

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE UNA CELDA LTE PARA DOWNLINK EN BASE AL MODELO DE TRÁFICO M/G/1 PS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**DAVID EMMANUEL MADRID PALOMEQUE**

**d.madrid20@yahoo.es**

**DIRECTOR: MSc. ANDRÉS FERNANDO REYES CASTRO**

**andres.reyes@epn.edu.ec**

**CODIRECTOR: PhD. MARTHA CECILIA PAREDES PAREDES**

**cecilia.paredes@epn.edu.ec**

**Quito, junio 2018**

## **AVAL**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por David Emmanuel Madrid Palomeque, bajo nuestra supervisión.

---

**MSC. ANDRÉS FERNANDO REYES CASTRO**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**PhD. MARTHA CECILIA PAREDES PAREDES**  
**CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, David Emmanuel Madrid Palomeque, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

David Emmanuel Madrid Palomeque

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, quién siempre guio mi camino y estuvo en los momentos más difíciles de mi vida, a mis padres Vinicio y Alexandra, de quienes recibí el mayor apoyo y sustento para terminar mi carrera universitaria, y a mis hermanos Heidy y Daniel, a quienes quiero dar el mejor ejemplo de superación y constancia que nos lleva a alcanzar nuestros sueños y objetivos propuestos.

## **AGRADECIMIENTO**

Durante mis años de estudio universitario, muchas personas han causado una gran influencia en mí, la cual me ha permitido prosperar y buscar ser alguien en la vida.

Ante todas las cosas, siempre estuvo primero Dios quien me cobijó y fortaleció constantemente, permitiéndome cada día despertar con la motivación para enfrentar los obstáculos presentes en mi camino, dándome siempre la esperanza de que en algún momento mis sacrificios serían recompensados siempre y cuando actúe de buena manera. Por tal razón agradezco a Dios por estar siempre conmigo y darme la oportunidad de cumplir paso a paso cada una de mis metas y seguirme llenando de vida y fortaleza para enfrentar mis objetivos futuros.

Otro pilar fundamental en mi vida al que agradeceré eternamente han sido mis padres, que han estado conmigo presentes durante toda mi vida y que lucharon por darme siempre lo mejor, poniendo enteramente su confianza en mí y apoyándome con toda su comprensión y afecto para el cumplimiento de mis objetivos.

Un agradecimiento especial también para el MSc. Andrés Reyes y la PhD Martha Paredes, quienes han puesto mucho interés, dedicación y me brindaron una buena orientación para el desarrollo de mi Trabajo de Titulación.

Agradezco también al resto de mi familia y amigos que me entregaron su apoyo incondicional y que han permitido que termine satisfactoriamente otra de las etapas de mi vida.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |      |
|---|------|
| AVAL.....   | I    |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....                              | II   |
| DEDICATORIA.....  | III  |
| AGRADECIMIENTO .....                                      | IV   |
| ÍNDICE DE CONTENIDO.....                                  | V    |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                   | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                    | X    |
| RESUMEN .....   | XIII |
| ABSTRACT .....  | XIV  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                      | 1    |
| 1.1 Objetivos.....  | 2    |
| 1.2 Alcance.....  | 2    |
| 1.3 Marco Teórico.....                                    | 3    |
| 1.3.1 Evolución de las Redes Celulares .....              | 4    |
| 1.3.1.1 Evolución del sistema celular .....               | 4    |
| 1.3.1.2 Evolución del tráfico en redes celulares .....    | 5    |
| 1.3.2 Tecnología LTE.....                                 | 6    |
| 1.3.2.1 Estandarización LTE .....                         | 6    |
| 1.3.2.2 Requerimientos para sistemas LTE.....             | 7    |
| 1.3.2.3 Espectro radioeléctrico .....                     | 8    |
| 1.3.2.3.1 Modos de Duplexación .....                      | 8    |
| 1.3.2.4 Arquitectura del sistema LTE.....                 | 9    |
| 1.3.2.4.1 Red de acceso evolucionada (E-UTRAN) .....      | 10   |
| 1.3.2.4.2 Red troncal de paquetes evolucionada (EPC)..... | 12   |
| 1.3.2.5 Capa física LTE .....                             | 14   |
| 1.3.2.5.1 Principios OFDM .....                           | 15   |
| 1.3.2.5.2 Acceso múltiple .....                           | 17   |
| 1.3.2.5.3 AMC y tamaño del bloque de transporte .....     | 18   |
| 1.3.2.6 Interfaz radio LTE .....                          | 19   |
| 1.3.2.6.1 Canales físicos, lógicos y de transporte .....  | 20   |
| 1.3.2.7 Gestión de recursos de radio.....                 | 22   |

|   |    |
|---|----|
| 1.3.3 Modelos de Tráfico en Comunicaciones Móviles .....          | 23 |
| 1.3.3.1 Conmutación de paquetes .....                             | 23 |
| 1.3.3.2 Sistemas de encolamiento .....                            | 24 |
| 1.3.3.2.1 <i>Proceso de llegada de Poisson</i> .....              | 24 |
| 1.3.3.2.2 <i>Distribución de servicio exponencial</i> .....       | 25 |
| 1.3.3.2.3 <i>Distribución de servicio arbitraria</i> .....        | 25 |
| 1.3.3.2.4 <i>Sistema de colas M/M/1</i> .....                     | 26 |
| 1.3.3.2.5 <i>Sistema de colas M/M/1/k</i> .....                   | 27 |
| 1.3.3.2.6 <i>Sistema de colas M/M/m/m</i> .....                   | 27 |
| 1.3.3.2.7 <i>Sistema de colas M/M/m</i> .....                     | 27 |
| 1.3.3.2.8 <i>Sistema de colas M/G/1</i> .....                     | 28 |
| 1.3.3.2.9 <i>Políticas de servicio en sistemas de colas</i> ..... | 28 |
| 1.3.3.2.10 <i>M/G/1 PS</i> .....                                  | 30 |
| 1.3.3.3 Métricas de rendimiento .....                             | 30 |
| 2. METODOLOGÍA .....  | 32 |
| 2.1 Parámetros de Simulación para Cobertura y Capacidad .....     | 32 |
| 2.1.1 Cobertura LTE .....   | 33 |
| 2.1.1.1 Presupuesto del enlace .....                              | 33 |
| 2.1.1.1.1 <i>Parámetros del canal</i> .....                       | 34 |
| 2.1.1.1.2 <i>Parámetros del eNB y del UE</i> .....                | 36 |
| 2.1.1.1.3 <i>Pérdidas en el enlace</i> .....                      | 39 |
| 2.1.1.2 Modelos de propagación .....                              | 39 |
| 2.1.1.2.1 <i>Modelo Okumura-Hata</i> .....                        | 39 |
| 2.1.1.2.2 <i>Modelo Cost 231 Hata</i> .....                       | 40 |
| 2.1.1.3 Área de la celda LTE .....                                | 41 |
| 2.1.2 Capacidad de una Celda LTE .....                            | 42 |
| 2.1.2.1 Parámetros de tráfico .....                               | 42 |
| 2.1.2.1.1 <i>Demanda de datos</i> .....                           | 42 |
| 2.1.2.1.2 <i>Tráfico diario promedio en hora pico</i> .....       | 42 |
| 2.1.2.1.3 <i>Número de usuarios</i> .....                         | 43 |
| 2.1.2.1.4 <i>Throughput promedio por usuario</i> .....            | 43 |
| 2.2 Diseño del Simulador de Planificación de Cobertura .....      | 43 |
| 2.2.1 Descripción .....   | 43 |
| 2.2.2 Funcionamiento .....  | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.2.1 Archivos .m.....   | 46 |
| 2.2.2.2 Parámetros .....   | 46 |
| 2.3 Simulador “Wireless Network Downlink Static Monte Carlo” ..... | 50 |
| 2.3.1 Descripción .....  | 50 |
| 2.3.2 Funcionamiento .....   | 52 |
| 2.3.2.1 Archivos .m.....   | 53 |
| 2.3.2.2 Parámetros .....   | 55 |
| 2.4 Diseño del Simulador de Capacidad LTE.....                     | 56 |
| 2.4.1 Descripción .....  | 56 |
| 2.4.2 Funcionamiento .....   | 57 |
| 2.4.2.1 Archivo .m.....  | 60 |
| 2.4.2.2 Parámetros .....   | 60 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                    | 63 |
| 3.1. Parámetros de Diseño.....                                     | 63 |
| 3.2. Escenario I: Simulación Ambiente Metropolitano .....          | 66 |
| 3.2.1 Definición del Escenario.....                                | 66 |
| 3.2.2 Resultados de la Simulación.....                             | 66 |
| 3.2.3 Análisis de Resultados.....                                  | 74 |
| 3.3. Escenario II: Simulación Ambiente Urbano .....                | 76 |
| 3.3.1 Definición del Escenario.....                                | 76 |
| 3.3.2 Resultados de la Simulación.....                             | 76 |
| 3.3.3 Análisis de Resultados.....                                  | 78 |
| 3.4. Escenario III: Simulación Ambiente Suburbano.....             | 80 |
| 3.4.1 Definición del Escenario.....                                | 80 |
| 3.4.2 Resultados de la Simulación.....                             | 81 |
| 3.4.3 Análisis de Resultados.....                                  | 82 |
| 3.5. Escenario IV: Simulación Ambiente Rural .....                 | 84 |
| 3.5.1 Definición del Escenario.....                                | 84 |
| 3.5.2 Resultados de la Simulación.....                             | 84 |
| 3.5.3 Análisis de Resultados.....                                  | 86 |
| 4. CONCLUSIONES .....  | 89 |
| 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                | 91 |
| 6. ANEXOS.....   | 96 |
| ORDEN DE EMPASTADO.....  | 97 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Evolución de tecnologías móviles celulares 3G/4G .....   | 4  |
| Figura 1.2. Visualización de ingresos en servicios de voz y datos .....  | 6  |
| Figura 1.3. Relación de costos de la red con los ingresos .....  | 6  |
| Figura 1.4. Modos de duplexación FDD y TDD .....   | 9  |
| Figura 1.5. Arquitectura LTE .....   | 9  |
| Figura 1.6. Arquitectura del E-UTRAN .....   | 10 |
| Figura 1.7. Arquitectura del EPC.....  | 12 |
| Figura 1.8. Eficiencia espectral de OFDM comparado con modulación tradicional de multiportadora: (a) Espectro tradicional (b) Espectro de OFDM ..... | 15 |
| Figura 1.9. Espectro de frecuencias de 6 subportadoras OFDM .....  | 16 |
| Figura 1.10. Inserción del prefijo cíclico .....   | 16 |
| Figura 1.11. Señal OFDMA separada en tiempo y frecuencia .....   | 17 |
| Figura 1.12. Eficiencia espectral promedio en celdas: (a) Muchos UEs por celda (b) Un UE con buen enlace (c) Un UE con enlace débil .....            | 19 |
| Figura 1.13. Encolamiento de paquetes en eNodeB y UEs .....  | 22 |
| Figura 1.14. Dos llegadas sin solapamiento con tiempo de duración distintos .....  | 25 |
| Figura 1.15. Diagrama de estados del sistema M/M/1 .....   | 26 |
| Figura 1.16. Diagrama de estados del sistema M/M/1/k .....   | 27 |
| Figura 1.17. Diagrama de estados del sistema M/M/m .....   | 28 |
| Figura 2.1. Función de distribución acumulada de la distribución normal estándar .....   | 35 |
| Figura 2.2. Sectorización hexagonal .....  | 41 |
| Figura 2.3. Interfaz PRESENTACION_CAP_LTE .....  | 44 |
| Figura 2.4. Interfaz PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE .....  | 45 |
| Figura 2.5. Error de entrada inválida .....  | 45 |
| Figura 2.6. Interfaz MONTE_CARLO_CAP_LTE .....   | 53 |
| Figura 2.7. Interfaz CAP_LTE .....   | 58 |
| Figura 2.8. Notificación del simulador de incumplimiento con los requerimientos del sistema en el borde de la celda.....                             | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.9. Notificación del simulador de incumplimiento con los requerimientos de capacidad del sistema.....  | 59 |
| Figura 3.1. Interfaz de PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE con parámetros de ejemplo.....  | 67 |
| Figura 3.2. Interfaz de MONTE_CARLO_CAP_LTE con parámetros de ejemplo  | 67 |
| Figura 3.3. Interfaz de CAP_LTE con parámetros de ejemplo .....  | 69 |
| Figura 3.4. Resultados de la interfaz MONTE_CARLO_CAP_LTE con parámetros recalculados .....  | 70 |
| Figura 3.5. Cálculos en la interfaz de CAP_LTE con distancia máxima de enlace recalculada.....   | 71 |
| Figura 3.6. Capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a variaciones del ancho de banda para cuando se cubre la demanda total en el primer escenario        | 75 |
| Figura 3.7. Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para cuando se cubre la demanda total en el primer escenario .....                | 76 |
| Figura 3.8. Capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a variaciones del ancho de banda para cuando se cubre la demanda total en el segundo escenario ..... | 79 |
| Figura 3.9. Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para cuando se cubre la demanda total en el segundo escenario .....               | 80 |
| Figura 3.10. Capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a variaciones del ancho de banda para cuando se cubre la demanda total en el tercer escenario .     | 83 |
| Figura 3.11. Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para el tercer escenario.....  | 84 |
| Figura 3.12. Valores de la capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a las variaciones del ancho de banda para el cuarto escenario .....                   | 87 |
| Figura 3.13. Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para el cuarto escenario .....   | 87 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.1. Releases de la especificación 3GPP para LTE .....  | 7  |
| Tabla 1.2. Resumen de requerimientos de LTE en el Release 8 (Parte I) .....                             | 7  |
| Tabla 1.3. Resumen de requerimientos de LTE en el Release 8 (Parte II) .....                            | 8  |
| Tabla 1.4. Interfaces de la red de acceso E-UTRAN de LTE .....  | 11 |
| Tabla 1.5. Interfaces de la red troncal EPS de LTE .....  | 14 |
| Tabla 1.6. Canales físicos para Downlink .....  | 20 |
| Tabla 1.7. Canales físicos para Uplink .....  | 20 |
| Tabla 1.8. Canales lógicos para Downlink/Uplink.....  | 21 |
| Tabla 1.9. Canales lógicos para Downlink .....  | 21 |
| Tabla 1.10. Canal lógico para Downlink/Uplink .....   | 21 |
| Tabla 1.11. Canales lógicos para Downlink .....   | 22 |
| Tabla 1.12. Canal lógico para Uplink.....   | 22 |
| Tabla 2.1. Número de RB disponibles para cada ancho de banda del canal .....                            | 34 |
| Tabla 2.2. Índice de modulación y TBS para PDSCH .....  | 38 |
| Tabla 2.3. Parámetros de entrada de la estación base para la interfaz<br>PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE ..... | 47 |
| Tabla 2.4. Parámetros de entrada del móvil para la interfaz<br>PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE (Parte I).....  | 47 |
| Tabla 2.5. Parámetros de entrada del móvil para la interfaz<br>PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE (Parte II)..... | 48 |
| Tabla 2.6. Parámetros de entrada del canal para la interfaz<br>PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE (Parte I).....  | 48 |
| Tabla 2.7. Parámetros de entrada del canal para la interfaz<br>PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE (Parte II)..... | 49 |
| Tabla 2.8. Otros parámetros de entrada para la interfaz<br>PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE .....               | 49 |
| Tabla 2.9. Parámetros de salida para la interfaz PLANIF_COBERTURA_CAP_LTE<br>.....                      | 50 |
| Tabla 2.10. Parámetros de entrada adicionales para la interfaz<br>MONTE_CARLO_CAP_LTE .....             | 55 |
| Tabla 2.11. Parámetros de salida para la interfaz MONTE_CARLO_CAP_LTE ..                                | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.12. Parámetros de entrada para la interfaz CAP_LTE .....  | 61 |
| Tabla 2.13. Parámetros de salida para la interfaz CAP_LTE (Parte I) .....   | 61 |
| Tabla 2.14. Parámetros de salida para la interfaz CAP_LTE (Parte II) .....  | 62 |
| Tabla 3.1. Ganancias de la antena SBNHH-1D65B para distintas bandas de frecuencia.....  | 64 |
| Tabla 3.2. Ancho del haz de la antena SBNHH-1D65B a media potencia para distintas bandas de frecuencia .....  | 64 |
| Tabla 3.3. Relación frente-atrás de la antena SBNHH-1D65B para distintas bandas de frecuencia.....  | 64 |
| Tabla 3.4. Probabilidad de cobertura dependiente del medio de propagación ....  | 65 |
| Tabla 3.5. Pérdidas por penetración dependiente del medio de propagación y banda de frecuencia .....  | 65 |
| Tabla 3.6. Número estimado de usuarios LTE (para una operadora) y superficie de parroquias de Pichincha de acuerdo al ambiente de propagación ..... | 66 |
| Tabla 3.7. Resultados para el primer escenario con una carga del 100% de la celda utilizando las bandas de 700 MHz y 1900 MHz.....                  | 72 |
| Tabla 3.8. Correcciones de la Tabla 3.7 para anchos de banda que no cubren la demanda .....   | 72 |
| Tabla 3.9. Resultados para el primer escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz .....                            | 73 |
| Tabla 3.10. Correcciones de la Tabla 3.9 para cargas que no cubren la demanda .....   | 73 |
| Tabla 3.11. Resultados para el segundo escenario con una carga del 100% de la celda utilizando las bandas de 700 MHz y 1900 MHz .....               | 77 |
| Tabla 3.12. Correcciones de la Tabla 3.11 para anchos de banda que no cubren la demanda .....   | 77 |
| Tabla 3.13. Resultados para el segundo escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz.....                           | 78 |
| Tabla 3.14. Correcciones de la Tabla 3.13 para cargas que no cubren la demanda .....  | 78 |
| Tabla 3.15. Resultados para el tercer escenario con una carga del 100% de la celda para las bandas de 700 MHz y 1900 MHz .....                      | 81 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 3.16. Correcciones de la Tabla 3.15 para anchos de banda que no cubren la demanda .....                                  | 82 |
| Tabla 3.17. Resultados para el tercer escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz .....      | 82 |
| Tabla 3.18. Resultados para el cuarto escenario con una carga del 100% de la celda para las bandas de 700 MHz y 1900 MHz ..... | 85 |
| Tabla 3.19. Correcciones de la Tabla 3.18 para anchos de banda que no cubren la demanda .....                                  | 85 |
| Tabla 3.20. Resultados para el cuarto escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz .....      | 86 |

## RESUMEN

Este Trabajo de Titulación se enfoca en determinar la capacidad del servicio de datos de una celda LTE (*Long Term Evolution*, Evolución a Largo Plazo), con base en cálculos y simulaciones utilizando parámetros reales.

Mediante el marco teórico, se obtienen los fundamentos necesarios para describir la funcionalidad del sistema celular LTE, el cual se fundamenta en una red puramente IP (*Internet Protocol*, Protocolo de Internet) y en la conmutación de paquetes; además, se revisan conceptos básicos de las teorías de colas en la ingeniería de tráfico. A partir de estos conceptos, se relaciona el comportamiento de los flujos de paquetes de datos dentro de la red celular con un modelo de tráfico que entregue una medida del *Throughput* promedio por usuario en el enlace de bajada (*Downlink*) de una celda LTE.

A continuación, se consideran distintos parámetros tanto de cobertura como de tráfico, tomando en cuenta la demanda de datos promedio por usuario y el número de usuarios promedio por celda; y que junto a simulaciones desarrolladas en MATLAB y de la aplicación del modelo de tráfico M/G/1 PS (*Processor Sharing*, Compartición del Procesador) se logra calcular la capacidad de una celda LTE, en unidades de tasas de bits por segundo, para distintos escenarios y bandas de frecuencia.

**PALABRAS CLAVE:** Conmutación de Paquetes, Demanda Total, Job, Long Term Evolution (LTE), Métricas de Rendimiento, Presupuesto del Enlace, Processor Sharing (PS), Throughput.

## ABSTRACT

This final career project focuses on determine approximately the capacity of the data service of a cell in LTE (*Long Term Evolution*) technology, based on calculations and simulations using real parameters.

Through the theoretical framework, the necessary fundamentals are obtained to describe the functionality of the LTE cellular network, which is based on an entire IP (*Internet Protocol*) network and reasoned on packet switching.

In addition, basic concepts of queueing theories in traffic engineering are reviewed. From these concepts, behavior of data packet flows within the cellular network are related to a traffic model that gives a measure of the Downlink data performance of an LTE cell.

Different parameters both of link budget and traffic are considered, taking into account the average data demand per user and the number of average users per cell, and using simulations developed in MATLAB applying the traffic model M/G/1 PS (*Processor Sharing*), it is possible to calculate the capacity of an LTE cell, in units of bits per second, for different scenarios and frequency bands.

**KEYWORDS:** Packet Switching, Total Demand, Job, Long Term Evolution (LTE), Performance Measures, Link Budget, Processor Sharing (PS), Throughput.

# 1. INTRODUCCIÓN

Siguiendo las tendencias del avance tecnológico continuo de las telecomunicaciones y junto con la presencia de nuevos requerimientos en las redes móviles, hace ya varios años que la tecnología móvil LTE (*Long Term Evolution*, Evolución a Largo Plazo) cuya primera especificación fue dada por el 3GPP<sup>1</sup> (*3rd Generation Partnership Project*, Proyecto Asociación de 3era Generación) a finales del 2008 [1], ha tenido un gran impulso a nivel mundial, ofreciendo alcanzar altas tasas de transmisión de datos con una baja latencia.

En este marco de evolución y expansión, a pesar de que la cantidad de tráfico de datos promedio en un *smartphone* alcanza solamente el 10% del tráfico comparado con una computadora personal [2], se debe tomar en cuenta que el número de conexiones de los dispositivos móviles es cada vez mayor. Sumándole a esto que los terminales móviles superan en número a los seres humanos (teniendo un promedio de 1.4 dispositivos por persona) [3], el análisis de tráfico resulta en un factor clave al momento de planificar las redes móviles.

Este incremento en la demanda de tráfico se traduce a un nuevo reto para los operadores de redes móviles, creando la necesidad de innovar en nuevas estrategias de planificación de recursos u optimizar los ya existentes, para de esta manera lograr abastecer la demanda total diaria por parte de los usuarios.

Al mismo tiempo, un problema de las redes móviles que permiten el tráfico de datos, es que, si bien se puede conocer la demanda de megabytes que se requerirá para una celda durante la hora pico, es difícil conocer cuán frecuentemente estos bits llegarán a dicha área de servicio, es decir, son impredecibles los tiempos de llegada de las demandas, lo cual puede incrementar los conflictos por el uso del recurso inalámbrico y formar colas de espera de los paquetes de los clientes. Considerando además que en LTE todos los servicios se transportan sobre el protocolo IP (*Internet Protocol*, Protocolo de Internet) se vuelve imprescindible contar con un modelo de tráfico que estudie el comportamiento del mismo en una red de conmutación de paquetes. Para tal caso, se hace uso de un modelo de tráfico de único servidor con distribución de Poisson para las llegadas y tiempo de servicio arbitrario (general) con compartición del procesador (*M/G/1 PS*).

Es por eso que, mediante la correcta planificación de una red celular LTE en cuanto al tráfico cursado y con el modelo de tráfico apropiado, se podrá conservar dicho diseño a lo

---

<sup>1</sup> 3GPP es una colaboración entre asociaciones de estándares de telecomunicaciones, cuyo alcance incluye el desarrollo y mantenimiento de estándares de generaciones: 2G, 2.5G, 3G, 4G y 5G, a partir del sistema celular de segunda generación GSM (Global System Mobile Communications).



largo del tiempo sin tener la necesidad de emplear nuevos mecanismos para solventar la congestión localizada, donde se requerirían de nuevas inversiones que serían facturadas por parte de los operadores móviles, algunas de ellas en [4].

A la vista de lo anterior, este Trabajo de Titulación se enfoca en realizar cálculos del rendimiento en el enlace de bajada (*Downlink*) para el servicio de datos de una celda LTE, así como de su capacidad y la eficiencia en el espectro de frecuencias, incluyendo parámetros propios de la tecnología, modelos de propagación y un modelo de tráfico que describa el comportamiento de los flujos de los paquetes de datos, logrando de esta forma realizar una adecuada planificación de los recursos que satisfagan la demanda.

## 1.1 Objetivos

El objetivo general de este Trabajo de Titulación es determinar la capacidad de una celda en el enlace descendente en una red LTE mediante el uso del modelo de tráfico M/G/1 PS en base a simulaciones en MATLAB.

En concreto, los objetivos específicos perseguidos en este Trabajo de Titulación son:

- a) Describir los fundamentos teóricos de la tecnología LTE y de tráfico en comunicaciones inalámbricas, enfocado en el modelo M/G/1 PS y en la conmutación de paquetes.
- b) Describir el funcionamiento y las características del simulador "*Wireless Network Downlink Static Monte Carlo*".
- c) Establecer los parámetros de diseño a ser usados en las simulaciones.
- d) Simular y calcular la capacidad de la red LTE en base al modelo de tráfico M/G/1 PS utilizando los parámetros establecidos para el diseño.
- e) Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones y de los cálculos basados en el modelo de tráfico.

## 1.2 Alcance

Este Trabajo de Titulación determinará el rendimiento en el borde de la celda y la capacidad (*Throughput*) de la misma para la tecnología LTE, en base a datos obtenidos de simulaciones en MATLAB y a la utilización de los mismos en el modelo de tráfico para redes de conmutación de paquetes M/G/1 PS, considerando además métricas de

*Throughput* y la demanda total durante la hora pico. Los cálculos de la capacidad son realizados solamente para el enlace de bajada (*Downlink*), considerando el tráfico de datos cursado en conmutación de paquetes, característica propia de la tecnología LTE.

### **1.3 Marco Teórico**

Si bien se conoce, la demanda de capacidad de las redes celulares y de mayores velocidades de datos, es cada vez más urgente por el gran impacto de las redes móviles y su crecimiento continuo, de hecho, según lo más destacado del Pronóstico Global Móvil VNI de Cisco [5], se indica que el tráfico de datos móviles crecerá 7 veces desde el 2016 hasta el 2021, existiendo la necesidad por parte de los operadores de conocer sus limitaciones técnicas y el comportamiento del tráfico que puede afectar la experiencia del usuario. Por tal razón los operadores móviles demandan de ciertas herramientas de planificación para el reparto de tráfico y de algoritmos de control de estimación de la capacidad de canales *Downlink* y *Uplink*.

Trabajos anteriores del área realizan un estudio sobre el dimensionamiento, factibilidad y diseño de una celda LTE, tomando en cuenta los principios de radio de la interfaz E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*, Red de Acceso Radio Terrestre UMTS), incluyendo procedimientos de presupuesto de enlace y análisis de cobertura mediante el uso de herramientas y software que involucre criterios de verificación de límite de ancho de banda y que permita hacer cálculos para los supuestos de tráfico, determinando que tipos de servicios tendría la red; además de un estudio para establecer la capacidad aproximada de una portadora LTE en base a simulaciones en MATLAB, considerando parámetros como la asignación conjunta de recursos MCS (*Modulation and Coding Scheme*, Esquema de Modulación y Codificación), *Resource Blocks* y potencia de cada estación base en el enlace *Downlink*, haciendo uso también de software y equipos para pruebas experimentales.

Un aspecto a no ser tomado en cuenta, a parte de la movilidad, es la evaluación del presupuesto del enlace para el enlace ascendente, debido a que el simulador a utilizarse fue diseñado solamente para la evaluación del canal descendente, siendo el análisis más prioritario al momento de la planificación de una red celular. Cabe destacar además que se usa la política de servicio *Processor Sharing* solamente, debido a las muestras uniformes de las ubicaciones del móvil en la celda.

Con el fin de proporcionar las bases de este Trabajo de Titulación, se describe la teoría principal que involucra el diseño de una red celular LTE y las principales características de

la misma, así también como de los modelos de tráfico para redes de paquetes y su relación existente con la capacidad de los sistemas celulares.

### 1.3.1 Evolución de las Redes Celulares

A continuación se describen las principales características involucradas en el proceso evolutivo de las redes móviles, con un mayor enfoque en la tecnología LTE. En esta parte se recalcan algunas características de los sistemas móviles aún vigentes, los cuales dejaron las bases consolidadas para la llegada de LTE.

#### 1.3.1.1 Evolución del sistema celular

Hace ya varias décadas que fue implantado el primer sistema celular enfocado en la transportación de voz, sin embargo, al inicio de la década de los 90s, es donde se da un crecimiento exponencial en el servicio de voz por parte de los usuarios y con una fuerte presencia de GSM (*Global System Mobile Communications*, Sistema Global de Comunicaciones Móviles) tecnología celular estandarizada a nivel mundial por parte del 3GPP en el sector de las comunicaciones móviles celulares.

Posteriormente el servicio de voz siguió siendo la prioridad en los operadores móviles frente al servicio de datos, creándose nuevas técnicas de acceso al medio inalámbrico. De tal forma se dio origen a WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*, Acceso Múltiple por División de Código de Banda ancha), a través del cual se crearon estándares de telefonía móvil 3G, entre ellos UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*, Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles), a partir de GSM, y su competencia proveniente del grupo 3GPP2<sup>2</sup> (*3rd Generation Partnership Project 2*, Proyecto Asociación de 3era Generación 2), con el nombre de cdma2000, obsérvese la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Evolución de tecnologías móviles celulares 3G/4G [6]

<sup>2</sup> 3GPP2 es un grupo de asociaciones de estándares de telecomunicaciones con el objetivo de desarrollar estándares de tercera generación a partir del sistema celular de segunda generación cdmaOne.

La necesidad por alcanzar mayores tasas de transmisión de datos, dio origen a HSPA (*High-Speed Packet Access*, Acceso a Paquetes a Alta Velocidad) de 3GPP, y a su equivalente EV-DO (*Evolution-Data Optimized*, Evolución de Datos Optimizados) de 3GPP2. Luego la visión evolutiva de 3GPP dio lugar a la red móvil LTE a partir del año 2010, en donde 3GPP2 decidió culminar sus investigaciones. La propuesta de 3GPP para sistemas 4G con mayores velocidades de datos que LTE, se da por medio de LTE-A (*Long Term Evolution-Advanced*, Evolución a Largo Plazo-Avanzada), al igual que su contrapunto competitivo WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas) 802.16e, y posteriormente 802.16m, impulsados a partir de IEEE<sup>3</sup> (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) [6].

