



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DESARROLLO DE UN SISTEMA CON SOFTWARE
LIBRE PARA LA PLANIFICACIÓN Y
DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE
COMUNICACIONES BASADOS EN LTE”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TOMÁS JUNIOR GUERRERO SANTOS

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos al Ph.D. Boris Ramos, quien ha inculcado sus valiosas enseñanzas en este trabajo de titulación, así mismo a mis padres y hermana, a mi esposa y a mi hijo ya que por ellos soy quien soy; son las personas que me dan ese cariño y calor humano necesario, son las que han velado por mi salud, mis estudios, mi educación, alimentación entre otros, son a ellos a quien les debo todo.

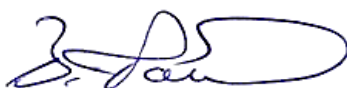
DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres y hermana, a mi esposa y a mis hijos por ser quienes han estado a mi lado en todo momento, dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir hacia mi meta, rompiendo todas las barreras que se me presenten.

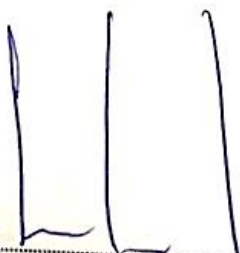
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



.....
Ph.D. César Martín
SUBDECANO DE LA FIEC



.....
Ph.D. Boris Ramos Sánchez
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



.....
M.Sc. César Yépez F.
MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Tomás Guerrero Santos

RESUMEN

La tecnología de comunicación inalámbrica, más conocida como LTE (Evolución a Largo Plazo), es uno de los sistemas más interesantes de los últimos tiempos pues, aparte de ofrecer mejoras significativas sobre las tecnologías antecesoras, muestra la posibilidad de interconexión con diversas redes que no sean exclusivamente redes celulares, dando la apertura a una convergencia completa de redes de datos, voz y video además su interconexión con todo dispositivo que utilice el protocolo IP. La evolución de LTE es sin duda uno de los pasos más significativos de la tecnología celular hacia el futuro, pues alcanza velocidades iguales o superiores que las obtenidas mediante medios de transmisión cableados, con baja latencia y entrega de datos eficiente. LTE está diseñado con técnicas avanzadas de acceso derivadas de OFDMA en el canal de radio y un ancho de banda flexible, permitiendo a los operadores de telefonía celular poder migrar sus redes de HSPA a LTE, para lo cual se dispone de una nueva arquitectura de red propia de esta tecnología pero a su vez muy compatible para su actualización, por eso permite soportar tráfico de conmutación de paquetes, con manejo de calidad de servicio a una mínima latencia. En el capítulo I se indica el marco referencial, identificando el problema y la solución propuesta, los objetivos a seguir y el alcance que tendrá el proyecto. En el capítulo II se realiza una introducción de los aspectos fundamentales del LTE 4G, la arquitectura utilizada en esta tecnología, la compatibilidad con las tecnologías antecesoras y las principales características implementadas. En el capítulo III se describe las generalidades del canal inalámbrico, los efectos de desvanecimiento de la señal, las frecuencias para LTE, se detalla el uso de modelos de propagación para diferentes ambientes (Urbano, Suburbano y Rural), cálculos del balance de radio para ambos enlaces y capacidades de las celdas. En el capítulo IV se detalla las características del sistema, los requerimientos y modelo de base de datos, así como el diseño de la interfaz. Finalmente en el capítulo V se realiza la simulación del canal inalámbrico con distintas bandas de frecuencia y condiciones geográficas. Así mismo se presentan los resultados obtenidos en la simulación y se compara con las especificaciones establecidas en LTE 4G.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO 1.....	3
1. MARCO REFERENCIAL.....	3
1.1 Identificación del problema.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Metodología.....	6
1.5 Alcance.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. FUNDAMENTOS DE LTE 4G.....	9
2.1 Características del sistema LTE 4G.....	9
2.2 Arquitectura de red LTE 4G.....	10
2.3 Canales físicos para enlace ascendente y descendente.....	13
2.4 Tecnologías a nivel físico: OFDMA y SC-FDMA.....	16
2.5 Interfaz de radio LTE.....	22
2.6 Técnicas de codificación y modulación.....	25
2.7 Sistemas de múltiples antenas MIMO.....	26
2.8 Agregación de portadoras.....	29
CAPÍTULO 3.....	31
3. PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO.....	31
3.1 Plan de frecuencias.....	32

3.2	Asignación de celdas: zonas de coberturas, ID y tipos.	33
3.3	Modelos de propagación.	34
3.4	Proceso de planeación y dimensionado de la red LTE 4G.....	36
3.5	Balance de radio enlace ascendente y descendente.	40
3.6	Nivel señal ruido requerido.	43
3.7	Eficiencia espectral.....	44
3.8	Cobertura basada en el número de sitios.	46
3.9	Modelos de tráfico en LTE 4G.	47
3.10	Densidad y tipo de suscriptores.....	50
3.11	Cálculo de la capacidad y tasa de transmisión.	52
CAPÍTULO 4.....		55
4.	DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA.....	55
4.1	Ingeniería de software.	55
4.2	Herramientas de desarrollo.	56
4.3	Características del sistema.....	57
4.4	Condiciones específicas del sistema.	58
4.5	Diseño de la arquitectura de la solución.	58
4.6	Diseño de los componentes y procesos a automatizar.	59
4.7	Diseño de la base de datos.	61
4.8	Diseño de la interfaz gráfica.	66
CAPÍTULO 5.....		68
5.	IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL SISTEMA.....	68
5.1	Construcción del sistema.....	68
5.2	Instalación de componentes.	69
5.3	Configuración de parámetros iniciales.	71
5.4	Validación y análisis de resultados finales.	88
5.4.1	Cálculo de cobertura por transmisor.	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		96
BIBLIOGRAFÍA.....		98

CAPÍTULO 1

1. MARCO REFERENCIAL.

El desarrollo de las comunicaciones móviles ha ido evolucionando notablemente durante los últimos años mediante la implementación de tecnología avanzada, permitiendo a los usuarios navegar a altas velocidades y aprovechar de manera óptima el ancho de banda. En esta etapa se identifica la problemática a analizar; la cual, a través de definiciones, estándares y procedimientos se determinará el desarrollo de una solución viable para la temática presentada.

1.1 Identificación del problema.

La tecnología LTE es el estándar de comunicación móvil más reciente en la actualidad, generalmente conocido a nivel de usuario y en forma comercial como cuarta generación 4G; como en toda tecnología móvil su implementación en áreas determinadas se basa en la planificación-dimensionamiento de las redes, abarcando aspectos de radio, cobertura, zonas geográficas, tráfico de red, cantidad y movilidad del usuario.

El inconveniente presentado es que actualmente no existe un aplicativo informático desarrollado en software libre para el procesamiento en simulaciones de redes de acceso de radio LTE 4G, que pueda estar al alcance del sector académico o experimental, existiendo únicamente en el mercado actual software comercial que no consideran los requerimientos sociales ni técnicos pertinentes a un diseño idóneo de la red, sino que son orientados a las necesidades propias de empresas y operadoras de telefonía móvil predominantes en el mundo de las telecomunicaciones.

En esta propuesta se plantea diseñar e implementar una aplicación web con herramientas de software libre para diseñar-dimensionar redes de acceso de radio, logrando determinar así los recursos necesarios para implementar una red LTE 4G en una área geográfica específica, a partir de parámetros como la densidad de usuarios en diferentes entornos, perfil en términos de la demanda de velocidad de datos, tasa de uso, clase de tráfico de voz-datos, requisitos de

calidad, tolerancia a la calidad inesperada, localización y altura de los edificios, potencia de transmisión de la estación base y móvil, tipo de antena, ganancia, pérdidas y el espectro disponible.

El sistema web obtendrá el cálculo del radio de cobertura máximo para cada celda, en base a la selección de un modelo de propagación, además del cálculo de la capacidad que soporta la celda en el enlace de ascendente y descendente, para una red de acceso de radio LTE 4G. Además se podrá utilizar diversos esquemas de configuración MIMO con antenas de hasta 8x8 en DL y 4x4 en UL, aumentando considerablemente la tasa global de transmisión a través del uso de antenas simultáneas. Finalmente se podrá cuantificar indicadores claves como intensidad de señal de recepción, niveles de interferencia, esquemas de codificación y la tasa efectiva de transmisión para ambos enlaces.

1.2 Justificación.

Hoy en día el Ecuador se encuentra en una etapa de transformación y adaptación a las tendencias de vanguardia caracterizada por la actualización de conocimientos e integración de nuevas tecnologías que mejoren la calidad de vida de la población; sin embargo el ámbito de las telecomunicaciones presenta problemas en el diseño de redes de datos en banda ancha debido al incremento de usuarios, la limitada capacidad de los recursos-herramientas manejados hasta el momento; es por ende que la presente investigación plantea el desarrollo de un sistema para la planificación-dimensionamiento de la red de acceso de radio LTE 4G en nuestro país que permita obtener de forma eficiente los datos clave de diseño como las predicciones de una determinada zona geográfica, parámetros necesarios para prestar un grado de servicio adecuado, número de nodos requeridos en la red; además permitirá apreciar la aplicación de los procesos técnicos a través de simulaciones y ponderaciones del comportamiento de la red diseñada; la implementación del proyecto no solo resuelve el percance planteado sino que contribuye al desarrollo del área desde el punto de vista técnico sino que servirá de herramienta didáctica a estudiantes de ingeniería en telecomunicaciones para un mejor entendimiento del funcionamiento de la red de acceso de radio, también garantizará un diseño más completo de proyectos

afines y beneficiará al sector experimental sirviendo de pauta para profundizar el estudio de métodos más eficientes e íntegros a la hora de diseñar e implementar redes de telecomunicaciones.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

Desarrollar un sistema de planificación y dimensionamiento de la red de acceso de radio en LTE 4G mediante la aplicación de un sistema web gestionado en software libre para realizar simulaciones y predicciones en una determinada zona geográfica.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Recopilar fundamentos teóricos sobre los ejes de la temática propuesta mediante una investigación bibliográfica que permita caracterizar los lineamientos conceptuales del trabajo pertinente.
- Diseñar el modelo de datos y estructuración del sistema a través del uso de las potencialidades-pericia formadas durante el ejercicio profesional de tal forma las simulaciones presente resultados correctos e información viable en tiempo real.
- Desarrollar las interfaces de los módulos de planificación-dimensionamiento de redes de acceso de radio LTE mediante el contraste con las normativas técnicas vigentes afines a los estándares aplicados.
- Modelar una herramienta útil y de fácil manejo al momento de planificar redes para agilizar los procesos e integrar la información generada.
- Determinar la configuración óptima LTE y ajuste de los parámetros operacionales para maximizar el rendimiento del sistema.
- Implementar reportes y resultados de simulaciones en el sistema mediante un análisis de las condiciones controladas para retroalimentar la dinámica del software al ponderar el dimensionamiento de la red.

1.4 Metodología.

Para la elaboración del presente proyecto se efectúa un procedimiento progresivo que se subdivide en fases denotándolas de la siguiente manera:

En primera instancia se ejecuta un estudio exhaustivo de los estándares del 3GPP sobre la red de acceso de radio de LTE, y comprender las especificaciones técnicas requeridas para establecer una comunicación óptima entre los equipos transmisores y receptores de la red.

Como segunda fase se debe compilar información teórica que facilite la comprensión de los criterios citados en la fundamentación del trabajo investigativo, mediante el estudio de fuentes documentadas como libros, webs y artículos de investigación relacionados al proceso de planificación y dimensionado de la red de acceso de radio de LTE, considerando los parámetros iniciales utilizados para el cálculo del balance de enlace y determinar la cobertura y capacidad de una estación base ;además es necesario analizar los modelos de propagación, el tráfico de la red y topografía del terreno debido a que son variables clave en el diseño de una red de datos.

Como tercera etapa se diseñará el aplicativo web en base al estándar 3GPP, el cual contará con una base de datos que gestionará el registro y obtención de resultados por usuario en los diferentes módulos secuenciales como: parámetros iniciales, sensibilidad del receptor, desvanecimiento, cantidad de usuarios, densidad de población, área geográfica, radio de cobertura de las celdas, cantidad de celdas, calidad de la señal recibida, tasa de transmisión efectiva y reportes por usuarios de las simulaciones.

En la cuarta fase se evaluará el sistema mediante monitoreo y control de datos para determinar las deficiencias o vulnerabilidades que pudieran presentarse, se ejecutan un sinnúmero de pruebas aleatorias, para verificar tanto los tiempos de respuestas como la validez de los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones.

Como última fase se desplegarán simulaciones en el aplicativo web dentro de varios entornos geográficos al mismo tiempo; el sistema podrá realizar

comparaciones para retroalimentar la configuración de ciertos parámetros y así obtener los mejores resultados en la transmisión de datos de la red LTE 4G.

1.5 Alcance.

Se desarrollará un sistema web que permita simular el despliegue de una red de acceso de radio LTE 4G en un área geográfica, considerando las siguientes etapas:

1) Etapa inicial.- En esta fase compete el registro en el aplicativo de información previa a la planificación de la red; como densidad de usuarios en las diferentes áreas, demanda de velocidad de datos, tasa de uso, clase de tráfico de datos según tipo de abonados, requisitos de calidad esperados, localización y altura de los edificios, potencia de transmisión de la estación base y del móvil, tipo de antena, ganancia, pérdidas, sensibilidad del receptor, espectro disponible, entre otros. Dentro del análisis del tráfico de la red, se consideran varios tipos de clientes que utilizarán el sistema de acuerdo a su ubicación geográfica; tales servicios pueden ser voz, datos, VoIP, video conferencia, transferencias FTP,...; para ello es necesario definir perfiles de usuarios según sus gestionamientos de red, clasificándolos como estándar, negocios, residenciales y móviles.

2) Planificación numérica y detallada (dimensionado).- Implica la selección del modelo de propagación utilizados principalmente para la realización de estudios de viabilidad durante el despliegue inicial de la red de acceso de radio. Se utilizará un modelo simplificado que posea factores de corrección en los entornos urbanos, suburbanos y rurales, para predecir las pérdidas en la trayectoria de la señal con una determinada frecuencia que permita la máxima cobertura de la celda basada en el balance de enlace, es decir, la cantidad de señal óptima que llega al borde de la celda. Esto depende del margen de desvanecimiento, el rendimiento en el borde de la celda, la carga promedio de la red, etc. Así mismo se evalúa la capacidad de la red de acuerdo a la cantidad de datos demandados por los usuarios y el volumen de tráfico de datos.

3) Optimización de los parámetros de planificación para garantizar un grado de calidad de servicio.- Se obtendrán los indicadores claves de rendimiento de la red de acceso de radio, mediante datos como la relación del nivel de potencia de

señal útil con el nivel de potencia de ruido y señales interferentes, dicho proceso permite determinar el mejor esquema de modulación / codificación MCS del enlace y con esto las velocidades de transmisión máximas, la capacidad total por celda en Mbps y la tasa entregada con éxito de los bits sobre un canal de comunicación. El tráfico generado en una red celular es determinado por el número de canales disponibles y la posibilidad de hallar canales ocupados durante las horas picos. Cuando se solicita el servicio de llamada al sistema y todos los canales de radio están en uso, el usuario es bloqueado o se le asigna un tiempo de espera hasta que se libere un canal. Por último, se podrá mejorar el nivel de transmisión de datos utilizando MIMO de hasta 8x8 en el DL y 4x4 en el UL, dependiendo del tipo de terminal móvil y condiciones del canal de radio.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS DE LTE 4G.

En esta sección se conjuga todos los criterios técnicos que definen y sustentan a la tecnología LTE 4G desde la perspectiva de telecomunicaciones; también se caracteriza todas las potencialidades que delimitan la investigación; a la vez que se justifica la razón de su uso en el medio socioeconómico ecuatoriano.

2.1 Características del sistema LTE 4G.

El sistema de comunicación móvil LTE 4G está descrito en la versión 10 del 3GPP, superando notablemente las características de las versiones 8 y 9. Por tal motivo, la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) la considera una tecnología 4G, con mejoras en las tasas de transmisión, gracias a la implementación de agregación de portadoras, permitiendo incrementar el ancho de banda hasta 100 MHz, aumentando la velocidad de subida y descarga de información, la eficiencia espectral y la calidad de señal [1].

La transmisión del enlace ascendente con esquema de configuración MIMO llega a eficiencias espectrales pico de hasta 15 bps/Hz y en el enlace descendente de hasta 30 bps/Hz [1].

LTE 4G estableció varios requerimientos, entre los cuales tenemos:

- Aumento de la velocidad máxima de datos, enlace descendente hasta 3 Gbps, y en el enlace ascendente hasta 1.5 Gbps [1].
- Mejora del rendimiento en los bordes de la celda, 2,6 bps/Hz/celda para descarga y 2 bps/Hz/celda para subida de información [2].
- Implementación de agregación de portadoras, aumento de la utilización de técnicas de múltiples antenas y el apoyo a los nodos de retransmisión [1].
- Capacidad de interconexión con otros sistemas anteriores a esta tecnología [1].
- Soporta conexiones de VoIP mayores a 60 sesiones / MHz / celda [2].

2.2 Arquitectura de red LTE 4G.

La arquitectura de la red LTE 4G está basada en el servicio de transferencia de paquetes IP, denominándose formalmente como Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS), y que cuenta con componentes fundamentales como son la red de acceso E-UTRAN y el dominio de paquetes EPC de la red troncal [3].

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los terminales de los usuarios y las redes de paquetes externas como Internet. La calidad de servicio de transferencia de paquetes IP (como por ejemplo la velocidad de transmisión o los retardos admisibles) puede configurarse en función de las necesidades de los servicios finales, cuyo establecimiento se realiza en plataformas externas [3].

Tal como se muestra en la Figura 2.1, la arquitectura del sistema EPS está conformada por tres principales componentes.

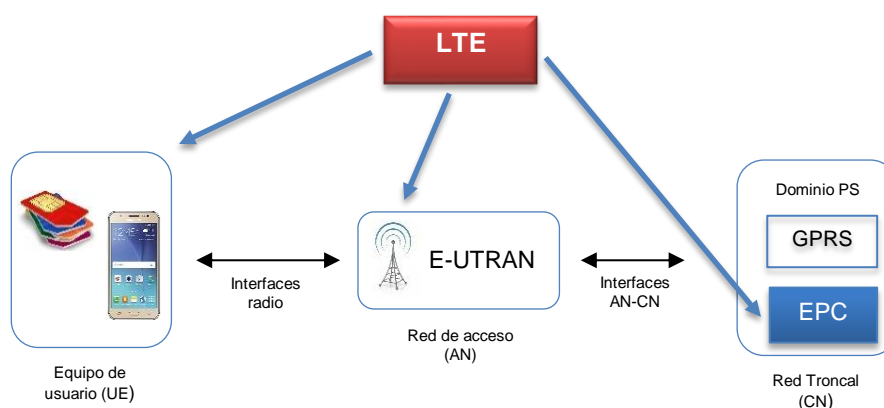


Figura 2.1: Sistema de paquetes evolucionado (EPS) [3]

Equipo de usuario (UE)

Es un dispositivo inalámbrico de largo alcance que sirve para establecer comunicación móvil entre varios usuarios conectados a una red celular. Este equipo contiene dos elementos fundamentales: el terminal móvil o celular y un Módulo de Identificación del Suscriptor (SIM), encargado de almacenar información y mantener el enlace con los servicios proporcionados por la red [3].

E-UTRAN

La red de acceso evolucionada E-UTRAN es la responsable de mantener y gestionar los recursos de radio para la provisión de servicios en LTE de forma eficiente, permitiendo la conectividad entre los equipos de usuario y la red troncal. En la red E-UTRAN se encuentra los Nodos B evolucionado (eNB) o estaciones bases que proporcionan los mecanismos para la transmisión y recepción de la señal inalámbrica, interactuando con los UE por medio de la interfaz de aire [4].

Una de las principales funciones de los eNB es la asignación dinámica de los recursos de radio en el canal ascendente o descendente, control de movilidad de UE, control de interferencia entre estaciones bases y transferencia de paquetes IP hacia los usuarios móviles y viceversa.

EPC

La red troncal de paquetes evolucionado EPC representa el núcleo del sistema de comunicaciones LTE, conformado por un Servidor de Suscriptores Locales HSS, la Entidad de Administración de Movilidad MME, el Servicio de Puerta de Enlace (S-GW) y la Puerta de Red de Paquetes de Datos P-GW, las cuales proporcionan acceso y uso de los servicios ofrecidos por los proveedores de comunicaciones.

1. El HSS es la base de datos que contiene información del usuario móvil, concediendo información necesaria para la conectividad como: identificadores universales de usuarios y servicios, seguridad, autenticación, localización, establecimiento de la sesión y la llamada [3].
2. El MME brinda gestión de movilidad a los usuarios registrados en la red, permite la autorización del acceso a los equipos mediante los datos obtenidos por el HSS y se encarga de la señalización requerida para mantener y liberar los servicios portadores EPS [3].
3. El S-GW funciona como un enrutador para dirigir los datos entre la red troncal EPC y la estación base. Se pueden presentar varios S-GW en la red LTE para ofrecer los servicios de enlace a usuarios en una determinada zona

geográfica. El S-GW se encarga del almacenamiento temporal de paquetes IP y de la gestión de movilidad con otras redes 3GPP [3].

4. El P-GW permite la conectividad de los equipos usuarios con redes externas como Internet, donde todo el tráfico IP dirigido o enviado desde un terminal LTE hacia la red externa sea encaminado por el P-GW, logrando así establecer y mantener el intercambio de información [3].

En la Figura 2.2 se presentan las interfaces de conexión entre la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC denominadas S1, las cuales suministran los recursos necesarios para el acceso de los terminales móviles conectados en el sistema LTE a los diversos servicios alojados en el EPC.

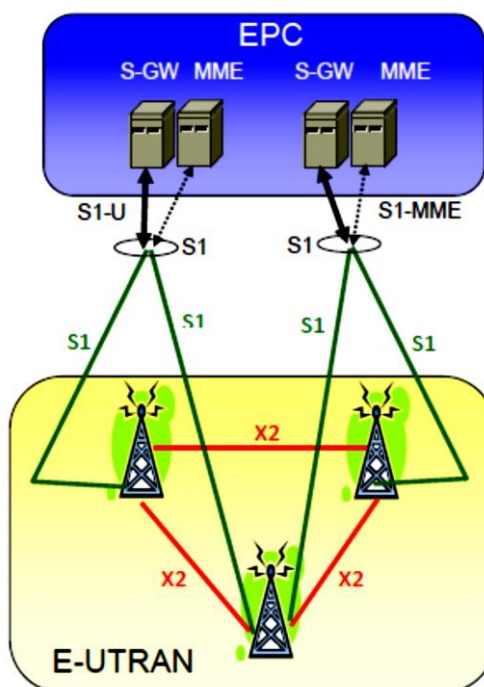


Figura 2.2: Arquitectura básica EPS [5]

La interfaz S1-MME permite dar soporte al plano de control, como por ejemplo la configuración de un eNB; y la interfaz S1-U al plano de usuario, donde se emplean los diversos protocolos para el envío de tráfico. Esta división de propiedades permite diferenciar los servicios de señalización, control y transmisión de datos a los usuarios. También se encuentra la interfaz X2 que conecta las estaciones

bases para intercambiar mensajes de señalización y control eficiente de los recursos de radio [5].

2.3 Canales físicos para enlace ascendente y descendente.

Un canal físico es una señal radioeléctrica que permite la transmisión eficiente de datos, a través del interfaz aire; se diferencian en canales de control, que son los que transportan señales de control generadas a nivel de capa física o mensajes de control generados en capas superiores, y en canales físicos de tráfico, los cuales transportan datos de usuario.

En el enlace descendente encontramos los siguientes canales físicos:

Canal Físico Compartido Descendente (PDSCH)

Se trata de un canal encargado de transmitir información de usuario, a partir de la información entregada por el canal de transporte DL-SCH. Se asigna sólo cuando el usuario recibe algún dato y como resultado de la gestión de recursos del enlace descendente. Considera los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM codificados con turbo códigos de tasa 1/3 [6].

Canal Físico de Multidifusión (PMCH)

Se utiliza para transportar información de Sistemas Multimediales de Multidifusión (MBMS) en redes de frecuencia simple (SFN). Su estructura es similar a la del canal PDSCH, diferenciándose básicamente en la disposición de los símbolos de referencia, el uso obligatorio del prefijo cíclico extendido y la no posibilidad de aplicar el mecanismo de retransmisión híbrido (HARQ) al transmitirse la señal para múltiples terminales móviles [6].

Canal Físico de Difusión Completa (PBCH)

Es el encargado de transportar la información básica de la red, a través del Bloque Máster de Información (MIB), la cual consiste en 4 bits de identificación de canalización, 3 bits para información de mecanismos de retransmisión híbrida HARQ y 7 bits utilizados como número de identificación de trama. Utiliza la modulación QPSK y se transmite en las 72 subportadoras centrales, ocupando 6RB en los símbolos OFDM 0, 1, 2 y 3 de la primera subtrama [6].

Canal Físico de Control Descendente (PDCCH)

El canal transporta los denominados Controles de Información Descendente (DCI), con información de asignación de recursos y tráfico compartido. El DCI está formado por la agregación de uno o varios Elementos de Canal de Control (CCE) en 9 conjuntos de cuatro parámetros denominados Grupos de Elementos de Recursos (REGs), transmitiendo información del esquema de modulación – codificación utilizado, control de potencia del enlace ascendente e información HARQ. Cada REG ocupa cuatro subportadoras mapeado en cuatro símbolos QPSK, en total 36 subportadoras como se muestra en la Tabla 1. El tipo de información transportada por el DCI corresponde a los formatos 0, 1, 2 y 3 [6].

Formato DCI	Número de CCEs	Número de REGs	Número de REs	Número de bits
0	1	9	36	72
1	2	18	72	144
2	4	36	144	288
3	8	72	288	576

Tabla 1: Configuraciones para el PDCCH

Canal Físico de Control para Indicador de Formato (PCFICH)

Es utilizado para informar al terminal móvil sobre el número de símbolos utilizados para el envío del canal PDCCH, a través del Indicador de Formato de Canal (CFI), que está conformado por 32 bits mapeados con modulación QPSK. El PCFICH se mapea en el primer símbolo OFDM de cada subtrama en cuatro grupos de cuatro subportadoras, donde el primer grupo de subportadoras determina el valor de identificador de celda y la canalización del sistema. Si se utilizan técnicas MIMO, se envía la señal por el mismo puerto de antena del PBCH [6].

