



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 9 de junio de 2017

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Manuel Oswaldo Angulo Perez, con C.C. No. 1075244865,

Carlos Enrique Guzmán Rosero, con C.C. No. 1075259485,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_

titulado: Análisis y evaluación de rendimiento de los codificadores de voz G.729, AMR e iLBC sobre tecnología LTE-ADVANCED.

presentado y aprobado en el año 2017 como requisito para optar al título de

Ingeniero Electrónico;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

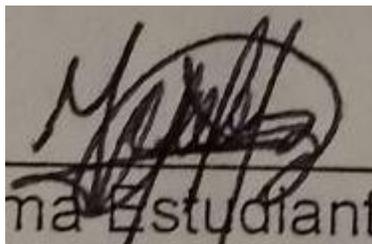
2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

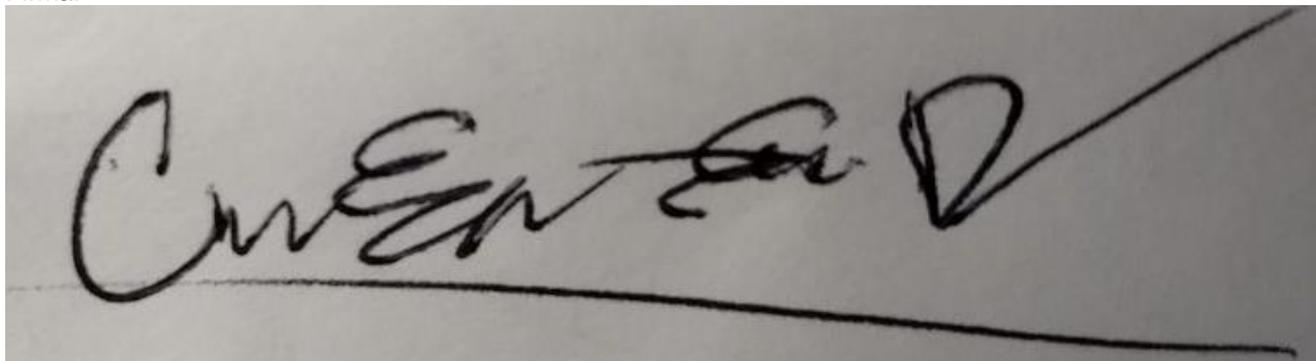
Firma:



na Estudiant

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:





DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>1 de 4</b>
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:**

Análisis y evaluación de rendimiento de los codificadores de voz G.729, AMR E iLBC sobre la tecnología LTE-ADVANCED

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Angulo Perez	Manuel Oswaldo
Guzmán Rosero	Carlos Enrique

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bravo Obando	Martin Diomedes

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Electrónico

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Electrónica

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2017

**NÚMERO DE PÁGINAS:**

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**

Diagramas  Fotografías  Grabaciones en discos  Ilustraciones en general  Grabados   
Láminas  Litografías  Mapas  Música impresa  Planos  Retratos  Sin ilustraciones   
Tablas o Cuadros

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO**

<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>2 de 4</b>
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento:

**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Codificadores de voz	codecs	6. _____	_____
2. ___OFDMA_____	OFDMA	7. _____	_____
3. _ LTE-A _____	LTE-A	8. _____	_____
4. Calidad del servicio de voz	quality of service	9. _____	_____
5. ___VoIP_____	___VoIP__	10. _____	_____

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

Este trabajo presenta un marco referencial después de un exhaustivo análisis de la calidad del servicio de voz con los estándares de codificación G.729, AMR e iLBC sobre la tecnología LTE-A (LTE-ADVANCED). La arquitectura que conforma la tecnología LTE-A haciendo un enfoque detallado en las características que conforma su interfaz OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal). Posteriormente se realizan las simulaciones de los escenarios mostrando así datos concretos del tráfico generado por un determinado número de usuarios. Por otro lado se realiza un algoritmo que lleve a cabo la extracción de los paquetes que se transmiten por los codificadores de voz según la información del tráfico en la red ofrecida por el simulador suministrado por la Universidad de Vienna. Por último se realizó las evaluaciones objetivas y subjetivas y se presentaron los resultados de la calidad del servicio de la voz sobre iP (VOiP) teniendo en cuenta las tablas que se obtuvieron de las pérdidas de paquetes.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>3 de 4</b>
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

this article present referential framework given by an exhaustive analysis of the quality of the service with respect to the G.729, AMR and iLBC coding standards on LTE-A (LTE-ADVANCED) technology. The architecture that forms the LTE-A technology, making a detailed focus on the characteristics that make up its OFDMA interface (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Simulations of the scenarios are then performed showing concrete data of the traffic generated by a certain number of users. On the other hand, an algorithm is performed that conduct extraction of the packets that are transmitted by the voice coders according to the traffic information in the network offered by the simulator. Finally, the objective and subjective evaluations were performed and the results of the voice service quality on iP (VOiP) were presented taking into account the packet loss tables.

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Jesús David Quintero

Firma:



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>4 de 4</b>
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

Nombre Jurado: Albeiro Cortes Cabezas

Firma:

FIRMA DEL JURADO

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE LOS  
CODIFICADORES DE VOZ G.729, AMR E iLBC SOBRE  
TECNOLOGÍA LTE-ADVANCED**

**MANUEL OSWALDO ANGULO PEREZ  
CARLOS ENRIQUE GUZMAN ROSERO**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA  
2017**

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE LOS  
CODIFICADORES DE VOZ G.729, AMR E iLBC SOBRE  
TECNOLOGÍA LTE-ADVANCED**

**MANUEL OSWALDO ANGULO PEREZ  
CARLOS ENRIQUE GUZMAN ROSERO**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**Director  
MARTIN DIOMEDES BRAVO OBANDO  
Ing. Ph.D.(c) en Teleinformática**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA  
2017**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Neiva, Junio 7 de 2017

Sabio no es aquel que dedica su vida a aprender, sino el que dedica su vida a enseñar.

*Albert Einstein*

## AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto no hubiese sido posible sin la ayuda de nuestro director **Martin Diomedes Bravo Obando**, él nos dio la oportunidad de encaminarnos en la parte investigativa, por su manera de educar en el aula, por ser la gran persona que es, y por preocuparse por el mejoramiento del programa.

A mis **padres**, a mi **hermana** y mi **cuñado**, por el apoyo que siempre me han brindado en mi vida. A mis **amigos** con los cuales compartí gran parte de mi vida universitaria. Y por último y mas importante a **Dios** por que él hace que todo en la vida sea posible.

*Manuel Angulo Perez*

De ante mano le agradezco a mis padres y mis hermanos por siempre apoyar cada uno de mis deseos y regalarme los consejos que en este momento definen la persona que soy.

A mis amigos de la infancia cada una se merece los agradecimientos por esta experiencia los que llegaron y los que ya no están.

A nuestro director de proyecto el ingeniero Martin Diomedes Bravo Obando por guiarnos en esta meta y por siempre compartir sus conocimientos.

*Carlos Enrique Guzmán Rosero*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 EVOLUCIÓN DE LOS ESTÁNDARES MÓVILES DE COMUNICACIONES	18
2.2 LONG TERM EVOLUTION (LTE)	19
2.2.1 OFDMA	19
2.2.2 Variaciones de potencia para OFDMA	21
2.2.3 Ventajas de OFDMA	21
2.2.4 SC-FDMA	22
2.2.5 Arquitectura de la red LTE	24
2.3 LONG TERM EVOLUTION ADVANCED (LTE-A)	27
2.3.1 Cuadrícula de Recursos	30
2.3.2 Estimación del canal	34
2.3.3 Sistemas MIMO	37
3. VOZ SOBRE EL PROTOCOLO DE INTERNET VoIP	39
3.1 Sistema de transporte VoIP	39
3.2 TRANSMISIÓN DISCONTINUA	40
3.3 CODIFICADORES DE VOZ	40
3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS CODIFICADORES G.729, AMR E iLBC	43
3.5 PÉRDIDA DE PAQUETES	43
3.5.1 Factores que afectan la transmisión de los paquetes	44
3.6 MÉTODOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL SERVICIO	45
3.6.1 CALIDAD DEL SERVICIO QOS	45
3.6.2 EVALUACIÓN OBJETIVA: PESQ(P.862)	45
3.6.3 EVALUACIÓN SUBJETIVA: MOS(P.800)	46
4. Simulador LTE-A	47
4.1 Simulador a Nivel de Enlace	47
4.2 Simulador a Nivel de Sistema	51
4.3 Escenarios del simulador	52
5. ANÁLISIS, RESULTADOS	55
5.1 SUMIMO	55
5.2 MUMIMO	57
5.3 Pérdida de Paquetes	59
5.4 EVALUACIÓN SUBJETIVA	61
5.5 EVALUACIÓN OBJETIVA	64
6. CONCLUSIONES	65
7. RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO	66
8. BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	70

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Parámetros en LTE-A	Pág. 28
Tabla 2.	Parámetros para cada frecuencia	29
Tabla 3.	Parámetros de Simulación (SUMIMO)	55
Tabla 4.	Parámetros de Simulación (MUMIMO)	57

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evolución de los estándares	18
Figura 2. Comparación entre OFDM y OFDMA	20
Figura 3. Diagrama de bloques de la transmisión y recepción OFDMA	20
Figura 4. Comparación entre OFDMA y SC-FDMA	23
Figura 5. Diagrama de bloques de la transmisión y recepción SC-FDMA	23
Figura 6. Arquitectura de la red	24
Figura 7. Arquitectura del equipo de usuario (UE) Lte	25
Figura 8. Arquitectura de la red de acceso radio en LTE	25
Figura 9. Arquitectura del EPC	26
Figura 10. Cuadrícula de recursos de enlace Ascendente y Descendente	31
Figura 11. Parámetros de los bloques de recursos Ascendente	32
Figura 12. Parámetros de los bloques de recursos Descendente	33
Figura 13. Trama	33
Figura 14. Modo FDD	35
Figura 15. Trama FDD	35
Figura 16. Modo TDD	36
Figura 17. Trama TDD	37
Figura 18. Esquema SU-MIMO	38
Figura 19. Esquema MU-MIMO	38
Figura 20. Diagrama de bloques de un sistema de codificación utilizando VAD.	41
Figura 21. Características de los codificadores de voz G.729, AMR e iLBC	43
Figura 22. Diagrama de bloques del algoritmo PESQ.	46
Figura 23. Estructura del simulador a nivel de enlace.	48
Figura 24. Estructura del transmisor	49
Figura 25. Estructura del receptor	50
Figura 26. Diagrama esquemático en bloque del simulador a nivel del sistema	52
Figura 27. Tipos de simulación	53
Figura 28. BLER VS SNR (SUMIMO)	56
Figura 29. Rendimiento VS SNR (SUMIMO)	56
Figura 30. BLER VS SNR (MUMIMO)	58
Figura 31. Rendimiento VS SNR (MUMIMO)	58
Figura 32. Tasa de tramas para los audios de los codificadores G.729, AMR e iLBC.	59
Figura 33. Tablas de resultados de la pérdida de paquetes	59
Figura 34. Resultados evaluación subjetiva (MOS)	62
Figura 35. PROMEDIO PESQ	64

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Código implementado para codificación de voz para el G.729, AMR e iLBC y generación de pérdida de paquetes	70

## ACRÓNIMOS

**3GPP:** 3rd Generation Partnership Project.

**AMPS:** Advanced Mobile Phone System.

**AMR:** Adaptive Multi-Rate.

**CDMA:** Code Division Multiple Access.

**DFT:** Discrete Fourier Transform.

**CNG:** Comfort Noise Generator

**EDGE:** Enhanced Data for Global Evolution.

**eNB:** evolved NodeB.

**EPC:** Evolved Packet Core.

**E-UTRAN:** Evolved UMTS Radio Access Network.

**FDD:** Frequency Division Duplex.

**FDMA:** Frequency Division Multiple Access.

**FFT:** Fast Fourier Transform.

**GIPS:** Global IP Sound.

**GPRS:** General Packet Radio System.

**GSM:** Global System for Mobile Communications.

**HSCSD:** High Speed Circuit Switched Data.

**HSS:** Home Subscriber Server.

**IETF:** Internet Engineering Task Force.

**IFFT:** Inverse Fast Fourier Transform.

**iLBC:** Internet Low Bitrate Codec

**ISI:** Intersymbol Interference.

**ITU-T:** International Telecommunication Union.

**LTE:** Long Term Evolution.

**LTE-A:** Long Term Evolution Advanced.

**ME:** Mobile Equipment.

**MIMO:** Multiple-input Multiple-output.

**MME:** Mobile Management Entity.

**MOS:** Mean Opinion Score.

**MT:** Mobile Termination.

**NPA:** Number Packet Audio.

**OFDMA:** Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

**PAPR:** Peak to Average Power Ratio.

**PER:** Packet Error Rate.

**PESQ:** Perceptual Evaluation of Speech Quality.

**P-GW:** Packet Data Network Gateway.

**QAM:** Quadrature Amplitude Modulation.

**QoS:** Quality of Service.

**QPSK:** Quadrature Phase-Shift Keying.

**RE:** Resource Element.

**RNC:** Radio Network Controller.

**SC-FDMA:** Single Carrier Frequency Division Multiple Access.

**SID:** Silence Insertion Descriptor

**SIM:** Subscriber Identity Module

**SMS:** Short Message Service.

**SNR:** Signal-to-Noise Ratio.

**S-WG:** Serving Gateway

**TDD:** Time Division Duplex.

**TDMA:** Time Division Multiple Access.

**TE:** Terminal Equipment.

**UICC:** Universal Integrated Circuit Card.

**UE:** User Equipment

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System.

**VoIP:** Voice over Internet Protocol.

## RESUMEN

El servicio de voz sobre iP (VOiP) demanda una serie limitada de recursos de red como son el canal de señalización y el canal de control además del canal de flujo de datos con el fin de garantizar la calidad del servicio de manera eficiente a los usuarios finales. Las características que ofrece las redes LTE-A son más que suficientes para asegurar una calidad del servicio óptima. Esta arquitectura ofrece altas velocidades de acceso y reduce el retraso en la transmisión de los paquetes, entre otras. De acuerdo a lo anterior el objetivo de este proyecto de grado es el de evaluar la calidad del servicio de voz, siguiendo los estándares de codificación G.729, AMR e iLBC y contribuir en la construcción de una referencia para la toma de decisión en cuanto a calidad del servicio de voz. Para conseguir el objetivo se realizó un análisis de las características más representativas de cada codificador y se identificó los parámetros que tenían impacto a nivel de red y que se debían garantizar para la prestación del servicio de VOiP. Además se utilizó el simulador LTE-A Link Level de la universidad de Vienna para simular los escenarios del tráfico de datos, cada uno con un determinado número de usuarios usando el modelo de red LTE-A. Finalmente se presentan los datos evaluados de cada codificador con su modelo objetivo y subjetivo, para seleccionar el codificador que brinde los resultados óptimos en la calidad del servicio teniendo en cuenta los resultados y tablas de pérdida de paquetes y las gráficas representativas de MOS (“Mean Opinion Score”) y PESQ (“Perceptual Evaluation of Speech Quality”).

### **PALABRAS CLAVE:**

VOiP, MOS, LTE-A, G.729, iLBC, AMR, Calidad del servicio.

## **ABSTRACT**

Voice over ip (VoIP) service demand a limit set of network resources such as a signaling channel and a control channel also data flow channel to guarantee a efficient way of quality of service to the end users. the features offered by LTE-A networks are more than enough to assure Optimal quality of service. this architecture offers high speed access and reduced delay among others. according to the last, the goal of this graduation project is to make a performance of quality of service of voice codecs following the codecs standars G.729, AMR and ILBC and contribute to the construction of a reference for the decision making regarding the quality of the voice service .to achieve the goal,an analysis of more representative characteristics of each encoder was carried out and the parameters that had impact at the network level and that were to be guaranteed for the provision of the VOiP service. additionally, a simulation of generated traffic on each scenery for a determinated number of users for LTE-A network model, was carried out. finally there was presented data evaluated in each codec with objective and subjective model to select the codec that achieve the optimal results in the quality of the service taking into account the results and tables of loss of packages and the representative graphs of MOS and PESQ.

## **KEYWORDS:**

VOiP, MOS, LTE-A, G.729, ILBC, AMR, Quality of service.

## INTRODUCCIÓN

Según la RAE un codificador transforma mediante reglas la información de un mensaje esto quiere decir que haciendo uso de normas que se deben respetar, cambia la información de un mensaje determinado; teniendo claro este termino el primer sistema binario de comunicación (mensajes de texto que hacia uso de señales eléctricas) y lenguaje de codificación de letras y números fue creado por Samuel Morse junto con Alfred Vail en el año de 1838. utilizando puntos y rayas el telégrafo codifica el mensaje automáticamente y lo enviaba mediante largas extensiones de cable. Luego se dio inicio a la comunicación moderna gracias a Harry Nyquist quien formulo la ecuación para medir la razón de transmisión de la señal en bauds o Hertz. Es decir la máxima tasa de señalización que se puede tener sobre un canal de comunicación de ancho de banda limitado sin presentar interferencia intersímbolo. Esta razón es igual a  $2B$  simbolos por segundo, donde  $B$  es el ancho de banda del canal de transmisión. La máxima capacidad de transmisión debe ser dos veces el ancho de banda del canal pero representado en simbolos o (señales). Estas investigaciones sirvieron de base para que Claude Shannon realizara y estableciera en 1948 los fundamentos matemáticos para la teoría de la información, la teoría llamada teorema de capacidad de Shannon que dio inicio a los sistemas de comunicaciones digitales que se usan hoy en día.<sup>1</sup>

Estos sistemas realizan la codificación transformando la voz (una señal analógica) a su forma digital, en este proceso de digitalización de la señal se emplea el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon el cual describe el proceso de tomar muestras periódicas de una señal cada  $T$  segundos, esta se discretiza con la condición que la señal este limitada en banda y la tasa de muestreo sea mayor al doble de su ancho de banda para luego hacer la cuantización dándole valores discretos a cada uno de los niveles de tensión obtenidos en el muestreo. Es necesario darle valores numéricos para su posterior empaquetamiento y transmisión utilizando los codecs (codificador/decodificador) y la señal muestreada debe tener una tasa de 8000 muestras por segundo traducido a frecuencia el valor es de 8kHz, El cual es posible transmitir hasta 4kHz que sería bastante para el canal telefónico de voz donde su frecuencia máxima transmitida es de 3.4 kHz.<sup>2</sup>

Los codificadores de voz G.729, AMR e iLBC deben reducir el tamaño del ancho de banda utilizado, esto quiere decir que se debe minimizar la transmisión de la tasa binaria(bits) aunque esto repercute también en la calidad del sonido. Para ello cada codificador que se ha diseñado tiene sus propias características como detección de actividad de voz (VAD), codificación mediante la predicción lineal excitado por código (ACELP), entre otros.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> "Teoría de comunicaciones".Universidad Arturo Prat, Depto. física y matemáticas. 2004.

<sup>2</sup>P Montenegro, V Mora "Análisis y evaluación para la selección de codecs de VOiP ".Universidad de Azuay, escuela de ingeniería de sistemas. 2007.

<sup>3</sup>P Montenegro, V Mora "Análisis y evaluación para la selección de codecs de VOiP ".Universidad de Azuay, escuela de ingeniería de sistemas. 2007.

UMTS (“Universal Mobile Telecommunications System”) es una tecnología usada para los dispositivos móviles de tercera generación se basa en tres importantes características que son servicios multimedia, velocidad de acceso a Internet alta y transmisión de voz con calidad equiparable a la de las redes fijas. Debido al aumento de uso de datos móviles y la aparición de nuevas aplicaciones hizo que UMTS viera la necesidad de impulsar el desarrollo de LTE basada en OFDMA, para el enlace descendente DL (“DownLoad”) y SC-FDMA para el enlace ascendente UL (“UpLoad”). Luego en una versión mejorada conocida como LTE-Advanced capaz de ofrecer altas capacidades de transmisión con anchos de banda de hasta 100 MHz, que se obtienen gracias a una característica de esta tecnología conocida como agregación de portadoras; donde se agregan cinco portadoras de 20 MHz, para obtener un ancho de banda de transmisión de hasta 100 MHz.