### **1.3.1.2 Evolución del tráfico en redes celulares**

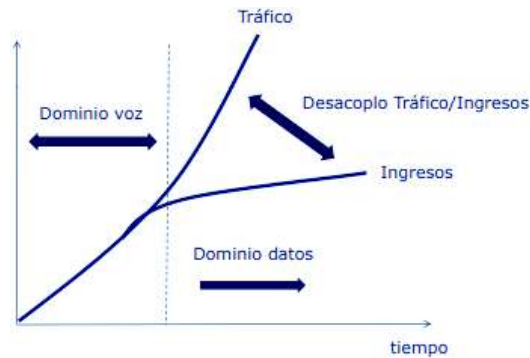
Sin duda en los últimos años se ha presentado un desarrollo muy dinámico de las redes celulares, las mismas que han tenido que anticiparse y adaptarse a los nuevos requerimientos para satisfacer las necesidades de los usuarios, al mismo tiempo que optimizando e innovando en recursos para hacer frente al mercado competitivo, que al igual que la tecnología, ha sufrido cambios evolutivos en cuanto a la planificación de estrategias de negocios, y que con los modelos vigentes juegan un papel importante dentro de las operadoras móviles.

En el tema del tráfico en las redes celulares ocurre un desacople entre el tráfico de voz y el tráfico de datos en cuanto a las ganancias facturadas por los operadores como se observa en la Figura 1.2. En el análisis respecto a los servicios de voz, se considera un ingreso por parte del operador proporcional al tiempo de ocupación de los canales de voz; es decir, las ganancias se incrementan con el tiempo de la llamada. Por otro lado, se nota un desacople en los ingresos del operador por el servicio de datos, esto debido a las tarifas planas que se establecen para este servicio.

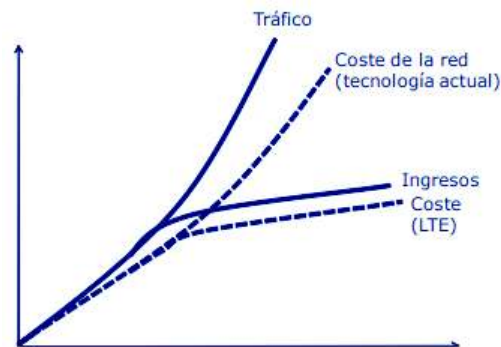
En la Figura 1.3 se puede observar la adición de los costes del tráfico y los ingresos, notando que los costos por mantener una red antigua guarda cierta proporcionalidad con el tráfico cursado en la red, siendo además muy superior a los ingresos obtenidos por parte de los operadores, por lo que se vuelve necesario la implementación de una red LTE para obtener un margen de beneficios respecto al costo de la misma, resaltando además la importancia del parámetro del volumen de tráfico al momento de diseñar una red LTE.

---

<sup>3</sup> IEEE es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la innovación y estandarización tecnológica en áreas técnicas.



**Figura 1.2.** Visualización de ingresos en servicios de voz y datos [6]



**Figura 1.3.** Relación de costos de la red con los ingresos [6]

### 1.3.2 Tecnología LTE

En su momento, las tecnologías inalámbricas tradicionales presentaron el desarrollo de su tecnología bajo un sistema de conmutación de líneas fijas o conmutación de circuitos<sup>4</sup>, pero con el advenimiento de nuevas tecnologías, hace ya varios años que ha sido instaurada la tecnología LTE desarrollada bajo un sistema de conmutación de paquetes, con el claro objetivo de ofrecer altas tasas de transmisión de datos, flexibilidad del espectro, arquitectura simplificada, entre otros.

#### 1.3.2.1 Estandarización LTE

El origen de LTE se da alrededor del año 2004, a partir del cual se han tratado temas de estandarización para la evolución hacia una nueva tecnología celular, mencionándose objetivos como alcanzar altas tasas de transmisión, una baja latencia para el servicio de datos, mejora de la eficiencia espectral de 2 a 4 veces comparado con el *Release 6*, interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP, un ancho de banda escalable, entre otros [7], [8].

<sup>4</sup> Conmutación de circuitos es un tipo de comunicación que establece un canal dedicado durante la conexión entre dos estaciones.

En el año 2006 se consigue la aprobación del TR 25.912, donde se discutieron muchas soluciones para la capa física, arquitectura de red simplificada E-UTRAN, parámetros de RF, características del *packet scheduling*, ARQ, HARQ, entre otros [9].

Luego en el año 2007 se aprobó la primera versión de las especificaciones completas para la tecnología LTE. Posteriormente en diciembre del 2008 se congelaron las especificaciones 3GPP en el *Release 8*, el mismo que omitía aún algunas características poco importantes del sistema LTE pero que luego fueron incluidas en el *Release 9*. El *Release 10* contiene capacidades adicionales que describen a LTE-A, ocurre lo mismo con los posteriores *Releases*. La Tabla 1.1 resume los *Releases* que incluyen especificaciones de la tecnología LTE y su evolución LTE-A.

**Tabla 1.1.** Releases de la especificación 3GPP para LTE [10]

| Release | Fecha congelado | Descripción  |
|---------|-----------------|--|
| R8      | Diciembre 2008  | LTE, SAE <sup>5</sup> ( <i>System Architecture Evolution</i> , Evolución de la Arquitectura del Sistema) |
| R9      | Diciembre 2009  | Mejoras a LTE y SAE  |
| R10     | Junio 2011      | LTE-A  |
| R11     | Junio 2013      | Mejoras a LTE-A  |

### 1.3.2.2 Requerimientos para sistemas LTE

Específicamente los requerimientos del sistema para las redes LTE fueron formalmente presentados en el *Release 8* de la especificación 3GPP, mostrados en las Tablas 1.2 y 1.3. Cabe recalcar que además los operadores de red establecieron sus requerimientos a través del NGMN (*Next Generation Mobile Networks*, Redes Móviles de Siguiete Generación) [11], como guía adicional para el diseño de una red LTE.

**Tabla 1.2.** Resumen de requerimientos de LTE en el Release 8 (Parte I) [12], [13]

|                           | Requerimiento              | Observación  |
|---------------------------|----------------------------|--|
| Ancho de banda escalable  | 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz | Hasta 4 veces más que en sistemas 3G                                     |
| Tasa de transmisión pico  | DL > 100 Mbps              | Usando 20 MHz FDD<br>DL: Multiplexación espacial 2x2<br>UL: Antena única |
|                           | UL > 50 Mbps               |  |
| Eficiencia espectral pico | DL > 5 bps/Hz              |  |
|                           | UL > 2.5 bps/Hz            |  |

<sup>5</sup> SAE es la evolución de la red troncal de GPRS, y cuya arquitectura fue desarrollada para proveer un rendimiento de alto nivel que cumpla con los requerimientos de la red troncal del estándar LTE de 3GPP.

**Tabla 1.3.** Resumen de requerimientos de LTE en el Release 8 (Parte II) [12], [13]

|                                       | Requerimiento        | Observación                                   |
|---------------------------------------|----------------------|---|
| Latencia en plano de usuario          | < 10 ms              | Retardo de radio de 2 vías                    |
| Latencia en configuración de conexión | < 100 ms             | Estado inactivo→activo                        |
| Capacidad plano de control            | > 200 usuarios/celda | Por cada 5 MHz                                |
| Soporte de movilidad                  | < 500 kmph           | Optimizado para bajas velocidades (0–15 kmph) |
| Cobertura (tamaño celda)              | 5-100 Km             | Degradación a partir de 30 km                 |

### 1.3.2.3 Espectro radioeléctrico

Tras la expansión de la demanda de las comunicaciones celulares y sistemas inalámbricos, se convierte en algo fundamental, el adecuado uso de un recurso físico tan limitado como es el espectro, a partir del cual se determina la viabilidad del sistema a implementarse.

Una de las claves importantes de LTE es el conseguir el despliegue de su red en un rango diverso de espectro en términos de ancho de banda, modos de duplexación y asimetrías de *Uplink* y *Downlink*. Considerando estos factores en el diseño del tráfico móvil, se puede evitar pérdidas innecesarias del valioso espectro radioeléctrico, resultando en una tecnología LTE fácilmente adaptable a asignaciones de cualquier banda en respuesta al incremento de la demanda y competencia por el espectro.

En la especificación de 3GPP se encuentra un gran número de bandas de frecuencias, todas estas definidas por la ITU<sup>6</sup> (*International Telecommunication Union*, Unión Internacional de Telecomunicaciones) y reguladores nacionales de las telecomunicaciones móviles. En el Anexo I se presenta una lista de bandas de frecuencias soportadas tanto para FDD (*Frequency Division Duplex*, Duplexación por División de Frecuencia) como para TDD (*Time Division Duplex*, Duplexación por División de Tiempo).

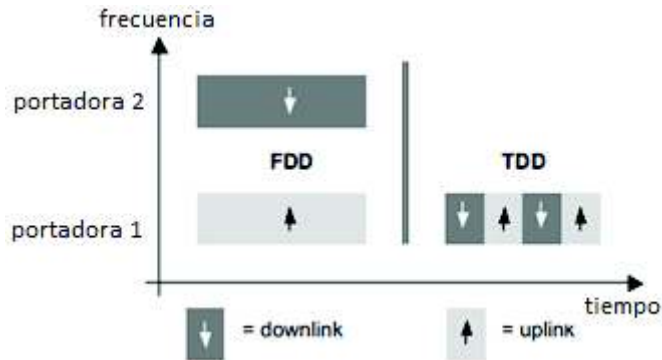
#### 1.3.2.3.1 Modos de Duplexación

El término “*dúplex*” involucra una comunicación de dos vías entre dos dispositivos, la misma que puede darse al mismo tiempo en ambas direcciones (*full-duplex*) o ser mutuamente exclusivos (*half-duplex*). Cabe destacar que una comunicación *half-duplex* puede llevar un servicio *full-duplex* como una comunicación telefónica normal.

---

<sup>6</sup> ITU es el organismo encargado de la estandarización y desarrollo de las telecomunicaciones a nivel internacional de la ONU (Organización de las Naciones Unidas).

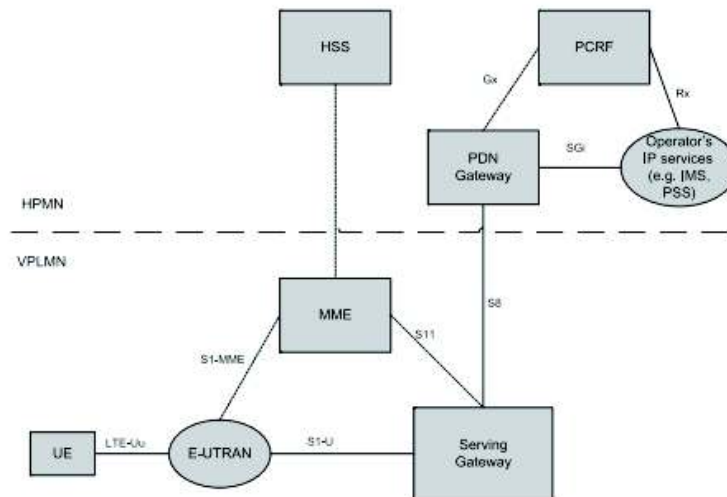
En el caso de la naturaleza *full-duplex*, el dominio de la frecuencia es usado para separar ambas direcciones, requiriendo el uso de dos portadoras de frecuencias para llevarlo a cabo, como es el caso de FDD. Para el caso de *half-duplex*, el dominio del tiempo es usado para separar la comunicación entrante de la saliente, haciendo uso de una sola portadora de frecuencia para ambas direcciones, como es el caso de TDD. Los dos modos de duplexación descritos arriba se presentan en la Figura 1.4.



**Figura 1.4.** Modos de duplexación FDD y TDD [12]

#### 1.3.2.4 Arquitectura del sistema LTE

La tecnología LTE cuenta con una arquitectura plana, formada por una red troncal EPC (*Evolved Packet Core*, Red Troncal de Paquetes Evolucionada) y una red de acceso E-UTRAN. La combinación de ambos nodos forma la arquitectura completa de LTE, también conocida como EPS (*Evolved Packet System*, Sistema de Paquetes Evolucionado). La arquitectura descrita se observa en la Figura 1.5.



**Figura 1.5.** Arquitectura LTE [12]



La principal diferencia con arquitecturas anteriores se encuentra en la red troncal, la cual da lugar a una red de servicios que usan el protocolo IP, mediante un mecanismo que soporta el tráfico de conmutación de paquetes, tomando en cuenta aspectos de calidad de servicio con una mínima latencia.

#### 1.3.2.4.1 Red de acceso evolucionada (E-UTRAN)

Parte del sistema que sustenta la transmisión por radio a los UEs (*User Equipment*, Equipo de Usuario) y que a su vez los conecta con la red troncal. Provee los servicios de transmisión y distribuye los recursos de forma eficiente para transportar la información del usuario al EPC, otorgando cierta capacidad de transmisión. La E-UTRAN posee un único elemento dentro de su arquitectura, el eNodeB o eNB (*evolved Node B*, Nodo B evolucionado). Se debe considerar además que las interfaces S1 y X2, que son descritas posteriormente, no son conexiones físicas, más bien, la información es encaminada a través de una red de transporte IP, donde cada eNB posee una dirección IP [14], [15].

La Figura 1.6 ilustra la E-UTRAN con sus entidades e interfaces correspondientes.

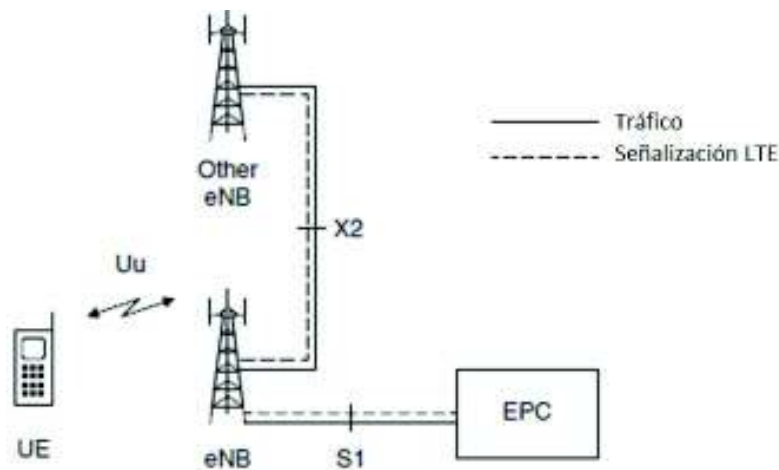


Figura 1.6. Arquitectura del E-UTRAN [10]

#### ➤ Evolved NodeB (eNB)

Los eNBs cumplen principalmente las funciones de transmisión y recepción de datos y mensajes de señalización hacia los equipos de usuario mediante la interfaz radio de LTE. Cada eNB trabaja con contextos en los cuales almacena información de cada UE conectado, la misma que comprende el estado, seguridad, capacidad del equipo de usuario, entre otros [14]. Una función clave del eNB es el proceso de *scheduling* (programación), donde se asignan dinámicamente recursos a los UEs tanto en *Uplink* como en *Downlink*. Los eNBs se encargan además del enrutamiento de datos del plano de usuario hacia el S-GW (*Serving Gateway*, Gateway de Servicio). Entre otras funciones

también se destaca el balanceo de carga, sincronización y coordinación de interferencia inter-celdas [15].

➤ **Interfaces del E-UTRAN**

La Tabla 1.4 muestra las interfaces que permiten la interconexión entre eNBs y su conexión con otras entidades de la arquitectura LTE.

**Tabla 1.4.** Interfaces de la red de acceso E-UTRAN de LTE

| Interfaz | Interconexión | Descripción  |
|----------|---------------|--|
| Uu       | UE – eNB      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmisión y recepción de datos a los móviles con protección mediante mecanismos de cifrado que ofrezcan integridad y confidencialidad.</li> <li>• Soporta transmisión de multidifusión de señalización de control, informando parámetros como la potencia máxima del UE, permisos de acceso del UE a otras entidades, entre otros [6].</li> <li>• Soporta transmisión de paquetes IP, siendo diseñada exclusivamente para el transporte de tráfico IP [6].</li> <li>• Permite gestionar recursos de radio y señalización de la red troncal, controlando el mecanismo de <i>handover</i><sup>7</sup> [6].</li> </ul>   |
| S1       | eNB – EPC     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporta procesos de establecimiento, modificación, liberación de recursos, <i>handover</i>, <i>paging</i><sup>8</sup> y localización de los UEs en modo <i>idle</i> (inactivo) en la red. Dividida en:<br/>S1-MME:<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporta información relacionada al plano de control, donde el eNB es controlado por la red troncal EPC a través del MME (<i>Mobility Management Entity</i>, Entidad de Gestión de Movilidad).</li> </ul> </li> <li>S1-U:<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporta información relacionada al plano de usuario, donde se da el envío de paquetes del usuario entre la E-UTRAN y la EPC a través del S-GW.</li> </ul> </li> </ul> |
| X2       | eNB – eNB     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporta transmisión de mensajes de señalización para el uso eficiente de recursos de radio.</li> <li>• Gestión de coordinación de interferencias entre celdas que usen un mismo canal.</li> <li>• Soporta transmisión de paquetes de usuarios entre eNBs durante procesos de <i>handover</i>, reduciendo latencias de conexión al no utilizar protocolos de capas superiores.</li> </ul>  |

<sup>7</sup> Handover o handoff es una técnica que permite la continuidad del servicio móvil con una calidad aceptable al pasar de una estación base a otra, usado cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones.

<sup>8</sup> Paging es una técnica utilizada para llamar a los móviles.

### 1.3.2.4.2 Red troncal de paquetes evolucionada (EPC)

Parte del sistema que se encarga del control de acceso a la red móvil, interconexión entre sistemas, control de movilidad y de sesiones de datos. Encargada además de activar los recursos usados para la transmisión de información en la red de acceso. La red troncal se caracteriza por el uso de un mecanismo de conmutación de paquetes para el manejo de todos los servicios transportados.

La Figura 1.7 ilustra la EPC con sus entidades e interfaces correspondientes.

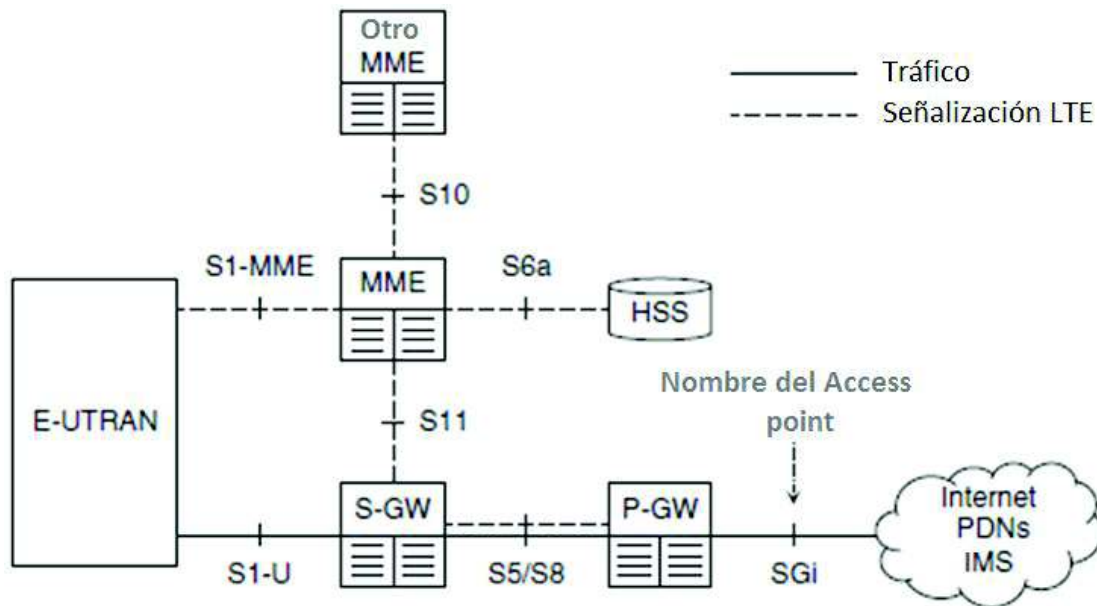


Figura 1.7. Arquitectura del EPC [10]

#### ➤ Mobility Management Entity (MME)

La entidad de administración de movilidad es la entidad principal del plano de control, encargada del control de acceso de terminales a la red y de la señalización entre cada UE y la red troncal. Los protocolos presentes entre los equipos de usuario y la red troncal son conocidos como protocolos NAS (*Non-Access Stratum*, Estrato de No Acceso).

De entre las funciones principales del MME se tiene el establecimiento de parámetros de movilidad y seguridad entre el UE y la red, información de la ubicación y confidencialidad del UE, y el *handover* de llamadas de voz. Todos estos procesos se cumplen solamente si se ha establecido una conexión de señalización en la capa del protocolo NAS, cuyos procesos de control se especifican en [16].

### ➤ **Serving Gateway (S-GW)**

El gateway de servicio posee funciones asociadas con el plano de usuario y es el punto que interconecta la red E-UTRAN con el P-GW (*Packet data network Gateway*, Gateway de red de Paquetes de datos). Mientras un UE puede estar conectado con varios P-GW, existe solamente un único S-GW para cada UE asociado a la EPS.

De entre sus funciones se incluyen su intervención dentro de *handovers* inter-eNBs, enrutamiento y direccionamiento de paquetes IP para el tráfico *Downlink* (P-GW al UE a través del eNB) y *Uplink* (UEs al P-GW), marcado de paquetes en capa transporte y contabilidad para la carga inter-operadora [17]. El S-GW tiene además la capacidad de almacenar temporalmente paquetes que no han sido entregados a los UEs cuando se encuentran en modo *idle*.

### ➤ **Packet data network Gateway (P-GW)**

Conocido también como PDN Gateway, posee funciones asociadas con el plano de usuario y permite la interconexión con otras redes de paquetes de datos como el Internet o conexiones adicionales hacia el IMS<sup>9</sup> (*IP Multimedia Subsystem*, Subsistema Multimedia IP), así también como funciones de filtrado de paquetes por usuario, asignación de direcciones IPv4 o IPv6 a los UEs, marcado de paquetes en capa transporte, mecanismos de control de parámetros de QoS (*Quality of Service*, Calidad de Servicio), contabilidad para la carga inter-operadora y control de acceso e imposiciones de tasas (*policing/shaping*) [18].

### ➤ **Home Subscriber Server (HSS)**

Corresponde a una base de datos central que contiene información sobre todos los clientes o abonados del operador de red, resultando de una combinación de las entidades de generaciones anteriores más la adición de funciones necesarias para las redes LTE. La información descrita involucra perfiles de suscripción, información permanente como condiciones de contrato del abonado (condiciones de QoS), información temporal como localización del abonado dentro de una zona de servicio, el indicador universal del suscriptor IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*, Identidad del Suscriptor Móvil Internacional), información de seguridad y cifrado.

---

<sup>9</sup> IMS es una arquitectura la cual integra el concepto de convergencia de servicios en una red totalmente IP.

➤ **Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)**

Es el elemento de control de carga y de políticas que controla los servicios de transmisión ofrecidos por la red LTE (servicios que ofrecen una capacidad para transmitir información del usuario), además del establecimiento de parámetros de QoS y tarificación.

➤ **Interfaces del EPC**

La Tabla 1.5 muestra las interfaces que permiten interconexiones internas y externas de entidades del EPS con otras entidades de la arquitectura LTE.

**Tabla 1.5.** Interfaces de la red troncal EPS de LTE

| Interfaz | Interconexión                                    | Descripción   |
|----------|--|---|
| SGi      | P-GW – Redes datos externas (ISP, Internet, IMS) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la interconexión con redes IPv4 e IPv6. Posee 2 modelos de interconexión vistos desde las redes externas:</li> <li>• Transparente: IP asignada al UE visible en la propia interfaz a través del P-GW. No transparente: se permite acceso de la red LTE a red externa remota.</li> </ul>                        |
| S5/S8    | P-GW – S-GW                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interfaz S5 usada cuando las entidades se encuentran dentro de la misma operadora [10].</li> <li>• Interfaz S8 usada cuando las entidades se encuentran en redes de distintas operadoras (<i>roaming</i><sup>10</sup>).</li> </ul>   |
| S6a      | MME – HSS  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporta información de las entidades P-GW almacenadas en el HSS usadas para el soporte de movilidad entre redes LTE y redes no 3GPP.</li> <li>• Transporta información sobre las subscripciones de cada usuario almacenados en el HSS para permitir o no el acceso de los UEs a los servicios de la red.</li> </ul> |
| S10      | MME – MME  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporta contextos de usuarios en procesos de <i>handover</i>, los mismos que contienen la localización del terminal, información de seguridad y cifrado, condiciones de subscripción de los usuarios, etc.</li> </ul>   |
| S11      | MME – S-GW                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporta registros de un UE en la red.</li> <li>• Establecimiento de conexiones con redes externas.</li> <li>• Notificación de paquetes en espera en el S-GW.</li> <li>• Reubicación del S-GW en procesos de <i>handover</i>.</li> </ul>   |

**1.3.2.5 Capa física LTE**

Para el alcance de las altas tasas de transmisión ofrecidas por LTE es importante contar con nuevas tecnologías en la capa física de una red celular que permita además un eficiente uso de los recursos de radio. En esta sección se abordan temas referentes a los

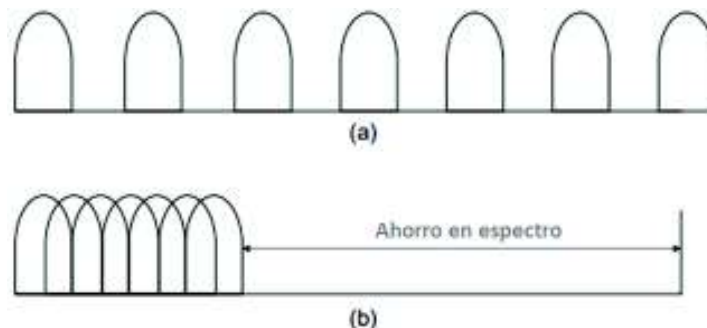
<sup>10</sup> Roaming es una técnica que permite que los clientes de un operador puedan seguir usando el servicio contratado desde una red móvil de otro operador, generalmente fuera del territorio nacional.

principios de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal) y las técnicas de acceso múltiple como OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*, Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) y SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*, Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única), utilizadas tanto para *Downlink* como *Uplink* respectivamente.

### 1.3.2.5.1 Principios OFDM

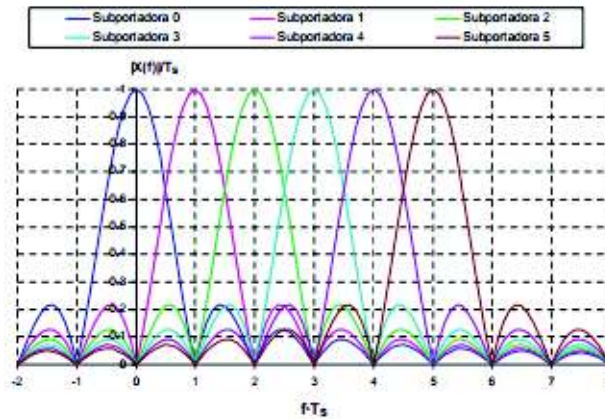
Tradicionalmente, los esquemas multiportadora subdividen el ancho de banda de un canal en un número de subcanales (subportadoras) paralelos tal como se muestra en la Figura 1.8 (a), existiendo la facilidad de que el receptor pueda fácilmente separar las portadoras individuales en el dominio de la frecuencia.

Por otro lado, la técnica de transmisión OFDM no es más que la transmisión multiportadora que multiplexa un grupo de símbolos sobre un grupo de subportadoras. La transmisión simultánea de todos los símbolos provoca un claro solapamiento de las subportadoras, tal como se muestra en la Figura 1.8 (b), pero gracias a su propiedad de ortogonalidad, es posible separar perfectamente estas subportadoras en recepción, evitando de esta manera el innecesario uso de bandas de guarda y obteniendo finalmente una eficiencia espectral considerable [6], [12].



**Figura 1.8.** Eficiencia espectral de OFDM comparado con modulación tradicional de multiportadora: (a) Espectro tradicional (b) Espectro de OFDM [12]

La Figura 1.9 muestra un ejemplo del espectro de 6 subportadoras OFDM, observando que solamente existe contribución espectral de una subportadora para cada frecuencia múltiplo de  $1/T_S$ , mientras que el resto resulta en nulos, donde  $T_S$  representa la duración del símbolo.

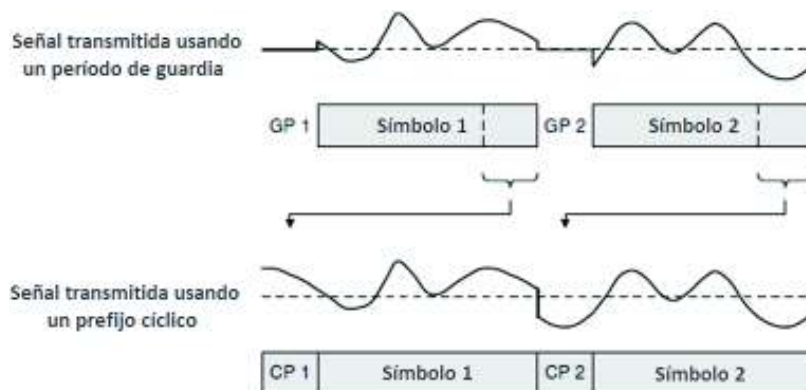


**Figura 1.9.** Espectro de frecuencias de 6 subportadoras OFDM [6]

➤ **Prefijo cíclico e ISI**

En las redes móviles existen varios fenómenos en el medio de propagación tales como la difracción y reflexión, los mismos que provocan que las señales en el receptor sufran retardos y lleguen múltiples copias de la señal transmitida debido a la multitrayectoria, resultando en una mezcla de señales con distintas amplitudes y fases que provoquen interferencia con los símbolos aledaños, dando lugar al ISI (*Inter-Symbol Interference*, Interferencia Inter-Símbolo) [6].

LTE usa una técnica conocida como la inserción del CP (*Cyclic Prefix*, Prefijo Cíclico), donde el transmisor inserta un periodo de guarda antes de cada símbolo. Este periodo de guarda resulta de una copia del final del siguiente símbolo tal como se muestra en la Figura 1.10, el cual tiene mayor duración que el retardo de propagación de la señal. Cada símbolo contiene un número exacto de ciclos de la onda seno, de tal forma que la señal recibida cambie suavemente al CP del siguiente símbolo [10], [19]. LTE usa una longitud de CP de aproximadamente 5 us con parámetros normales y 17 us en ambientes rurales y suburbanos.