Canal Físico Indicador de Retransmisión Híbrida (PHICH)

Es el canal dedicado para retornar las confirmaciones de respuestas ACK/NACK del enlace ascendente. Utiliza modulación QPSK con una duración normal de un símbolo por subtrama, o extendida con tres símbolos en la subtrama. Para transmitir información a múltiples usuarios utiliza un conjunto de secuencias ortogonales denominadas Walsh [6].

Para el enlace ascendente, se utilizan los siguientes canales físicos:

Canal Físico Compartido Ascendente (PUSCH)

Es el canal encargado de transmitir información de usuario y control procedente de capas superiores hacia la estación base, utilizando señales SC-FDMA. No es un canal dedicado, sino que se asigna cuando existen datos enviados a través del canal ascendente. Se considera el QPSK, 16 QAM y 64 QAM como esquemas de modulación, siendo el último opcional según el tipo de categoría de terminal móvil. Así mismo aplica codificación turbo código 1/3 y mecanismo de retransmisión HARQ mediante el uso de código de redundancia cíclico CRC de 24 bits [6].

Canal Físico de Control Ascendente (PUCCH)

Es utilizado para transmitir información de control como solicitudes de asignación de recursos, ACK/NACK de los paquetes del enlace descendente e información de calidad del canal CQI para optimizar la asignación de recursos en la descarga de datos. El PUCCH se ubica en los extremos de la banda de frecuencia del sistema LTE, permitiendo que el PUSCH ocupe toda la parte central del espectro disponible. Así mismo brinda robustez frente a desvanecimientos enviando la señal de control por duplicado, en la primera y segunda ranura temporal de la subtrama. El número de radio bloques ofrecidos en el canal PUCCH dependen de la canalización empleada, tal como se muestra en la Tabla 2.

Canalización (MHz)	Número de PRBs asignados	Número de canales PUCCH
1.4	2	1
3	4	2
5	8	4
10	16	8
20	32	16

Tabla 2: Número de PRBs para PUCCH

El número de PRBs asignados es el doble del número de canales PUCCH debido al mecanismo de diversidad en frecuencia [6].

Canal Físico de Acceso Aleatorio (PRACH)

Es el encargado de reestablecer la conexión con el sistema, gestiona el acceso inicial del terminal móvil a la red, el número máximo de reintentos y genera los mecanismos de traspaso de información. El PRACH transmite un prefijo cíclico y un preámbulo enviado por el UE a la red, modulado en SC-FDMA en 72 subportadoras contiguas, es decir 6RB [6].

2.4 Tecnologías a nivel físico: OFDMA y SC-FDMA.

La tecnología de acceso de radio para LTE proporciona mecanismos para ofrecer mayor eficiencia espectral y robustez frente a los desvanecimientos de la señal inalámbrica. Con la finalidad de proporcionar a los operadores flexibilidad en el despliegue de red, para el enlace descendente se utiliza la técnica de Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA); y en el enlace ascendente, con el fin de reducir el consumo de potencia en los terminales móviles, se aplica la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Simple (SC-FDMA). Además puede usar la transmisión y recepción con múltiples antenas (MIMO) [7].

OFDMA

En el enlace descendente, cuando la antena de la estación base transmite información para los diversos móviles conectados a la red LTE, la técnica OFDMA permite asignar varios símbolos modulados a diferentes usuarios. Este proceso aumenta la cantidad de datos enviados, a través de transmisiones simultáneas en subportadoras discontinuas [7].

Para lograr el proceso de acceso múltiple, OFDMA permite la división del canal en varias subportadoras, siendo distribuidas según la necesidad del servicio solicitado por el usuario, las condiciones de interferencia de la señal y la distancia del móvil con la estación base. El sistema es dinámico al modificar constantemente las asignaciones de subportadoras si las condiciones del canal mejoran. Estas subportadoras pueden encontrarse juntas o separadas sin afectar la calidad de información recibida por el usuario. En la Figura 2.3 se muestra una representación del espectro de la señal OFDMA.

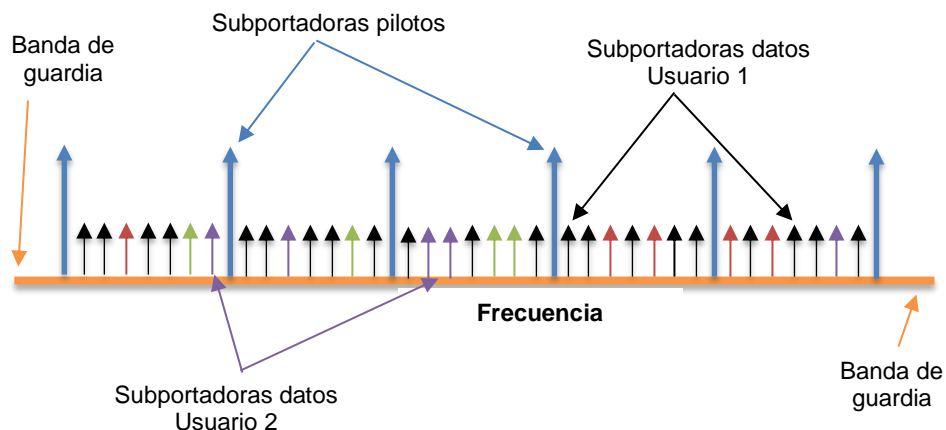


Figura 2.3: Espectro señal OFDMA

Esta técnica de acceso presenta bastantes ventajas, de las cuales se podrían considerar las siguientes como principales:

Diversidad multiusuario: Se asigna a los usuarios las subportadoras según el estado actual de interferencia señal ruido, siendo el canal inalámbrico inestable, presentando desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras. Así se consigue una mayor velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. En la Figura 2.4 se presenta la asignación de paquetes a múltiples usuarios OFDMA [6].

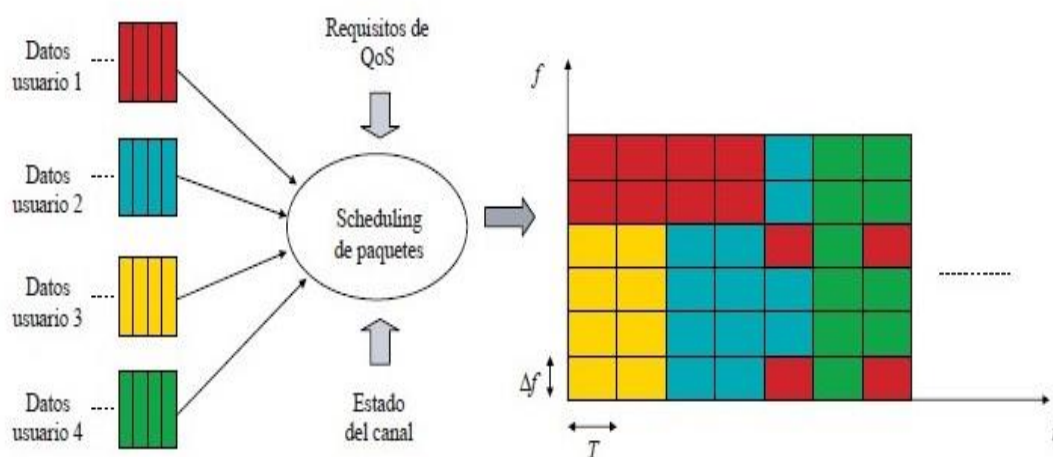


Figura 2.4: Asignación de paquetes en OFDMA [6]

Diversidad frecuencial: Las subportadoras pueden estar de manera contiguas o dispersas, siendo asignadas de acuerdo a la necesidad de transmisión de cada usuario.

Robustez en multitrayecto: Se utilizan técnicas de ecualización y control de información para disminuir interferencia y distorsión de señal en el receptor, aplicando prefijo cíclico en la transferencia de datos.

Flexibilidad de banda: De acuerdo a la velocidad de transmisión solicitada por el terminal móvil y las condiciones del canal de propagación, se pueden asignar más o menos subportadoras por canal a los usuarios [6].

En la Figura 2.5 se muestra el esquema de transmisión en OFDMA, donde varios símbolos destinados a los usuarios son mapeados en el espectro y enviados al receptor mediante la señal inalámbrica. También presenta algunos inconvenientes, entre los cuales están la baja eficiencia en el consumo de potencia: la relación entre potencia de pico envolvente de la señal y la potencia media, PAPR (Radio pico promedio de potencia), es muy elevada, lo que obliga a utilizar amplificadores de alta linealidad.

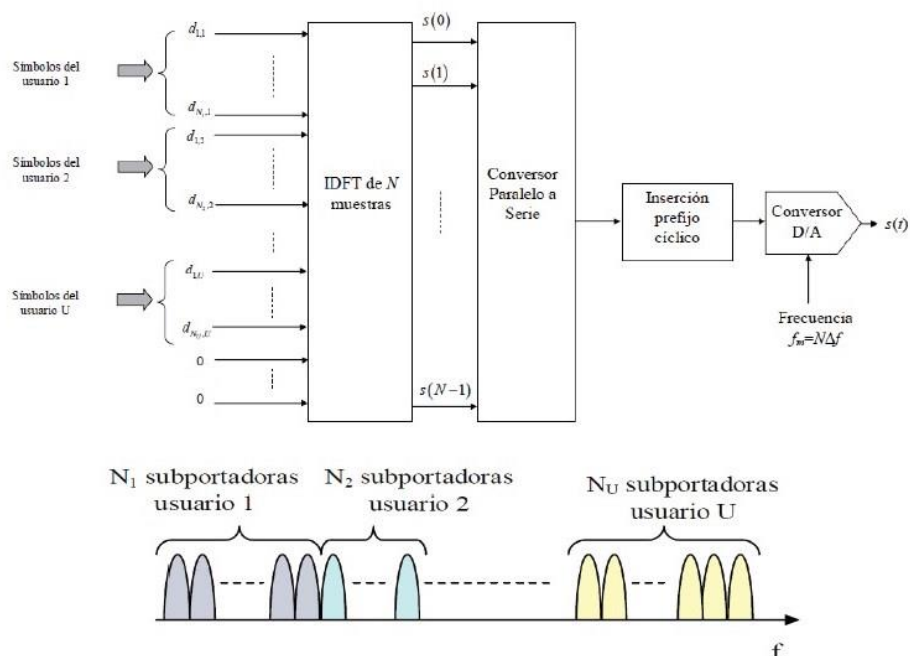


Figura 2.5: Esquema de transmisión de la señal OFDMA [6]

Aunque presenta robustez frente al multitrayecto gracias al prefijo cíclico, el uso de este genera una reducción en la velocidad de transmisión [5].

Para OFDMA la separación entre subportadoras es de 15 kHz, agrupándose en bloques de 12 subportadoras consecutivas lo que da como resultado un ancho de banda de 180 kHz. El número de total de subportadoras ocupadas es igual a 12 por el número de radio bloques asignados más uno, considerando que el centro de la banda no se utiliza para transmitir información. El tiempo de duración de símbolo en OFDM se calcula mediante el inverso de la separación entre subportadoras, es decir $T_s = 1/15 \text{ kHz} = 66,67 \text{ us}$, y con un período útil por símbolo de $T_u = 2048 T_s$ [6].

SC-FDMA

SC-FDMA es una nueva técnica de modulación híbrida, que combina la robustez frente a la propagación multicamino y flexibilidad de ubicación de las subportadoras propia de los sistemas OFDM con menor PAPR propia de las modulaciones con portadora única. En la Figura 2.6 se presenta la evolución temporal de un PAPR al emplear 3, 6 y 12 subportadoras, moduladas por secuencia de símbolos variados +1 y -1, demostrando que el incremento de subportadoras aumenta el valor máximo del PAPR en LTE [6].

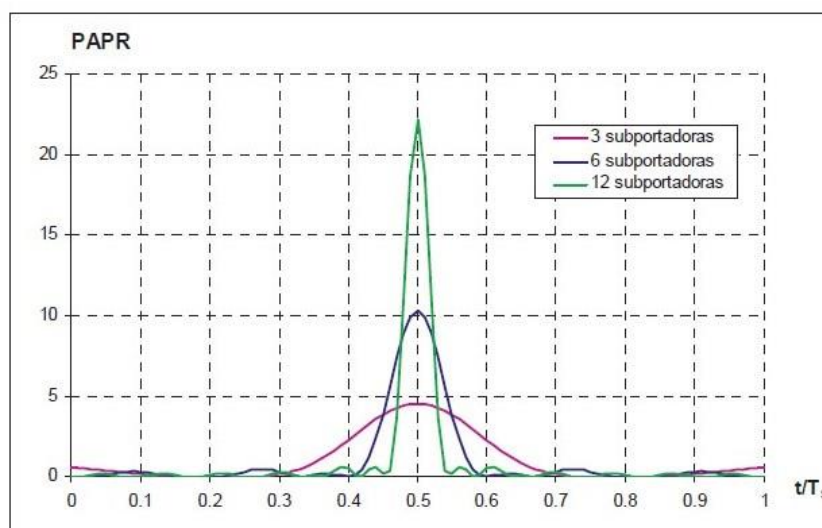


Figura 2.6: Asignación de paquetes en OFDMA [6]

Como ya se ha dicho, en LTE se utiliza la técnica OFDMA para el enlace descendente. Esta técnica presenta un mal PAPR, no obstante ese problema se soluciona con amplificadores de alta linealidad aunque esto requiera el consumo de más energía, imposible de implementar en los dispositivos móviles, por tal razón se utiliza una técnica de acceso de portadora única.

Esta tecnología reduce el nivel de los picos de potencia en el dominio del tiempo pero aumenta la potencia radiada fuera de banda en el dominio frecuencial. También genera una pérdida de sensibilidad entre 2 y 3 dB en canales con desvanecimientos.

En SC-FDMA existen K símbolos a transmitir, los que son precodificados mediante una transformada discreta de Fourier (DFT) de K muestras, y transmitidos con una transformada discreta inversa de Fourier IDFT de N muestras OFDM, separadas entre subportadoras y con prefijo cíclico. Esta técnica de transmisión de señal se denomina DFT – Propagación OFDM (DFTS-OFDM). Este esquema de transmisión en banda base se indica en la Figura 2.7.

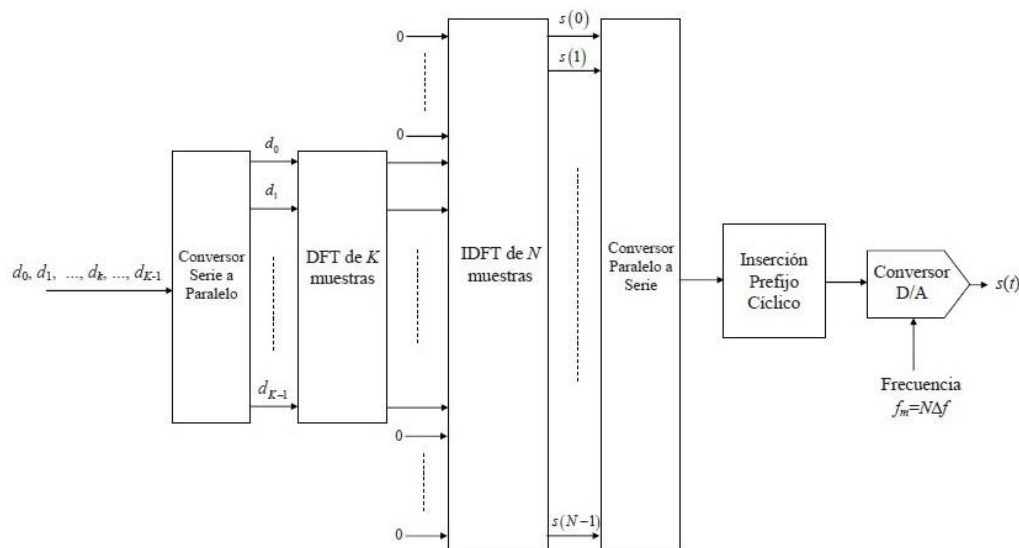


Figura 2.7: Esquema de transmisión de la señal SC-FDMA [6]

Finalmente mencionar que esta técnica permite dos modos de mapeo de las subportadoras. Uno de ellos es el modo localizado, tal como se muestra en la

Figura 2.8, el cual hace que los usuarios tengan subportadoras contiguas. Este es el modo de operación elegido para LTE.

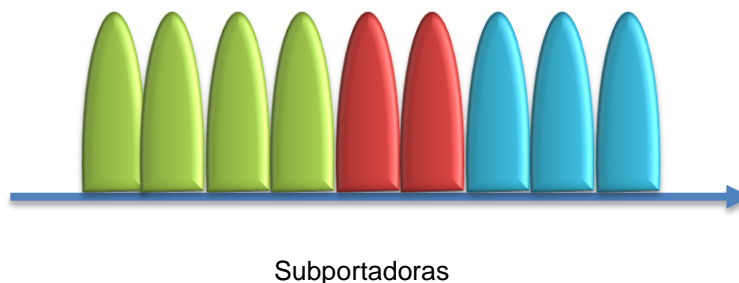


Figura 2.8: SC-FDMA modo localizado

El otro modo es el distribuido, que tiene dos formas de operar. Una de ellas se denomina intercalado FDMA-IFDMA, el cual se caracteriza en que las subportadoras son equidistantes unas de otras. La otra forma de operar se denomina FDMA distribuido puro, en el cual no hay una distribución uniforme de las subportadoras en la banda disponible, tal como se muestra en la Figura 2.9.

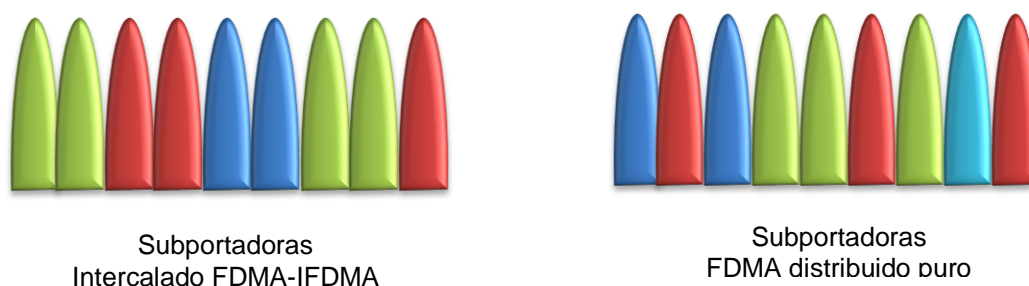


Figura 2.9: SC-FDMA modo distribuido

Para el enlace ascendente LTE con SC-FDMA se utiliza separación entre subportadoras de 15 kHz agrupada en bloques de 12 subportadoras cada uno, pudiéndose asignar a los usuarios según los requerimientos solicitados en el sistema. El número total de subportadoras es de $12 \times RB$, al no utilizar la subportadora central como en OFDMA. Para SC-FDMA los valores de duración del prefijo cíclico y período de símbolo son los mismos empleados en el enlace descendente [5].

2.5 Interfaz de radio LTE.

La comunicación entre la estación base y las terminales móviles se realiza por medio de la interfaz de aire, que utiliza señales inalámbricas en ciertas frecuencias para establecer comunicación. En los canales ascendentes y descendentes la separación entre subportadoras es igual a 15 KHz. En la Tabla 3 se muestran los valores según la canalización del espectro en LTE con una ocupación del ancho de banda correspondiente a las canalizaciones definidas del 90%, para 3, 5, 10, 15 y 20 MHz, excepto en el caso de 1.4 MHz donde se considera el 78%.

Ancho de banda nominal (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Número de N_{RB}	6	15	25	50	75	100
Subportadoras para OFDMA	73	181	301	601	901	1201
Subportadoras para SC-FDMA	72	180	300	600	900	1200
Ancho de banda ocupado (MHz)	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18

Tabla 3: Subportadoras-canalización para LTE

Un bloque de recurso físico (PRB) es un mínimo elemento de información conformado por 12 subportadoras de 15 KHz cada una. En la Figura 2.10, se presenta el PRB como un bloque asignado en los procesos de transmisión en el canal ascendente y descendente, con una duración por intervalo de 0.5 ms.

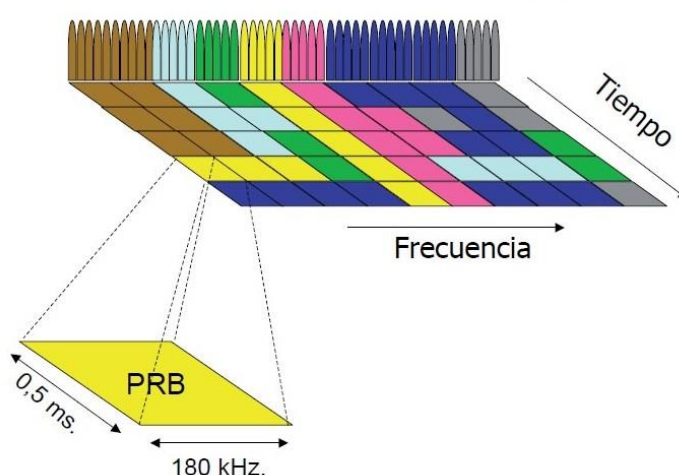


Figura 2.10: Bloque de Recurso Físico PRB

El PRB se representa como una rejilla de recursos conformado por elementos de recursos RE, presentados gráficamente en la Figura 2.11. Un RE es una subportadora modulada con QPSK, 16 QAM o 64 QAM dependiendo de tipo de esquema seleccionado en la transmisión. Por lo tanto, la rejilla PRB contiene 12 subportadoras por 7 símbolos transportados en un intervalo de 0.5 ms, lo que da como resultado 84 RE [6].

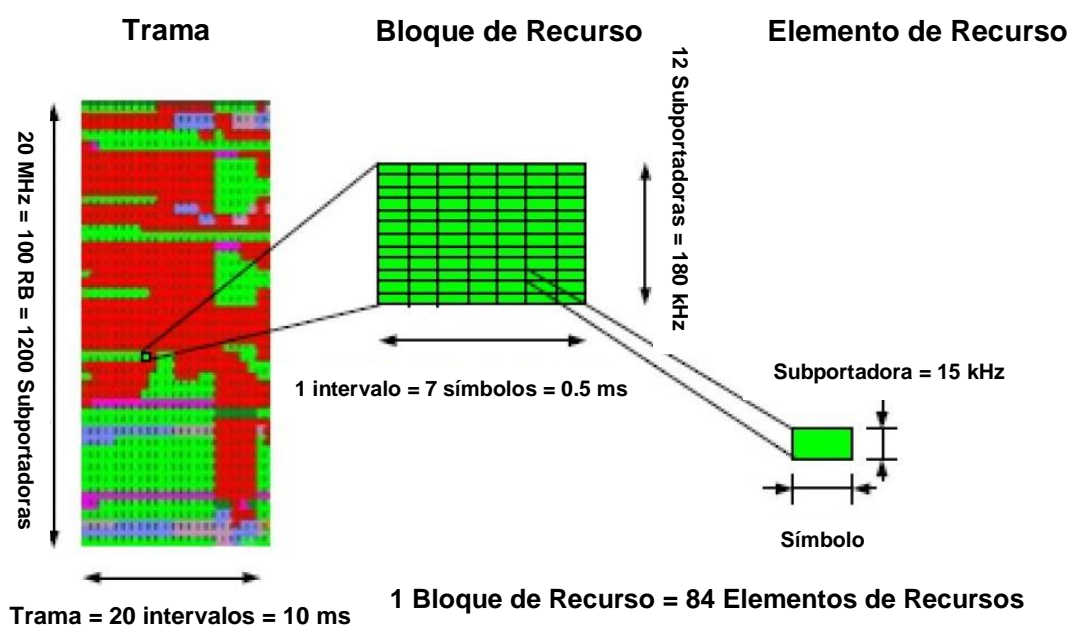


Figura 2.11: Asignación de elementos de recursos en LTE

Para los sistemas con multiplexación por división de frecuencias FDD aplicada para el enlace ascendente o descendente, se presenta la trama tipo 1 en la Figura 2.12, compuesta por un eje dividido en tramas de 10 ms de duración. Las tramas a su vez están conformada por 20 intervalos temporales de 0,5 ms. La unidad básica de recursos se define como TS, siendo una subtrama de duración de 1 ms, de dos intervalos temporales.

La funcionalidad de esta estructura funciona con el sistema UMTS. De igual manera, se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM con duración de $T_s = 66,67 \mu s$ en cada intervalo. Si se usa prefijo cíclico normal, la transmisión se realiza con 7

símbolos para propagaciones menos exigentes, y prefijo cíclico extendió con 6 símbolos para compensar propagación multicamino [13].

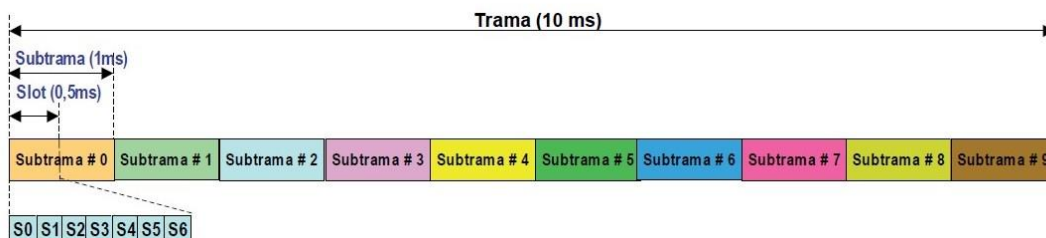


Figura 2.12: Estructura de trama Tipo 1

Con respecto a la multiplexación por división de tiempo TDD, en la Figura 2.13 se presenta la estructura de trama tipo 2 para el enlace ascendente y descendente, compuesta de 10 subtramas de 1 ms cada una. La flexibilidad es una característica en este tipo de trama, la cual contiene símbolos pilotos para ambos enlaces y períodos de guardia entre transmisión y recepción, facilitando la transición entre los enlaces por razones de sincronización.