De esta manera, este trabajo se enfoco en evaluar el rendimiento de los codificadores de voz G.729, AMR e iLBC sobre la tecnología LTE-A. Por esta razón se estudio un elemento muy importante en la comunicación que son los codecs de voz con los cuales se realiza la transmisión de un conjunto de muestras digitales por la red de paquetes. Por medio de esta investigación se pretende obtener mayores beneficios sobre la tecnología de cuarta generación LTE-A; mediante una adecuada elección de codificador de voz, según el ancho de banda y la calidad que se requiera.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el rendimiento de los codificadores de voz G.729, AMR e iLBC sobre la tecnología LTE-A.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los distintos estándares de codificación de voz en redes LTE-A.
- Apropiar conceptos sobre los factores que afectan el rendimiento de VoIP en redes LTE-A.
- Elaborar la configuración del simulador LTE-A link level suministrado por la universidad tecnológica de Vienna.
- Adecuar los codificadores según estándares internacionales como la ITU-T, 3GPP para la transmisión del servicio de voz.
- Utilizar las recomendaciones de evaluación de voz, de tipo objetivas y subjetivas con el fin de analizar y evaluar el rendimiento de los codificadores G.729 (ITU-T), AMR (3GPP) e iLBC (IETF) configurados sobre LTE-A.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 EVOLUCIÓN DE LOS ESTÁNDARES MÓVILES DE COMUNICACIONES

**Primera Generación (1G):** Fue creada estrictamente para voz y era analógica, se basaba en el Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), tenía baja velocidad (2400 bauds) y no era segura. La tecnología de esta generación es el Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS).

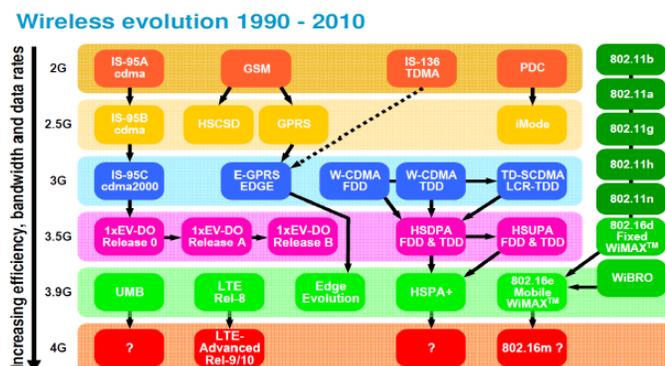
**Segunda Generación (2G):** Ya es digital, utiliza protocolos de codificación más sofisticados que son utilizados en los dispositivos móviles actualmente, las tecnologías que predominaron fueron el Sistema global para las Ócomunicaciones móviles (GSM) y el Acceso Múltiple por División de Código (CDMA). En esta generación las velocidades de información de voz es alta, pero es limitada para datos; se ofrece servicios como fax, datos y el Servicio de mensajes cortos (SMS).

**Generación (2.5G):** Es más rápida y más económica para actualizar a 3G, ofrece servicios como el Servicio General de Paquetes Vía Radio (GPRS), Datos por conmutación de circuitos de alta velocidad (HSCSD), tasas de datos mejoradas para la evolución del GSM (EDGE).

**Tercera Generación (3G):** convergencia de voz y datos con acceso a internet, trabaja con altas transmisiones de datos y servicios multimedia como por ejemplo voz con audio (MP3), vídeo en movimiento, vídeo conferencia entre otros.<sup>4</sup>

En la imagen se mostrara una breve síntesis de la evolución de los estándares de las generaciones de telefonía inalámbrica:

Figura 1. Evolución de los estándares



Fuente: SEMINARIO: LTE (Long Term Evolution). “Capa Física y Planificación en LTE”. (May. 2013). Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.

<sup>4</sup>Cox, Christopher. “AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS”. En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

En la Figura 1, se ve el mejoramiento de la eficiencia, el ancho de banda y la tasa de transferencia de datos, de acuerdo al cambio de tecnología o generación, teniendo en cuenta las características principales explicadas anteriormente.

## 2.2 LONG TERM EVOLUTION (LTE)

Las especificaciones de LTE fueron elaboradas por 3GPP, release 8, 2008. Como sucesora del Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS). Se creó con el fin de superar a las otras tecnologías en velocidad de transmisión, capacidad, eficiencia y movilidad, está basada en el Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA), el tipo de modulación que se trabajan son Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), Modulación de amplitud en cuadratura (16QAM o 64 QAM) y un ancho de banda no superior a 20 Mhz, teniendo en cuenta que los ancho de banda nominales son 1.4, 3.5, 10, 15 o 20 MHz con un intervalo de tiempo de transmisión de 1 ms. Con una tasa de datos máxima transportada por canal a 75Mbps en enlace de subida y en enlace de bajada, usando Multiplexación espacial esta tasa puede llegar a los 300Mbps.<sup>5</sup>

LTE utiliza OFDMA y el Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA) para hacer el enlace de comunicación del dispositivo móvil con la estación base, donde OFDMA se utiliza para el enlace descendente y SC-FDMA en el enlace ascendente respectivamente.

### 2.2.1 OFDMA

En la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) el ancho de banda se divide en múltiples subportadoras, donde cada subportadora puede ser modulada independientemente separadas a una frecuencia de 15KHz. La transmisión de múltiples subportadoras se hace en paralelo, es posible que cada una transmita a una tasa de símbolo baja ayudando a que la tecnología tenga mayor robustez ante las interferencias.

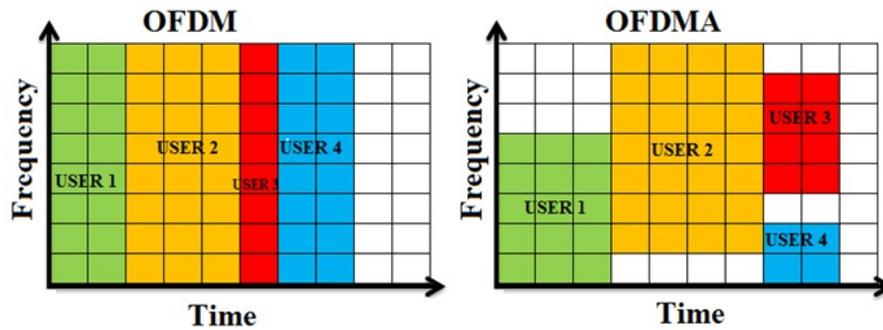
OFDMA es la versión multiusuario de OFDM, es semejante a CDMA porque su tecnología trabaja con espectro separado; se usa para que un grupo de usuarios compartan el espectro de un canal determinado en aplicaciones de baja velocidad. Para que se cumpla el acceso múltiple se debe dividir el canal en un conjunto de subportadoras de acuerdo a la necesidad de cada usuario, esto garantiza una calidad diferente de servicio (QoS) en función del ancho de banda asignado. A cada usuario se le asigna una velocidad de conexión y se puede determinar una probabilidad de error individual.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup>3GPP TS 36.213. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures V8.2.0 (Mar. 2008).

<sup>6</sup>Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

Figura 2. Comparación entre OFDM y OFDMA

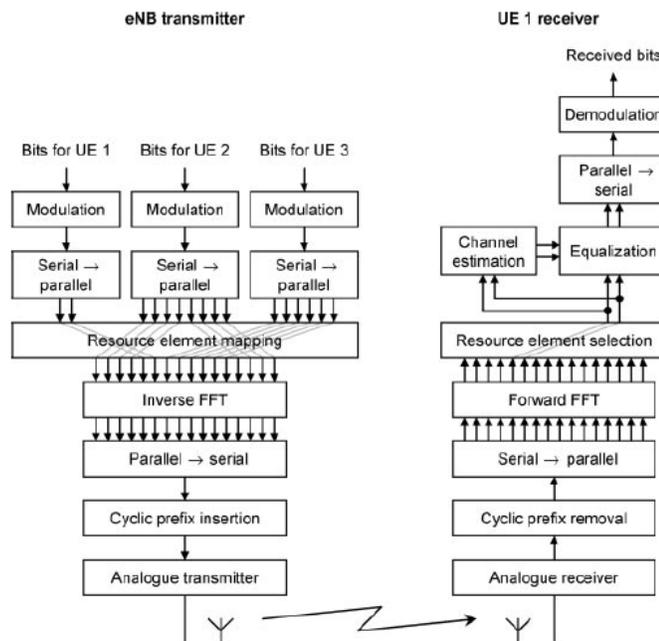


Fuente: Difference Between. En: <http://www.differencebetween.com/difference-between-ofdm-and-vs-ofdma>. 31 de Jul. 2014

Como se puede ver en la Figura 2. OFDM está basada solamente en el Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), en cambio OFDMA puede ser basada en TDMA y FDMA o las dos al mismo tiempo.

OFDMA soporta la transmisión a baja velocidad de datos simultánea un grupo de usuarios, mientras que OFDM solo puede asignar los recursos a un usuario en un determinado tiempo.

Figura 3. Diagrama de bloques de la transmisión y recepción OFDMA



Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

La estación base envía flujo de datos para tres dispositivos móviles, se modula cada flujo de datos de manera independiente posiblemente usando un tipo de modulación para cada uno. Luego cada flujo de datos pasa por un convertidor serie paralelo para dividirlo en sub-streams, el número de sub-streams por móvil depende de la velocidad de datos. El elemento de recursos coge los sub-streams individuales y elige la subportadora por la cual se va a transmitir, la subportadora de un móvil puede estar en un bloque contiguo como en el caso de los móviles 1 y 3 o pueden ser divididos como en el móvil 2. La información resultante es la amplitud y la fase de cada subportadora en función de la frecuencia, el bloque de prefijo cíclico es para reducir la interferencia entre símbolos (ISI), se pasa por la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) donde se calcula los componentes de fase y cuadratura de la forma de onda en el dominio del tiempo para poder ser transmitida.

En el receptor se invierte el proceso, se inicia mediante el muestreo de la señal, se filtra, se elimina el prefijo cíclico y se pasan los datos por a través de una FFT directa para recuperar la amplitud y la fase de cada subportadora, teniendo en cuenta que el receptor procesa la señal recibida dentro de una ventana cuya longitud es igual a la duración de símbolo, y descarta el resto. Si la ventana se coloca correctamente entonces la señal recibida es exactamente lo que se transmite sin ningún tipo de interferencia, sin embargo el receptor puede compensarlas usando técnicas de estimación del canal móvil e igualación.<sup>7</sup>

### 2.2.2 Variaciones de potencia para OFDMA

OFDMA funciona bien en el enlace descendente, pero tiene un inconveniente la potencia de la señal transmitida está sujeta a variaciones. Las variaciones de potencia pueden provocar problemas al amplificador de potencia del transmisor. Si el amplificador es lineal, la potencia de salida es proporcional a la de la entrada por lo tanto la forma de onda de salida es exactamente la requerida. Pero si el amplificador no es lineal, la potencia de salida ya no es proporcional a la de la entrada, entonces la forma de onda de salida esta distorsionada. Cualquier distorsión en la forma de onda en el dominio del tiempo, distorsionará el espectro de potencia en el dominio de la frecuencia, así que la señal producirá pérdidas en las bandas de frecuencias adyacentes y causarán interferencia a otros receptores.

### 2.2.3 Ventajas de OFDMA

Las ventajas de OFDMA son:

**Diversidad multiusuario:** La asignación de subportadoras a usuarios se hace de manera dinámica, teniendo cambios en períodos cortos de tiempo. En el canal se presentarán desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras y estos desvanecimientos son independientes para cada usuario; donde se puede seleccionar para cada subportadora el usuario que tenga el mejor estado del canal ósea que perciba

---

<sup>7</sup>Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

la mejor SNR, esto significa que se aprovechara la banda disponible para obtener una mayor velocidad de transmisión (una mayor eficiencia espectral).

**Diversidad frecuencial:** Se asigna a un mismo usuario subportadoras no contiguas, separadas para que el estado del canal sea independiente, haciendo que exista una diversidad frecuencial en la transmisión.

**Robustez frente al multitrayecto:** Con la ayuda del prefijo cíclico OFDMA es robusta frente a la interferencia entre símbolos (ISI).

**Elevada granularidad en los recursos asignables:** Al subdividir la banda en muchas subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a cada usuario; se obtiene una elevada granularidad al asignar los recursos necesarios a cada uno, garantizando una diferente calidad de servicio (QoS).

**Flexibilidad de las bandas asignadas:** Se puede asignar de manera sencilla las velocidades de transmisión a cada usuario de acuerdo a la necesidad.

**Sencillez de implementación en dominio digital:** Se hace una agrupación de  $N$  números complejos, uno por cada canal, donde a cada bloque se le realiza una transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) y se transmite la señal resultante. En el receptor se realiza una transformada rápida de Fourier para recuperar los datos originales.

#### 2.2.4 SC-FDMA

Su transmisión es muy similar a la de OFDMA, lo que cambia es que se realiza una precodificación utilizando la transformada discreta de Fourier (DFT), que hace reducir las variaciones de la potencia instantánea. En OFDMA se transmite un símbolo en cada subportadora durante un periodo de símbolo completo en cambio SC-FDMA se transmite un símbolo en todas las subportadoras disponibles.

Al hacer la precodificación se tiene una gran ventaja con respecto a OFDMA por la reducción del factor cresta o PAPR, que es la que mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media esto es debido a la portadora única; las señales con un valor de PAPR muy grande requieren amplificadores de potencia altamente lineales para evitar la distorsión asociada a la intermodulación. En el caso OFDMA el PAPR se incrementa al incrementar el número de subportadoras utilizadas. Por lo tanto SC-FDMA es adecuada para los dispositivos móviles ya que poseen un bajo consumo energético<sup>8</sup>.

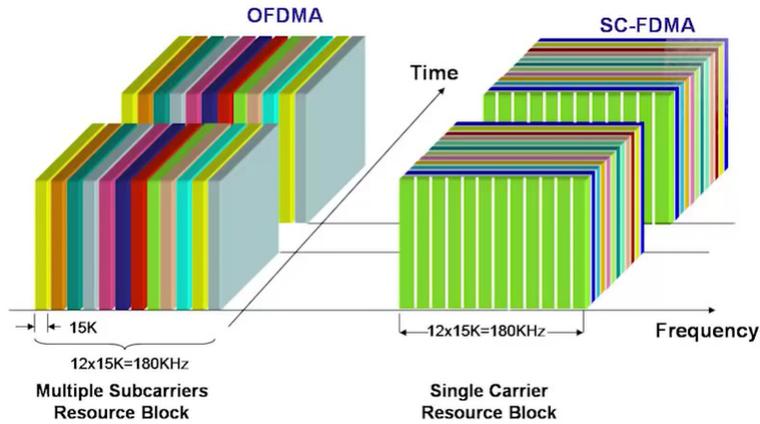
En la Figura 4, OFDMA se divide en un gran número de subportadoras moduladas con un pequeño ancho de banda 15KHz y ortogonales entre sí, donde el número de subportadoras disponibles son 12. En SC-FDMA la separación de subportadoras también es de 15KHz agrupadas en bloque de 12 subportadoras cada uno, donde los

---

<sup>8</sup>Agusti Ramón, Bernardo Francisco, Casadevall Fernando, Ferrús Ramon, Romero Pérez Jordi, Sallent Oriol. "LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES".Universitat Politècnica de Catalunya. En: Fundación Vodafone España. Copyright, (2010).

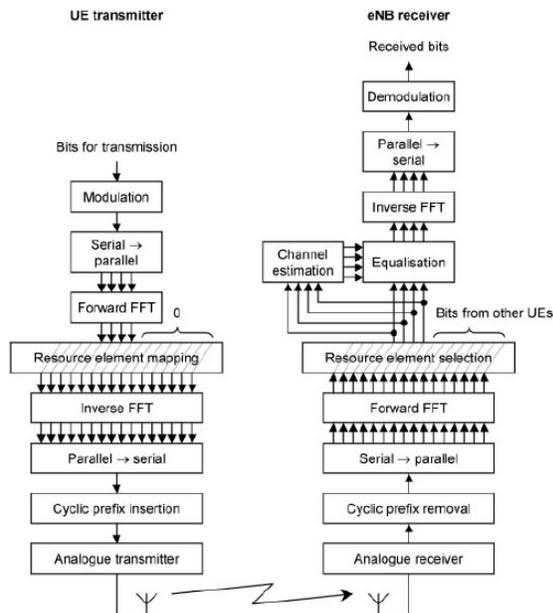
bloques se asignan según la necesidad de los usuarios, las subportadoras asignadas a un usuario deben ser contiguas.

Figura 4. Comparación entre OFDMA y SC-FDMA



Fuente: Shapira, Yair. "SC-FDMA vs. OFDMA". (1 de May. 2012). 2:25 minutos.

Figura 5. Diagrama de bloques de la transmisión y recepción SC-FDMA



Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012)..

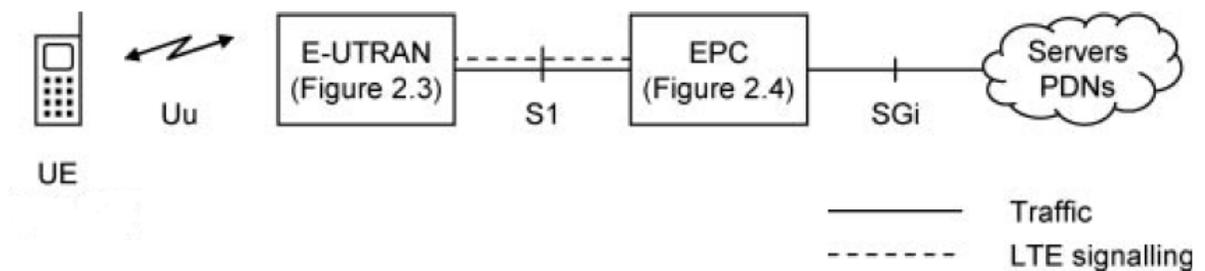
En este diagrama hay tres diferencias con respecto a la OFDMA, la principal es la transformada rápida de Fourier (FFT) directa en el transmisor haciendo reducir las variaciones de potencia y se invierte por una transformada rápida de Fourier inversa (IFFT), la segunda diferencia es porque se realiza en el enlace ascendente, debido a esto el móvil sólo utiliza algunas de las subportadoras colocando las otras en cero, y quedan disponibles para los otros móviles de la celda. Por ultimo cada móvil utiliza un único bloque contiguo de subportadoras.

Los tres pasos claves en la transmisión de SC-FDMA son la FFT directa, el elemento de recursos y la IFFT. A la FFT llega una secuencia de símbolos en el dominio del tiempo, donde la FFT directa convierte estos símbolos al dominio de la frecuencia, el elemento de recursos los desplaza y la IFFT los convierte al dominio del tiempo.

### 2.2.5 Arquitectura de la red LTE

La arquitectura está compuesta por tres elementos principales que son: User Equipment, E-UTRAN y EPC, donde el EPC se comunica con redes de paquetes de datos del mundo exterior. Las interfaces entre las diferentes partes del sistema se denominan Uu, S1 y SGI.

Figura 6. Arquitectura de la red



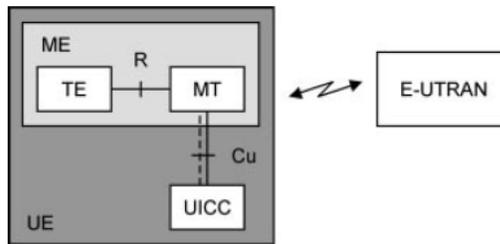
Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

**Equipo de usuario (UE):** es el dispositivo por el cual el usuario puede acceder y tener disponibilidad de los servicios que nos ofrece la red. El dispositivo debe llevar una tarjeta inteligente llamada Tarjeta de circuito integrado universal (UICC) que popularmente se le conoce como SIM, que realiza un almacenamiento de identificación del usuario y es necesaria para permitir la conexión de la red y hacer uso de sus servicios.