**Figura 1.10.** Inserción del prefijo cíclico [10]

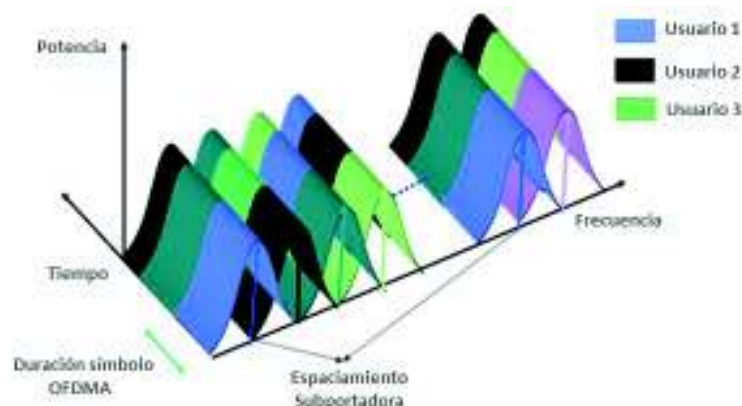
El receptor junta las múltiples copias de la señal transmitida con múltiples tiempos de llegada, obteniendo una señal seno con la misma frecuencia pero con distinta amplitud y fase a la transmitida. Luego se procesa la señal recibida dentro de una ventana cuya duración es igual a la del símbolo, y la extensión es descartada.

### 1.3.2.5.2 Acceso múltiple

Uno de los conflictos presentes en un sistema celular corresponde a la asignación eficiente de los recursos disponibles a los diferentes usuarios que decidan ocupar los servicios de la red, para lo cual se han desarrollado distintas técnicas de acceso múltiple que solventan este inconveniente. Entre las técnicas más utilizadas se tienen la combinación TDMA/FDMA (*Time/Frequency Division Multiple Access*, Acceso Múltiple por División de Tiempo/Frecuencia) para GSM, y el acceso múltiple por división de código de banda ancha WCDMA para UMTS. En el caso de LTE, se usan las técnicas de acceso múltiple OFDMA y SC-FDMA que son descritas en las siguientes secciones.

#### ➤ OFDMA

LTE usa la técnica de acceso múltiple OFDMA para el enlace descendente, es decir, desde el eNB hacia el UE. Esta técnica de transmisión usa un grupo de subportadoras ortogonales entre sí para transmitir simultáneamente información de varios usuarios, de manera que las señales de múltiples usuarios son separadas en diferentes slots o símbolos OFDM en el dominio del tiempo y subportadoras en el dominio de la frecuencia, tal como se observa en la Figura 1.11, presentando una señal OFDMA donde se separan las señales de 3 usuarios.



**Figura 1.11.** Señal OFDMA separada en tiempo y frecuencia [20]

Un RB (*Resource Block*, Bloque de Recurso) es la unidad mínima de recurso asignable a un usuario, el mismo que contiene 12 subportadoras consecutivas equi-espaciadas 15 kHz entre ellas, y 6 o 7 símbolos OFDM (dependiendo de la longitud del CP), ocupando un



ancho de banda de 180 kHz con una duración de 0.5 ms. Una trama FDD LTE tiene una duración de 10 ms, dividida en subtramas o TTI (*Transmission Time Interval*, Intervalo de Tiempo de Transmisión) de 1 ms. El número de RBs disponibles en LTE depende del ancho de banda del sistema, tal como se observará en la metodología de este trabajo. Además en el enlace descendente se pueden utilizar las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM, las mismas que corresponden a 2, 4 y 6 bits por símbolo, respectivamente [6], [10].

Ésta técnica es empleada en transmisores con un rango dinámico amplio y no puede ser utilizada en el enlace ascendente debido a la complejidad computacional que representaría (en los amplificadores de los terminales móviles) el reducir el parámetro PAPR<sup>11</sup> (*Peak to Average Power Ratio*, Relación de Potencia Pico a Promedio). Mientras mayor sea el valor del PAPR, menor será la relación entre la potencia transmitida y la consumida de los amplificadores del transmisor [4].

#### ➤ **SC-FDMA**

Por otro lado, LTE usa la técnica de acceso múltiple SC-FDMA para el enlace ascendente (UE hacia el eNB). Esta técnica combina todas las características deseables de OFDM, como dividir el ancho de banda en múltiples subportadoras paralelas y ortogonales entre ellas, y hacer uso además del CP para evitar el ISI; pero a diferencia de OFDM, realiza un proceso previo a la transmisión de los símbolos (pre-codificación) [6], evitando así valores de PAPR significativamente altos e incrementando la eficiencia en los amplificadores del transmisor.

Los parámetros de esta técnica empleados por LTE son básicamente los mismos que para el canal descendente, con una separación de portadoras de 15 kHz y agrupadas en RB de 12 subportadoras, las mismas que son distribuidas bajo demanda y que deben ser contiguas al momento de ser asignadas a un determinado usuario [6], [12].

#### **1.3.2.5.3 AMC y tamaño del bloque de transporte**

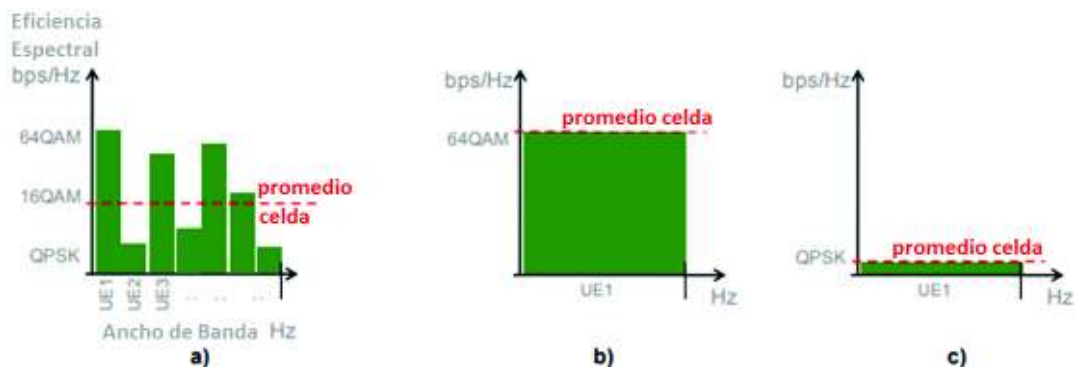
#### ➤ **Modulación y codificación adaptiva**

La tecnología LTE usa la técnica AMC (*Adaptive Modulation and Coding*, Modulación y Codificación Adaptiva) para obtener una alta eficiencia espectral del canal, además de incrementar la tasa de datos de la red [21]. Esta técnica permite que en casos donde la

---

<sup>11</sup> PAPR es una medida que indica la relación entre el valor pico de la potencia instantánea de la señal transmitida con respecto a su potencia media; es decir, una medida de la degradación esperada de la señal.

SINR<sup>12</sup> (*Signal to Interference plus Noise Ratio*, Relación Señal a Interferencia más Ruido) sea alta, se utilice un esquema de modulación de alta eficiencia espectral (64QAM) con una codificación no muy redundante; caso contrario, se utilice una modulación de baja eficiencia espectral (QPSK) con codificación redundante, como se observa en la Figura 1.12. De esta manera el UE puede elegir el esquema MCS más adecuado. LTE en sus canales de datos usa modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM, con una codificación usando turbo códigos<sup>13</sup>; mientras que en sus canales de control usa las modulaciones BPSK y QPSK, usando códigos convolucionales<sup>14</sup> [22]. Esta técnica resulta en una herramienta muy útil en respuesta a los cambios aleatorios de canales *fading*<sup>15</sup> [23], [24].



**Figura 1.12.** Eficiencia espectral promedio en celdas: (a) Muchos UEs por celda (b) Un UE con buen enlace (c) Un UE con enlace débil [24]

### ➤ Tamaño del bloque de transporte

Un bloque de transporte contiene básicamente la información o datos provenientes de la subcapa MAC hacia la capa física, y define el número de bits de datos transmitidos por cada subtrama o TTI de 1 ms. Su tamaño se representa por las siglas TBS (*Transport Block Size*, Tamaño del Bloque de Transporte) y depende principalmente del número de RBs o PRBs (*Physical Resource Blocks*, Bloques de Recursos Físicos) asignados a un usuario, los mismos que fueron definidos anteriormente.

### 1.3.2.6 Interfaz radio LTE

En esta sección se realiza una breve descripción de los canales físicos, lógicos y de transporte que permiten cumplir con los objetivos de la interfaz de radio LTE, especificados

<sup>12</sup> SINR es una medida que indica que tan potente es una señal comparada con la interferencia y ruido presentes en comunicaciones inalámbricas, usada generalmente para medir la calidad de un enlace.

<sup>13</sup> Turbo códigos son códigos de corrección de errores caracterizados por una alta eficiencia.

<sup>14</sup> Códigos convolucionales son códigos de detección de errores caracterizados por añadir redundancia a la información.

<sup>15</sup> Fading es la atenuación o variación de una señal por factores como el tiempo, frecuencia y posición geográfica en comunicaciones inalámbricas.

en la estandarización 3GPP, los cuales pretenden alcanzar velocidades de transmisión de 100 Mbps para *Downlink* y 50 Mbps para *Uplink*, usando una modulación de alta eficiencia espectral (64 QAM) [6], [10].

### 1.3.2.6.1 Canales físicos, lógicos y de transporte

Los flujos de información entre distintos protocolos son conocidos como señales y canales. Los canales físicos de datos llevan información entre partes de la capa física, los canales lógicos transportan mensajes de datos y señalización entre los protocolos RLC (*Radio Link Control*, Control de Enlace de Radio) [25] y MAC (*Medium Access Control*, Control de Acceso al Medio) [26], y finalmente los canales de transporte llevan información entre la capa física y el protocolo MAC.

#### ➤ Canales físicos

Los canales físicos se clasifican de acuerdo al tipo de información que llevan, ya sea datos o control. Las Tablas 1.6 y 1.7 muestran los canales físicos para *Downlink* y *Uplink*, respectivamente.

**Tabla 1.6.** Canales físicos para Downlink

| Canales | Descripción   |
|---------|---|
| PD SCH  | <i>Physical Downlink Shared Channel</i> : transporta datos y mensajes de señalización del canal compartido, mensajes de <i>paging</i> , además de poder adaptar su esquema de modulación en respuesta a la SINR recibida. |
| PBCH    | <i>Physical Broadcast Channel</i> : lleva el bloque de información maestro desde el canal de difusión o broadcast y usa un esquema de modulación fijo.  |
| PMCH    | <i>Physical Multicast Channel</i> : lleva datos desde el canal de multidifusión.  |
| PDCCH   | <i>Physical Downlink Control Channel</i> : lleva información de control.  |
| PHICH   | <i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i> : lleva indicadores ARQ híbridos.  |
| PCFICH  | <i>Physical Control Format Indicator Channel</i> : lleva indicadores de formato de control.   |

**Tabla 1.7.** Canales físicos para Uplink

| Canales | Descripción   |
|---------|---|
| PUSCH   | <i>Physical Uplink Shared Channel</i> : transporta datos y mensajes de señalización del canal compartido, y puede adaptar su esquema de modulación en respuesta a la SINR recibida. |
| PRACH   | <i>Physical Random Access Channel</i> : lleva transmisiones de acceso aleatorias desde el canal de acceso aleatorio y usa un esquema de modulación fijo.                            |
| PUCCH   | <i>Physical Uplink Control Channel</i> : lleva información de control.  |

➤ **Canales lógicos**

Este grupo de canales se clasifican según el tipo de información que llevan, por un lado están los canales de control lógicos que llevan mensajes de señalización en el plano de control, y los canales de tráfico lógicos que llevan información de datos en el plano de usuario. Por otro lado están los canales lógicos dedicados, los mismos que son ubicados específicamente para cada equipo de usuario. Las Tablas 1.8 y 1.9 muestran los canales lógicos para *Downlink/Uplink* y solo *Downlink*, respectivamente.

**Tabla 1.8.** Canales lógicos para Downlink/Uplink

| Canales | Descripción  |
|---------|--|
| DTCH    | <i>Dedicated Traffic Channel</i> : lleva datos desde o hacia el equipo de usuario.   |
| DCCH    | <i>Dedicated Control Channel</i> : lleva todos los mensajes de señalización específicos para cada equipo de usuario en modo activo.  |
| CCCH    | <i>Common Control Channel</i> : lleva mensajes de señalización para UEs que están cambiando de modo <i>idle</i> a activo en el proceso de establecimiento de conexión RRC <sup>16</sup> ( <i>Radio Resource Control</i> , Control de Recursos de Radio). |

**Tabla 1.9.** Canales lógicos para Downlink

| Canales | Descripción  |
|---------|--|
| PCCH    | <i>Paging Control Channel</i> : lleva mensajes de <i>paging</i> que los eNBs transmiten a los UEs que se encuentran en modo <i>idle</i> .  |
| BCCH    | <i>Broadcast Control Channel</i> : lleva todos los mensajes de información del sistema RRC que son enviados en difusión desde los eNBs hacia cada UE para informar sobre la configuración de la celda. |

➤ **Canales de transporte**

Las Tablas 1.10, 1.11 y 1.12 muestran los canales de transporte para *Downlink/Uplink*, solo *Downlink* y solo *Uplink*, respectivamente.

**Tabla 1.10.** Canal lógico para Downlink/Uplink

| Canal | Descripción  |
|-------|--|
| SCH   | <i>Shared Channel</i> : lleva la mayor parte de datos y mensajes de señalización en la interfaz radio. |

<sup>16</sup> RRC es un protocolo del plano de control de la interfaz radio de LTE encargado de enviar mensajes de señalización entre el UE y el eNB.

**Tabla 1.11.** Canales lógicos para Downlink

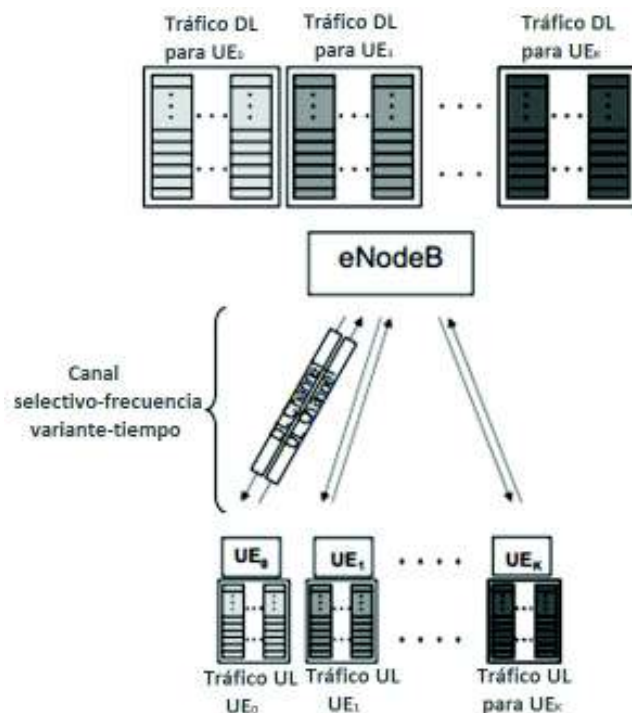
| Canales | Descripción   |
|---------|---|
| PCH     | <i>Paging Channel</i> : lleva mensajes <i>paging</i> del canal de control de <i>paging</i> .        |
| BCH     | <i>Broadcast Channel</i> : lleva el bloque de información maestro del canal de control de difusión. |
| MCH     | <i>Multicast Channel</i> : lleva datos de multidifusión de servicios multimedia.                    |

**Tabla 1.12.** Canal lógico para Uplink

| Canales | Descripción  |
|---------|--|
| RACH    | <i>Random Access Channel</i> : canal por el cual el UE puede conectarse a la red sin ninguna asignación previa |

### 1.3.2.7 Gestión de recursos de radio

Dentro de la arquitectura LTE, la principal entidad encargada de la administración o asignación de recursos con una QoS determinada es el eNB, tanto para los canales *Downlink* y *Uplink*. En la Figura 1.13 se observa la conexión de un eNB con K equipos de usuario a través de canales de tráfico. Para el caso de *Downlink*, el eNB contiene K buffers y sus respectivas colas de datos correspondientes a cada UE con los que se encuentra conectado, atendiendo cada cola con parámetros de calidad de servicio distintos. De la misma manera, en *Uplink* se tienen varias colas de datos dentro de cada UE.



**Figura 1.13.** Encolamiento de paquetes en eNodeB y UEs [12]

Generalmente para la asignación o distribución del tráfico de datos en los recursos físicos (canales inalámbricos), se utilizan algoritmos que optimicen dicho proceso, y que se relacionen estrechamente con los esquemas de AMC junto al tamaño del bloque de transporte y el protocolo HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*, Petición de Repetición Automática Híbrida), protocolo que resulta de la combinación de las técnicas FEC (*Forward Error Correction*, Corrección de Errores Hacia Adelante) y ARQ (*Automatic Repeat reQuest*, Petición de Repetición Automática), cuya función es detectar y corregir errores gracias a la retransmisión de paquetes, almacenando además los paquetes erróneos hasta la recepción de las respectivas retransmisiones [27].

### **1.3.3 Modelos de Tráfico en Comunicaciones Móviles**

Los modelos de tráfico dentro del diseño de redes móviles son un pilar importante para la correcta planificación de los recursos, especialmente para aquellos sistemas desarrollados con el objetivo de soportar tráfico elástico<sup>17</sup> e inelástico<sup>18</sup> sobre una red de conmutación de paquetes con requerimientos de QoS.

La mayoría de modelos analíticos de tráfico existentes describen de buena manera el comportamiento del tráfico telefónico, utilizando procesos de Markov [28]; sin embargo, son insuficientes para el modelamiento del tráfico donde se tiene una alta variabilidad en el tiempo de los datos de aplicaciones (transacciones cliente-servidor, transferencia de archivos, e-mail) con un ancho de banda variable, diferenciándose del ancho de banda fijo de telefonía [29]. En la presente sección se describe el modelo de tráfico M/G/1 PS que es utilizado en este Trabajo de Titulación.

#### **1.3.3.1 Conmutación de paquetes**

Las redes de conmutación de paquetes a diferencia de las de circuitos, no requieren de un recurso (canal o ancho de banda) dedicado en el momento que un usuario desea enviar datos, permitiendo a un gran número de usuarios permanecer conectados virtualmente al mismo canal físico en la red, y proveyendo de una alta eficiencia de canal al ser usado solamente cuando se transmite o recepta información [30]. Esto resulta muy útil en redes celulares donde el ancho de banda disponible es limitado.

Para este tipo de redes, debido a la variabilidad de las tasas de transmisión, se utilizan procesos estocásticos complejos para el análisis de la capacidad en redes de tráfico de

---

<sup>17</sup> Tráfico elástico o de baja prioridad es aquel que ocupa la mayor parte del tráfico en Internet (navegación web, descarga de archivos, e-mail, etc).

<sup>18</sup> Tráfico inelástico o de tiempo real es caracterizado por una alta prioridad (VoIP: voz sobre IP, video, etc).

datos [31], siendo estos muy distintos a las redes de tráfico de voz. Si se toma en cuenta el modelo de Poisson [32], modelo sin memoria introducido por A. K. Erlang que estudia el comportamiento del tráfico en telefonía, para su aplicación en el tráfico de datos, se observa su limitación en cuanto a la captura de ráfagas de tráfico, característica principal en redes de datos.

En tráfico de datos no se habla sobre distribución de tiempos de servicio, siendo más común el uso de distribución del tamaño del job o tiempo de transmisión. Al hablar de un job, se hace referencia a un paquete de datos de tamaño medio  $s$ , cuyas unidades son los bits o bytes; mientras que al referirse a la capacidad del sistema  $C$ , se habla de la máxima velocidad de transmisión del sistema medida en bps (bits por segundo). Finalmente, la fracción de tiempo que el servidor está ocupado  $\rho$  (factor de utilización), se representa en la Ecuación 1.1 para el tráfico de datos, donde  $\lambda$  representa la tasa media de llegada de jobs.

$$\rho = \frac{\lambda s}{C}$$

**Ecuación 1.1.** Factor de utilización para tráfico de datos

### **1.3.3.2 Sistemas de encolamiento**

En la siguiente sección se presenta una breve descripción de algunos sistemas de colas con accesibilidad completa (ningún cliente queda en cola mientras haya un servidor inactivo), con proceso de llegada de Poisson y distribución de tiempo de servicio (distribución del tamaño del job para redes de datos) exponencial y general, dando un principal énfasis al sistema M/G/1.

#### **1.3.3.2.1 Proceso de llegada de Poisson**

Los procesos de llegada como los mensajes entrantes a un servidor o llamadas entrantes a un sistema de conmutación se describen matemáticamente como procesos de eventos estocásticos, sabiendo diferenciar uno del otro. Uno de los procesos más importantes es el proceso de Poisson, el cual entrega una buena descripción de muchos procesos reales, siendo un proceso aleatorio.

Entre las principales características de este proceso se tienen: la estacionalidad, donde las distribuciones de probabilidad son independientes del instante de tiempo; independencia, siendo un proceso de Markov (sin memoria) ya que un estado futuro depende solamente del estado presente; y simple, donde la probabilidad de que exista más de un evento en un punto dado sea cero. Una representación gráfica se observa en la Figura 1.14, y su función

de distribución se observa en la Ecuación 1.2, donde  $\lambda$  representa la tasa de llegadas de  $k$  eventos en un intervalo de tiempo  $t$ .



**Figura 1.14.** Dos llegadas sin superlapiamiento con tiempo de duración distintos [32]

$$f(k, t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}, \quad \lambda > 0, \quad t \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots$$

**Ecuación 1.2.** Función de distribución de Poisson [32]

### 1.3.3.2.2 Distribución de servicio exponencial

Es la distribución de tiempo de servicio más comúnmente usada cuando se sobreponen procesos de eventos estocásticos. En las Ecuaciones 1.3 y 1.4 se tienen la CDF<sup>19</sup> (*Cumulative Distribution Function*, Función de Distribución Acumulativa), probabilidad de que la duración de un intervalo de tiempo sea menor o igual a  $t$ ; y su derivada PDF<sup>20</sup> (*Probability Density Function*, Función de Densidad de Probabilidad), respectivamente.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0, \quad t \geq 0$$

**Ecuación 1.3.** Función de distribución acumulativa [32]

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0, \quad t \geq 0$$

**Ecuación 1.4.** Función de densidad de probabilidad [32]

Considerando un proceso de Poisson, el tiempo hasta la siguiente llegada es exponencialmente distribuido al cumplir con las ecuaciones anteriores.

### 1.3.3.2.3 Distribución de servicio arbitraria

El tiempo de servicio arbitrario o general implica a que no existan restricciones en cuanto a la distribución del tiempo de servicio, entre las cuales están la determinística, Erlang- $k$ , Hiper-exponencial, y otras en [32].

Es decir, el caso en que la distribución del tiempo de servicio sea exponencial, las fórmulas se reducirán a las correspondientes del modelo M/M/1 que son vistas más adelante.

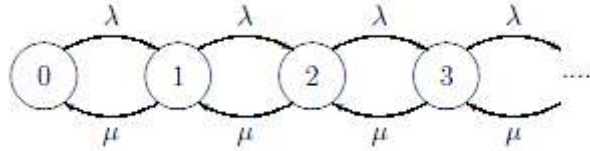
<sup>19</sup> CDF describe la probabilidad de que una variable aleatoria sea menor o igual a cierto valor.

<sup>20</sup> PDF describe la probabilidad de que una variable aleatoria tome cierto valor.



### 1.3.3.2.4 Sistema de colas M/M/1

Es un sistema formado por un proceso de llegada de Poisson (M), tiempo de servicio exponencial (M), un único servidor y capacidad del sistema infinita. La Figura 1.15 muestra el diagrama de estados de este sistema, donde las probabilidades de estado están dadas por series geométricas.



**Figura 1.15.** Diagrama de estados del sistema M/M/1 [32]

Para este sistema la longitud media de la cola aumenta si el tráfico ofrecido también lo hace, independientemente del aumento de la tasa media de llegada de clientes  $\lambda$  o de la tasa media de servicio del sistema  $\mu$ .

Las probabilidades de estado se observan en la Ecuación 1.5, donde la fracción de tiempo que el sistema tenga  $k$  clientes es  $\rho_k$ .

$$\rho_k = (1 - \rho) * \rho^k, \quad k = 0,1,2, \dots$$

**Ecuación 1.5.** Probabilidades de estado en M/M/1 [33]

Donde  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$

En las Ecuaciones 1.6, 1.7 y 1.8 se presentan el número medio de clientes en el sistema  $N$ , el tiempo medio total en el sistema  $T$  y el tiempo medio en cola  $W$ , respectivamente.

$$N = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

**Ecuación 1.6.** Número promedio de clientes en el sistema [33], [39]

$$T = \frac{1}{\mu(1 - \rho)}$$

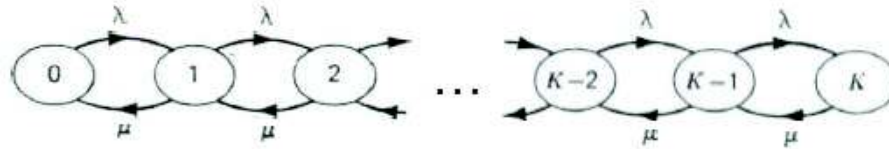
**Ecuación 1.7.** Tiempo promedio total en el sistema [33], [39]

$$W = \frac{\frac{\rho}{\mu}}{1 - \rho}$$

**Ecuación 1.8.** Tiempo promedio en cola [33], [39]

### 1.3.3.2.5 Sistema de colas M/M/1/k

A diferencia del anterior, en este caso se asume un sistema con capacidad finita de  $k$  clientes (incluyendo los clientes en servicio) donde las nuevas llegadas de clientes serán rechazadas a la entrada del sistema. El diagrama de estados de este sistema se observa en la Figura 1.16.



**Figura 1.16.** Diagrama de estados del sistema M/M/1/k [33]

### 1.3.3.2.6 Sistema de colas M/M/m/m

Es considerado un sistema de pérdidas de  $m$  servidores y una capacidad finita  $m$ , donde se tienen clientes o llamadas bloqueadas (perdidas). Cada cliente es atendido por un servidor privado al momento en que llega; sin embargo, si todos los servidores están ocupados, el cliente no es atendido y se pierde. En la Ecuación 1.9 se observa la fórmula  $P_m$  de Erlang B, la misma que representa la fracción de tiempo cuando todos los servidores  $m$  están ocupados, y donde  $A$  representa el tráfico ofrecido. La fórmula  $P_m$  además es independiente a la distribución de tiempo de servicio; es decir, es válida para cualquier distribución de tiempo de servicio con media  $\frac{1}{\mu}$ .

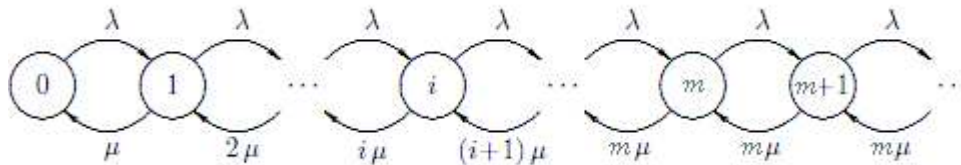
$$P_m = \frac{\frac{A^m}{m!}}{\sum_{k=0}^m \frac{A^k}{k!}}$$

**Ecuación 1.9.** Fórmula de Erlang B [33]

Donde  $A = \frac{\lambda}{\mu}$

### 1.3.3.2.7 Sistema de colas M/M/m

Este es uno de los sistemas de colas más importantes conocido también como sistema del retardo de Erlang, el mismo que está formado por  $m$  servidores y una capacidad del sistema infinita. El estado del sistema corresponde al número total de clientes en el sistema, ya sea siendo servidos o en cola. En la Figura 1.17 se muestra el diagrama de transición de estados de este sistema y en la Ecuación 1.10 se observa la fórmula  $C_m$  de retardo de Erlang o Erlang C, la misma que representa la probabilidad de que un nuevo cliente tenga que esperar por un servidor.



**Figura 1.17.** Diagrama de estados del sistema M/M/m [32]

$$C_m = \frac{m * P_m}{m - \rho(1 - P_m)}$$

**Ecuación 1.10.** Fórmula de Erlang C [34]

Donde  $\rho = \frac{\lambda}{m\mu}$

### 1.3.3.2.8 Sistema de colas M/G/1

Es un sistema formado por un proceso de llegada de Poisson (M), tiempo de servicio general o arbitrario (G), un único servidor y capacidad del sistema infinita.

Este sistema cuenta con una tasa media de  $\lambda$  llegadas por segundo, dado que comprende un proceso de llegada de Poisson. La Ecuación 1.11 y 1.12 representan la media del tiempo en cola  $W$  y la media del número de clientes en el sistema  $N$ , obtenidos del estudio de Pollaczek-Khinchine (P-K) [34], donde  $t_s$  es el tiempo medio de servicio.

$$W = \frac{\lambda * \overline{t_s^2}}{2(1 - \rho)}$$

**Ecuación 1.11.** Media del tiempo en cola [35]

$$N = \rho + \frac{\lambda^2 * \overline{t_s^2}}{2(1 - \rho)}$$

**Ecuación 1.12.** Media del número de clientes en el sistema [35]

Donde  $\rho = \lambda * t_s$

### 1.3.3.2.9 Políticas de servicio en sistemas de colas

Existen varias políticas de servicio clásicas de encolamiento que pueden ser clasificadas en varios grupos, entre ellas se tienen las que consideran solamente el proceso de llegada (FCFS, LCFS, SIRO), el tiempo de servicio (SJF) y la cantidad de tiempo en cola (RR, PS, FB) [32].

➤ **First Come – First Served (FCFS)**

También denominada FIFO (*First In – First Out*, Entra Primero –Sale Primero), es una cola ordenada, muy conocida cuando se trata de personas y referida solamente a la cola, no al sistema en sí, ya que en el caso de tener más de un servidor, un cliente con tiempo de servicio corto puede adelantar a uno con tiempo de servicio largo.

➤ **Last Come – First Served (LCFS)**

También conocida como LIFO (*Last In – First Out*, Entra Último –Sale Primero) y corresponde al principio de apilamiento.

➤ **Service In Random Order (SIRO)**

Todos los clientes en la cola tienen la misma probabilidad de ser servidos, ya que se realiza una selección aleatoria.

➤ **Shortest Job First (SJF)**

Conocida también como SPF (*Shortest Processing time First*, tiempo de Procesamiento más Corto Primero) o SJN (*Shortest Job Next*, Job más Corto Siguiente) y que a diferencia de las anteriores, toma en cuenta el tiempo de servicio como criterio, reduciendo el tiempo de espera total para todos los clientes.

➤ **Round Robin (RR)**

Caracterizada por un encolamiento equitativo, donde se asigna al menos un slot de tiempo fijo para cada cliente, y que en caso de que el servicio no sea completado, regresa a la cola con FCFS. Si el slot de tiempo es infinitesimal, la política de servicio se convierte en *Processor Sharing*.