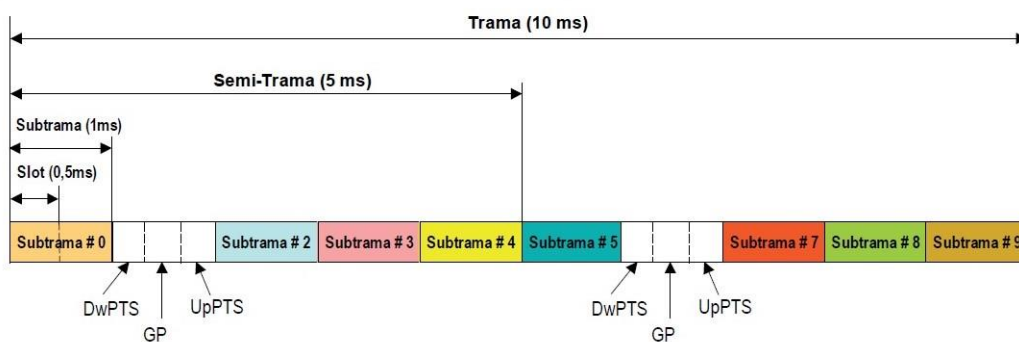


Figura 2.13: Estructura de trama Tipo 2

En este tipo de trama se puede distinguir tres campos:

DwPTS, utilizado en el enlace descendente con longitud mínima de un símbolo OFDM, sirve para ubicar el modo TDD, señales de referencia y datos.

UpPTS, utilizado en el enlace ascendente y está compuesto por dos símbolos OFDM que sirven para transportar un preámbulo corto de acceso aleatorio [13].

2.6 Técnicas de codificación y modulación.

En LTE 4G se manejan tres técnicas de modulación, siendo QPSK, 16QAM y 64QAM (2, 4, y 6 bits respectivamente); la constelación define por un lado las amplitudes de la componente en fase (I) cuadratura (Q) asociadas a cada símbolo o punto, por otro lado se tiene la correspondencia entre símbolos y grupos de bits. Desde esta perspectiva, con el objetivo de incrementar la velocidad de transmisión resulta conveniente incrementar el número de bits por símbolo de la modulación empleada a base de utilizar constelaciones con mayor cantidad de símbolos, tal como se muestra en la Figura 2.14; sin embargo, ante unas condiciones de SNR en el canal dadas, el empleo de modulaciones de orden elevado ocasiona un peor comportamiento en términos de probabilidad de error de bit, debido a que al existir más símbolos en la constelación y encontrarse éstos más próximos, es más fácil que se detecte erróneamente un símbolo en lugar de otro a causa del ruido en la red. Por tal motivo, para poder emplear satisfactoriamente modulaciones con un número elevado de símbolos, es preciso disponer de buenas condiciones de relación señal a ruido [10].

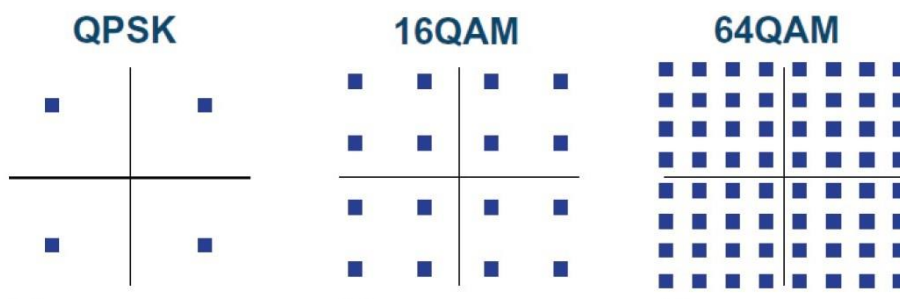


Figura 2.14: Diagrama de constelación para QPSK, 16 QAM y 64 QAM

OFDMA emplea la adaptación de enlace, que intenta extraer el máximo rendimiento del canal implementando técnicas de modulación adaptadas a una determinada condición de señal ruido, permitiendo la transmisión de grandes cantidades de bits de acuerdo a la modulación seleccionada. Esto permite que las subportadoras que presentan una relación señal a ruido de mejor calidad, tenderán a utilizar modulaciones de mayor orden que las que presentan una relación señal a ruido menor.

La fiabilidad del enlace depende de las características de propagación presentes en el entorno geográfico, las condiciones del canal y la distancia del receptor móvil con la estación base. En caso de que la recepción de señal sea de baja calidad, la aplicación de redundancia permite la correcta entrega de datos, a cambio de disminuir la cantidad de bits. Es decir, con esquemas de modulación como QPSK se consigue transmitir pocos datos pero con una confiabilidad alta de entrega, y al contrario con 64 QAM al codificarse en 16 bits se transmiten grandes cantidades de información pero el SNR debe ser alto.

El 3GPP define hasta 28 esquemas de modulación y codificación (MCS). Como ejemplo, con una modulación 16 QAM con tasa de código 0.33 la capacidad es más alta que con una modulación QPSK con tasa de código 0.12. En la Figura 2.15 se muestra un diagrama de la tasa de datos alcanzable según el MCS y la relación señal ruido del canal [6].

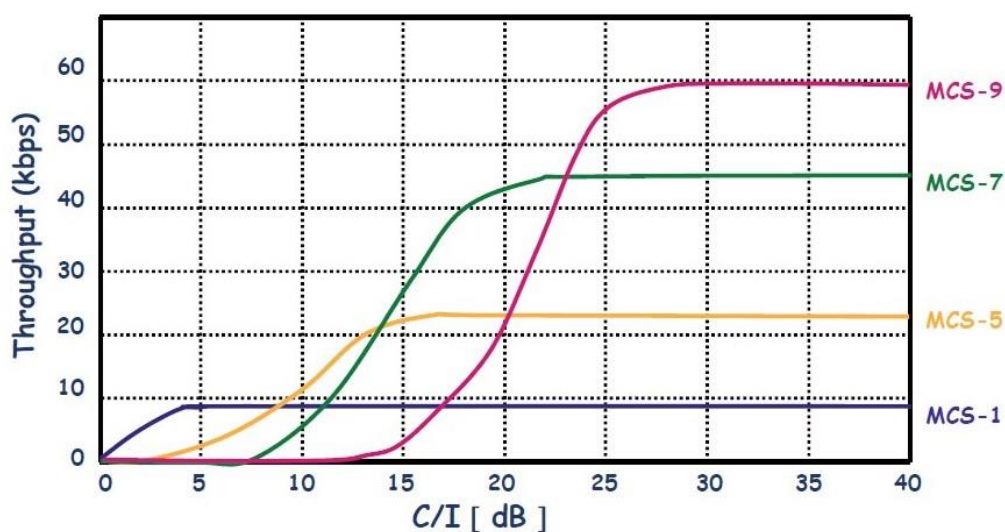


Figura 2.15: Tasa de datos para cada MCS según la condición del canal

2.7 Sistemas de múltiples antenas MIMO.

Se considera diversidad espacial al conjunto de antenas separadas cierta distancia, las cuales transmiten señales inalámbricas de un punto a otro. Al combinar un arreglo con varias antenas transmisoras y receptoras se puede incrementar el nivel de potencia instantánea y mejorar las condiciones del canal

con respecto a la potencia de ruido. En la Figura 2.16 se muestra un esquema general de la sumatoria de señales con arreglos de antenas.

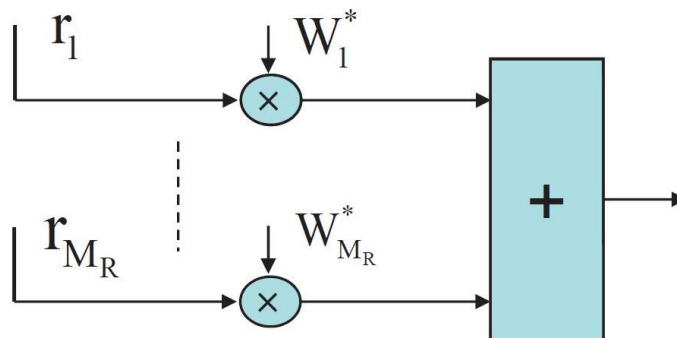


Figura 2.16: Esquema de diversidad en espacio

La transmisión a través de sistemas MIMO divide las tramas para ser direccionadas por cada antena, utilizando las mismas frecuencias y modulación en todas las antenas activas.

La capacidad inalámbrica del sistema está dada por el teorema de Shannon, indicando que la misma cantidad de antenas transmisoras deberá existir en la parte receptora, caso contrario se seleccionará la capacidad de acuerdo al lado con el menor número de antenas. La Figura 2.17 muestra este efecto.

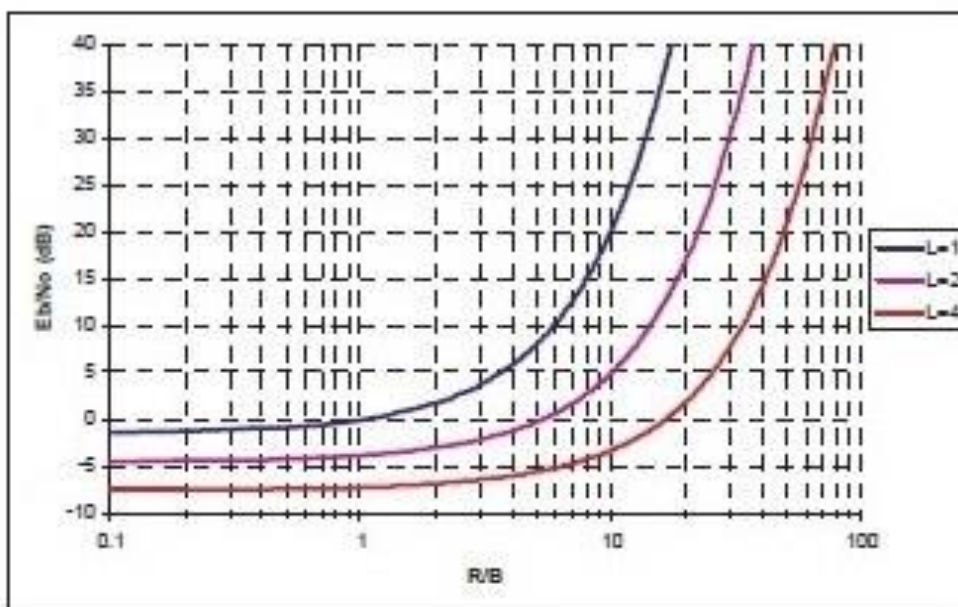


Figura 2.17: Efecto del número de antenas sobre R/B en MIMO

Donde L es el número de antenas, R la tasa de transmisión, B el ancho de banda y E_b/N_0 la relación señal a ruido del canal. Puede observarse que para una E_b/N_0 fijada, con un número mayor de antenas puede obtenerse mayores tasas de transmisión.

La señal viaja en múltiples direcciones debido a la separación de las antenas, lo cual permite la utilización de varios caminos hasta llegar a su receptor. Esta ventaja incrementa las tasas de transmisión y aprovecha de mejor manera el alcance final al tener más antenas con diversidad.

Para incrementar las velocidades de los enlaces, como es la característica fundamental de LTE 4G, es necesario mejorar la capacidad del sistema MIMO. En el enlace descendente MIMO, con móviles categoría 8 se puede tener un arreglo de antenas de hasta 8×8 para un único usuario, mientras que para el enlace ascendente MIMO puede tener un arreglo de antenas de hasta 4×4 , como se muestra en la Figura 2.18. Es por esto que en el UL la transmisión, vista por un UE, es punto a punto, es decir todos los UEs transmiten hacia el eNB.

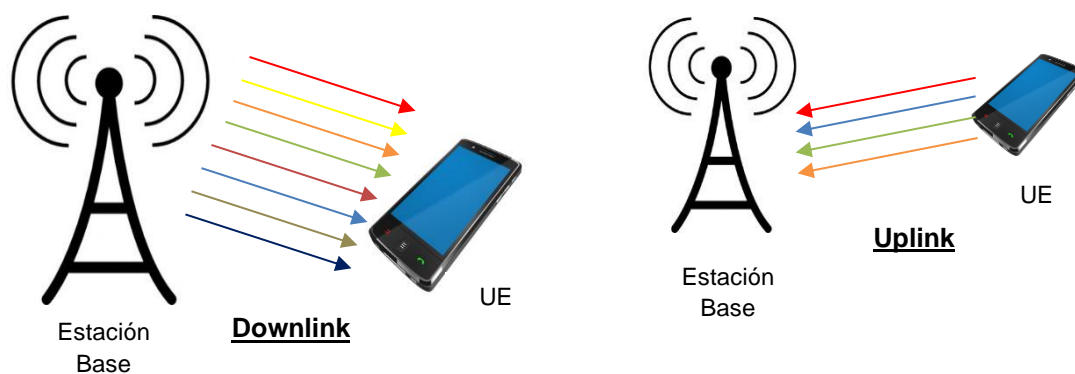


Figura 2.18: Arreglo de antenas en MIMO

Según el estándar 3GPP, los terminales móviles se clasifican en 8 categorías, basados en la capacidad del UE, configuración de antenas MIMO y velocidades picos de transmisión. Estas especificaciones son obligatorias para análisis de los requerimientos mínimos que debe tener el sistema LTE, respetando los

parámetros de capacidad de acceso de radio UE. En la Tabla 4 se muestran los valores máximos para el enlace ascendente y descendente en LTE 4G [14].

Categoría	Enlace Descendente		Enlace Ascendente		
	Número máximo de bits recibidos	Máximo número de antenas	Número máximo de bits transmitidos	Máximo número de antenas	Soporta 64 QAM en UL
1	10296	1	5160	1	No
2	51024	2	25456	1	No
3	102048	2	51024	1	No
4	150752	2	51024	1	No
5	299552	4	75376	1	Sí
6	301504	2 o 4	51024	1	No
7	301504	2 o 4	102048	2	No
8	2998560	8	1497760	4	Sí

Tabla 4: Categoría de los terminales móviles en LTE 4G

2.8 Agregación de portadoras.

La técnica de agregación de portadoras comprende la transmisión diversa de hasta cinco canales de 20 MHz, obteniendo un total de 100 MHz en el canal ascendente y descendente a la vez.

Al realizar la planificación del enlace, las operadoras utilizan diferentes mediciones para el cálculo de la cobertura máxima que tendrá la estación base, y la separación de bandas para mejorar el alcance de la señal en todas las áreas de las celdas. En la Figura 2.19 se indica que con el uso de frecuencias bajas genera grandes áreas de cobertura, mientras que frecuencias altas permiten el aumento de la cantidad de datos de información [9].

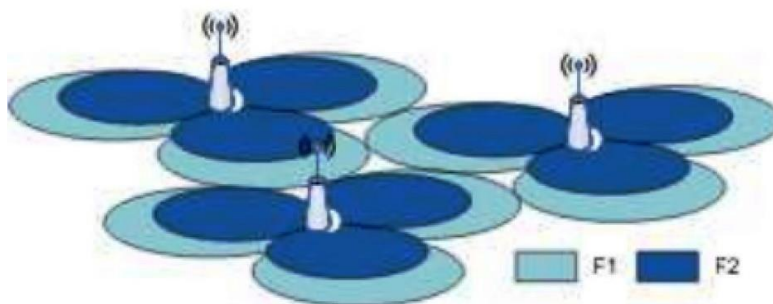


Figura 2.19: Cobertura con portadoras de diferentes bandas [9]

La agrupación de múltiples portadoras se puede dar en bandas contiguas y no contiguas, y la agregación interbanda con distintas frecuencias, significando una gran funcionalidad para las operadoras telefónicas en la adaptación del espectro asignado para brindar el servicio celular LTE 4G.

El uso de agregación de portadoras es mencionado en el estándar 3GPP, de acuerdo al número de canales asignados en LTE. De tal manera, que los bloques de recursos se incrementan proporcionalmente con la agrupación de canalización de diferentes anchuras, tal como se muestra en la Tabla 5 [15].

Clase de CA	Bloques de recursos disponibles	Número de portadoras contiguas	Tasas máximas Mbps
A	≤ 100	1	75
B	≤ 100	2	75
C	$100 < N_{RB} \leq 200$	2	150
D	$200 < N_{RB} \leq 300$	3	225
E	$300 < N_{RB} \leq 400$	4	300
F	$400 < N_{RB} \leq 500$	5	375

Tabla 5: Clasificación de CA en LTE 4G

Con esta asignación de recursos, para una transmisión con agregación de 5 portadoras de 20 MHz por canal, la velocidad pico teórica en el sistema alcanza los 3 Gbps, y tomando como referencia los datos establecidos en LTE 4G, este tipo de agregado funciona correctamente para un terminal móvil categoría 8.

Cabe mencionar, que el valor no es el real, al considerar las condiciones más favorables de la red de acceso de radio, es decir, con modulación 64 QAM que exige tasas altas de SNR, ubicación cercana a la estación base, propagación estable de la señal y sin efectos de desvanecimientos y pérdidas de trayectoria. Por tal motivo, se indica como valor máximo teórico de transmisión en LTE 4G.

CAPÍTULO 3

3. PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO.

Los sistemas de comunicaciones móviles deben ser planificados de acuerdo a una determinada tecnología celular, a los requerimientos por partes de los usuarios para acceder a un sinnúmero de servicios con capacidad de movilidad y en todas las áreas geográficas, considerando un adecuado nivel de calidad de la señal en todo momento.

Los proveedores de los servicios móviles deberán establecer los recursos necesarios a fin de satisfacer la demanda solicitada por los usuarios, realizando diferentes simulaciones numéricas en la red de radio acceso. Como primer punto, se debe tomar en cuenta cierta densidad de usuarios distribuidos en un área U (usuarios/Km²), los mismos que generarán un tráfico de datos medido en cantidad de bits por segundo T (bits/s/usuario). En esa área geográfica se encontrará una estación base con un ancho de banda B medido en (Hz), ofreciendo una eficiencia espectral medida en bits por segundo por Hz, E (bits/s/Hz). Si la estación base tiene que cubrir una determinada superficie S (Km²), el operador deberá ofrecer una capacidad en bits por segundo por superficie, $B \times E/S$ (bits/s/Km²). Para cubrir el operador con una demanda de tráfico solicitada por el usuario, deberá seguir la ecuación 3.1.

$$B \times E/S = U \times T \quad (3.1)$$

Analizando la igualdad, se obtiene que si se incrementa la cantidad de usuarios en un área, y se aumentan los niveles de servicios solicitados por estos usuarios, requiere que el operador satisfaga las condiciones mencionadas, equilibrando la ecuación mediante:

- Aumento del ancho de banda, canalización y un mayor espectro radioeléctrico.
- Incrementando la eficiencia espectral, con el uso de tecnología más eficiente (esquemas de modulación / codificación)
- Reduciendo la superficie cubierta por la estación base, desplegando un mayor número de sitios en el área geográfica.

3.1 Plan de frecuencias.

Para LTE 4G, el estándar 3GPP define bandas de frecuencias en modo dúplex FDD y TDD para el enlace ascendente y descendente, compatibles con las anteriores versiones de LTE. Esto permite a las operadoras interactuar con las diferentes tecnologías desplegadas en el país, así como utilizar la misma infraestructura de redes celulares. Ver Tabla 6 [15].

Banda	Banda UL BS recibe UE transmite		Banda DL BS transmite UE recibe		Modo Dúplex
	F _{UL_low}	F _{UL_high}	F _{DL_low}	F _{DL_high}	
1	1920 MHz	– 1980 MHz	2110 MHz	– 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	– 1910 MHz	1930 MHz	– 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	– 1785 MHz	1805 MHz	– 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	– 1755 MHz	2110 MHz	– 2155 MHz	FDD
5	824 MHz	– 849 MHz	869 MHz	– 894MHz	FDD
6 ¹	830 MHz	– 840 MHz	875 MHz	– 885 MHz	FDD
7	2500 MHz	– 2570 MHz	2620 MHz	– 2690 MHz	FDD
8	880 MHz	– 915 MHz	925 MHz	– 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	– 1784.9 MHz	1844.9 MHz	– 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	– 1770 MHz	2110 MHz	– 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	– 1447.9 MHz	1475.9 MHz	– 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz	– 716 MHz	729 MHz	– 746 MHz	FDD
13	777 MHz	– 787 MHz	746 MHz	– 756 MHz	FDD
14	788 MHz	– 798 MHz	758 MHz	– 768 MHz	FDD
15	Reserved		Reserved		FDD
16	Reserved		Reserved		FDD
17	704 MHz	– 716 MHz	734 MHz	– 746 MHz	FDD
18	815 MHz	– 830 MHz	860 MHz	– 875 MHz	FDD
19	830 MHz	– 845 MHz	875 MHz	– 890 MHz	FDD
20	832 MHz	– 862 MHz	791 MHz	– 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz	– 1462.9 MHz	1495.9 MHz	– 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	– 3490 MHz	3510 MHz	– 3590 MHz	FDD
23	2000 MHz	– 2020 MHz	2180 MHz	– 2200 MHz	FDD
24	1626.5MHz	– 1660.5MHz	1525 MHz	– 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz	– 1915 MHz	1930 MHz	– 1995 MHz	FDD
26	814 MHz	– 849 MHz	859 MHz	– 894 MHz	FDD
27	807 MHz	– 824 MHz	852 MHz	– 869 MHz	FDD
28	703 MHz	– 748 MHz	758 MHz	– 803 MHz	FDD
29	N/A	717 MHz	728 MHz	FDD ²	
30	2305 MHz	– 2315 MHz	2350 MHz	– 2360 MHz	FDD
31	452.5 MHz	– 457.5 MHz	462.5 MHz	– 467.5 MHz	FDD
32	N/A		1452 MHz	– 1496 MHz	FDD ²
33	1900 MHz	– 1920 MHz	1900 MHz	– 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	– 2025 MHz	2010 MHz	– 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	– 1910 MHz	1850 MHz	– 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	– 1990 MHz	1930 MHz	– 1990 MHz	TDD

37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz – 3600 MHz	3400 MHz – 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz – 3800 MHz	3600 MHz – 3800 MHz	TDD
44	703 MHz – 803 MHz	703 MHz – 803 MHz	TDD

Tabla 6: Frecuencias para LTE 4G

En Ecuador, según el ARCOTEL, se asignaron bandas de frecuencia para las operadoras de servicio de telefonía móvil, tal como se muestra en la Tabla 7.

Operador	Banda	Frecuencia
Movistar	2	1900 MHz
Claro	4	1700 / 2100 MHz
CNT	4 - 28	1700 / 2100 MHz – 700 MHz
Tuenti	2	1900 MHz

Tabla 7: Frecuencias asignadas operadores en Ecuador

3.2 Asignación de celdas: zonas de coberturas, identificadores y tipos.

En el proceso de despliegue de estaciones base para cubrir un área geográfica determinada, las celdas que se encuentran contiguas unas con otras, suelen solaparse, cuando la potencia de una de las estaciones base supera el área cubierta por la estación vecina.

Las estaciones bases comúnmente sufren de solapamiento en los bordes de las celdas, incrementándose la interferencia inter-celular de la red. Para mitigar estas deficiencias, se usan cálculos para determinar la asignación de frecuencias y recursos a usuarios, tomando en cuenta valores de interferencia y distancias de reúsos.

Una vez asignadas las frecuencias para evitar solapamiento de señal, se designa un identificador físico a la celda ID, el que consiste en un número entero de 0 a 503, con la función de que el móvil identifique las celdas que se encuentran en el área de movilización del usuario. Este identificador también permite determinar la calidad del enlace y poder establecer un mejor MCS.

La identificación de la celda se determina en un rango de 504 elementos únicos, divididos en 3 grupos de 168 identificadores de celda. En cada grupo se encuentra una Señal de Sincronización Primaria (PSS), y cada elemento dentro del grupo se obtiene con una Señal de Sincronización Secundaria (SSS). Con estas señales de referencia se obtienen además de las medidas de calidad, la búsqueda de celdas y sincronización inicial.

En la Figura 3.1 se identifican las señales de referencia PSS y SSS denominadas símbolos de referencias primarias, y se transmiten dos veces por trama, en el último símbolo-OFDM de los slots 0 y 10, ocupando 62 subportadoras centrales del canal, aunque se reservan 6 PRB [6].

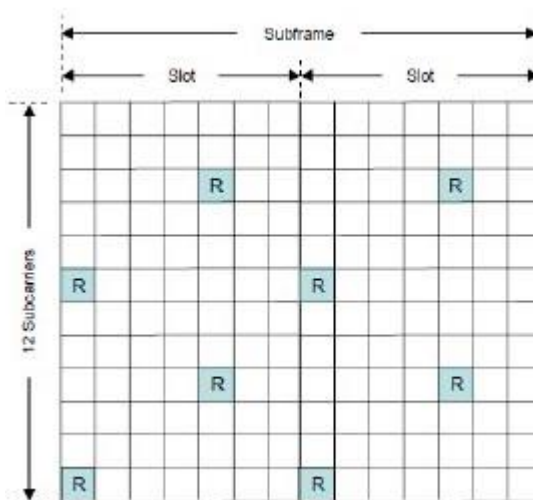


Figura 3.1: Señal de referencia para un PRB

3.3 Modelos de propagación.

Para conocer las pérdidas de propagación de una señal inalámbrica en un ambiente determinado por topografía del terreno, densidad poblacional, alturas de edificios y otros factores que impidan la visibilidad directa entre transmisor y receptor, se utilizan varios modelos matemáticos que simplifican las características de un sistema inalámbrico. Estos conjuntos de expresiones y algoritmos predicen comportamientos de la pérdida de la señal mediante la

utilización de la distancia, la frecuencia del enlace, las alturas utilizadas por el emisor y el receptor, entre otros.

Actualmente existen varios modelos de propagación empíricos y teóricos, y son utilizados de acuerdo a las necesidades de cada zona geográfica, por lo que en este proyecto utilizaremos el modelo de propagación Okumura-Hata y el modelo extendido Cost-231, aplicado para tres tipos de ambientes (Denso Urbano, Urbano, Rural y Sub-Urbano); diferenciándose una del otro en el rango de frecuencia utilizado en el enlace, tal como se muestra en la Tabla 8 [16].

El modelo Okumura-Hata se caracteriza por ser simple y preciso para la medición de los valores de pérdidas de propagación, tomando en cuenta varios aspectos como el porcentaje de edificios, tipo de terreno (montañoso, semi-cubierto, marítimo), y frecuencia de la portadora.

En este proyecto, se utiliza el modelo Okumura-Hata para frecuencias portadoras menores a 1500 MHz, y para frecuencias entre los rangos de 1500 a 3000 MHz se aplica el modelo extendido de Hata Cost-231, manteniendo parámetros básicos como alturas de antenas y factores de corrección.