El dispositivo estrictamente hablando se denomina equipo móvil (ME) ya sea un teléfono normal o un Smartphone, él equipo terminal (TE) sería un portátil y la Terminación Móvil (MT) sería la tarjeta LTE responsable de las funciones de comunicación.<sup>9</sup>

<sup>9</sup>Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE

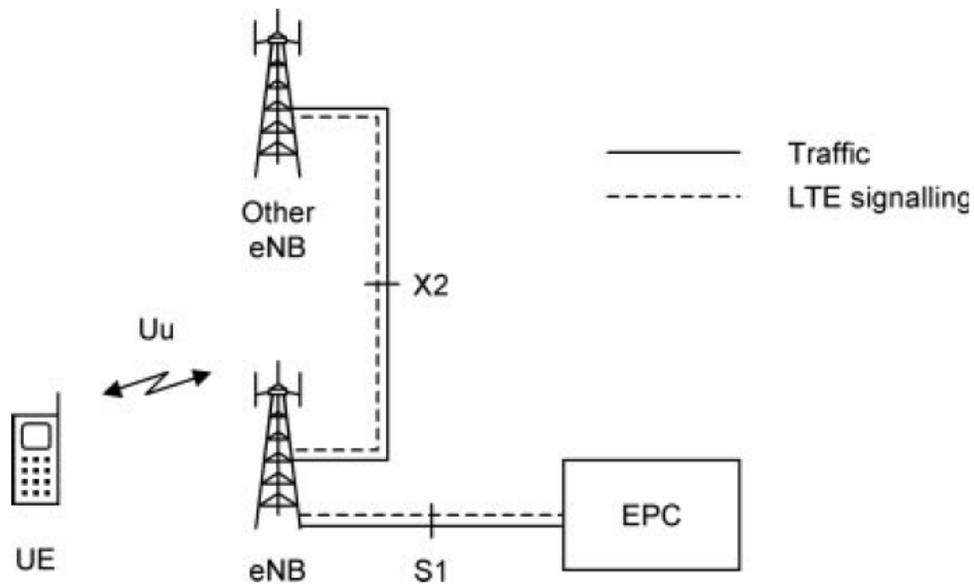
Figura 7. Arquitectura del equipo de usuario (UE) Lte



Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012)..

**Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionado (E-UTRAN):** Es la responsable de realizar la comunicación transmisión radio con los dispositivos móviles para proporcionar la conectividad necesaria entre los usuarios y los equipos de la red troncal.

Figura 8. Arquitectura de la red de acceso radio en LTE



Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

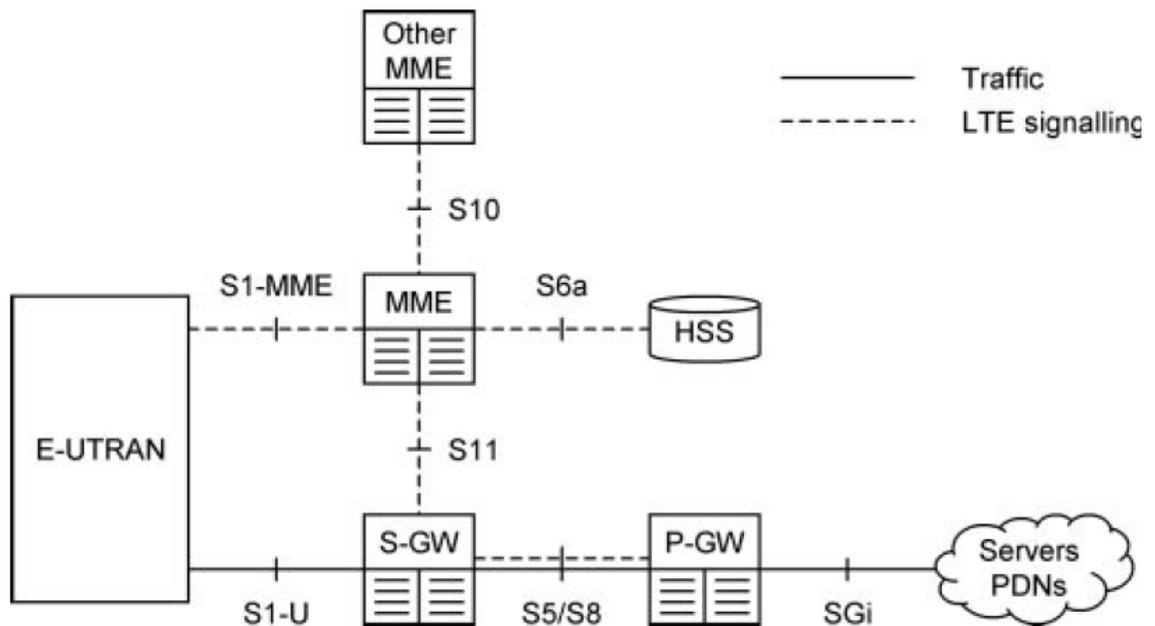
Dispone de eNB que es la estación base, el eNB cumple la función del NodeB y el Controlador de la Red Radio (RNC) en UTRAN, es decir recibiendo y enviando señales en el DL y UL. Las estaciones bases están conectadas al EPC mediante la interfaz S1

COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

y las adyacentes están conectadas entre sí mediante la interfaz X2 para posibilitar el handover. (Ver en figura 8)

**Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC):** Se encarga del control de acceso a la red celular, gestión de movilidad de los usuarios, gestión de las sesiones de datos. (Ver en figura 9)

Figura 9. Arquitectura del EPC



Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

HSS: Contiene la información de los usuarios.

P-GW: Es la puerta de unión con las redes externas como internet.

S-WG: Trabaja como router y envía los paquetes de datos entre el eNB y el P-GW.

MME: Controla las operaciones de los usuarios, enviando mensajes de señalización.<sup>10</sup>

<sup>10</sup>Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

### 2.3 LONG TERM EVOLUTION ADVANCED (LTE-A)

Las especificaciones de LTE-A fueron elaboradas por la 3GPP, release 10, 2009. LTE-A es la 4 generación de la tecnología de comunicaciones móviles donde pretende dar una mayor tasa de velocidad de transmisión para enlace de bajada de 3 Gbit/s y de 1.5 Gbit/s para enlace de subida considerando una canalización de 20 MHz como también haciendo mejoras con respecto al release 8. De la eficiencia espectral de un máximo de 16 bps/Hz en release 8 a 30 bps/Hz en release 10 además de mejoras en el rendimiento de los bordes de las células por ejemplo para enlace de bajada 2X2 MIMO (Multiple Input Multiple Output) al menos de 2.40 bps/Hz/cell. Esto hace que se tengan que satisfacer la alta demanda y expectativa del usuario para proporcionar una alta calidad de servicio cada vez con más velocidades de transmisión y pequeños índices de latencia haciendo una navegación más fluida.

La agregación de portadoras se realiza para aumentar la velocidad de transmisión, con el fin de incrementar la capacidad del ancho de banda donde puede ser utilizado tanto FDD y TDD. Debido al ancho de banda adaptativo que puede ser de 1.4, 3.5, 10, 15 o 20 MHz con un máximo de 5 portadoras es por esto que el ancho de banda máximo es de 100 MHz, sin embargo el número de portadoras agregadas al enlace de bajada puede ser diferente para el enlace de subida. El número de portadoras para enlace de subida nunca será mayor que en el enlace de bajada.

MIMO hace la utilización de 2 o más antenas de recepción y transmisión, aumenta la tasa de bits con el uso de diferentes señales de referencia tanto en frecuencia como en el tiempo. En LTE-A se utiliza MIMO 8X8 en enlace de bajada Y 4x4 en enlace de subida. El uso de esta técnica es preferible cuando se tiene una SNR alta, si esta es baja se recomienda el uso de otras técnicas multi-antenas como la diversidad de transmisión. La importancia de los nodos de retransmisión es fuertemente marcada por su aplicación en redes heterogéneas ya que proporciona una mayor cobertura y capacidad en los bordes de la célula como también la característica para conectarse en zonas remotas sin conexión de fibra.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup>3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic, 2010).

Tabla 1. Parámetros en LTE-A

Subtrama	1 ms
Tiempo de Slot	0.5 ms
Símbolos	7
Periodo útil del símbolo (Tu)	2048
Subportadoras	12 o 24
Frecuencia de cada subportadora	15 o 7.5 (KHZ)
Ancho de banda	$12*15= 24*7.5=180\text{KHZ}$
Trama en LTE	10 ms o 10 subtramas 20 slots
Bloque de recursos	$12*7=84 \text{ RE}^*$
Tipo de Modulación	PQSK, 16QAM, 64QAM

Fuente: Autores

El tiempo de slot es la mitad de la subtrama que es utilizado en FDD y TDD.<sup>12</sup>

Los prefijos cíclicos son los símbolos enviados en un tiempo de slot, que permite eliminar la interferencia entre símbolos, ya sea normal o extendido como lo podemos ver en la figura 11 para el enlace ascendente y 12 para el descendente; en LTE el más utilizado es el normal.<sup>13</sup>

Todos los símbolos tienen un periodo útil  $T_u = 2048$  para mantener la ortogonalidad de las subportadoras.<sup>14</sup>

\*Un Elemento de recurso (RE) es una subportadora modulada con niveles M, donde (M=4, 16, 64) según sea su tipo de Modulación (PQSK, 16QAM, 64QAM) en el tiempo de un símbolo.

<sup>12</sup>3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic, 2010).

<sup>13</sup>Agusti Ramón, Bernardo Francisco, Casadevall Fernando, Ferrús Ramon, Romero Pérez Jordi, Sallent Oriol. "LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES".Universitat Politècnica de Catalunya. En: Fundación Vodafone España. Copyright, (2010).

<sup>14</sup>Fuente: SEMINARIO: LTE (Long Term Evolution). "Capa Física y Planificación en LTE". (May. 2013). Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.

## Tipos de Modulación

QPSK: Los datos que se van transmitir se dividen en pares de bits consecutivos llamados Dibits, codificando cada bit como un cambio de fase con respecto al elemento de la señal anterior.

QAM: consiste en modular por desplazamiento en amplitud (ASK) de forma independiente, dos señales portadoras que tienen la misma frecuencia pero que están desfasadas entre sí  $90^\circ$ . La señal modulada QAM es el resultado de sumar ambas señales ASK.

Es posible la elección de QPSK, 16 QAM o 64 QAM con 2, 4 o 6 bits por símbolo (4,16 o 64 niveles), QPSK es más resistente al ruido e interferencia, pero proporciona tasas binarias bajas. Lo contrario ocurre con 64 QAM que ofrece tasas altas, pero requiere un canal radio con elevada SINR (Signal to Interference and Noise Ratio).<sup>15</sup>

Tabla 2. Parámetros para cada frecuencia

Anchura de banda nominal (MHZ)	1,4	3	5	10	15	20
Anchura de banda ocupada Transmisión (MHZ)	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Número de RB	6	15	25	50	75	100
Número de Subportadoras	72	180	300	600	900	1200
Frecuencia de Muestreo (MHZ)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Fuente: SEMINARIO: LTE (Long Term Evolution). “Capa Física y Planificación en LTE”. (May. 2013). Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.

Los anchos de bandas nominales en LTE-A son: 1,4 MHz; 3 MHz; 5 MHz; 10 MHz; 15 MHz; 20 MHz. A cada ancho de banda nominal se le saca el 10 por ciento que es utilizado para guardar la banda y el restante es el ancho de banda ocupado.<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup>Fuente: SEMINARIO: LTE (Long Term Evolution). “Capa Física y Planificación en LTE”. (May. 2013). Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.

<sup>16</sup>3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic, 2010).

Una subportadora es una señal separada, analógica o digital, que contiene una Transmisión de radio principal, que lleva información adicional, como voz o datos.

La frecuencia de muestre se refiere al número de veces por segundo que cambia el nivel de una señal digital.<sup>17</sup>

### 2.3.1 Cuadrícula de Recursos

Cada ancho de banda nominal en LTE-A tiene asignado un bloque de recursos (RB) como se ilustra en la tabla 2, que es calculado así:

$$R_B = BBT/180KHZ$$

$BBT$ : Anchura de banda ocupada de Transmisión (MHZ).

Ese valor asignado de RB, es utilizado para el enlace ascendente y descendente.

Enlace Ascendente:

$$N_{R_B}^{min,U_L} \leq N_{R_B}^{U_L} \leq N_{R_B}^{max,U_L}$$

$N_{R_B}^{U_L}$ : Número de bloque de recursos para el enlace ascendente.

$N_{R_B}^{min,U_L}$ : Número de bloque de recursos mínimo para el enlace ascendente.

$N_{R_B}^{max,U_L}$ : Número de bloque de recursos máximo para el enlace ascendente.

Enlace Descendente:

$$N_{R_B}^{min,D_L} \leq N_{R_B}^{D_L} \leq N_{R_B}^{max,D_L}$$

$N_{R_B}^{D_L}$ : Número de bloque de recursos para el enlace descendente.

$N_{R_B}^{min,D_L}$ : Número de bloque de recursos mínimo para el enlace descendente.

$N_{R_B}^{max,D_L}$ : Número de bloque de recursos máximo para el enlace descendente.

Donde:

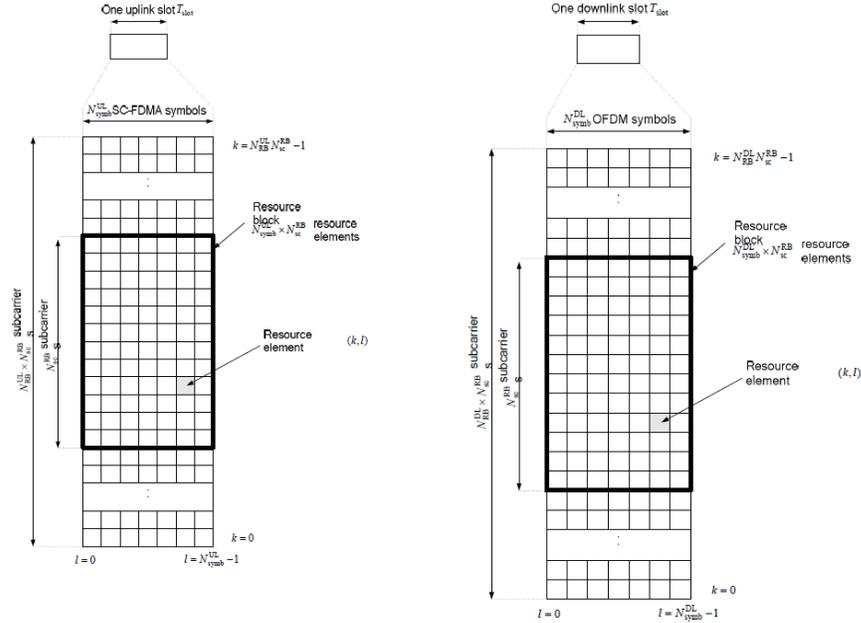
$$N_{R_B}^{min,U_L} = N_{R_B}^{min,D_L} = 6$$

$$N_{R_B}^{max,U_L} = N_{R_B}^{max,D_L} = 110$$

---

<sup>17</sup>Fuente: SEMINARIO: LTE (Long Term Evolution). “Capa Física y Planificación en LTE”. (May. 2013). Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.

Figura 10. Cuadrícula de recursos de enlace Ascendente y Descendente



Fuente: 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic. 2010).

En la Cuadrícula de recursos de enlace Ascendente y Descendente se observa los elementos de recurso (RE) y el bloque de recursos (RB) en el que trabaja LTE-A, cada RB contiene 84 RE como se muestra en la tabla 1.<sup>18</sup>

### Elementos de Recursos

Cada elemento de la cuadrícula de recursos se denomina elemento de recurso y se define de forma única por el par de índices  $(k, l)$  en una ranura donde:

Enlace Ascendente:

$$k = 0, \dots, N_{RB}^{UL} N_{SC}^{RB} - 1$$

$$l = 0, \dots, N_{symb}^{UL} - 1$$

Enlace Descendente:

$$k = 0, \dots, N_{RB}^{DL} N_{SC}^{RB} - 1$$

$$l = 0, \dots, N_{symb}^{DL} - 1$$

Que son los índices en los dominios de frecuencia y tiempo, respectivamente.

$k$ : índice de dominio de frecuencia.

<sup>18</sup>3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic. 2010).

$l$ : índice de dominio de tiempo.

$N_{RB}^{UL}$ : Configuración de ancho de banda de enlace ascendente, expresada en múltiplos de  $N_{SC}^{RB}$ .

$N_{RB}^{DL}$ : Configuración de ancho de banda de enlace descendente, expresada en múltiplos de  $N_{SC}^{RB}$ .

$N_{SC}^{RB}$ : Número de subportadoras por bloque de recurso.

$N_{symp}^{UL}$ : Número de símbolos SC-FDMA en una ranura de enlace ascendente.

$N_{symp}^{UL}$ : Número de símbolos OFDM en una ranura de enlace descendente.

### Bloque de Recursos

Enlace Ascendente:

Un bloque de recursos físicos se define como  $N_{symp}^{UL}$  Símbolos SC-FDMA consecutivos en el dominio del tiempo y  $N_{SC}^{RB}$  subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia, donde  $N_{symp}^{UL}$  y  $N_{SC}^{RB}$  son dados en la Figura 11.<sup>19</sup>

Un bloque de recursos físicos en el enlace ascendente consta de  $N_{symp}^{UL} * N_{SC}^{RB}$  elementos de recursos.

Figura 11. Parámetros de los bloques de recursos Ascendente

Configuration	$N_{sc}^{RB}$	$N_{symp}^{UL}$
Normal cyclic prefix	12	7
Extended cyclic prefix	12	6

Fuente: 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic. 2010).

Enlace Descendente:

El bloque de recursos físicos se define como  $N_{symp}^{DL}$  Símbolos OFDM consecutivos en el dominio del tiempo y  $N_{SC}^{RB}$  subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia, donde  $N_{symp}^{DL}$  y  $N_{SC}^{RB}$  son dados en la Figura 12.

<sup>19</sup>3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic. 2010).

Un bloque de recursos físicos en el enlace descendente consta de  $N_{symbol}^{DL} * N_{SC}^{RB}$  elementos de recursos.

Figura 12. Parámetros de los bloques de recursos Descendente

Configuration		$N_{sc}^{RB}$	$N_{symbol}^{DL}$
Normal cyclic prefix	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$	12	7
	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$		6
Extended cyclic prefix	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$	24	3
	$\Delta f = 7.5 \text{ kHz}$		3

Fuente: 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic. 2010).

La relación entre el número de bloque de recursos físico y los elementos de recurso en el dominio de la frecuencia en un intervalos  $(k, l)$ , está dada por:

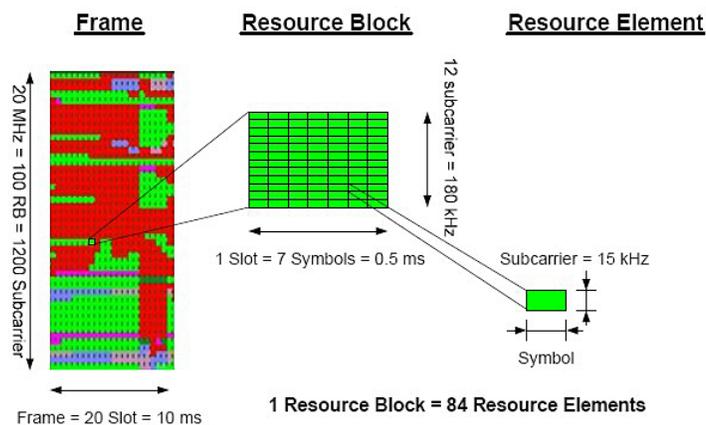
$$n_{PRB} = \left\lceil \frac{k}{N_{SC}^{RB}} \right\rceil \quad (1)$$

$n_{PRB}$ : Número de bloque de recursos físicos.