➤ **Foreground – Background (FB)**

El servidor ofrece servicio al cliente quien más lejos haya recibido la menor cantidad de servicio. El momento en que la cantidad servida sea igual en todos los clientes, éste se comportará como *Processor Sharing*.

➤ **Processor Sharing (PS)**

Es un modelo de encolamiento justo, donde los recursos disponibles en el sistema son distribuidos equitativamente en tiempos de respuesta pequeños  $\Delta t$ , cada vez que un job o cliente es servido. Si un job no es servido completamente durante este intervalo de tiempo, este regresa a una cola FCFS que compartirá con otros jobs hasta obtener el tiempo de

servicio requerido. Si el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es infinito, todos los jobs serán completados en el primer servicio, obteniendo un sistema M/G/1 FCFS; pero cuando  $\Delta t$  tiende a cero, se obtiene una política de servicio PS.

Si existen  $x$  jobs en el sistema, cada uno de ellos recibirá la fracción  $\frac{1}{x}$  de la capacidad del mismo, resultando en un servicio continuo del servidor con una cola no real, ya que todos los jobs son servidos al mismo tiempo.

Una propiedad importante del modelo PS es que el proceso de salida es un proceso de Poisson, tal como la entrada, obteniendo un sistema reversible [32].

Este modelo es comúnmente utilizado para el modelamiento del tráfico elástico (baja prioridad), el cual ocupa la mayor parte del tráfico transportado en Internet y en sistemas de comunicaciones, un ejemplo de esto se encuentra en [36], [37], [38].

#### **1.3.3.2.10 M/G/1 PS**

Adentrándose en los sistemas inalámbricos y de redes de datos, este es un sistema de encolamiento de único servidor con distribución de tamaño de job arbitrario y política de servicio PS, considerando además un único enlace de capacidad  $C$ , proceso de Poisson para la llegada de jobs a una tasa  $\lambda$ , probabilidades de estado iguales que para M/M/1 (ver Ecuación 1.4) y asumiendo que el enlace se comparte equitativamente entre los jobs de tamaño medio  $s$ , se presenta en la Ecuación 1.13 el tiempo de respuesta o tiempo promedio en el sistema del job  $T$ , notando que el valor de  $\rho$  es como lo indica la Ecuación 1.1.

$$T = \frac{s}{C(1 - \rho)}$$

**Ecuación 1.13.** Tiempo promedio en el sistema de un job [39]

Este sistema provee un modelo conceptual muy útil que ilustra un rendimiento robusto para la distribución del tamaño del job, siempre y cuando el proceso de llegada sea una distribución de Poisson y que además se trabaje con una compartición equitativa del ancho de banda. En [39] y [40] se asegura que este sistema de encolamiento modela de buena manera el rendimiento de un enlace que transporta tráfico elástico en base a la compartición equitativa del ancho de banda.

#### **1.3.3.3 Métricas de rendimiento**

En la planificación y dimensionamiento de la capacidad de redes es importante la consideración de métricas de rendimiento del tráfico y que puedan ser usadas para calcular las tasas de datos (*Throughput*) obtenidos por las sesiones de los clientes.

La métrica del retardo es utilizada para el tráfico en tiempo real, mientras que para el tráfico elástico tolerante al retardo una métrica adecuada es el *Throughput*; sin embargo, existen muchas otras métricas en donde la mejor dependerá de un balance entre facilidad de cálculo y convergencia de información [36], [41], [42].

El *Throughput*, técnicamente hablando, es una métrica que corresponde al número de bits transmitidos en un intervalo o ventana de tiempo y comúnmente utilizada para aplicaciones de datos.

En los sistemas PS es común encontrar la utilización de dos métricas de rendimiento, *Throughput* promedio de llamada  $\theta$  (*Call-Average Throughput*) y *Throughput* promedio de flujo  $\phi$  (*Flow-Average Throughput*) [36], [37].

Tras varias aproximaciones de [38] y [40] se observa la representación matemática de  $\theta$  en la Ecuación 1.14, donde  $S$  representa el tamaño del job en bits,  $t$  el tiempo total en el sistema,  $E[C]$  la media aritmética<sup>21</sup> de la capacidad,  $\rho$  el factor de utilización y  $C^*$  la media armónica<sup>22</sup> de la capacidad.

$$\theta = E\left[\frac{S}{t}\right] = E[C] \frac{1-\rho}{\rho} \ln \frac{1}{1-\rho}$$

**Ecuación 1.14.** Throughput promedio de llamada [38], [40]

Donde  $\rho = \frac{\lambda s}{c^*}$

Por otro lado, la representación matemática de  $\phi$  se la observa en la Ecuación 1.15, donde  $E(S)$  representa la media de  $S$  y  $E(t)$  la media de  $t$ .

$$\phi = \frac{E[S]}{E[t]} = \frac{s}{T} = E[C](1-\rho)$$

**Ecuación 1.15.** Throughput promedio de flujo [31], [36]

Cabe destacar que  $\theta$  es el mejor estimador de *Throughput* para tráfico elástico con cargas de la celda menores al 85%, caso contrario se usará la métrica de  $\phi$  [36]. Además se recalca que las dos últimas expresiones son poco sensibles (dependientes) a la distribución del tamaño del job, por lo que tales expresiones pueden ser sostenidas tanto para un sistema M/M/1 PS como M/G/1 PS [43].

<sup>21</sup> Media aritmética o también denominada promedio aritmético es el valor esperado a partir de la suma de todos los valores y dividida para el número total de datos.

<sup>22</sup> Media armónica es el inverso de la media aritmética de los recíprocos de sus valores los cuales deben ser necesariamente no nulos.

## 2. METODOLOGÍA

En esta parte metodológica del Trabajo de Titulación se detallan los procesos a través de los cuales se calcula aproximadamente la capacidad de una celda y del sistema para la tecnología LTE a partir de simulaciones desarrolladas en Matlab y del marco teórico descrito en la primera parte.

En la primera fase, se establecen los parámetros a utilizarse en los tres programas de simulación que permiten simular la planificación de la cobertura y de la capacidad del sistema LTE. Estos parámetros están relacionados con el presupuesto del enlace y el tráfico en redes de datos.

En la segunda fase, se desarrolla un programa de simulación con su respectiva interfaz gráfica GUI (*Graphical User Interface*, Interfaz Gráfica de Usuario), basado en Matlab, que permite calcular la distancia del enlace entre el UE y el eNB, la distancia entre estaciones base y el tamaño de una celda a través del presupuesto del enlace para *Downlink*.

En la tercera fase, se realiza una descripción y una interfaz gráfica GUI del simulador desarrollado en Matlab "*Wireless Network Downlink Static Monte Carlo*", el cual a partir de los resultados obtenidos del primer programa de simulación, entrega valores de las medias aritméticas, armónicas, percentiles<sup>23</sup> y SINR para el canal descendente de LTE en unidades de tasas de bits por segundo. Los valores obtenidos de este simulador son utilizados para el cálculo de la capacidad del sistema LTE.

Finalmente en la cuarta fase, se desarrolla un nuevo programa de simulación con su respectiva interfaz gráfica GUI, basado en Matlab, que permita calcular matemáticamente la capacidad de una celda y del sistema para la tecnología LTE, las cuales deben cumplir con la demanda de datos total durante la hora pico. Estos cálculos están basados en las métricas de rendimiento del modelo de tráfico de único servidor con distribución de Poisson para las llegadas y una distribución del tamaño del job arbitrario (general) con compartición del procesador (M/G/1 PS).

### 2.1 Parámetros de Simulación para Cobertura y Capacidad

Al momento del diseño y planificación de una red celular se deben considerar ciertos parámetros importantes que cumplan con las expectativas del planificador respecto al área total a cubrir, configuraciones de la estación base, el espectro disponible, el número de

---

<sup>23</sup> Percentil es el valor de la variable bajo el cual se encuentra un porcentaje dado de los datos en un grupo de datos ordenados de menor a mayor.

usuarios, la densidad de tráfico, probabilidad de cobertura, probabilidad de bloqueo y la capacidad del sistema [44]. Algunos de estos parámetros son obtenidos de acuerdo a estadísticas o información del mercado, tales como la cantidad de usuarios y su demanda total en Mbps [25].

### 2.1.1 Cobertura LTE

A continuación se presenta una descripción de los parámetros que influyen en el cálculo de la cobertura LTE, los mismos que son utilizados posteriormente en las simulaciones. Cabe destacar que el análisis es realizado para el enlace descendente, donde se tienen parámetros propios del canal, estación base y móvil.

#### 2.1.1.1 Presupuesto del enlace

El presupuesto del enlace es un proceso clave para la determinación del número de eNBs y la distancia máxima de sus enlaces con lo que podrían abastecer determinadas áreas de cobertura cuyas unidades vienen dadas en km<sup>2</sup>. El presupuesto del enlace calcula las pérdidas máximas permitidas en el enlace, introduciendo márgenes en el diseño que permita compensar dichas pérdidas del tipo físico y ambiental, con lo que será posible determinar la distancia máxima del enlace y a su vez el área de cobertura de una estación base.

Por tal razón es importante destacar los parámetros que resaltan en dicho presupuesto, y a partir del cual, aplicar el modelo de propagación de radio frecuencia adecuado y finalmente encontrar el diámetro del área de cobertura de la celda.

En la Ecuación 2.1 se describen los parámetros a ser tomados en cuenta en este Trabajo de Titulación que intervienen en el cálculo de la pérdida máxima en la trayectoria del enlace *Downlink* para un sistema LTE en unidades de decibelios (dB).

$$L_p = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{fdTx} - M_{SFdiv} - MI - L_{pen} - L_B - L_{fdRx} + G_{Rx} - P_{sens}$$

**Ecuación 2.1.** Presupuesto del enlace Downlink LTE [10], [45]

Donde:

$L_p$ : Pérdidas por trayectoria

$P_{Tx}$ : Potencia de transmisión del eNB

$L_{fdTx}$ : Pérdidas por conectores en el eNB

$L_{fdRx}$ : Pérdidas por conectores en el móvil



$L_{pen}$ : Pérdidas por penetración

$L_B$ : Pérdidas por cuerpo

$G_{Tx}$ : Ganancia de antena del eNB

$G_{Rx}$ : Ganancia de antena del móvil

$M_{SFdiv}$ : Margen de shadowing diverso

$MI$ : Margen de interferencia

$P_{sens}$ : Sensibilidad del receptor

#### 2.1.1.1.1 Parámetros del canal

Los parámetros a considerarse en el canal son los descritos a continuación.

##### ➤ Ancho de banda

Como se mencionó en la parte teórica, LTE usa un ancho de banda de canal variable, el cual incluye anchos de banda desde 1.4 hasta 20 MHz. Debido a la flexibilidad de LTE en cuanto al dominio de la frecuencia, existe el concepto de configuración del ancho de banda de transmisión, el mismo que define el número máximo de RB disponibles correspondientes a cada ancho de banda del canal. La Tabla 2.1 muestra el número de RB disponibles para cada ancho de banda.

**Tabla 2.1.** Número de RB disponibles para cada ancho de banda del canal [12]

| Ancho de banda del canal [MHz] | # RB disponibles |
|--------------------------------|------------------|
| 1.4                            | 6                |
| 3                              | 15               |
| 5                              | 25               |
| 10                             | 50               |
| 15                             | 75               |
| 20                             | 100              |

##### ➤ Margen de Shadowing

Margen utilizado para contrarrestar los efectos del desvanecimiento a gran escala, *Shadow Fading* o desvanecimiento lento, presente cuando la señal es afectada por obstáculos grandes. Este margen permite asegurar que el nivel de señal en un porcentaje del área de la celda, generalmente 90%, sea igual o mayor al umbral especificado (sensibilidad del receptor), siendo dependiente de la desviación estándar  $\sigma$  del nivel de la señal [46]. Este

margen ronda entre los 8 a 9 dB en ambientes urbanos [19], [47]. Para este margen se utiliza la CDF de la distribución normal estándar  $F(x)$ , la cual indica la probabilidad de que una variable aleatoria  $X = P_{sens}$  (potencia en recepción) sea menor o igual a  $x = -k\sigma$  (sensibilidad). Las Ecuaciones 2.2 y 2.3 representan la CDF de la distribución normal estándar y el Margen de Shadowing, respectivamente, donde  $P_{cover}$  representa la probabilidad de cobertura, es decir, el área bajo la curva; mientras que  $k$  es el factor que se debe determinar mediante la tabla de la función de distribución acumulativa de la distribución normal estándar, especificada en el Anexo III.

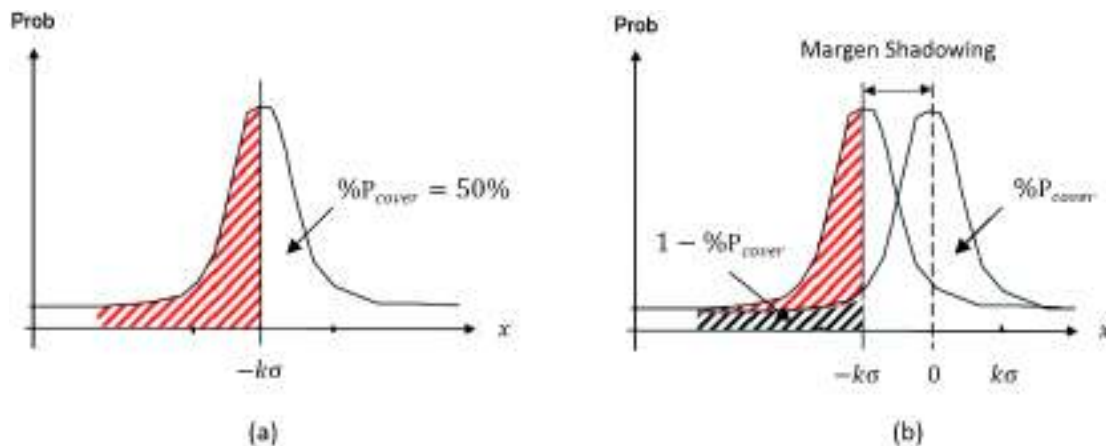
$$P(X \geq x) = P(P_{sens} \geq k\sigma) = P(P_{sens} \leq -k\sigma) = 1 - P_{cover} = F(x)$$

**Ecuación 2.2.** Probabilidad de que  $P_{sens}$  sea menor o igual a  $-k\sigma$  [48]

$$M_{SF} = -(k\sigma) \text{ [dB]}$$

**Ecuación 2.3.** Margen de Shadow Fading [48]

En la Figura 2.1 se observa la CDF de la distribución normal estándar antes y después de aplicar el margen de *shadowing*, donde (a) existe un 50% de probabilidad de que la potencia recibida sea menor o igual a la sensibilidad ( $-k\sigma$ ); y (b) existe una probabilidad ( $1 - \%P_{cover}$ ) de que la potencia recibida sea menor o igual a la sensibilidad ( $-k\sigma$ ).



**Figura 2.1.** Función de distribución acumulada de la distribución normal estándar

### ➤ Margen de interferencia

Este parámetro considera la interferencia producida por móviles LTE de celdas adyacentes que se encuentran utilizando los mismos RBs para sus transmisiones y recepciones. La Ecuación 2.4 representa la fórmula para el cálculo del margen de interferencia (en veces), donde  $SIR_{min}$  es la relación señal a interferencia en el borde de la celda, la cual depende de la geometría de la red y cuyos valores típicos están entre -4 y -1 dB,  $SINR$  es la relación

señal a interferencia más ruido en el borde de la celda, y finalmente  $\gamma$  representa la carga de la celda objetivo [10].

$$MI = \frac{1}{1 - \gamma \frac{SINR}{SIR_{min}}}$$

**Ecuación 2.4.** Margen de interferencia para Downlink [10]

#### 2.1.1.1.2 Parámetros del eNB y del UE

Los parámetros a considerarse por parte de la estación base y del móvil son los descritos a continuación.

##### ➤ **Potencia de Transmisión**

Esta potencia influye directamente en la interferencia entre celdas experimentada por celdas vecinas que usen el mismo canal, por lo que es importante su adecuada configuración. Las especificaciones de 3GPP no definen la potencia de transmisión  $P_{tx}$  de la estación base, sin embargo existen 3 clases de eNodeBs [12], entre ellos los eNodeB de hogar con  $P_{tx} \leq 20 \text{ dBm}$ , los de área local con  $P_{tx} \leq 24 \text{ dBm}$ , y los de área amplia con valores comunes de  $P_{tx}$  entre 40 y 46 dBm [10]. La potencia de transmisión depende del valor del *Throughput* que se desee alcanzar en el borde de la celda, es decir, se considera el número de RB que serán asignados en el borde de la celda. La fórmula para el cálculo de la potencia de transmisión provista por cada estación base se la observa en la Ecuación 2.5.

$$P_{Tx} = \frac{P_{m\acute{a}x} * \#RB_{asignados}}{\#RB_{disponibles}} \text{ [dB]}$$

**Ecuación 2.5.** Potencia de transmisión de la estación base [49]

##### ➤ **Ganancia de las antenas**

Se define como la relación entre la densidad de potencia que produce una antena en una dirección determinada y la densidad de potencia que produce una antena isotrópica. A mayor ganancia de la antena, mejor será su directividad.

##### ➤ **Ancho del haz y relación frente-atrás de las antenas**

El ancho del haz se define como la apertura angular donde el 50% de la potencia es radiada, es decir, donde la potencia expresada en decibelios disminuye 3 dB. La relación frente-atrás es el cociente entre la radiación máxima con dirección frontal del eje de la antena (lóbulo principal) con la dirección contraria (lóbulo posterior).

### ➤ Sensibilidad del receptor

La sensibilidad representa el nivel mínimo de potencia con el cual la antena receptora trabajará a un cierto BER<sup>24</sup> (*Bit Error Rate*, Tasa de Error de Bit) [47].

Ésta depende de factores como: la densidad de ruido térmico  $kT$  que se define en -174 dBm/Hz [10], [12], donde  $k$  representa la constante de Boltzmann<sup>25</sup> y  $T$  la temperatura del receptor; el ancho de banda  $B$  utilizado que equivale a  $B = \#RBs * 180 \text{ kHz}$ , donde  $\#RBs$  representa el número de RBs asignados y  $180 \text{ kHz}$  es el ancho de banda de un RB; la relación señal a interferencia más ruido  $SINR$ , cuya fórmula se observa en la Ecuación 2.6, donde  $R$  representa la velocidad de transmisión; y finalmente la  $NF$ <sup>26</sup> (*Noise Figure*, Figura de Ruido) [12]. La fórmula para el cálculo de la sensibilidad del receptor se observa en la Ecuación 2.7.

$$SINR = 10 \log \left( 1.6 * \left( 2^{\frac{R}{0.65B}} - 1 \right) \right) - 4.6 \text{ [dB]}$$

**Ecuación 2.6.** Relación señal a interferencia más ruido [49]

$$P_{sens} = 10 \log \left( \frac{kTB}{0.001} \right) + SINR + NF \text{ [dBm]}$$

**Ecuación 2.7.** Sensibilidad del receptor [10]

### ➤ Asignación de recursos

En la tecnología LTE, el nivel de potencia de la señal recibida por un UE depende en gran parte de la calidad del canal de la celda en servicio, del nivel de ruido y de la interferencia proveniente de otras celdas. Por tal razón, es que el transmisor debe estar sujeto a las variaciones de la calidad de señal recibida, para esto utilizando el método AMC revisado en la parte teórica.

Los esquemas de modulación influyen directamente en la tasa de transmisión de los bits de datos, por ejemplo, las modulaciones de orden bajo como QPSK pueden tolerar altos niveles de interferencia debido a la propiedad de robustez que presentan, proveyendo a la vez de bajas tasas de transmisión de datos. Por otro lado, las modulaciones de orden alto como 64QAM ofrecen altas tasas de transmisión de datos, pero son más susceptibles a los

---

<sup>24</sup> BER es el número de bits recibidos erróneamente con respecto al total de bits enviados durante un intervalo de tiempo.

<sup>25</sup> Constante de Boltzmann es una constante física cuyo valor es  $1.380662 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  y relaciona la temperatura absoluta con la energía.

<sup>26</sup> NF es una medida de la degradación de la SINR producido por las imperfecciones de los componentes análogos del receptor.

errores debido a su alta sensibilidad al ruido, interferencia y errores de estimación de canal; es decir, el uso de estas modulaciones son apropiadas cuando se tengan niveles de SINR suficientemente altos. En el caso de la tasa de codificación, depende de la modulación seleccionada, obteniendo bajas tasas de codificación para canales de pobres condiciones, mientras que altas tasas de codificación para canales con niveles altos de SINR.

- Determinación del orden de modulación y TBS

En LTE, el UE determina el orden de modulación y el tamaño del bloque de transporte en el canal físico PDSCH, a través del cual lee el índice del esquema de modulación y codificación  $I_{MCS}$ , y mediante la Tabla 2.2, encuentra el orden de modulación  $Q_m$  usado en el canal, siendo de nivel 2, 4 o 6 correspondientes a QPSK, 16QAM o 64QAM, respectivamente; y determina finalmente el índice del tamaño del bloque de transporte  $I_{TBS}$ .

**Tabla 2.2.** Índice de modulación y TBS para PDSCH [50]

| Índice MCS<br>$I_{MCS}$ | Orden de modulación<br>$Q_m$ | Índice TBS<br>$I_{TBS}$ |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 0                       | 2                            | 0                       |
| 1                       | 2                            | 1                       |
| 2                       | 2                            | 2                       |
| 3                       | 2                            | 3                       |
| 4                       | 2                            | 4                       |
| 5                       | 2                            | 5                       |
| 6                       | 2                            | 6                       |
| 7                       | 2                            | 7                       |
| 8                       | 2                            | 8                       |
| 9                       | 2                            | 9                       |
| 10                      | 4                            | 9                       |
| 11                      | 4                            | 10                      |
| 12                      | 4                            | 11                      |
| 13                      | 4                            | 12                      |
| 14                      | 4                            | 13                      |
| 15                      | 4                            | 14                      |
| 16                      | 4                            | 15                      |
| 17                      | 6                            | 15                      |
| 18                      | 6                            | 16                      |
| 19                      | 6                            | 17                      |
| 20                      | 6                            | 18                      |
| 21                      | 6                            | 19                      |
| 22                      | 6                            | 20                      |
| 23                      | 6                            | 21                      |
| 24                      | 6                            | 22                      |
| 25                      | 6                            | 23                      |
| 26                      | 6                            | 24                      |
| 27                      | 6                            | 25                      |
| 28                      | 6                            | 26                      |

- Determinación del Throughput

Para el cálculo del número de bits de datos transmitidos durante un TTI de duración de 1 ms para un determinado número de PRBs  $N_{PRB}$  e índice TBS  $I_{TBS}$ , se hace uso de la tabla del Anexo II. El índice TBS está asociado a un orden de modulación específico y corresponde a un valor particular de SINR, tal como se observó anteriormente. De esta manera se encuentra el tamaño del bloque de transporte en el borde de la celda, o en otras palabras, el *Throughput* en *Downlink*. Por ejemplo para 100 PRBs con un  $I_{TBS} = 26$ , se transmiten 75,376 bits, lo que se traduce a un *Throughput* de 75.376 Mbps.

#### **2.1.1.1.3 Pérdidas en el enlace**

Entre estas se tienen las pérdidas por penetración, las mismas que son causadas por interferencias de vehículos y edificios.

Existen otras pérdidas por cuerpo y conectores, en el primer caso donde la potencia transmitida o receptada de un móvil es afectada por la absorción de ondas de radio del cuerpo humano; en el segundo caso se tienen pérdidas resultantes de las imperfecciones en el acople o conexión de la antena con los equipos de la estación base [10].

#### **2.1.1.2 Modelos de propagación**

Al momento de la planificación de la cobertura de las estaciones base, es importante seleccionar un modelo de propagación adecuado, el cual permita predecir las pérdidas por trayectoria de las ondas de radio propagadas entre dos puntos, todo esto a través de fórmulas empíricas matemáticas que involucren parámetros como la frecuencia de operación, altura de las antenas, ancho de las calles, tipo del terreno, entre otros.

En este Trabajo de Titulación se hace mención a dos modelos de propagación que se incluyen en los cálculos de la cobertura del sistema LTE.

##### **2.1.1.2.1 Modelo Okumura-Hata**

Modelo de pérdidas de propagación con estudios realizados en los alrededores de Tokio, el cual utiliza parámetros como la frecuencia de operación  $f$ , altura de la antena del móvil  $h_{mobile}$ , altura de la antena de la estación base  $h_{BS}$ , y la distancia del enlace entre ambas antenas  $d$ . Este modelo es aplicable para sistemas móviles diseñados para UHF<sup>27</sup> (*Ultra*

---

<sup>27</sup> UHF es la banda del espectro electromagnético que se encuentra en el rango de frecuencias de 300MHz a 3GHz.

*High Frequency*, Frecuencia Ultra Alta) y VHF<sup>28</sup> (*Very High Frequency*, Frecuencia Muy Alta) bajo las siguientes condiciones: rango de frecuencias de 100 a 1500 MHz, distancia de 1 a 20 km, altura de la antena de 30 a 200 m para la estación base y de 1 a 10 m para el móvil [51].

Las fórmulas empíricas que entrega este modelo se observan en las Ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10 para áreas urbanas, suburbanas y rurales, respectivamente.

$$L_{urban} = 69.55 + 26.16 \log(f_{MHz}) - 13.82 \log(h_{BS}) - A(h_{mobile}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{BS})) \log(d_{km}) \text{ [dB]}$$

**Ecuación 2.8.** Pérdidas de propagación de modelo Okumura-Hata urbano [51]

$$L_{suburban} = L_{urban} - 2 \left( \log \left( \frac{f_{MHz}}{28} \right) \right)^2 - 5.4 \text{ [dB]}$$

**Ecuación 2.9.** Pérdidas de propagación de modelo Hata suburbano [47]

$$L_{ro} = L_{urban} - 4.78(\log(f_{MHz}))^2 + 18.33 \log(f_{MHz}) - 40.94 \text{ [dB]}$$

**Ecuación 2.10.** Pérdidas de propagación de modelo Hata rural [47]

Donde  $A(h_{mobile})$  se la observa en la Ecuación 2.11 para ciudades medianas o pequeñas, y en la Ecuación 2.12 para ciudades grandes.

$$A(h_{mobile}) = (1.1 \log(f_{MHz}) - 0.7)h_{mobile} - (1.56 \log(f_{MHz}) - 0.8)$$

**Ecuación 2.11.** Factor de corrección de antena del móvil para ciudad mediana-pequeña [51]

$$A(h_{mobile}) = 3.2(\log(11.75h_{mobile}))^2 - 4.97$$

**Ecuación 2.12.** Factor de corrección de antena del móvil para ciudad grande [51]

#### **2.1.1.2.2 Modelo Cost 231 Hata**

Llamado también Extensión PCS al modelo Hata [30], es una versión extendida del modelo Hata desarrollada por el comité de trabajo de COST-231. Este modelo es aplicable para sistemas móviles bajo las siguientes condiciones: rango de frecuencias de 1500 a 2000 MHz, distancia de 1 a 20 km, altura de la antena de 30 a 200 m para la estación base y de 1 a 10 m para el móvil [52].

---

<sup>28</sup> VHF es la banda del espectro electromagnético que se encuentra en el rango de frecuencias de 30MHz a 300MHz.

La fórmula empírica que entrega este modelo se observa en la Ecuación 2.13, donde  $C_M$  toma el valor de 0 dB para ciudades medianas y suburbanas, y de 3 dB para ciudades grandes.

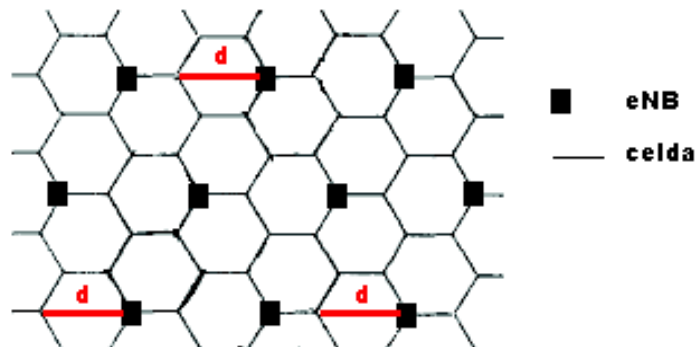
$$L_{urban} = 46.3 + 33.9 \log(f_{MHz}) - 13.82 \log(h_{BS}) - A(h_{mobile}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{BS})) \log(d_{km}) + C_M \text{ [dB]}$$

**Ecuación 2.13.** Pérdidas de propagación de modelo COST-231 Hata urbano [52]

Para ambientes suburbanos y rurales se utilizan las Ecuaciones 2.9 y 2.10 respectivamente, tomando en cuenta la nueva variable  $L_{urban}$  de la Ecuación 2.13.

### 2.1.1.3 Área de la celda LTE

La combinación del presupuesto del enlace con un modelo de propagación adecuado permite estimar el tamaño de una celda. La geometría hexagonal de las celdas es la más usada en las redes celulares, debido a que con esta forma se logra ocupar la mayor parte del área a cubrir sin dejar huecos o espacios de cobertura. Además, una técnica para el incremento de la capacidad del sistema es la sectorización de celdas, la cual consiste en dividir la celda en partes pequeñas o sectores. La sectorización a usarse en este Trabajo de Titulación es la hexagonal, observada en la Figura 2.2, donde cada sitio o estación base comprende a 3 sectores/celdas hexagonales.



**Figura 2.2.** Sectorización hexagonal [30]

El área de una celda viene dada por la Ecuación 2.14, donde  $d$  representa la distancia del enlace entre la estación base y el móvil. Además, el cálculo de la distancia entre estaciones base ISD (*Inter Site Distance*, Distancia Entre Sitios), se realiza a través de la Ecuación 2.15.

$$A_{cell} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

**Ecuación 2.14.** Área de una celda hexagonal [30]



$$ISD = \frac{3}{2}d$$

**Ecuación 2.15.** Distancia entre estaciones base [30]

## **2.1.2 Capacidad de una Celda LTE**

La variabilidad de la capacidad en *Downlink* ocurre de varias maneras, como por ejemplo al alcanzar mayores tasas de datos cuando el móvil se encuentre en mejores condiciones de propagación, por ejemplo al aire libre; o por otro lado, las tasas de datos fluctuarán dependiendo del número de móviles contenidos en la celda, obteniéndose altas tasas de datos al encontrarse solamente un único móvil cercano a la estación base, en lugar de varios.

A continuación se definen los parámetros a ser utilizados para el cálculo de la capacidad de una celda.