Características	Okumura-Hata	Extendido de Hata (Cost-231)
Frecuencia	150 MHz < f < 1,5 GHz	1,5 GHz < f < 3 GHz
Altura antena estación base	30 m < h _{eb} < 200 m	
Altura antena móvil	1 m < h _{eb} < 10 m	
Distancia máxima	1 m < d < 20 Km	

Tabla 8: Valores modelos de propagación

El modelo de propagación Okumura-Hata y Hata Cost-231 se define para tres ambientes, el tipo de zona urbano corresponde para ciudades grandes o medianas, con altas edificaciones y gran distribución de viviendas, tal como se describe en la ecuación (3.2).

$$L(dB) = B - 13,82 \log h_{eb} - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_{eb}) \log d + C_m \quad (3.2)$$

Donde:

h_{eb}: Altura de la estación base en metros

h_m : Altura del móvil en metros

d : Distancia entre transmisor y receptor

f : Frecuencia portadora en MHz

C_m : 3 dB para Denso Urbano; 0 dB para las demás áreas

B: Esquema según la frecuencia portadora

- Para $150 \text{ MHz} < f < 1,5 \text{ GHz}$ (Okumura-Hata)

$$B = 69,55 + 26,16f \quad (3.3)$$

- Para $1,5 \text{ GHz} < f < 3 \text{ GHz}$ (Hata Cost-231)

$$B = 46,30 + 33,90f \quad (3.4)$$

a(hm): Factor de corrección de altura de antenas

- Denso Urbano con $f \leq 300 \text{ MHz}$

$$a(hm) = 8,29[\log(1,54 h_m)]^2 - 1,1 \quad (3.5)$$

- Denso Urbano con $f > 300 \text{ MHz}$

$$a(hm) = 3,20[\log(11,75 h_m)]^2 - 4,97 \quad (3.6)$$

- Urbano, Sub-Urbano y Rural

$$a(hm) = [1,1(\log f) - 0,7]h_{eb} - [1,5(\log f) - 0,8] \quad (3.7)$$

Para las áreas sub-urbanos se consideran zonas geográficas con casas dispersas, vegetación y carreteras, para el cálculo se considera la ecuación 3.8.

$$L(db) = L(db)_{Urbano} - 2 \left[\log \frac{f}{28} \right]^2 - 5,4 \quad (3.8)$$

Para áreas rurales y abiertas, donde existe mayormente carreteras de alta velocidad, zonas montañosas y con gran vegetación, se utiliza la ecuación 3.9.

$$L(db) = L(db)_{Urbano} - 4,78(\log f)^2 - 18,33f - 40,94 \quad (3.9)$$

3.4 Proceso de planeación y dimensionado de la red LTE 4G.

El dimensionado corresponde a la fase inicial de la planificación de la red. El propósito es estimar los recursos y el número de estaciones bases necesarias

para soportar una carga de tráfico demandada en una determinada área geográfica.

El dimensionamiento de redes celulares inalámbricas está directamente relacionado con la calidad y efectividad de la red, y puede afectar profundamente su desarrollo, tal como se muestra en la Figura 3.2. El dimensionamiento de la red celular inalámbrica sigue las siguientes etapas:

- Análisis de datos y tráfico
- Estimación de cobertura
- Evaluación de la capacidad
- Dimensionamiento de transporte

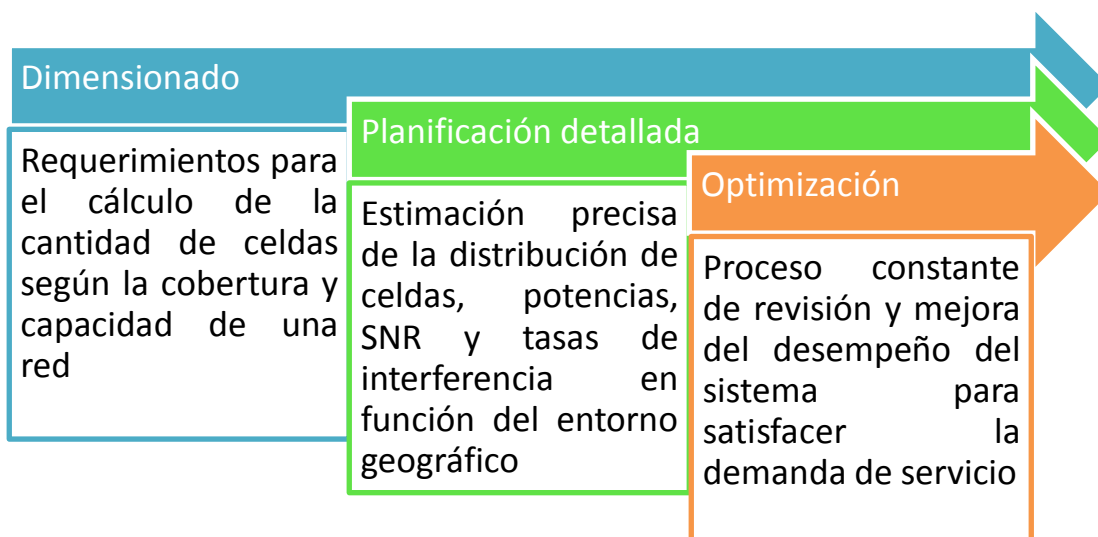


Figura 3.2: Proceso de planificación de una red celular

El objetivo del dimensionamiento de la red de acceso LTE es estimar la cantidad requerida de los sitios y su configuración en el área de despliegue de la red. Las actividades iniciales de planificación de la red de acceso LTE incluyen: Balance de radio enlace, análisis de cobertura, estimación de la capacidad celular, estimación de la cantidad de eNB y finalmente equipos a ser utilizados.

Las entradas para el dimensionado de una red LTE están divididas en tres categorías; Calidad, cobertura y relacionados con la capacidad.

Los insumos relacionados con la calidad incluyen el rendimiento promedio de las celdas y la probabilidad de bloqueo. Estos parámetros son los requisitos que exige el cliente al proveedor, quién proporcionará un nivel de servicio a sus usuarios. Además, el criterio de rendimiento del borde de la celda se utiliza para determinar el radio de la celda y la cantidad de sitios. Tres métodos son empleados para determinar el borde de la celda: el rendimiento máximo definido por el usuario en el borde de la celda, la máxima cobertura con respecto al MCS más bajo, y el radio predefinido de la celda. En nuestro proyecto utilizaremos el análisis del máximo radio de celda a través del esquema modulación-codificación más bajo asignado, el mismo que permite la comunicación con niveles de ruidos altos y menores tasas de transmisión.

Las entradas de dimensionamiento LTE para la planificación de cobertura son similares a las entradas correspondientes para redes 3G UMTS. El balance de radio enlace (RLB) es de vital importancia para determinar la cobertura en LTE. Las entradas RLB incluyen la potencia del transmisor, tipo de antenas transmisoras y receptoras, número de antenas utilizadas, ganancias y pérdidas del sistema, y modelos de propagación. Además, los valores de información geográfica son necesarias para iniciar el dimensionamiento de la cobertura.

Los insumos respecto a la planificación de capacidad otorgan el número de suscriptores y la cantidad de información a utilizar. El espectro disponible y ancho de banda del canal utilizado son de vital importancia para la planeación de la capacidad en LTE. Por otra parte, el análisis de tráfico y datos de los servicios disponibles, se utilizan para determinar el número de usuarios que soporta una celda y obtener el radio de la celda basado en la capacidad [17].

Los resultados de la fase de dimensionamiento se utilizan para estimar la factibilidad y costo de la red. Estas salidas se utilizan además en la planificación detallada de la red y para trabajos posteriores. La red LTE dimensionada puede ayudar al núcleo LTE a planificar un diseño de red adecuado y determinar el número de enlaces necesarios en la fase inicial del despliegue.

Finalmente se presenta un esquema que completa el proceso de planificación y dimensionamiento de una red de acceso de radio, representados en la Figura 3.3.

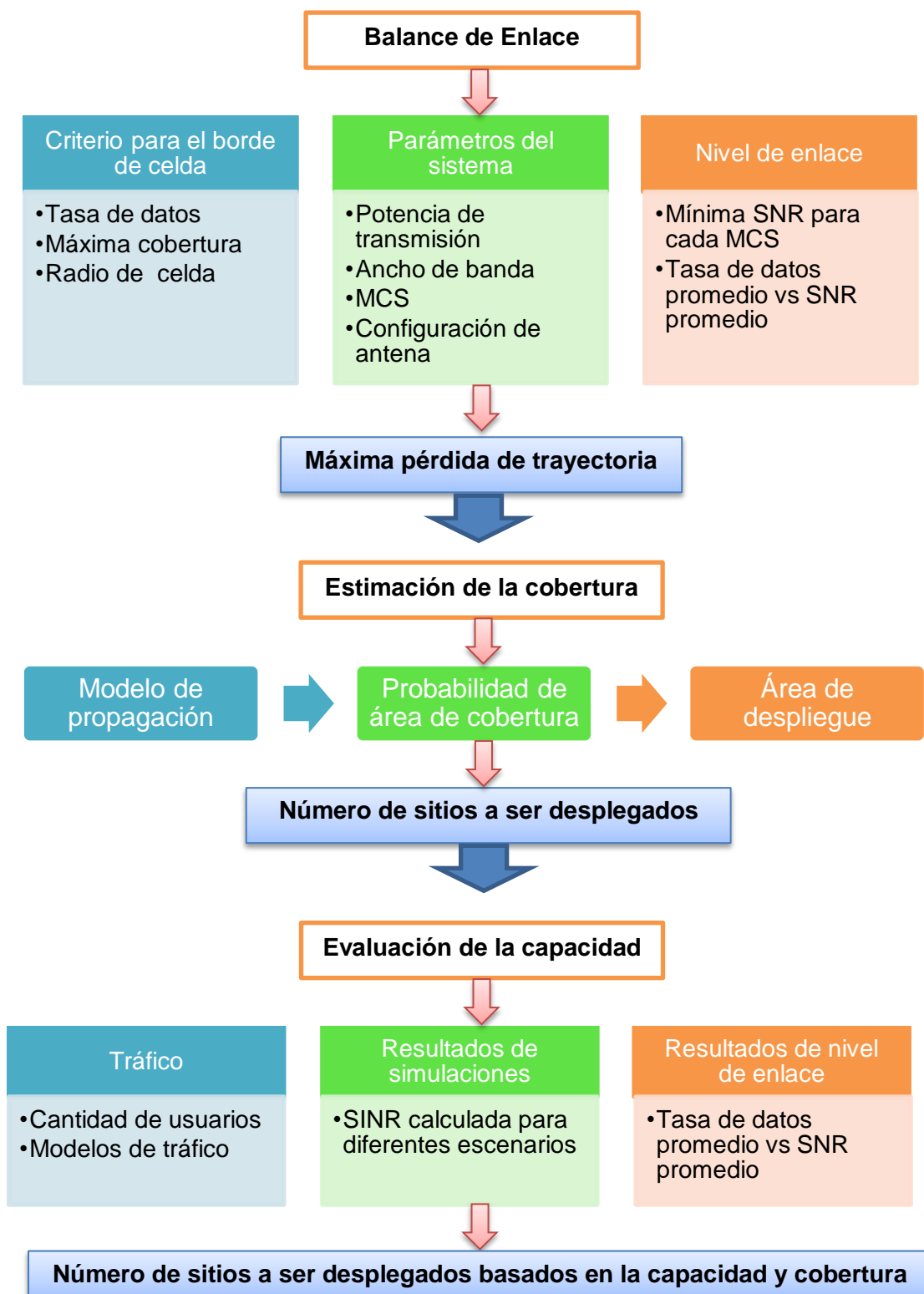


Figura 3.3: Dimensionamiento de la red LTE

El tamaño de la celda es el resultado principal del ejercicio de dimensionamiento. Se obtienen dos valores de radio de celda, uno respecto a la evaluación de la cobertura y el segundo a la capacidad. El mayor de los dos números se toma como la salida final. El radio de la celda se utiliza entonces para determinar el número de sitios. Suponiendo una forma de celda hexagonal, el número de sitios se puede calcular usando geometría simple. Este procedimiento se explica más adelante. Las capacidades de los eNB se obtienen a partir de la capacidad de evaluación, junto con el número de suscriptores apoyados por cada celda [17].

El proceso del dimensionado LTE inicia con el cálculo del RLB, usado para determinar la pérdida máxima de trayectoria. El resultado de este paso depende de los modelos de propagación utilizados. El tamaño de celda obtenido en este paso, indica el tamaño máximo permitido de las celdas. Este parámetro es utilizado para calcular el número de celdas o eNB requeridos para cubrir un área geográfica.

Los cálculos para determinar la capacidad de la red, siguen el proceso anterior. Si la estimación de la cobertura para la configuración dada, cumple con los requisitos de capacidad, entonces no se requiere adicionar más celdas, caso contrario se añade un número adecuado de celdas para conseguir la capacidad requerida en el sistema. Por otro lado, si se utiliza tasas de tráfico más altas de lo esperado, entonces puede conducir a un nivel innecesariamente alto de sitios.

En este trabajo de titulación, se centra principalmente en el balance de radio enlace, estimaciones de la capacidad por celda y herramientas de dimensionado LTE.

3.5 Balance de radio enlace ascendente y descendente.

El balance de enlace se calcula para estimar la pérdida de trayectoria máxima permitida, mediante parámetros en la transmisión y recepción como potencias, ganancias de antenas, pérdidas del sistema, ganancias de diversidad, desvanecimiento, penetración, entre otros. Con la distancia máxima obtenida se calcula el tamaño de la celda usando un modelo de propagación adecuado. La ecuación básica para el balance del enlace tanto ascendente como descendente, se muestra en la ecuación 3.10 [18].

$$MAPL = PotenciaTx + GananciasTx - PérdidasTx - Sensibilidad + GananciasRx - PérdidasRx - Desvanecimiento + Diversidad MIMO \quad (3.10)$$

El procedimiento para la medición de la máxima atenuación de la señal descendente se muestra en la Tabla 9 [19].

PARÁMETRO	VALOR
A. Potencia estación de base	Depende de la clase de estación (TS.36.104): Wide Área (sin límite) Local Área (15-24 dBm) Home (11-20 dBm)
B. Pérdidas en los cables de conexión y conectores	Función de la frecuencia y longitud de los cables. Con amplificadores en antena pueden ser muy reducidas (1-6 dB)
C. Ganancia de antena TX para el trayecto	Depende de la frecuencia y tipo de antena (direccional) (15-21 dBi)
D. PIRE, potencia equivalente "en el aire"	$D = A - B + C$
E: Factor ruido equipo usuario (UE)	Función de la banda y separación dúplex (6-11 dB)
F: Potencia de ruido térmico en recepción	Depende de la anchura de banda asignada (número de bloques de recursos). $F = -174 + E + 10 \log(BW(\text{Hz}))$
G: Relación SINR objetivo	Depende de la tasa binaria y condiciones de explotación. Se obtiene a partir de simulaciones o de la fórmula de Shannon corregida
H: Margen de interferencia	Se debe tener en cuenta la interferencia intercelular de otros eNB sobre el UE. Depende de la "geometría" celular (2-8 dB)
I: Sensibilidad del receptor	$I: F + G + H$
J: Ganancia antena UE	Función del equipo y de la banda (-5-10 dBi)
K: Pérdidas por cuerpo (para enlaces de voz)	Para equipo personal en aplicaciones de voz (3-5 dB)
L: Ganancia MIMO	De acuerdo al tipo de configuración de antena
M: Margen por sombra	Valores de desvanecimiento por obstáculos

Tabla 9: Parámetros modelos para el enlace descendente

La potencia de transmisión de ambos enlaces se distribuye a lo largo de todo el ancho de banda del canal, por lo que sólo un porcentaje de la potencia total está disponible para los bloques de recursos asignados a la conexión [19].

Para el enlace ascendente, se presenta los valores aproximados en la Tabla 10.

PARÁMETRO	VALOR
A: Potencia equipo usuario (UE)	Depende de la case de equipo (21-23 dBm)
B. Pérdidas por cuerpo (para enlaces de voz)	Para equipo personal en aplicaciones de voz (0-3 dB)
C: Ganancia de antena UE	Función del equipo y de la banda (0-5 dBi)

D: PIRE, potencia equivalente “en el aire”	$D = A-B+C$
E: Factor ruido térmico en estación base	Depende del diseño. El valor máximo recomendado es de unos 5 dB, pero suele ser mejor.
F: Potencia de ruido térmico en recepción	Depende de la anchura de banda asignada (número de bloques de recursos). $F = -174+E+10\log(BW(Hz))$
G: Relación SINR objetivo	Depende de la tasa binaria y condiciones de explotación. Se obtiene a partir de simulaciones o de la fórmula de Shannon corregida
H: Margen de interferencia	Incremento en el nivel de ruido en BS causado por interferencia desde otros usuarios (1-10 dB)
I: Sensibilidad del receptor	$I: F+G+H$
J: Ganancia antena UE	Función del equipo y de la banda (-5-10 dBi)
K: Pérdidas por cable	Función de la frecuencia y longitud de los cables (1-6 dB)
L: Ganancia MIMO	De acuerdo al tipo de configuración de antena
M: Margen por sombra	Valores de desvanecimiento por obstáculos

Tabla 10: Parámetros modelos para el enlace ascendente

La potencia de transmisión máxima de 23 dBm se especifica en 3GPP dentro de TS 36.101. Esta capacidad tiene una tolerancia de + - 2 dB por lo que 23 dBm podría ser optimista para algunos dispositivos. La potencia máxima de transmisión se reduce a 22 dBm para 1 Mbps y 2 Mbps porque se considera una reducción de potencia máxima de 1 dB cuando se asignan más de 18 bloques de recursos desde el ancho de banda de 20 MHz mientras se utiliza QPSK [19].

Se utiliza el número total de bloques de recursos cuando se calcula la potencia de transmisión para los bloques de recursos asignados, es decir, la potencia máxima de transmisión se distribuye entre el número total de bloques de recursos, de manera que sólo una proporción de esa potencia está disponible para los bloques de recursos asignados.

El margen de atenuación lento se calcula a partir de una probabilidad de ubicación en interiores y una desviación estándar en interiores. La probabilidad de ubicación en interiores se especifica a menudo como una probabilidad promedio de experimentar la cobertura interior en el área de la celda.

La ganancia de traspaso de sombreado se genera permitiendo que el UE transfiera al mejor servidor. Cuando el móvil está en el borde de la celda y hay

múltiples estaciones bases, el UE puede seleccionar la mejor celda para ayudar a evitar que experimente desvanecimientos.

3.6 Nivel señal ruido requerido.

El nivel de señal ruido requerido indica la mínima intensidad de señal para proporcionar un enlace de calidad en LTE en relación al ruido del canal. El borde de la celda se obtiene considerando un nivel SINR requerido, para ofrecer un rendimiento mínimo en cada sitio desplegado, por lo que es de valor fundamental para el balance de enlace ascendente y descendente [17].

El SINR requerido depende de los siguientes factores:

- Esquemas de modulación y codificación (MCS)
- Modelo de canal de propagación

Mientras el MCS utilizado sea menos robusto, el SINR requerido será más alto y viceversa, en este caso para modulación 64 QAM con 6 bits por símbolos, con tasas altas de datos, se necesita un canal con un alto valor SINR. La estimación del SINR se puede realizar mediante dos métodos diferentes:

Uso de tablas “Rendimiento vs Valor promedio SNR”, donde se obtiene a través de simulaciones de nivel de enlace según el tipo de canal de propagación y configuración de antenas. El ruido modelado es el AWGN [17].

Usando la fórmula de Alpha-Shannon, la cual proporciona en la Tabla 11, una aproximación de los resultados del nivel de enlace descendente [17].

MODULACIÓN	TASA DE CÓDIGO POR 1024	SINR (dB)	IM (dB)
QPSK	120	-7.5351	2,5
	157	-6.2557	
	193	-5.2492	
	251	-3.9290	
	308	-2.8621	
	379	-1.7364	
	449	-0.7754	
	526	0.1631	
	602	1.0008	
	679	1.7822	
16 QAM	340	1.7920	3
	378	2.5111	

	434	3.4995	
	490	4.4227	
	553	5.4028	
	616	6.3356	
	658	6.9367	
64 QAM	438	3.5674	4
	466	7.5103	
	517	8.5516	
	567	9.5436	
	616	10.4940	
	666	11.4466	
	719	12.4413	
	772	13.4238	
	822	14.3419	
	873	15.2712	
	910	15.9418	
	948	16.6279	

Tabla 11: Relación entre MCS y SINR

Con estos valores, es posible hallar la sensibilidad de referencia que necesitará el receptor, en el enlace ascendente y descendente como mínima señal de potencia que deberá recibir para establecer una comunicación adecuada. La sensibilidad está definida como se muestra en la ecuación 3.11 [20].

$$S(\text{dBm}) = KTB + NF + SINR + IM - 3 \quad (3.11)$$

Donde:

- KTB: Nivel de ruido térmico
- NF: Figura de ruido del receptor
- SINR: Relación señal a interferencia más ruido
- IM: Margen de interferencia

3.7 Eficiencia espectral.

La eficiencia espectral es la tasa de transmisión máxima que puede ser transportada en un canal con ancho de banda determinado, siendo el número de bits por segundo que se transmiten por cada Hz. Para incrementar la eficiencia espectral se deberá aumentar proporcionalmente la velocidad de transmisión

manteniendo una canalización constante, tal como se muestra en la ecuación 3.12 [21].

Uno de los mecanismos para aprovechar de manera eficiente el espectro, es con el uso de arreglo de antenas en la transmisión y recepción de datos, produciendo diversidad espacial con múltiples antenas MIMO.

$$\text{Eficiencia Espectral} \left(\frac{\text{bps}}{\text{Hz}} \right) = \frac{\text{Tasa de datos}(\text{bps})}{\text{Ancho de banda}(\text{Hz})} \quad (3.12)$$

Así mismo, la eficiencia espectral se utiliza para conocer el valor de la SINR requerido mediante la fórmula Alpha-Shannon, utilizando la ecuación 3.13 [17].

$$\text{Eficiencia Espectral} = B \log_2 \left(1 + 10^{\frac{\text{SNR}}{10}} \right) \quad (3.13)$$

Donde:

- B: Ancho de banda del canal
- SNR: Relación señal-ruido

El indicador de calidad del canal (CQI) es un valor estandarizado por el estándar 3GPP tal como se muestra en la Tabla 12, mismo que se relaciona directamente con el tipo de modulación y una tasa de código asignada, con el objetivo de cumplir la relación entre cantidad de bits recibidos y bits transmitidos. En resumen, la tasa de código es la efectividad con la que puede transmitirse un bloque de transporte en una trama [22].

Para el cálculo de la tasa de código en el sistema LTE, se tiene la ecuación 3.14.

$$\text{tasa de código} = (TBS + CRC) / (RE \times \text{Bits por RE}) \quad (3.14)$$

Donde:

- TBS: Tamaño del bloque de transporte, según el bloque de recursos asignado
- CRC: Código de redundancia cíclica, definido por el número de bits para detección de errores. 3GPP define este valor como 24.

- RE: Elementos de recursos en una trama, según el prefijo cíclico asignado.
- Bits por RE: Tasa de bits según el tipo de modulación (QPSK, 16 QAM, 64 QAM)

ÍNDICE CQI	MODULACIÓN	TASA DE CÓDIGO POR 1024	EFICIENCIA
0		out of range	
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Tabla 12: Relación entre CQI y eficiencia espectral

Finalmente se puede destacar, que mediante el cálculo de la eficiencia espectral asignado a cada CQI, se obtienen los valores de señal ruido mediante el uso de la ecuación 3.13.

3.8 Cobertura basada en el número de sitios.

La pérdida máxima de trayectoria se puede utilizar para calcular el radio de la celda usando un adecuado modelo de propagación. Los modelos Okumura-Hata y extendido de Hata Cost-231 sirven para determinar la pérdida de trayectoria para frecuencias portadoras entre 150 y 3000 MHz. Dado el radio de la celda, el área de cobertura de la celda, suponiendo sea de forma hexagonal, depende de la configuración del sitio [17]. En la Figura 3.4 se presentan las diferentes formas para los tres modelos de celdas hexagonales, donde las áreas del sitio se pueden calcular de la siguiente manera:

Sitio omni-direccional, descrito en la ecuación 3.14.

$$\text{Área de sitio}(Km^2) = 2,6 \times (\text{radio de celda}(Km))^2 \quad (3.14)$$

Sitio bi-sector, descrito en la ecuación 3.15.

$$\text{Área de sitio}(Km^2) = 1,6 \times (\text{radio de celda}(Km))^2 \quad (3.15)$$

Sitio tri-sector, descrito en la ecuación 3.16.

$$\text{Área de sitio}(Km^2) = 1,95 \times (\text{radio de celda}(Km))^2 \quad (3.16)$$

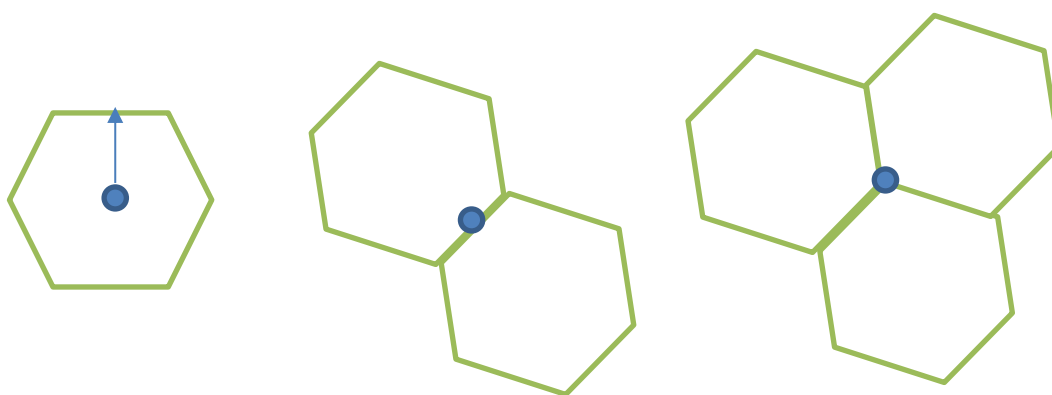


Figura 3.4: Tipos de sitios (Omni-direccional, bi-sector, tri-sector)

Finalmente, el número de sitios a ubicar se puede calcular fácilmente dividiendo entre el área de sitio y el área de despliegue, así como se muestra en la ecuación 3.17 [17].

$$\text{Número de sitios por cobertura} = \frac{\text{Área de despliegue}}{\text{Área de sitio}} \quad (3.17)$$

3.9 Modelos de tráfico en LTE 4G.

En un sistema de comunicación móvil, el ancho de banda en un canal inalámbrico puede ofrecer una cierta capacidad de datos limitada por el espectro, donde el tráfico generado por los usuarios en horas pico, podría afectar notablemente la calidad de transmisión de la señal, impidiendo cubrir con los requerimientos solicitados en todas las áreas desplegadas. El factor de reventa describe la cantidad o número promedio de usuarios simultáneos que comparten un canal

de transmisión LTE. Los principales recursos para encontrar este factor de reventa son:

- Análisis de tráfico en horas picos
- Densidad de usuarios
- Volumen de datos por usuario
- Pérdida y velocidad media de datos
- Perfiles de tráfico

De igual manera que con la planificación por cobertura, el análisis de la capacidad de la red se realiza por separado para diferentes escenarios, sean estos Densos Urbanos, Urbanos, Sub-Urbano y Rurales.