$k$ : índice de dominio de frecuencia.

$N_{SC}^{RB}$ : Número de subportadoras por bloque de recurso.

Figura 13. Trama



Fuente: SEMINARIO: LTE (Long Term Evolution). "Capa Física y Planificación en LTE". (May. 2013). Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.

En la Figura 13 se trabaja con una frecuencia de 20 MHz (100 RB, 1200 subportadoras) y 10 ms o 20 slot que es el tiempo usado en la trama de LTE-A, la cuadrícula esta

compuesta por bloques de recurso. Cada bloque de recurso tiene 12 subportadoras y 7 símbolos (Prefijo cíclico normal), cada bloque de recurso contiene 84 elementos de recurso; donde cada elemento de recurso esta compuesto por una subportadora que trabaja a una frecuencia de 15 KHZ, y un simbolo.

### Número de bits por subtrama

Para calcular el número de bits por subtrama se tiene la siguiente ecuación:

$$N_{bits}^{Sf} = N_{RB} * 12 * 2 * N_{symp}^{Ts} * \log_2 M(bits) \quad (2)$$

$N_{bits}^{Sf}$ : Número de bits por subtrama.

$N_{RB}$ : Número de bloque de recursos.

$N_{symp}^{Ts}$ : Valor del simbolo.

$M$ : Tipo de modulación.

La tasa binaria es en (*kbps*), como la subtrama dura 1 ms coincide con el número de bits, por lo tanto  $N_{bits}^{Sf}$  esta dado en términos de (*kbps*).

### 2.3.2 Estimación del canal

La señal recibida no solo depende de la fase de la señal transmitida si no también de la posición exacta del receptor. en LTE-A el canal es estimado por los usuarios y transmitido de regreso a la estación base.

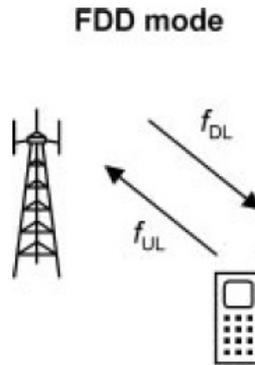
### Modo FDD

En el modo de duplexación por división de frecuencia, la estación base y móvil transmiten y reciben al mismo tiempo, utilizando diferentes frecuencias de portadora. El ancho de banda por lo general es el mismo tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. Esto lo hace adecuado para comunicaciones de voz, ya que las velocidades de datos de enlace ascendente y descendente son muy similares.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup>Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

Figura 14. Modo FDD

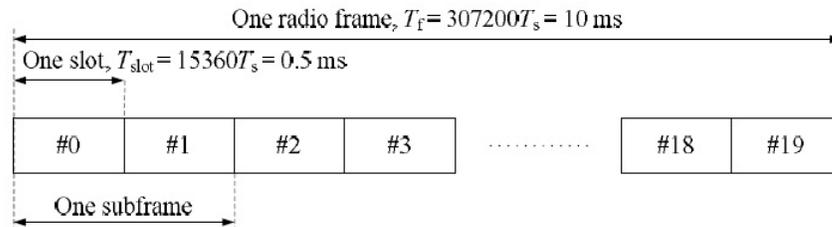


Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

### Estructura de la trama FDD

La trama es de 10ms o de 20 intervalos llamados Slot ( $T_s$ )<sup>21</sup>

Figura 15. Trama FDD



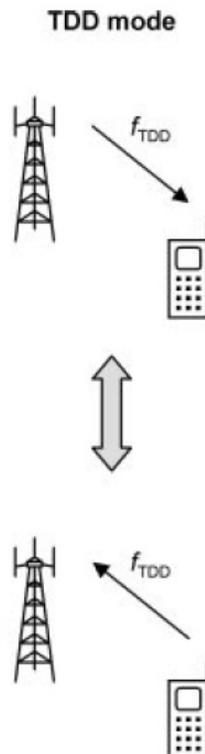
Fuente: 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Diciembre, 2010).

<sup>21</sup>3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic. 2010).

## Modo TDD

En el modo de de duplexación por división de tiempo, el sistema puede ajustar la cantidad de tiempo asignada al enlace ascendente y descendente. Esto lo hace adecuado para aplicaciones tales como la navegación web, en la que la velocidad de datos del enlace descendente puede ser mucho mayor que la velocidad en el enlace ascendente.

Figura 16. Modo TDD



Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

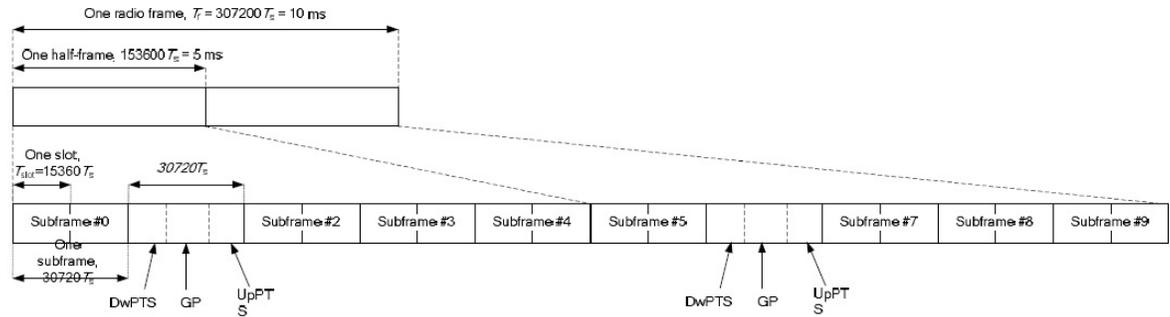
## Estructura de la trama TDD

Consta de dos semitramas de 5ms; cada semi trama se subdivide en 5 subtramas de 0,5 ms (0 - 4 y 5 - 9). Las subtramas 1 y 6 son especiales con 3 campos de datos.<sup>22</sup>

---

<sup>22</sup>Fuente: Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

Figura 17. Trama TDD



Fuente: 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic, 2010).

- DwPTS: Downlink Pilot Time Slot.
- GP: Guard Period.
- UpPTS: Uplink Pilot Time Slot.

### 2.3.3 Sistemas MIMO

El término “MIMO” se refiere al uso de múltiples antenas en el transmisor y el receptor. Específicamente es una técnica para enviar y recibir más de una señal de datos simultáneamente sobre el mismo canal de radio, explotando la propagación por trayectos múltiples. MIMO tiene variaciones dependiendo del número de usuario como las siguientes:

#### SU-MIMO

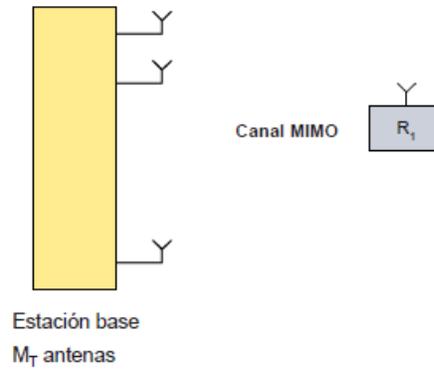
SU-MIMO (Single User MIMO), Es el enlace entre la estación de base y un móvil, habilitando para ello varios caminos paralelos desacoplados entre ambos. Su principal característica es aumentar la capacidad del enlace. Ver en figura 18.

#### MU-MIMO

MU-MIMO (Multi User MIMO), se pretende es que hasta K móviles distintos puedan compartir la misma banda de frecuencias, con ello explotar una posible ortogonalidad o desacoplo espacial entre los flujos de datos, que se transportan entre la base y cada uno de los distintos K móviles. Su principal característica es aumentar la capacidad de la celda. Ver en figura 19.<sup>23</sup>

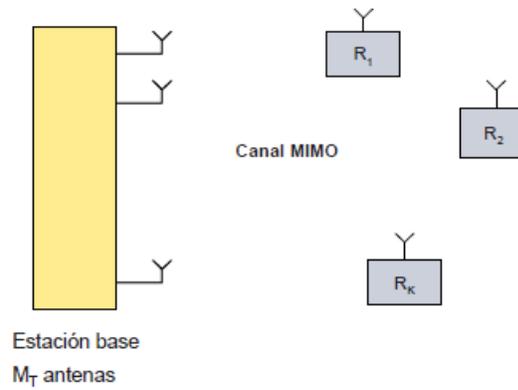
<sup>23</sup> Agustí Ramón, Bernardo Francisco, Casadevall Fernando, Ferrús Ramon, Romero Pérez Jordi, Sallent Oriol. “LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES”.Universitat Politècnica de Catalunya. En: Fundació Vodafone España. Copyright, (2010).

Figura 18. Esquema SU-MIMO



Fuente: Agusti Ramón, Bernardo Francisco, Casadevall Fernando, Ferrús Ramon, Romero Pérez Jordi, Sallent Oriol. "LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES". Universitat Politècnica de Catalunya. En: Fundación Vodafone España. Copyright, (2010).

Figura 19. Esquema MU-MIMO



Fuente: Agusti Ramón, Bernardo Francisco, Casadevall Fernando, Ferrús Ramon, Romero Pérez Jordi, Sallent Oriol. "LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES". Universitat Politècnica de Catalunya. En: Fundación Vodafone España. Copyright, (2010).

### 3. VOZ SOBRE EL PROTOCOLO DE INTERNET VOIP

Debido a los cambios de las ultimas décadas sobre las comunicaciones en Internet, nos brinda la oportunidad de ofrecer servicios de voz en tiempo real a través de redes de conmutación de paquetes. A medida que se incrementan los recursos de la red surgen nuevos horizontes para el desarrollo de esta tecnología lo cual requiere más que un servicio básico de telefonía.

Por eso se estudiara los codecs de voz ya que son un componente importante para dicho desarrollo en las comunicaciones, como también la forma como se realiza la transmisión, las características que los identifica y los factores que afecta su funcionamiento .

#### 3.1 SISTEMA DE TRANSPORTE VOIP

Las redes de datos requieren de diferentes protocolos para entregar los paquetes de VoIP como lo son el control de transporte y señalización. El protocolo de señalización está dado por la recomendación H.323 y el protocolo de inicio de sesión (SIP) desarrollado por la IETF, ambos se utilizan para configurar, controlar y terminar una sesión de llamada VoIP. Cuando se establece una sesión los paquetes pueden usar dos tipos de protocolos de transporte llamados, protocolo en tiempo real (RTP) y protocolo de datagramas de usuario (UDP) ambos sobre IP. RTP provee un medio orientado a conexión esto quiere decir que este protocolo se asegura que los paquetes lleguen al punto final mientras que UDP no es orientado a conexión esto hace que el ancho de banda utilizado sea menor, un medio propicio para realizar el transporte de VoIP. También se debe enfatizar que en los sistemas UDP no se realiza retransmisión al momento de realizar una llamada, esto provoca un porcentaje de pérdida mitigada en el proceso de codificación.

Los protocolos de transporte RTP y UDP portan las señales que son codificadas, esto significa que toman la señal análoga de la voz muestreándola a una tasa de 8Khz con esto se cuantifica asignándole valores de 8 o 16 bits. El proceso de cada codificador depende de la tasa de compresión o de la longitud de la trama para finalmente ser encapsulada dentro de los protocolos de transporte y transmitirlos sobre la red. Todos los codificadores usan diferentes algoritmos y tienen diferentes características como tasas de bits, algoritmo de codificación y retardo de codificación.<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup>Younes LABYAD, Mohammed MOUGHIT , Abderrahim Marzouk , Abdelkrim HAQIQ. "Impact of Using G.729 on the Voice over LTE Performance". Faculty of Sciences and Techniques, Settat, Morocco. 2014.

## 3.2 TRANSMISIÓN DISCONTINUA

Con el objetivo de reducir la congestión de la red, el consumo de potencia de la MS y la interferencia en la celda, los codificadores brindan la opción de suspender la transmisión de datos durante los periodos de silencio. existen dos módulos que se encargan de administrar esta función:

- El módulo de detección de actividad vocal VAD ( “Voice Activity Detection”) el cual realiza la gestión de detectar la ausencia o presencia de actividad de voz para las señales de entrada.
- El módulo de transmisión discontinua DTX ( “Discontinuous Transmission”) se encarga de la administración del envío o no de tramas respecto a la información que el VAD le entrega.

En el momento que no se detecta actividad de transmisión por ejemplo cuando el canal esta inactivo en el extremo del codificador, las tramas que están inactivas se recuperan mediante la generación de ruido de confort CNG ( “Comfort Noise Generator”), se genera un ruido artificial en la ausencia total de sonido el cual no es desagradable en una conversación. se envían las características del ruido de fondo a través de tramas descriptoras de silencio SID(“Silence Descriptor”). Durante todo el período de silencio se transmiten estas tramas dependiendo el tipo de codificador al principio de la inactividad vocal a intervalos regulares o irregulares de tiempo.

## 3.3 CODIFICADORES DE VOZ

### Recomendación G.729

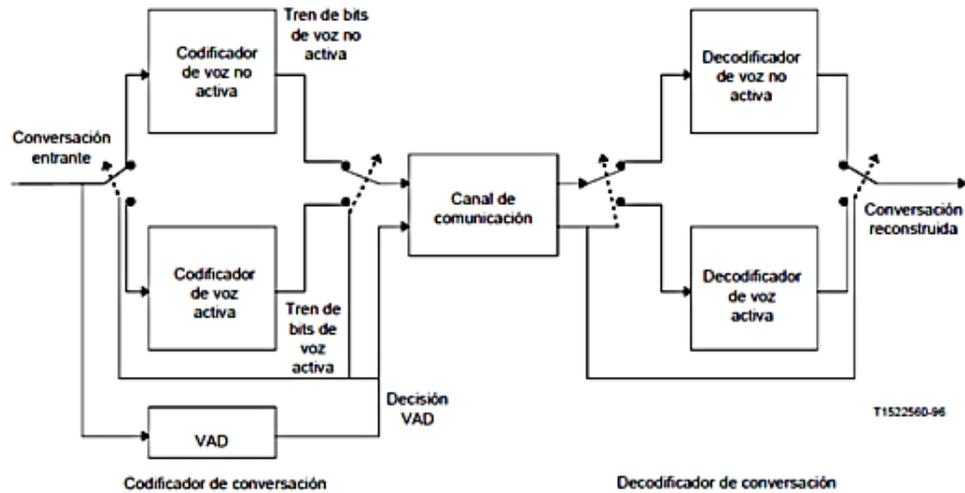
Recomendación realizada en 1996 por la unión internacional de telecomunicaciones (UIT-T), quien es el organismo encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras. Utiliza un algoritmo de codificación de la voz a 8 kbps que según la recomendación H.323 es apropiado para aplicaciones de audio con un bajo requisito de ancho de banda<sup>25</sup> .

La principal característica de este códec es la predicción lineal con excitación por código algebraico con estructura conjugada CS-ACELP (Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear Prediction). Este algoritmo toma muestras futuras para realizar la mitigación de pérdida de paquetes ya que durante este proceso de codificación y decodificación se realizan todo el tiempo procesos de filtrado, se usa generalmente para aplicaciones inalámbricas y VoIP donde se necesita alta calidad en la voz ya que su canal puede ser ruidoso y de baja complejidad.

---

<sup>25</sup> José Luis Carmona Maqueda. “Reconocimiento de Voz Codificada sobre Redes IP”. Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, Universidad de Granada. (2009)

Figura 20. Diagrama de bloques de un sistema de codificación utilizando VAD.



tomado de: "Reconocimiento de Voz Codificada sobre Redes IP". José Luis Carmona Maqueda

Este codificador trabaja con tramas de 10 ms que contienen 80 muestras, esto quiere decir que se tendría 8000 muestras en un segundo y se produce un preanálisis de 5 ms, por consiguiente el retardo algorítmico total será de 15 ms. En este códec posee en el anexo B un módulo de detección de actividad de voz VAD que a su vez está conformado por un algoritmo de transmisión discontinua DTX y generador de ruidos confortable de la audición CNG. Este módulo requiere de 4 parámetros a la hora de realizar el proceso de detección vocal que son la energía de la trama en la totalidad de la banda y en la banda inferior, el conjunto de frecuencias del espectro de rayas y la tasa de cruces por cero de las tramas. Si la energía de la trama que se obtiene por el análisis LPC (Linear Predictive Coding) es mayor a 15 dB el valor de VAD será un 1 pero si esta es menor este valor reproducirá un 0. Estos algoritmos se utilizan para reducir la velocidad de transmisión y el ancho de banda utilizado durante los periodos de silencio.

En la figura 20 se muestra el diagrama de bloques funcional del detector de actividad de voz. Si en el codificador indicamos 1 esto quiere decir que se activa el módulo para codificar-decodificar las tramas de voz activa. Si se indica 0 los bits recorrerán el codificador-decodificador de voz no activa donde se utilizan los algoritmos DTX/CNG.<sup>26</sup>

## AMR

Codificador AMR (Adaptative Multi-Rate) la compresión de los datos de audio optimizados para la codificación de voz. Fue puesto en marcha en octubre de 1998 como estándar de 3GPP (3 Generation Partnership Project). En su mayor parte es utilizado en GSM (Global System for Mobile communication) que ha evolucionado a UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

<sup>26</sup> José Luis Carmona Maqueda. "Reconocimiento de Voz Codificada sobre Redes IP". Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, Universidad de Granada. (2009)

Este codificador es utilizado para aplicaciones de redes celulares o telefonía móvil y fue desarrollado con una adaptación en función de las degradaciones del canal móvil. Brinda ocho tasas de velocidad de transmisión 4.75, 5.15, 5.9, 6.7, 7.4, 7.95, 10.2 y 12.2 kbps de modo que a medida que la degradación del canal aumenta, se seleccionan tasas de transmisión inferiores incrementando paralelamente la información de redundancia y por tanto, la protección frente a errores.<sup>27</sup>

Como el codificador G.729, este usa los algoritmos DTX, VAD para detección de actividad de voz Y CNG. Se fundamenta en un algoritmo de predicción lineal con excitación por código algebraico de estructura conjugada ACELP (Algebraic Code-Excited Linear Prediction). Las tramas son de 20 ms y contiene 160 muestras dividido en cuatro subtramas de 5 ms que corresponde a 40 muestras respectivamente. Debido a que el codificador toma muestras futuras el retardo algorítmico aumenta 5 ms a excepción del modo 12.2 kbps que no lo utiliza, sin embargo para que haya compatibilidad para todas las tasas se le añade un retardo 5 ms a este modo.<sup>28</sup>

## iLBC

Códec de voz desarrollado por GIPS (Global IP Solutions) y estandarizado por el organismo IETF en la RFC-3951 con licencia de código abierto. Fue específicamente diseñado para comunicaciones de voz robusta sobre redes de paquetes IP. Requiere señales muestreadas a 8 kHz y Soporta dos longitudes de tramas que son de 20 ms a una tasa binaria de 15.2 kbps y 30 ms a una tasa de 13.33 kbps.