### **2.1.2.1 Parámetros de tráfico**

#### **2.1.2.1.1 Demanda de datos**

Mundialmente la demanda de tráfico de datos móviles es de aproximadamente 7.2 Exabytes al mes, el equivalente a 19,953 millones de mensajes de texto cada segundo [5], esto tras el crecimiento continuo de la demanda de datos comparado con años anteriores. Este tráfico de datos incluye el tráfico generado por *smartphones*, computadoras y tabletas. En este Trabajo de Titulación se utilizan valores cercanos a los estudios realizados en [5], donde se especifica que la demanda de datos móviles generada por un *smartphone* promedio en la región de Latino América es de aproximadamente 1,455 Megabytes al mes.

#### **2.1.2.1.2 Tráfico diario promedio en hora pico**

Los usuarios como fuentes de tráfico hacen uso de los servicios móviles de datos casual y aleatoriamente, por lo que debido a este comportamiento, el número de recursos ocupados simultáneamente variará permanentemente. Sin embargo, existen periodos de tiempo en los que regularmente se da un gran incremento del uso de estos recursos, resultando en periodos del día donde el tráfico alcanza sus máximos valores. Este periodo de tiempo es conocido como la hora pico, el cual se define como aquellos 60 minutos donde se alcanza la máxima intensidad de tráfico en el día. Con el parámetro de tráfico diario promedio en la hora pico se representa el porcentaje del tráfico diario que recae durante la hora pico [53].

### **2.1.2.1.3 Número de usuarios**

El número de usuarios, al igual que la demanda de datos, depende de la región o sector/celda a ser servido. Mediante éste parámetro se puede hallar la demanda total del sistema durante la hora pico.

### **2.1.2.1.4 Throughput promedio por usuario**

Representa la tasa de datos objetivo o promedio que el usuario desee alcanzar. Éste parámetro es utilizado para el cálculo de la capacidad de una celda a través del modelo de tráfico escogido. Para el caso de análisis de este Trabajo de Titulación, las métricas de rendimiento a ser utilizadas son la métrica del *Throughput* promedio de flujo (*Flow-Average Throughput*) y la métrica del *Throughput* promedio de llamada (*Call-Average Throughput*).

## **2.2 Diseño del Simulador de Planificación de Cobertura**

### **2.2.1 Descripción**

Se desarrolló un programa de simulación en Matlab que permite calcular el tamaño de una celda LTE y la distancia entre estaciones base a través del presupuesto del enlace y la selección adecuada del ambiente de propagación para *Downlink*. Estos resultados son necesarios para una siguiente simulación que junto a otros parámetros evalúa las tasas de datos promedio en sectores del área de cobertura.

En primer lugar el programa calcula la relación señal a interferencia más ruido a partir del número de RBs asignados y del *Throughput* en el borde de la celda, ambos parámetros ingresados por el usuario. Luego es calculada la potencia de transmisión proveniente de cada estación base, para esto se identifica primeramente el número de RBs disponibles a partir del ancho de banda de canal ingresado y el número de RBs asignados, ya que dicha potencia depende del *Throughput* que se desee alcanzar en el borde de la celda.

La sensibilidad del receptor es calculada a partir de la figura de ruido del móvil y la temperatura, datos que de igual forma son ingresados por el usuario. Además se incluyen márgenes de interferencia y de Shadow Fading (desvanecimiento lento); para este último fue utilizada una función de MATLAB que permita calcular la inversa del CDF normal estándar, tal como se muestra en el fragmento del Código 2.1.

```

M_div=2; % número de antenas para diversidad
Qcond=nthroot(1-Probcb/100,M_div); %diversidad espacial
kcond=norminv(Qcond); % inversa del CDF normal estándar
MSFcond=-(kcond*sig); % margen shadowing diverso

```

**Código 2.1.** Margen de shadow fading diverso del Anexo VI

Todos los parámetros calculados anteriormente son utilizados para el presupuesto del enlace diseñado en el programa, que posteriormente, al combinarse con un modelo de propagación dependiente de la frecuencia y del tipo de área que escoja el usuario, entre estos el área metropolitana, urbana, suburbana y rural, entregue los parámetros de salida objetivos de esta primera simulación, los cuales corresponden a la distancia máxima del enlace, la distancia entre estaciones base y el área de la celda.

### 2.2.2 Funcionamiento

En primer lugar cabe recalcar que se debe tener instalado el software MATLAB R2013b o superior. Luego de abrir este software se procede a correr la interfaz **PRESENTACION\_CAP\_LTE** de la Figura 2.3, la cual consta con los datos iniciales que presenten al Trabajo de Titulación en cuestión, y además 2 botones, donde el botón rojo (SALIR) lleva al cierre del programa, mientras que el botón azul (INICIAR) permite avanzar a la primera fase del simulador y redirige a una nueva interfaz gráfica. El código fuente para el desarrollo de esta primera interfaz gráfica se encuentra en el Anexo IV.



**Figura 2.3.** Interfaz PRESENTACION\_CAP\_LTE

Al iniciar el simulador se accede a una nueva interfaz llamada **PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE**, la misma que se observa en la Figura 2.4, en la cual el usuario puede ingresar los parámetros de entrada correspondientes a la estación base, el móvil, el canal, y otros parámetros del sistema como la frecuencia de trabajo y la selección del ambiente de propagación. Además se cuenta con un botón amarillo (Calcular) cuyo proceso arranca a partir del archivo *link\_budget.m*, el mismo que permite obtener los parámetros de salida tales como el cálculo de la distancia máxima del enlace provisto por la estación base, la distancia entre estaciones base y el área de la celda, estos últimos usados como entradas en la interfaz de simulación que se describe más adelante y a la cual se puede acceder a través del botón verde (Monte Carlo). El código fuente para el desarrollo de esta interfaz se encuentra en el Anexo V.



**Figura 2.4.** Interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE

Cabe mencionar además que cada entrada ingresada por el usuario debe ser un valor numérico válido, caso contrario aparecerá una ventana de error, tal como se muestra en la Figura 2.5.



**Figura 2.5.** Error de entrada inválida

### 2.2.2.1 Archivos .m

En esta primera parte de la simulación se utilizan los archivos que se mencionan a continuación:

#### ➤ link\_budget.m

Este archivo de programación realiza los cálculos básicos del presupuesto del enlace a partir de los datos ingresados por el usuario. Este archivo entrega los valores calculados de los parámetros de salida, los mismos que fueron mencionados con anterioridad y cuyo fragmento se muestra en el Código 2.2. El código fuente completo de este archivo se encuentra en el Anexo VI.

```
% Presupuesto del enlace
Lp = Ptx+Ga_t-Lf_t-MSFcond-MI-p_loss-b_loss-Lf_r+Ga_r-Prx;

% Modelo de Propagación
d_km_p = PropModel(city,h_ms,h_bs,freq,PL_model,Lp);

% ISD
isd = 3*d_km_p/2;

% Área celda
a_km2_cell = (3*sqrt(3)/2)*(d_km_p/2)^2;
```

**Código 2.2.** Parámetros de salida del Anexo VI

#### ➤ PropModel.m

Función que calcula la distancia entre la estación base y el móvil, a través de las pérdidas por propagación obtenidas del presupuesto del enlace, y de un modelo de propagación dependiente de la frecuencia de trabajo, del ambiente y del tipo de ciudad especificado por el usuario. El código fuente de este archivo se encuentra en el Anexo VII.





### 2.2.2.2 Parámetros

A continuación se describen los parámetros que incluye la interfaz de la Figura 2.4.

#### ➤ Entrada




La Tabla 2.3 muestra los parámetros a ser ingresados por el usuario respecto a la estación base.

**Tabla 2.3.** Parámetros de entrada de la estación base para la interfaz  
PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE




| Parámetro en MATLAB | Descripción  | Elemento en Interfaz  |
|---------------------|--|---|
| Ptxmax              | Toma valores en unidades de decibelio-milivatio (dBm).<br>Depende del <i>Throughput</i> que se desee alcanzar en el borde de la celda y sus valores típicos se encuentran en la sección 2.1.1.1.2. |   |
| Ga_t                | Toma valores en unidades de decibelio-isotrópico (dBi).<br>Su valor está especificado en los <i>datasheets</i> de las antenas a ser empleadas.   |   |
| Lf_t                | Toma valores en unidades de decibelio (dB).<br>Su valor típico es de 0.5 dB, considerando las imperfecciones en la conexión de la antena con los equipos de la estación base [10].                 |   |
| h_bs                | Toma valores en unidades de metros (m).<br>Alturas típicas mayores a 20 m [12].  |  |

Las Tablas 2.4 y 2.5 muestran los parámetros a ser ingresados por el usuario respecto al móvil.

**Tabla 2.4.** Parámetros de entrada del móvil para la interfaz  
PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE (Parte I)





| Parámetro en MATLAB | Descripción   | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|---|--|
| Ga_r                | Toma valores en unidades de decibelio-isotrópico (dBi).<br>Normalmente tiene valores de 0 dBi en antenas móviles de equipos celulares [19], [47].                 |  |
| Lf_r                | Toma valores en unidades de decibelio (dB).<br>Su valor típico es de 0 dB en los móviles, ya que no existen mayores pérdidas de conectores en estos equipos [12]. |  |
| h_ms                | Toma valores en unidades de metros (m).<br>Altura promedio de 1.5 m para un móvil [12].   |  |

**Tabla 2.5.** Parámetros de entrada del móvil para la interfaz  
PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE (Parte II)




| Parámetro en MATLAB | Descripción  | Elemento en Interfaz  |
|---------------------|--|---|
| NF_ms               | Toma valores en unidades de decibelio (dB).<br>LTE define un requisito de NF de 9 dB para el móvil, al igual que UMTS [12].  |   |
| R_ms                | Toma valores en unidades de kilobits por segundo (kbps).<br>Depende del número de PRBs asignados para la transmisión y de la modulación utilizada. El proceso para su obtención se observa en la asignación de recursos de la sección 2.1.1.1.1. |   |
| RBas                | Toma valores en un rango de 1 a 110 de acuerdo al Anexo II.  |  |

Las Tablas 2.6 y 2.7 muestran los parámetros a ser ingresados respecto al canal.

**Tabla 2.6.** Parámetros de entrada del canal para la interfaz  
PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE (Parte I)



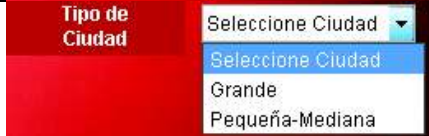
| Parámetro en MATLAB | Descripción  | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|--|--|
| sys_BW              | Toma valores en unidades de megahercios (MHz).<br>Sus valores permitidos son 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz de acuerdo al ancho de banda variable de LTE.  |  |
| T                   | Toma valores en unidades de grados Celsius (°C).<br>Los valores normales de operación son típicamente entre +15°C a +35°C [12].  |  |
| Probc               | Toma valores en unidades porcentuales (%).<br>Indica la probabilidad de que la señal receptada sea mayor al umbral especificado en el borde de la celda. Sus valores dependen del ambiente de propagación. |  |
| sig                 | Toma valores en unidades de decibelio (dB). Sus valores normales están entre 6 a 12 dB, mientras que su valor típico es de 8 dB para ambientes urbanos y suburbanos [46].                                  |  |

**Tabla 2.7.** Parámetros de entrada del canal para la interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE (Parte II)

| Parámetro en MATLAB | Descripción  | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|--|--|
| n_load              | Toma valores en unidades porcentuales (%).<br>Indica la carga o demanda de tráfico en la celda.  |  |
| p_loss              | Toma valores en unidades de decibelio (dB).<br>Valores típicos en interiores y exteriores de edificios: 16-20 dB y 10-15 dB respectivamente. Valores típicos por vehículos: 3-6 dB [19], [47]. |  |
| b_loss              | Toma valores en unidades de decibelio (dB).<br>Pérdidas por absorción típicamente de 0 dB para datos [10].   |  |

La Tabla 2.8 muestra otros parámetros del sistema a ser ingresados por el usuario.

**Tabla 2.8.** Otros parámetros de entrada para la interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE




| Parámetro en MATLAB | Descripción   | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|---|--|
| freq                | Toma valores en unidades de mega hercios (MHz).<br>Las bandas de frecuencia son especificados para FDD y TDD en el Anexo I. |  |
| PL_model            | Entre las opciones se tiene el Área Metropolitana, Urbana, Suburbana y Rural.   |  |
| city                | Entre las opciones se tiene Ciudad Grande y Ciudad Pequeña-Mediana.   |  |

➤ **Salida**

La Tabla 2.9 muestra los parámetros de salida que resultan de la planificación de la cobertura utilizando los parámetros de entrada antes mencionados.



**Tabla 2.9.** Parámetros de salida para la interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE

| Parámetro en MATLAB | Descripción   | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|---|--|
| d_km_p              | Se muestra la distancia máxima del enlace provista por la estación base en unidades de kilómetros (km). |  |
| isd                 | Se muestra la distancia entre estaciones base en unidades de kilómetros (km).                           |  |
| a_km2_cell          | Se muestra el tamaño de la celda en unidades de kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> ).                |  |

## 2.3 Simulador “Wireless Network Downlink Static Monte Carlo”

### 2.3.1 Descripción

El principal objetivo de la presente simulación son los cálculos de los valores de  $E[C]$  y  $C^*$ , los mismos que representan el promedio aritmético y la media armónica de la capacidad de la celda para *Downlink*, respectivamente, siendo necesarios para los cálculos de la capacidad para LTE y que serán descritos más adelante.

Cabe recalcar además que esta simulación no considera la movilidad y que solamente utiliza el modelo de asignación *Round Robin* debido a las muestras uniformes y aleatorias de las ubicaciones de los móviles, con lo que se consigue que los algoritmos de asignación de recursos entreguen el mismo número de RBs a cada móvil de una forma consistente.

Dentro del simulador, la variable ISD, define la distancia en kilómetros entre estaciones base. Su valor definido en kilómetros permite escalar no solamente la red, sino también las ubicaciones de los móviles, cuyo fragmento se muestra en el Código 2.3.

```

ms_plan='random';           % Selección de la distribución de los
switch lower(ms_plan); % móviles (MS), aleatoria por defecto
case 'random'
num_MS=ceil(MS);           % Número de móviles
LLim_x=0.0;               % Límite inferior para ubicaciones de MS en x
ULim_x=0.9;               % Límite superior para ubicaciones de MS en x
LLim_y=-0.8;              % Límite inferior para ubicaciones de MS en y
ULim_y=0.8;               % Límite superior para ubicaciones de MS en y

% Construcción de la matriz de ubicaciones de móviles
MS_loc=zeros(num_MS,2);
MS_loc(:,1)=LLim_x+(ULim_x-LLim_x)*rand(num_MS,1);
MS_loc(:,2)=LLim_y+(ULim_y-LLim_y)*rand(num_MS,1);
end

% Escalamiento de ubicaciones por el factor ISD
BS_loc=ISD_scale*BS_loc'; % Escalamiento de BS (eNB)
MS_loc=ISD_scale*MS_loc;  % Escalamiento de MS (UE)

```

**Código 2.3.** Escalamiento de ubicaciones de móviles y estaciones base del Anexo IX

En esta simulación se evalúa la potencia recibida (sensibilidad) en cada ubicación del móvil proveniente de cada estación base. Usando estos valores es posible identificar la estación base que provee la mayor potencia, con lo que se determina la primera celda en ser servida, considerando que todas las celdas trabajan a la misma potencia. A partir de esto son evaluados los parámetros como la SINR, la sensibilidad de recepción, el promedio aritmético de la capacidad de la celda  $E[C]$  y la media armónica de la capacidad de la celda  $C^*$ , para cada ubicación de la misma.

Además se describe que en este simulador existe un *Throughput* mínimo de 0.032 Mbps (32 kbps), basado en el TBS más pequeño considerando 2 PRBs, y en donde todos los valores de cada ubicación menores a este umbral serán excluidos de los cálculos, tal como lo muestra el fragmento del Código 2.4.

```

% Descarte de Throughput, SINR, ubicaciones del móvil y
% valores de sensibilidad para tasas de datos < 32 kbps
i=find(RATE<0.032); % filas donde Throughput < 32kbps
RATE(i,:)=[]; % Throughput
SINR(i,:)=[]; % SINR
MS_loc(i,:)=[]; % ubicaciones de móviles
RSS_max(i,:)=[]; % sensibilidad del receptor

```

**Código 2.4.** Descarte de parámetros cuando Throughput < 32 kbps del Anexo IX

### 2.3.2 Funcionamiento

A esta parte de la simulación se accede luego de hacer clic en el botón verde (Monte Carlo) de la interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE, donde a continuación se abre la interfaz **MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE**, la misma que se observa en la Figura 2.6, en la cual el usuario puede ingresar los parámetros de entrada adicionales requeridos para esta simulación. Cabe destacar que muchos de los parámetros de entrada de la anterior interfaz son también utilizados para la presente simulación, entre ellos se tienen:

En cuanto a la estación base, la potencia de transmisión, pérdidas en conectores, ganancia de la antena transmisora y altura de la estación base; para el móvil, la ganancia de la antena receptora, pérdidas de los conectores, altura de la antena del móvil y la figura de ruido; para el canal, el ancho de banda del sistema, temperatura, desviación estándar para Shadow Fading, pérdidas por penetración y pérdidas por cuerpo; además de parámetros como la frecuencia de trabajo y el ambiente de propagación; y finalmente parámetros adicionales propios de esta parte de la simulación como el ancho del haz y la relación frente-atrás de la antena transmisora, el número de ubicaciones del móvil y la distancia máxima del enlace que fue obtenida de la primera simulación.

Además esta interfaz cuenta con un botón amarillo (Calcular) cuyo proceso arranca a partir del archivo *wnsim\_multi\_reuse.m*, el cual a su vez hace el llamado a otras funciones internas que son descritas más adelante, y que con las cuales finalmente se obtienen los parámetros de salida tales como el promedio aritmético y la media armónica de la capacidad de la celda, el segundo percentil, el quinto percentil, la SINR promedio y los gráficos de la CDF de la capacidad de la celda, los mismos que son utilizados para el cálculo de la capacidad de la celda LTE en base al modelo de tráfico M/G/1 PS en una nueva interfaz, a la cual se accede luego de hacer clic en el botón verde (Capacidad LTE). El código fuente para el desarrollo de esta interfaz se encuentra en el Anexo VIII.

Al igual que en la primera simulación, las entradas ingresadas por el usuario deben ser valores numéricos válidos, de otra forma aparecerá la ventana de error de la Figura 2.5 para que se vuelva a ingresar un valor correcto.

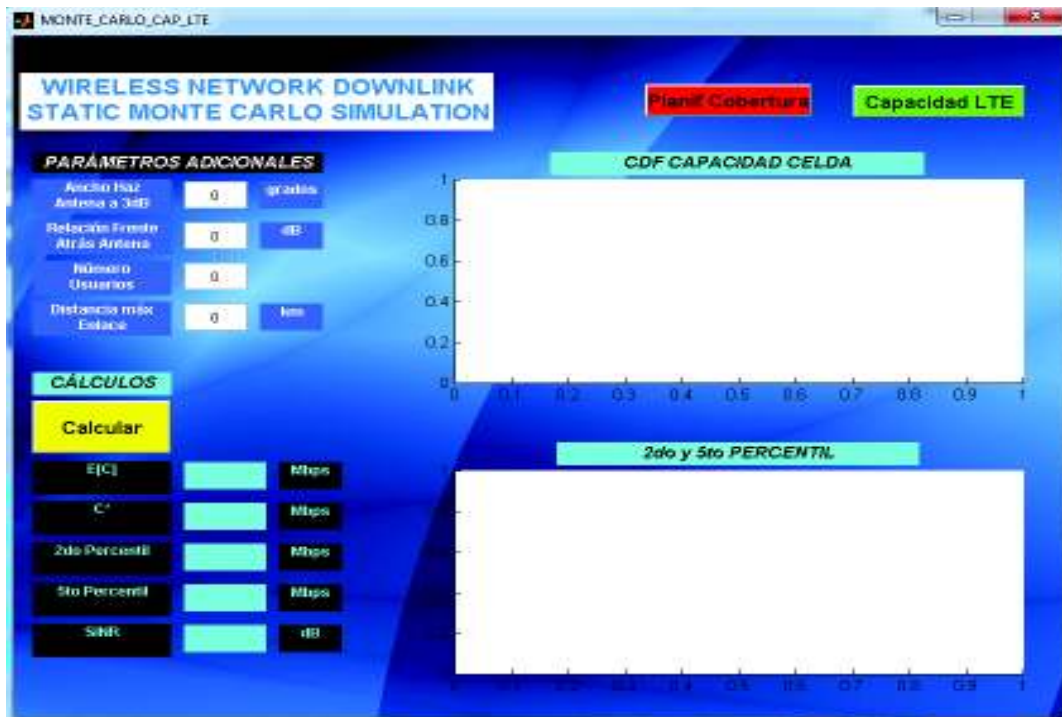


Figura 2.6. Interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE

### 2.3.2.1 Archivos .m

Los archivos de programación para esta simulación basada en LTE son los listados a continuación:

➤ **wnsim\_multi\_reuse.m**

Corresponde al primer archivo en ser ejecutado luego de hacer clic en el botón CALCULAR de la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE, en este se encuentra la programación principal de esta simulación, en el cual se leen todos los parámetros de entrada y tras varios procesos entrega los resultados como parámetros de salida. En este archivo se establecen las ubicaciones de las estaciones base, así también como la de los móviles, siendo para este último una planificación aleatoria y que pueden ser escalados de acuerdo al parámetro *ISD*. Se determinan las distancias entre cada móvil y cada estación base, estableciendo una distancia mínima de 35 metros entre ellos, eliminando las ubicaciones de los móviles que no cumplan con esta condición. Se determinan también los ángulos horizontales que forman cada móvil hacia cada celda de la estación base, considerando que existen 3 celdas por estación base. Se calculan además los valores de la sensibilidad para cada ubicación de los móviles proveniente de cada celda de las estaciones base. Se realizan los cálculos de la SINR y del *Throughput* para todos los valores de sensibilidad obtenidos. Finalmente se obtienen los parámetros de salida mencionados anteriormente y cuyo fragmento se

muestra en el Código 2.5. El código fuente completo de este archivo se encuentra en el Anexo IX.

```
% Generación de la distribución del Throughput (RATE)
rate_cdf(:,1)=sort(RATE,'ascend');
rate_cdf(:,2)=cumsum(ones(1,n_num_MS(1))./n_num_MS(1));

% Cálculos de E[C] y C*
E_C=sum(RATE./n_num_MS(1));
C_star=(sum(n_num_MS(1)^-1./RATE))^-1;

% Cálculos del 5to y 2do percentil
Fifth_PerCent=spline(rate_cdf(:,2),rate_cdf(:,1),0.05);
Two_PerCent=spline(rate_cdf(:,2),rate_cdf(:,1),0.02);

% Cálculo de la SINR promedio
SINR_prom=sum(SINR./n_num_MS(1));
```

**Código 2.5.** Parámetros de salida del Anexo IX

➤ **ij2xy.m**

Función que se encarga de la conversión de los puntos del plano cartesiano (x,y) a los puntos espaciales (i,j), donde i=x y j es 60 grados relativo a x. El código fuente de este archivo se encuentra en el Anexo X.

➤ **sf\_3gpp.m**

Función que genera el mapa de las distribuciones de Shadow Fading mediante las propiedades de correlación de [46], usando los parámetros de desviación estándar, ubicaciones de los móviles, el número de estaciones base y la distancia de correlación. El código fuente de este archivo se encuentra en el Anexo XI.

➤ **AntGain.m**

Función que calcula la ganancia de la antena transmisora considerando los parámetros espaciales para la estación base [46]. El código fuente de este archivo se encuentra en el Anexo XII.

➤ **GenPathLoss.m**

Función que calcula las pérdidas por trayectoria de acuerdo a la frecuencia de trabajo y al ambiente de propagación utilizando los modelos de propagación Okumura-Hata y Cost 231 Hata. El código fuente de este archivo se encuentra en el Anexo XIII.

➤ **pol2rec.m**

Función que convierte vectores de coordenadas polares a coordenadas rectangulares. El código fuente de este archivo se encuentra en el Anexo XIV.

➤ **Percentile.m**

Función que permite graficar la CDF de la capacidad de la celda con el 100% y 10% de la probabilidad, en éste último observándose claramente los valores del segundo y quinto percentil. El código fuente de este archivo se encuentra en el Anexo XV.

**2.3.2.2 Parámetros**

A continuación se describen cada uno de los parámetros que incluye la interfaz de la Figura 2.6.

➤ **Entrada**

En esta simulación son utilizados algunos de los parámetros de entrada de la interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE, y los parámetros adicionales ingresados por el usuario se observan en la Tabla 2.10.







**Tabla 2.10.** Parámetros de entrada adicionales para la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE

| Parámetro en MATLAB | Descripción  | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|--|--|
| bw3dB               | Toma valores en unidades de grados.<br>Su valor está especificado en los <i>datasheets</i> de las antenas a ser empleadas.         | Ancho Haz Antena a 3dB <input type="text" value="0"/> grados   |
| FB                  | Toma valores en unidades de decibelio (dB).<br>Su valor está especificado en los <i>datasheets</i> de las antenas a ser empleadas. | Relación Frente Atrás Antena <input type="text" value="0"/> dB |
| MS                  | Toma valores del número de usuarios.   | Número Usuarios <input type="text" value="0"/>                 |
| d_km                | Toma valores en unidades de kilómetros (km).<br>Su valor es obtenido del simulador PLANF_COBERTURA_CAP_LTE.                        | Distancia máx Enlace <input type="text" value="0"/> km         |

➤ **Salida**

La Tabla 2.11 muestra los parámetros de salida que resultan de la simulación MONTE CARLO utilizando los parámetros de entrada antes mencionados.

**Tabla 2.11.** Parámetros de salida para la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE

| Parámetro en MATLAB | Descripción   | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|---|--|
| E_C                 | Se muestra la media aritmética de la capacidad en la celda en unidades de megabits por segundo (Mbps).                            |    |
| C_star              | Se muestra la media armónica de la capacidad en la celda en unidades de megabits por segundo (Mbps).                              |    |
| Two_PerCent         | Se muestra el valor de la tasa de datos en unidades de megabits por segundo (Mbps) por debajo del cual cae el 2% de los datos.    |    |
| Fifth_PerCent       | Se muestra el valor de la tasa de datos en unidades de megabits por segundo (Mbps) por debajo del cual cae el 5% de los datos.    |    |
| SINR_prom           | Se muestra el valor de la relación señal a interferencia más ruido en unidades de decibelio (dB).                                 |   |
| axes 1 y 2          | Se muestran dos curvas de la CDF de la capacidad de la celda, correspondientes al 100% y 10% de la probabilidad, respectivamente. |  |

## 2.4 Diseño del Simulador de Capacidad LTE

### 2.4.1 Descripción

Este programa de simulación desarrollado en Matlab estima mediante cálculos la capacidad de una celda y del sistema en total, el cual cubre con la demanda total de datos durante la hora pico.

Los cálculos de la capacidad de la celda comienzan a partir del 2do percentil de la distribución del *Throughput*, el mismo que debe ser mayor a la tasa de datos en el borde de la celda especificada por el usuario, satisfaciendo de esta manera el primer requerimiento de la red.

A través de los parámetros de salida de la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE, tales como la media aritmética y la media armónica, y mediante las métricas de rendimiento (*Flow-Average Throughput* y *Call-Average Throughput*) del modelo de tráfico M/G/1 PS, se procede al cálculo de la capacidad de una de las celdas del sistema, con lo que consecuentemente se obtiene la capacidad de la estación base LTE y finalmente la capacidad del sistema, con el requerimiento de que la misma abastezca a la demanda total durante la hora pico, caso contrario, el programa realiza los cálculos respectivos de un nuevo diámetro de la celda para satisfacer la demanda, y consecuentemente recalcula la métrica de rendimiento del modelo de tráfico utilizado, todo esto se observa en el fragmento del Código 2.6.

```

if c_sys < d_total_BH % capacidad sistema < demanda total
    sig=questdlg('Cap del sistema menor a demanda total en hora pico.
¿Recalcular dist. máx del enlace?', 'ATENCIÓN', 'Aceptar', 'Cancelar');

    % recálculos
    n_bs_n = ceil(d_total_BH/c_bs); % nuevo # de eNB
    a_km2_n = a_T/n_bs_n; % nueva área de eNB
    d_km_n = sqrt((8*a_km2_n)/(9*sqrt(3))); % nueva distancia enlace

else capacidad sistema > demanda total
    c_cell_n = d_total_BH/(3*n_bs); % capacidad de la celda
    if n_load > 0.85 % Flow average throughput
        perf_n = En*(1-c_cell_n/Cn);
    else % Call average throughput
        syms x
        perf_n = double(solve(x-En*((Cn-
c_cell_n)/c_cell_n)*log(Cn/(Cn-c_cell_n)),x));
    end
end
end

```

**Código 2.6.** Capacidad del sistema frente a la demanda total del Anexo XVII

### 2.4.2 Funcionamiento

A esta tercera parte de la simulación se accede luego de hacer clic en el botón verde (Capacidad LTE) de la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE, donde se presenta la última interfaz de este Trabajo de Titulación llamada **CAP\_LTE**, la misma que se muestra en la Figura 2.7, y a través de la cual el usuario puede ingresar los parámetros de entrada de tráfico requeridos para llegar al objetivo de esta simulación.

Entre los parámetros de entrada se tienen tres parámetros que fueron obtenidos de entre los resultados de la anterior interfaz, tales como la media aritmética del *Throughput* en la celda, la media armónica del *Throughput* en la celda y el 2do percentil. Los parámetros propios de esta interfaz corresponden al *Throughput* promedio por usuario, el porcentaje



del tráfico diario durante la hora pico, la demanda mensual del usuario, y finalmente, el área total de cobertura del sistema.

Al igual que en las anteriores simulaciones, esta interfaz también cuenta con un botón amarillo (Calcular) cuyo proceso arranca a partir del archivo *capacidad\_lte.m*, a través del cual entrega los parámetros de salida tales como la capacidad de la celda, estación base y sistema, además del número de estaciones base, celdas, sus áreas respectivas, la demanda mensual del usuario y la total durante la hora pico, así también como el cálculo de un nuevo *Throughput* promedio por usuario (si se recalculan los parámetros para cubrir la demanda durante la hora pico), y una nueva distancia máxima del enlace, de ser el caso.

Para salir del programa y terminar con la simulación, se lo hace a través del botón verde (Salir). El código fuente para el desarrollo de esta interfaz se encuentra en el Anexo XVI.