Los recursos que se estiman para la correcta transmisión de la señal en todo momento, requieren datos que no se estimen con un tráfico en hora pico, ya que existiría un sobredimensionado y desperdicio de recursos en horas del día donde no haya mayor ocupación de la red. Para evitar esto, se define el factor de reventa (OBF). Si se asume un canal con el 100% de carga, entonces el factor de reventa será igual a la relación entre el pico y la tasa promedio (PAR). En la mayoría de las redes de datos, se asume un factor de utilización de al menos el 85% para garantizar la calidad del servicio (QoS). Así que cuanto mayor sea el factor de utilización en el sistema, mayor será el tiempo de espera para que los usuarios accedan al canal de transmisión. De esta manera, el factor de reventa se calcula en la ecuación 3.18 [17].

$$OBF = \text{Relación pico a tasa promedio} \times \text{Factor de utilización} \quad (3.18)$$

La calidad de servicio permite identificar prioridades de los servicios ofrecidos por las operadoras móviles, los mismos que especifican las condiciones mínimas necesarias de la red para la transmisión óptima de los datos. Estos servicios pueden ser de voz (llamadas, video conferencia); o de datos (navegador web, correo electrónico, juegos en línea). Si la red está saturada con la petición de servicios por muchos usuarios, la calidad de transmisión de la señal se verá disminuida, por lo que los valores de QoS no serán los mínimos aceptados en el terminal móvil.

Para obtener la tasa de datos promedio utilizada por usuario, se debe calcular la cantidad de bits por servicio, tal como indica la ecuación 3.19 [18].

$$IT \text{ por usuario} = \frac{TP \times T \text{ de sesión PPP} \times R \text{ de sesión PPP}}{(1 - BLER)} \quad (3.19)$$

Donde:

- IT: Es la tasa de intensidad de tráfico, según el servicio por usuario, en Kbps
- TP: Tasa de datos requerida por servicio, en Kbps
- T de sesión PPP: Duración en segundos del protocolo Punto a Punto
- R de sesión PPP: Radio de sesión por servicio del protocolo Punto a Punto
- BLER: Porcentaje de error por bloque

Los valores promedios correspondientes a los diferentes servicios en LTE, se muestran en la Tabla 13 y 14. [22]

Enlace Ascendente					
Servicio	TP (Kbps)	T sesión PPP (s)	R sesión PPP	BLER (%)	Intensidad de tráfico (Kbps)
VoIP	26,9	80	0,4	1	869,5
Video llamada	62,53	70	1	1	4421,3
Video Conferencia	62,53	1800	1	1	113.690,9
Juegos en tiempo real	31,26	1800	0,2	1	11.367,3
Transmisión multimedia	31,26	3600	0,05	1	5.683,6
Buscador Web	62,35	1800	0,05	1	5668,2
Transferencia de archivos	140,69	600	1	1	85.266,7
E-mail	140,69	50	1	1	7.105,6
Intercambio de archivos P2P	250,11	1200	1	1	303.163,6

Tabla 13: Parámetros de tráfico para enlace ascendente

Enlace Descendente					
Servicio	TP (Kbps)	T sesión PPP (s)	R sesión PPP	BLER (%)	Intensidad de tráfico (Kbps)
VoIP	26,9	80	0,4	1	869,5

Video llamada	62,53	70	1	1	4421,3
Video Conferencia	62,53	1800	1	1	113.690,9
Juegos en tiempo real	125,06	1800	0,4	1	90.952,7
Transmisión multimedia	250,11	3600	0,95	1	864.016,4
Buscador Web	250,11	1800	0,05	1	22.737,3
Transferencia de archivos	750,34	600	1	1	454.751,5
E-mail	750,34	15	1	1	11.368,8
Intercambio de archivos P2P	750,34	1200	1	1	909.503

Tabla 14: Parámetros de tráfico para enlace descendente

La conectividad punto a punto permite en conmutación de paquetes establecer comunicación entre dos extremos, manteniendo la autenticidad y asignación dinámica IP. LTE al ser una tecnología móvil basada en IP, maneja protocolos relacionados con el intercambio de información.

3.10 Densidad y tipo de subscriptores.

Para la planificación y dimensionado de una red celular, se considera la distribución de sitios que cubrirán un área geográfica y la demanda solicitada por los usuarios. Estos sitios serán instalados en terrenos y condiciones urbanísticas de diversos escenarios. Los escenarios muchas veces están compuestos por poblaciones altamente densas, donde existen edificaciones altas, abundante cantidad de personas en centros comerciales, tasa de movilidad baja debido al tráfico vehicular, entre otros. A este tipo de escenario se le denomina Denso Urbano, y aquí se encontrarán usuarios de negocios que manejen varios servicios móviles como e-mail, transferencia de archivos, navegación web y video conferencia. Estos usuarios harán uso más elevado de la red que otro tipo de usuarios por contar con terminales adaptados a MIMO y tasas de MCS menos robustas [5].

El entorno Urbano se define como áreas residenciales cercanas al casco comercial de una zona, y a diferencia del Denso Urbano, existen más viviendas y menos congestión vehicular. Los usuarios establecidos en estos entornos se

denominan estándar, y son aquellos que consumen mayormente voz, ya que acceden a los datos mediante Wifi cercanos.

En el despliegue de una red, se contempla el entorno Sub-Urbano y Rural, los cuales son sitios alejados de las zonas residenciales, con alta movilidad al encontrarse carreteras y autopistas de gran velocidad, en estos entornos se encuentran usuarios estándares y conductores, los que consumen mayormente servicio de voz.

Finalmente, con la intensidad de tráfico por usuario obtenido en la ecuación 3.16, obtenemos la tasa de datos de red por usuario mediante la tasa de penetración por servicio y los intentos de sesión en horas ocupadas (BHSA), mostrados en la ecuación 3.20 [18].

$$TD = \frac{1}{3600} \times \sum_{i=1}^{\#servicios} IT \text{ por usuario}_i \times BHSA_i \times T \text{ penetración}_i \quad (3.20)$$

Donde:

- TD: Tasa de datos de red por usuario, en Kbps
- IT por usuario: Intensidad de tráfico de servicio por usuario, en Kbps
- BHSA: Número de intentos de sesión en horas picos
- T penetración: Porcentaje de participación de mercado por cada tipo de entorno y servicio

De esta manera, expresamos los valores promedios por cada tipo de entorno, tal como se muestra en la Tabla 15 y 16.

Entorno	Denso Urbano		Urbano	
	Tasa penetración (%)	BHSA	Tasa penetración (%)	BHSA
VoIP	100	1,4	100	1,3
Video llamada	20	0,2	20	0,16
Video Conferencia	20	0,2	20	0,2
Juegos en tiempo real	30	0,2	30	0,2
Transmisión multimedia	15	0,2	15	0,15
Buscador Web	100	0,6	100	0,4

Transferencia de archivos	20	0,3	20	0,2
E-mail	10	0,4	10	0,3
Intercambio de archivos P2P	20	0,2	20	0,3

Tabla 15: Parámetros de tráfico para enlace Descendente

Entorno	Sub-Urbano		Rural	
	Tasa penetración	BHSA	Tasa penetración	BHSA
VoIP	50	1	50	0,9
Video llamada	10	0,1	5	0,05
Video Conferencia	10	0,1	5	0,05
Juegos en tiempo real	10	0,1	5	0,05
Transmisión multimedia	5	0,1	5	0,1
Buscador Web	40	0,3	30	0,2
Transferencia de archivos	20	0,2	10	0,2
E-mail	10	0,2	5	0,1
Intercambio de archivos P2P	20	0,2	5	0,1

Tabla 16: Parámetros de tráfico para enlace Ascendente

Con la estimación de tráfico descritos anteriormente, y la cantidad de usuarios en el área, se puede calcular la tasa de datos de la red, como se muestra en la ecuación 3.21 [18].

$$Tasa\ de\ red(Kbps) = \# Total\ de\ usuarios \times Tasa\ de\ datos\ por\ usuario \quad (3.21)$$

3.11 Cálculo de la capacidad y tasa de transmisión.

La capacidad teórica de la red está limitada por el número de eNB instalados en la red. La capacidad celular en LTE se ve afectada por varios factores, que incluyen el nivel de interferencia, la implementación de la gestión de paquetes y los esquemas de modulación y codificación admitidos.

El balance de enlace en la planificación por cobertura, proporciona la pérdida de trayectoria máxima permitida y el máximo radio de una celda, tomando en cuenta el valor de interferencia de acuerdo al modelo proporcionado en el sistema. Por

tal motivo, el incremento de ruido e interferencia disminuye la cobertura de la celda, provocando a que el máximo radio de alcance sea menor.

En resumen, el principal indicador de la capacidad en una celda está dada por la distribución SINR, y se determina que en la red de acceso de radio LTE, la cantidad de sitios está limitado en cobertura por el enlace ascendente, y en capacidad por el enlace descendente [17].

La evaluación de la capacidad requiere completar las dos siguientes tareas:

- Estimar el rendimiento de la celda, a través de los ajustes y parámetros necesarios en la obtención del radio de la estación base.
- Analizar los valores de tráfico proporcionados por el operador, para obtener la demanda de servicio de voz y datos, donde se incluye cantidad de suscriptores, modelos de tráfico y densidad de usuarios en la zona de despliegue.

Conociendo la demanda de tráfico y los factores implicados en ella, se puede calcular la tasa de datos requerida por el sistema. Con el factor de reventa descrito en 3.9, el total de datos para el cálculo de la capacidad se muestra en la ecuación 3.22 [17].

$$Tasa\ de\ DG = No.\ usuarios \times TD\ por\ usuario \times Factor\ de\ reventa \quad (3.22)$$

Donde:

- Tasa de DG: Tasa de datos global, en Kbps.
- TD por usuario: Tasa de datos por usuario, en Kbps.

El número de sitios necesario para soportar el tráfico total calculado anteriormente, se describe en la ecuación 3.23 [17].

$$Número\ de\ sitios\ según\ Capacidad = \frac{Tasa\ de\ DG}{Capacidad\ de\ sitio} \quad (3.23)$$

Donde la capacidad de sitio corresponde a la cantidad total de recursos asignados a cada área de la celda, según el tipo de modulación (QPSK, 16 QAM, 64 QAM), de acuerdo al cálculo del balance de radio enlace previamente obtenido en la planificación por cobertura. El conteo de sitios basados en la capacidad es

generalmente mayor que los sitios basados en cobertura, esto en una red totalmente funcional. En redes reales, este número suele ser menor en los primeros años de funcionamiento de la red, cuando el número de usuarios es mínimo. Pero a medida que la demanda aumenta y más usuarios acceden al servicio, el conteo de sitios basados en capacidad toma el liderazgo y se requieren celdas más pequeñas. El mayor de los dos conteos se utiliza como número final en el dimensionamiento [20].

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA.

La tecnología actual en el mundo de las comunicaciones está dirigida a la interacción en línea con los clientes y servicios. Desde el momento en que la web se vislumbró como algo más que un vehículo para simples páginas estáticas de hipertexto, la posibilidad de ejecutar código tanto en el cliente como en los servidores se convirtió en una prioridad. Este tipo de aplicaciones se diseña con una arquitectura de Cliente/Servidor con capas de aplicación, servidor y base de datos.

4.1 Ingeniería de software.

La ingeniería de software está definida por un conjunto de procedimientos detallados que indican el inicio, continuidad y mantenimiento del software, desde su etapa de investigación de requerimientos, análisis, desarrollo, pruebas, implementación y actualización.

Dentro del desarrollo de un sistema se analizan las siguientes etapas:

Determinación de los requerimientos de información. En esta fase se investiga las necesidades utilizadas para el diseño de la solución, mediante la observación de los procesos de planificación y dimensionamiento de redes de acceso de radio LTE 4G.

Análisis de las necesidades del sistema. Con los datos empíricos recopilados en la etapa anterior se crean diagramas en forma estructurada de los flujos de entradas, procesos y salida de la información.

Diseño del sistema recomendado. En esta fase se usa la información recolectada anteriormente para estructurar los procedimientos de entrada de información, y se puede organizar los distintos elementos a fin de que el procesamiento y salida de información sean correctos.

Desarrollo y documentación del software. Se trabaja en la programación para crear un software. Durante esta fase, se utilizan las herramientas informáticas

para la elaboración del código y presentación de la aplicación, buscando crear una interfaz amigable para los usuarios.

Pruebas y mantenimiento del sistema. Una vez desarrollado el sistema deberá ser puesto a pruebas, verificando parámetros de cumplimiento de requerimientos por parte de los usuarios, medición en los tiempos de respuesta al solicitar información, interfaz gráfica amigable, funcional, y resolución de posibles errores para entregar un software de calidad.

Implementación y evaluación del sistema. En esta fase el desarrollador ayuda en la implementación del sistema de información y al entrenamiento de los usuarios. Adicionalmente, el analista necesita un plan de migración de antiguos sistemas, así como una evaluación constante de las bondades y mejoras de procesamiento de información.

4.2 Herramientas de desarrollo.

El desarrollo de sistemas en ambiente web se hace sobre un lenguaje script llamado HTML. La idea de hacer que los lenguajes web sean script, es facilitar de cierta forma, la comunicación entre plataformas.

Para poder acceder a un sistema desarrollado en ambiente web se debe hacer desde un servidor en línea HTTP a través de internet, por lo que este funciona bajo un modelo Cliente/Servidor, así como se muestra en la Figura 4.1.

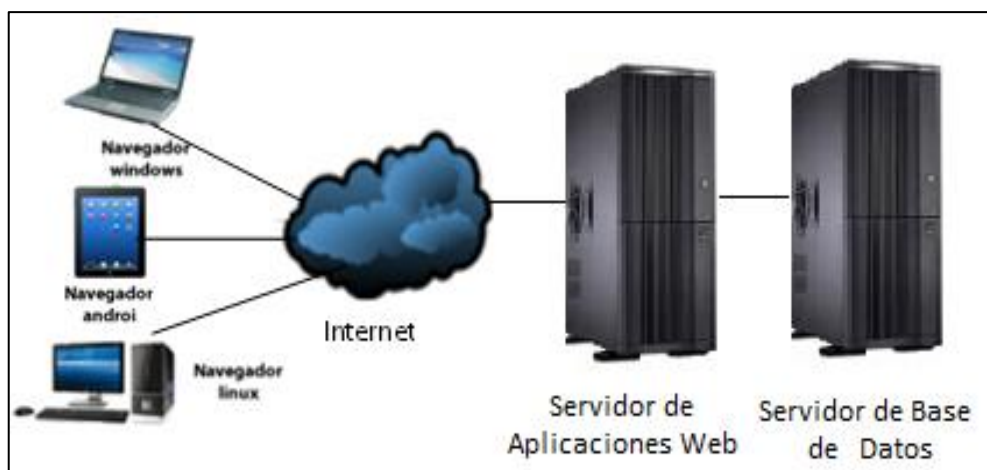


Figura 4.1: Arquitectura cliente/servidor de tres capas

Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado para diversos sistemas operativos, soportando la programación en varios lenguajes. Asp.Net es un modelo de desarrollo web unificado creado para el desarrollo de sitios y aplicaciones web dinámicas con un mínimo de código. Asp.Net forma parte del .NET Framework que contiene las librerías necesarias para la codificación, donde en nuestro proyecto utilizaremos la codificación con el lenguaje de programación de VB.net.

Para el desarrollo de la aplicación se utilizó Visual Studio 2015, versión comunidad, siendo de uso libre para el desarrollo de proyectos a nivel académico, que al trabajar de manera integral, facilitan el diseño, codificación, prueba, y depuración del código fuente del software. Como lenguaje de programación orientado a objetos se utilizó el Visual Basic .NET (VB.NET), que se puede considerar una evolución de Visual Basic implementada sobre el framework.NET. Además permite la conexión a un sinnúmero de bases de datos (SQL, MYSQL, Oracle, PostgreSQL, Access) logrando trabajar en diferentes ambientes para cubrir las necesidades.

4.3 Características del sistema.

Para el desarrollo del sistema se requiere hacer un análisis detallado de requerimientos, flujos de procesos, y estructura completa del procedimiento para la Planificación y Dimensionamiento de redes de acceso LTE 4G, lo que permitirá obtener una sistematización de los procesos manuales para el cálculo de la cobertura de una estación base en un área geográfica.

El sistema de planificación y dimensionamiento debe estar disponible para el acceso de los estudiantes y académicos que desean realizar cálculos y simulaciones de redes LTE 4G, donde podrán acceder a través de la interfaz web desde cualquier sitio para procesar información y generar reportes.

Para ingresar al sistema será necesaria la asignación de un usuario y contraseña debidamente registradas por el administrador, quién otorgará los permisos necesarios para acceder a las diversas opciones del menú principal, donde se almacenará en la base de datos los movimientos realizados por cada usuario según el rol asignado.

Los cálculos realizados a través del sistema serán almacenados en una base de datos, manteniendo integridad, confiabilidad y seguridad en la información.

4.4 Condiciones específicas del sistema.

Entre los requerimientos para establecer de manera efectiva la planificación y dimensionamiento de redes de radio LTE 4G que debe proporcionar el sistema, se debe tomar en cuenta los estándares 3GPP, donde se detallan especificaciones para las entradas y salidas de información correspondiente a cada uno de los módulos asignados en el software, como características de equipos móviles, antenas, potencias de transmisión, tipos de modulación, indicadores de calidad y señal ruido del sistema.

- Las interfaces gráficas de la aplicación serán amigables y seguras para el usuario.
- Llevar de manera automatizada los procedimientos para el cálculo de la cobertura y capacidad de una red de radio LTE 4G a través de la implementación del sistema.
- Consultar en tiempo real la información generada en el sistema por cada simulación realizada.
- Obtener reportes de resultados finales como tasas de datos, potencias de recepción en las estaciones bases, número de sitios desplegados, modulación utilizada y radio máximo de cobertura.
- Se debe controlar el acceso mediante la generación de claves encriptadas a los usuarios registrados en el sistema.
- Almacenar en la base de datos la información pertinente estableciendo parámetros de acceso y seguridad.
- Consultas de simulaciones realizadas por cada usuario y generación de reportes con resultados finales.

4.5 Diseño de la arquitectura de la solución.

Las aplicaciones web se fundamentan en la idea de que los navegadores que las ejecutan muestran páginas escritas en HTML. Este tipo de aplicaciones se diseña

con una arquitectura de Cliente/Servidor de tres capas o niveles, la misma que es compartida en:

Un cliente de aplicación, es decir, el equipo que solicita los recursos, equipado con una interfaz de usuario mediante un navegador web, para la presentación de información de cada usuario con sus respectivos privilegios en el Menú Principal, realizando a su vez cambio de contraseña si el caso lo requiera.

El servidor de aplicaciones web Xampp también conocido como software intermedio o lógica de negocio, cuya tarea es proporcionar los recursos de enlace entre el software de aplicación y el usuario final.

El servidor de base de datos Mysql, el mismo que proporciona el almacenamiento de datos necesarios para la ejecución de la aplicación, permitiendo el ingreso, selección y procesamiento de información que el usuario final genera a través del aplicativo en su interfaz web.

4.6 Diseño de los componentes y procesos a automatizar.

En el diseño de componentes se estructuran las tecnologías y servicios presentes en la implementación del sistema, incorporando los diagramas en la Figura 4.2 que detallan cada uno de los procesos en el sistema.

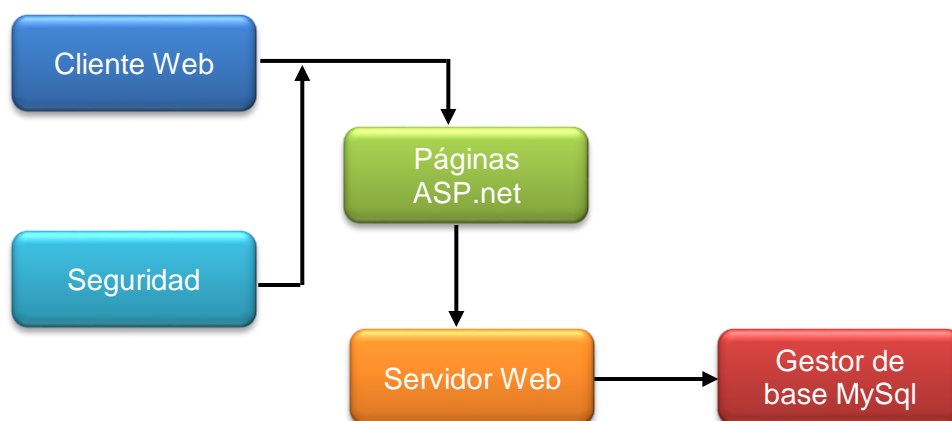


Figura 4.2: Diagrama de componentes

El proceso principal en el sistema para la planificación y dimensionamiento de redes de acceso LTE 4G se refleja en las operaciones realizadas por los usuarios,

iniciando con el acceso al sitio web mediante un usuario y contraseña asignados, tal como se detalla en la Figura 4.3.

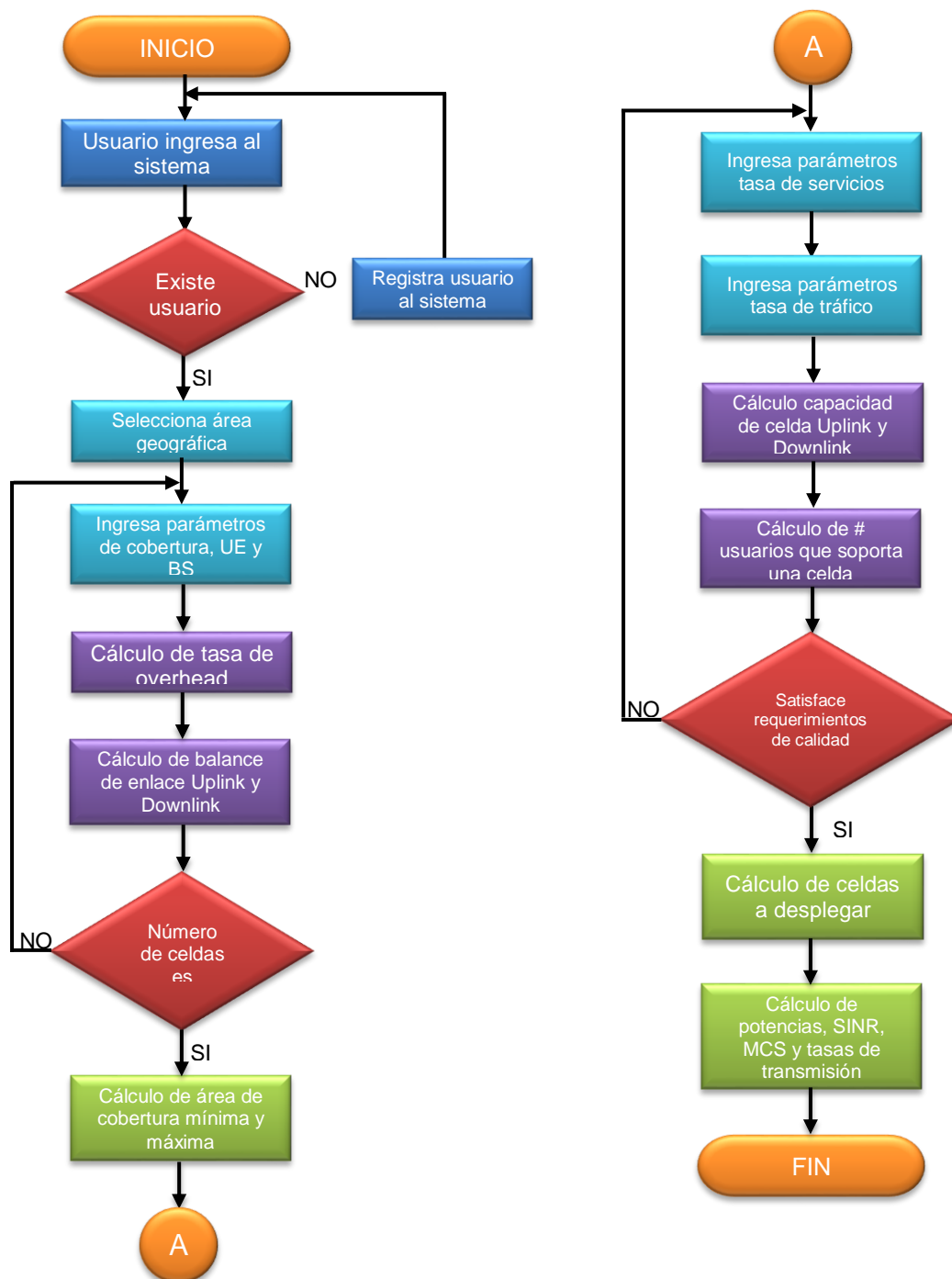


Figura 4.3: Diagrama de planificación y dimensionamiento LTE 4G

Una vez el usuario ingrese en el sistema, visualizará las opciones de administración de usuario (cambio de contraseña), planificación y dimensionado de una red, calculadoras de ruido térmico y velocidades de transmisión, y acceso a reportes finales.