Usa el algoritmo de bloque independiente LPC el cual modela la señal de voz como una combinación lineal de  $N$  muestras anteriores y se le añade una señal de error como si fuera un filtro digital, en este caso no es una estructura CELP (Code-Excited Linear Prediction) de análisis por síntesis ya que se desea evitar la dependencia intertrama, no hace uso del filtro de pitch para replicar esta periodicidad a largo plazo, al contrario, identifica el valor donde hay mayor energía en la excitación de la trama actual y es llamada estado inicial. Tiene como objetivo aumentar la robustez ante la pérdida de paquetes, característica que lo diferencia de los demás codecs de voz que actualmente se están usando, razón por la cual se ha impuesto en algunas aplicaciones bastante reconocidas como Skype y Google Talk. Aunque, la robustez frente a pérdidas de paquetes presenta el inconveniente de una mayor tasa de bits.<sup>29</sup>

---

<sup>27</sup>Juan Carlos Zarraga Estrada. "Compresión de voz para la transmisión de comunicaciones inalámbricas de banda ancha". Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Ingeniería Eléctrica-Telecomunicaciones. (2013)

<sup>28</sup>Juan Carlos Zarraga Estrada. "Compresión de voz para la transmisión de comunicaciones inalámbricas de banda ancha". Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Ingeniería Eléctrica-Telecomunicaciones. (2013)

<sup>29</sup>José Luis Carmona Maqueda. "Reconocimiento de Voz Codificada sobre Redes IP". Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, Universidad de Granada. (2009)

### 3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS CODIFICADORES G.729, AMR E ILBC

Las principales características de los codificadores de voz fueron los siguientes: tasa de bits, tramas, bit por trama y tipo de compresión. Se eligió la tasa de bit de 15.2 kbps para el iLBC ya que trabaja con tramas de 20 ms como también lo hace el AMR sin embargo el G.729 trabaja con tramas de 10 ms pero su tipo de compresión es CS-ACELP parecida a la del AMR como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Características de los codificadores de voz G.729, AMR e iLBC

CODEC	Tasas de bit(kbps)	Trama(ms)	Bit por trama	Tipo de compresión
G.729	8	10	80	CS-ACELP
AMR	5.15	20	103	ACELP
ilbc	15.2	20	304	LPC

Fuente: autor

En la figura 21 se habla de los siguientes términos:

Bit: es la unidad de información digital que se utiliza en comunicaciones de datos, puede tomar dos valores o estados distintos, “alto” y “bajo” o “1” y “0”.<sup>30</sup>

Tasa de bits: Se define como el número máximo de bits que pueden transmitirse en un segundo y viene dada en bits por segundo.<sup>31</sup>

Trama: es un conjunto de bytes (8 bits) transmitidos secuencialmente sobre un medio físico.<sup>32</sup>

Tipo de compresión: Es el proceso en el cual se remueve información redundante para reducir el ancho de banda que se requiere para su transmisión.<sup>33</sup>

### 3.5 PÉRDIDA DE PAQUETES

La causa más conocida que genera el factor de pérdida es la congestión de la red o corrupción de datos. Los paquetes se transportan por la red IP, después que estos se envían, el problema puede ser causado en la pasarela o en la misma dirección a la que se

---

<sup>30</sup>J. Carlos Pascual Viñe. “INTRODUCCION A LA TELEMATICA Y A LAS REDES DE DATOS”. Telefónica de España. Servicios de información. Madrid. (2000)

<sup>31</sup>J. Carlos Pascual Viñe. “INTRODUCCION A LA TELEMATICA Y A LAS REDES DE DATOS”. Telefónica de España. Servicios de información. Madrid. (2000)

<sup>32</sup>J. Carlos Pascual Viñe. “INTRODUCCION A LA TELEMATICA Y A LAS REDES DE DATOS”. Telefónica de España. Servicios de información. Madrid. (2000)

<sup>33</sup>Karen Hernández R, Arturo Veloz G, José L Leyva M. “ALGORITMO DE CODIFICACIÓN DE VOZ CS-ACELP PARA USARLO EN REDES DE DATOS. MEXICO. (2017)

envía. Para minimizar esta pérdida se utiliza el algoritmo de ocultamiento de pérdida de paquetes PLC (“Packet Loss Concealment”) que toma muestras de voz previas para que después de este proceso el decodificador realice la predicción de tramas perdidas, mitigando así la pérdida de los paquetes.<sup>34</sup>

Dependiendo de los resultados de BLER se realiza la estimación de la tasa de error de trama. El error y el valor de BLER están correlacionados a través de la longitud del paquete y el número de subtramas, FER es la tasa de error por trama y BLER es la tasa de error por bloque

$$FER = 1 - (1 - BLER)^{N_{bits}^{Sf}} \quad (3)$$

De esta forma se estima el numero de paquetes perdidos donde NPA es el numero de paquetes por audio.

$$Packet_{Lost} = \frac{NPA * FER}{100} \quad (4)$$

### 3.5.1 Factores que afectan la transmisión de los paquetes

#### Latencia

En VoIP latencia se precisa como el tiempo en el que demora la voz en salir desde el emisor hasta llegar al receptor. Se definen tres tipos:

- La propagación: es el tiempo que tarda la señal en llegar al punto final ya sea por fibra óptica o cable de cobre.
- La serialización: es el tiempo que toma en ubicar un bit o un byte al interior de una interfaz.
- El procesamiento se origina en los dispositivos al realizar un envío de tramas a través de la red.

el retardo de cola sucede cuando se envían paquetes de más que no puede soportar la capacidad del canal en un intervalo de tiempo, este también se puede definir como latencia. la ITU-T en la recomendación G.114 especifica que una calidad de voz óptima de tener un retardo menor de 150 ms <sup>35</sup>

#### Jitter

Se le dice jitter a la variación del retardo de los paquetes. El tiempo que tarda cada paquete en ser transmitido no siempre es constante, este puede variar debido a errores en

---

<sup>34</sup>Cristian Daniel Segura Villalobos. “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE QoS/QoE EN SERVICIOS OTT MONTADOS SOBRE UNA PLATAFORMA LTE/IMS”.Universidad de Chile. FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS. Santiago de Chile. (2012)

<sup>35</sup>Cristian Daniel Segura Villalobos. “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE QoS/QoE EN SERVICIOS OTT MONTADOS SOBRE UNA PLATAFORMA LTE/IMS”.Universidad de Chile. FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS. Santiago de Chile. (2012)

la configuración, congestión en la red o encolamiento indebido ya que en el emisor se envían los paquetes en un flujo continuo espaciado de manera uniforme. El encargado para compensar este retardo es el buffer puesto que almacena los paquetes para luego reproducirlos como un flujo constante a los procesadores de señal digital que luego se convertirá en una secuencia de audio analógico.<sup>36</sup>

## 3.6 MÉTODOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL SERVICIO

### 3.6.1 CALIDAD DEL SERVICIO QOS

La ITU-T define la calidad del servicio como la totalidad de las características de un servicio de telecomunicaciones que determinan su capacidad para satisfacer las necesidades explícitas e implícitas del usuario del servicio. Se puede decir que el proveedor de servicios debe garantizar un índice ya sea máximo o mínimo de QoS, si por el contrario no se garantiza los límites este se designa como servicio Best-effort o de mejor esfuerzo. Desde un principio se ha venido hablando de los protocolos con lo que VoIP trabaja, sin embargo el fin de este servicio es de entregar la calidad similar a la de llamadas telefónicas en la RTCP. El principal dilema de la red IP es su tipo de servicio no orientado a conexión y del mejor esfuerzo ya que los paquetes se envían en diferente orden y no se garantiza que estos lleguen, por congestión en las colas de los diferentes caminos.<sup>37</sup>

### 3.6.2 EVALUACIÓN OBJETIVA: PESQ(P.862)

La evaluación perceptual de la calidad vocal conocida como recomendación ITU-T P.862, es un método objetivo para la evaluación de la calidad de la voz de extremo a extremo de redes de banda estrecha y codecs vocales la cual da el soporte de los resultados obtenidos de la evaluación subjetiva. Esta compara una señal de voz con la misma señal degradada posteriormente simula la señal cuando pasa a través de un canal de comunicación. Básicamente son dos funciones de filtro diferentes, un filtro de banda estrecha y un filtro de banda ancha que se elige dependiendo de la aplicación preferida.

Como primera medida se realiza la alineación entre las dos señales con el fin de compensar los pequeños cambios de tiempo que pueden ocurrir en canal de por el proceso de codificación. Luego de obtener las representaciones audibles se acumulan las diferencias audibles en el tiempo mientras se ponderan de manera diferente dependiendo de si se ha añadido una distorsión a la señal o si le faltaban partes de la señal después de la transmisión. Por último son comparadas usando un modelo por percepción que se muestra en la figura 22 y se genera la puntuación MOS (“Mean Opinion Score”).<sup>38</sup>

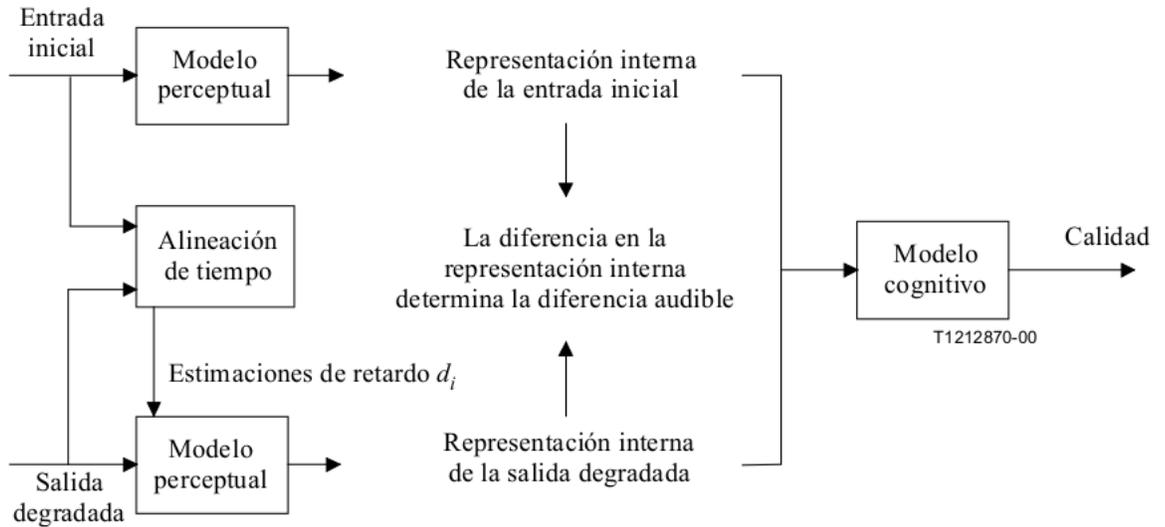
---

<sup>36</sup>Cristian Daniel Segura Villalobos. “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE QoS/QoE EN SERVICIOS OTT MONTADOS SOBRE UNA PLATAFORMA LTE/IMS”. Universidad de Chile. FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS. Santiago de Chile. (2012)

<sup>37</sup>Unión internacional de telecomunicaciones. “DEFINICIONES DE TÉRMINOS RELATIVOS A LA CALIDAD DEL SERVICIO”. Sector de normalización de las telecomunicaciones de la ITU. (2008)

<sup>38</sup>Unión internacional de telecomunicaciones. “EVALUACIÓN DE LA CALIDAD VOCAL POR PERCEPCIÓN:

Figura 22. Diagrama de bloques del algoritmo PESQ.



tomado de: "Recomendación UIT-T P.862".

### 3.6.3 EVALUACIÓN SUBJETIVA: MOS(P.800)

Existen muchas formas para realizar una evaluación subjetiva y el usuario es quien determina la calidad del servicio mediante su opinión. EL MOS es uno de los métodos más usados para realizar dicha evaluación, este método tiene varios anexos sin embargo el audio puede ser evaluado de forma directa o comparativa. La forma directa se obtiene realizando ACR (Absolute Category Rating) evaluando directamente, se califica el audio de 1 a 5, siendo 5 excelente y 1 malo. En este caso se usa el MOS promediando así los ACR medidos entre una cantidad definida de usuarios. Por otro lado la evaluación comparativa de tipo DCR (Degradation Category Rating) también se califica de 1 a 5 y se utiliza un audio de referencia y otro degradado. 5 será el valor cuando no haya diferencia apreciable entre el audio y 1 cuando la degradación sea bastante desagradable y no se entienda el mensaje. el valor promedio de los valores DCR se conoce como DMOS (Degradation MOS).<sup>39</sup>

UN MÉTODO OBJETIVO PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD VOCAL DE EXTREMO A EXTREMO DE REDES TELEFÓNICAS DE BANDA ESTRECHA Y CÓDECS VOCALES". Sector de normalización de las telecomunicaciones de la ITU. (2001)

<sup>39</sup>Unión internacional de telecomunicaciones. "MÉTODOS DE DETERMINACION SUBJETIVA DE LA CALIDADE DE TRANSMISIÓN". Sector de normalización de las telecomunicaciones de la ITU. (1996)

## 4. SIMULADOR LTE-A

El simulador utilizado fue elaborado por la universidad de Vienna, el cual trabaja a nivel de enlace y a nivel de sistema.

En el desarrollo y estandarización de LTE-A, como en la puesta en práctica de los fabricantes de equipos, las simulaciones son necesarias para probar y optimizar los algoritmos y procedimientos. Esto se realiza en la capa física (nivel de enlace) y en la red (nivel del sistema).<sup>40</sup>

### 4.1 SIMULADOR A NIVEL DE ENLACE

Permiten la investigación de la estimación de canal, seguimiento y algoritmos de predicción, algoritmos de sincronización<sup>41 42</sup>, ganancia MIMO, modulación y codificación adaptativa (AMC) y realimentación<sup>43 44</sup>. Además, las estructuras de recepción (Por lo general descuidar la interferencia entre células y el impacto de programación, aumenta la complejidad y tiempo de ejecución de la simulación drásticamente), modelamiento de la codificación y decodificación de canal<sup>45</sup>, modelamiento de la capa física<sup>46</sup>. A pesar de que los canales de transmisión MIMO se han investigado extensamente durante los últimos años<sup>47 48</sup>, todavía hay muchas preguntas abiertas que necesitan ser resueltas, tanto en teoría como en la aplicación práctica. Por ejemplo, LTE ofrece la flexibilidad para ajustar muchos parámetros de transmisión, pero no está claro hasta ahora la forma de explotar los grados de libertad

---

<sup>40</sup>Mehlführer Christian, Ikuno Colom Josep, Simko Michal, Schwarz Stefan, Wrulich Martin, Ruoo Markus, The Vienna LTE Simulators Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research.

<sup>41</sup>C Williams, S McLaughlin, MA Beach, Exploiting multiple antennas for synchronization. IEEE Trans. Veh. Technol. 58(2), 773-787 (Feb. 2009)

<sup>42</sup>Q Wang, S Caban, C Mehlführer, M Rupp, Measurement based throughput evaluation of residual frequency offset compensation in WiMAX, in Proc. 51st International Symposium ELMAR- 2009, Zadar, Croatia pp. 233-236 (Sept. 2009)

<sup>43</sup>N Kolehmainen, J Puttonen, P Kela, T Ristaniemi, T Henttonen, M Moisio, Channel quality indication reporting schemes for UTRAN long term evolution downlink, in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring (VTC), pp. 2522-2526 (May. 2008)

<sup>44</sup>S Schwarz, C Mehlführer, M Rupp, Calculation of the spatial preprocessing and link adaption feedback for 3GPP UMTS/LTE, in Proc. IEEE Wireless Advanced, London, UK (June 2010)

<sup>45</sup>M Wrulich, M Rupp, Performance and modeling of LTE H-ARQ, in Proc. International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2009), Berlin, Germany (Feb. 2009) M Wrulich.

<sup>46</sup>M Rupp, Computationally efficient MIMO HSDPA system-level modeling. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009 (2009). Article ID 382501

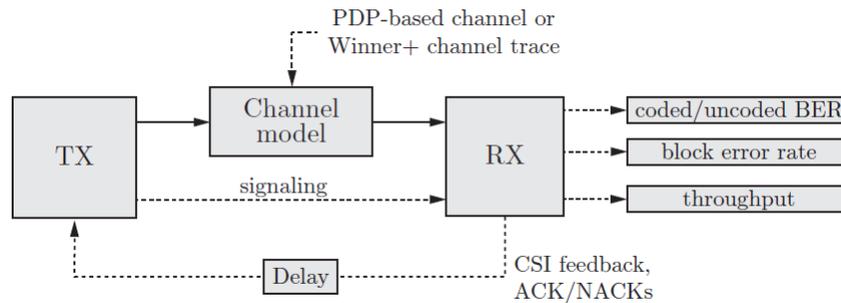
<sup>47</sup>TM Cover, Comments on broadcast channels. IEEE Trans. Inf. Theory. 44(6), 2524-2530 (Oct. 1998). doi:10.1109/18.72054

<sup>48</sup>H Weingarten, Y Steinberg, S Shamai, The capacity region of the gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel. IEEE Trans. Inf. Theory. 52(9), 3936-3964 (Sept. 2006)

disponibles para lograr un rendimiento óptimo. Algunos resultados teóricos recientes señalan la forma de proceder en este tema<sup>49</sup>, pero los resultados prácticos para LTE son insuficientes.

El simulador tiene una estructura que se divide en tres: el transmisor, el canal y el receptor. El transmisor y receptor están unidos por un canal, que se usa para transmitir los datos de enlace descendente, mientras que la realimentación y la señalización en el enlace ascendente se supone que es libre de error. La señalización tiene un nivel de SNR mayor que los datos, logrando obtener una modulación y codificación más baja.

Figura 23. Estructura del simulador a nivel de enlace.



Fuente: Mehlführer. C, Colom Ikuno. J, Simko. M, Schwarz. S, Wrulich. M, Rupp. M. "The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research". Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria .

- El transmisor: La representación gráfica de la descripción del transmisor lo define el estándar TS36<sup>50 51</sup>. En base a los valores de realimentación de los UE, un algoritmo asigna bloques de recursos (RBs) para los UEs y establece un Esquema de modulación y codificación (MCS) con tasas de codificación entre 0,076 y 0,926 con modulación 4, 16, o 64-QAM; el modo de transmisión MIMO (TxM), Multiplexación espacial en lazo abierto (OLSM), Multiplexación espacial en lazo cerrado (CLSM) y la pre-codificación/número de espacios de capas para todos los usuarios del servidor.

En la figura 24, se generan datos de bits aleatorios para hacer una codificación de canal por usuario, mapeando los símbolos y precodificandolos, formando un conjunto de símbolos OFDMA para realizar una IFFT e introducir el prefijo cíclico y lograr la transmisión de la señal.

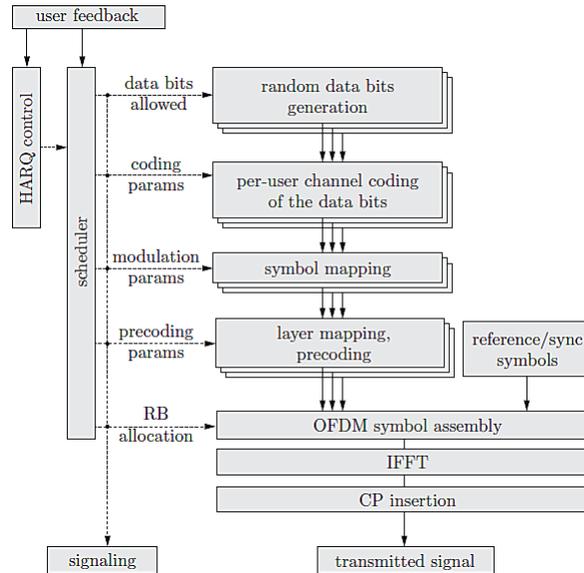
- El canal: El simulador a nivel de enlace trabaja con canales que son el de desvanecimiento rápido donde el impulso del canal correlacionado se genera para cada

<sup>49</sup>U Niesen, P Gupta, D Shah, The balanced unicast and multicast capacity regions of large wireless networks. IEEE Trans. Inf. Theory. 56(5), 2249-2271 (May 2010)

<sup>50</sup>Technical Specification Group RAN, E-UTRA; physical channels and modulation. 3GPP, Tech. Rep. TS 36.211 Version 8.7.0 (May 2009)

<sup>51</sup>Technical Specification Group RAN, E-UTRA; physical layer procedures. 3GPP, Tech. Rep. TS 36.212 (March 2009)

Figura 24. Estructura del transmisor



Fuente: Mehlführer. C, Colom Ikuno. J, Simko. M, Schwarz. S, Wrulich. M, Rupp. M. "The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research". Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria .

muestra de la señal a transmitir, y el de desvanecimiento en bloque, el canal es constante durante la duración de la subtrama a 1 ms. Los canales que soporta el simulador son:

- Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN).
- Desvanecimiento plano Rayleigh.
- Modelos de canal de potencia retrasada basado en perfiles, tales como UIT PedB, UIT VehA<sup>52</sup>.
- Winner Phase II+<sup>53</sup>.