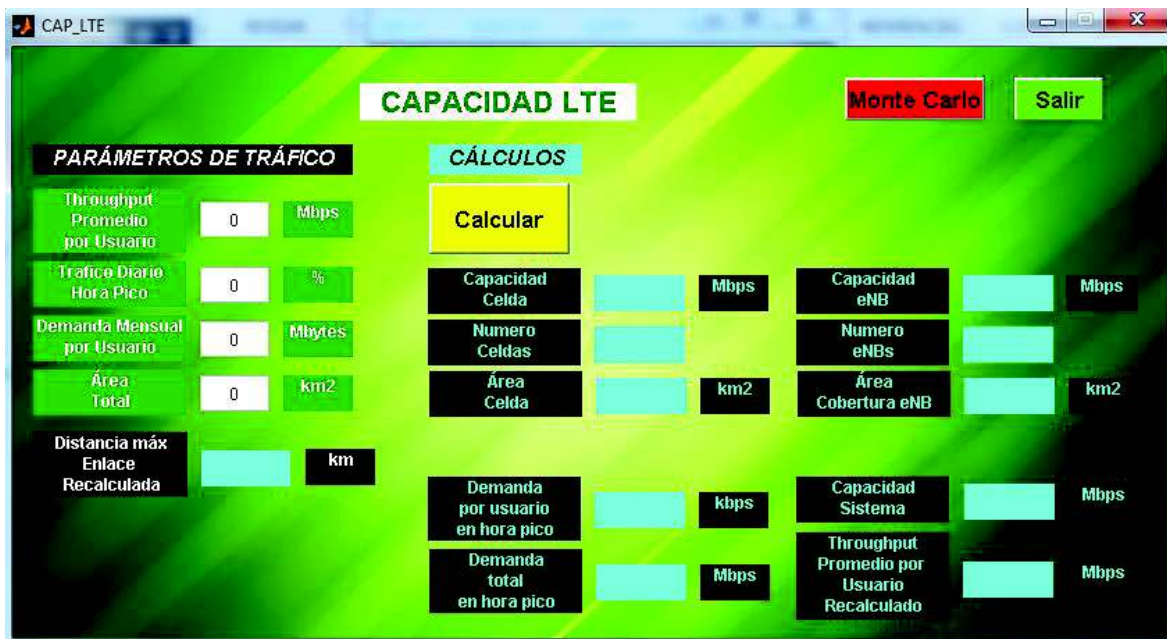


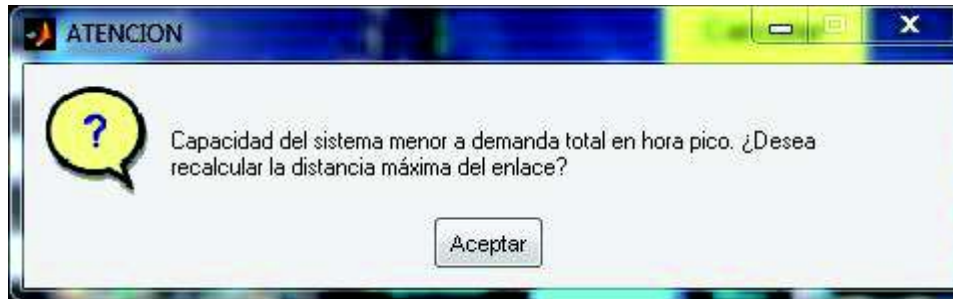
Figura 2.7. Interfaz CAP\_LTE

Para el caso en que el 2do Percentil, obtenido del simulador MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE, sea menor al *Throughput* en el borde de la celda en el simulador PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE, se mostrará el mensaje de la Figura 2.8. De ser este el caso se deberían cambiar parámetros de la interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE con el objetivo de cumplir con este requerimiento del sistema.



**Figura 2.8.** Notificación del simulador de incumplimiento con los requerimientos del sistema en el borde de la celda

Además, de presentarse el caso en el que la capacidad del sistema calculada por el simulador sea menor a la demanda total durante la hora pico, se mostrará el mensaje de la Figura 2.9, el cual indica que se procederá a recalcular la distancia máxima del enlace con el fin de cumplir con los requerimientos de la red.



**Figura 2.9.** Notificación del simulador de incumplimiento con los requerimientos de capacidad del sistema

Luego de hacer clic en el botón gris (Aceptar), el programa calcula una nueva distancia del enlace entre el móvil y la estación base, la misma que permitiría abastecer la demanda total durante la hora pico. Con la nueva distancia calculada, se procede a recalcular los parámetros de salida de la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE, y a partir de los cuales se vuelve a calcular la capacidad del sistema en la interfaz CAP\_LTE, con la garantía de que esta vez la demanda total durante la hora pico ya será cubierta.

Para esta simulación las entradas ingresadas por el usuario deben ser valores numéricos válidos, caso contrario se presentará la ventana de error de la Figura 2.5.

### 2.4.2.1 Archivo .m

Para la tercera parte de la simulación se utiliza el archivo descrito a continuación:

#### ➤ capacidad\_lte.m

Este archivo de programación permite calcular los parámetros de salida mencionados anteriormente, verificando que se cumplan con los requisitos de la red tales como el valor mínimo del *Throughput* en el borde de la celda y que la capacidad del sistema cubra con la demanda total durante la hora pico. Tras los procesos respectivos con los parámetros de tráfico ingresados por el usuario, finalmente se obtienen valores de las capacidades de la celda, la estación base y el sistema, cuyo fragmento se muestra en el Código 2.7. Con el fin de cumplir con los requisitos mencionados, el programa es capaz de recalculer los valores de la distancia máxima del enlace para cumplir con la demanda requerida. El código fuente completo de este archivo se encuentra en el Anexo XVII.

```
% capacidad celda (M/G/1 PS)
if n_load > 0.85 % flow average throughput
    c_cell = Cn*(1-(perf)/En);
else % call average throughput
    syms x
    c_cell = double(solve(perf-En*((Cn-x)/x)*log(Cn/(Cn-x)),x));
end

% capacidad estación base
c_bs = 3*c_cell;

% capacidad sistema
c_sys = c_bs*n_bs;
```

**Código 2.7.** Capacidad celda, estación base y sistema del Anexo XVII





### 2.4.2.2 Parámetros

A continuación se describen cada uno de los parámetros que incluye la interfaz de la Figura 2.7.

#### ➤ Entrada

La Tabla 2.12 muestra los parámetros de entrada a ser ingresados por el usuario.






**Tabla 2.12.** Parámetros de entrada para la interfaz CAP\_LTE

| Parámetro en MATLAB | Descripción   | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|---|--|
| perf                | Toma valores en unidades de megabits por segundo (Mbps).<br>Depende de la tasa de datos objetivo que se desee que alcance el usuario. |  |
| T_BH                | Toma valores en unidades porcentuales (%).<br>Generalmente está entre el 10 y 20% [53].   |  |
| D_M                 | Toma valores en unidades de megabytes (Mbytes).<br>Depende de la demanda de los usuarios en la región donde se encuentren.            |  |
| a_T                 | Toma valores en unidades de kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> ).<br>Depende del área al que se quiera ofrecer el servicio.        |  |







➤ **Salida**

Las Tablas 2.13 y 2.14 muestran los parámetros de salida que resultan de esta simulación a partir de los parámetros de entrada antes mencionados.

**Tabla 2.13.** Parámetros de salida para la interfaz CAP\_LTE (Parte I)

| Parámetro en MATLAB | Descripción   | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|---|--|
| c_cell              | Se muestra la capacidad de la celda hexagonal en unidades de megabits por segundo (Mbps). |  |
| n_cell              | Se muestra el número de celdas resultantes.   |  |
| a_km2_cell          | Se muestra el área de la celda en unidades de kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> ).    |  |
| c_bs                | Se muestra la capacidad de la estación base en unidades de megabits por segundo (Mbps).   |  |
| n_bs                | Se muestra el número de estaciones base resultantes.                                      |  |

**Tabla 2.14.** Parámetros de salida para la interfaz CAP\_LTE (Parte II)

| Parámetro en MATLAB | Descripción  | Elemento en Interfaz   |
|---------------------|--|--|
| a_km2_bs            | Se muestra el área de cobertura de la estación base en unidades de kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> ).                |  |
| d_user_BH           | Se muestra la demanda mensual por usuario durante la hora pico en unidades de kilobits por segundo (kbps).                 |  |
| d_total_BH          | Se muestra la demanda total del sistema durante la hora pico en unidades de megabits por segundo (Mbps).                   |  |
| c_sys               | Se muestra la capacidad del sistema LTE en unidades de megabits por segundo (Mbps).  |  |
| perf_n              | Se muestra la tasa de datos objetivo recalculado que el usuario puede alcanzar en unidades de kilobits por segundo (kbps). |  |
| d_km_n              | Se muestra la distancia máxima del enlace recalculada provista por la estación base en unidades de kilómetros (km).        |  |

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se realizan pruebas con los simuladores descritos anteriormente y se analizan los resultados a partir de tablas y gráficos que permitan observar las variaciones al trabajar con diferentes parámetros como el ancho de banda y la carga, utilizando distintos escenarios y bandas de frecuencia.

En la sección 2.1 se explicaron los valores que podrían tomar cada uno de los parámetros de entrada del presupuesto de enlace y de tráfico, así también como el modelo de propagación adecuado para cada banda de frecuencia.

A continuación se presentan las simulaciones utilizando distintos ambientes de propagación como son metropolitano, urbano, suburbano y rural, evaluando de esta manera la funcionalidad del software bajo distintos parámetros y escenarios.

Posteriormente se presenta el análisis de los resultados a partir del tamaño de la celda, Throughput promedio por usuario y capacidad de la celda, para los escenarios descritos arriba.

Para la planificación de la cobertura y capacidad de la celda LTE, se utilizan parámetros reales para la antena transmisora, en este caso haciendo uso de la antena sectorial SBNHH-1D65B, cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo XVIII.

#### 3.1. Parámetros de Diseño

En esta sección se detallan los parámetros de prueba utilizados en los escenarios de simulación, los cuales fueron obtenidos de [10], [12], [46], [47] y [53].

##### ➤ Estación Base

- Potencia de transmisión de la antena sectorial: 46dBm para casi todos los escenarios y 40dBm para el escenario rural, por ser un ambiente de pocas pérdidas y de no requerir potencias demasiado altas.
- Ganancia de la antena: ver en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1.** Ganancias de la antena SBNHH-1D65B para distintas bandas de frecuencia

| Banda de Frecuencia (MHz) | Ganancia (dBi) |
|---------------------------|----------------|
| 700                       | 14.9           |
| 1900                      | 18.2           |

- Pérdidas conectores: 0.5 dB
- Altura de la antena: 30 metros de acuerdo a los requisitos de los modelos de propagación y 20 metros para el escenario rural, por ser un ambiente de pocas pérdidas y de no requerir alturas demasiado altas.
- Ancho del haz de la antena a media potencia: ver en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2.** Ancho del haz de la antena SBNHH-1D65B a media potencia para distintas bandas de frecuencia

| Banda de Frecuencia (MHz) | Ancho Haz (grados) |
|---------------------------|--------------------|
| 700                       | 68                 |
| 1900                      | 66                 |

- Relación frente-atrás de la antena: ver en la Tabla 3.3

**Tabla 3.3.** Relación frente-atrás de la antena SBNHH-1D65B para distintas bandas de frecuencia

| Banda de Frecuencia (MHz) | Relación frente-atrás (dB) |
|---------------------------|----------------------------|
| 700                       | 27                         |
| 1900                      | 28                         |

➤ **Móvil**

- Ganancia de la antena: 0 dBi
- Pérdidas conectores: 0 dB
- Altura de la antena: 1.5 m
- Figura de ruido: 9 dB

- *Throughput* en el borde de la celda: 520 kbps, *Throughput* mínimo considerado en [54], usando 12 RB asignados y una modulación QPSK ( $I_{TBS} = 2$ ) según el Anexo II.

- Resource Blocks asignados: 12

➤ **Canal**

- Ancho de banda del sistema: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz
- Temperatura: 17 °C
- Probabilidad de cobertura en el borde de la celda: ver en la Tabla 3.4

**Tabla 3.4.** Probabilidad de cobertura dependiente del medio de propagación [55]

| Ambiente de propagación | Probabilidad cobertura borde celda (%) |
|-------------------------|--|
| Metropolitano           | 87                                     |
| Urbano                  | 86                                     |
| Suburbano               | 85                                     |
| Rural                   | 71                                     |

- Desviación estándar: 8 dB
- Pérdidas por penetración: ver en la Tabla 3.5

**Tabla 3.5.** Pérdidas por penetración dependiente del medio de propagación y banda de frecuencia [55]

| Ambiente            | Pérdidas por penetración (dB) |                        |
|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| Banda de frecuencia | 700MHz                        | 1700/1800/1900/2100MHz |
| Metropolitano       | 17                            | 20                     |
| Urbano              | 14                            | 17                     |
| Suburbano           | 11                            | 14                     |
| Rural               | 5                             | 8                      |

- Pérdidas por cuerpo: 0 dB

➤ **Parámetros Adicionales**

- Frecuencia: 700 MHz (banda 12, 13, 14 y 17) y 1900 MHz (banda 2)
- Tipo de área: Metropolitana, urbana, suburbana y rural



- Tipo de ciudad: Grande y mediana-pequeña
- Número de usuarios y superficie total: ver en la Tabla 3.6

**Tabla 3.6.** Número estimado de usuarios LTE (para una operadora) y superficie de parroquias de Pichincha de acuerdo al ambiente de propagación [56], [57]

| Tipo de ambiente | Parroquia  | Población | Densidad de Líneas Activas (88.01%) | Usuarios LTE Estimados (11% densidad) | Superficie Aproximada por Parroquia (km <sup>2</sup> ) |
|------------------|------------|-----------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Metropolitana    | Quito      | 1'607,734 | 1'414,967                           | 150,000                               | 372  |
| Urbana           | Sangolquí  | 75,080    | 66,078                              | 7,300                                 | 57   |
| Suburbana        | Cayambe    | 50,829    | 44,735                              | 4,900                                 | 382  |
| Rural            | El Quinche | 16,056    | 14,131                              | 1,500                                 | 215  |

#### ➤ Parámetros de Tráfico

- *Throughput* promedio por usuario: 1 Mbps, describe la métrica del *Throughput* promedio que un usuario desee alcanzar y es representada por  $\theta$  o  $\Phi$  según la carga.
- Tráfico diario durante la hora pico: 10 %
- Demanda mensual por usuario: 1500 Mbytes

## 3.2. Escenario I: Simulación Ambiente Metropolitano

### 3.2.1 Definición del Escenario

En este escenario se utilizan los parámetros adecuados para el ambiente metropolitano de ejemplo (Quito), que se encuentra caracterizado por una alta concentración de casas, edificios y vehículos, y cuyos cálculos se realizan a partir de las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz para un tipo de ciudad grande.

### 3.2.2 Resultados de la Simulación

En primer lugar se presenta un ejemplo de cálculo de los resultados para el primer escenario. En la Figura 3.1 se observan los resultados obtenidos de la planificación de cobertura tales como la distancia máxima del enlace entre el eNB y el UE de 5.412 km, la distancia entre eNBs de 8.118 km y el área de la celda de 19.025 km<sup>2</sup>, usando un ancho de banda de 1.4 MHz y una carga del 100%, para la banda de 700 MHz.



Figura 3.1. Interfaz de PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE con parámetros de ejemplo

En la Figura 3.2 se observan los resultados obtenidos de la simulación Monte Carlo. Los valores de la media aritmética  $E[C]$  y la media armónica  $C^*$  son utilizados en el simulador CAP\_LTE, mientras que los gráficos que se observan representan la CDF de la capacidad de la celda con el 100% y 10% de la probabilidad, respectivamente, notándose que el segundo percentil toma un valor de 616 kbps; es decir, se asegura que el 98% de los usuarios alcancen un *Throughput* mayor a este, o en otras palabras, que más del 98% de los usuarios superen el *Throughput* establecido en el borde de la celda de 520 kbps. También se obtiene la SINR promedio de todos los usuarios en la celda, cuyo valor es 4.392 dB.

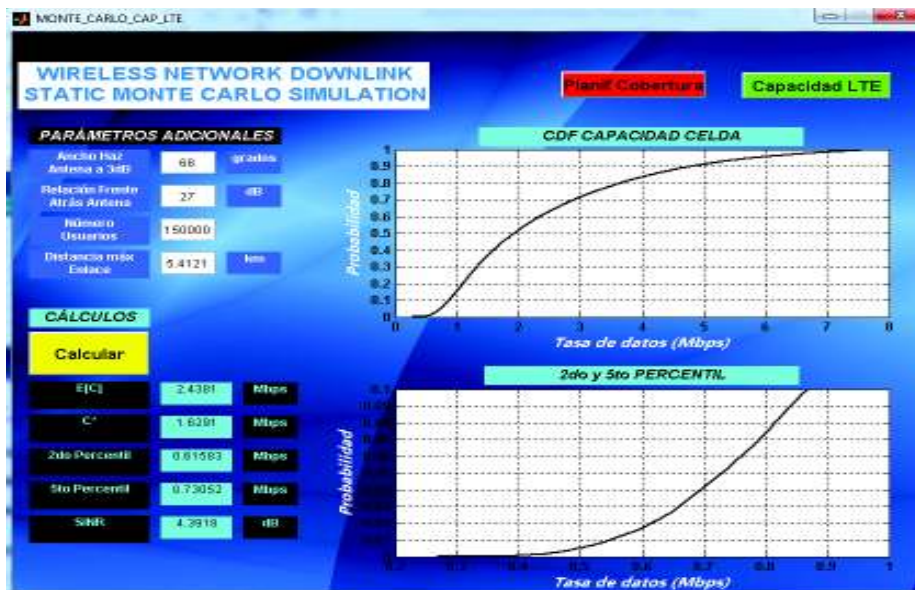


Figura 3.2. Interfaz de MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE con parámetros de ejemplo

Para los cálculos de la capacidad de la celda, se toman en cuenta las métricas de rendimiento para el modelo de tráfico M/G/1 PS, tales como  $\theta$  (cargas menores al 85%) y  $\Phi$  (cargas mayores al 85%) tal como se explicó en la sección 1.3.3.3.

Para este ejemplo se utiliza una carga del 100% y un Throughput promedio por usuario de 1 Mbps, y mediante la Ecuación 1.15 se calcula la capacidad de la celda:

$$\Phi = E[C](1 - \rho)$$

Reemplazando  $\rho = \frac{\lambda s}{C^*}$

$$\Phi = E[C]\left(1 - \frac{\lambda s}{C^*}\right)$$

Despejando  $\lambda s$

$$\lambda s = C^* * \left(1 - \frac{\Phi}{E[C]}\right)$$

Reemplazando los valores obtenidos del simulador MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE:

$$\lambda s = 1.629 M * \left(1 - \frac{1 M}{2.438 M}\right) = 0.961 Mbps$$

Resultando en una capacidad de la celda de 0.961 Mbps.

La capacidad de la estación base viene dado por:

$$\lambda s_{eNB} = 3 * \lambda s = 3 * 0.961 M = 2.882 Mbps$$

El área de la estación base y la celda se obtienen a través de:

$$A_{eNB} = \frac{9\sqrt{3}}{2} \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{9\sqrt{3}}{2} \left(\frac{5.412}{2}\right)^2 = 57.075 km^2$$

$$A_{cell} = \frac{A_{eNB}}{3} = 19.024 km^2$$

El número de estaciones base y celdas se obtiene a través de:

$$N_{eNB} = \frac{A_{total}}{A_{eNB}} = \frac{372 km^2}{57.075 km^2} = 6.52 \approx 7$$

$$N_{cell} = \frac{A_{total}}{A_{cell}} = \frac{372 km^2}{19.024 km^2} = 19.55 \approx 20$$

La capacidad del sistema finalmente se calcula a través de:

$$\lambda s_{sys} = \lambda s_{eNB} * N_{eNB} = 2.882 M * 7 = 20.178 Mbps$$

A continuación se calcula la demanda total para el tráfico Downlink durante la hora pico  $D_{TBH}$ , conociendo que la demanda mensual por usuario  $D_m$  es de 1500 Mbytes, tal como se estableció anteriormente. En primer lugar se considera que el tráfico Downlink ocupa un 80% del tráfico total, y que un mes está conformado por 30 días, por lo que la demanda diaria  $D_d$  se calcula:

$$D_d = \frac{D_m}{30} * 0.8 = \frac{1500 M}{30} * 0.8 = 40 Mbytes$$

Además se estableció que la demanda de tráfico por usuario durante la hora pico  $D_{BH}$  ocupa un 10% del tráfico diario, por lo que:

$$D_{BH} = D_d * 0.1 = 40 M * 0.1 = 4 Mbytes$$

Ahora haciendo la conversión a bits y a segundos se tiene:

$$D_{BH} = 4M * \frac{8bits}{3600seg} = 8.888 kbps$$

Finalmente se calcula la demanda total durante la hora pico  $D_{TBH}$  conociendo el número de usuarios  $N_{users}$ , siendo 150,000 para este escenario:

$$D_{TBH} = D_{BH} * N_{users} = 8.888k * 150,000 = 1,333.333 Mbps \approx 1.333 Gbps$$

En la Figura 3.3 se presentan los resultados calculados anteriormente, donde se observa que la capacidad del sistema 20.177 Mbps no satisface la demanda total durante la hora pico de 1.333 Gbps, por lo que se procede a recalcular varios parámetros, de entre ellos la distancia máxima del enlace, la misma que entrega el simulador y cuyos cálculos se describen más adelante.



Figura 3.3. Interfaz de CAP\_LTE con parámetros de ejemplo

Para satisfacer la demanda total en la hora pico se debe incrementar el número de celdas, por lo que la distancia del enlace y la distancia entre estaciones base serán distintas. Estos datos se recalculan de la siguiente manera:

Nuevo número de estaciones base en función de la demanda:

$$N_{eNB} = \frac{D_{TBH}}{\lambda S_{eNB}} = \frac{1.333 \text{ G}}{2.882 \text{ M}} = 463.642 \approx 464$$

Nueva área de la estación base:

$$A_{eNB} = \frac{A_{total}}{N_{eNB}} = \frac{372 \text{ km}^2}{464} = 0.803 \text{ km}^2$$

Distancia del enlace entre el móvil y la estación base recalculada:

$$d = \sqrt{\frac{A_{eNB} * 8}{9\sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{0.803 * 8}{9\sqrt{3}}} = 0.642 \text{ km}$$

Con esta nueva distancia, mostrada además en la interfaz de la Figura 3.3 (en el cuadro rojo), se recalculan los parámetros de la media aritmética y armónica en el simulador MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE, obteniendo los resultados de la Figura 3.4, y a partir de los cuales se obtienen los cálculos finales de la capacidad en la Figura 3.5

| CÁLCULOS      |         |      |
|---------------|---------|------|
| Calcular      |         |      |
| E[C]          | 2.4198  | Mbps |
| C*            | 1.7573  | Mbps |
| 2do Percentil | 0.7359  | Mbps |
| 5to Percentil | 0.85081 | Mbps |
| SINR          | 3.9373  | dB   |

**Figura 3.4.** Resultados de la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE con parámetros recalculados

Con los nuevos parámetros se realizan los mismos cálculos vistos anteriormente a partir de la Ecuación 1.15, presentando los resultados en la Figura 3.5, donde se observa que la capacidad del sistema se incrementa a 1,435.299 Mbps debido al incremento significativo del número de estaciones base a 464, con lo que la demanda total queda cubierta.



**Figura 3.5.** Cálculos en la interfaz de CAP\_LTE con distancia máxima de enlace recalculada

Ya que se obtuvieron nuevos parámetros, se procede además a recalculer la métrica del *Throughput* promedio alcanzada por un usuario durante la hora pico, para lo cual primero se determina la capacidad de la celda basada en el número de estaciones base y la demanda total:

$$\lambda_s = \frac{D_{T_{BH}}}{3 * N_{eNB}} = \frac{1333.333 M}{3 * 464} = 0.958 Mbps$$

$$\Phi = E[C] \left(1 - \frac{\lambda_s}{C^*}\right) = 2.419 M * \left(1 - \frac{0.958 M}{1.757 M}\right) = 1.101 Mbps$$

Obteniendo un nuevo *Throughput* promedio por usuario que supera al establecido de 1 Mbps.

El valor de la eficiencia descrito en las siguientes tablas, simplemente fue calculado como la relación entre la capacidad de la celda frente al ancho de banda utilizado.

A continuación, en la Tabla 3.7 se presentan los resultados obtenidos de los simuladores para las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz considerando una ciudad grande, y en donde se observan los distintos valores que pueden tomar varios parámetros a partir de la variación del ancho de banda disponible para LTE con una carga del 100% de la celda.

**Tabla 3.7.** Resultados para el primer escenario con una carga del 100% de la celda utilizando las bandas de 700 MHz y 1900 MHz

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | SINR (dB) | Distancia Máxima Enlace (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) |
|-------------------------------|----------------------|-----------|------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 700                           | 1.4                  | 4.392     | 5.412                        | 0.961                  | 7          | 20.179                   | 0.686                               |
|                               | 3                    | 4.31      | 4.99                         | 2.78                   | 8          | 66.715                   | 0.927                               |
|                               | 5                    | 4.18      | 4.509                        | 4.921                  | 10         | 147.626                  | 0.984                               |
|                               | 10                   | 3.903     | 3.813                        | 9.991                  | 14         | 419.635                  | 0.999                               |
|                               | 15                   | 3.707     | 3.429                        | 14.677                 | 17         | 748.523                  | 0.978                               |
|                               | 20                   | 3.445     | 3.174                        | 18.902                 | 19         | 1077.437                 | 0.945                               |
| 1900                          | 1.4                  | 4.514     | 1.881                        | 0.98                   | 54         | 158.702                  | 0.700                               |
|                               | 3                    | 4.444     | 1.734                        | 2.828                  | 64         | 542.885                  | 0.943                               |
|                               | 5                    | 4.173     | 1.567                        | 4.838                  | 78         | 1131.986                 | 0.968                               |
|                               | 10                   | 3.79      | 1.325                        | 10.635                 | 109        | 3477.767                 | 1.064                               |
|                               | 15                   | 3.641     | 1.191                        | 14.576                 | 135        | 5903.381                 | 0.972                               |
|                               | 20                   | 3.323     | 1.103                        | 18.593                 | 157        | 8757.424                 | 0.930                               |

Tomando como referencia la Tabla 3.7, se observa que solamente para los anchos de banda de 10, 15 y 20 MHz de la banda de 1900 MHz, la capacidad del sistema cubre con la demanda total de 1.333 Gbps; sin embargo, para los anchos de banda restantes, es necesario recalcular la distancia del enlace (diámetro de la celda) a través del simulador para abastecer dicha demanda, obteniendo como resultado la Tabla 3.8. Cabe mencionar que para todos los anchos de banda de la Tabla 3.7 se alcanza un *Throughput* promedio por usuario de 1000 kbps, establecido como parámetro de entrada.

**Tabla 3.8.** Correcciones de la Tabla 3.7 para anchos de banda que no cubren la demanda

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | Distancia Enlace Recalculada (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) | Throughput Promedio por Usuario Recalculado (Mbps) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|--|
| 700                           | 1.4                  | 0.642                             | 1.031                  | 464        | 1435.3                   | 0.736                               | 1.101  |
|                               | 3                    | 1.092                             | 2.829                  | 161        | 1366.615                 | 0.943                               | 1.101  |
|                               | 5                    | 1.456                             | 5.226                  | 91         | 1426.493                 | 1.045                               | 1.477  |
|                               | 10                   | 2.06                              | 11.057                 | 46         | 1525.084                 | 1.106                               | 3  |
|                               | 15                   | 2.482                             | 16.382                 | 32         | 1572.333                 | 1.092                               | 4.577  |
|                               | 20                   | 2.8811                            | 20.686                 | 23         | 1427.257                 | 1.034                               | 3.317  |
| 1900                          | 1.4                  | 0.65                              | 1.057                  | 452        | 1433.954                 | 0.731                               | 1.1  |
|                               | 3                    | 1.103                             | 2.872                  | 158        | 1361.498                 | 0.974                               | 1.077  |
|                               | 5                    | 1.481                             | 5.163                  | 88         | 1363.644                 | 1.033                               | 1.323  |

A continuación en la Tabla 3.9 se presentan los resultados de distintos parámetros, incluyendo la distancia entre estaciones base ISD, en función de la carga de la celda, utilizando un ancho de banda fijo de 10 MHz para las bandas de 700 MHz y 1900 MHz.

**Tabla 3.9.** Resultados para el primer escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz

| Frecuencia de operación (MHz) | Carga de la Celda (%) | Distancia Máxima Enlace (km) | ISD (km) | Capacidad Celda (Mbps) | Nº de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Demanda total (Mbps) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------|------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| 700                           | 25                    | 3.867                        | 5.8      | 10.79                  | 13         | 420.793                  | 333.333              |
|                               | 50                    | 3.849                        | 5.773    | 10.656                 | 13         | 415.58                   | 666.667              |
|                               | 75                    | 3.831                        | 5.746    | 10.637                 | 14         | 446.754                  | 1000                 |
|                               | 100                   | 3.813                        | 5.719    | 9.991                  | 14         | 419.635                  | 1,333.33             |
| 1900                          | 25                    | 1.343                        | 2.015    | 11.404                 | 106        | 3626.472                 | 333.333              |
|                               | 50                    | 1.337                        | 2.006    | 11.068                 | 107        | 3552.952                 | 666.667              |
|                               | 75                    | 1.331                        | 1.997    | 10.725                 | 108        | 3474.947                 | 1000                 |
|                               | 100                   | 1.325                        | 1.987    | 10.635                 | 109        | 3477.767                 | 1,333.33             |

En la Tabla 3.9 se calcula la demanda total de acuerdo a la carga de la celda, teniendo 1.333 Gbps durante la hora pico y 333.333 Mbps al estar 25% cargada de usuarios, observando con esto que la demanda total es abastecida por la capacidad del sistema para una carga ligera del 25% de la banda de 700 MHz, y para toda carga de la banda de 1900 MHz, con sus respectivos *Throughputs* promedio que alcanzará un usuario. Con estos resultados se conoce que es necesario recalculer la distancia del enlace con la cual se cubra principalmente la demanda en la hora pico (100% de carga) para la banda de 700 MHz. En la Tabla 3.10 se presentan los nuevos cálculos para cargas superiores al 25% en dicha banda, además de su respectivo *Throughput* promedio por usuario.