En la opción de planificación y dimensionado de una red el usuario podrá consultar las simulaciones realizadas anteriormente, así como iniciar un nuevo despliegue, seleccionando el lugar de despliegue de la red, donde se irán activando diversas pantallas para ingresar los valores de balance de enlace ascendente y descendente respectivamente. En esta parte se elegirá el MCS requerido por el sistema, de acuerdo a la tasa de datos ofrecida para el usuario. Luego registra los parámetros de cobertura como frecuencias, alturas de antenas, valores de sobrecarga por señalización, y tipo de sitios. Con estos datos se calcula la máxima pérdida de trayectoria de la señal, obteniendo el radio de la celda, el área de celda y la cantidad de sitios que se deberán desplegar en el área geográfica. Luego se ingresan los parámetros de tráfico según los servicios solicitados por los usuarios, para calcular la capacidad total que tendrá la celda, con estos valores se determinará la cantidad de usuarios que soportará una estación base. Como resultados finales obtendremos la cantidad de celdas a desplegar en el área geográfica, las potencias de recepción, relación señal ruido más interferencia, esquemas de codificación y modulación según la distancia; y la tasa de transmisión efectiva en la red LTE 4G.

4.7 Diseño de la base de datos.

El gestor de base de datos MySQL Workbench es un aplicativo diseñado para administrar visualmente bases de datos. Esta herramienta permite el diseño de modelos de bases de datos, con diagramas visuales para establecer relaciones entre conjuntos de tablas. También posee un editor de texto en el que se realizan consultas y ejecución de acciones mediante comandos para seleccionar, insertar, actualizar o eliminar datos de una tabla.

Una base de datos correctamente diseñada permite obtener acceso a información exacta y actualizada. Un buen diseño nos lleva a tener datos confiables y de esta manera tener una estructura robusta para lograr los objetivos

fijados para la base de datos. El principio básico del diseño de una base de datos funcional y eficiente se guía por algunas normas. El primero de ellos es evitar la información duplicada o datos redundantes, porque malgastan el espacio y además pueden llevar a que se produzcan errores e incoherencias. El segundo que la información sea correcta y completa.

Ventajas de las bases de datos

1. Autonomía en los procesos. Para aplicar cambios o modificaciones sin afectar al resto de la información.
2. Menor redundancia. Reducción de datos repetitivos en la codificación y base de datos.
3. Integridad de los datos. Ventaja de mantener los datos o de evitar incoherencias con ellos, asegurando la consistencia de la base de datos.

El Proceso de Diseño

1. Se determina la finalidad de la base de datos. Esto ayuda a estar preparado para los demás pasos, pues permite tomar decisiones correctas sobre la información que se va a almacenar en la base.
2. Se busca y organiza la información necesaria. Se agrupa todo tipo de información que se desee registrar en la base de datos, como los datos de potencias de transmisión, recepción, pérdidas, ganancias, sensibilidad de receptor, MAPL, radios de celda, áreas de cobertura, cantidad de datos por usuario, tasa promedio de celda, cantidad de sitios según la capacidad y cobertura y número de usuarios.
3. Se divide la información obtenida en tablas. Se divide los elementos de información de acuerdo al tipo de dimensionado, por capacidad, cobertura, potencias de recepción, datos de usuario y resultados finales.
4. Se convierten los elementos de información en columnas. Se decide qué información se va almacenar en cada una de las tablas. Cada ítem se convertirá en un campo y se visualizará como una columna en la tabla. Por ejemplo, una tabla Simulación podría incluir campos como frecuencia y área desplegada.

5. Se especifica claves principales. Se elige la clave principal de cada tabla.

6. Se define relaciones entre las tablas. Se examina cada tabla y se decide cómo se relacionan los datos de una tabla con las demás tablas, en caso de ser necesario se agregan campos a las tablas o se crean nuevas tablas para clarificar las relaciones.

Modelo de la Base de Datos

Antes de utilizar MySQL para crear las tablas y los demás objetos, es importante diseñar la base de datos. Un buen diseño es la pieza clave para crear una base que realice las operaciones que se deseen, de una forma correcta y efectiva. A continuación se muestra la figura del modelo de la base de datos que se utilizará para implementar el sistema para Planificación y Dimensionamiento de redes de acceso LTE 4G.

La estructura está formada por un grupo en el que se tienen 15 tablas, éstas almacenan la información de los usuarios, parámetros y resultados de cobertura y capacidad de las redes utilizadas en cada simulación. En la Figura 4.4 se muestran las tablas que conforman el grupo de datos de ubicación y esquemas de modulación y codificación. Se realizó utilizando el esquema columna considerando el crecimiento masivo de datos al alojar cantidades significantes en los procesos de planificación y dimensionamiento, pudiendo la base de datos llenarse con gran facilidad.

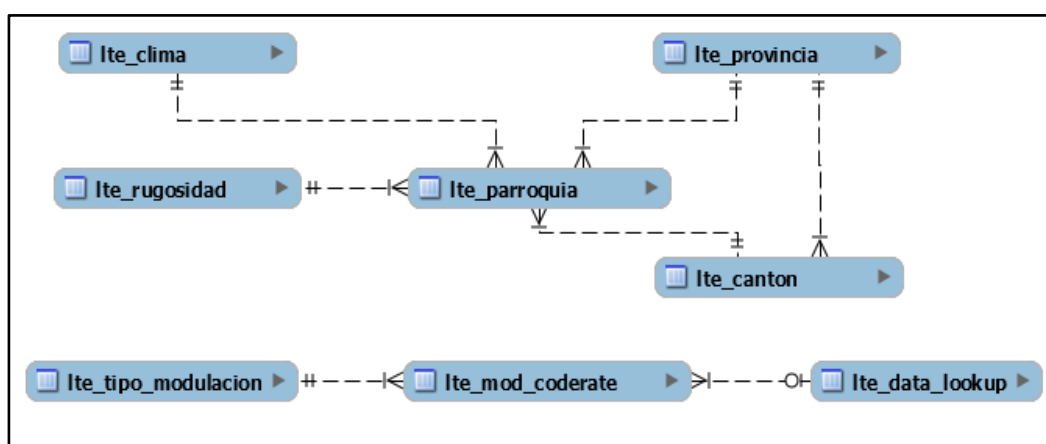


Figura 4.4: Modelo de base de datos 1

El proceso de planificación y dimensionamiento comienza desde que el usuario se registra en el sistema y selecciona la opción de INICIAR. Inmediatamente se activan las ventanas para ingreso de datos en el balance de radio enlace ascendente y descendente, registrando parámetros de cobertura y sobrecarga, para realizar los respectivos cálculos y presentar resultados finales que son almacenados en la tabla cabecera y detalle simulación. La Figura 4.5 corresponde al grupo de tablas que conforman la información de simulaciones realizadas por cada usuario en el sistema.

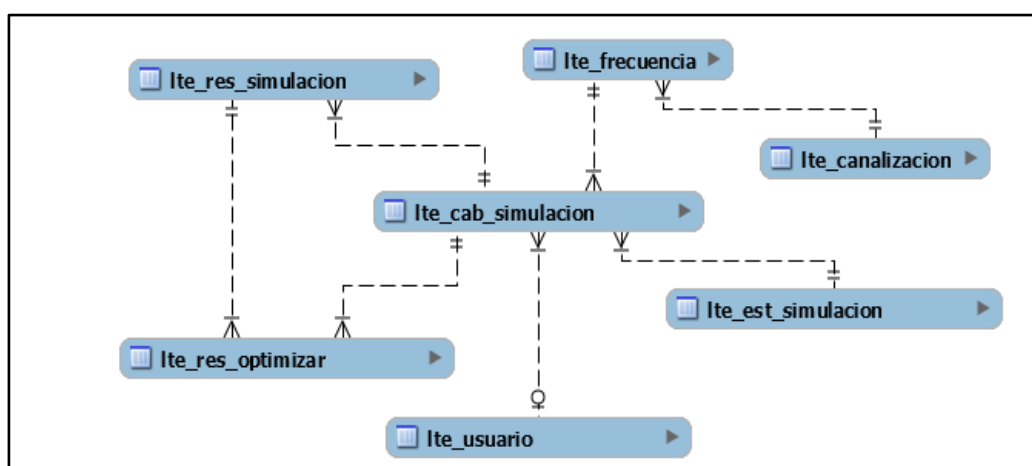


Figura 4.5: Modelo de base de datos 2

Como siguiente paso se ingresan los datos en la ventana de parámetros de tráfico para los diversos servicios ofrecidos en LTE 4G.

Finalmente se presentan los resultados finales de cobertura y capacidad, los cuáles son registrados en la tabla capacidad y contar con los datos finales de la simulación. Adicionalmente se generan las potencias de recepción, los SNR y MCS permitidos y las tasas de datos por celda.

En las Figura 4.6 se indica el detalle de campos asignado a cada tabla, con un indicador de clave primaria indexada que permitirá la búsqueda eficiente de los datos en caso de almacenamiento masivo de información, además la relación entre cada tabla para la interacción y gestión organizada de las simulaciones. Esta interacción entre campos únicos de varias tablas permite al sistema ubicar la información de forma ágil y segura.

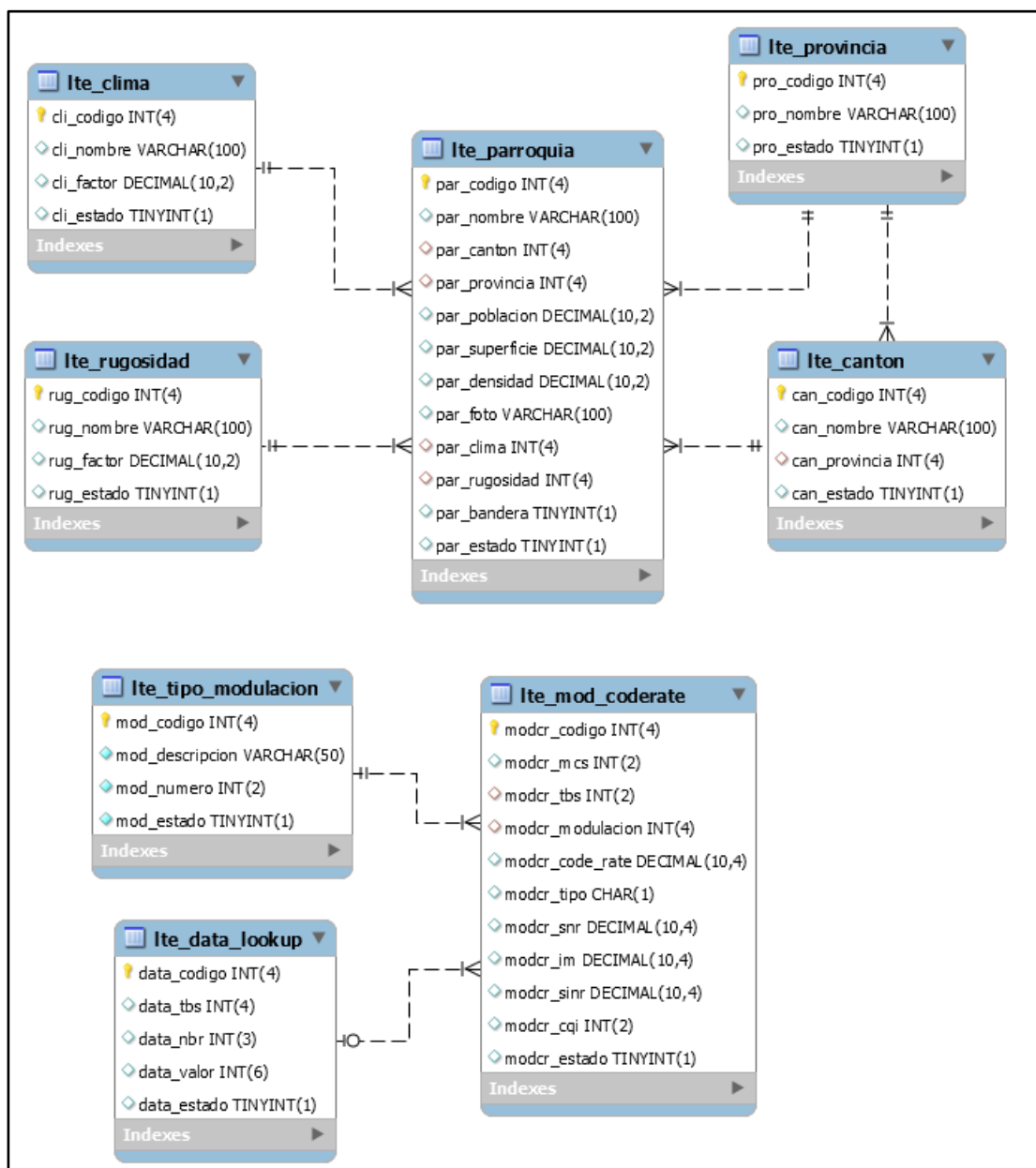


Figura 4.6: Detalle de campos modelo de base de datos 1

La Figura 4.7 indica la relación existente entre las tablas cabecera simulación, resultado simulación y optimización de valores, diseñadas exclusivamente para almacenar los resultados de cada uno de los cálculos realizados en el sistema, siendo clasificados por lugar, usuario, parámetros de radio enlace en los canales

ascendentes y descendentes, datos de cobertura y niveles de tráfico de los servicios disponibles según el entorno geográfico.

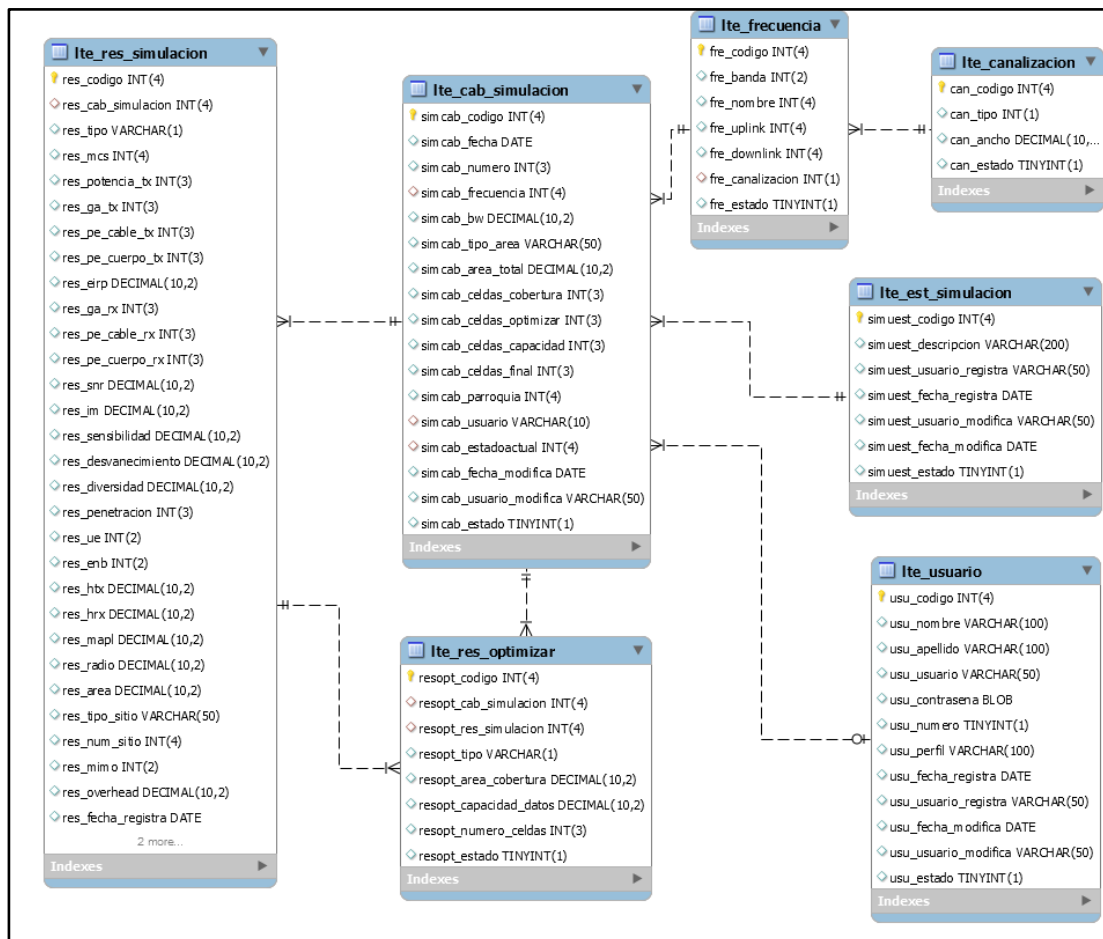


Figura 4.7: Detalle de campos modelo de base de datos 2

4.8 Diseño de la interfaz gráfica.

La interfaz de usuario juega un papel preponderante en el diseño y puesta en marcha del sistema, es la carta de presentación del mismo y en ocasiones resulta determinante para la aceptación o rechazo de todo el sistema. El diseño de la aplicación se centra en el usuario, por lo tanto se crearon formularios de acuerdo a los formatos empleados por los diversos procesos de la planificación y dimensionamiento de redes de acceso LTE, aplicando modelos reales en la sistematización de ventanas, colores, modelos y escenarios que son visualmente agradables, para tener un fácil desempeño en las opciones del sistema. Así

mismo se despliega un menú con la información completa a la que se puede acceder según el perfil asignado.

La Figura 4.8 representa el esquema de pantalla utilizado en el proyecto, con un diseño amigable y fácil para el usuario, donde puede acceder mediante un navegador web. En este caso, al seleccionar una provincia se despliegan los cantones asignados, y por cada cantón se muestran las distintas parroquias con los valores de superficie, población y densidad poblacional.

SISTEMA DE PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE REDES DE ACCESO DE RADIO LTE

Inicio > PLANEACION Y DIMENSIONAMIENTO > CALCULADORA > REPORTES

SELECCIÓN DEL LUGAR

Provincia	SANTA ELENA
Cantón	SALINAS
Parroquia	SALINAS
Superficie	25,50 Km2
Población	34789,00 Hab
Densidad poblacional	1364,27 Hab /Km2

CONTINUAR

Provincia de Santa Elena
Cantón Salinas

Google Earth

miércoles, 23 de agosto de 2017

Usuario:
ESPOL MET III @Copyright 2017

Figura 4.8: Interfaz de selección de lugar en el sistema

CAPÍTULO 5

5. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL SISTEMA.

El desarrollo del sistema de Planificación y Dimensionamiento de redes de acceso de radio LTE 4G está basado en la programación de herramientas web, base de datos y servidores de aplicaciones permitiendo la ejecución de procesos y simulaciones a los usuarios.

5.1 Construcción del sistema.

Una vez concluida la etapa de análisis y diseño de sistemas se procede con la implementación del programa, utilizando las siguientes herramientas:

1. MySQL Server. Servidor potente de base de datos que sirve para almacenar la información generada por las simulaciones de los usuarios que utilizan la aplicación. Una de las ventajas de la base de datos MySQL es que puede instalarse y funcionar perfectamente en una computadora de bajos recursos tecnológicos, consumiendo poca memoria y recursos.

2. Visual Studio 2015. Herramienta de programación orientada a objetos que se utiliza para desarrollar aplicaciones informáticas. La aplicación Visual Studio 2015 ha sido creada con visión al futuro, pensando en realizar software avanzado de aplicaciones web, en la nube y en dispositivos táctiles. Presenta un entorno de desarrollo integrado e incluye nuevas herramientas que permiten la relación con diferentes sistemas gestores de bases de datos. La combinación con MySQL genera un componente robusto y eficaz para soportar procesamiento de datos en todos los niveles, ayudados de componentes dinámicos como Ajax para mejorar la entrega de visualización en las interfaces gráficas.

3. Xampp Web Server. Servidor web y un conjunto de servicios para cualquier sistema operativo disponible. Se puede instalar de manera fácil y segura, configurando puertos y privilegios a los usuarios para el acceso remoto.

El diseño del sistema en ambiente web proporciona una conectividad rápida a los usuarios, quienes haciendo uso de un navegador web, puedan iniciar sesión

desde cualquier computador, portátil o tablet donde se encuentren, y así realizar diferentes simulaciones en la herramienta informática.

5.2 Instalación de componentes.

El sistema de Planificación y Dimensionamiento de redes de acceso LTE 4G requiere componentes que deben ser instalados en caso de ser un servidor local para ofrecer el servicio web, o alojados en un servidor externo para acceso desde la nube. En el caso de ser local, se activará el servicio web y base de datos mediante el aplicativo Xampp, versión libre la cual permite la interacción de páginas web dinámicas. El programa se instalará con los siguientes pasos:

- Descargar del internet el aplicativo Xampp
- Ejecutar el instalador, seleccionando los servicios a activarse, tal como se muestra en la Figura 5.1.

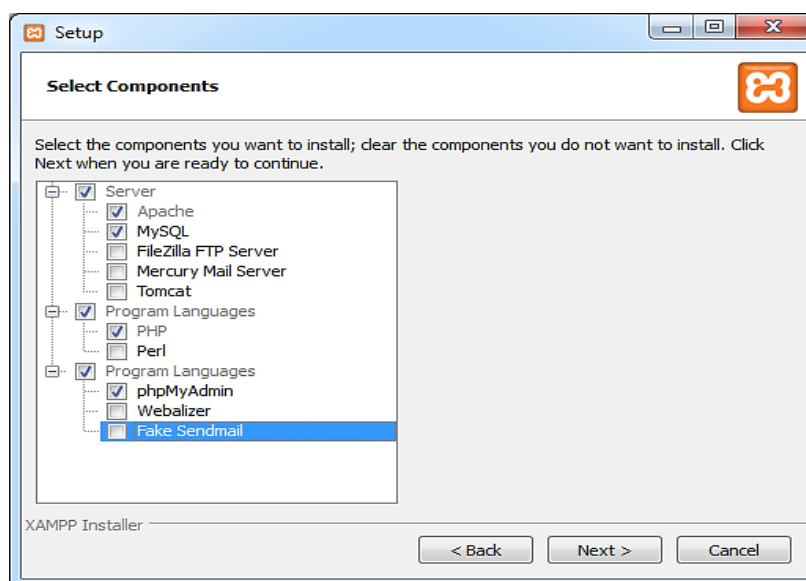


Figura 5.1: Selección de componentes a instalar en Xampp

- Finalizar instalación, donde se marca el puerto por defecto de los servidores y aparece los registros que se van ejecutando en el momento, tal como se muestra en la Figura 5.2.

A continuación procedemos a instalar el IIS Express, como servicio adicional para la interacción de páginas ASP.Net, de la siguiente manera:

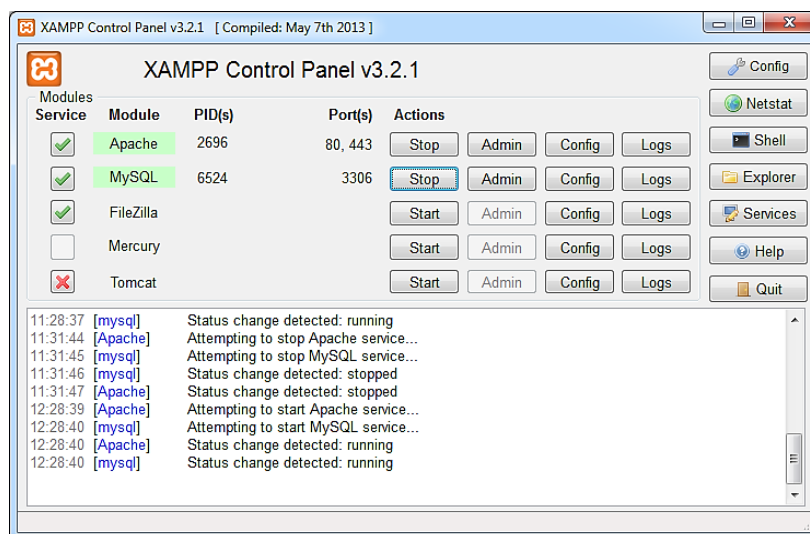


Figura 5.2: Panel de Control Xampp

A continuación procedemos a instalar el IIS Express, como servicio adicional para la interacción de páginas ASP.Net, tal como se muestra en la Figura 5.3.

- Descargar del sitio oficial en internet el IIS Express
- Abrir el aplicativo y ejecutar siguiendo los pasos de instalación
- Una vez instalado, procedemos a abrir el programa y activar el servicio Default Web Site, donde inicializará el sitio web.

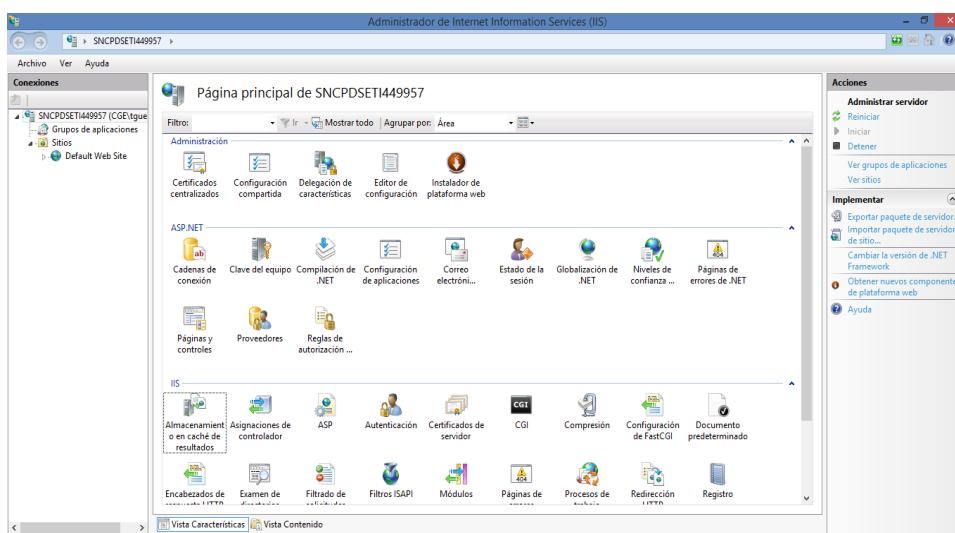


Figura 5.3: Administrador IIS Express

Finalmente debemos cargar la base de datos del aplicativo web en el gestor, esto se realiza como se muestra en la Figura 5.4.

- Ingresar mediante el navegador web a la dirección localhost/phpmyadmin.
- Crear una nueva base de datos con el nombre LTE.