El más sofisticado es el modelo Winner Phase II+. Es una evolución del modelo de canal espacial 3GPP e introduce características adicionales como el soporte para diagramas de antenas 3D arbitrarias.

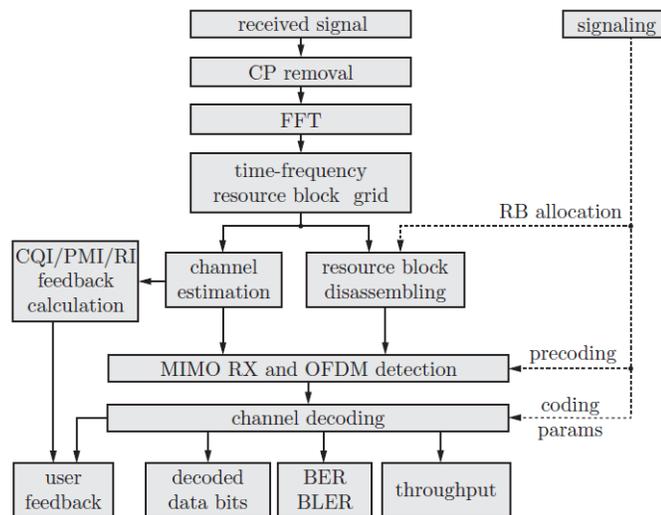
- Receptor: El simulador soporta Zero-Forcing (ZF), Error cuadrático medio mínimo lineal (LMMSE), y decodificación esférica suave como algoritmo de detección. El simulador soporta cuatro tipos diferentes de estimadores de canal que son :

<sup>52</sup>Member of ITU, Recommendation ITU-R M.1225: Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000. International Telecommunication Union (ITU), Tech. Rep (1997)

<sup>53</sup>L. Hentila, P. Kyosti, M Kaske, M Narandzic, M Alatosava, MATLAB implementation WINNER phase ii channel model ver1,1 (Dec.2007)

- Mínimos cuadrados (LS).
- Error Cuadrático Medio Mínimo (MMSE).
- LMMSE Aproximado<sup>54</sup>.
- Conocimiento de canal perfecto de conductor genio (cercano) basado en todos los símbolos transmitidos.

Figura 25. Estructura del receptor



Fuente: Mehlführer. C, Colom Ikuno. J, Simko. M, Schwarz. S, Wrulich. M, Rupp. M. "The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research". Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria .

LTE-A requiere realimentación UE para adaptar la transmisión a las condiciones del canal. El estándar LTE-A Release 10, especifica tres indicadores de realimentación para lograr este objetivo que son: El Indicador de calidad del canal (CQI) que es el encargado de elegir el Esquema de modulación y codificación (MCS) apropiado para lograr una Tasa de error bloque (BLER) predefinida. El Indicador de Rango (RI) y el Indicador de la matriz de precodificación (PMI) se utilizan para el pre-procesamiento MIMO, donde el RI informa al eNodeB la cadena de datos paralelo preferido y el PMI designa el precodificador preferido que se derivan de un libro de códigos finito<sup>55</sup>.

<sup>54</sup>M Simko, C Mehlführer, M Wrulich, M Rupp, Doubly dispersive channel estimation with scalable complexity, in Proc. International ITG Workshop on Smart Antennas, (WSA 2010), Bremen, Germany, pp. 251-256 (Feb. 2010)

<sup>55</sup>Technical Specification Group RAN, E-UTRA; physical channels and modulation. 3GPP, Tech. Rep. TS 36.211 Version 8.7.0 (May 2009)

## 4.2 SIMULADOR A NIVEL DE SISTEMA

Se centran más en los problemas relacionados con la red, tales como la asignación de recursos.<sup>5657</sup>, gestión de la movilidad<sup>58 59</sup>, control de admisión, la gestión de interferencias, y la optimización de la planificación de redes<sup>60</sup>. Además de eso, en un sistema orientado multi-usuario, como LTE-A, no es directamente evidente que figuras de mérito se deben utilizar para evaluar el rendimiento del sistema. Las medidas clásicas de la tasa de error de bits (BER), tasa de error bloque (BLER), y el rendimiento no satisfacen las propiedades del escenario multiusuario. Otras medidas más integrales del rendimiento de LTE-A son, por ejemplo, la equidad, diversidad multi-usuario, o Grados de libertad (DoF)<sup>61</sup>. Sin embargo, estos conceptos teóricos tienen que ser mapeados a los valores de rendimiento que pueden evaluarse por medio de simulaciones<sup>6263</sup>.

En LTE-A, una red de este tipo Consiste en que multitud de eNodosB cubren un área específica en la que se encuentran muchos terminales moviéndose alrededor. Si bien las simulaciones de un enlace de capa física individual permiten la investigación de las ganancias MIMO, la realimentación de la Modulación y Codificación Adaptativa (AMC), el modelamiento del canal, y retransmisiones<sup>6465</sup>; no es posible reflejar los efectos de la planificación de células, scheduling, o la interferencia en una gran escala con docenas de eNodoB y cientos de usuarios. Simplemente el rendimiento de las simulaciones de la capa física en los enlaces de radio entre todos los terminales y estaciones base son inviables para la investigación a nivel de sistema debido a la gran cantidad de potencia computacional.

---

<sup>56</sup>D Skoutas, D Komnakos, D Vouyioukas, A Rouskas, Enhanced dedicated channel scheduling optimization in WCDMA, in Proc. 14th European Wireless Conference (EW) (June 2008)

<sup>57</sup>S Schwarz, C Mehlführer, M Rupp, Low complexity approximate maximum throughput scheduling for LTE, in Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA (Nov. 2010)

<sup>58</sup>P Gkonis, D Kaklamani, G Tsoulos, Capacity of WCDMA multicellular networks under different radio resource management strategies, in Proc. 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC), pp.60?64 (2008)

<sup>59</sup>M Castañeda, M Ivrlac, J Nossek, I Viering, A Klein, On downlink intercell interference in a cellular system, in Proc. IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1-5 (2007)

<sup>60</sup>T Nihtila, V Haikola, HSDPA MIMO system performance in macro cell network, in Proc. IEEE Sarnoff Symposium (2008)

<sup>61</sup>SA Jafar, MJ Fakhereddin, Degrees of freedom for the MIMO interference channel. IEEE Trans. Inf. Theory. 53(7), 2637?2642 (July 2007)

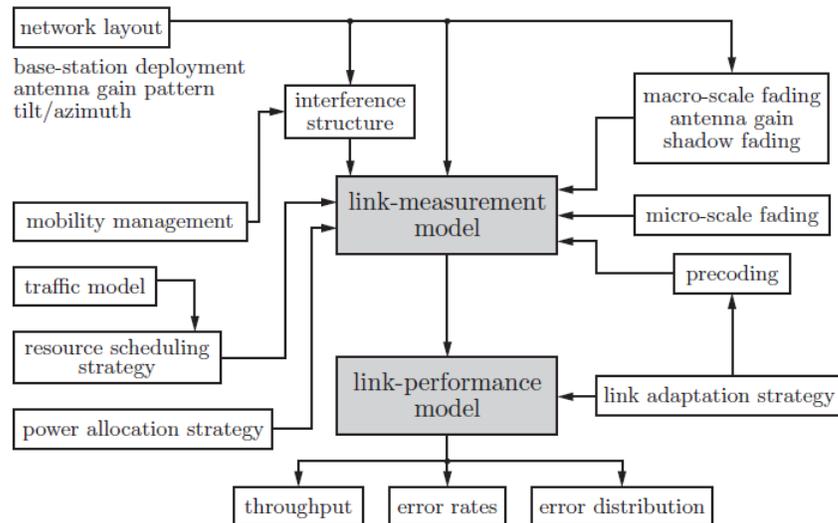
<sup>62</sup>Nortel, Performance evaluation of CL MIMO under different UE speed. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. R1-080384 (Jan. 2008)

<sup>63</sup>Nokia y Nokia-Siemens-Networks, LTE performance benchmarking. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. R1- 071960 (Apr. 2007)

<sup>64</sup>JC Ikuno, C Mehlführer, M Rupp, A novel link error prediction model for OFDM systems with HARQ, in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), Kyoto, Japan (May 2011)

<sup>65</sup>P Wu, N Jindal, Performance of hybrid-ARQ in block-fading channels: A fixed outage probability analysis. IEEE Transactions on Communications. 58(4), 1129?1141 (Apr. 2010)

Figura 26. Diagrama esquemático en bloque del simulador a nivel del sistema



Fuente: Mehlführer. C, Colom Ikuno. J, Simko. M, Schwarz. S, Wrulich. M, Rupp. M. "The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research". Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria .

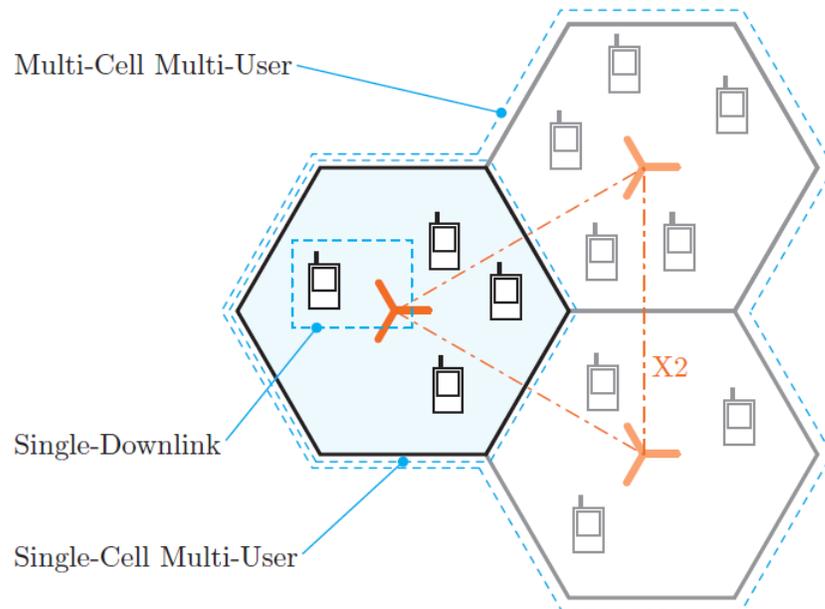
El simulador se compone de dos partes:

- Modelo de medición de enlace: Refleja la calidad del enlace, a cargo de los informes enviados de medición UE, y es indispensable para llevar a cabo la adaptación del enlace y la asignación de los recursos. La medida de la calidad de enlace elegido es evaluado por subportadora. Basándose en la señal de Interferencia y ruido (SINR), el cálculo UE, la realimentación (PMI, RI, y CQI), que se emplea para la adaptación del enlace en el eNodeB.
- Modelo de rendimiento del sistema: Predice la BLER, basado en la SINR del receptor y los parámetros de transmisión (por ejemplo, modulación y codificación).

### 4.3 ESCENARIOS DEL SIMULADOR

El simulador trabaja con tres clases diferentes de simulaciones, que difieren en gran medida de la complejidad computacional.

Figura 27. Tipos de simulación



Fuente: Mehlführer. C, Colom Ikuno. J, Simko. M, Schwarz. S, Wrulich. M, Rupp. M. "The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research". Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria .

- Única Descarga : Este tipo de simulación es entre un eNodeB y un UE. Tal configuración permite la investigación de:
  - Estimadores de canal.
  - Seguimiento de canal.
  - Predicción de canal.
  - Algoritmos de sincronización.
  - Ganancias MIMO.
  - Realimentación AMC incluyendo la optimización de mapeo de realimentación.
  - Las estructuras de receptor<sup>66</sup>.
  - Modelamiento de codificación y decodificación canal.

<sup>66</sup>L Boher, R Legouable, R Rabineau, Performance analysis of iterative receiver in 3GPP/LTE DL MIMO OFDMA system, in Proc. IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA), pp.103-108 (Aug. 2008)

–Modelamiento de la capa física<sup>67</sup>.

•Única célula con múltiples usuarios: Esta simulación se realiza entre una estación base y múltiples usuarios. Esta investigación permite la investigación de:

–Estructuras del receptor que tiene en cuenta la influencia de la programación.

–Pre-codificación multi-usuario.

–La asignación de recursos.

–Ganancias multiusuario

Complementario a las exigencias de la situación de un solo enlace descendente, estas simulaciones necesitan un AMC completamente funcional. En el caso de las investigaciones de la estructura del receptor, la complejidad computacional de la simulación se puede reducir para solamente evaluar el usuario de interés.

•Multi-célula con múltiples usuarios: Es el escenario más exigente computacionalmente y cubre los vínculos entre múltiples estaciones base y múltiples usuarios. Esta configuración permite la investigación de:

–Técnicas de interferencia<sup>68</sup>.

–Gestión de la interferencia, incluida la transmisión cooperativa.

–Los algoritmos basados en red como la asignación de recursos y la programación conjunta.

Teniendo en cuenta que las dos últimas investigaciones propuestas requieren extensas cantidades de esfuerzo computacional.

---

<sup>67</sup>M Wrulich, S Eder, I Viering, M Rupp, Efficient link-to-system level model for MIMO HSDPA, in Proc. of the 4th IEEE Broadband Wireless Access Workshop, New Orleans, LA, USA (Dec. 2008)

<sup>68</sup>C Mehlführer, M Wrulich, M Rupp, Intra-cell interference aware equalization for TxAA HSDPA, in Proc. 3rd IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC 2008), Santorini, Greece, pp. 406-409 (May 2008)

## 5. ANÁLISIS, RESULTADOS

En el simulador se trabajo con dos escenarios SUMIMO y MUMIMO, donde se realizaron las gráficas de la BLER garantizando un valor de  $10^{-3}$ .

Para la simulación de los escenarios se trabajó con un canal AWGN, ya que es utilizado en teoría de la información para imitar procesos que se producen en la naturaleza.

### 5.1 SUMIMO

En el escenario SUMIMO se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

Tabla 3. Parámetros de Simulación (SUMIMO)

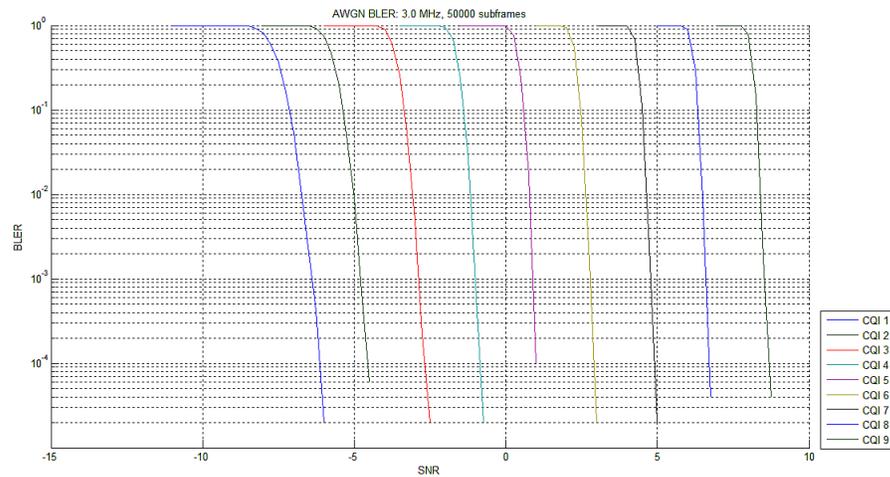
Parámetros	Valor
Tipo de simulación	LTE-A SUMIMO
Número subtramas	50000
Tipo de canal	AWGN
Tiempo transcurrido	2.6881e+04
Ancho de banda	3MHZ
Número de bloques	15
Frecuencia de subportadora	15KHZ
Prefijo cíclico	Normal
Número de usuarios	1
Número de Estaciones base	1

Fuente: Autores

Después de haber configurado los parámetros se obtienen las gráficas.

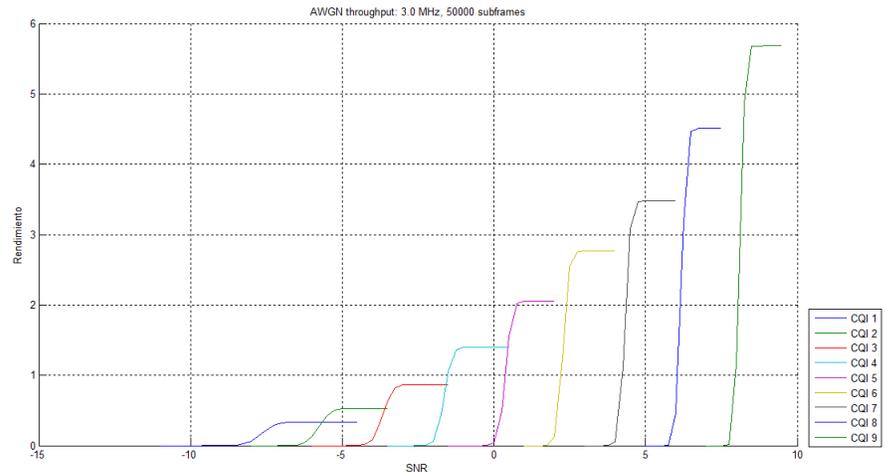
Para obtener la relación de error de bloque (BLER) y el rendimiento para el esquema de modulación y codificación (MCS) correspondiente a cada valor CQI, se realizaron simulaciones AWGN. El MCS determina tanto el tipo de modulación como la tasa de código efectivo (ECR) del codificador de canal. La Figura muestra los resultados de BLER de CQIs 1-9. Cada curva está espaciada aproximadamente 2 dB entre sí.

Figura 28. BLER VS SNR (SUMIMO)



Fuente: Simulador

Figura 29. Rendimiento VS SNR (SUMIMO)



Fuente: Simulador

La SNR en el simulador se define como la subportadora SNR (que es la suma de las potencias de señal de subportadora de datos divididas por la suma de las potencias de ruido recibidas en todas las subportadoras de datos).

En la Figura, las curvas de rendimiento se trazan para cada valor de CQI. La diferencia de SNR es alrededor de 2 dB para la mayoría de los valores de CQI. Al aumentar el número de CQI va aumentando el rendimiento del sistema. Teniendo en cuenta que las CQIs 1-6 trabajan con modulación QPSK y las CQIs 7-9 (16-QAM).<sup>69</sup>

<sup>69</sup>Mehlführer Chistian,Wrulich Martin, Ikuno Colom Josep, Bosanska Dagmar, Rupp Markus. "SIMULATING THE

## 5.2 MUMIMO

En el escenario MUMIMO se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

Tabla 4. Parámetros de Simulación (MUMIMO)

Parameter	Value
Simulation type	LTE-A SUMIMO
Number subframes	100000
elapsedtime	6.0183e+04
Channel	AWGN
System Bandwidth	3MHZ
Number of Resource Blocks	15
Subcarrier Spacing	15KHZ
Cyclic Prefix	Normal
Number of Users	1
Number of Bs	1

Fuente: Autores

Después de haber configurados los anteriores parámetros se obtienen las gráficas.

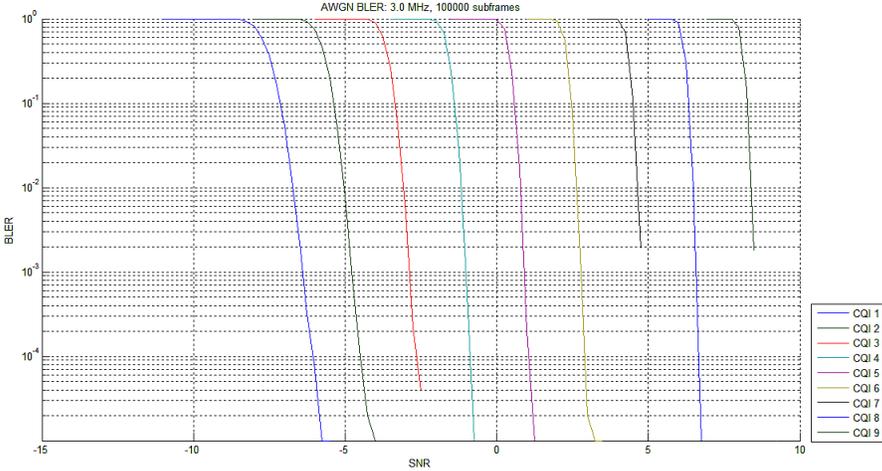
Como se especifico en el capítulo tres, donde se dio a conocer el funcionamiento del simulador, se dijo que no puede obtener las gráficas de la BLER de un sistema multiusuario ya que el simulador tiene esa limitación, lo que se hizo fue escoger un usuario para poder graficar. La simulación demoro demasiado en el procesamiento, como se puede ver en la imagen para poder garantizar el valor de  $10^{-3}$ , se aumento el número de subtramas a 100000.