**Tabla 3.10.** Correcciones de la Tabla 3.9 para cargas que no cubren la demanda

| Frecuencia de operación (MHz) | Carga de la Celda (%) | Distancia Enlace Recalculada (km) | ISD (km) | Capacidad Celda (Mbps) | Nº de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Demanda total (Mbps) | Throughput Promedio por Usuario (Mbps) |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------|------------------------|------------|--------------------------|----------------------|--|
| 700                           | 50                    | 3.015                             | 4.523    | 10.656                 | 22         | 703.296                  | 666.667              | 6.165                                  |
|                               | 75                    | 2.482                             | 3.723    | 11.781                 | 32         | 1130.976                 | 1000                 | 5.403                                  |
|                               | 100                   | 2.06                              | 3.09     | 11.057                 | 46         | 1525.866                 | 1,333.33             | 3                                      |



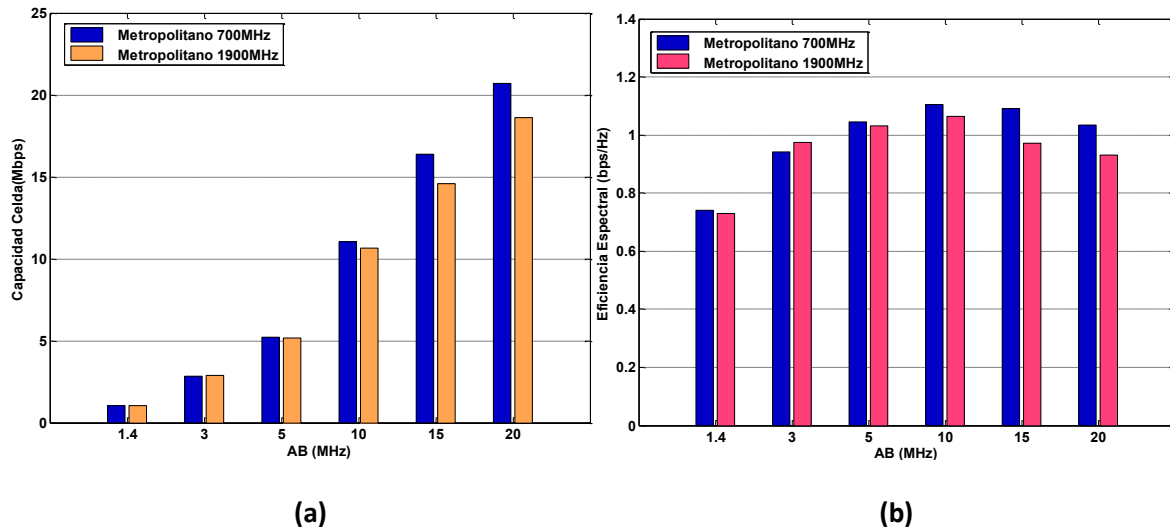
### 3.2.3 Análisis de Resultados

En la Tabla 3.7 se observa que a medida que aumenta el ancho de banda, también se incrementa la capacidad de la celda, notando una disminución de la SINR de 4.392 dB (con 1.4 MHz) a 3.445 dB (con 20 MHz) en la banda de 700 MHz, y de 4.514 dB (con 1.4 MHz) a 3.323 dB (con 20 MHz) en la banda de 1900 MHz, lo cual afecta (disminuye) a la distancia máxima del enlace. Se observa además que la demanda total durante la hora pico (1.333 Gbps), no logra ser cubierta por la capacidad del sistema excepto para los anchos de banda de 10, 15 y 20 MHz de la banda de 1900 MHz.

En la Tabla 3.8 se observa que la capacidad del sistema para cada ancho de banda restante cubre la demanda durante la hora pico. Haciendo referencia a la Tabla 3.7, se considera que el *Throughput* promedio por usuario alcanza una tasa de 1 Mbps; mientras que en la Tabla 3.8, luego de recalcular el *Throughput* promedio para cada ancho de banda, se tiene un valor mínimo de 1.101 y 1.1 Mbps para las bandas de 700 y 1900 MHz, respectivamente, notando bajo estos resultados que se supera el 1 Mbps establecido como parámetro de entrada.

Para lograr un incremento en la capacidad del sistema de cada ancho de banda de la Tabla 3.8, fue necesario calcular una distancia del enlace (diámetro de la celda) menor, de tal forma que las celdas sean más pequeñas y las estaciones base se encuentren más cercanas entre sí, logrando incrementar el número de estaciones base para abastecer la demanda. A partir de esto se obtiene la Figura 3.6, donde se observa la dependencia de (a) la capacidad de la celda y (b) la eficiencia espectral, respecto a cada ancho de banda disponible para LTE, notándose que las mayores tasas de datos (20.686 Mbps para la banda de 700 MHz y 18.593 Mbps para la banda de 1900 MHz) se obtienen a 20 MHz de ancho de banda, y que las mejores eficiencias espectrales (1.106 bps/Hz para 700 MHz y 1.064 bps/Hz para 1900 MHz) se encuentran en 10 MHz. Debido a esta alta eficiencia, el análisis del comportamiento de la capacidad frente a distintas cargas se realiza considerando un ancho de banda de 10 MHz.

Se observa además en la Figura 3.6 que para la banda de 1900 MHz se alcanzan capacidades similares a la banda de 700 MHz hasta un ancho de banda de 5 MHz, a partir del cual empieza a decaer, sucediendo lo mismo con la eficiencia, debido a que la demanda es abastecida para los anchos de banda mayores o iguales a 10 MHz en la banda de 1900 MHz, por lo que no fue necesario incrementar el número de estaciones base ni la capacidad ofrecida por la celda.

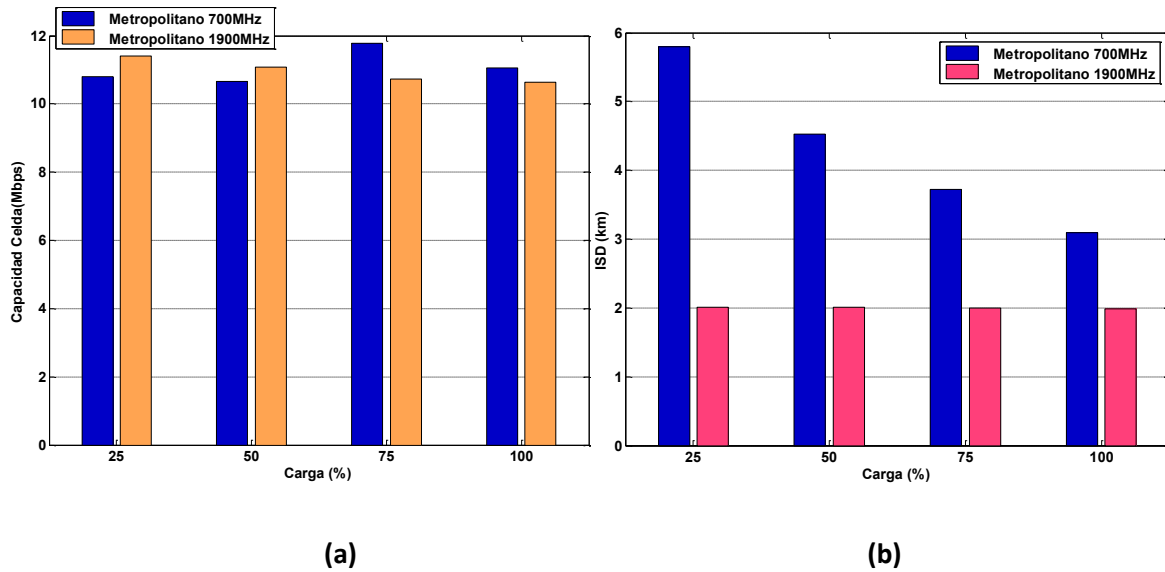


**Figura 3.6.** Capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a variaciones del ancho de banda para cuando se cubre la demanda total en el primer escenario

En la Tabla 3.9 se observa que no se cubre la demanda total para cargas mayores al 25% de la banda de 700 MHz, por lo que es necesario recalculer el diámetro de la celda. Por otro lado, la demanda es cubierta durante la hora pico (100% de carga) en la banda de 1900 MHz, y por ende es también abastecida para el resto de cargas.

En la Tabla 3.10 se presentan las correcciones de los diámetros de la celda y los ISDs que cubran la demanda total, observando que la métrica del *Throughput* promedio por usuario mínimo de 3 Mbps para 700 MHz, y 1 Mbps para 1900 MHz (que no necesitó ser recalculado), cumplen con el *Throughput* promedio por usuario establecido de 1 Mbps.

En la Figura 3.7 se observa cómo cambia (a) la capacidad de la celda y (b) la ISD, en función de la carga. Debido a que los cambios en las distancias máximas de los enlaces son mínimos de una carga a otra (comparado con la variación del ancho de banda), se nota que la capacidad de la celda no presenta una clara tendencia a disminuir o aumentar frente a la carga, reflejando así la variabilidad del canal inalámbrico. Además se tiene una gran diferencia entre ISDs de ambas bandas de frecuencia, esto debido a que a frecuencias bajas se alcanza mayores distancias, ya que las señales a estas frecuencias sufren menos pérdidas por trayectoria. Se observa también una mayor disminución de la ISD mientras aumenta la carga para la banda de 700 MHz comparado con la de 1900 MHz, esto debido a que se recalculó la distancia del enlace para esta banda.



**Figura 3.7.** Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para cuando se cubre la demanda total en el primer escenario

### 3.3. Escenario II: Simulación Ambiente Urbano

#### 3.3.1 Definición del Escenario

Para el escenario del ambiente urbano de ejemplo (Sangolquí), se utilizan los parámetros adecuados para este ambiente, realizando los cálculos respectivos a partir de las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz para un tipo de ciudad mediana-pequeña.

#### 3.3.2 Resultados de la Simulación

En la Tabla 3.11 se presentan los resultados para las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz, en donde se observan los valores que pueden tomar distintos parámetros a partir de las variaciones del ancho de banda, manteniendo fija la carga de la celda.

Para este escenario el número de usuarios a emplearse es de 7,300, por lo que la demanda total durante la hora pico es:

$$D_{TBH} = D_{BH} * N_{users} = 8.888 k * 7,300$$

$$D_{TBH} = 64.889 Mbps$$

**Tabla 3.11.** Resultados para el segundo escenario con una carga del 100% de la celda utilizando las bandas de 700 MHz y 1900 MHz

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | SINR (dB) | Distancia Máxima Enlace (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) |
|-------------------------------|----------------------|-----------|------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 700                           | 1.4                  | 4.7       | 6.713                        | 0.983                  | 1          | 2.95                     | 0.702                               |
|                               | 3                    | 4.656     | 6.19                         | 2.7707                 | 1          | 8.312                    | 0.924                               |
|                               | 5                    | 4.346     | 5.593                        | 4.909                  | 1          | 14.727                   | 0.982                               |
|                               | 10                   | 4.053     | 4.729                        | 10.125                 | 2          | 60.748                   | 1.013                               |
|                               | 15                   | 3.775     | 4.254                        | 14.66                  | 2          | 87.962                   | 0.977                               |
|                               | 20                   | 3.457     | 3.937                        | 18.697                 | 2          | 112.181                  | 0.935                               |
| 1900                          | 1.4                  | 4.63      | 2.845                        | 1.012                  | 4          | 12.144                   | 0.723                               |
|                               | 3                    | 4.51      | 2.623                        | 2.812                  | 5          | 42.182                   | 0.937                               |
|                               | 5                    | 4.313     | 2.37                         | 5.042                  | 6          | 90.718                   | 1.008                               |
|                               | 10                   | 3.977     | 2.004                        | 10.343                 | 8          | 248.227                  | 1.034                               |
|                               | 15                   | 3.715     | 1.803                        | 14.512                 | 10         | 435.356                  | 0.967                               |
|                               | 20                   | 3.654     | 1.669                        | 18.773                 | 11         | 619.497                  | 0.939                               |

Como se observa en la Tabla 3.11, para los anchos de banda de 15 y 20 MHz de la banda de 700 MHz, y para los anchos de banda de 5, 10, 15 y 20 MHz de la banda de 1900 MHz, se asegura que la capacidad del sistema cubre a la demanda total, alcanzando un *Throughput* promedio por usuario de 1 Mbps, tal como se definió en los parámetros de entrada; mientras que para los anchos de banda restantes, es necesario recalculer la distancia del enlace para abastecer dicha demanda, y cuyos valores se presentan en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12.** Correcciones de la Tabla 3.11 para anchos de banda que no cubren la demanda

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | Distancia Enlace Recalculada (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) | Throughput Promedio por Usuario Recalculado (Mbps) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|--|
| 700                           | 1.4                  | 1.153                             | 1.047                  | 23         | 72.243                   | 0.748                               | 1.096  |
|                               | 3                    | 1.912                             | 2.878                  | 9          | 77.706                   | 0.959                               | 1.767  |
|                               | 5                    | 2.419                             | 5.227                  | 5          | 78.405                   | 1.045                               | 2.555  |
|                               | 10                   | 3.123                             | 11.211                 | 4          | 134.717                  | 1.121                               | 9.651  |
| 1900                          | 1.4                  | 1.104                             | 1.06                   | 25         | 79.5                     | 0.757                               | 1.182  |
|                               | 3                    | 1.912                             | 2.905                  | 9          | 78.435                   | 0.968                               | 1.622  |

En la Tabla 3.13 se presentan los valores que toman distintos parámetros a partir de la variación de la carga de la celda, manteniendo fijo el ancho de banda de 10 MHz, y utilizando las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz.

**Tabla 3.13.** Resultados para el segundo escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz

| Frecuencia de operación (MHz) | Carga de la Celda (%) | Distancia Máxima Enlace (km) | ISD (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Demanda total (Mbps) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------|------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| 700                           | 25                    | 4.796                        | 7.194    | 10.328                 | 2          | 61.969                   | 16.222               |
|                               | 50                    | 4.774                        | 7.161    | 11.18                  | 2          | 67.8                     | 32.445               |
|                               | 75                    | 4.7518                       | 7.128    | 10.855                 | 2          | 65.127                   | 48.667               |
|                               | 100                   | 4.729                        | 7.094    | 10.125                 | 2          | 60.748                   | 64.889               |
| 1900                          | 25                    | 2.033                        | 3.050    | 11.118                 | 8          | 266.839                  | 16.222               |
|                               | 50                    | 2.023                        | 3.035    | 10.445                 | 8          | 250.671                  | 32.445               |
|                               | 75                    | 2.014                        | 3.021    | 10.97                  | 8          | 263.285                  | 48.667               |
|                               | 100                   | 2.004                        | 3.006    | 10.343                 | 8          | 248.227                  | 64.889               |

Como se observa en la Tabla 3.13, la demanda total relativa a cada carga es abastecida por la capacidad del sistema para toda carga de la banda de 1900 MHz, con sus respectivos *Throughputs* promedio por usuario; mientras que para la banda de 700 MHz es necesario recalcular la distancia máxima del enlace durante la hora pico (100% de carga), y cuyos resultados se observan en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14.** Correcciones de la Tabla 3.13 para cargas que no cubren la demanda

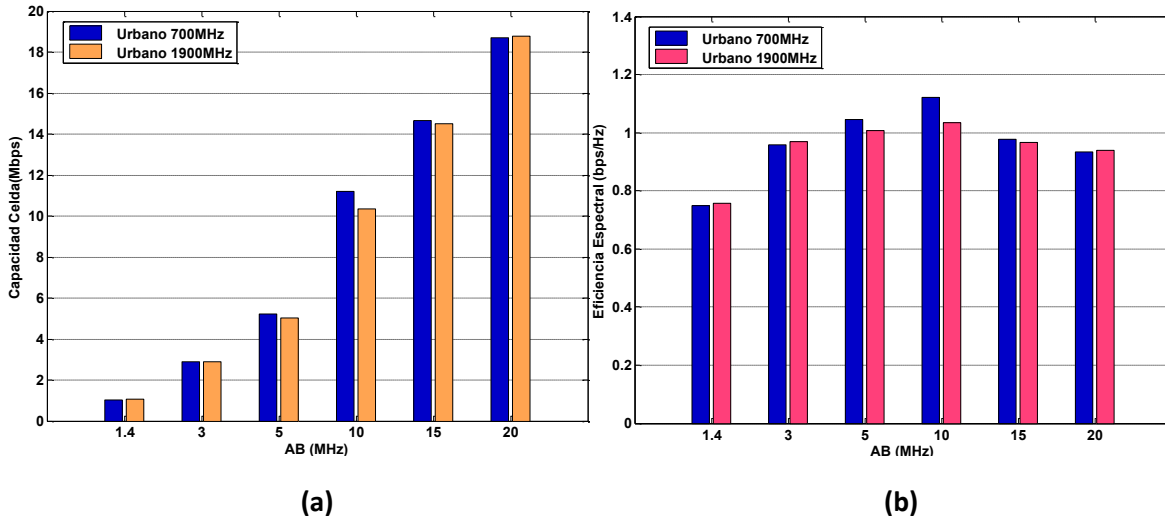
| Frecuencia de operación (MHz) | Carga de la Celda (%) | Distancia Enlace Recalculada (km) | ISD (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Demanda total (Mbps) | Throughput Promedio por Usuario Recalculado (Mbps) |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------|------------------------|------------|--------------------------|----------------------|--|
| 700                           | 100                   | 3.123                             | 4.685    | 11.211                 | 4          | 134.717                  | 64.889               | 9.651  |

### 3.3.3 Análisis de Resultados

Los resultados de la Tabla 3.11 aseguran que la demanda total de 64.889 Mbps será solamente cubierta por los anchos de banda de 15 y 20 MHz en la banda de 700 MHz, y por los anchos de banda mayores o iguales a 5 MHz en la banda de 1900 MHz, notando como disminuye la distancia máxima del enlace conforme aumenta el ancho de banda, ya que también disminuye la calidad del enlace representado por la caída de la SINR de 4.7 dB (con 1.4 MHz) a 3.457 dB (con 20 MHz) para la banda de 700 MHz. Por otro lado, se observa también en la banda de 1900 MHz cómo disminuye la distancia máxima del enlace debido a que la SINR disminuye de 4.63 dB (con 1.4 MHz) a 3.654 dB (con 20 MHz).

Tras las correcciones en la Tabla 3.12 y más los anchos de banda descritos en la Tabla 3.11, se observa que la demanda durante la hora pico es cubierta por la capacidad del

sistema para todos los anchos de banda disponibles, notando además que el *Throughput* promedio mínimo por usuario recalculado de 1.096 Mbps para la banda de 700 MHz y de 1.182 Mbps para la banda de 1900 MHz, superan al establecido de 1 Mbps. Se observa además que las mayores capacidades de la celda, para ambas bandas de frecuencia, se obtienen a 20 MHz, resultando en una capacidad máxima de 18.697 Mbps para 700 MHz y de 18.773 Mbps para 1900 MHz. Además se nota que el incremento en la capacidad del sistema es producido por el aumento de estaciones base que cubren la demanda.

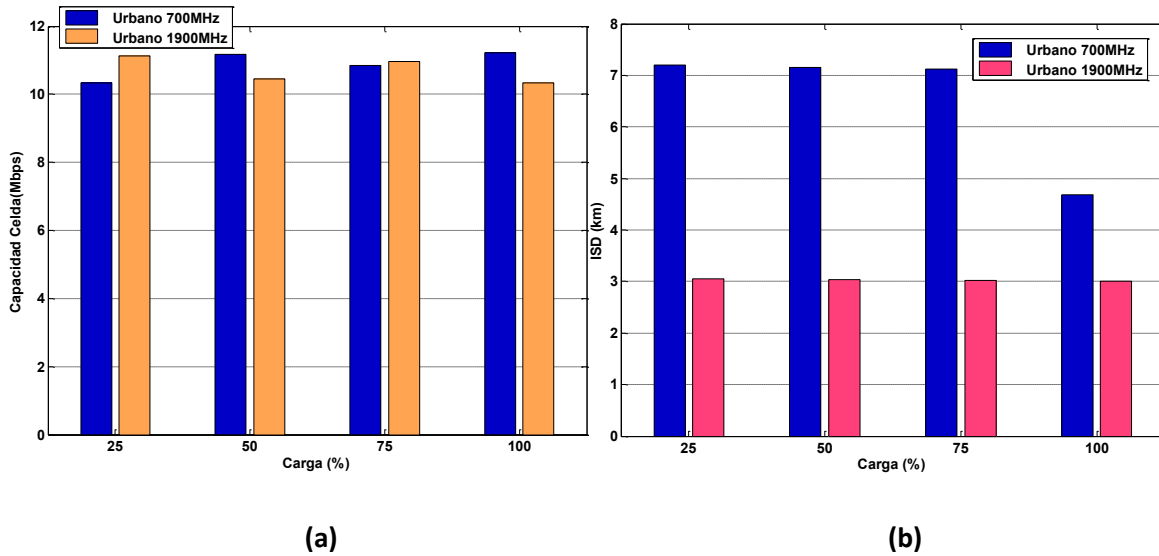


**Figura 3.8.** Capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a variaciones del ancho de banda para cuando se cubre la demanda total en el segundo escenario

En la Figura 3.8 se observa cómo se relaciona (a) la capacidad de la celda y (b) la eficiencia espectral, con el ancho de banda disponible para LTE, notando que dicha capacidad en la banda de 1900 MHz, disminuye en comparación con la banda de 700 MHz usando el ancho de banda de 10 MHz. La razón de esto es porque el diámetro de la celda no fue recalculado para 10 MHz en la banda de 1900 MHz, sucediendo lo contrario en la banda de 700 MHz para este mismo ancho de banda, donde la capacidad se incrementa ligeramente. En cuanto a la eficiencia espectral, se observa que los mejores valores son de 1.121 bps/Hz para 700 MHz y de 1.034 bps/Hz para 1900 MHz, usando un ancho de banda de 10 MHz.

En la Tabla 3.13 se observa que se abastece la demanda total para toda carga menor al 100 % de la banda de 700 MHz, sin embargo, se debe recalculer un nuevo diámetro de la celda durante la hora pico (carga al 100%), visto en la Tabla 3.14, y de esta manera se cubrirá el resto de cargas. En el caso de la banda de 1900 MHz, sí se abastece la demanda para cualquier carga. De estas tablas resulta que los *Throughputs* promedio por usuario corresponden a 1 Mbps para todas las cargas y bandas de frecuencia, a excepción de la

banda de 700 MHz al 100% de carga donde toma un valor de 9.651 Mbps luego de ser recalculado.



**Figura 3.9.** Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para cuando se cubre la demanda total en el segundo escenario

La Figura 3.9 presenta las variaciones de (a) la capacidad de la celda y (b) la ISD, dependiente de la carga. Como en el escenario metropolitano, las variaciones de las distancias máximas de los enlaces de una carga a otra son mínimos, por lo que la capacidad de la celda tampoco presenta una clara tendencia a disminuir o aumentar frente a la carga. De igual manera que en el escenario anterior, se alcanzan mayores distancias a frecuencias bajas, observando además que el ISD disminuye bruscamente al tener 100 % de carga en la banda de 700 MHz, ya que fue recalculada la distancia del enlace para la esta carga.

### 3.4. Escenario III: Simulación Ambiente Suburbano

#### 3.4.1 Definición del Escenario

En este escenario son utilizados los parámetros adecuados para el ambiente suburbano de ejemplo (Cayambe), obteniendo los resultados para las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz en una ciudad grande.

### 3.4.2 Resultados de la Simulación

La Tabla 3.15 presenta los resultados obtenidos utilizando las bandas de 700 MHz y 1900 MHz, donde se observan los valores de varios parámetros a partir de variaciones del ancho de banda con una carga de la celda fija.

**Tabla 3.15.** Resultados para el tercer escenario con una carga del 100% de la celda para las bandas de 700 MHz y 1900 MHz

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | SINR (dB) | Distancia Máxima Enlace (km) | Capacidad Celda (Mbps) | Nº de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) |
|-------------------------------|----------------------|-----------|------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 700                           | 1.4                  | 4.63      | 15.276                       | 0.963                  | 1          | 2.888                    | 0.688                               |
|                               | 3                    | 4.369     | 14.085                       | 2.803                  | 1          | 8.409                    | 0.934                               |
|                               | 5                    | 4.2       | 12.727                       | 4.974                  | 2          | 29.846                   | 0.995                               |
|                               | 10                   | 4.046     | 10.761                       | 10.317                 | 2          | 61.904                   | 1.032                               |
|                               | 15                   | 3.805     | 9.678                        | 14.712                 | 3          | 132.407                  | 0.981                               |
|                               | 20                   | 3.55      | 8.959                        | 18.69                  | 3          | 168.213                  | 0.935                               |
| 1900                          | 1.4                  | 4.708     | 6.374                        | 0.999                  | 5          | 14.992                   | 0.714                               |
|                               | 3                    | 4.576     | 5.877                        | 2.829                  | 6          | 50.919                   | 0.943                               |
|                               | 5                    | 4.458     | 5.31                         | 5.089                  | 7          | 106.869                  | 1.018                               |
|                               | 10                   | 4.14      | 4.49                         | 10.118                 | 10         | 303.535                  | 1.012                               |
|                               | 15                   | 3.817     | 4.039                        | 14.566                 | 13         | 568.053                  | 0.971                               |
|                               | 20                   | 3.514     | 3.738                        | 18.834                 | 15         | 847.542                  | 0.942                               |

En este escenario el número de usuarios es de 4,900, por lo que la demanda total durante la hora pico es:

$$D_{TBH} = D_{BH} * N_{users} = 8.888 k * 4,900$$

$$D_{TBH} = 43.555 Mbps$$

En la Tabla 3.15 se observa que la capacidad del sistema para los anchos de banda de 10, 15 y 20 MHz de la banda de 700 MHz, y los anchos de banda de 3 MHz en adelante de la banda de 1900 MHz, logra abastecer la demanda total, considerando un *Throughput* promedio por usuario de 1 Mbps para todos los casos; mientras que para los anchos de banda que no cubren la demanda, se recalcula la distancia del enlace, mostrando sus resultados en la Tabla 3.16.



**Tabla 3.16.** Correcciones de la Tabla 3.15 para anchos de banda que no cubren la demanda

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | Distancia Enlace Recalculada (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) | Throughput Promedio por Usuario Recalculado (Mbps) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|--|
| 700                           | 1.4                  | 3.615                             | 1.014                  | 15         | 45.63                    | 0.724                               | 1.126  |
|                               | 3                    | 5.716                             | 2.91                   | 6          | 52.38                    | 0.970                               | 1.309  |
|                               | 5                    | 8.084                             | 5.264                  | 3          | 47.376                   | 1.053                               | 1.538  |
| 1900                          | 1.4                  | 3.742                             | 1.016                  | 14         | 42.672                   | 0.726                               | 1.008  |

La Tabla 3.17 presenta los resultados obtenidos a partir de las variaciones de la carga de la celda para las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz con un ancho de banda fijo de 10 MHz.

**Tabla 3.17.** Resultados para el tercer escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz

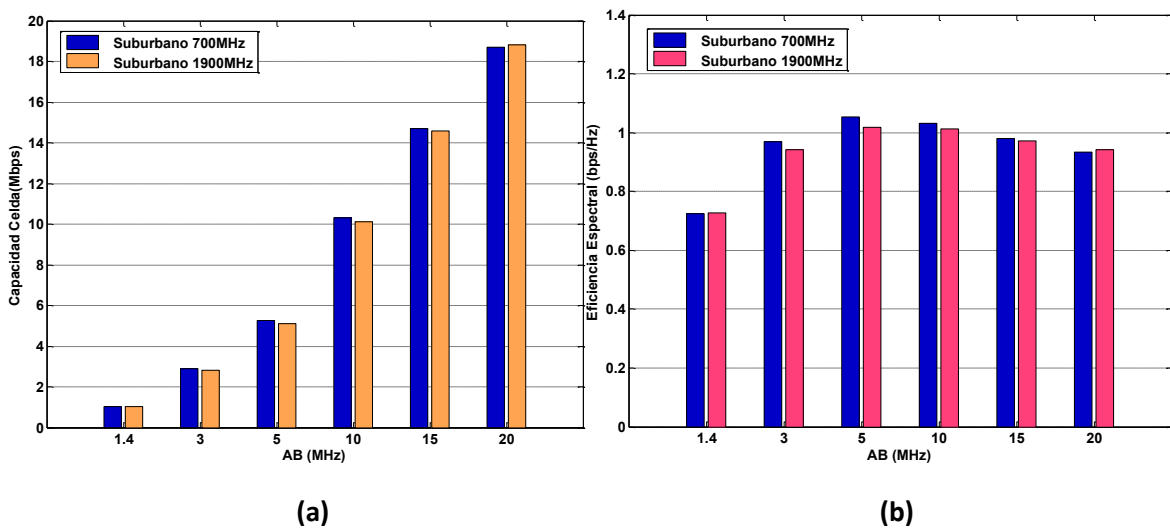
| Frecuencia de operación (MHz) | Carga de la Celda (%) | Distancia Máxima Enlace (km) | ISD (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Demanda total (Mbps) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------|------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| 700                           | 25                    | 10.913                       | 16.37    | 10.4                   | 2          | 62.397                   | 10.889               |
|                               | 50                    | 10.863                       | 16.294   | 10.775                 | 2          | 64.649                   | 21.778               |
|                               | 75                    | 10.812                       | 16.218   | 10.675                 | 2          | 64.047                   | 32.667               |
|                               | 100                   | 10.761                       | 16.142   | 10.317                 | 2          | 61.904                   | 43.556               |
| 1900                          | 25                    | 4.554                        | 6.83     | 11.395                 | 10         | 341.86                   | 10.889               |
|                               | 50                    | 4.533                        | 6.799    | 10.698                 | 10         | 320.926                  | 21.778               |
|                               | 75                    | 4.512                        | 6.767    | 10.664                 | 10         | 319.913                  | 32.667               |
|                               | 100                   | 4.49                         | 6.735    | 10.118                 | 10         | 303.535                  | 43.556               |

En la Tabla 3.17 se calcula de demanda total para cada carga de la celda, notando que esta demanda es cubierta para toda carga de ambas bandas, por lo que no fue necesario recalculer la distancia del enlace en ningún caso.

### 3.4.3 Análisis de Resultados

En la Tabla 3.15 se observa que la demanda total está solamente cubierta para anchos de banda mayores o iguales a 10 MHz en la banda de 700 MHz, y mayores o iguales a 3 MHz en la banda de 1900 MHz. Se observa además cómo disminuye la distancia máxima del enlace conforme se aumenta el ancho de banda, dado que la calidad de la señal, representado por la SINR, disminuye de 4.63 a 3.55 dB en la banda de 700 MHz, y de 4.708 a 3.514 dB en la banda de 1900 MHz.