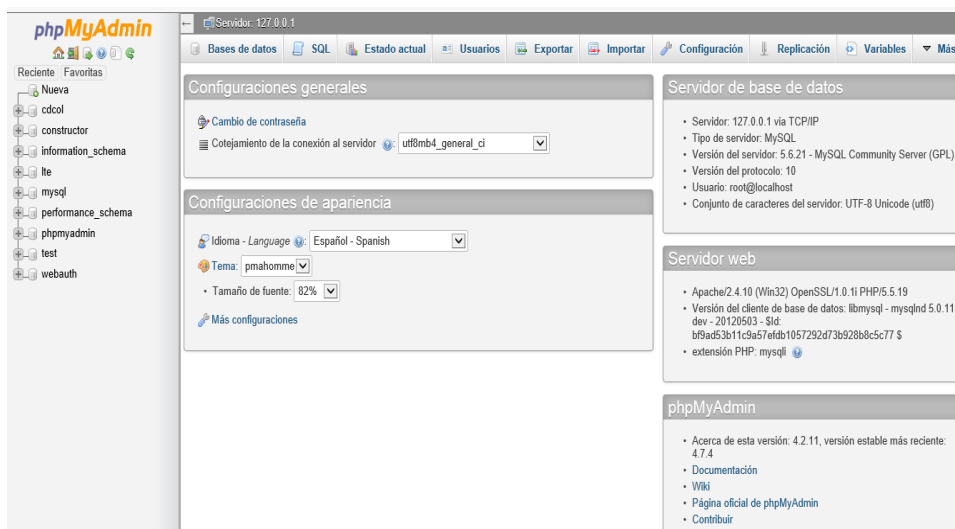


Figura 5.4: Administrador phpMyAdmin para base de datos

- Seleccionar importar y escoger el archivo de respaldo, con extensión SQL.
- Se cargará la base de datos LTE en MySQL. El tamaño máximo de una base de datos está determinado por la cantidad de espacio de disco disponible.

5.3 Configuración de parámetros iniciales.

Una vez instalado los componentes principales del sistema, se deberá realizar la configuración inicial, que corresponde al registro en la base de datos de los parámetros necesarios para la planificación y dimensionamiento de una red LTE 4G, los que comprenden el ingreso de usuarios, valores estándares de los esquemas MCS para enlace ascendente y descendente especificados en el 3GPP, tabla de tamaño de bloques de transporte (TBS), tipos de modulación, tasas de código, valores de relación señal ruido más interferencia, características

del terreno y del clima, superficie y densidad poblacional por cantones y parroquias del Ecuador.

Como primer paso deberá ingresar un usuario y contraseña, como se muestra en la Figura 5.5, el cual estará previamente registrado en el sistema.

Figura 5.5: Pantalla de ingreso al sistema

Una vez verificado los campos de usuario y contraseña, se presentará la pantalla de la Figura 5.6, donde se ubica el menú principal en la parte superior con las opciones del sistema, también estarán cargadas las simulaciones realizadas anteriormente para visualizarlas, así como un botón para el inicio de una nueva simulación.

Figura 5.6: Pantalla de ingreso al sistema

Al seleccionar el inicio de simulación, se muestra la ventana de la Figura 5.7, donde se escoge el lugar geográfico en el cual se desplegarán las celdas celulares. Al desarrollar un sistema para el sector académico en Ecuador, tendrá cargado previamente las provincias, cantones y parroquias más importantes del país, contando con el área en kilómetros cuadrados, el número de población y la densidad, datos proporcionados por el INEC, así como las fotografías satelitales actualizadas.

SELECCIÓN DEL LUGAR

Provincia	SANTA ELENA
Cantón	LA LIBERTAD
Parroquia	LA LIBERTAD
Superficie	24,98 Km ²
Población	95942,00 Hab
Densidad poblacional	3840,75 Hab /Km ²

CONTINUAR




Figura 5.7: Selección del área geográfica

Cálculo del balance de radio enlace ascendente

Continuando con el proceso de dimensionado, en la Figura 5.8 se registran los parámetros iniciales para el cálculo del balance de radio en el canal ascendente, donde se permite la selección de valores por “default”, considerando las medidas estandarizadas del 3GPP. Al ser un sistema para evaluar las capacidades de una red, los campos se han programado de tal manera que el usuario puede

especificar cualquier valor. Esto permite un mejor análisis e interpretación de resultados, para experimentar con valores reales y ficticios las posibilidades de planificar una mejor red celular. En la Figura 5.8 se presenta un esquema para el balance en el enlace de subida.

La potencia de máxima de transmisión de un equipo móvil se fija en 23 dBm, según se especifica en el estándar 3GPP. Esto se debe a que un celular no puede generar mayor potencia de transmisión porque podría disminuirse la carga de batería y provocar interrupción de la señal con la estación base [15].

La ganancia de la antena del equipo móvil siempre es menor a la de la estación base, motivo por el cual en el sistema se considera un rango de 0 a 5 dBi, esto es por la ubicación de la antena en el dispositivo, y al ser omnidireccionales no están dirigidas a un solo punto para mejorar la transmisión. Las antenas para estación base cuentan con una ganancia referencial de 15 a 21 dBi, dependiendo del ancho del haz, la direccionalidad y el tipo de antena [19].

Las pérdidas por cuerpo son ocasionadas por las interferencias que emiten las diferentes zonas del cuerpo humano, principalmente la cabeza. Se sitúa entre los valores de 0 a 3 dB. Seguidamente debemos seleccionar el esquema de codificación y modulación para el enlace ascendente, el cual se encuentra especificado en el 3GPP 36-213.

Balance del enlace UpLink		
ID	Parámetro	Valor
Transmisor UE		
		<input checked="" type="checkbox"/> *
a	Potencia máxima de transmisión	23 (dBm)
b	Ganancia de antena Tx	0 (0-5 dBi)
c	Pérdidas por cuerpo	0 (0-3 dB)
Cell Edge		
d	MCS Uplink	16QAM 0.307 ▾
e	Configuración de antena	SISO 1 X 1 ▾
CONTINUAR		ATRAS

Figura 5.8: Ingreso de parámetros para enlace ascendente

Dentro del estándar se detallan los valores índices para cada MCS relacionados directamente con un TBS (Tamaño de Bloque de Transporte), para indicar la cantidad de bits transmitidos en una trama. La tasa de código es la relación de la cantidad de bits recibidos correctamente frente a los bits enviados, y en este caso se selecciona la configuración 16 QAM 0.307.

El cálculo de la tasa de código se indica en la ecuación 3.14, y considera el tamaño de un bloque de transporte definido en el 3GPP TS 36.213, de acuerdo a la selección de un MCS. De acuerdo a eso, utilizando 100 bloques de recursos, un control cíclico de redundancia de 24 bits, y 4 bits correspondientes a la modulación 16 QAM, tenemos:

Cálculo del número de elementos de recursos

Para hallar el número total de elementos de recursos para datos en una trama:

$$RE = RB \times \# \frac{\text{subportadoras}}{RB} \times \# \text{símbolos OFDM} \times 2 \frac{\text{intervalos}}{\text{trama}} \times (1 - \% \text{ sobrecarga}) \quad (5.1)$$

Donde:

- RE: Número de elementos de recursos
- RB: Bloques de recursos asignados según la canalización
- # Símbolos OFDM: 7 bits de datos para prefijo cíclico normal y 6 bits de datos para prefijo extendido.
- % Sobrecarga: Se considera un porcentaje por señalización del 15%

$$RE = 100 \times 12 \times 7 \times 2 \times (1 - 0.15)$$

$$RE = 14280$$

Una vez obtenidos estos valores, se procede al cálculo de la tasa de código:

$$\text{tasa de código} = (17568 + 24) / (14280 \times 4)$$

$$\text{tasa de código} = 0.30798$$

Para la configuración de antenas, en nuestro caso seleccionamos un SISO 1 x 1, conociendo que en el enlace ascendente se puede tener hasta cuatro antenas transmitiendo y cuatro recibiendo señal.

Cálculo del balance de radio enlace descendente

La configuración de parámetros para el cálculo balance de enlace descendente sigue los mismos lineamientos descritos anteriormente, en la Figura 5.9 se observa el inicio con la selección del MCS, referenciado en el estándar 3GPP con los valores índices de TBS para el canal descendente. En este caso particular, elegimos la configuración 16 QAM 0.642, y el proceso del cálculo de la tasa de código es similar al del enlace ascendente.

Así mismo se hace necesario la selección de la configuración de la antena, que como se menciona en la Tabla 4 del Capítulo 2, depende de la categoría del terminal móvil. En nuestro caso seleccionamos una configuración MIMO 4 x 4.

Balance del enlace DownLink		
ID	Parámetro	Valor
	Cell Edge	<input checked="" type="checkbox"/> *
a	MCS Downlink	16QAM 0.642 ▾
b	Configuración de antena	MIMO 4 X 4 ▾
	Transmisor Node B	
c	Clase estación base	Area Amplia ▾
d	Potencia máxima de transmisión	46 (dBm)
e	Ganancia de antena Tx	18 (15-21 dBi)
f	Pérdidas por cable	2 (1-6 dB)
<input type="button" value="CONTINUAR"/> <input type="button" value="ATRAS"/>		

Figura 5.9: Ingreso de parámetros para enlace descendente

El 3GPP define varios tipos de estación base, entre los cuales están los de área amplia, área local y área hogar. Estas estaciones requieren una potencia máxima de transmisión, dependiendo además de la configuración de la antena, tal como se muestra en la Tabla 17, donde para una estación base con área amplia y esquema MIMO 4 x 4 la potencia de transmisión es de 43 dBm. De la misma forma, para la ganancia de la antena en la estación base se ha utilizado como

medida aproximada un promedio de 18 dBi, dependiendo del ancho del haz vertical, horizontal, del tipo de antena y de la frecuencia [23].

Clase estación base	Tipo de escenario	Potencia de transmisión (dBm)	Número de antenas transmisoras
Área Amplia	Macro celdas	43	Cualquiera
Área Local	Pico celdas	< 24	1
		< 21	2
		< 18	4
		< 15	8
Área Hogar	Femto celdas	< 20	1
		< 17	2
		< 14	4
		< 11	8

Tabla 17: Potencias de transmisión de la estación base

Las pérdidas por cable están en función de la frecuencia, longitud y tipo de cable. En nuestro proyecto, se ha estimado un valor por pérdida de 2 dB.

Otros parámetros de enlace

El Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información a través del Plan Nacional de Frecuencias designó a las operadoras móviles del país ciertas frecuencias para el despliegue de redes LTE 4G, las mismas que corresponden a la Banda 2, 4 y 28 del estándar 3GPP. Para este proyecto se han utilizado además de las bandas mencionadas anteriormente, las frecuencias que permiten trabajar con los canales de ancho de banda 1.4, 3, 5, 10 y 20 MHz, tal como se presenta en la Tabla 18 [15].

Banda	Frecuencia	Canalización (MHz)
1	2100	5,10,15,20
2	1900	1.4,3,5,10,15,20
3	1800	1.4,3,5,10,15,20
4	1700	1.4,3,5,10,15,20
7	2600	5,10,15,20
20	800	5,10,15,20
28	700	3,5,10,15,20

Tabla 18: Bandas de frecuencias utilizadas

Las pérdidas por desvanecimiento se deben a la presencia de obstáculos en el área de propagación de la señal, disminuyendo la intensidad de la señal cuando el receptor se encuentra en una zona de sombra provocada por grandes edificaciones, construcciones o árboles. Estas zonas se conocen como debilitamiento de sombra, con una distribución gaussiana con media cero, y determinada en dB, las cuáles impiden que exista visibilidad directa entre el transmisor y receptor, contribuyendo con una atenuación adicional que se incrementa a las pérdidas totales del sistema. Por tal motivo, para aumentar el tamaño de cobertura de una celda se debe añadir un margen de seguridad, en nuestro caso consideramos un porcentaje de cobertura en el borde de la celda de un 90% y obtenemos según la Tabla 19, un coeficiente normalizado de 1,3 [24].

Coeficiente de sombra normalizado	Probabilidad de cobertura
1,2	88,49 %
1,25	89,44 %
1,3	90,32 %
1,35	91,15 %
1,4	91,92 %
1,45	92,65 %
1,5	93,32 %
1,55	93,94 %
1,6	94,52 %
1,65	95,05 %

Tabla 19: Relación del coeficiente de sombra normalizado [25]

Según esta estructura, la probabilidad de cobertura de señal en una celda se ofrece en el rango de 88 % a 95 %, de acuerdo al nivel de cumplimiento que establece el operador en el despliegue de la red LTE. Cabe señalar que este nivel puede depender del tipo de cliente o servicio, además de presentarse un sinnúmero de impedimentos como topografía del terreno, densidad de usuarios y calidad de servicio [24].

El coeficiente de sombra normalizado multiplicado por una desviación típica σ en dB, dará como resultado el margen de sombra. La desviación típica depende del entorno y la frecuencia utilizada, y según recomendación UIT-R P.1406, se puede estimar su valor según la ecuación 5.2.

$$\sigma L = 5,25 + 0,42 \log\left(\frac{f}{100}\right) + 1,01 \left(\log\left(\frac{f}{100}\right)\right)^2 \quad (5.2)$$

Donde f es válida para 100 MHz y 3000 MHz. Estos parámetros se los presenta en la Figura 5.10.

Otros parámetros del enlace		
ID	Parámetro	Valor
Transmisor y Receptor		
a	Frecuencia (MHz)	1700
b	Canalización (MHz)	10,00
c	Tipo de área	Denso Urbano
d	Ganancia por diversidad	6 (dB)
e	Margen por sombra	9,34 (dB)
CONTINUAR		ATRAS

Figura 5.10: Ingreso de otros parámetros del enlace

En el margen de sombra se incluyen las pérdidas por penetración en edificaciones, generando un resultado de máxima trayectoria de señal que incluya una holgura necesaria para que el móvil pueda conectarse en el borde de la celda y no pierda la señal en zonas de alta densidad poblacional.

El valor promedio de ganancia por diversidad de recepción, tomando en cuenta la multiplexación espacial de la señal debido al uso de varias antenas. Esta técnica es útil para la transmisión en múltiples trayectos, estableciendo canales paralelos que traen consigo un aumento en la ganancia, donde con un arreglo de N antenas existe una ganancia de $10 \times \log(N)$ (dB) en relación señal ruido, tanto para transmisión como recepción. Esto quiere decir, que para un esquema 2 x 2 se obtiene 3 dB, en el caso de un MIMO 4 x 4 se obtienen 6 dB, y 9 dB para 8 x 8, si el terminal móvil es categoría 8.

Parámetros de cobertura

La figura de ruido es un parámetro que especifica el nivel de ruido inyectado por el amplificador a la señal de entrada. Se define como la relación entre la SNR de

entrada y la SNR de salida, siendo válida para un ruido de entrada con una temperatura estándar de 290 °K. En nuestro proyecto seleccionamos valores típicos de 7 dB para la estación base, produciendo mayor ruido térmico por los generadores de potencia de señal, que un terminal móvil con 2 dB [26].

En la Figura 5.11 se establecen valores referenciales para las figuras de ruido y alturas de las antenas transmisoras y receptoras.

Parámetros de cobertura		
ID	Parámetro	Valor
	Transmisor y Receptor	<input checked="" type="checkbox"/> *
a	Factor ruido móvil	<input type="text" value="2"/> (2-5 dB)
b	Factor ruido estación base	<input type="text" value="7"/> (6-11 dB)
c	Altura Antena Node B	<input type="text" value="35"/> (30-200 m)
d	Altura Antena Móvil	<input type="text" value="1,5"/> (1-10 m)
e	Tipo de sitio	<input type="text" value="Omni-direccional"/> ▼

Figura 5.11: Ingreso de parámetros de cobertura

El cálculo de la pérdida de propagación se estima con una altura de antena en la estación base de 30 a 200 metros, mientras que el móvil deberá estar situado de 1 a 10 metros. Así mismo, se seleccionan tres tipos de sitios para el despliegue de las torres celulares, con antenas omnidireccionales, direccionales para dos sectores y tres sectores. Al seleccionar el parámetro de tipo de sitio, el sistema automáticamente calculará el área cubierta por cada estación base.

Cálculo de sobrecarga

En el proceso de transmisión de señal ascendente y descendente, el sistema LTE requiere de un conjunto de señales físicas para conocer y controlar, el estado de conectividad entre el eNB y los UEs desplegados en un área geográfica. Estas señales físicas ocupan ciertos bloques de recursos, haciéndose necesario

calcular la cantidad de sobrecarga presente en la trama, y determinar los bloques de recursos utilizados por el canal físico de datos [27].

Para el cálculo de la sobrecarga por señalización en el enlace descendente consideramos en primer lugar las señales de referencias RS por puertos de antenas. Esta señal identifica los puertos de la antena del eNB, a través de señales primarias y secundarias. Si la estación base transmite con una antena como en la Figura 5.12, la cantidad de señales de referencia para un intervalo de tiempo es de 4 elementos de recursos. Para obtener el total de elementos de recursos utilizados por RS durante una transmisión de datos:

$$Total\ RE = \#RE/RS \times RB \times 2\ intervalos \times 10ms \quad (5.3)$$

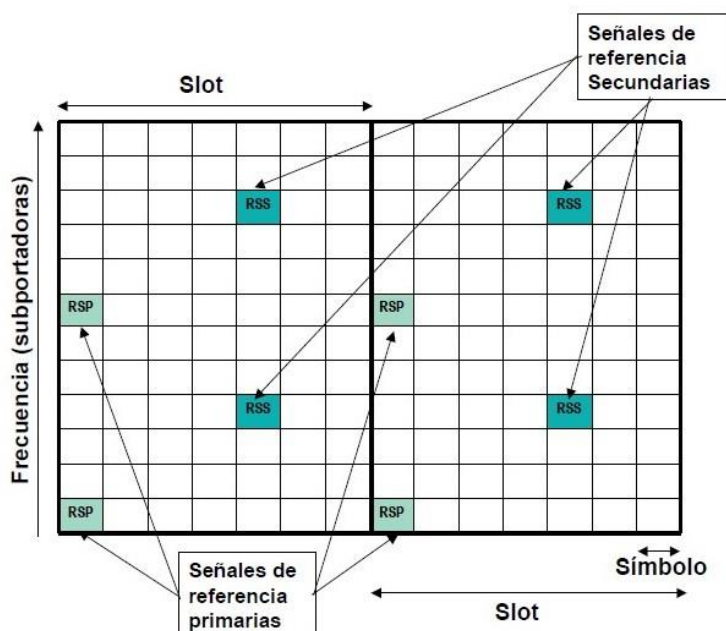


Figura 5.12: Señales de referencia en un PRB [6]

Estas señales de referencias son transmitidas cada seis subportadoras en el primer y quinto símbolo de cada intervalo para prefijo cíclico normal; y en el primer y cuarto símbolo si utiliza prefijo cíclico extendido. De tal manera, que si se incrementa el número de antena, las señales de referencia aumentarán proporcionalmente. Es decir, para dos antenas se requieren 8 señales de referencia, para cuatro antenas 16 señales y para ocho antenas 32 señales [6].

Para el cálculo de las señales físicas de control, el PDCCH lleva el Indicador de Control Descendente DCI, transmitiendo esquemas de modulación y codificación, control de potencia, redundancia cíclica y retransmisiones de información. Este DCI está conformado por uno o varios elementos de control de canal (CCE), como se muestra en la Tabla 1 del Capítulo 2. Estos elementos de recursos para cada CCE se determinan de acuerdo al formato DCI seleccionado por el sistema, dependiendo de la distancia localizada del terminal móvil con la estación base, y de las condiciones de propagación del enlace inalámbrico. Es decir, mientras el UE está cerca de la estación base, se necesitará un único CCE, caso contrario si está ubicado en el borde de la celda, se incrementará el número de CCE para conseguir una transmisión robusta [6].

En la Figura 5.13 se detallan los resultados de sobrecarga para ambos enlaces. El cálculo de los elementos de recursos designados para el PDCCH se realiza mediante el siguiente procedimiento:

$$Total\ RE = \#RE/CCE \times RB \times 10ms \quad (5.4)$$

ID	Parámetro	Valor	
a	Frecuencia (MHz)	1700	
b	Canalización (MHz)	10,00	
c	Tipo de área	Denso Urbano	
d	Número de bloques de recursos	50	
e	Número de subportadoras	600	
f	Recursos por trama	84000,00	
Downlink			..
g	Total de recursos por señalización	22576,00	
h	Porcentaje de sobrecarga	26,88	
Uplink			..
i	Total de recursos por señalización	25680,00	
j	Porcentaje de sobrecarga	20,57	

Figura 5.13: Cálculo de sobrecarga para enlace ascendente y descendente

El PBCH transporta información básica del sistema como la identificación de la red, bandas de operación, longitud del prefijo cíclico y configuración MIMO. Se transmite en las 72 subportadoras, ubicándose en los símbolos 0, 1, 2 y 3 del segundo intervalo. De igual manera, las señales de sincronización primaria y secundaria utilizan 72 subportadoras y se ubican en 2 símbolos del primero y

segundo intervalo, lo que permite la identificación de las celdas desplegadas. En la Figura 5.14 se muestra la ubicación de estas señales de referencias.

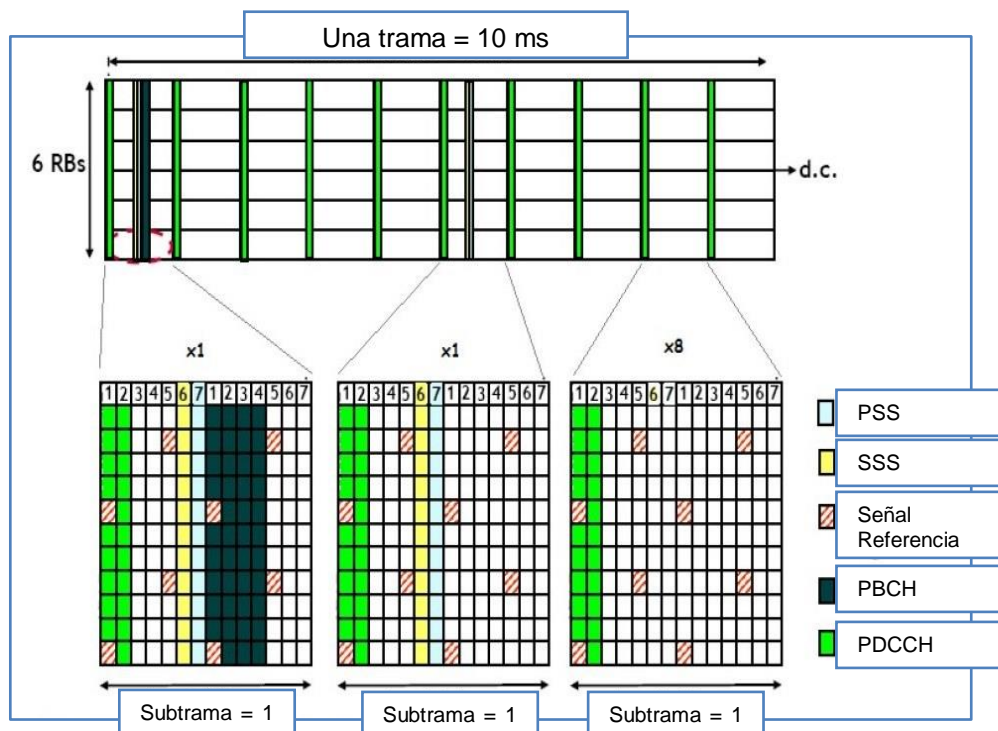


Figura 5.14: Ubicación de las señales físicas en el canal descendente

Resultados según cobertura

El resumen de parámetros y valores obtenidos se resume en la Figura 5.15, donde se clasifican los datos del enlace ascendente y descendente con los resultados para el transmisor, receptor, máxima pérdida de trayectoria y número de sitios a desplegar según la cobertura.

El balance de enlace da como resultado la máxima distancia de cobertura para una estación base, calculando el radio mediante la ecuación 3.10. Una vez obtenido el valor de cobertura máxima, calculamos la distancia utilizando el modelo de propagación Hata-Okumura con la ecuación 3.2. Finalmente, de acuerdo a la selección del sitio a desplegar, en nuestro caso se desea implementar una estación base que irradie señal por igual en todos los sectores, obtenemos el área de cobertura a través de la ecuación 3.16.

Todos estos cálculos dan como resultado el número mínimo de sitios a desplegar, indicando en la ecuación 3.17 que la cantidad de sitios según la cobertura es igual a la relación entre el área geográfica seleccionada frente al área de cobertura de una celda, determinando que para un área de 24,98 km² será necesario el despliegue de 21 sitios con antenas omnidireccionales.

RESULTADOS		
Frecuencia (Mhz)	1700	
Ancho de banda	10	
Tipo de área	Denso Urbano	
Area de despliegue (km2)	24,98	
Descripción	Downlink PDSCH	Uplink PUSCH
Transmisor	PDSCH	PUSCH
Tipo de modulación	16QAM 0,6426	16QAM 0,3075
Potencia de máxima de transmisión (dBm)	46	23
Ganancia de antena (dBi)	18	0
Pérdidas por cable (dB)	2	0
Pérdidas por cuerpo (dB)	0	0
EIRP (dB)	62	23
Receptor	PDSCH	PUSCH
Ganancia de antena (dBi)	0	18
Pérdidas por cable (dB)	0	2
Pérdidas por cuerpo (dB)	0	0
Factor ruido (db)	2	7
Señal a ruido SNR (dB)	6.9367	1.31
Margen de interferencia (dB)	3	3
Sensibilidad del receptor RS (dBm)	-95.52	-96.15
MAPL	PDSCH	PUSCH
Ganancia MIMO (dB)	0	6
Margen por sombra (dB)	9,34	9,34
Máxima Pérdida de Trayectoria (dB)	148.18	131.81
Radio de celda (km)	1.64	0.68
Área de celda (km2)	7.03	1.20
Número de celdas	4	21
Tipo de sitio	Omni-direccional	
Número de sitios por cobertura	21	

Figura 5.15: Sumario de resultados por cobertura

Terminado el procedimiento para hallar el número de sitios según la cobertura, continuamos con el registro de datos para el tráfico que circulará en una red.

Tráfico por servicio

Para el dimensionado de la red LTE 4G determinamos la cantidad de datos utilizado por los usuarios, de acuerdo a los servicios disponibles por cada operador. En el capítulo 3 se presentan valores típicos utilizados en el enlace ascendente y descendente para el cálculo de la tasa de datos por servicio. En la Figura 5.16 se muestra el listado de servicios disponibles, donde el usuario deberá seleccionar el servicio que ofrecerá en la red a desplegar, e indicar los valores para el canal ascendente y descendente de tasa de datos, tiempo de sesión punto a punto, tasa de sesión de radio y porcentaje de corrección de errores BLER.