A una relación señal ruido alta la energía de símbolo va ser menor, por lo tanto utilizamos una modulación de un orden menor para no tener una pérdida mayor de información. Debido a esto se va a realizar el mapeo de las CQIs QPSK y 16-QAM.

---

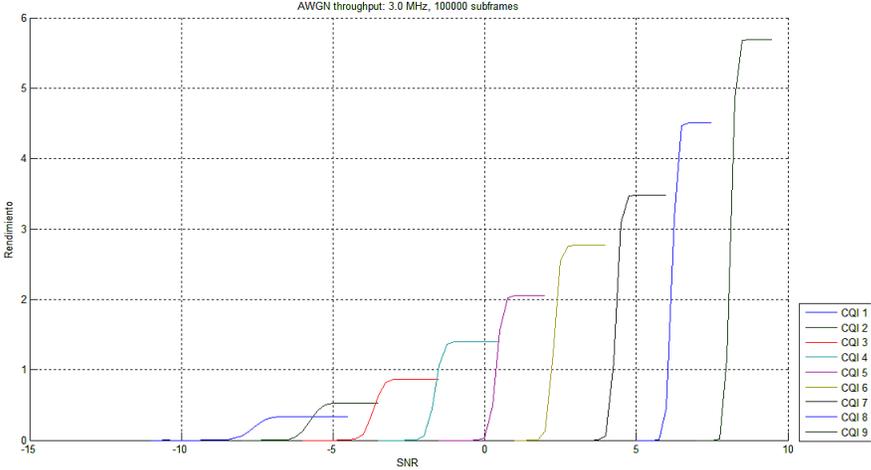
LONG TERM EVOLUTION PHYSICAL LAYER". Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering Vienna University of Technology Gusshausstrasse 25/389, A-1040 Vienna, Austria En: EURASIP, (2009).

Figura 30. BLER VS SNR (MUMIMO)



Fuente: Simulador

Figura 31. Rendimiento VS SNR (MUMIMO)



Fuente: Simulador

### 5.3 PÉRDIDA DE PAQUETES

Para realizar las pérdidas de paquetes se tomo en cuenta los valores de la ecuación de tasa de pérdida de tramas dependiendo del tipo de modulación y la tasa de tramas para cada uno de los audios por los tres codificador. En la figura 32 se muestra el numero de tramas que tiene cada audio codificado con G.729, AMR e iLBC y se puede observar que el las muestras codificadas con la recomendación G.729 tienen un mayor numero de tramas comparado con las muestras codificadas con AMR e iLBC, esto ocurre ya que G.729 utiliza tramas de 10 ms en cambio AMR e iLBC utiliza tramas de 20 ms. ademas el numero de tramas entre AMR e iLBC son iguales y se puede explicar por que ambos usan el mismo numero de tramas para empaquetar como se explico en el caso anterior. En este caso se trabajo con las modulaciones QPSK Y 16QAM ya que tienen un índice de pérdida menor.

Figura 32. Tasa de tramas para los audios de los codificadores G.729, AMR e iLBC.

N° DE MUESTRAS	TASA DE TRAMAS(frames)		
	G.729	AMR	iLBC
Muestra 1	2197	1032	1032
Muestra 2	1644	743	743
Muestra 3	1635	818	818
Muestra 4	1951	1003	1003
Muestra 5	1781	891	891
Muestra 6	2021	976	976

Fuente: Autores

En la figura 33 se puede observar los resultados del numero de paquetes que se extrajeron para cada muestra de audio separadas por el tipo de modulación y CQi (“Channel Quality Indicator”) que es el indicador de calidad de canal como su nombre lo indica es el que brinda información de la calidad del canal dado por el EU. Del indice 1 al 6 se trabaja la modulación QPSK y del 7 al 9 la 16QAM como se ha dicho en el anterior apartado de resultados SUMIMO. se garantizo un valor BLER de  $10^{-3}$  es por esto los índices 4 y 5 no se toman, ya que no garantizan este valor.

Los valores de las tablas de la figura 33 fueron el resultado de la ecuación (5) de la sección 3.5 y fueron organizados de esta manera por tipo de codificador y tipo de modulación.

Figura 33. Tablas de resultados de la pérdida de paquetes

SUMIMO	QPSK				16QAM		
	CQi1	CQi2	CQi3	CQi6	CQi7	CQi8	CQi9
Muestras 1	21.96	21.97	21.97	21.96	21.96	21.96	21.96
Muestras 2	16.43	16.44	16.43	16.43	16.43	16.44	16.43
Muestras 3	16.34	16.35	16.35	16.34	16.35	16.35	16.34
Muestras 4	19.5	19.51	19.51	19.5	19.51	19.51	19.5
Muestras 5	17.8	17.81	17.81	17.81	17.81	17.81	17.8
Muestras 6	20.2	20.21	20.21	20.21	20.2	20.21	20.2

a)

<b>MUMIMO</b>	<b>QPSK</b>				<b>16QAM</b>		
<b>MUESTRAS</b>	<b>CQi1</b>	<b>CQi2</b>	<b>CQi3</b>	<b>CQi6</b>	<b>CQi7</b>	<b>CQi8</b>	<b>CQi9</b>
Muestras 1	21.97	21.97	21.97	21.96	21.97	21.97	21.97
Muestras 2	16.43	16.44	16.44	16.43	16.43	16.44	16.44
Muestras 3	16.35	16.35	16.35	16.34	16.35	16.35	16.34
Muestras 4	19.51	19.51	19.51	19.5	19.51	19.51	19.51
Muestras 5	17.81	17.81	17.81	17.8	17.81	17.81	17.81
Muestras 6	20.21	20.21	20.21	20.2	20.21	20.21	20.21

b)

<b>SUMIMO</b>	<b>QPSK</b>				<b>16QAM</b>		
<b>MUESTRAS</b>	<b>CQi1</b>	<b>CQi2</b>	<b>CQi3</b>	<b>CQi6</b>	<b>CQi7</b>	<b>CQi8</b>	<b>CQi9</b>
Muestras 1	10.31	10.32	10.32	10.316	10.319	10.32	10.319
Muestras 2	7.42	7.43	7.43	7.427	7.429	7.43	7.429
Muestras 3	8.17	8.18	8.18	8.177	8.179	8.18	8.179
Muestras 4	10.02	10.03	10.03	10.026	10.029	10.03	10.02
Muestras 5	8.9	8.91	8.91	8.906	8.909	8.91	8.909
Muestras 6	9.75	9.76	9.76	9.756	9.759	9.76	9.759

c)

<b>MUMIMO</b>	<b>QPSK</b>				<b>16QAM</b>		
<b>MUESTRAS</b>	<b>CQi1</b>	<b>CQi2</b>	<b>CQi3</b>	<b>CQi6</b>	<b>CQi7</b>	<b>CQi8</b>	<b>CQi9</b>
Muestras 1	10.319	10.32	10.32	10.316	10.316	10.32	10.319
Muestras 2	7.429	7.43	7.43	7.427	7.429	7.43	7.429
Muestras 3	8.179	8.18	8.18	8.177	8.179	8.18	8.179
Muestras 4	10.029	10.03	10.03	10.026	10.026	10.03	10.029
Muestras 5	8.9	8.91	8.91	8.906	8.906	8.91	8.909
Muestras 6	9.759	9.76	9.76	9.756	9.756	9.76	9.759

d)

<b>SUMIMO</b>	<b>QPSK</b>				<b>16QAM</b>		
<b>MUESTRAS</b>	<b>CQi1</b>	<b>CQi2</b>	<b>CQi3</b>	<b>CQi6</b>	<b>CQi7</b>	<b>CQi8</b>	<b>CQi9</b>
Muestras 1	10.31	10.32	10.32	10.316	10.319	10.32	10.319
Muestras 2	7.42	7.43	7.43	7.427	7.429	7.43	7.429
Muestras 3	8.17	8.18	8.18	8.177	8.179	8.18	8.179
Muestras 4	10.02	10.03	10.03	10.026	10.029	10.03	10.02
Muestras 5	8.9	8.91	8.91	8.906	8.909	8.91	8.909
Muestras 6	9.75	9.76	9.76	9.756	9.759	9.76	9.759

e)

MUMIMO	QPSK				16QAM		
MUESTRAS	CQi1	CQi2	CQi3	CQi6	CQi7	CQi8	CQi9
Muestras 1	10.319	10.32	10.32	10.316	10.316	10.32	10.319
Muestras 2	7.429	7.43	7.43	7.427	7.429	7.43	7.429
Muestras 3	8.179	8.18	8.18	8.177	8.179	8.18	8.179
Muestras 4	10.029	10.03	10.03	10.026	10.026	10.03	10.029
Muestras 5	8.9	8.91	8.91	8.906	8.906	8.91	8.909
Muestras 6	9.759	9.76	9.76	9.756	9.756	9.76	9.759

f)

a)G.729 SUMIMO b)G.729 MUMIMO c) AMR SUMIMO d)AMR MUMIMO  
e)iLBC SUMIMO f)iLBC MUMIMO

Los resultados otorgados por las tablas de las figuras 32 y 33 muestran que a medida que aumenta el número de tramas, aumenta proporcionalmente el valor de FER y que el tipo de modulación y codificador afecta muy mínimo el valor de la pérdida de tramas.

Las tablas de los codificadores AMR e iLBC son iguales que ya que ambos manejan un tamaño de trama de 20 milisegundos, es por esto que la medida del bitstream para cada una de las muestras en ambos codificadores es la misma, de igual forma la velocidad de transmisión tampoco afecta el tamaño de las tramas.

Se realizó una comparación entre los resultados de la tasa de tramas de la figura 32 y paquetes perdidos de la figura 33 y para cada una de las muestras el porcentaje de pérdida fue aproximadamente del uno por ciento.

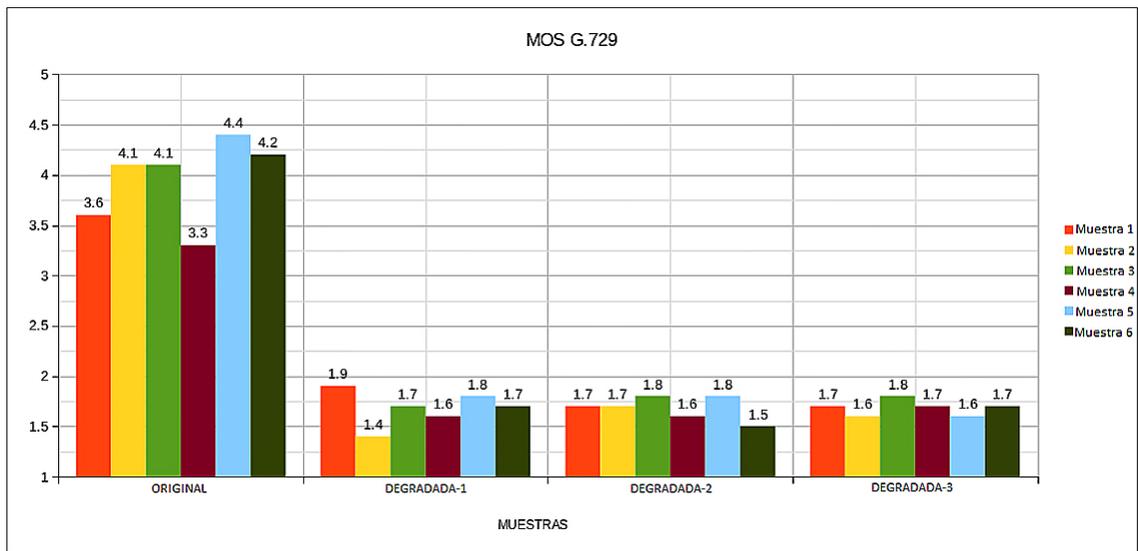
## 5.4 EVALUACIÓN SUBJETIVA

Para la realización de las pruebas subjetivas se tuvieron en cuenta un número de 10 personas a las cuales ninguna de ellas había efectuado una entrevista similar seis meses antes.

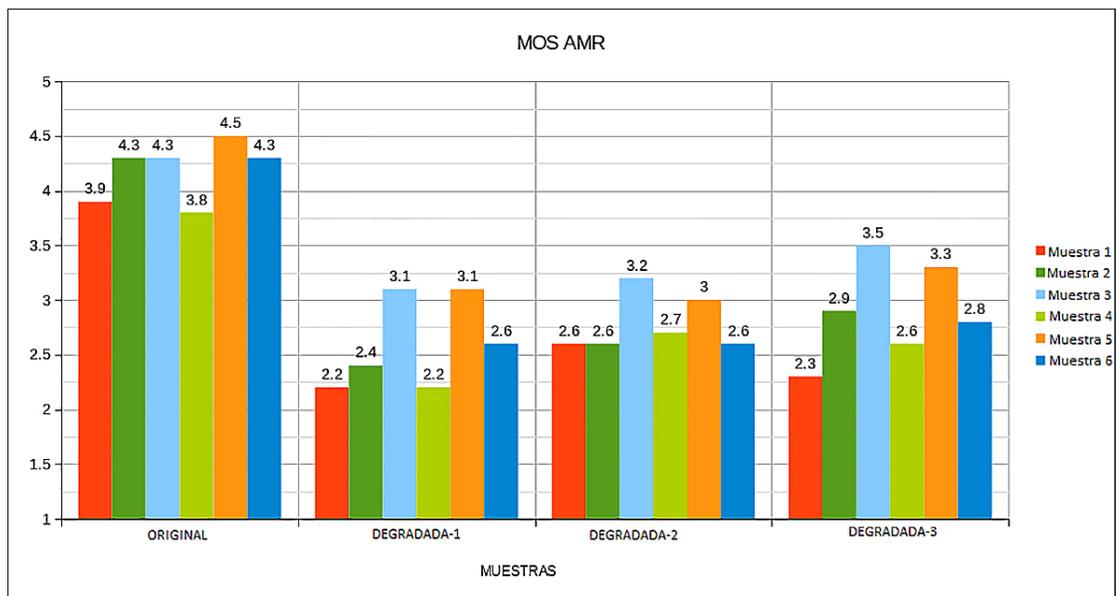
Se les explicó que debían realizar un test tipo encuesta y calificar de 1 a 5 un número determinado de audios, dándole al valor más bajo de calidad del audio donde el mensaje no se entiende a 1 y el valor más alto donde el mensaje es claro y sin ningún tipo de interferencia a 5.

Se produjeron seis audios además de eso a cada audio se le extrajeron un porcentaje de paquetes como se ha venido explicando. Estos valores de pérdidas se pueden ver en la figura 33. La extracción se llamó degradación, se hicieron 3 degradaciones para cada audio; cada persona calificó un número de 24 audios contando originales y degradados por cada codificador. En total se calificaron 72 audios para los codificadores G.729, AMR e iLBC.

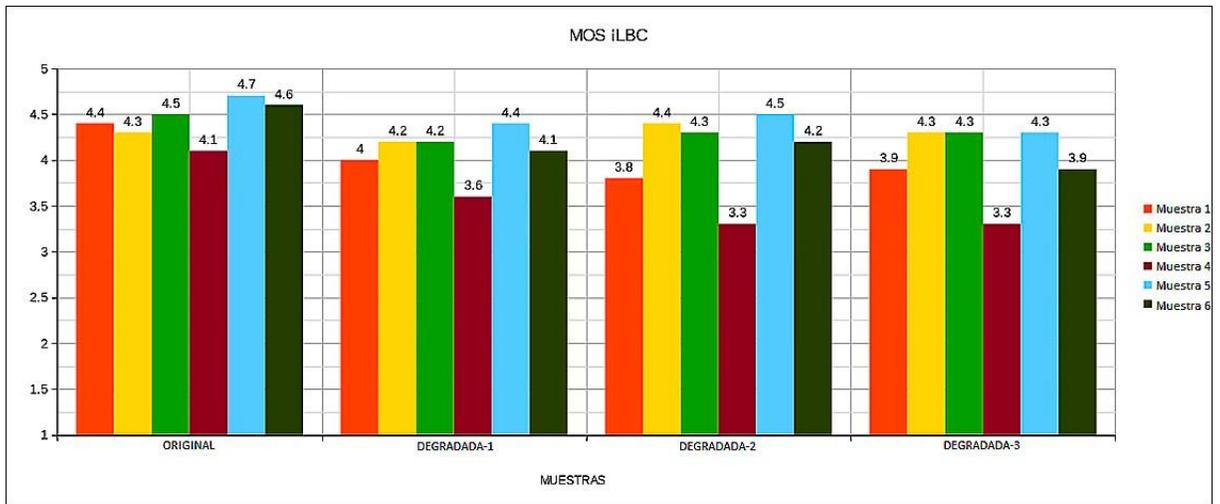
Figura 34. Resultados evaluacion subjetiva (MOS)



(a)



(b)



(c)

(a)MOS G.729. (b)MOS AMR. (c)MOS iLBC.

La figura 34 muestra que la calificación del MOS porcentual de los tres codificadores, el gráfico a) muestra el MOS de la recomendación G.729. El b) muestra el MOS del AMR y el c) muestra el MOS del iLBC.

El codificador el G.729 su menor valor cae a 1.4 mientras que en el AMR su menor valor es 2.2 e iLBC tiene como valor más bajo 3.3. Lo cual demuestra que el iLBC es más robusto comparado con los otros dos codificadores, y también se resalta su calificación más alta con un valor de 4.5 comparado con el G.729 de 1.9 y el AMR de 3.5 teniendo en cuenta que se ignora el valor MOS de las muestras originales.

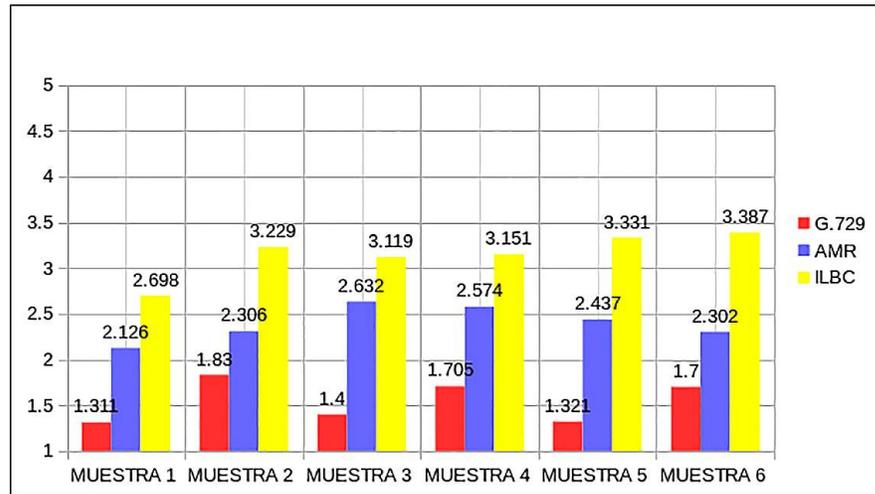
También demuestra que el codificador con el valor más bajo en sus calificaciones es el G.729, a pesar de que los tres codificadores tienen igual porcentaje de pérdida su robustez ante las pérdidas es muy bajo en comparación con los otros dos codificadores.

La gráfica (a) de la figura 34 muestra que el valor promedio MOS más alto está en las muestras degradadas número uno. Por otro lado en la gráfica (b) el valor del MOS del codificador AMR se observa en las muestras degradadas número tres y para la gráfica (c) el iLBC este se puede ver en las muestras degradadas número dos.

## 5.5 EVALUACIÓN OBJETIVA

Para las pruebas objetivas se utilizó el método para calificación de la calidad vocal por percepción PESQ. La gráfica de la figura 35 muestra los resultados promediados de la evaluación objetiva PESQ. De color rojo el codificador G.729, de color azul AMR y de color amarillo iLBC. En la asíntota horizontal está ubicada desde la muestra 1 hasta la muestra 6 y la asíntota vertical están los valores de 1 a 5 que son los valores del MOS que arroja el PESQ.

Figura 35. PROMEDIO PESQ



Fuente: Autores

Los resultados porcentuales muestran que el valor que se mantiene superior en cada una de las muestras degradadas es el iLBC (amarillo), al contrario el valor que siempre es inferior para cada muestra es el G.729 haciéndolo el más sensible ante presencia de pérdidas.

comparando los resultados de la figura 34 y 35 el valor mínimo que arrojo en la gráfica (a) la prueba subjetiva para el codificador G.729 fue de 1.4 y la prueba objetiva dio un valor mínimo de 1.311. el valor más alto por la prueba subjetiva fue el del codificador iLBC con un valor promedio de 4.5 y un poco más alejado el valor esta vez de la evaluación objetiva con 3.387.

## 6. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha realizado un análisis y la posterior evaluación del rendimiento de tres codificadores de voz utilizando sus módulos de detección de voz respectivamente. Se simularon pérdidas teniendo en cuenta el índice de tasa de tramas pérdidas y se realizó la simulación del comportamiento de un usuario en una red LTE-A obteniendo que a medida que se aumenta la SNR el rendimiento del sistema igualmente aumenta, pero hay que tener en cuenta que a una relación señal a ruido alta la energía de símbolo va a ser menor, que influye a tener una pérdida mayor de información, para evitar esto se trabaja con modulaciones de un orden menor.

Al realizar la simulación de las pérdidas de paquetes en los codificadores se debe tener en cuenta que la extracción se debe dar en bloques o tramas y no en bits aleatorios ya que al transmitir paquetes se puede perder el paquete, pero si se pierde un bit del paquete puede degradar todo el bitstream y la decodificación no será satisfactoria.

Las evaluaciones subjetiva y objetiva demostraron fielmente que el codificador que mejor se comporto ante las pruebas de degradación fue el iLBC teniendo en cuenta que este tiene velocidad de transmisión mayor a la de los codificadores G.729 y AMR. cabe agregar que el iLBC tiene el mismo tamaño de entramado que el AMR. Aunque el iLBC no posee un módulo de mitigación de paquetes perdidos tiene la capacidad de interpolar el paquete anterior y posterior reemplazando el paquete perdido haciéndolo más robusto a la pérdida. Los resultados que se obtuvieron en base a las pruebas realizadas dan por hecho que este codificador tiene un impacto poco notable ante pérdidas comparado con los otros dos codificadores.

Respecto a la comparación de los resultados entre el MOS y el PESQ, estos muestran una relación muy cercana entre los valores de los codificadores G.729 y AMR, por ejemplo el valor más alto de la evaluación subjetiva para las muestras degradadas en el codificador G.729 fue de 1.9 mientras que en la evaluación objetiva fue de 1.83 así mismo el valor menor para la evaluación subjetiva fue de 1.4 y en la evaluación objetiva de 1.311, sin embargo en el iLBC los valores son más diferentes a pesar que ambas evaluaciones muestran como el codificador con más sensibilidad a pérdidas el G.729 seguido por el AMR y siendo el más robusto de los tres el iLBC. se debe considerar que las personas entrevistadas en la evaluación subjetiva tienen diferentes percepciones auditivas. Esto demuestra que es necesario la realización de diferentes evaluaciones para poder garantizar la fiabilidad de los resultados.

El indicador de calidad de canal (CQI) asegura una apropiada transmisión, que al aumentar el número de CQI va a mejorar el rendimiento del sistema, cumpliendo con el criterio de que la tasa de error de bloque (BLER) en el canal correspondiente no sobrepase el 10 por ciento.

## 7. RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO

- Se propone trabajar con codificadores multibanda para evaluar su rendimiento a medida que se varíe su tasa de transmisión en redes LTE-ADVANCE y hacer una comparación entre ellos.
- Se recomienda la implementación del simulador para poder mapear un sistema multiusuario, ya que el simulador presenta esta limitación.
- Utilizar otros estándares de evaluación de calidad paramétricas y no paramétricas como el POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Assessment) evolución del PESQ, ya que este puede trabajar en la banda super ancha.
- Realizar evaluación objetiva y subjetiva de la calidad de extremo a extremo con los distintos estándares, en un sistema en tiempo real y hacer comparaciones entre ellas para observar cual se comporta de la mejor manera.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Cox, Christopher. "AN INTRODUCTION TO LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS". En: John Wiley & Sons Ltd. (2012).

SEMINARIO: LTE (Long Term Evolution). "Capa Física y Planificación en LTE". (May. 2013). Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.

3GPP TS 36.213. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures V8.2.0 (Mar. 2008).

DifferenceBetween. <http://www.differencebetween.com/differencebetweenofdm-and-vofdma>. (31 de Jul. 2014).

Shapira, Yair. "SC-FDMA vs. OFDMA". (1 de May. 2012). 2:25 minutos.

3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation V10.0.0 (Dic, 2010).

C Williams, S McLaughlin, MA Beach, Exploiting multiple antennas for synchronization. IEEE Trans. Veh. Technol. 58(2), 773-787 (Feb. 2009).

Q Wang, S Caban, C Mehlführer, M Rupp, Measurement based throughput evaluation of residual frequency offset compensation in WiMAX, in Proc. 51st International Symposium ELMAR- 2009, Zadar, Croatia pp. 233-236 (Sept. 2009).

N Kolehmainen, J Puttonen, P Kela, T Ristaniemi, T Henttonen, M Moisio, Channel quality indication reporting schemes for UTRAN long term evolution downlink, in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring (VTC), pp. 2522-2526 (May. 2008).

S Schwarz, C Mehlführer, M Rupp, Calculation of the spatial preprocessing and link adaption feedback for 3GPP UMTS/LTE, in Proc. IEEE Wireless Advanced, London, UK (June 2010).

M Wrulich, M Rupp, Performance and modeling of LTE H-ARQ, in Proc. International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2009), Berlin, Germany (Feb. 2009) M Wrulich.

M Rupp, Computationally efficient MIMO HSDPA system-level modeling. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009 (2009). Article ID 382501.

TM Cover, Comments on broadcast channels. IEEE Trans. Inf. Theory. 44(6), 2524-2530 (Oct. 1998). doi:10.1109/18.72054.

H Weingarten, Y Steinberg, S Shamai, The capacity region of the gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel. IEEE Trans. Inf. Theory. 52(9), 3936-3964 (Sept. 2006).

U Niesen, P Gupta, D Shah, The balanced unicast and multicast capacity regions of

large wireless networks. *IEEE Trans. Inf. Theory.* 56(5), 2249-2271 (May 2010)

Mehlführer, C, Colom Ikuno, J, Simko, M, Schwarz, S, Wrulich, M, Rupp, M. "The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research". Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria.

Technical Specification Group RAN, E-UTRA; physical channels and modulation. 3GPP, Tech. Rep. TS 36.211 Version 8.7.0 (May 2009).

Technical Specification Group RAN, E-UTRA; physical layer procedures. 3GPP, Tech. Rep. TS 36.212 (March 2009).

Member of ITU, Recommendation ITU-R M.1225: Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000. International Telecommunication Union (ITU), Tech. Rep (1997).

L. Hentila, P. Kyosti, M Kaske, M Narandzic, M Alatossava, MATLAB implementation WINNER phase ii channel model ver1,1 (Dec.2007).

M Simko, C Mehlführer, M Wrulich, M Rupp, Doubly dispersive channel estimation with scalable complexity, in Proc. International ITG Workshop on Smart Antennas, (WSA 2010), Bremen, Germany, pp. 251-256 (Feb. 2010).

Technical Specification Group RAN, E-UTRA; physical channels and modulation. 3GPP, Tech. Rep. TS 36.211 Version 8.7.0 (May 2009).

D Skoutas, D Komnacos, D Vouyioukas, A Rouskas, Enhanced dedicated channel scheduling optimization in WCDMA, in Proc. 14th European Wireless Conference (EW) (June 2008).

S Schwarz, C Mehlführer, M Rupp, Low complexity approximate maximum throughput scheduling for LTE, in Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA (Nov. 2010).

P Gkonis, D Kaklamani, G Tsoulos, Capacity of WCDMA multicellular networks under different radio resource management strategies, in Proc. 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC), pp.60-64 (2008).

M Castañeda, M Ivrlac, J Nossek, I Viering, A Klein, On downlink intercell interference in a cellular system, in Proc. IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1-5 (2007).

T Nihtila, V Haikola, HSDPA MIMO system performance in macro cell network, in Proc. IEEE Sarnoff Symposium (2008).

SA Jafar, MJ Fakhereddin, Degrees of freedom for the MIMO interference channel. *IEEE Trans. Inf. Theory.* 53(7), 2637-2642 (July 2007).

Nortel, Performance evaluation of CL MIMO under different UE speed. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. R1-080384 (Jan. 2008).

Nokia y Nokia-Siemens-Networks, LTE performance benchmarking. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. R1- 071960 (Apr. 2007).

JC Ikuno, C Mehlhruher, M Rupp, A novel link error prediction model for OFDM systems with HARQ, in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), Kyoto, Japan (May 2011).

P Wu, N Jindal, Performance of hybrid-ARQ in block-fading channels: A fixed outage probability analysis. IEEE Transactions on Communications. 58(4), 1129-1141 (Apr. 2010).

L Boher, R Legouable, R Rabineau, Performance analysis of iterative receiver in 3GPP/LTE DL MIMO OFDMA system, in Proc. IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA), pp.103-108 (Aug. 2008).

M Wrulich, S Eder, I Viering, M Rupp, Efficient link-to-system level model for MIMO HSDPA, in Proc. of the 4th IEEE Broadband Wireless Access Workshop, New Orleans, LA, USA (Dec. 2008).

C Mehlhruher, M Wrulich, M Rupp, Intra-cell interference aware equalization for TxAA HSDPA, in Proc. 3rd IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC 2008), Santorini, Greece, pp. 406-409 (May 2008).

Juan Carlos Zarraga Estrada. "Compresion de voz para la transmision de comunicaciones inalambricas de banda ancha". Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Programa de Maestria y Doctorado en Ingenieria, Ingenieria Electrica-Telecomunicaciones. (2013).

José Luis Carmona Maqueda. "Reconocimiento de Voz Codificada sobre Redes IP". Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, Universidad de Granada. (2009).

Younes LABYAD, Mohammed MOUGHIT , Abderrahim Marzouk , Abdelkrim HAQIQ. "Impact of Using G.729 on the Voice over LTE Performance". Faculty of Sciences and Techniques, Settat, Morocco. 2014.

Cristian Daniel Segura Villalobos. "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE QoS/QoE EN SERVICIOS OTT MONTADOS SOBRE UNA PLATAFORMA LTE/IMS". Universidad de Chile. FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS. Santiago de Chile. (2012).

Mehlhruher Chistian, Wrulich Martin, Ikuno Colom Josep, Bosanska Dagmar, Rupp Markus. "SIMULATING THE LONG TERM EVOLUTION PHYSICAL LAYER". Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering Vienna University of Technology Gusshausstrasse 25/389, A-1040 Vienna, Austria En: EURASIP, (2009).

## ANEXO A: CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA CODIFICACIÓN DE VOZ PARA EL G.729, AMR E ILBC Y GENERACIÓN DE PERDIDA DE PAQUETES

- Código implementado para codificación de voz para el G.729, AMR e iLBC y generación de pérdida de paquetes:

- Código del Codificador G.729

```
import os
import subprocess
import random
import math

a = ['muestra.wav']
b = ['cod1', 'cod2', 'cod3']
c = ['deco1', 'deco2', 'deco3']
d = ['m_g729mue']
i=0
while i<3:
    filepath = a[i]
    fil = open(filepath, "rb")

    with fil:
        encabezado = fil.read(44) #se retira el encabezado
        dat = fil.read()
        filelpath = 'audio'
        fill = open(filelpath,"wb")

    with fill:
        fill.write(dat)

    subprocess.call(['./coderg729', filelpath,b[i],'1'])
# se realiza la codificacion
#en este paso se utiliza el archivo codificado (bitstream)

#para asi extraerle el porcentaje de paquetes que se desee

def main():
    with open(b[i], "rb") as f:
        while True:
```

```

        byte = f.read(1)
        if not byte:
            break
        yield(ord(byte))

with open(b[i], "rb+") as fh:
    codic=fh.read()

B=[]
for x in main():
    B.append(x) #contrumimos el vector con el valor de los bit
    #en Enteros

N.frame = 0
Ubic_frame=[]
Valor_byte_in=[]
Tipo_frame=[]
Ubic_frame_HEX=[]
h=len(B)
print("longitud del bitstream: ",h)
# se debe ubicar donde empieza cada trama,

#asi se digita el patron en decimal el que empieza cada una de ellas
for k in range(h):
    if B[k] == 33 and B[k+1] == 107 :
        N.frame +=1

    H = hex(k)
    Ubic_frame_HEX.append(H)
    Ubic_frame.append(k) #Ubicacion del inicio donde comienza cada frame

print('frame numero: ', Ubic_frame[2] )
print('numero de frames: ',N.frame)

#"se crea la lista de numero aleatorios"

def listaAleatorios(n,h):
    lista = [0]* n
    for i in range(n):
        lista[i] = math.floor(h*(random.random()))
        #if lista[i]== & :
    return lista

```

```

#se calcula el valor de las tramas que se extraeran
#E = N.frame
cantidad_frames_perdidas =16 # random.randint(0,M)# cantidad de tramas
#que se van a perder frames_perdidas =
#listaAleatorios(cantidad_frames_perdidas, N.frame)

#llama la funcion de una lista de bits aleatorias a las cuales eliminar

#print("cantidad de tramas que se deben perder: ",cantidad_frames_perdidas)
#print("cantidad de trames perdidas:",frames_perdidas)
s=0
while s<cantidad_frames_perdidas:
    T = frames_perdidas[s]
    ini = Ubic_frame[T] # byte de inicio
    fin = Ubic_frame[T+1]
    D = ini + 1

    with open('cerro.bit', 'rb') as fh:
        prueba = fh.read()

#****es aqui donde se debe modificar el codigo, b[i]
#sera la variable que se modificara

#y se guardara para luego ser llamada en

#el ejecutable del decodificador
while D >= ini and D < fin : #aca se debe dar la longitud de la trama,
#se debe modificar
    with open(b[i], 'rb+') as fh:
        fh.seek(D)
        fh.write(prueba)
        D = D + 0x1
    s+=1
#for v in frames_perdidas:
#print('ubicacion de las tramas que se perdieron %s'%(Ubic_frame.HEX[v]))

#"DECODIFICACION"

subprocess.call(['./decoderg729', b[i], c[i]])#se realiza la decodificacion

file2Path = c[i]
fil2 = open(file2Path, "rb") #abrimos y leemos el archivo decodificado,
#creado por el decoder g.729
with fil2:

```

```

datos = fil2.read()

#se junta el archivo modificado con el encabezado para formar

#el archivo de audio .wav
audiofinal = encabezado + datos

file3Path = d[i] + '.wav'
fil3 = open(file3Path, 'wb')
with fil3:
    fil3.write(audiofinal)
i += 1

```

### • Código del Codificador AMR

```

import os
import subprocess
import random
import math

a = ['muestra.wav']
b = ['cod1']
c = ['decol']
d = ['mamr.mue']
i = 0
while i<3:
    filepath = a[i]
    fil = open(filepath, "rb")

    with fil:
        encabezado = fil.read(44)
        dat = fil.read()
    filelpath = 'audio'
    fill = open(filelpath,"wb")

    with fill:
        fill.write(dat)

    subprocess.call(['./amrnb-encoder-vad2','-dtx','MR515', filelpath,b[i]])
#en este paso se utiliza el archivo codificado (bitstream)
#para asi extraerle el porcentaje de paquetes que "
#se desee

```

```

def main():
    with open(b[i], "rb") as f:
        while True:
            byte = f.read(1)
            if not byte:
                break
            yield(ord(byte))

B = []
for x in main():
    B.append(x) #contrumimos el vector con el valor de
#los bit en Enteros

N_frame = 0
Ubic_frame=[]
Valor_byte_in=[]
Ubic_frame_HEX=[]
h=len(B)

for k in range(h):
    if B[k] == 12:
        N_frame +=1

    H = hex(k)
    Ubic_frame_HEX.append(H)
    Ubic_frame.append(k) #Ubicacion del inicio donde comienza cada frame

print('numero de frames: ',N_frame)

#"se crea la lista de numero aleatorios"

def listaAleatorios(n,h):
    lista = [0]* n
    for i in range(n):
        lista[i] = math.floor(h*(random.random()))
        #if lista[i]== & :
    return lista

cantidad_frames_perdidas =10 # random.randint(0,M)
# cantidad de bits que se van a perder

```

```

frames_perdidas = listaAleatorios(cantidad_frames_perdidas, N_frame)
#llama la funcion de una lista de bits aleatorias a las cuales eliminar

print('frames:', frames_perdidas)
s = 0

while s < cantidad_frames_perdidas:
    T = frames_perdidas[s]
    ini = Ubic_frame[T] # byte de inicio
    fin = Ubic_frame[T + 1]
    D = ini + 1

    with open('cerro.bit', 'rb') as fh:
        pruebas = fh.read()

# ****es aqui donde se debe modificar el codigo,
#b[i] sera la variable que se modificara
#y se guardara para luego ser llamada en
# el ejecutable del decodificador
while D >= ini and D < fin: # aca se debe dar la longitud de la trama,
#se debe modificar
    with open(b[i], 'rb+') as fh:
        fh.seek(D)
        fh.write(pruebas)
        D = D + 0x1
    s += 1

#print('lista de aleatorios: %s'(lista))

#for v in bit_perdido:
    #print('ubicacion de los bits que se perdieron %s'%(Ubic_bit_HEX[v]))

#"DECODIFICACION"

subprocess.call(['./amrnb-decoder', b[i], c[i]])

file2Path = c[i]
fil2 = open(file2Path, "rb")#abrimos y leemos el archivo decodificado,
#creado por el codeILBC
with fil2:
    datos = fil2.read()

audiofinal = encabezado + datos #juntamos los datos decodificados y
#la cabecera

```

```

file3Path = d[i] + '.wav'
fil3 = open(file3Path, 'wb')
with fil3:
    fil3.write(audiofinal)
i += 1

```

## • Código del Codificador iLBC

```

import os
import subprocess

a = [' muestraN.wav']
b = ['codN']
c = ['decN']
d = ['m_ilbccris1','m_ilbccris2','m_ilbccris3']
e = ['packet_lost1.txt','packet_lost2.txt','packet_lost3.txt']
i=0
while i<3:
    filepath = a[i]
    fil = open(filepath, "rb")

    with fil:
        encabezado = fil.read(44)
        dat = fil.read()
        filelpath = 'audio'
        fill = open(filelpath,"wb")

    with fill:
        fill.write(dat)

    fillost = e[i]

    subprocess.call(['./sound.exe', '20',filelpath,b[i],c[i],fillost])

    file2Path = c[i]
    fil2 = open(file2Path, "rb")#abrimos y leemos el archivo decodificado,
    #creado por el codeILBC
    with fil2:
        datos = fil2.read()

    audiofinal = encabezado + datos #juntamos los datos

```

```
#decodificados y la cabecera
```

```
file3Path = d[i] + '.wav'  
fil3 = open(file3Path, 'wb')  
with fil3:  
    fil3.write(audiofinal)  
i += 1
```