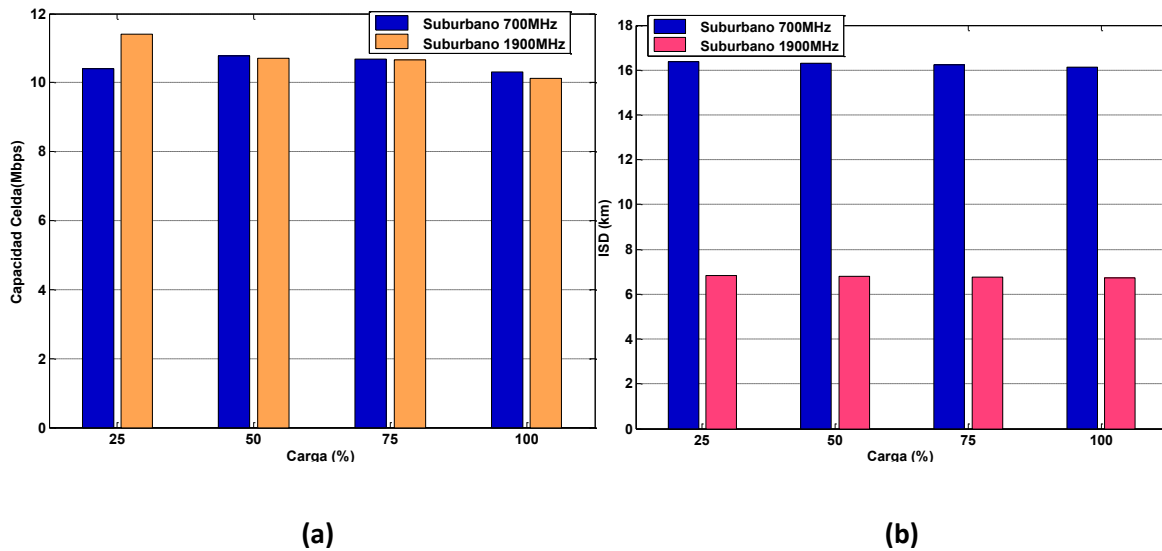
Observando las Tablas 3.15 y 3.16 se observa que la demanda total es cubierta para todos los anchos de banda disponibles, alcanzando *Throughputs* promedio por usuario de 1 Mbps en la Tabla 3.15, y en la Tabla 3.16 un *Throughput* promedio mínimo por usuario de 1.126 y 1.008 Mbps para las bandas de 700 y 1900 MHz, respectivamente, cumpliendo con el *Throughput* promedio por usuario establecido. Se nota además que las mayores capacidades de la celda se consiguen a 20 MHz de ancho de banda, siendo de 18.69 y de 18.834 Mbps para las bandas de 700 y 1900 MHz, respectivamente. Cabe recalcar que para el incremento de la capacidad de la celda, fue necesario disminuir la distancia del enlace (diámetro de la celda), con lo que consecuentemente se incrementa el número de estaciones base.



**Figura 3.10.** Capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a variaciones del ancho de banda para cuando se cubre la demanda total en el tercer escenario

En la Figura 3.10 se observa la variación de (a) la capacidad de la celda y (b) la eficiencia espectral, en función del ancho de banda utilizado, notando que se alcanzan capacidades similares en ambas bandas, y que las más altas eficiencias espectrales de 1.032 bps/Hz para 700 MHz y 1.018 bps/Hz para 1900 MHz, se consiguen usando anchos de banda de 10 y 5 MHz, respectivamente.

En los resultados de la Tabla 3.17, se observa que la demanda total para cada carga utilizada es cubierta, sin la necesidad de recalculer la distancia máxima, obteniendo un *Throughput* promedio de 1 Mbps para todos los anchos de banda de ambas bandas de frecuencia.



**Figura 3.11.** Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para el tercer escenario

En la Figura 3.11 se presentan los valores de (a) la capacidad de la celda y (b) la ISD, dependientes de la carga de la celda, notando que dicha capacidad para la banda de 700 MHz no sigue la misma tendencia para la carga del 25% que para el resto de cargas, puesto que las distancias máximas de los enlaces cambian levemente al variar la carga, tal como se explicó en los escenarios anteriores. En cuanto al ISD, se observa que este disminuye levemente al aumentar la carga, alcanzando mayores distancias a frecuencias menores.

### 3.5. Escenario IV: Simulación Ambiente Rural

#### 3.5.1 Definición del Escenario

Para el escenario del ambiente rural de ejemplo (El Quinche), se usan parámetros propios del escenario, así también como una altura de las antenas de la estación base de 20 metros y una potencia de 40 dBm, obteniendo los resultados a partir de las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz para un tipo de ciudad grande.

#### 3.5.2 Resultados de la Simulación

En la Tabla 3.18 se encuentran los valores que pueden tomar varios parámetros a partir de la variación del ancho de banda con una carga fija de la celda para las bandas de frecuencia de 700 MHz y 1900 MHz.

**Tabla 3.18.** Resultados para el cuarto escenario con una carga del 100% de la celda para las bandas de 700 MHz y 1900 MHz

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | SINR (dB) | Distancia Máxima Enlace (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) |
|-------------------------------|----------------------|-----------|------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 700                           | 1.4                  | 5.178     | 46.064                       | 1.041                  | 1          | 3.124                    | 0.744                               |
|                               | 3                    | 4.906     | 42.582                       | 2.944                  | 1          | 8.831                    | 0.981                               |
|                               | 5                    | 4.207     | 38.6                         | 4.924                  | 1          | 14.772                   | 0.985                               |
|                               | 10                   | 4.006     | 32.812                       | 9.703                  | 1          | 29.109                   | 0.970                               |
|                               | 15                   | 3.309     | 29.611                       | 12.966                 | 1          | 38.899                   | 0.864                               |
|                               | 20                   | 3.147     | 27.477                       | 18.125                 | 1          | 54.376                   | 0.906                               |
| 1900                          | 1.4                  | 5.178     | 22.348                       | 1.08                   | 1          | 3.239                    | 0.771                               |
|                               | 3                    | 4.558     | 20.659                       | 2.784                  | 1          | 8.353                    | 0.928                               |
|                               | 5                    | 4.459     | 18.727                       | 4.874                  | 1          | 14.622                   | 0.975                               |
|                               | 10                   | 4.08      | 15.919                       | 9.642                  | 1          | 28.927                   | 0.964                               |
|                               | 15                   | 3.647     | 14.366                       | 13.521                 | 1          | 40.563                   | 0.901                               |
|                               | 20                   | 3.204     | 13.331                       | 17.066                 | 1          | 51.199                   | 0.853                               |

El número de usuarios en este escenario es de 1,500, por lo que la demanda total durante la hora pico es:

$$D_{TBH} = D_{BH} * N_{users} = 8.888 k * 1,500$$

$$D_{TBH} = 13.332 Mbps$$

En la Tabla 3.18 se observa que solamente con los anchos de banda de 5, 10, 15 y 20 MHz tanto para la banda de 700 MHz como la de 1900 MHz, la capacidad del sistema cubre con la demanda total, considerando además *Throughputs* promedio por usuario de 1 Mbps para todos ellos, tal como se definió en los parámetros de entrada; por esta razón es necesario recalcular la distancia del enlace y obtener nuevos resultados que abastezcan dicha demanda para los anchos de banda restantes, los mismos que se presentan en la Tabla 3.19.

**Tabla 3.19.** Correcciones de la Tabla 3.18 para anchos de banda que no cubren la demanda

| Frecuencia de operación (MHz) | Ancho de Banda (MHz) | Distancia Enlace Recalculada (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Eficiencia Espectral Celda (bps/Hz) | Throughput Promedio por Usuario Recalculado (Mbps) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|--|
| 700                           | 1.4                  | 4.698                             | 1.073                  | 6          | 19.314                   | 0.766                               | 1.472  |
|                               | 3                    | 7.428                             | 3.204                  | 2          | 19.223                   | 1.068                               | 1.806  |
| 1900                          | 1.4                  | 4.698                             | 1.085                  | 6          | 19.53                    | 0.775                               | 1.562  |
|                               | 3                    | 7.428                             | 3.184                  | 2          | 19.104                   | 1.061                               | 2.372  |

La Tabla 3.20 muestra los resultados de parámetros en función de la carga de la celda, manteniendo un ancho de banda fijo de 10 MHz para las banda de 700 MHz y 1900 MHz.

**Tabla 3.20.** Resultados para el cuarto escenario con un ancho de banda de 10 MHz para la banda de 700 MHz y 1900 MHz

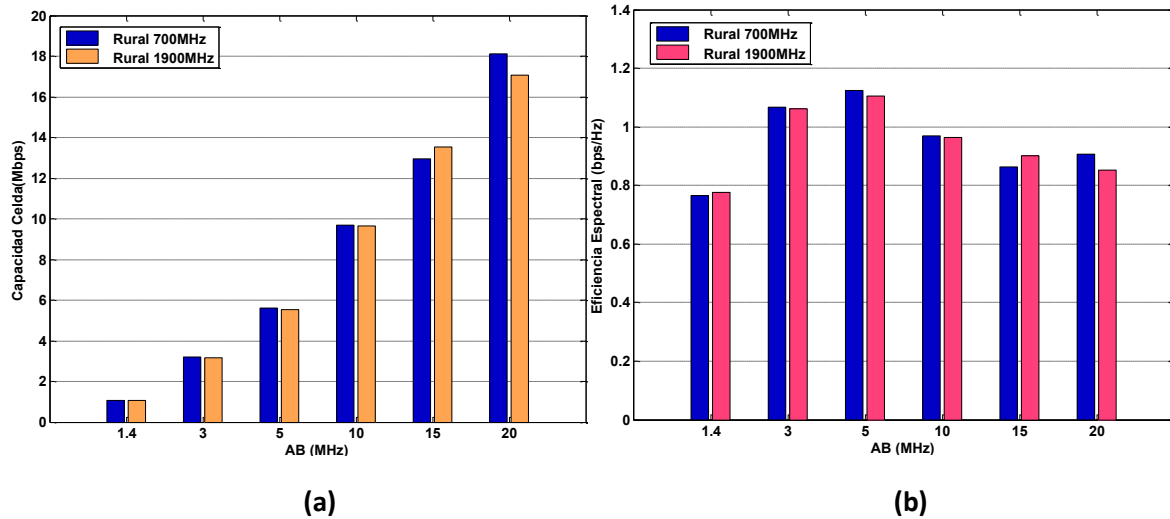
| Frecuencia de operación (MHz) | Carga de la Celda (%) | Distancia Máxima Enlace (km) | ISD (km) | Capacidad Celda (Mbps) | N° de eNBs | Capacidad Sistema (Mbps) | Demanda total (Mbps) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------|------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| 700                           | 25                    | 33.261                       | 49.892   | 11.073                 | 1          | 33.219                   | 3.333                |
|                               | 50                    | 33.113                       | 49.67    | 10.087                 | 1          | 30.26                    | 6.666                |
|                               | 75                    | 32.964                       | 49.446   | 10.126                 | 1          | 30.377                   | 9.999                |
|                               | 100                   | 32.812                       | 49.219   | 9.703                  | 1          | 29.109                   | 13.332               |
| 1900                          | 25                    | 16.137                       | 24.205   | 9.227                  | 1          | 27.681                   | 3.333                |
|                               | 50                    | 16.065                       | 24.098   | 10.137                 | 1          | 30.413                   | 6.666                |
|                               | 75                    | 15.993                       | 23.989   | 10.534                 | 1          | 31.603                   | 9.999                |
|                               | 100                   | 15.919                       | 23.879   | 9.642                  | 1          | 28.927                   | 13.332               |

Se observa en la Tabla 3.20 que la demanda total calculada es abastecida para toda carga de ambas bandas, siendo innecesario recalculer el valor de la distancia del enlace para cualquier caso.

### 3.5.3 Análisis de Resultados

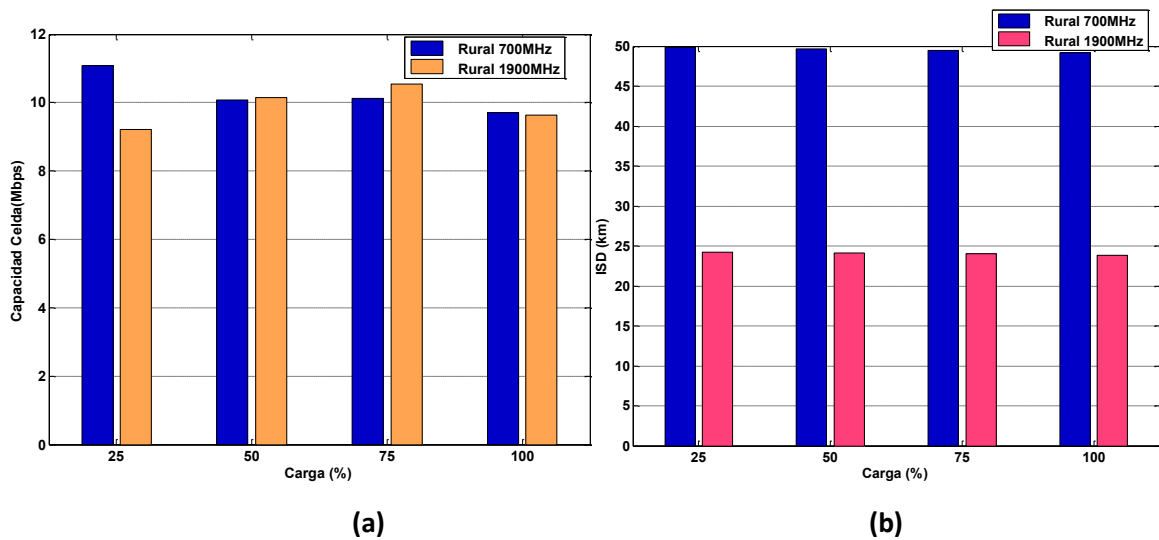
La Tabla 3.18 muestra que solamente al usar anchos de banda mayores o iguales a 5 MHz se logra cubrir la demanda total de 13.332 Mbps, mientras que para los anchos de banda restantes, se recalcula la distancia máxima del enlace para incrementar el número de estaciones base y por ende aumentar la capacidad del sistema. Se observa además como la distancia máxima del enlace disminuye conforme aumenta el ancho de banda, esto debido a que la SINR también disminuye de 5.178 dB (con 1.4 MHz) a 3.147 dB (con 20 MHz) para la banda de 700 MHz; mientras que disminuye de 5.178 dB (con 1.4 MHz) a 3.204 dB (con 20 MHz) para la banda de 1900 MHz.

Las Tablas 3.18 y 3.19 muestran que la demanda total durante la hora pico es cubierta por la capacidad del sistema para todos los anchos de banda, considerándose también un *Throughput* promedio por usuario de 1 Mbps en la Tabla 3.18, mientras que en la Tabla 3.19 se calculan *Throughputs* promedios mínimos de 1.472 y 1.562 Mbps para las bandas de 700 y 1900 MHz, respectivamente, superando al *Throughput* promedio por usuario establecido anteriormente. Además se observa que se alcanzan capacidades por celda de hasta 18.125 Mbps para 700 MHz y 17.066 Mbps para 1900 MHz, usando un ancho de banda de 20 MHz.



**Figura 3.12.** Valores de la capacidad de la celda y eficiencia espectral frente a las variaciones del ancho de banda para el cuarto escenario

En la Figura 3.12 se observa cómo varía (a) la capacidad de la celda y (b) la eficiencia espectral, respecto al ancho de banda, notándose cómo esta capacidad crece en función del ancho de banda, obteniendo capacidades similares para ambas bandas. Se observa además que las mejores eficiencias espectrales se consiguen en 5 MHz, obteniendo un valor de 0.985 bps/Hz para 700 MHz y de 0.975 bps/Hz para 1900 MHz, ya que hasta dicho ancho de banda se recalculó la distancia máxima del enlace, por lo cual se vio incrementada su capacidad y eficiencia.



**Figura 3.13.** Valores de la capacidad y del ISD frente a las variaciones de la carga para el cuarto escenario

En la Tabla 3.20 se observa que la demanda total es cubierta por la capacidad del sistema para toda carga y en ambas bandas de frecuencia.

Finalmente, en la Figura 3.13 se presentan los valores de (a) la capacidad de la celda y (b) la ISD, dependientes de la carga. En esta figura se observan capacidades variables, sin una tendencia fija de aumentar o disminuir frente a la carga, ya que los cambios de las distancias máximas de los enlaces de una carga a otra son mínimos, tal como sucedió en los escenarios anteriores. En cuanto al ISD, se observa que este disminuye levemente mientras aumenta la carga, notando una gran diferencia entre bandas de frecuencia tal como se describió en los escenarios antes vistos.

## 4. CONCLUSIONES

En este Trabajo de Titulación se utilizaron 3 simuladores de Matlab que consideraron, en primer lugar, las especificaciones establecidas para la tecnología LTE tales como el espectro radioeléctrico, arquitectura, principios de capa física y de radio, parámetros de cobertura y parámetros de tráfico para la capacidad de una celda, y en segundo lugar, un modelo de tráfico adecuado que modele múltiples transmisiones de flujos con una compartición equitativa del ancho de banda, y cuyas conclusiones se presentan a continuación:

- La capacidad de la celda depende enormemente del ancho de banda que se esté utilizando y de la carga de la celda (ocupación de los recursos disponibles), siendo esta capacidad mayor cuando el ancho de banda también es mayor, ya que se asignan más recursos para la celda; mientras que si la carga aumenta, el tamaño de la celda decrecerá, disminuyendo la capacidad de la misma por el hecho de que los recursos deberán ser distribuidos entre más usuarios.
- Para todos los escenarios en la banda de 700 MHz, se alcanzan mayores distancias de cobertura en comparación con la banda de 1900 MHz, esto debido a que en frecuencias altas existen mayores pérdidas en la señal, por lo que el número de estaciones base debe ser mayor en la banda de 1900 MHz para lograr cubrir el área total de cobertura.
- La distancia máxima del enlace calculada por el simulador disminuye conforme aumenta el ancho de banda, esto ocurre debido a que la relación señal a interferencia más ruido disminuye; es decir, empeora la calidad del canal y consecuentemente aumentan las pérdidas afectando en el tamaño de la celda.
- Considerando los cálculos para cuando se abastece con la demanda, se alcanzan los siguientes picos en tasas de transmisión de la celda: para el primer escenario (metropolitano) se obtienen velocidades máximas de 20.686 Mbps y 18.593 Mbps, en el segundo escenario (urbano) de 18.697 Mbps y 18.773 Mbps, en el tercer escenario (suburbano) de 18.69 Mbps y 18.834 Mbps, y en el cuarto escenario (rural) de 18.125 Mbps y 17.066 Mbps, para las bandas de 700 y 1900 MHz respectivamente, tomando en cuenta un ancho de banda de 20 MHz y una modulación QPSK ( $I_{TBS} = 2$ ), además de los parámetros establecidos en las páginas 63-66. De esta forma se concluye que las mayores velocidades son alcanzadas con un ancho de banda de 20 MHz, obteniendo además valores altos de eficiencia espectral.



- Para lograr cubrir con la demanda de la tasa de datos total durante la hora pico, fue necesario recalcular nuevos parámetros como la distancia del enlace, lo que consecuentemente lleva a un incremento del número de estaciones base LTE y un aumento en la capacidad del sistema utilizando tamaños de celda más pequeños. Esto se cumple para los distintos escenarios simulados, así también como en cada una de las diferentes bandas de frecuencia y anchos de banda utilizados.
- Una opción para reducir el número de estaciones base es el uso de mayores anchos de banda, ya que se consiguen mayores capacidades de datos logrando cubrir la demanda durante la hora pico, tal como se observa en los resultados que muestran las correcciones de los cálculos; sin embargo, el operador debe cubrir los costos necesarios para adquirir un mayor espectro de frecuencias.
- Otra opción para reducir el número de estaciones base y cubrir la demanda en Mbps, es el incremento de sectores o celdas, donde se podría cambiar la sectorización de 120 grados a 60 grados, resultando en 6 sectores por estación base, aumentando de esta manera la capacidad; sin embargo, se podría tener una situación de handovers innecesarios entre sectores debido al solapamiento de las áreas de cobertura.
- La capacidad más baja calculada para una celda LTE cumple con el requisito del *Throughput* en el borde de la celda propuesto, además de que la capacidad del sistema cubre con la demanda total durante la hora pico para todos los escenarios, logrando de esta manera satisfacer todos requerimientos y demandas del sistema.
- En este Trabajo de Titulación se emplean dos métricas de rendimiento para el modelo de tráfico M/G/1 PS, por lo que se recomienda emplear nuevas métricas y modelos de tráfico basados en conmutación de paquetes con los cuales se permita realizar un análisis comparativo y a partir de ellos concluir los beneficios y desventajas de cada modelo empleado.
- Se recomienda realizar nuevos análisis con la variación de parámetros que no intervinieron en este Trabajo de Titulación, tales como el aumento de la modulación y de los recursos asignados, al igual que el empleo de técnicas MIMO para el análisis de las capacidades alcanzadas más cercanas a las teóricas; y además de la inclusión de modelos de calidad de servicio que permitan diferenciar el tráfico prioritario (inelástico) del no prioritario (elástico).

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “LTE”, *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Accedido: 04-feb-2018].
- [2] Nokia Siemens Networks Smart Labs, “Understanding smartphone behavior in the network”, White Paper, 2011.
- [3] “Solución de problemas de servicios de LTE y de VoLTE para los operadores móviles”, Netscout, Technical Report 6001200, 2017.
- [4] J. M. Ruiz, “Algoritmos de reparto de tráfico en Femtoceldas corporativas LTE”, Tesis doctoral, Universidad de Málaga, Málaga, 2015.
- [5] “VNI Mobile Forecast Highlights, 2016-2021”, CISCO. [En línea]. Disponible en: [https://www.cisco.com/assets/sol/sp/vni/forecast\\_highlights\\_mobile/index.html](https://www.cisco.com/assets/sol/sp/vni/forecast_highlights_mobile/index.html). [Accedido: 05-feb-2018].
- [6] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, y O. Sallent, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Madrid: Fundación Vodafone España, 2010.
- [7] Rohde & Schwarz España, “LTE (Long Term Evolution): El siguiente nivel”, 2010.
- [8] 3GPP, “Technical Report Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 9)”, 3GPP TR 25.913 V9.0.0, feb. 2010.
- [9] 3GPP, “Technical Report Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) (Release 9)”, 3GPP TR 25.912 V9.0.0, oct. 2009.
- [10] C. Cox, *An introduction to LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*, 2da ed. UK: John Wiley & Sons Ltd., 2014.
- [11] NGMN Alliance, “Next Generation Mobile Networks Beyond HSPA & EVDO”, White Paper, 2006.
- [12] S. Sesia, I. Toufik, y M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, 2da ed. UK: John Wiley & Sons Ltd., 2011.

- [13] Verizon Wireless, "LTE: The Future of Mobile Broadband Technology", White Paper, 2009.
- [14] 3GPP, "Technical Specification LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 8)", 3GPP TS 36.300 V8.9.0, jul. 2009.
- [15] 3GPP, "Technical Specification LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description (Release 12)", 3GPP TS 36.401 V12.2.0, abr. 2015.
- [16] 3GPP, "Technical Specification Group Core Network and Terminals; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3 (Release 8)", 3GPP TS 24.301 V8.10.0, jun. 2011.
- [17] 3GPP, "Technical Specification LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 8)", 3GPP TS 23.401 V8.14.0, jun. 2011.
- [18] 3GPP, "Technical Specification Digital cellular telecommunications system (Phase 2+);; Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture (Release 12)", 3GPP TS 23.203 V12.6.0, sep. 2014.
- [19] L. Korowajczuk, *LTE, WIMAX, and WLAN network design, optimization, and performance*. Reston, VA, USA: John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [20] S. Srikanth, V. Kumaran, y C. Manikandan, "Orthogonal Frequency Division Multiple Access: Is it the Multiple Access System of the Future", Chennai, India, 2008.
- [21] S. Catreux, V. Erceg, D. Gesbert, y R. W. Heath, "Adaptive modulation and MIMO coding for broadband wireless data networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, n.º 6, pp. 108-115, jun. 2002.
- [22] A. Goldsmith, "Adaptive modulation and coding for fading channels", *Proc. 1999 IEEE Inf. Theory Commun. Workshop Cat No 99EX253 Kruger Natl. Park*, pp. 24-26, 1999.
- [23] A. Sharma and S. De, "Exploiting Fading Dynamics along with AMC for Energy-Efficient Transmission over Fading Channels", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, n.º 11, pp. 1218-1220, nov. 2011.
- [24] NGMN Alliance, "Guidelines for LTE Backhaul Traffic Estimation", White Paper, 2011.

- [25] 3GPP, “Technical Specification LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification (Release 10)”, 3GPP TS 36.322 V10.0.0, ene. 2011.
- [26] 3GPP, “Technical Specification LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 12)”, 3GPP TS 36.321 V12.5.0, abr. 2015.
- [27] B. Serrano, “Modelado e implementación de HARQ en un entorno de comunicaciones inalámbricas”, Tesis, Universidad de Stuttgart, Stuttgart, Alemania.
- [28] O. Knill, *Probability and Stochastic Processes with Applications*. India: Overseas Press India Private Limited, 2009.
- [29] H. Bidgoli, *Distributed Networks, Network Planning, Control, Management, and New Trends and Applications*, vol. 3. Wiley, 2007.
- [30] T. S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, 2da ed. Prentice Hall, 2001.
- [31] P. Fitzpatrick y M. Ivanovich, “On Approximating Throughput in Wireless Systems with Complex Rate Variability and QoS”, *2008 Australas. Telecommun. Netw. Appl. Conf.*, pp. 57-61, 2008.
- [32] V. B. Iversen, *Teletraffic Engineering and Network Planning*. 2011.
- [33] L. Kleinrock, *Queueing Systems: Theory*, vol. 1. Nueva York: John Wiley & Sons Ltd., 1975.
- [34] J. Sztrik, “Queueing Theory and its Applications, A Personal View”, *Proc. 8th Int. Conf. Appl. Inform.*, vol. 1, pp. 9–30, ene. 2010.
- [35] L. Kleinrock, *Queueing Systems: Computer Applications*, vol. 2. Nueva York: John Wiley & Sons Ltd., 1976.
- [36] M. Ivanovich y P. Fitzpatrick, “Throughput Metrics in Beyond 3G Wireless Systems with Complex Rate Variability and QoS”, *Proc. PIMRC 2008*, sep. 2008.
- [37] A. A. Kherani y A. Kumar, “Performance Analysis of TCP with Nonpersistent Sessions”, *Workshop on Modelling of Flow and Congestion Control*, INRIA, Ecole Normale Supérieure, Paris, Septiembre, 2000.

- [38] A. A. Kherani y A. Kumar, "Stochastic models for throughput analysis of randomly arriving elastic flows in the Internet", *Proceedings Twenty-First Annu. Jt. Conf. IEEE Comput. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 1014-1023, 2002.
- [39] T. Bonald, A. Proutière, G. Régnié, y J.W. Roberts, "Insensitivity results in statistical bandwidth sharing", in *Proc. 17th ITC, Salvador da Bahia, Brazil, Dec*, vol. 4, pp. 125-136, 2001.
- [40] M. Ivanovich y P. Fitzpatrick, "An Accurate Performance Approximation for Beyond 3G Wireless Broadband Systems With QoS", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, n.º 5, pp. 2230-2238, jun. 2013.
- [41] D. P. Heyman, T. V. Lakshman, y A. L. Neidhardt, "A New Method for Analysing Feedback-Based Protocols with Applications to Engineering Web Traffic over the Internet", *Performance Evaluation Review*, vol. 25, n.º 1, 1997.
- [42] A. W. Berger y Y. Kogan, "Dimensioning bandwidth for elastic traffic in high-speed data networks", *IEEEACM Trans. Netw.*, vol. 8, n.º 5, pp. 643-654, oct. 2000.
- [43] N. Chen y S. Jordan, "Throughput in Processor-Sharing Queues", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, n.º 2, pp. 299-305, feb-2007.
- [44] H. Holma y A. Toskala, *WCDMA for UMTS - HSPA Evolution and LTE*. John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [45] 3GPP, "Technical Specification Environmental Engineering (EE) Measurement Method for Energy Efficiency of Wireless Access Network Equipment", 3GPP TS 2.706 V1.2.1, oct. 2011.
- [46] 3GPP, "Technical Report Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations (Release 10)", 3GPP TR 25.996 V10.0.0, abr. 2011.
- [47] V. K. Garg, *Wireless Communications and Networking*, 1era ed. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007.
- [48] K. C. Kapur y M. Pecht, *Reliability Engineering*. John Wiley & Sons Ltd., 2014.
- [49] M. Granja, "Propuesta de un software basado en CRM (Customer Relationship Management) orientado al diseño de redes celulares de tercera y cuarta generacion", Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016.

- [50] 3GPP, "Technical Specification LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 8)", 3GPP TS 36 213 V8.3.0, nov. 2008.
- [51] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 29, n.º 3, pp. 317-325, ago. 1980.
- [52] S. A. Mawjoud, "Path Loss Propagation Model Prediction for GSM Network Planning", *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 84, n.º 7, pp. 30-33, dic. 2013.
- [53] CISCO, "Traffic Analysis for Voice over IP", White Paper, 2001.
- [54] T. Bonald, S. Elayoubi, y Y. Lin, "A Flow-Level Performance Model for Mobile Networks Carrying Adaptive Streaming Traffic", Globecom, San Diego, United States, 2015.
- [55] H. Meza y L. Santín, "Estudio y diseño de una celda base de acceso inalámbrico con tecnología 4g LTE para el sector de Iñaquito de la ciudad de Quito", Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [56] "Información censal", *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. [En línea]. Disponible en: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-censal-cantonal/>. [Accedido: 07-feb-2018].
- [57] "Servicio Móvil Avanzado (SMA)", *Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones*. [En línea]. Disponible en: <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>. [Accedido: 07-feb-2018].

## 6. ANEXOS

ANEXO I. Bandas de frecuencia operativas FDD y TDD

ANEXO II. Tabla del tamaño del bloque de transporte de dimensión  $1 < N_{PRB} < 110$

ANEXO III: Tabla de la CDF de la distribución normal estándar

ANEXO IV: Código fuente de la interfaz PRESENTACION\_CAP\_LTE

ANEXO V: Código fuente de la interfaz PLANIF\_COBERTURA\_CAP\_LTE

ANEXO VI: Código fuente del archivo link\_budget.m

ANEXO VII: Código fuente del archivo PropModel.m

ANEXO VIII: Código fuente de la interfaz MONTE\_CARLO\_CAP\_LTE

ANEXO IX: Código fuente del archivo wnsim\_multi\_reuse.m

ANEXO X: Código fuente del archivo ij2xy.m

ANEXO XI: Código fuente del archivo sf\_3gpp.m

ANEXO XII: Código fuente del archivo AntGain.m

ANEXO XIII: Código fuente del archivo GenPathLoss.m

ANEXO XIV: Código fuente del archivo pol2rec.m

ANEXO XV: Código fuente del archivo Percentile.m

ANEXO XVI: Código fuente de la interfaz CAP\_LTE.m

ANEXO XVII: Código fuente del archivo capacidad\_lte.m

ANEXO XVIII: Especificaciones técnicas de la antena SBNHH-1D65B

Todos los anexos son digitales y constan en el CD adjunto.

## ORDEN DE EMPASTADO