Servicio	Modelo de servicio							
	UL				DL			
	Bearer rate (Kbps)	PPP Sesion Time	PPP Sesion Duty Ratio	BLER (%)	Bearer rate (Kbps)	PPP Sesion Time	PPP Sesion Duty Ratio	BLER (%)
<input type="checkbox"/> VoIP	26,9	80	0,4	1	26,9	80	0,4	1
<input type="checkbox"/> Video Phone	62,53	70	1	1	62,53	70	1	1
<input checked="" type="checkbox"/> Video Conference	62,53	1800	1	1	62,53	1800	1	1
<input type="checkbox"/> Real Time Gaming	31,26	1800	0,2	1	125,06	1800	0,4	1
<input checked="" type="checkbox"/> Streaming Media	31,26	3600	0,05	1	250,11	3600	0,95	1
<input checked="" type="checkbox"/> IMS Signaling	15,63	7	0,2	1	15,63	7	0,2	1
<input type="checkbox"/> WEB Browsing	62,35	1800	0,05	1	250,11	1800	0,05	1
<input type="checkbox"/> File Transfer	140,69	600	1	1	750,34	600	1	1
<input type="checkbox"/> E-mail	140,69	50	1	1	750,34	15	1	1
<input checked="" type="checkbox"/> P2P File Sharing	250,11	1200	1	1	750,34	1200	1	1

Figura 5.16: Parámetros de tráfico según el tipo de servicio

Cada cuadro de selección permite activar o desactivar el servicio, y no sea utilizado en el cálculo de la tasa de datos por usuario y red del sistema. Las operaciones se realizan a través de la ecuación 3.16, donde se obtiene la intensidad de tráfico en Kbps de cada servicio.

Cabe señalar que existen diferencias en la tasa de datos transmitidos entre el enlace ascendente y descendente, debido a la utilización y tipo del servicio. Es decir, en el caso de la navegación web, los usuarios comúnmente descargan información de los sitios en internet, más no cargan datos desde sus móviles

hacia las páginas web. Lo mismo sucede con transferencia e intercambio de archivos, correo electrónico y juegos en línea, donde el usuario solicita descarga de información.

Modelo de tráfico

Para realizar el cálculo de la tasa total de datos operativa de la red, será necesario el cálculo por servicio de la tasa de penetración y la cantidad de intentos de llamadas en horas picos. Estos valores se definen de acuerdo a los entornos geográficos de la red, con valores típicos para zonas densos urbanos, urbanos, suburbanos y rurales. La Figura 5.17 presenta una tabla con los valores a utilizar. Una vez establecidos los datos por servicio, utilizamos la ecuación 3.18, donde se procede a calcular la tasa total de la red a través del producto de los datos de red IP por la cantidad total de usuarios del sistema [4].

Modelo de tráfico				
	DU	URBANO	SUB-URBANO	RURAL
Servicio	Tasa de penetración de tráfico (%)		Intentos de llamadas en horas ocupadas BHSA	
<i>VoIP</i>	50		1	
<i>Video Phone</i>	10		0,1	
<i>Video Conference</i>	10		0,1	
<i>Real Time Gaming</i>	10		0,1	
<i>Streaming Media</i>	5		0,1	
<i>IMS Signaling</i>	25		3	
<i>WEB Browsing</i>	40		0,3	
<i>File Transfer</i>	20		0,2	
<i>E-mail</i>	10		0,2	
<i>P2P File Sharing</i>	20		0,2	

Figura 5.17: Parámetros de tráfico según el entorno geográfico

La cantidad de usuarios del sistema depende de la densidad poblacional del área desplegada. Esta información es proporcionada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador, donde existen los datos del área ocupada por

provincia, cantón y parroquia, así como el número de habitantes en esa región. Sin embargo, hay que señalar que de ese total de población, solo un porcentaje hará uso de la red celular, estableciendo de esta manera una cantidad aproximada de usuarios activos en el sistema [18].

Concluido este procedimiento, logramos obtener los datos de tráfico según los parámetros establecidos anteriormente, calculando la tasa de datos requerida por toda la red, la capacidad de la estación base; y la relación de estos dos valores nos da como resultado la cantidad de celdas necesarias para cubrir la demanda de datos solicitada por los usuarios, tal como se muestra en la Figura 5.18.

RESULTADOS DE CAPACIDAD

Frecuencia (MHz)	1700
Ancho de banda (MHz)	10,00
Área de despliegue (Km2)	24.98
Tipo de área	Denso Urbano
Número de usuarios	67159
Localidad	LA LIBERTAD

Descripción	Downlink	Uplink
Consumo de datos por usuario (Kbps)	24,84	6,03
Consumo de datos total (Mbps)	1668,24	404,97
Descripción	Valores	
Área de cobertura de anillo (Km2)	4,73	
Tipo de celda	Omni-direccional	
Número de celdas requeridas según cobertura	5	
Capacidad requerida por celda (Mbps)	333,65	
Densidad de datos (Mbps/Km2)	66,78	
Capacidad máxima soportada por celda (Mbps)	315,88	
Número de usuarios soportados por celda	12717	

Figura 5.18: Resultados según la capacidad

En resumen, tenemos que un usuario requiere 24,84 Kbps para descarga y 6,03 Kbps para carga de información, a través del acceso a los servicios de VoIP, video llamada, juegos en línea, navegador web, transferencia de archivos y correo electrónico. Cada celda puede soportar aproximadamente 315,88 Mbps para ambos enlaces, lo que significa que será necesario el despliegue de 5

celdas. Esto nos indica, que el número total de celdas será de 5 sitios con antenas omnidireccionales, lo que permitirá dar servicio en un área urbana de 24,98 km².

5.4 Validación y análisis de resultados finales.

Para verificar los resultados del sistema, utilizamos como área de simulación, el despliegue de una red en el cantón La Libertad, perteneciente a la provincia de Santa Elena, con una superficie de 24,98 Km² y una densidad poblacional de 3840 habitantes por Km², forma parte de una de las ciudades más pobladas en relación con su extensión geográfica, según el INEC [28].

Al ser un ambiente urbano, la propagación de la señal se verá disminuida por los obstáculos presentados durante la trayectoria. Con el uso del modelo de propagación de Okumura-Hata y extendido de Hata Cost-231 podemos obtener el radio de cobertura de las celdas, y así encontrar la cantidad total de celdas serán desplegadas en el área, para cubrir los requerimientos en todos los sectores.

5.4.1 Cálculo de cobertura por transmisor.

Para establecer las dimensiones del anillo hexagonal de la celda, utilizamos los valores mínimos y máximos de SINR por cada tipo de modulación existente en LTE 4G (QPSK, 16 QAM, 64 QAM). Estos datos indicarán un rango de cobertura donde el móvil podrá transmitir dependiendo de la distancia que se encuentre respecto a la estación base, permitiendo que exista señal en toda el área de cobertura de la celda. En la Tabla 20 se muestran los indicadores SINR establecidos en el sistema.

Modulación	SINR Mínimo (dB)	SINR Máximo (dB)
QPSK	-8.39	1.29
16 QAM	1.29	9.13
64 QAM	9.13	16.52

Tabla 20: Valores SINR para enlace ascendente

Con estos datos se calculará la sensibilidad del receptor, según el tipo de modulación empleado, utilizando la ecuación 3.11 tenemos los siguientes resultados, resumidos en la Tabla 21.

Para QPSK:

$$S_{Min}(dBm) = -174 + 10 \log(PR_B \times 180 \times 10^3) + \text{Figura ruido Rx} \\ - SNR + IM - 3$$

$$S_{Min}(dBm) = -174 + 10 \log(50 \times 180 \times 10^3) + 7 - 8.39 + 2.5 - 3$$

$$S_{Min}(dBm) = -106.35$$

$$S_{Max}(dBm) = -174 + 10 \log(50 \times 180 \times 10^3) + 7 + 1.29 + 2.5 - 3$$

$$S_{Max}(dBm) = -96.67$$

Para 16 QAM:

$$S_{Min}(dBm) = -174 + 10 \log(50 \times 180 \times 10^3) + 7 + 1.29 + 2.5 - 3$$

$$S_{Min}(dBm) = -96.67$$

$$S_{Max}(dBm) = -174 + 10 \log(50 \times 180 \times 10^3) + 7 + 9.13 + 3 - 3$$

$$S_{Max}(dBm) = -88.33$$

Para 64 QAM:

$$S_{Min}(dBm) = -174 + 10 \log(50 \times 180 \times 10^3) + 7 + 9.13 + 2.5 - 3$$

$$S_{Min}(dBm) = -88.33$$

$$S_{Max}(dBm) = -174 + 10 \log(50 \times 180 \times 10^3) + 7 + 16.52 + 4 - 3$$

$$S_{Max}(dBm) = -79.94$$

Modulación	Sensibilidad _{Min} (dBm)	Sensibilidad _{Max} (dBm)
QPSK	-106.35	-96.67
16 QAM	-96.67	-88.33
64 QAM	-88.33	-79.94

Tabla 21: Valores de sensibilidad para enlace ascendente

Los resultados antes mencionados corresponden a las potencias mínimas para aceptar una señal como válida. Una vez calculado estos datos procedemos a obtener las pérdidas de trayectorias mínimas y máximas, a través de la ecuación 3.10, tal como se muestra en la Tabla 22.

Para QPSK:

$$PL_{Max/Min}(dB) = EIRP + Ganancias_{Rx} - Pérdidas_{Rx} -$$

$$Margen\ por\ sombra + Ganancia\ MIMO_{Rx} - S_{Min/Max}$$

$$PL_{Min}(dB) = 23 + 18 - 2 - 9.34 + 6 + 96.67$$

$$PL_{Min}(dB) = 132.67$$

$$PL_{Max}(dB) = 23 + 18 - 2 - 9.34 + 6 + 106.35$$

$$PL_{Max}(dB) = 142.35$$

Para 16 QAM:

$$PL_{Min}(dB) = 23 + 18 - 2 - 9.34 + 6 + 88.33$$

$$PL_{Min}(dB) = 124.33$$

$$PL_{Max}(dB) = 23 + 18 - 2 - 9.34 + 6 + 96.67$$

$$PL_{Max}(dB) = 132.67$$

Para 64 QAM:

$$PL_{Min}(dB) = 23 + 18 - 2 - 9.34 + 6 + 79.94$$

$$PL_{Min}(dB) = 115.94$$

$$PL_{Max}(dB) = 23 + 18 - 2 - 9.34 + 6 + 88.33$$

$$PL_{Max}(dB) = 124.33$$

Modulación	Pérdida por propagación _{Min} (dB)	Pérdida por propagación _{Max} (dB)
QPSK	132.67	142.35
16 QAM	124.33	132.67
64 QAM	115.94	124.33

Tabla 22: Pérdida por propagación para enlace ascendente

Una vez obtenido los datos por pérdida de señal en el enlace de subida, procedemos a realizar el cálculo de la distancia de cobertura para esa pérdida, a través de la fórmula extendida de Hata Cost-231 descrita en la ecuación 3.2, utilizando los mismos parámetros descritos en la Tabla 23.

Parámetros	Valores
Frecuencia (MHz)	1710
Ancho de banda (MHz)	10
Altura antena estación base (m)	35
Altura antena móvil (m)	1.5
Tipo de área	Denso Urbano

Tabla 23: Parámetros de cálculo para enlace ascendente

Para QPSK:

$$d_{Min/Max} (Km) = 10^{\frac{PL_{Min/Max} - [B - (13.82 \times \log ht) - ahm + ac]}{44.9 - (6.55 \times \log ht)}}$$

Para ambiente Denso Urbano con frecuencia mayor a 1500 MHz:

$$B = 46.3 + (33.9 \times \log f) + cm$$

$$ahm = 3.2 \times \log(11.75 \times hr)^2 - 4.97$$

$$ac = 0$$

$$cm = 3$$

$$d_{Min} (Km) = 10^{\frac{132.67 - [158.90 - 21.34 + 0.00092 + 0]}{34.79}}$$

$$d_{Min} (Km) = 0.72$$

$$d_{Max} (Km) = 10^{\frac{142.35 - [158.90 - 21.34 + 0.00092 + 0]}{34.79}}$$

$$d_{Max} (Km) = 1.37$$

Para 16 QAM:

$$d_{Min} (Km) = 10^{\frac{124.33 - [158.90 - 21.34 + 0.00092 + 0]}{34.79}}$$

$$d_{Min} (Km) = 0.42$$

$$d_{Max} (Km) = 10^{\frac{132.67 - [158.90 - 21.34 + 0.00092 + 0]}{34.79}}$$

$$d_{Max} (Km) = 0.72$$

Para 64 QAM:

$$d_{Min}(Km) = 10^{\frac{115.94 - [158.90 - 21.34 + 0.00092 + 0]}{34.79}}$$

$$d_{Min}(Km) = 0.24$$

$$d_{Max}(Km) = 10^{\frac{124.33 - [158.90 - 21.34 + 0.00092 + 0]}{34.79}}$$

$$d_{Max}(Km) = 0.42$$

En la Tabla 24 se resumen los valores correspondientes al radio de cobertura para cada anillo de modulación en la red LTE 4G.

Modulación	Distancia / radio de cobertura _{Min} (Km)	Distancia / radio de cobertura _{Max} (Km)
QPSK	0.72	1.37
16 QAM	0.42	0.72
64 QAM	0.24	0.42

Tabla 24: Valores de radio cobertura para enlace ascendente

Para hallar el área de cobertura de cada anillo de modulación instalada en una torre celular, se requiere el uso de la ecuación 3.14.

Para QPSK:

$$Area(Km^2) = 2.6 \times (d_{Max}^2 - d_{Min}^2)$$

$$Area(Km^2) = 2.6 \times [(1.37)^2 - (0.72)^2]$$

$$Area(Km^2) = 3.53$$

Para 16 QAM:

$$Area(Km^2) = 2.6 \times [(0.72)^2 - (0.42)^2]$$

$$Area(Km^2) = 0.89$$

Para 64 QAM:

$$Area(Km^2) = 2.6 \times [(0.42)^2 - (0.24)^2]$$

$$Area(Km^2) = 0.31$$

Los datos mencionados en la Tabla 25 proporcionan el porcentaje de cobertura por cada anillo de modulación en las celdas desplegadas en la zona geográfica, donde el mayor porcentaje corresponde al anillo con modulación QPSK, debido a soportar interferencias altas de ruido con relación a la señal.

Modulación	Área de cobertura (Km ²)	Área de cobertura total (Km ²)	Porcentaje de cobertura (%)
QPSK	3.53	4.73	74
16 QAM	0.89		19
64 QAM	0.31		7

Tabla 25: Área y porcentaje de cobertura para enlace ascendente

De acuerdo a la Tabla 3 del Capítulo 2, se asignan 50 recursos de radio bloque para una canalización de 10 MHz, los cuales serán distribuidos y asignados a los usuarios presentes en cada anillo de modulación, tal como se detalla en la Tabla 26.

Modulación	Recursos de radio bloque	Elementos de recursos (RE)	Tasa pico de datos (Mbps)
QPSK	37	6216	12.43
16 QAM	9	1512	6.05
64 QAM	4	672	4.03
TOTAL	50	8400	22.51

Tabla 26: Capacidad pico para enlace ascendente

Esta repartición de recursos se considera teórica, suponiendo que los usuarios están conectados de manera proporcional en cada zona de la red. Sin embargo, estos datos podrían cambiar en el momento de que los terminales móviles estén ubicados en diferentes anillos de modulación, obteniendo resultados diferentes.

Siendo seleccionada la configuración de antenas SISO 1 x 1 para el canal ascendente, la capacidad total pico que podría alcanzar un usuario para carga de información en la red sería de 22.51 Mbps que es la suma de la capacidad de datos por usuario según cada anillo de modulación. Por

último, la cantidad total de celdas requeridas para cubrir un área de 24.68 Km², corresponde a 5 celdas, luego de la optimización de parámetros.

Para el enlace descendente, en la Tabla 27 se muestran los parámetros seleccionados similares al del canal ascendente, con la única diferencia de la frecuencia. Aplicando los procedimientos antes realizados, obtenemos el cálculo de cobertura para cada anillo de modulación.

Parámetros	Valores
Frecuencia (MHz)	2110
Ancho de banda (MHz)	10
Altura antena estación base (m)	35
Altura antena móvil (m)	1.5
Tipo de área	Denso Urbano

Tabla 27: Parámetros de cálculo para enlace descendente

La Figura 5.19 resume todos los valores obtenidos mediante procedimientos automáticos generados por el sistema, utilizando las mismas ecuaciones del enlace ascendente.

DOWNLINK

Modulación	SINR Mínimo (dB)	SINR Máximo (dB)	Sensibilidad Mínima (dBm)	Sensibilidad Máxima (dBm)	Mínima Pérdida por Propagación (dB)	Máxima Pérdida por Propagación (dB)
QPSK	-7,54	1,78	-110,50	-101,18	154,18	163,50
16 QAM	1,78	6,94	-101,18	-95,52	148,52	154,18
64 QAM	6,94	16,63	-95,52	-84,83	137,83	148,52

Modulación	Distancia Mínima (km)	Distancia Máxima (km)	Área de anillo por Modulación (km ²)	Área Total (km ²)	Porcentaje de área por Modulación (%)	Bloques de recursos asignados (RB)	Tasa máxima de datos (Mbps)
QPSK	2,45	4,54	37,95	51,75	73,33	37	12,32
16 QAM	1,68	2,45	8,26		15,96	8	5,36
64 QAM	0,83	1,68	5,54		10,71	5	5,40

Figura 5.19: Resultados para enlace descendente

En la Tabla 28 se muestran los resultados finales referente al cálculo del número de celdas que deberán desplegarse para ofrecer cobertura en toda el área geográfica. Para el cálculo inicial se consideraron los valores preliminares de la simulación, donde se eligió un tipo de MCS provisional para el enlace ascendente y descendente. Este valor conlleva a que todos

los terminales móviles y estaciones bases utilizarían ese tipo de codificación, resultando que para el canal ascendente se necesitaría de 21 celdas y para el canal descendente de 4 celdas a implementar.

Valores	Enlace Ascendente	Enlace Descendente
CÁLCULO INICIAL		
Modulación Inicial	16QAM 0.31	16QAM 0.64
Área celda (Km²)	1.20	7.03
Número de Celdas	21	4
OPTIMIZACIÓN		
Anillo Modulación	QPSK – 16 QAM – 64 QAM	QPSK – 16 QAM – 64 QAM
Área celda (Km²)	4.73	51.75
Número de Celdas	5	1

Tabla 28: Resultados finales de cálculo de cobertura

Luego se optimiza el esquema, de acuerdo a la configuración de un anillo con varios tipos de modulaciones, siendo más flexible y próxima al dimensionado real de las celdas, donde un terminal móvil puede transmitir o recibir información utilizando las condiciones de propagación más adecuadas en el momento. Por tal motivo, existe un incremento del área de cobertura de cada celda, al considerar tres tipos de modulaciones (QPSK, 16 QAM y 64 QAM) para ambos canales. Con estas condiciones, en el canal ascendente se requieren 5 celdas y para el canal descendente se necesita tan solo una celda a implementar. Como resultado final obtenemos, que en el cantón La Libertad, siendo una área Denso Urbana de 24.68 Km², se necesitará implementar 5 celdas con antenas omnidireccionales para tener cobertura en ambos sentidos, consiguiendo así una capacidad máxima en la estación base de 23.08 Mbps. A este valor le agregamos el esquema seleccionado para el enlace descendente MIMO 4 x 4 con lo que la estación base tendría una capacidad máxima de 92.32 Mbps.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La tecnología LTE 4G está siendo implementada en el Ecuador por las operadoras de telefonía móvil, debido al gran auge de teléfonos inteligentes que permiten utilizar parámetros modernos de conexión para lograr descargar y subir información a la red de forma rápida y segura.

El sistema de Planificación y Dimensionamiento de redes de acceso de radio LTE 4G es una herramienta ágil y versátil, que brinda las bondades de un sistema moderno, permitiendo el análisis y estudio de la cobertura y capacidades de estaciones bases desplegadas en un área geográfica.

La aplicación fue desarrollada basada en los estándares del 3GPP y recomendaciones ITU, considerando todas las especificaciones técnicas involucradas en el cálculo del radio enlace para los canales ascendentes y descendentes del sistema LTE 4G.

El acceso en línea del sistema ofrece la posibilidad a los usuarios de utilizar el sistema desde cualquier dispositivo conectado a la red, y sin la necesidad de instalar componentes adicionales para su óptimo funcionamiento. Además de interactuar con el gestor de base de datos, las simulaciones podrán ser almacenadas y revisadas por los usuarios registrados en el sistema.

El sistema posee mecanismos de seguridad y autenticación de usuarios por medio de contraseñas cifradas, las cuales deben estar previamente autorizadas en la base de datos, generando integridad y confiabilidad de los datos generados en las simulaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos correspondientes al cálculo del balance de radio enlace en ambos canales, la máxima pérdida por trayectoria se presenta en el enlace descendente, debido a la potencia de transmisión generada por las estaciones bases, logrando alcanzar un radio de cobertura mucho mayor que el enlace ascendente.

La cantidad de celdas requeridas para una red LTE 4G están dadas según la cobertura por el área cubierta por una celda en el enlace ascendente; y según la

capacidad, por la cantidad de datos requeridos en el enlace descendente por los usuarios de la red. Esta tasa de datos debe ser administrada por cada estación base según la capacidad de recursos asignados en el sistema.

Una de las recomendaciones para el manejo correcto del sistema, es que el usuario debe conocer previamente las funcionalidades de la red de radio acceso LTE 4G, los parámetros e indicadores para el cálculo del balance de radio enlace ascendente y descendente.

Se puede mejorar y adaptar el software para que trabaje con diferentes entornos y modelos de propagación, así como utilizar varias distribuciones de tráfico y usuarios desplegados en un área determinada.

Con el constante avance tecnológico en nuestro entorno, es necesaria la actualización de los estándares y procedimientos contemplados en el sistema de Planificación y Dimensionamiento, para que pueda adaptarse a las tecnologías innovadoras y realizar comparativas de los resultados obtenidos.

Se debe incorporar la funcionalidad de administración principal del software, para que un representante académico pueda brindar las facilidades de control, apoyo y asesoría en el manejo del aplicativo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] 3GPP Release 11 (2013, Agosto). Understanding the Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements [Online]. Disponible en <http://www.4gamericas.org>.
- [2] 3GPP Release 10 (2012, Octubre). 4G Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 10 and Beyond - HSPA+, SAE/LTE and LTE-Advanced [Online]. Disponible en <http://www.4gamericas.org>.
- [3] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2005.
- [4] Amit Kumar, Jyotsna Sengupta, Yun-fei Liu. 3GPP LTE: The future of mobile broadband. *Wireless Pers Commun*, 62(2):671– 686, Febrero 2012.
- [5] I. Fernández, “Planificación y Dimensionamiento de una red LTE”, Proyecto Final de Carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2014.
- [6] A.C. Ramón, B. F. Álvarez, F.P. Cassadevall, R. F. Ferre y O. S. Roig, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, España: Fundación Vodafone España, 2010.
- [7] D. Marcano, “Capítulo 3: Acceso Múltiple OFDMA”, In *Dimensionamiento de Redes Móviles OFDMA*, Caracas, Venezuela, Enero 2012.
- [8] O.S. Jarquín, “Tecnología LTE: La nueva alternativa en comunicaciones inalámbricas”, In *Gerencia de Ingeniería Móvil*, Claro, Nicaragua, Agosto 2011.
- [9] E. Seidel, “LTE-A Carrier Aggregation Enhancements in Release 11”, Technical report, Munich, Germany, Agosto 2012.
- [10] R. He and J. Xei, “BER Performance of M-QAM and MPSK Nakagami fading channel with STTD,” *IEEE Inter. Sympo. On per. Indoor and mobile Radio commun*, 2003.
- [11] 3GPP TR 32.816 (2008, Diciembre). Study on management of Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) and Evolved Packet Core (EPC) [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/32816.htm

- [12] 3GPP TR 36.902 (2011, Marzo). Selfconfiguring and self-optimizing network use cases and solutions [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/dynareport/36902.htm
- [13] 3GPP TS 36.211 (2013, Febrero). Physical Channels and Modulation [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/dynareport/36211.htm
- [14] 3GPP TS 36.306 (2015, Diciembre). User Equipment (UE) radio access capabilities [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/dynareport/36306.htm
- [15] 3GPP TS 36.101 (2017, Septiembre). User Equipment (UE) radio transmission and reception [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/dynareport/36101.htm
- [16] V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars, and M.G. Brown, "Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems", In Vehicular Technology Conference, United Kingdom, 2005, pp. 73-77.
- [17] A.B. Syed, "Dimensioning of LTE Network Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface", Tesis de Maestría, Helsinki University Technology, Espoo, 2009.
- [18] HIAST Communication Department (2014, Septiembre). LTE Cell Planing Tool [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/288141955_LTE_Cell_Planning_Tool
- [19] A. Chhalotre, "LTE Drive Testing, Radio Network Planning & Optimization", Nex-G Exuberant Solutions Pvt. Ltd., 2013.
- [20] Atel Asesores C.A (2011). Dimensionamiento de una Red Inalámbrica [Online]. Disponible en: <http://www.atelasesores.com.ve>
- [21] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, Second Edition. United Kingdom: A John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [22] Huawei Technologies Co., Ltd. (2010, Mayo 31). LTE Radio Network Planning Introduction [Online]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/tharinduwije/lte-radio-network-planning-huawei>
- [23] 3GPP TS 36.104 (2017, Enero). Base Station (BS) radio transmission and reception [Online]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36104.htm>

[24] Ministerio de Industria, Energía y turismo de España (2014, Abril). Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos [Online]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/bandaancha/cobertura/Paginas/otros-documentos-interes.aspx>

[25] D. Marcano, “Capítulo 6: Dimensionamiento de Redes Móviles”, In Dimensionamiento de Redes Móviles OFDMA, Caracas, Venezuela, Febrero 2012.

[26] Planeta Maxwell (2014, Mayo 5). Temperatura Equivalente de Ruido y Factor de Ruido [Online]. Disponible en: <http://planetamaxwell.com/temperatura-equivalente-de-ruido-y-factor-de-ruido>

[27] D.A. Verdugo, “Análisis de la capacidad de una portadora LTE en base a simulación y experimentación”, Proyecto de Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017.

[28] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC. (2010). Población, Superficie (Km²), Densidad poblacional a nivel parroquial [Excel]. Disponible en: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda>