

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



METODOLOGÍAS DE DISEÑO Y
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES
4G - LTE

PRESENTADO POR:

HENRY ANSELMO TORRES VANEGAS

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

**METODOLOGÍAS DE DISEÑO Y
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE
REDES 4G - LTE**

Presentado por:

HENRY ANSELMO TORRES VANEGAS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

SAN SALVADOR, ABRIL DE 2022

Docente Asesor:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, jueves 31 de marzo de 2022, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma


Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE
(Docente Asesor)


Firma

- MSC. HUGO MIGUEL COLATO RODRIGUEZ


Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

METODOLOGÍAS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES 4G-LTE

A cargo del Bachiller:

- TORRES VANEGAS HENRY ANSELMO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.6

(OCHO PUNTO SEIS)

AGRADECIMIENTOS

HENRY ANSELMO TORRES VANEGAS

A Dios por haberme dado la oportunidad culminar mi carrera, por cuidarme, protegerme, guiarme en sus caminos brindándome la fe y convicción para seguir adelante.

A mis padres, Yasmin Vanegas y Anselmo Torres, quienes amo, admiro y respeto mucho, siempre trabajaron arduamente para que nuestras metas se cumplieran, apoyándonos y educándonos por el buen camino con mucho amor y dedicación.

A mis hermanos Irvin Torres y Josué Torres por ser mis compañeros de toda la vida, su afecto y amor me motiva a seguir adelante.

A mi novia, Brenda Montenegro, quien siempre ha estado durante toda esta carrera brindándome su apoyo y amor sin condición.

A mi asesor, ingeniero Werner Meléndez, quien ha tenido la paciencia de guiarme en este proceso de desarrollo de tesis y por enseñarme el interés de la rama de telecomunicaciones.

A toda la planta docente de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, por brindarme conocimiento y directrices para mi desarrollo profesional durante toda la carrera. A toda la planta de colaboradores de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, en especial a Reinita, quien siempre me ha brindado su aprecio y ha sido guía durante toda mi carrera, siempre me ha apoyado en todo lo que he necesitado.

A toda mi familia y hermanos en la fe que siempre me han apoyado y me han llevado en sus oraciones.

A mi amigo, Alcides Nerio quien siempre me apoyo durante todo el desarrollo de este trabajo.

A todos mis amigos, compañeros de estudio y trabajo que han contribuido en mi formación académica y profesional.

INDICE DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABLAS	4
GLOSARIO	5
OBJETIVOS	8
Objetivo General	8
Objetivos específicos	8
ALCANCES	8
ANTECEDENTES	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
JUSTIFICACION	9
CAPÍTULO 1: TEORIA DE REDES 4G – LTE	10
Introducción	10
Evolución de la telefonía móvil	10
Estándares 4G y LTE	11
Características de redes LTE 4G	13
Arquitectura LTE	21
Estructura de trama de radio	24
Rehúso de frecuencia	25
Interferencias intra celdas e inter celdas	26
Parámetros de calidad QoS	28
CAPÍTULO II: PARÁMETROS DE DISEÑO CONSIDERADOS POR LOS OPERADORES EN EL SALVADOR	29
Factor económico	29
Factor del usuario	35
Factor técnico	42
Simulaciones de red	52
Legislación especial nacional	56
CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES LTE	60
Drive Test de desempeño	60
Evaluación del desempeño a través de simulaciones	64

Monitoreo del desempeño de red LTE	73
CONCLUSIONES	77
BIBLIOGRAFIA	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de datos móviles en los últimos siete años. (Cerwall, 2021).	11
Figura 2: Estándares 3GPP como solución a requerimientos de la UIT. (Henry T. 2022).	11
Figura 3: Señal OFDMA enlace descendente. (Huidobro, 2014)	14
Figura 4: Comparación de PARP entre señales OFDMA y SC-FDMA. (Comes, 2010)	15
Figura 5: OFDMA y SC-FDMA. (RF Wireless World)	15
Figura 6: LTE FDD y LTE TDD. (Henry T. 2022)	16
Figura 7: Configuración MIMO 2X2. (Henry T. 2022)	17
Figura 8: Características de LTE Advanced. (Huidobro, 2014)	20
Figura 9 : Metodo de propagacion Erceg-Greenstein. (Erceg-Greenstein, 1999)	20
Figura 10: Arquitectura de LTE. (3GPP, 2008)	21
Figura 11: E-UTRAN y sus interfaces. (Sánchez, 2016)	22
Figura 12: Entidades que conforman EPS y sus interfaces. (Sánchez, 2016)	23
Figura 13: Bloque de recursos físico en tiempo y frecuencia. (Comes, 2010)	24
Figura 14: Estructura de trama LTE FDD. (Huidobro, 2014)	25
Figura 15: Interferencia Inter celda e Intra celda. (Henry T. 2022)	26
Figura 16: Packet Scheduling o Scheduler, asignacion dinamica de recursos. (Comes, 2010)	27
Figura 17: Intercell Interference Coordination. (Comes, 2010)	27
Figura 18: Plan de recuperacion de la inversion 5 años. (Henry T. 2022)	31
Figura 19: Equilibrio en el dimensionamiento de red. (Henry T. 2022)	31
Figura 20: Grafica ancho de banda vs velocidad de transmision de datos. (Metsala. 2015)	32
Figura 21: Trafico de datos en un eNodoB semanal. (Metsala. 2015)	33
Figura 22: Planeacion continua de redes. (Metsala. 2015)	34
Figura 23: Zonas de cobertura de los cuatro operadores de telefonía en El Salvador. (Henry T. 2022)	35
Figura 24: Mediciones de bajo rendimiento de red LTE en zona urbana. (Henry T. 2022)	36
Figura 25: Estructura física de una estación base LTE (ENodoB). (Henry T. 2022)	38
Figura 26: Superposición LTE. (Henry T. 2022)	39
Figura 27: Sistemas expansión LTE. (Henry T. 2022)	40
Figura 28: Cantidad de mediciones de velocidad de transmisión de datos, El Salvador. (Henry T. 2022)	41

Figura 29: Cantidad de mediciones de velocidad de transmisión de datos, El Salvador. (Aras Technologies, 2018)	43
Figura 30: Comparativa de cantidad de estaciones base para una red operando en la banda de 1900 MHz y en 850 MHz. (H. Torres, 2022)	44
Figura 31: Uso de indicadores ICIC para limitar interferencia intercelular. (R. A. Comes, 2010) ...	45
Figura 32: Esquemas de rehuso de frecuencias en LTE, mediante técnicas ICIC. (R. A. Comes, 2010)	45
Figura 33: RRU utilizado en estaciones base. (H. Torres, 2022)	47
Figura 34: Distintas configuraciones de antena para estaciones base. (H. Torres, 2022)	48
Figura 35: Equipamiento utilizado en redes de telefonía. (Imagen libre, 2022)	48
Figura 36: Hilos de fibra óptica utilizados para la interconexión de eNodeBs. (Libre, 2022)	50
Figura 37: Interconexión de estaciones base por enlace microonda. (Imagen libre, 2022)	50
Figura 38: Imagen satelital de los sitios para telecomunicaciones en El Salvador y Centro América. (SBA, 2022)	51
Figura 39: eNodeBs a implementar en la simulación. (H. Torres, 2022)	55
Figura 40: Valor de RSRP esperado en la zona. (H. Torres, 2022)	55
Figura 41: Valor de RSRQ esperado en la zona. (H. Torres, 2022)	56
Figura 42: SIGET realiza mediciones de la calidad de señal antes del mundial de Surf “ISA World Surfing Games 2021” en playas de la Libertad. (SIGET El Salvador, 2021)	57
Figura 43: Antena de telecomunicaciones ubicada contiguo a centro penitenciario de Usulután, con antenas radiantes a baja altura y sector mudo instalado en estructura. (H. Torres, 2022)	58
Figura 44: Sector mudo instalado afuera de un centro penitenciario. (H. Torres, 2022)	59
Figura 45: Equipos para realización de Drive Test. TEMs Investigation. (H. Torres, 2022)	60
Figura 46: Medición de RSRP antes y posterior a la implementación de un nuevo eNodeB. (H. Torres, 2022)	62
Figura 47: Puntos de medición UL/DL para el usuario final. (H. Torres, 2022)	63
Figura 48: Zona de estudio para simulación y rendimiento de la red. (H. Torres, 2022)	67
Figura 49: Comparación de RSRP antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022)	68
Figura 50: Modificación en dB del valor percibido de RSRP. (H. Torres, 2022)	68
Figura 51: Comparación de RSRQ antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022)	69
Figura 52: Comparación de SINR antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022)	69
Figura 53: Modificación en dB de SINR en la zona de estudio. (H. Torres, 2022)	70

Figura 54: Superposición de transmisores activos antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022)	70
Figura 55: Modulación utilizada en zona de estudio antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022)	71
Figura 56: Comparación de throughput disponible en la zona de estudio antes y después de la simulación. (H. Torres, 2022)	72
Figura 57: BLER en zona de estudio. (H. Torres, 2022)	72
Figura 58: Throughput máximo disponible de canal para usuario. (H. Torres, 2022)	73
Figura 59: Interfaz gráfica de software de monitoreo remoto de eNodoB en tiempo real. (H. Torres, 2022).....	74
Figura 60: Interfaz gráfica de software de monitoreo remoto de eNodoB en tiempo real. (H. Torres, 2022)	74
Figura 61: Gráfico de funcionamiento de red LTE. (H. Torres, 2022)	75
Figura 62: Gráfico de funcionamiento de red LTE. (H. Torres, 2022)	76
Figura 63: Funcionamiento de un eNodoB en UL y DL. (H. Torres, 2022)	76

LISTA DE TABLAS

Tabla. 1: Características de la primera, segunda y tercera generación celular. (Henry T. 2022)	10
Tabla. 2: Características de LTE. (Huidobro, 2014)	13
Tabla. 3: Características de LTE Advanced. (Huidobro, 2014)	13
Tabla. 4: Características de LTE Advanced. (Huidobro, 2014)	17
Tabla 5: Tipos de modulación según valor QCI. (3GPP TS 36.213, 2011)	18
Tabla 6: Bandas de operación LTE FDD. (3GPP TS 36.942, 2009)	19
Tabla 7: Bandas de operación LTE TDD. (3GPP TS 36.942, 2009)	19
Tabla. 8: RB por ancho de banda en LTE. (Huidobro, 2014)	24
Tabla 9: Velocidades máximas teóricas de LTE. (Comes, 2010)	25
Tabla 10: Plan de recuperación de la inversión 5 años. (Metsala, 2015)	30
Tabla 11: Comparación de velocidad de transmisión de datos 2018 – 2021. (H. Torres, 2022)	41
Tabla 12: Bandas de frecuencia utilizadas en telecomunicaciones móviles. (A. Calderón. 2022)	42
Tabla 13: Bandas de frecuencia utilizadas en telecomunicaciones móviles. (A. Calderón. 2022) ...	43
Tabla 14: Velocidades máximas según ancho de banda y configuración MIMO para LTE. (3GPP, 2014)	46
Tabla 15: Capacidades máximas de tarjeta controladora de LTE. (3GPP, 2014)	49
Tabla 16: Parámetros de configuración eNodeB LTE. (H. Torres, 2022)	54
Tabla 17: Características de Drive Test realizados. (H. Torres, 2022)	61
Tabla 18: Características del eNodeB implementado. (H. Torres, 2022)	62
Tabla 19: Medición de velocidad previo a la implementación de eNodeB. (H. Torres, 2022)	63
Tabla 20: Medición de velocidad pos a la implementación de eNodeB. (H. Torres, 2022)	64
Tabla 21: Parámetros fijos para simulaciones de red LTE. (H. Torres, 2022)	66
Tabla 22: Parámetros que se variaran en las distintas simulaciones. (H. Torres, 2022)	66
Tabla 23: Características de escenarios de implementación para simulación. (H. Torres, 2022)	66
Tabla 24: Escenarios de simulación. (H. Torres, 2022)	66
Tabla 25: Parámetros de RF antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022)	67

GLOSARIO:

16-QAM: Modulación de amplitud en cuadratura.

2G: Segunda generación.

3G: Tercera generación.

3GPP: Proyecto asociación de tercera generación.

4G: Cuarta generación.

5G: Quinta generación:

64-QAM: Modulación de amplitud en cuadratura.

EarfcnUL: Numero de canal absoluto de radiofrecuencia en enlace ascendente.

AWS: Banda de frecuencia comprendida entre 1700 y 2100 MHz.

AZIMUTH: Angulo de arco medido sobre el horizonte que forman el punto cardinal norte.

CDMA: Acceso múltiple por división de código.

CELDA: Parte de una red que brinda servicio a determinada zona.

DBI: Decibelios de ganancia sobre un radiador isotrópico.

DBM: Medida de la relación de potencia expresada en decibelios relativa a un mili vatio.

DL: Enlace descendente.

Duplexor: Dispositivo que permite la intercomunicación bidireccional sobre un sistema.

EarfcnDL: Numero de canal absoluto de radiofrecuencia en enlace descendente.

EMPLAZAMIENTO: Infraestructura de torre en donde se ubican equipos de telecomunicación.

ENodoB. Nodo B evolucionado.

EPC: Core de paquetes evolucionado.

Estación base: estación fija para la comunicación bidireccional.

E-UTRAN: Red troncal del sistema LTE.

FDD: Duplexacion por división de frecuencia.

FO: Fibra optica.

Gbps: Giga bits por segundo.

GSM: Sistema global para comunicaciones.

Hora pico: Tiempo de mayor demanda en un día.

HSS: Home subscriber server, base de datos central de LTE.

ICIC: Coordinación de interferencias en LTE.

IP: Protocolo de internet.

Kbps: Kilo bits por segundo.

Latencia: Medida del retardo.

LTE: Evolución a largo plazo.

Mbps: Mega bits por segundo.

MIMO: Múltiple entrada múltiple salida.

MME: Entidad de administración de la movilidad.

Nodo B: Parte de la red 3G que es el punto de interconexión con usuarios.

OFDMA: Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal.

PAPR: Relación de potencia pico a potencia media.

PCI: ID físico de celda.

PRB: Bloque de recursos físico.

QCI: Identificador de clase.

QOS: Identificador de clase de QoS.

QPSK: Modulación por desplazamiento de fase.

RET: Control remoto de Tilt eléctrico.

RRU: Unidad de radio remota.

RSRP: Potencia de señal recibida de la señal de referencia.

RSRQ: Calidad de señal recibida de la señal de referencia.

RSSI: Indicador de fuerza de la señal recibida.

Rx: Receptor.

S1: Interfaz de la arquitectura de LTE que intercomunica E-UTRAN con EPC.

SC-FDMA: Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única.

Scheduling: Técnica de mitigación de interferencias.

Sector: Radiante de una celda.

S-GW: Serving Gateway.

SIGET: Superintendencia general de electricidad y telecomunicaciones.

SNR: Relación de señal a ruido.

TDD: Duplexación por división de tiempo.

Tx: Transmisor.

UE: Equipo de usuario.

UIT: Unión internacional de telecomunicaciones.

UL: Enlace ascendente.

UMTS: Sistema de telecomunicación móvil universal.

Uu: Interfaz entre eNodoB y UE.

X2: Interfaz que comunica los eNodoB.

OBJETIVOS:

Objetivo General:

- Evaluar las metodologías de diseño y evaluación, aplicados en las redes 4G-LTE de telefonía móvil, conforme a lo indicado por los organismos normalizadores correspondientes

Objetivos específicos:

- Explicar los métodos de diseño y evaluación en campo, utilizados por los operadores de telefonía móvil en El Salvador, para la puesta en funcionamiento de nodos 4G-LTE
- Ejemplificar lo anterior, en una zona concreta de El Salvador, indicando la forma en la cual, se demuestra el cumplimiento de la normativa asociada a este tipo de instalaciones (tanto nacional como internacional)
- Proponer alternativas de enseñanza de estos conceptos, que hagan uso de herramientas de bajo costo, y que permitan emular los procesos de diseño/evaluación utilizados por los operadores comerciales

ALCANCES:

- Analizar la normativa asociada a las tecnologías 4G-LTE y su estado actual de implementación en El Salvador
- Explicar los métodos utilizados por los operadores de telefonía móvil en El Salvador, para el diseño y evaluación en campo, del desempeño de este tipo de redes
- Identificar alternativas de bajo costo que permitan emular los métodos anteriores, dado que los utilizados por las empresas de este sector, son (por lo general) de tipo propietario, con altos costos por licenciamiento
- Ejemplificar el uso de las alternativas de bajo costo propuestas, en una zona concreta de El Salvador, y demostrar la validez de sus resultados, comparándolos con aquellos que se obtienen con sistemas comerciales

ANTECEDENTES:

En El Salvador la primera empresa en anunciar la implementación de redes 4G LTE fue Telefónica a finales del año 2016, seguido de ellos la empresa TIGO anuncia también la implementación de la tecnología 4G, ambos operadores iniciaron en el mes de diciembre a brindar servicios a través de esta tecnología. En un inicio la cobertura LTE era muy limitada, la empresa Telefónica introdujo esta tecnología brindando cobertura únicamente en los departamentos de San Salvador, San Miguel y Santa Ana; para enero 2020 dicha empresa contaba con una red de 305 eNodeB para brindar cobertura LTE a nivel nacional, dato que sigue en crecimiento porque no representa más allá del 36% de la cobertura respecto a las tecnologías 2G/3G de la misma.

A finales de 2017 se contabilizaron 500 mil líneas activas con acceso a red LTE de cualquier operador a nivel nacional. Para finales de 2019, el 87% de la población nacional tenía al menos cobertura 3G. Y para el año 2022 se espera que haya 2,5 millones de líneas activas con acceso a LTE en el país, lo que equivaldría a un 28.5% del total de líneas activas en el país. Hasta diciembre de 2019 El Salvador solo contaba con una carretera digital del 207 MHz para servicios móviles, el Gobierno ha gestionado el poder ampliar esta brecha, ese mismo año se realizó una subasta de 120 MHz de nuevo espectro, esto contribuyó a que las operadoras pudiesen mejorar su servicio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

El diseño y evaluación en campo, de redes de telefonía 4G, usualmente utiliza herramientas de hardware y software con costos de licenciamiento altos, lo que dificulta su uso en procesos de enseñanza; sin embargo, existen alternativas de bajo costo que pueden adaptarse o complementarse entre ellas, para proporcionar alternativas de emulación válidas. Lo anterior incluye el uso de instrumentos de medición, actualmente disponibles en la EIE. El presente trabajo tiene como finalidad, estudiar y proponer formas de uso y adaptación de dichas alternativas, de tal forma que se puedan utilizar en la enseñanza de este tipo de conceptos.

JUSTIFICACION:

Las tecnologías 4G-LTE, si bien es cierto que tienen varios años de estar en funcionamiento alrededor del mundo, en nuestro país la implementación de esta tecnología aún se encuentra en auge, dado que los operadores se encuentran integrando más eNodeB a la red a nivel nacional para poder alcanzar una cobertura similar a la de la tecnología 3G, la cual es predominante en este momento, por lo que resulta de suma importancia abordar su a enseñanza en las asignaturas correspondientes de la EIE, lo que a su vez demanda de alternativas que permitan abordar el diseño y la evaluación del desempeño en campo de dichas redes, lo que permitiría fortalecer dicho proceso de enseñanza

CAPÍTULO I: TEORIA DE REDES 4G – LTE.

Introducción.

Los sistemas de telefonía móvil han venido evolucionando a lo largo de los últimos años, superando en gran manera a los sistemas de telefonía fija. La telefonía móvil en un principio fue pensada para ofrecer los mismos servicios que la telefonía fija, teniendo en cuenta el hecho de que en esta tecnología el usuario podía tener movilidad aun con la conexión ya establecida, una vez desarrollada la red móvil se volvió el centro de trabajo para los desarrolladores el aumentar las velocidades de transmisión de datos por redes inalámbricas, ya no solo la transmisión de voz, en transmisión de datos las primeras tecnologías radio móviles no superaban la banda ancha fija, con el paso del tiempo las tecnologías de redes celulares fueron aumentando sus velocidades con el desarrollo de la 3G y 4G, proceso que a su vez involucraba el desarrollo de los dispositivos móviles, los cuales cada vez incorporaban mejores velocidades de procesamiento, cantidades diversas de aplicaciones, cámaras de alta calidad, etc.

Evolución de la telefonía móvil.

A partir de los años 80 las tecnologías de las telecomunicaciones entraron en un gran auge, desarrollándose como 2G (GSM), 3G (UMTS y CDMA), 4G (LTE Y LTE ADVANCE), se están teniendo muchos avances para que en corto plazo se ponga en desarrollo la 5G, el cual se proyecta que para 2027 cuente con el 50% de las conexiones móviles activas. Los operadores de las redes celulares en cada país deben tener estrategias claras para poder desarrollar una tecnología teniendo presente que la velocidad de evolución de estas les exigirá su cambio constante. En el presente trabajo presentamos el desarrollo de Long Term Evolution LTE, según el informe [1] a finales del año 2021 LTE cuenta con 4,700 millones de suscriptores. La cantidad de datos que actualmente en promedio utiliza mensualmente cada teléfono inteligente asciende a 11.4GB/m [1], lo que motiva a la mejora continua de estas redes. La Figura 1 muestra el crecimiento de la demanda de datos de los últimos siete años. La Tabla 1 muestra las velocidades máximas de transmisión de datos alcanzadas por las primeras tres generaciones de telefonía móvil.

Generación	Voz	Datos
Primera	Si	0 Kbps
Segunda	Si	240 Kbps
Tercera	Si	42 Mbps

Tabla. 1: Características de la primera, segunda y tercera generación celular. (Henry T. 2022)

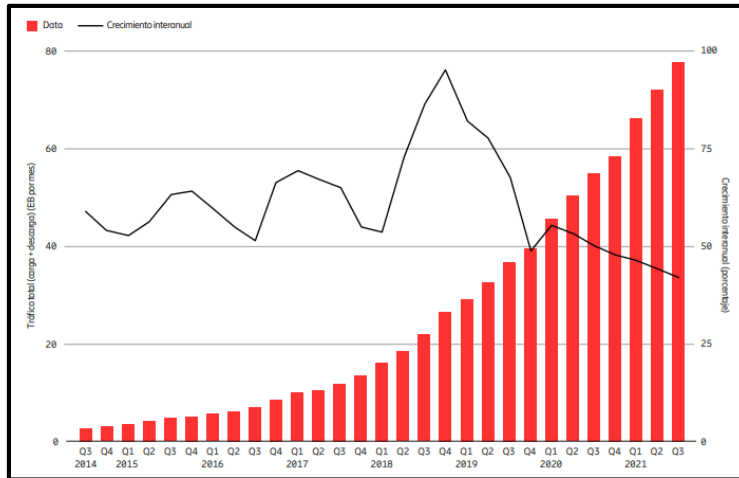


Figura 1: Consumo de datos móviles en los últimos siete años. (Cerwall, 2018).

Estándares 4G y LTE.

La UIT ha establecido estándares globales para la implementación de tecnologías de transmisión de datos móviles. La tercera generación viene establecido en el estándar IMT-2000, donde se establecen las condiciones mínimas que un sistema debe cumplir para ser considerado de tercera generación, dentro de estos estándares el 3GPP ha trabajado en conjunto para establecer sistemas de comunicación móvil que cumplan con estos estándar, dentro de estas mejoras continuas fue lanzado LTE quien en sus inicios teóricos y prácticos aun no podía ser considerado como una tecnología de cuarta generación, sino más bien como 3.9 G la cual se detallara más adelante.

La misma UIT dio paso en el año 2008 a los estándares IMT-ADVANCE IMT–Avanzados o 4G, donde se establecen los requisitos mínimos que un sistema debe cumplir para ser considerados de cuarta generación. La Figura 2 muestra las soluciones de 3GPP a los estándares establecidos por la UIT.

UIT	IMT 2000	IMT ADVANCED	IMT 2020
3GPP	Release 8	Release 10 a	Release 15 a
	Release 9	Release 14	Release 18
	2008	2010	2018

Figura 2: Estándares 3GPP como solución a requerimientos de la UIT. (Henry T. 2022).

IMT 2000.

Los sistemas bajo los estándares de las IMT 2000 son considerados predecesores del 4G, entre los cuales se encuentran la 3G, 3.5G y en los cuales se ubican los sistemas de 3.9G, dentro de los cuales se ubica el LTE de 3GPP en sus versiones Release 8 y 9, el cual fue creado para introducir mejoras en el sistema UMTS de 3G.

El 3.9G tiene dos sistemas de distintos creadores, por un lado, esta LTE de 3GPP y WiMAX 802.15e de IEEE, ambos estándares cumplen los requisitos de IMT 2000 de alcanzar velocidades de transmisión de hasta los 10Mbit/s. En este trabajo se hará único estudio a profundidad del sistema LTE de 3GPP.

Características que deben cumplir los sistemas en el estándar IMT -2000:

- Redes basadas en el protocolo de internet IP.
- Las velocidades pueden llegar a los 100Mbit/s en enlace descendente (DownLink) y 50 Mbit/s en enlace ascendente (UpLink).

Release 8 y 9 de 3GPP.

Long Term Evolution es un proyecto creado por el grupo 3GPP quienes buscaban introducir mejoras en el estándar UMTS de 3G. Release 8 es el conjunto de especificaciones que caracterizan a LTE y RELEASE 9 presenta mejoras en el sistema. LTE brindaba mejoras claramente notables respecto a las tecnologías predecesoras respecto a velocidades de transmisión, pero aun no logro cumplir todas las especificaciones de IMT-ADVANCE que es el estándar que define las características de las tecnologías de cuarta generación.

El objetivo principal de LTE es proporcionar acceso de radiofrecuencia de alto rendimiento que logre alcanzar velocidades altas en transmisión y recepción de datos en dispositivos móviles, este sistema también debía coexistir con las tecnologías antes implementadas por el grupo 3GPP, es decir tener compatibilidad con HSPA y GSM.

La historia de LTE comienza en el año 2004, el primer grupo de trabajo oficial por parte de 3GPP se formó en 2006, ellos definieron una serie de especificaciones denominada Release 8 la cual fue congelada en diciembre de 2008, Release 9 fue congelada funcionalmente en diciembre de 2009, en ese momento comenzaron los primeros despliegues de LTE se dieron a finales de 2009 en Noruega y Suecia.

Principales características de LTE:

- Tiempos de latencia reducidos.
- Velocidades de transmisión altas.
- Uso flexible del espectro radioeléctrico.
- Eficiencia espectral mejorada.
- Uso de MIMO.
- Red basada en el protocolo de internet (IP), conmutación de paquetes.
- Configuraciones necesarias para tener un óptimo Handover entre tecnologías 3GPP.

Se tuvo como consideración principal que esta tecnología debía convivir con sus predecesoras (3G & 2G), esto ha servido de base para los sistemas multi tecnología que tenemos en la actualidad, inclusive todos los equipos de usuario mantienen su estructura de funcionamiento en todas las tecnologías disponibles. La Tabla 2 muestra de manera resumida las principales características de LTE Release 8/9 [2].

LTE RELEASE 8 de 3GPP	
Duplexacion	FDD y TDD
Modulación	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexacion UL	SC-FDMA
Multiplexacion DL	OFDMA
Ancho de banda [MHz]	1.4, 5, 10, 15, 20
Latencia [ms]	10
Transmisión máxima de datos DL [Mbps]	326

Tabla. 2: Características de LTE. (Huidobro, 2014)

IMT Advanced.

La UIT definió las IMT advanced como las tecnologías posteriores a las IMT – 2000. En 2008 la IUT realizo una invitación para que se pudiesen presentar tecnologías que fueran candidatas para formar parte de las IMT avanzadas 4G. En 2010 LA UIT ratifico a LTE Advanced de 3GPP y WiMax 802.16m de IEEE como tecnologías de cuarta generación. Algunos requisitos que incluyen las IMT avanzadas son: funcionamiento de canales de 40 MHz de ancho de banda, eficiencia espectral alta, tasa teórica máxima de 1.5 Gbit/s.

Release 10.

Para poder participar en el proceso de selección de tecnologías de cuarta generación realizado por la UIT, 3GPP lanzó su propuesta de LTE avanzado, el cual entre sus principales características se encuentra la agregación de sub portadoras en el ancho de banda, logrando un máximo de hasta 100 MHz. La Tabla 3 muestra las principales características de LTE avanzado [2].

	LTE ADVANCED
Velocidad de descarga máxima	1 Gbit/s
Velocidad de subida máxima	500 Mbit/s
Latencia	<5ms
Release 3GPP	REL 10
Años de despliegue inicial	N/A
Método de acceso	OFDMA / SC-FDMA

Tabla. 3: Características de LTE Advanced. (Huidobro, 2014)

Características de redes LTE 4G.

LTE fue desarrollado para brindar transmisiones de banda ancha móvil, los usuarios pueden tener acceso a grandes velocidades de descarga o subida de contenido, todo esto se logra con un conjunto de tecnologías que trabajan paralelamente para cumplir el estándar, a continuación, se muestran las características principales de LTE y como aportan directamente al desarrollo de esta red.

OFDMA: La técnica de acceso múltiple OFDMA que se utiliza en el enlace descendente en el sistema LTE ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las sub portadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por lo tanto, es posible acomodar varias transmisiones simultaneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en sub portadoras diferentes. La diferencia entre OFDM y OFDMA es que OFDMA tiene la capacidad de asignar dinámicamente sub portadoras a cada usuario según las necesidades.

Con esto se consigue que un conjunto de usuarios pueda compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad. El sistema se realimenta con las condiciones de canal, adaptando continuamente el número de sub portadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que este necesita y las condiciones del canal. La Figura 3 muestra las principales características de una señal OFDM.

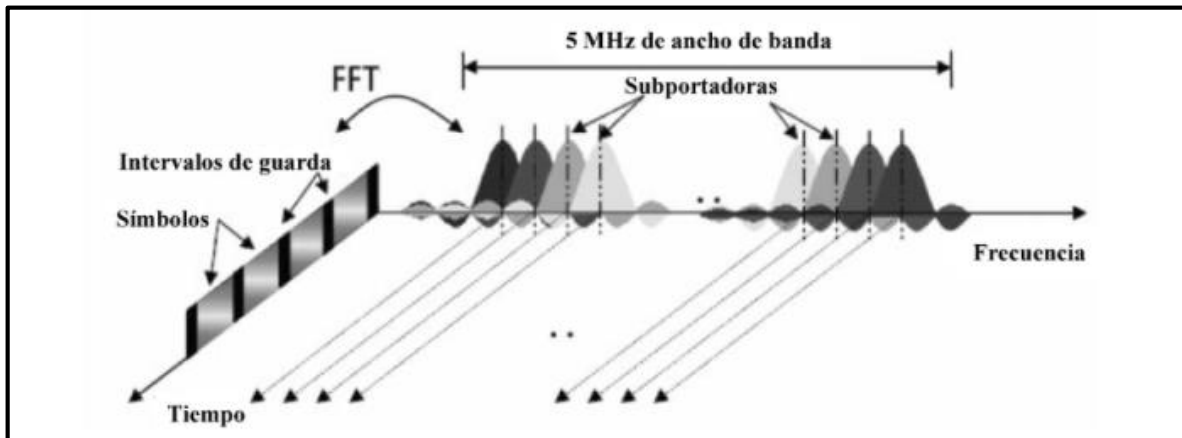


Figura 3: Señal OFDMA enlace descendente. (Huidobro, 2014)

Algunas ventajas del OFDMA son:

- **Diversidad multiusuario:** La asignación de sub portadoras se realiza de manera dinámica. Como el canal radio presentara desvanecimientos aleatorios en las diferentes sub portadoras y que serán independientes de cada usuario, se puede intentar seleccionar para sub portadora el usuario que presente un mejor estado de canal, es decir, el que perciba una mejor relación señal a ruido. Con esto se consigue una mayor velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. Esto se le conoce como métodos scheduling, que son explicados más adelante.
- **Robustez frente al multi trayecto:** Esta técnica es muy robusta frente a las interferencias resultantes de la propagación multi trayecto.
- **Elevada granularidad en los recursos asignables:** Al sub dividir la banda total en un conjunto elevado de sub portadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, con lo que esto ayudara a acomodar servicios con diferentes requisitos de calidad.
- **Sencillez de implementación en el dominio digital,** gracias al uso de la transformada rápida de Fourier (FFT e IFFT).

SC-FDMA: En el sistema LTE se utiliza OFDMA para el enlace descendente porque en la estación base no se requieren técnicas que incrementen la complejidad computacional para reducir el PAPR de la señal y no es tan crítica la eficiencia ni el coste de los amplificadores de potencia.

En el lado del terminal del usuario si es crítico reducir el consumo de potencia y conseguir por lo tanto una gran eficiencia en el amplificador, por lo que se adopta una técnica de acceso de portadora única. El SC-FDMA se basa en unos principios de transmisión muy similares a los de OFDM, pero en este caso se efectúa una recodificación de los símbolos que se van a transmitir previa al proceso de transmisión OFDM, lo que permite reducir las variaciones en la potencia instantánea. La Figura 4 muestra una comparación entre la reducción del PARP entre OFDMA y SC-FDMA [3].

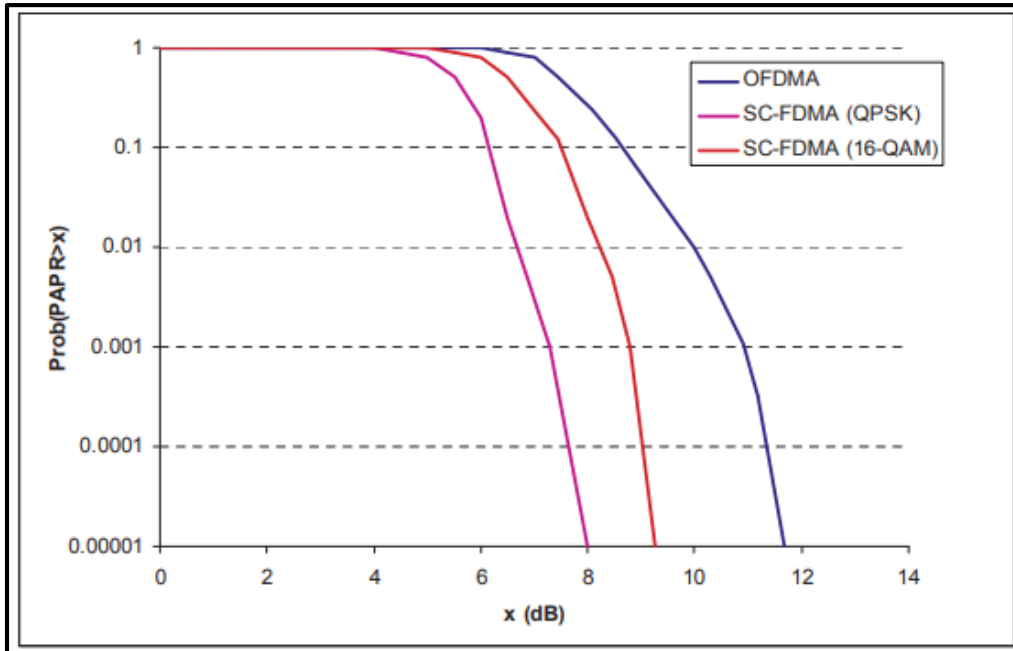


Figura 4: Comparación de PARP entre señales OFDMA y SC-FDMA. (Comes, 2010)

La Figura 5 muestra de manera gráfica la diferencia entre una transmisión OFDMA y SC-FDMA [4].

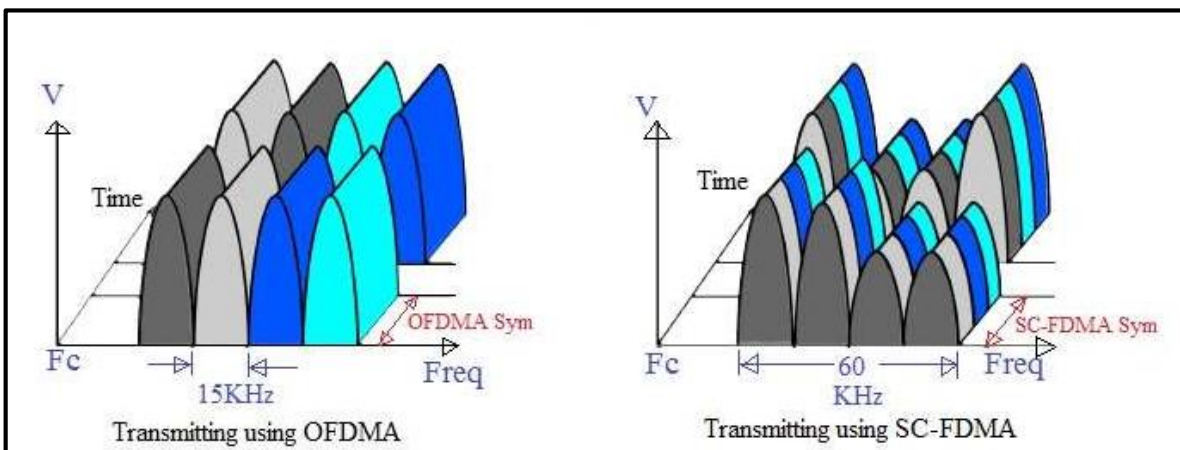


Figura 5: OFDMA y SC-FDMA. (RF Wireless World).

LTE FDD y TDD: La duplexación del Sistema LTE puede ser FDD o TDD. FDD para alcanzar Full dúplex necesita dos frecuencias una para DL y otra para DL en la cual se realiza una transmisión continua en ambos sentidos. TDD no necesita doble frecuencia para su funcionamiento dado que para alcanzar el full dúplex realiza divisiones de tiempo en la misma frecuencia. La Figura 6 muestra de manera gráfica la diferencia entre ambos sistemas.

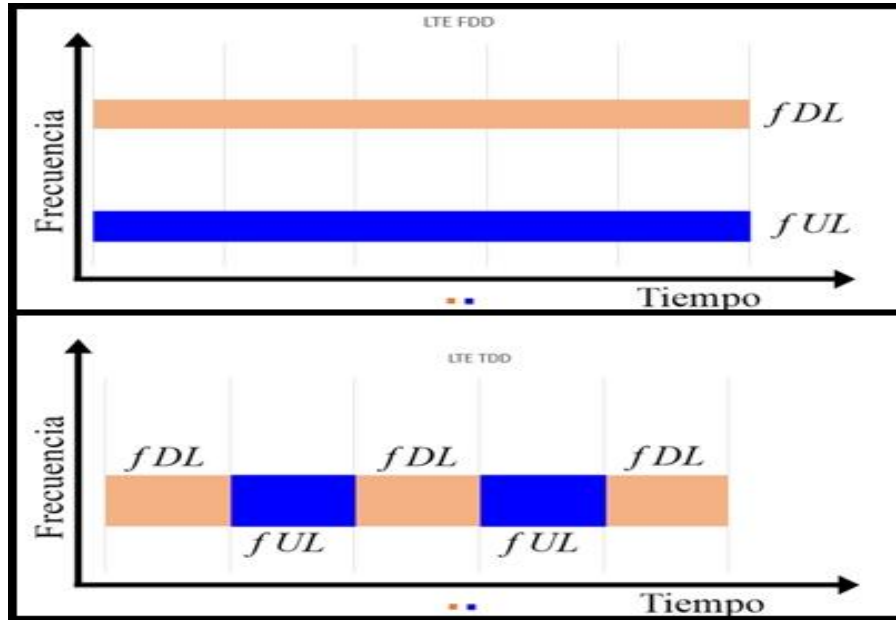


Figura 6: LTE FDD y LTE TDD. (Henry T. 2022).

Los modos de funcionamiento TDD y FDD dentro de LTE permiten el uso de bandas de frecuencias pareadas y no pareadas, en [5] se encuentran las bandas de frecuencia que se pueden utilizar en LTE tanto para FDD y para TDD. Estos ambos modos de funcionamiento son soportados por los terminales móviles. Las diferencias entre los modos de funcionamiento TDD y FDD se muestran en la Tabla 4, que fue tomada de [2].

Parámetro	LTE FDD	LTE TDD
Espectro	Requiere espectro pareado con separación de frecuencia suficiente para permitir Full dúplex.	No requiere espectro pareado. La Tx y Rx se llevan a cabo en la misma banda.
Coste del Hardware	Es necesario un "Duplexor" para aislar Tx de Rx, lo que implica mayor coste.	Menor coste del Hardware al no requerir duplexor.
Reciprocidad del canal	Las características del canal son diferentes en ambos sentidos	Es la misma en ambos sentidos, lo que permite Tx y Rx con un único conjunto de parámetros.
Asimetría DL / UL	La capacidad UL/DL se determina por la asignación de frecuencias, que es fija y no hace posible realizar cambios.	La relación UL/DL se puede cambiar dinámicamente en función de la demanda.
Periodo / Banda de guarda	Banda de seguridad necesaria para aislar UL/DL, bandas de guarda grandes no influyen en la capacidad.	Banda de guardia necesaria. El periodo de protección limita la capacidad.
Transmisión discontinua	Se requiere transmisión continua.	La transmisión discontinua es necesaria para permitir transmisiones en UL y DL, lo que puede degradar el rendimiento.

Tabla. 4: Características de LTE Advanced. (Huidobro, 2014)

MIMO: La diversidad espacial (Múltiple entrada – múltiple salida) es una tecnología fundamental utilizada en LTE para alcanzar altas velocidades de transmisión de datos. LTE Release 8 puede alcanzar hasta 100 Mbps en DL, cuando se utiliza una configuración MIMO 4X4 (4TX – 4RX) se pueden alcanzar velocidades en DL arriba de los 300 Mbps. Esto se logra porque la diversidad de señales que se reciben, se procesa y se obtiene una señal modulada en mejores condiciones. Las configuraciones más utilizadas en El Salvador en implementaciones de LTE son MIMO 2X2 y MIMO 4X4. La Figura 5 muestra el funcionamiento gráfico de esta tecnología en configuración MIMO 2X2.

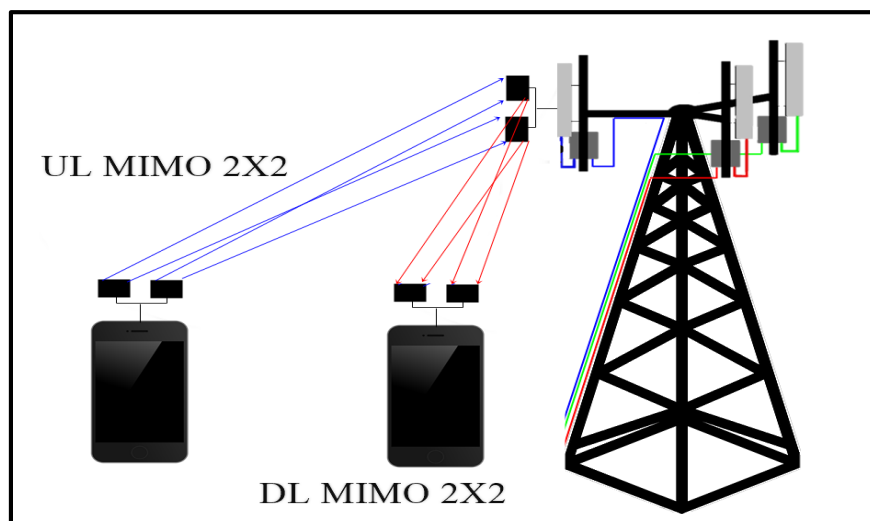


Figura 7: Configuración MIMO 2X2. (Henry T. 2022).

Codificación y Modulación: En LTE existen tres escenarios de modulación, QPSK, 16 QAM y 64 QAM. En LTE se utiliza la codificación y modulación adaptativa que simplemente varia los métodos de modulación y codificación según sean las condiciones del canal de cada usuario, para ello el UE envía constantemente información de la calidad del canal recibido y es enviada hacia el eNodeB donde se toman las decisiones sobre qué tipo de codificación y modulación se utilizara. El parámetro QCI que se estudia en la sección se utiliza para informar sobre el estado de canal de cada UE y en base a ello el eNodeB decide el tipo de modulación que le será asignado al usuario. El rendimiento general de la interfaz Uu (Interfaz entre eNodeB y UE) tendrá interrelación entre la configuración MIMO del sistema y la AMC asignada según la calidad del canal.

El rendimiento de la red puede ser medido en la velocidad instantánea máxima y los datos de errores de Bits en la transmisión. QPSK es el tipo de modulación más resistente al ruido e interferencia, pero proporciona tasas binarias bajas, en cambio 64 QAM es más sensible a ruido e interferencia, pero tiene mayor capacidad de transmisión de bits. La Tabla 5 tomada parcialmente de [6] muestra las variaciones de la modulación según la calidad de canal reportada por el UE a través de CQI

Indicador CQI	Modulación	Eficiencia
1	QPSK	0.1523
5	QPSK	0.877
8	16 QAM	1.9141
15	64 QAM	5.5547

Tabla 5: Tipos de modulación según valor QCI. (3GPP TS 36.213, 2011).

Bandas de frecuencia: El estándar de 3GPP [7] define las bandas de frecuencia en las que puede operar LTE, están divididas entre frecuencias pareadas para el uso de LTE FDD y no pareadas para LTE TDD. La variedad en las bandas de frecuencias disponible abre la posibilidad que los operadores puedan hacer un despliegue rápido de esta tecnología, no necesitando espectro extra para su implementación. También se establece que para LTE Release 8 /9 el ancho de banda máximo disponible para el eNodeB es variable: 1.4, 3., 5, 10, 15, 20; [MHz]. La Tabla 6 muestra las bandas de frecuencia en las que puede operar LTE FDD y la Tabla 7 muestra las bandas de frecuencia en las que puede operar LTE TDD.

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F _{UL_low} – F _{UL_high}	F _{DL_low} – F _{DL_high}	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	FDD
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz – 3490 MHz	3510 MHz – 3590 MHz	FDD
23	2000 MHz – 2020 MHz	2180 MHz – 2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
27	807 MHz – 824 MHz	852 MHz – 869 MHz	FDD
28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD

Tabla 6: Bandas de operación LTE FDD. (3GPP TS 36.942, 2009).

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F _{UL_low} – F _{UL_high}	F _{DL_low} – F _{DL_high}	
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz – 3600 MHz	3400 MHz – 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz – 3800 MHz	3600 MHz – 3800 MHz	TDD
44	703 MHz – 803 MHz	703 MHz – 803 MHz	TDD

Tabla 7: Bandas de operación LTE TDD. (3GPP TS 36.942, 2009).

Anchos de banda.

El estándar LTE define que puede ser implementado en distintos anchos de banda, esta característica permite a los operadores implementar LTE de manera rápida reduciendo sus costos de instalación. LTE puede ser superpuesto sobre una tecnología existente, en el caso de 3G con un ancho de banda de 5 MHz operando en la Banda 5, 850 MHz, LTE puede ser superpuesto con un ancho de banda de 5MHz operando en la Banda 5. Esto reduce la necesidad de adquisición de más espectro para la implementación de esta tecnología, la reorganización del espectro de cada operador dependerá de las proyecciones que tengan a futuro. La Figura 8 muestra los distintos anchos de banda utilizados en LTE [2].

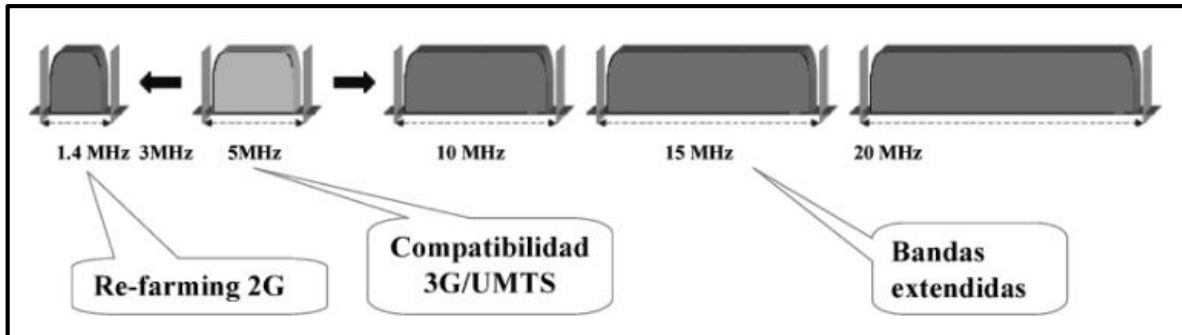


Figura 8: Características de LTE Advanced. (Huidobro, 2014)

Métodos de propagación: El método de propagación utilizado dependerá de la banda de frecuencia en la cual se realice el despliegue, en [8] se puede obtener un detalle de los modelos de propagación que se pueden utilizar en las tecnologías 3GPP. Para este trabajo se utilizará el método Erceg-Greenstein (SUI) el cual es un método estadístico en la banda de los 1900 MHz, el cual muestra el comportamiento de la propagación en el espacio para esa banda de frecuencia. [9]. La Figura 9 muestra el comportamiento de la propagación en la distancia.

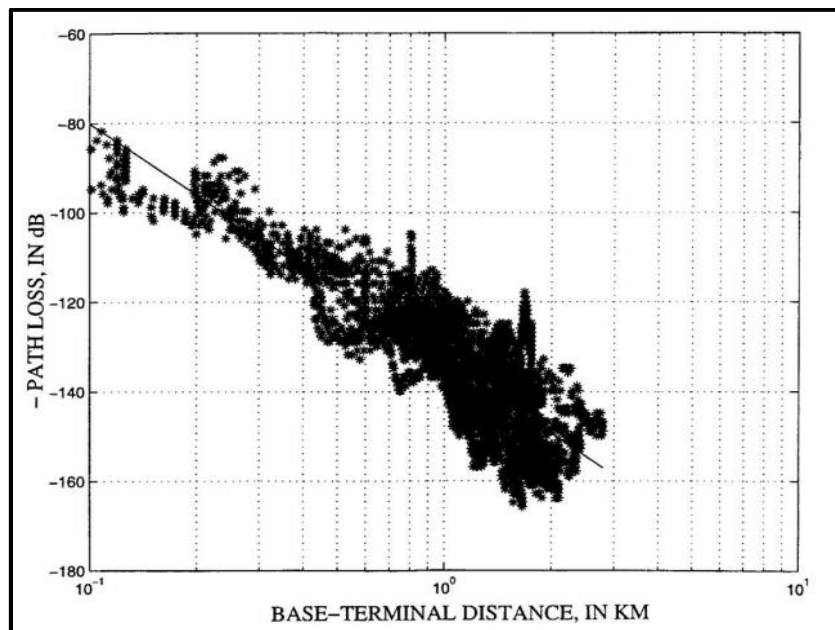


Figura 9: Metodo de propagacion Erceg-Greenstein. (Erceg-Greenstein, 1999)

Arquitectura de LTE.

Para lograr los objetivos de la UIT en reducir la latencia para los servicios de cuarta generación, 3GPP opto por reducir las capas dentro de la arquitectura de red en LTE, la cual está basada en su totalidad en la conmutación de paquetes. La red de acceso de LTE esta simplemente conformada por eNodeBs conectados entre sí, por lo que se vuelve una arquitectura plana generando reducción en la latencia y mejorar el proceso de Handover. La Figura 10 muestra la arquitectura de LTE [10].

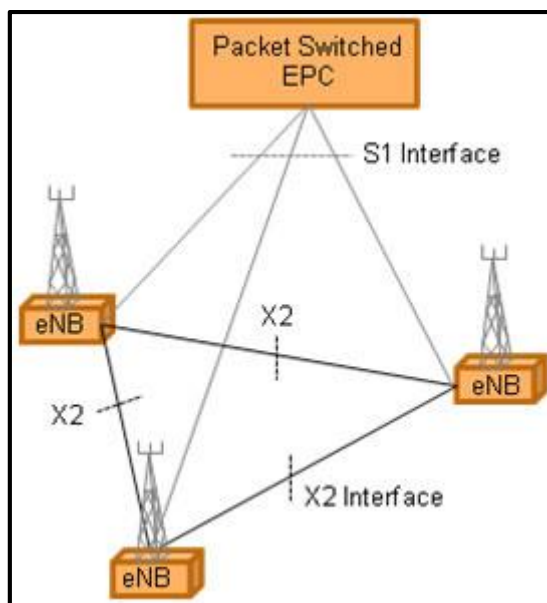


Figura 10: Arquitectura de LTE. (3GPP, 2008)

E-UTRAN.

En E-UTRAN la única entidad de red en dicha red es la estación base, la cual esta denominada en LTE como eNodeB (evolved NodeB). Esta estación base integra todas las funcionalidades de la red de accesos. Los eNodeB integran todas las funcionalidades de la red de acceso.

El eNodeB tiene tres interfaces para comunicarse con los usuarios, con la red troncal y con otro eNodeB.

E-UTRAN es la interfaz radio que comunica al usuario con la estación base utilizando el canal radio, todas las funciones y protocolos que se necesitan para realizar el envío de datos y controlar la interfaz se implementa en la eNodeB.

A la red troncal se comunica a través de la interfaz S1, la cual se subdivide en 2, la S1-MME, la cual es utilizada para el plano de control, la cual se refiere a la torre de protocolos necesaria para sustentar las funciones y procedimientos necesarios para gestionar la interfaz. El S1-U es para el plano del usuario, el cual se refiere a la torre de protocolos empleados para el envío de tráfico de usuarios a través de dicha interfaz.

Esta separación entre las entidades de la red, permite dimensionar de manera independiente los recursos de transmisión necesarios para el soporte de la señalización del sistema y para el envío de tráfico de los usuarios.

Otra interfaz que existe es la X2, la cual se utiliza para conectar los eNodeB entre sí, por medio de esta interfaz se logra intercambiar mensajes de señalización, destinados a permitir una gestión más eficiente de los recursos de radio, así como el control de tráfico de usuarios cuando estos se trasladan de un eNodeB a otro (Handover). La Figura 11 muestra E-UTRAN y sus diferentes interfaces [11].

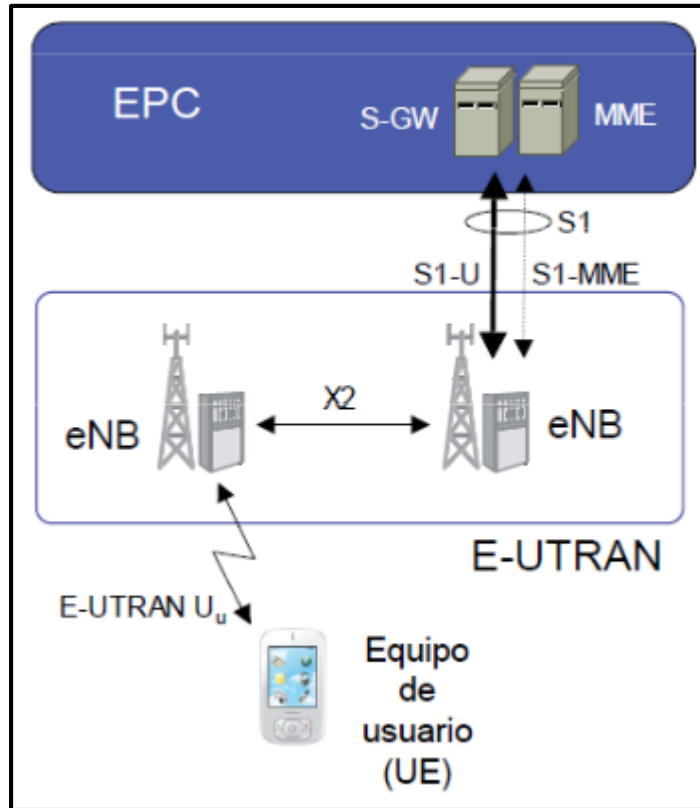


Figura 11: E-UTRAN y sus interfaces. (Sánchez, 2016)

Evolved Packet Core EPC.

Esta red ha sido concebida para tener conectividad IP, el núcleo de la red troncal EPC está formado por tres entidades de red, MME (Mobility Management Entity), Serving Gateway (S-GW) y el Packet Data Network Gateway (P-GW), que junto a la base de datos principal del sistema denominada HSS (Home Subscriber Server), constituyen los elementos principales para la prestación del servicio de conectividad IP entre los equipos de usuario conectados al sistema a través de la red de acceso E-UTRAN y redes externas a las que se conecta la red Troncal EPC. La Figura 12 muestra la organización de todas estas entidades dentro de EPC [11].

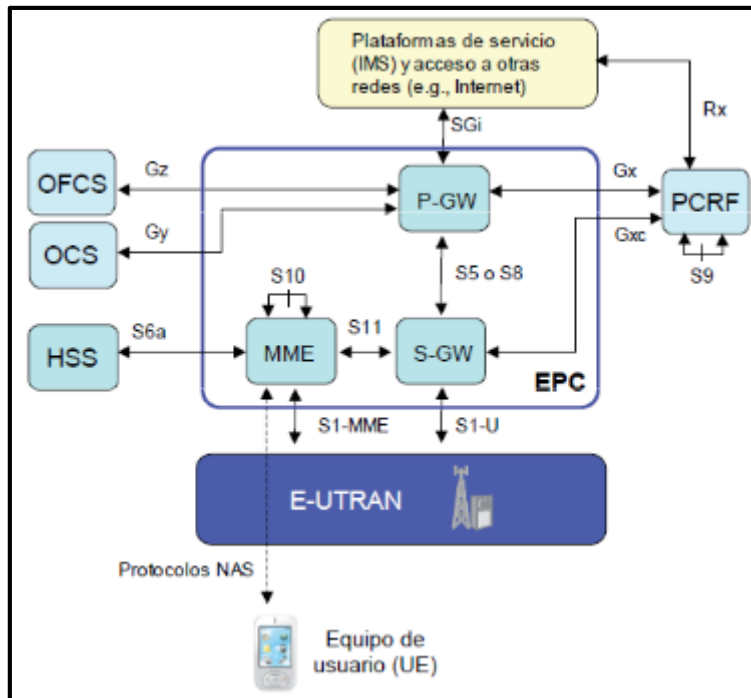


Figura 12: Entidades que conforman EPS y sus interfaces. (Sánchez, 2016)

MME: Es el elemento principal del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. Todo terminal que se encuentre registrado en la red LTE y sea accesible a través de E-UTRAN, tiene una entidad MME asignada, las principales funciones de esta entidad son:

- Autenticación y autorización del acceso de los usuarios, siempre a través de E-UTRAN
- Gestión de los servicios portadores EPS. Esta entidad encargada es la encargada de gestionar la señalización que se necesita para establecer, mantener, modificar y liberar los servicios portadores.
- Gestión de movilidad de los usuarios en modo idle (Terminales que no tiene establecida ninguna conexión de control con E-UTRAN, pero están registrados en la red LTE)
- Señalización para el soporte de movilidad entre EPS y otras redes externas.

S-GW: Es la pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Igual que en la entidad MME, todo usuario registrado en la red LTE tiene asignado una entidad S-WG en la red EPC a través de la cual transcurre su plano de usuario. Las características principales son:

- Proporcionar un punto de anclaje en la red EPC con respecto a la movilidad del terminal entre eNodeB.
- La funcionalidad de anclaje también se aplica a la gestión de la movilidad con las otras redes de acceso del 3PP (UMTS y GSM).
- Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso de que los terminales se encuentren en modo idle.
- Encaminamiento del tráfico de usuario. Esta entidad albergara la información y funciones de encaminamiento necesarias para dirigir el tráfico de subida hacia la pasarela P-WG que corresponda y el tráfico de bajada hacia el eNodeB.

PDN Gateway (P-WG): Es la encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas. Por tanto, un paquete IP generado en la red LTE resulta “Invisible” en la red externa, a través de la entidad P-GW, que hace de pasarela entre una red y otra. Un usuario tiene asignada como

mínimo una pasarela P-GW desde su registro en la red LTE. Principales características de esta entidad de red:

- Aplicación de reglas de uso de la red y control de tarificación a los servicios portadores que tenga establecidos el terminal.
- La asignación de la dirección IP de un terminal utilizado en una determinada red externa se realiza desde la pasarela P-GW que corresponda.
- Actúa como punto de anclaje para la gestión de movilidad entre LTE y redes externas no 3GPP (WiMAX, Wifi, CDMA2000, etc.)

HSS es la base de datos principal que almacena todos los datos de los usuarios de la red. La información almacenada es tanto lo relativo a la suscripción del usuario como lo necesario para la operatividad de la red.

Estructura de trama de radio FDD.

El Bloque de recursos RB es la cantidad mínima de recursos que se puede asignar a un UE en UL o DL. Un RB en el tiempo ocupa 0,5 ms y 180 kHz en el dominio de la frecuencia. La cantidad de bloques de recursos disponibles va a depender del ancho de banda del sistema, cada bloque de recursos cuenta con 12 sub portadoras consecutivas. La Tabla 8 tomada de [2] muestra la cantidad de bloque de recursos según el ancho de banda del sistema.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Numero de RB	6	15	25	50	75	100

Tabla. 8: RB por ancho de banda en LTE. (Huidobro, 2014).

La Figura 13 tomada de [3] muestra el concepto de bloque de recursos en tiempo y frecuencia.

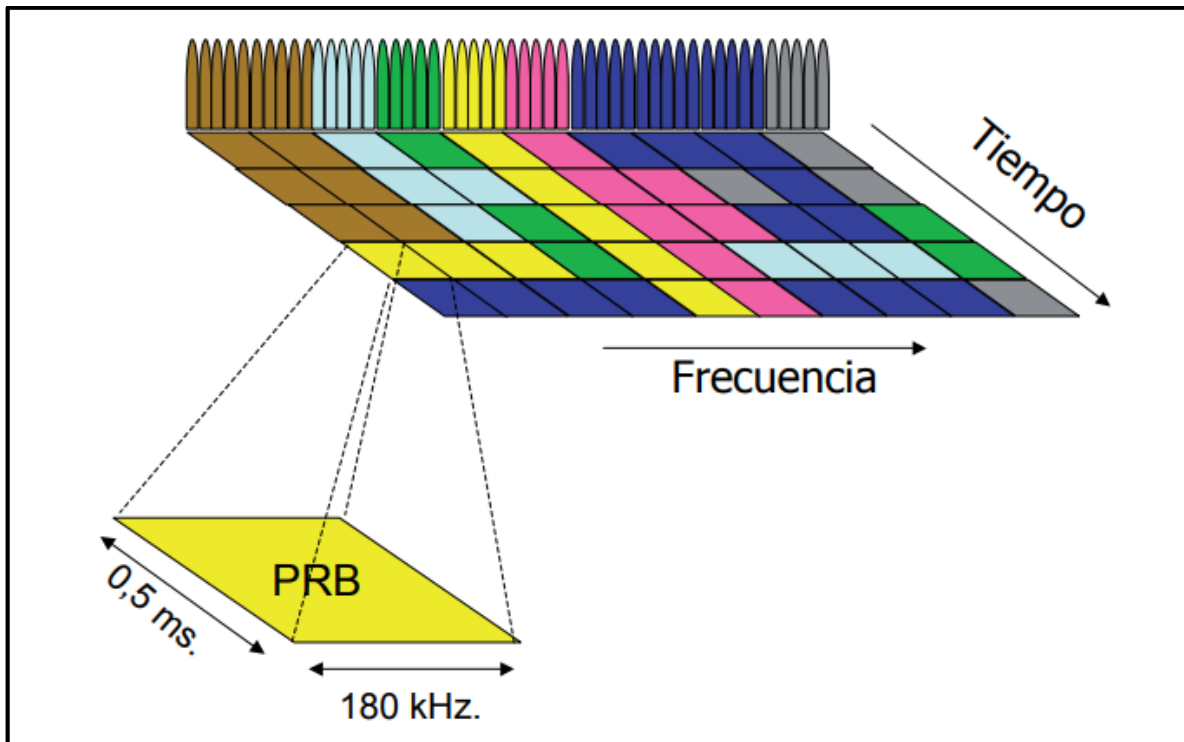


Figura 13: Bloque de recursos físico en tiempo y frecuencia. (Comes, 2010).

Las tramas de radio FDD duran 10 ms, están divididas con 20 slots de 0.05 ms cada uno, dependiendo el prefijo cíclico utilizado en OFDM puede llevar 6 símbolos en extendido o 7 en prefijo cíclico corto. La Figura 14 representa la estructura de trama FDD de LTE [2].

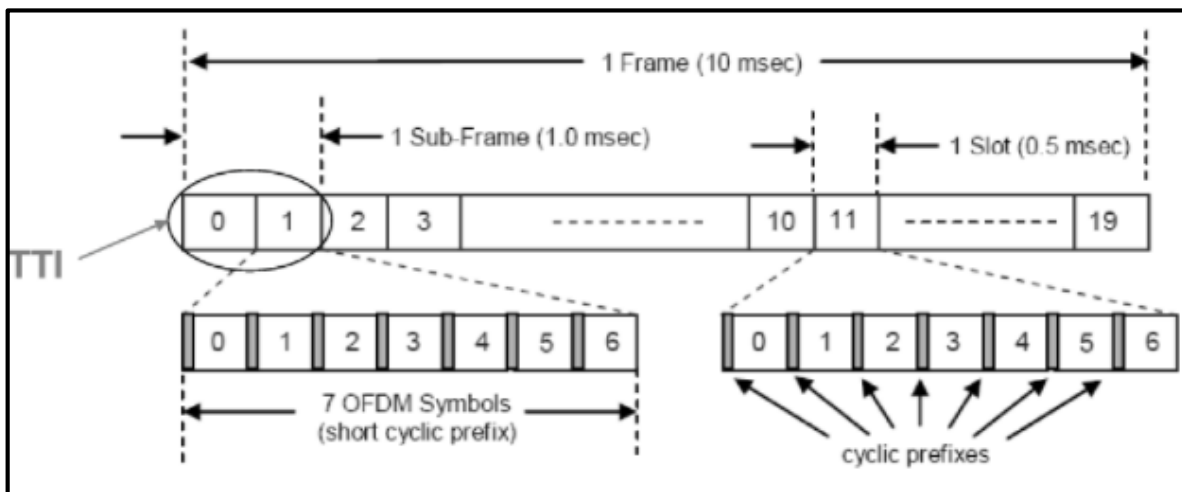


Figura 14: Estructura de trama LTE FDD. (Huidobro, 2014).

Normalmente se utiliza un prefijo cíclico extendido de 6 símbolos, cada símbolo puede llevar un máximo de 6,144 bits y la cantidad de bloques de recursos dependerá del ancho de banda. Con esto se puede estimar la cantidad máxima de transmisión teórica. La Tabla 9 tomada de [3] muestra las velocidades máximas teóricas para DL.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Velocidad de pico total (Mb/s)	≈6	≈15	≈25	≈50	≈75	≈100
Velocidad de pico bruta de usuario (Mb/s) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	≈5,1	≈12,8	≈21	≈42,5	≈63,7	≈85

Tabla 9: Velocidades máximas teóricas de LTE. (Comes, 2010).

Categorías de UE.

Las velocidades máximas que un usuario final puede obtener de la red dependerá de la categoría de la unidad móvil, se han definido estándares para categorizar los equipos de usuario y definir qué tipo de modulación pueden utilizar y las configuraciones MIMO que soportan, en [12] se encuentran definidas estas categorías.

Rehúso de frecuencia.

En LTE para alcanzar las velocidades esperadas no se debía tener una limitación en la asignación de recursos al usuario, por lo que se decidió que en LTE todos los recursos estarían presentes en todas

las celdas, es decir un rechazo de frecuencias igual a uno, esto generaría que un usuario en determinada celda no tenga límites en los recursos que le puedan ser asignados. El dinamismo de LTE en la asignación de recursos y coordinación entre celdas para el multi servicio a un usuario permite alcanzar altas velocidades de transmisión. Sin duda que esta configuración provoca en el sistema altas interferencias entre celdas vecinas, entre UEs y entre sectores. Por lo que se desarrollaron métodos óptimos para combatir estos problemas.

Interferencias Intra celdas e Inter celdas.

La interferencia intra celda se refiere a la interferencia que pueden ser generadas entre sectores, la interferencia inter celdas son las generadas en los bordes de dos celdas. Los UEs en las zonas pueden presentar problemas de desconexión si el sistema no tiene una buena coordinación. La coordinación inter celda e intra celda se mitigan regulando los recursos en una celda que están siendo utilizados por un UE pero que les está sirviendo una celda distinta.

La Figura 15 muestra interferencias inter celdas e intra celdas.

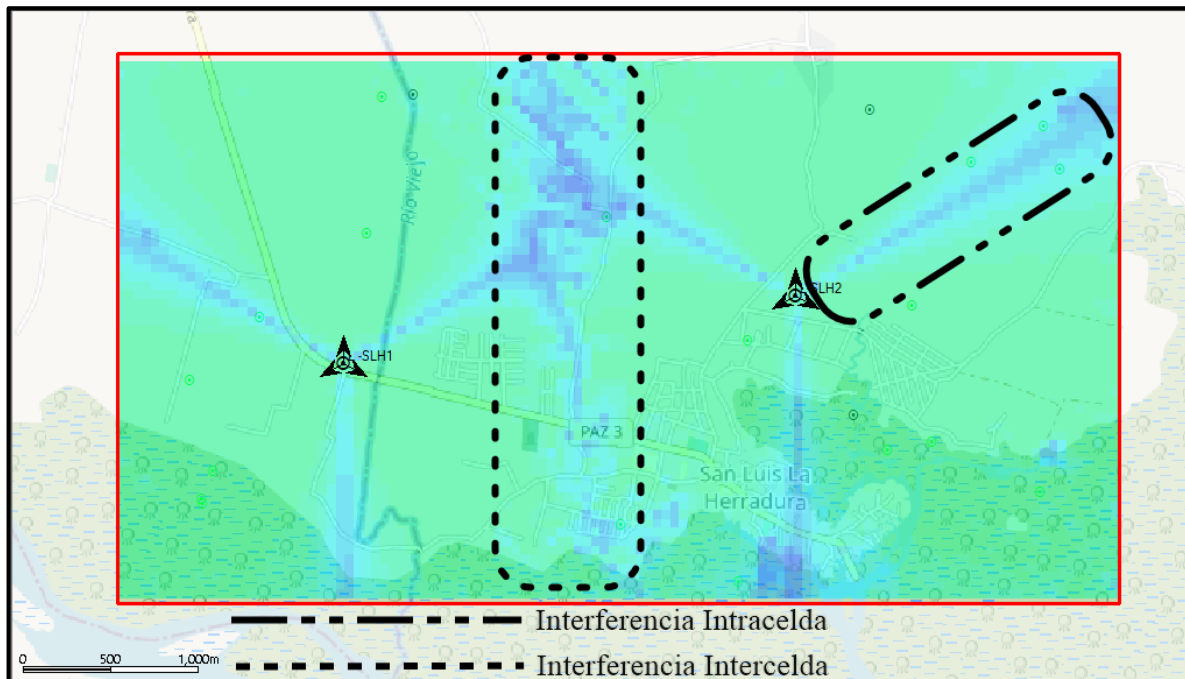


Figura 15: Interferencia Inter celda e Intra celda. (Henry T. 2022).

Los UE que se encuentran en estas zonas presentan alta interferencia dado que los recursos que están utilizando están siendo servidos por dos celdas, por lo que el UE presenta problemas de identificación de la celda que le está brindando servicios.

Packet Scheduling.

El packet Scheduling es una de las funciones de Radio Resource Management, el cual se encarga de asignar los recursos a los usuarios dentro de una celda, este decide quién y en qué momento transmite, definiendo los parámetros de modulación y codificación que utilizara. El scheduler controla que los usuarios realicen sus transmisiones de manera ordenada dentro de la misma celda, mitigando la interferencia intra celda. La Figura 16 muestra el packet scheduling que organiza de manera dinámica los recursos asignados a diferentes usuarios [3].

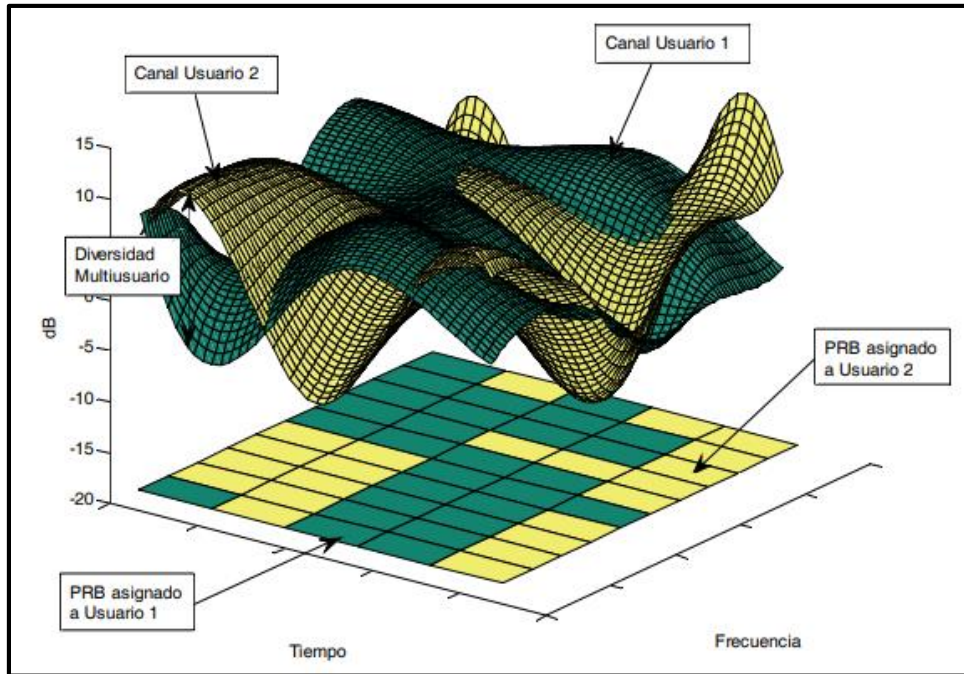


Figura 16: Packet Scheduling o Scheduler, asignacion dinamica de recursos. (Comes, 2010).

ICIC Intercell Interference Coordination.

ICIC es el método mediante el cual se controla la interferencia entre celdas, ICIC con un buen método scheduler brindan al sistema LTE un dinamismo tal que los usuarios reciben constantemente los recursos necesarios sin tener afectación mientras se encuentran en movilidad. La Figura 17 muestra la interconexión de eNodoBs y el control dinámico de ICIC.

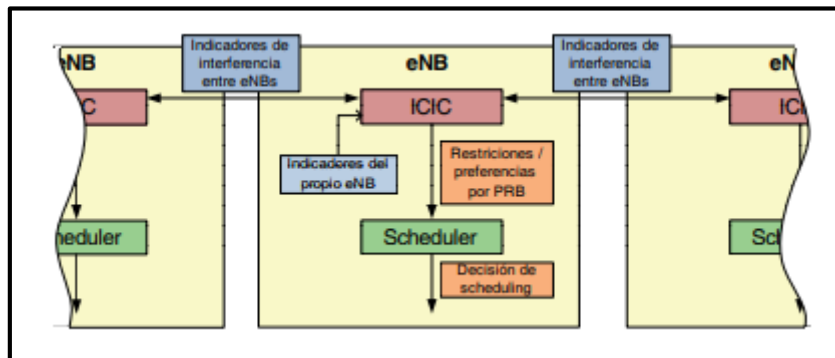


Figura 17: Intercell Interference Coordination. (Comes, 2010).

Existen dos tipos de reacciones ICIC cuando un UE se encuentra en un borde de celda utilizando determinado recurso.

Proactivo: Donde los eNodoB anuncian a sus vecinos que hará uso de determinado grupo de recursos, a lo cual sus vecinos reaccionan no asignando esos mismos recursos durante se estén utilizando. En este caso si el UE se ubica en un borde de celda no presentara interferencia.

Reactivo: Cuando un UE está utilizando un grupo de recursos y se encuentra en un borde de celda, el eNodeB que está sirviendo los recursos informan a los demás eNodoB vecinos para que reduzcan la potencia de esos mismos recursos mientras el usuario tenga activa su conexión.

Parámetros de calidad - QoS.

QoS delimita la calidad de los servicios brindados por la red a los distintos usuarios, se pueden establecer diferentes modelos de QoS para los usuarios dentro de la misma red. Algunos parámetros que establece QoS son tasa de bits, retardos de transferencia de datos o pérdida de paquetes aceptables. Dado que el sistema LTE tiene sus límites para la operación no se puede sobredimensionar para aceptar a todos los usuarios posibles en determinada zona por lo cual se utiliza QoS para limitar los recursos utilizados por distintos usuarios para obtener la mejor distribución posible de los recursos según las condiciones de cada usuario. Los usuarios se pueden limitar dependiendo del plan de servicios que tenga contratado con el operador o el “Tipo de cliente” que se denomine el usuario. Las prestaciones mínimas para diferentes escenarios se establecen en QoS.

En LTE el modelo de QoS que define el comportamiento de un servicio portador especificando 4 parámetros

QCI determina el comportamiento de determinado servicio dentro de la red. Depende de diversos factores como scheduler, mediciones de canal desde el UE. Sirve como indicador para determinada clase de servicio

ARP determina el comportamiento del plano de control, es un indicador de prioridades que decide cuando inicia, se modifica o finalizada un servicio portador. Tiene control sobre las conexiones y puede liberar ciertos recursos para dar paso a los paquetes con prioridad.

GBR es la tasa media de bit por segundos garantizada que debe proporcionar un servicio portador

MBR es la tasa máxima de bits por segundos permitido, utiliza una función de control máximo que limita el volumen máximo de tráfico.

UE-AMBR y APN-AMBR son parámetros en el plano de usuario final, el primero limita la tasa máxima de transferencia de datos y el segundo limita la tasa de datos con una red externa. Estos parámetros forman parte de un perfil del usuario que tiene cada operador, este puede decidir en base a sus criterios de comercialización las diferentes clases de usuarios que tendrán y establecer límites máximos de transferencia de datos dentro de la red según sea la condición individual

CAPÍTULO II: PARÁMETROS DE DISEÑO CONSIDERADOS POR LOS OPERADORES EN EL SALVADOR

Factor económico

El desarrollo de una tecnología de telecomunicaciones en un país estará limitado por las capacidades económicas del operador que instalará una red, la recuperación de la inversión que se pueda tener, la capacidad económica de las personas para poder adquirir los servicios. Todo el desarrollo está limitado por lo económico, más allá de las limitaciones técnicas se puede considerar que lo económico es el eje principal que rige el desarrollo de las tecnologías.

Planes económicos de implementación: Los planes de expansión de la red deben estar dentro de la estructura general de los procesos de la empresa, los operadores realizan planes de implementación de LTE buscando mantener costos bajos sin perder la calidad de la red y los servicios ofrecidos a los usuarios. Para realizar estas inversiones de recuperación a largo plazo se requiere de un estudio económico, el Ingeniero de planificación debe ser capaz de presentar más de una propuesta de diseño técnico para evaluar la mejor opción en términos económicos en conjunto con el área financiera. [13]

Los planes que requieren inversión económica deben ir enfocados en la proyección de desarrollo económico de cada empresa, pueden existir distintos enfoques de crecimiento, desde aumentar la calidad de servicio al cliente aumentando puntos de atención o introducir nuevos sitios para garantizar la accesibilidad a la red, estos planes estarán de la mano con las proyecciones económicas empresariales. La adquisición y mantenimiento de equipos representa un alto costo para los operadores, por lo que se debe realizar un estudio de los costos de mantenimiento a lo largo de la vida útil de la red, es normal que los costos de operación diaria de la red puedan superar por mucho los costos de inversión inicial, por ello no se debe optar por la opción más económica sin evaluar sus costos de operación y mantenimiento en el tiempo.

De los principales de implementación es La infraestructura de implementación es de las principales características de diseño que deben tomarse el base a criterios económicos, muchas empresas optan por el alquiler de infraestructura y esto puede generar altos costos operativos para la red y la implementación de infraestructura propia necesita de altos costos de inversión. La decisión de alquilar o construir afectara directamente en las proyecciones de crecimiento de la red a lo largo del tiempo, un operador que tenga infraestructura propia tiene la ventaja que a querer aumentar la capacidad de su red o implementar una nueva tecnología no tendrá que elevar sus costos de inversión inicial, esto comparado con los operadores que alquilan ubicaciones y derechos de paso.

La interconexión entre sitios actualmente se vuelve un costo variable el cual depende de las condiciones donde está ubicado el sitio, para LTE es más favorable utiliza fibra óptica para interconectar los sitios y el núcleo de red por sus capacidades en velocidad, pero este tipo de interconexión se encuentra limitado en muchas ocasiones y se opta por enlaces microondas, existen diversos factores como lo es las regulaciones municipales, permisos por paso en determinadas zonas, etc. [13] Algunas empresas con la llegada de LTE pueden proponerse el mejorar la red de fibra óptica para brindar velocidades de transmisión mayores, pero dependerá de las proyecciones económicas.

La topología de red física y lógica deben estar coordinados en todas sus capaz para cumplir el propósito técnico elegido por el Ingeniero de diseño de la mano con el área financiera, el equipamiento físico que dependerá de las condiciones propias de cada sitios y las configuraciones lógicas no deben causar limitantes en la implementación del estándar LTE, es decir, los requisitos de

latencia, alta transmisión de datos se deben cumplir y que ningún paso intermedio (Como enlaces microonda) causen cuellos de botella.

Recuperación de la inversión: Las recuperaciones de inversión son difíciles definir las en estos entornos de implementación de sitios, pero debe hacer una predicción de retorno de inversión más apegado a las características de la zona de implementación, la manera de recuperación de la inversión principalmente se obtiene de la remuneración de los usuarios de la red de radio, además se pueden tener distintos ingresos extra:

- Alquiler de espacios en infraestructuras a otros operadores.
- Alquiler de espacios para instalación de fibra óptica a través de una ruta en funcionamiento.
- Servicios dedicados a empresas de internet fijo.

Los retornos de inversión se verán reflejados a través de los diversos planes de acceso a la red brindado a los usuarios, con condiciones llamativas más usuarios comenzarán a comprar acceso a la red. La Tabla 10 refleja el plan de recuperación de inversión de una inversión x, la métrica simple muestra el tiempo en el cual se recupera el dinero invertido, entre menor sea el costo mejor será la inversión, datos tomados de Tabla 3.2 de [13]. La Figura 18 muestra la representación gráfica de esta recuperación de la inversión.

Año	Ahorro de costo en efectivo	Salida de caja, equipo	Flujo de caja anual neto	Flujo de caja neto acumulado
Año 0	0	-80	0	-80
Año 1	50	-	50	-30
Año 2	50	-	50	20
Año 3	50	-	50	70
Año 4	50	-	50	120
Año 5	51	-	50	170

Tabla 10: Plan de recuperacion de la inversion 5 años. (Metsala, 2015).

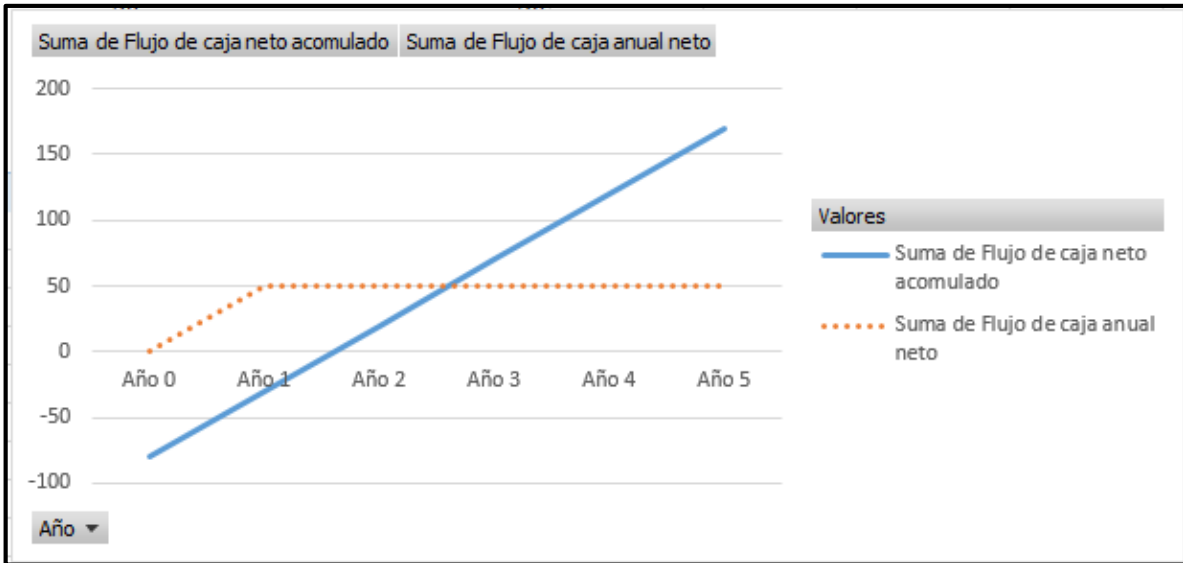


Figura 18: Plan de recuperacion de la inversion 5 años. (Henry T. 2022).

Dimensionamiento de la red: La Figura 19 muestra que el dimensionamiento debe lograr un equilibrio entre el escenario de implementación, rendimiento óptimo para los usuarios y reducción de costos.

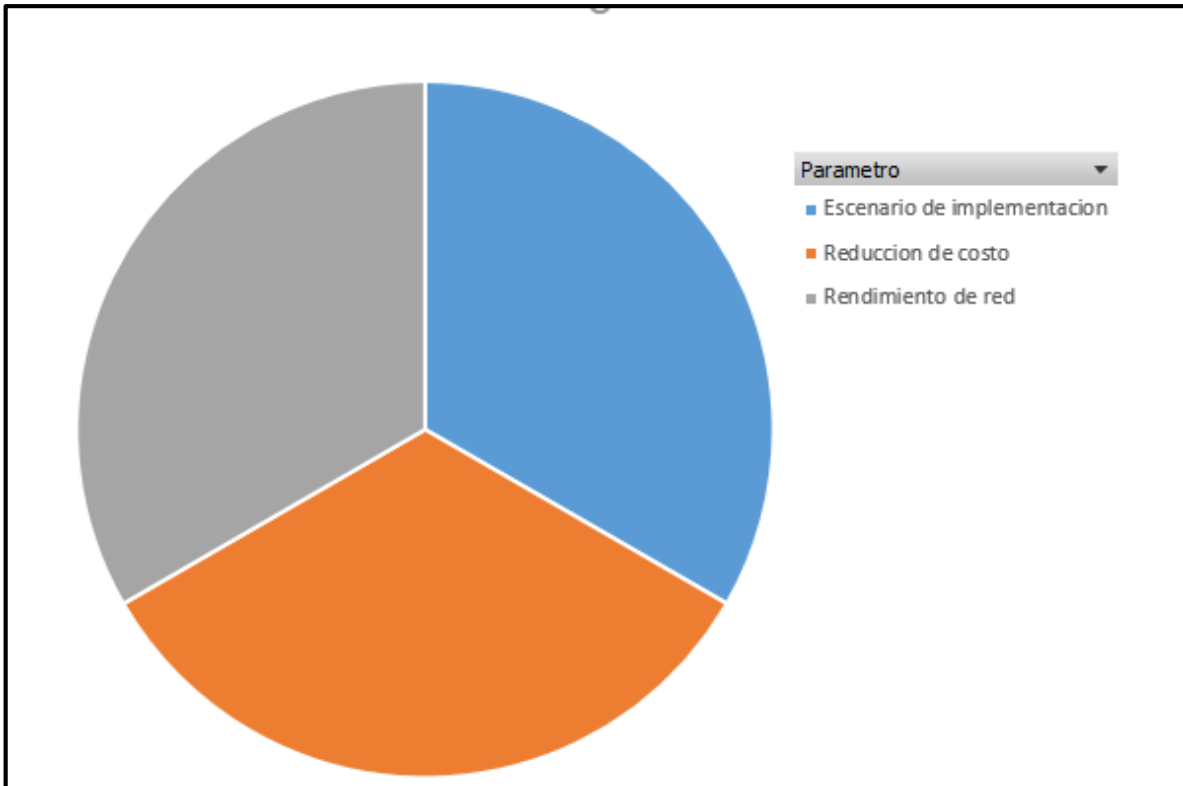


Figura 19: Equilibrio en el dimensionamiento de red. (Henry T. 2022).

El satisfacer la demanda de trafico proyectada es de los primeros que se deben tomar para la planeación, determinar un objetivo en base a la resiliencia, parámetros QoS, cantidad de usuarios, tipo de tráfico que se servirá.

Tipos de tráfico

Las actuales aplicaciones móviles exigen diferentes condiciones que la red de acceso debe satisfacer, las aplicaciones en tiempo real (Descarga continua) y de descarga web (Tiempo discreto), se deben evaluar de manera distinta, dado que las condiciones mínimas son diferentes para cada tipo de tráfico. Los escenarios de tráfico no están del todo definidos, la planeación debe realizar un estudio del tipo de tráfico necesario, un parámetro importante es si se utilizara VoLTE o si se realizara handover a tecnologías anteriores para llamadas.

Navegación web.

La navegación web (No interactiva) es el proceso mediante el cual un usuario accede a una página web en la cual descarga y transmite datos. El indicador de calidad de la navegación web es la medida del tiempo en que el usuario tarda en conectarse, el usuario espera un ingreso rápido y navegar dentro de el de manera óptima, según [2] el usuario se retira de una página web si no ha cargado en 10 s, por lo cual el acceso se debe garantizar en el menor tiempo posible. Las planeaciones para satisfacer el tráfico de navegación web se deben basar en estar por debajo del tiempo promedio de descarga de las páginas web más utilizadas por los usuarios. La Figura 20 [13] muestra que teniendo una buena planeación se tiene disponibilidad de un ancho de banda mayor para un usuario lo cual permite tener mayores velocidades y por lo tanto reducir el tiempo de descarga de una página web.

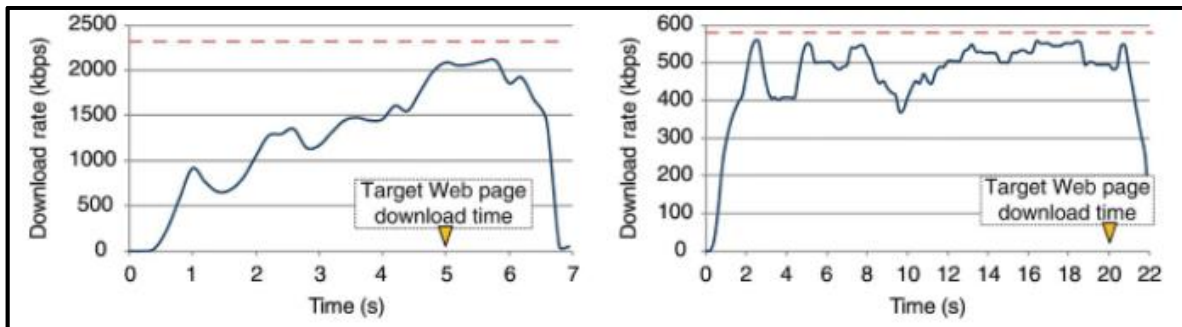


Figura 20: Grafica ancho de banda vs velocidad de transmisión de datos. (Metsala. 2015).

Descarga de video

La descarga de videos es un tipo de tráfico que ha aumentado exponencialmente en los últimos años, no solamente en descarga sino en subida con las video llamadas. La mejor experiencia del usuario se alcanza cuando se tiene una rápida descarga y constante. La variación en la disponibilidad del ancho de banda para usuario puede generar un atraso en la descarga de estos archivos, generando una inconformidad en la experiencia de usuario. Por lo cual el planeador debe procurar que los usuarios mantengan constante los recursos necesarios para la reproducción continua de estos archivos.

Horas pico de demanda.

La evaluación de un eNodeB se puede ver en la Fig. en la cual se puede observar el comportamiento de tráfico de datos, el ingeniero de planeación debe buscar que el eNodeB cumpla la demanda de datos en las horas pico, si se planea en base a rendimientos mínimos, la probabilidad de bloqueo y rechazo de conexiones es muy alta. La Figura 21 muestra el comportamiento de un eNodeB durante una semana.

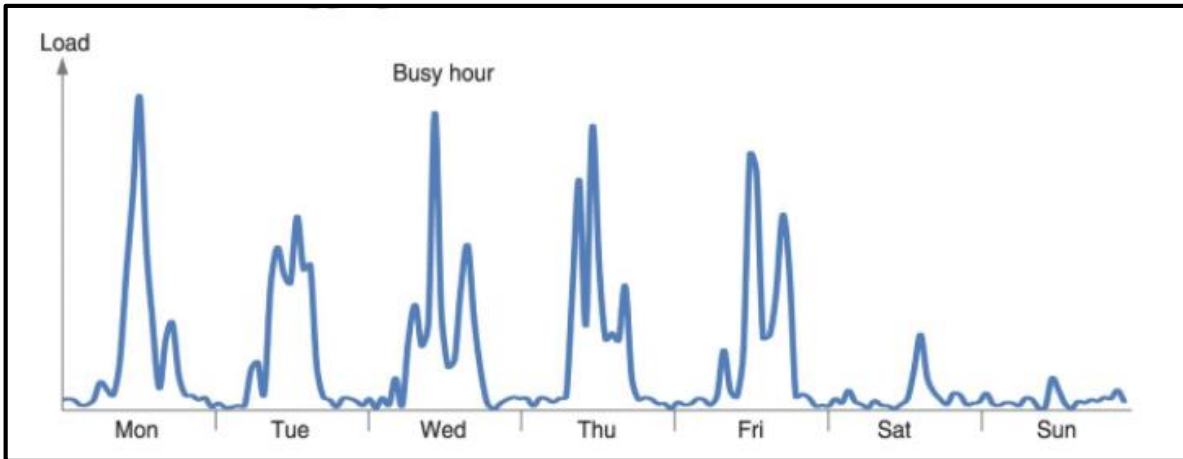


Figura 21: Tráfico de datos en un eNodeB semanal. (Metsala. 2015).

Saturación por demanda de tráfico.

La planeación de la red no debe ser sobredimensionada sino acorde a las demandas que se puedan generar en la zona de cobertura, la mala planeación de una celda puede provocar reducción en el rendimiento de usuario final, la planeación debe determinar el ancho de banda necesario para satisfacer las necesidades de tráfico. A medida se agregan conexiones a la celda, se ve rápidamente reducido el ancho de banda y throughput nominal disponible para usuario, esta saturación puede llevar al colapso de las conexiones.

Planeación de despliegue: La planeación de la red Incluye todos los aspectos relacionados con la puesta en servicio de un eNodeB o un grupo de eNodeBs, parámetros importantes como la planeación de IP, PCI, sub redes IP, Vland, Parámetros QoS, parámetros de RF están involucrados en este proceso.

La planeación no tiene finalización, sino que está en constante cambio, buscando siempre la optimización de la red basada en las demandas de tráfico. Este proceso es constante a lo largo de la vida útil de la red. En un escenario de implementación la proyección o estimación de tráfico puede variar desde que se diseñó hasta la puesta en servicio, los constantes cambios en equipos y aplicaciones de usuario obligan a los operadores a mantener un constante monitoreo de la red y realizar las mejoras pertinentes. En la Figura 22 Se muestra el proceso continuo de planeación que tiene una red.



Figura 22: Planeacion continua de redes. (Metsala. 2015).

La planificación de la red se basa en las condiciones propias del proyecto, el Ingeniero de diseño debe tomar en cuenta las condiciones que estas disponibles para implementación y en base a ellos escoger el modelo más óptimo.

LTE necesita una interconexión de los eNodoBs a través de la interfaz X2, esto en la aplicación real actualmente se utiliza un punto en común entre un grupo de eNodoBs a donde llega el tráfico de todos ellos, la topología de la red dependerá si se cuenta con fibra óptica o con enlace microonda.

La cantidad de saltos desde un Nodo central dependerá de la capacidad del equipamiento obtenido para el despliegue. En El Salvador la topología más utilizada para los despliegues de LTE es la Estrella.

La resiliencia dentro de la red debe estar presente para responder ante fallas de cualquier tipo dentro de la red, estas afectaciones pueden ser completas o parciales. Se debe garantizar desde el diseño que la red se encuentre preparada para enfrentar problemas y tener la capacidad de resolver de manera remota, siempre una recuperación remota será mucho más rápida que una recuperación manual del sistema.

Factor del usuario

Las empresas de telefonía tienen planes propios de la expansión de su red, estos son estructurados con anticipación para cubrir zonas en las que actualmente no se tiene cobertura y en las que se necesita mejorar la capacidad y calidad del servicio.

Estas expansiones requieren una gran inversión económica distribuida a corto y mediano plazo, dado que el país tiene menos de diez años con la tecnología LTE, un ejemplo claro de estos proyectos a gran escala fue la implementación de esta tecnología, una de las empresas nacionales realizó una inversión de \$450 millones de dólares en un periodo de 5 años para poder desplegar a nivel nacional LTE [14].

Estos proyectos son estructurados en conjunto por todas las áreas de la empresa basándose en información obtenida de la red ya implementada, adaptándose a las mejoras tecnológicas e innovaciones que brindan los proveedores de equipo. Los planes de recuperación de Inversión y la relación - costo beneficio es adaptado por cada operador según sea su estrategia de mercado. Los planes de expansión de la red son orientados a satisfacer las necesidades de sus clientes y atraer nuevos suscriptores.

El Salvador fue de los últimos países en la región en implementar LTE, esto en conjunto con la creciente exigencia de una mayor velocidad de navegación por parte de los usuarios, se propició un escenario en el que todos los operadores crearon proyectos de inversión entre 2016 y 2017. En un inicio esta red se implementó en zonas críticas y de alta demanda donde los operadores ya tenían tecnologías brindando servicio (2G, 3G), en el despliegue inicial se cubrieron San Salvador, Santa Ana, San Miguel y con el tiempo se ha ido implementando en las distintas cabeceras departamentales. El operador en base a estudios previos de su red desplegada (2G y 3G) definen zonas donde será implementado LTE. En la Figura 23 se muestran las zonas de cobertura de las redes que actualmente operan en el país, esta información se encuentra en las páginas web de estas empresas [15] [16] [17] [18], LTE sigue expandiéndose a nivel nacional, en este trabajo se presenta la manera en que esta tecnología se está expandiendo.

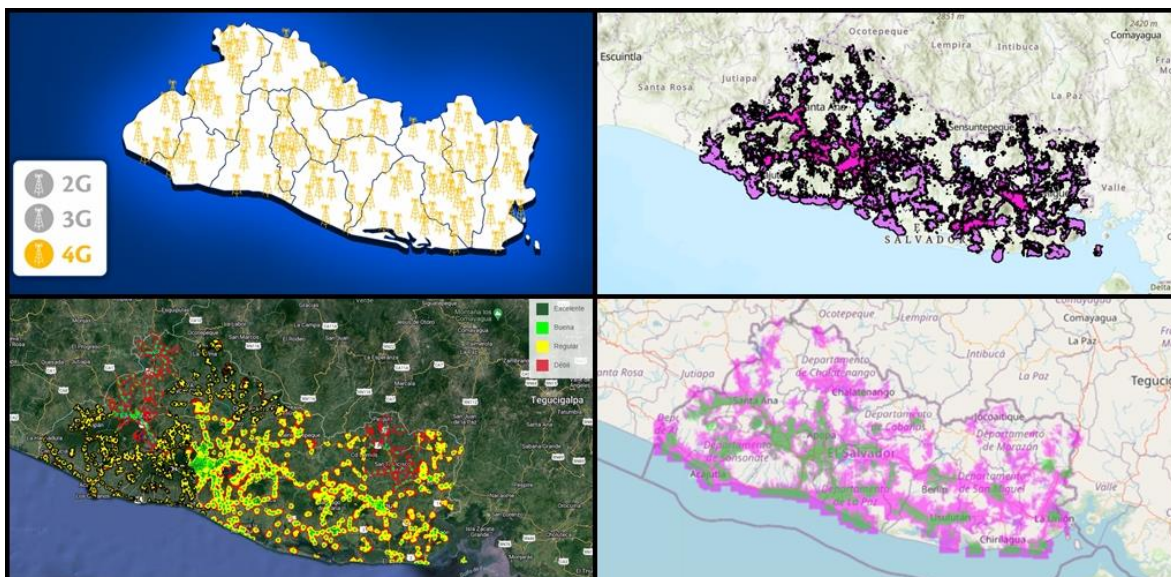


Figura 23: Zonas de cobertura de los cuatro operadores de telefonía en El Salvador. (Henry T. 2022).

Intervención por bajo rendimiento de red: Cuando la red LTE se encuentra implementada en determinada zona, el área comercial se encarga de brindar una campaña intensiva de marketing para alcanzar nuevos clientes y generar mayores ganancias. Esta área se encarga de conocer las necesidades de los clientes, y través de esta información se generan reportes de alta pérdida de clientes por mala calidad del servicio y cantidad de reclamos por mal desempeño de la red. Cuando el operador reconoce que está perdiendo muchos clientes por reclamos de mala calidad de servicio se envía al área de operación para realizar respectiva revisión en la zona, quienes determinaran si el problema se puede resolver o es debido a una saturación de la red y si se requiere una expansión de la red. El área de O&M e Ingeniería realizan una revisión a detalle de la situación, en caso de requerir una nueva estación base, esta propuesta se lleva a evaluación.

El área de monitoreo y operación de la red es quien principalmente maneja los informes de las zonas donde la red está presentando degradación, saturación u otro tipo de anomalía. Estos casos son analizados individualmente para descartar cualquier tipo de falla que esté afectando a los clientes. Si se determina luego de la evaluación que se tiene una alta saturación en la zona, se presenta la información, el área correspondiente lo lleva a evaluación y se determina si se necesita una nueva estación base para cubrir las necesidades actuales.

La expansión de la red a través de la implementación estaciones base deberá tomar en cuenta aspectos económicos para el operador, no se puede ampliar la red en una zona donde no se obtendrá el beneficio económico necesario para poder recuperar la inversión de una manera segura en el tiempo, para ello es necesario realizar estudios de mercado que garanticen que el servicio llamara a nuevos clientes.

Se requiere además un estudio de ingeniería, el cual más adelante se presenta en detalle, acá se realiza el diseño del posible nodo, definiendo ciertas características que satisfagan las necesidades de la zona. La Figura 24 muestra mediciones de usuario final donde se deja ver la baja velocidad de transmisión de datos en una zona urbana, esto es considerado como degradación y bajo rendimiento en la red.

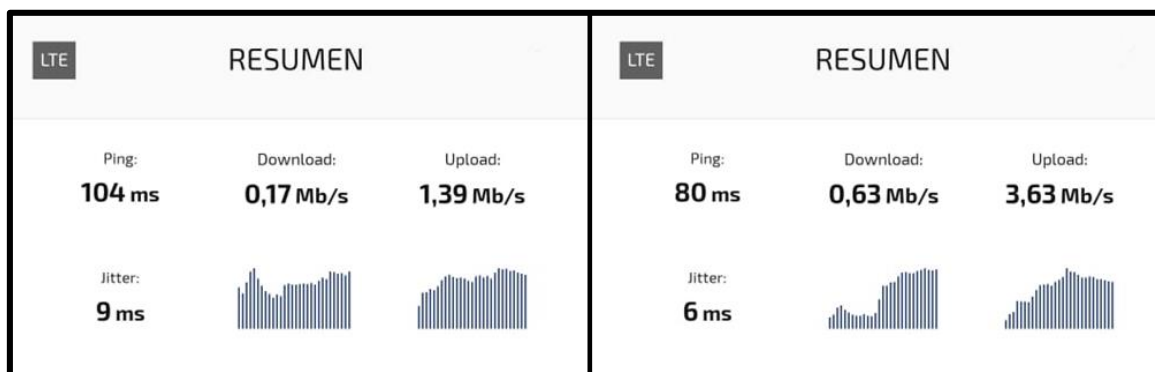
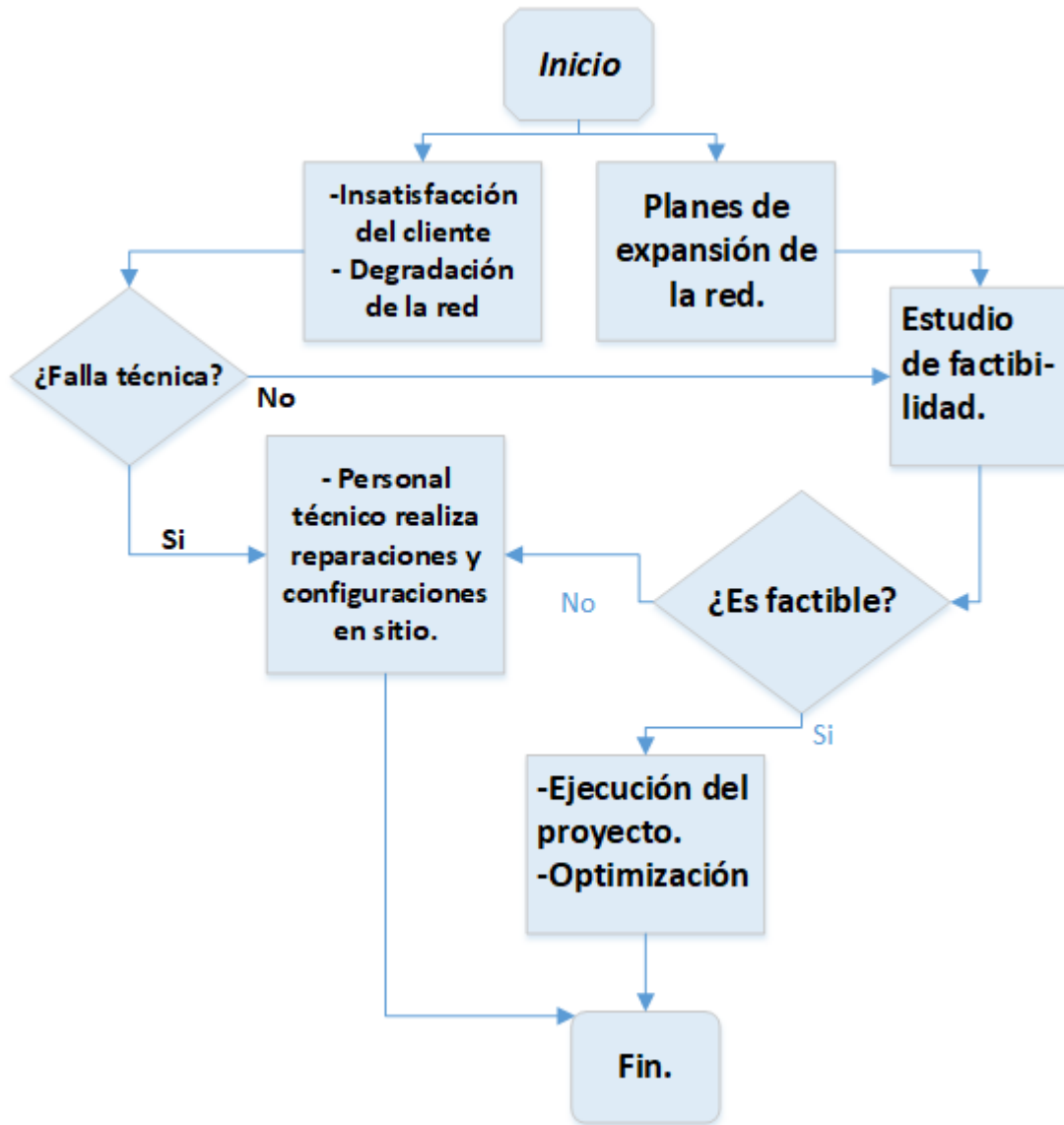


Figura 24: Mediciones de bajo rendimiento de red LTE en zona urbana. (Henry T. 2022).

Si el proyecto es definido como factible, se comienza con la adjudicación del proyecto, el proveedor de equipo configura la estación base según los requerimientos del operador, se realizan mediciones del desempeño de las estaciones base circundantes, los cuales son presentados al operador para verificar la mejoría de su red en la zona específica

En el Diagrama de flujo 1, se muestra de manera muy resumida los pasos generales que se siguen a nivel empresarial para el crecimiento de la red a través de la instalación de nuevas estaciones base [19]:



Despliegue de LTE en El Salvador.

El Salvador tenía la necesidad urgente de poder aumentar la velocidad de transmisión de datos dado el aumento en el uso de dispositivos móviles para todo tipo de actividades de comercio, empresariales, industriales, educativas, etc. La comunicación directa entre personas, grupos de trabajo, actividades educativas y de ocio en línea han tenido un crecimiento exponencial en el país esto debido a la llegada de la pandemia COVID-19. Esto lleva a la saturación de la red móvil en transmisiones de datos, los operadores deben responder de manera inmediata a esta demanda brindando soluciones que sean optimas y económicamente viable.

Los factores de diseño y planeación de redes LTE no tienen limitante solo técnicos, uno de los más importantes que influyen en la manera de desarrollar un proyecto es el presupuesto. En este trabajo se presentan los principales métodos de diseño de redes LTE aplicados en el país.

Superposición LTE (Overlays).

Los operadores nacionales hasta 2016 iniciaron la implementación de LTE en el país, esto representa un atraso de alrededor de ocho años desde que salieron los estándares. Se necesitaba una introducción rápida de estos servicios de datos de alta velocidad. El despliegue de la red LTE inicio con una técnica denominada “Overlay” la cual consiste en superponer esta tecnología sobre el equipamiento existente, esto se puede lograr debido a la flexibilidad de los parámetros de implementación del estándar LTE, diferentes bandas de frecuencia, ancho de banda variable de portadora, diferentes condiciones MIMO [2].

Este tipo de despliegue de LTE permite la reutilización del equipamiento de una estación base, lo abarata el costo de la implementación, es decir que el operador puede reutilizar RRU, antenas y tarjetas controladoras, en la Figura 25 se muestra los componentes básicos de una estación base LTE (eNodeB), el cual se compone de una tarjeta controladora, fibras ópticas de intercomunicación con las Unidades de Radio Remota, Unidades de radio remota, guía de onda y antenas.

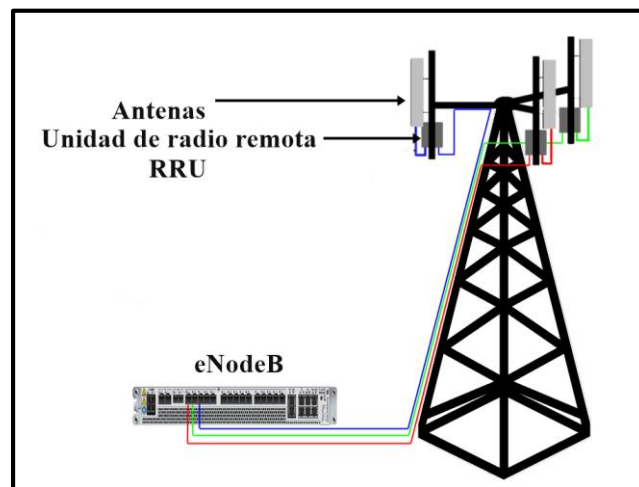


Figura 25: Estructura física de una estación base LTE (eNodeB). (Henry T. 2022).

El equipamiento de una estación varía según la frecuencia de operación, es decir que el equipamiento para 4G no es el mismo a nivel físico para distintas frecuencias. En [5] se muestra las bandas operativas de la arquitectura de LTE. En equipamiento los equipos traen una identificación B5, B2, B8 dependiendo la banda de frecuencias en las que operan.

LTE presenta una capacidad de operar en distintas bandas de frecuencias y con diferentes anchos de banda (Incluyendo 5 MHz) se puede superponer a una tecnología existente, esto brinda un beneficio muy bien visto en términos económicos para los operadores. Este procedimiento de Overlay se puede realizar en todas las bandas operativas disponibles según los estándares de LTE, ya será cada operador quien decida cómo implementar.

La Figura 26 muestra el procedimiento de superposición LTE, en el cual se reutiliza toda la infraestructura existente y solo se configura el eNodeB, parámetros de transmisión y arquitectura E-UTRAN.

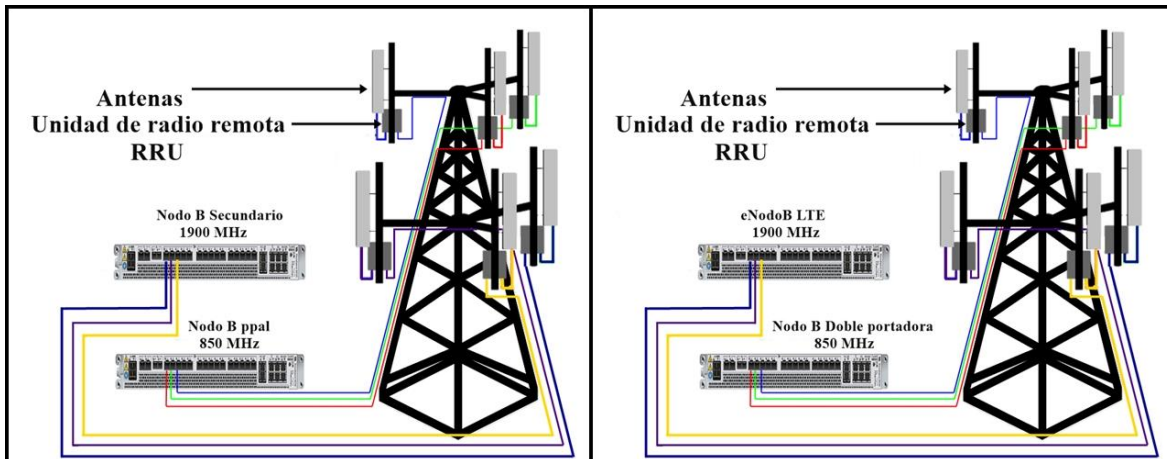


Figura 26: Superposicion LTE. (Henry T. 2022).

Expansiones LTE.

Un criterio de diseño utilizado en el país es el de LTE expansión o LTE secundario, este criterio de diseño no se considera LTE advanced, dado que es un LTE normal instalado paralelamente con un LTE principal del mismo ancho de banda o menor. Esta técnica no todos los operadores la utilizando dado que requiere uso de doble ancho de banda manteniendo una velocidad de LTE básico para los usuarios. Los operadores que no tiene capacidad de poder implementar un LTE Advanced utilizan esta solución para aumentar las capacidades del eNodeB.

Con esta técnica se logra que todos los usuarios en la zona tengan una velocidad de navegación aceptable para las configuraciones dadas. La manera de implementación de un LTE expansión va a depender de las necesidades de la zona:

- Necesidad de mayor calidad y capacidad para los usuarios: Esto se puede lograr simplemente con configuraciones en el eNodeB aun desde manera remota, solamente al equipamiento actual se le configura una segunda portadora con un ancho de banda de hasta 20 MHz si se tiene disponible, con ello se gana que los usuarios que están conectados al nodo tengan una mayor calidad del servicio, disminuyendo la saturación. El LTE expansión que se configura sobre un equipamiento de LTE principal, va a tener las mismas características físicas en direccionamiento y cobertura. Este criterio va a necesitar una licencia nueva por parte del proveedor de equipamiento para el operador.
- Necesidad de mayor alcance en cobertura: Este método de diseño incluye la instalación de un equipamiento independiente al LTE principal, las configuraciones de este LTE expansión son independientes y puede tener ancho de banda, configuración MIMO, direccionamiento de antenas diferente. Con esta sectorización se logra además de brindar una menor saturación, alcanzar mejor cobertura contorno al eNodeB. En toda instalación nueva también se requiere una licencia de operación por parte del proveedor de equipos. En la Figura 27 se muestra este método de diseño.

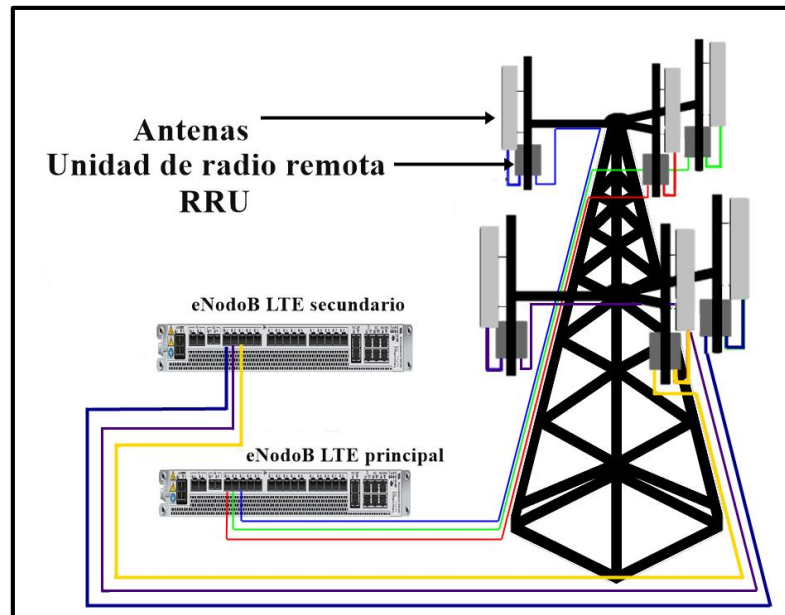


Figura 27: Sistemas expansion LTE. (Henry T. 2022).

LTE 4.5G.

En su Lanzamiento 10 (Release 10) 3GPP presento el estándar avanzado de LTE, en [20] se presenta un resumen de las principales características de esta versión. Este lanzamiento se realizó para que pudiese formar parte tecnologías de cuarta generación definidas por la UIT en las IMT-ADVANCED. En el país esta mejora del sistema LTE se veía retrasada por las limitaciones del espectro asignado a los operadores, en 2019 SIGET subasto 120 MHz de espectro en la banda AWS, de los cuales dos operadoras se quedaron con el 75% del espectro subastado [21]. Con esta nueva parte del espectro disponible se abrió la posibilidad que las empresas pudiesen implementar LTE avanzado o que se conoce a nivel de marketing como LTE 4.5 G.

Dos empresas nacionales ya tienen implementado sistemas de LTE avanzado, las cuales brindan altas velocidades de transmisión de datos. El beneficio para el usuario final dependerá de la cantidad de usuarios conectados a una celda y la calidad del canal que esté presente. Entre menor sea el número de usuarios y una calidad de canal optima se le programaran múltiples portadoras obteniendo un rendimiento significativo para el usuario final.

En la Tabla 11, se realiza una comparación las velocidades de trasmisión de dato y latencia en El Salvador, del año 2018 y 2021. La información se ha obtenido de [22] [23], ahí se especifican las condiciones en las que se realizaron estas mediciones, la Figura 28 tomada de [23] muestra un promedio de la cantidad de unidades móviles en el país entre las cuales se realizaron estas mediciones. Estos dos años han sido seleccionados por que es donde se ve marcado el inicio de la introducción de LTE avanzado con la subasta del espectro por parte de SIGET en la banda AWS, el cual provee mayores velocidades al usuario final que un LTE normal, es de recordar que LTE se comenzó a implementar desde 2016.

Pruebas de velocidad y latencia en El Salvador. Comparación 2018 y 2021.				
Año	2018		2021	
Detalle.	DL (Mbps)	UL (Mbps)	DL (Mbps)	UL (Mbps)
Velocidad media del país.	9.62	4.6	17.65	7.94
Velocidad promedio del operador mejor evaluado.	18.09	8.34	25.4	8.27
Velocidad promedio del operador peor evaluado.	6.37	5.44	10.33	5.44
Velocidad media en San Salvador del operador mejor evaluado.	18.46	8.87	25.06	8.42
Velocidad media en San Salvador del operador peor evaluado.	5.78	6.03	10.2	5.8
Latencia promedio del país [ms].	56		23	

Tabla 11: Comparación de velocidad de transmisión de datos 2018 – 2021. (H. Torres, 2022)

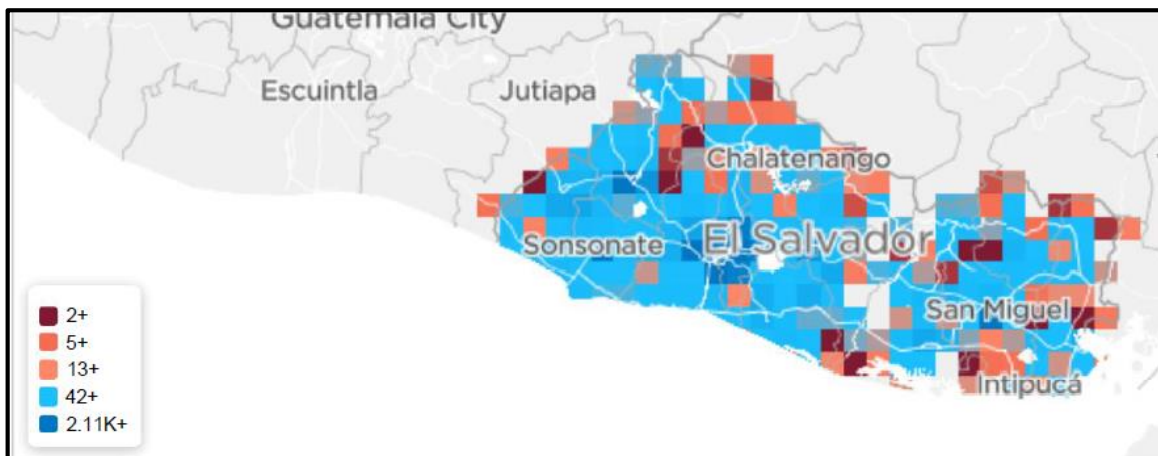


Figura 28: Cantidad de mediciones de velocidad de transmisión de datos, El Salvador. (Speed Test. 2021).

El año 2021 en comparación con 2018 El Salvador aumento su velocidad de descarga de datos en un 83.47%, esto se debe a la expansión del espectro para las telecomunicaciones que permitieron que se implementara en muchas zonas del país LTE avanzado, no obstante, las empresas que no se postularon para poder participar en la subasta de espectro han tomado la decisión de mejorar sus redes LTE actuales, implementando mejoras como lo son configuraciones MIMO 4X4, MIMO 2X2. Esto para mantenerse competitivos en la actualidad del país. Según los datos de 2021 existe una diferencia de velocidad media nacional entre el operador con más baja velocidad y el operador de mas alta velocidad, de 15.07 MHz.

Esto claramente es una desventaja para los operadores que no tienen más espectro disponible y aunque se han tratado de mejorar las redes utilizando tecnologías como MIMO se debe complementar con planes llamativos a los clientes para poder mantenerse competentes dentro del mercado salvadoreño.

Factor Técnico

Espectro radio eléctrico nacional: En El Salvador las operadoras de telefonía comenzaron con los despliegues de redes LTE en el año 2016, dado que los estándares permiten una amplia gama de bandas de frecuencia para su implementación, lo que permite a estas empresas realizar procedimientos denominados overlays (Superposiciones), que en resumen es utilizar las mismas frecuencias y anchos de banda asignadas para la implementación de esta nueva tecnología.

Hasta 2019 el país contaba con un total de 207 MHz del espectro dedicado para la telefonía móvil [24], a finales de ese año el gobierno subastó 120 MHz de la banda AWS de los cuales 90 MHz fueron repartidos entre dos operadores que ya estaban funcionando en el país, esto eleva a un total de 297 MHz el espectro asignado a la telefonía [25].

En la Tabla 12 se muestra el detalle de las bandas de frecuencia en las que operan las empresas de telefonía en el país [26]:

Banda	UP Link	Down Link
850 MHz	824-849 MHz	869-894 MHz
900 MHz	849.2-914 MHz	939.2-959 MHz
AWS	1,710-1,755 MHz	2,110-2,155 MHz
1900 MHz	1.850-1,910 MHz	1,930-1,990 MHz
2.6 GHz	TDD: 2,570 - 2,620 MHz	

Tabla 12: Bandas de frecuencia utilizadas para telecomunicaciones móviles. (A. Calderón. 2022).

Las tecnologías de cuarta generación definidas por la UIT, establece que el ancho de banda debe ser escalable [27]. En el estándar LTE de 3GPP [5] se define que puede ser utilizado en un amplio rango de frecuencias por lo que los operadores tienen distintas maneras de implementar LTE, utilizando la misma cantidad de espectro que tienen concesionada. Esta característica de 4G brinda la opción de realizar superposiciones rápidas para migrar las redes existentes (2G y 3G) a 4G. La determinación del ancho de banda que se utilizará para la implementación de LTE dependerá del espectro concesionado y las necesidades del área de implementación.

El ancho de banda en conjunto con otras tecnologías, forman parte de las características principales para que los usuarios finales de la red alcancen velocidades altas.

LTE se presentó en Release 8 de 3GPP [28] con un ancho de banda máximo de 20 MHz, con LTE ADVANCED y agregación de portadora, se pudo lograr un ancho de banda de hasta 100 MHz con 5 portadoras transmitiéndose a la vez [29]. A nivel nacional se utilizan anchos de banda que normalmente están entre 5, 10 y 15 MHz; aunque con la ampliación del espectro concesionado en 2019 para tecnologías móviles, algunos operadores han comenzado a utilizar anchos de banda más allá de 20 MHz, brindando capacidades de 4.5G LTE - Advanced.

La Tabla 13, muestra los anchos de banda que actualmente están siendo utilizados por las empresas de telefonía para la explotación de sus servicios:

Banda	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4
850 MHz	0	25 MHz	0	25 MHz
900 MHz	0	0	36.8 MHz	0
AWS	40 MHz	50 MHz	0	0
1900 MHz	50 MHz	20 MHz	20 MHz	30 MHz

Tabla 13: Bandas de frecuencia utilizadas para telecomunicaciones móviles. (A. Calderón. 2022).

Estaciones base según frecuencias de operación: En [30] se define RSRP (Potencia recibida de señal de referencia) este parámetro es medido por el móvil y se definen rangos de potencia aceptable para el estándar LTE, la Figura 28 muestra los rangos de potencia aceptables [31].

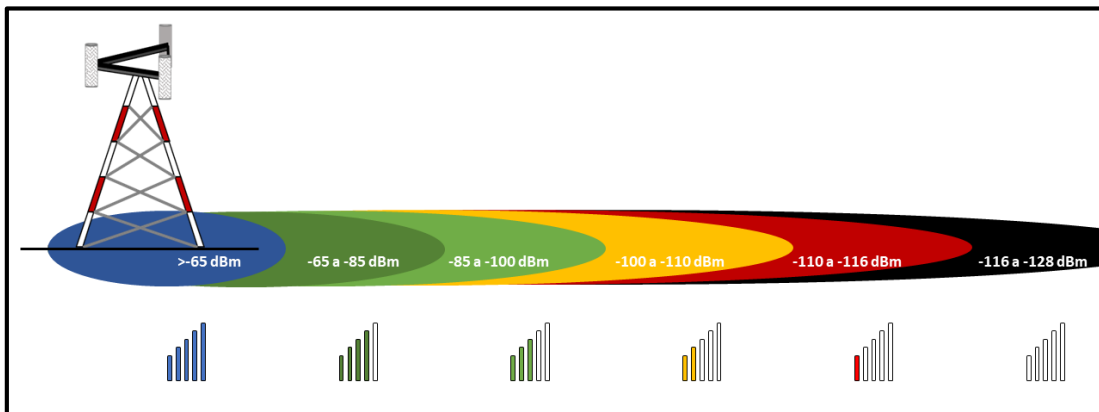


Figura 29: Cantidad de mediciones de velocidad de transmisión de datos, El Salvador. (Aras Technologies. 2018).

Un parámetro importante que determina el alcance máximo de estos valores de potencia es la frecuencia en la cual se está transmitiendo, de las ecuaciones de Friss [32] se establece que a mayor frecuencia utilizada existe una mayor atenuación, lo que provoca un menor alcance. Este principio de radiofrecuencia se traduce en que los operadores que tienen frecuencias asignadas altas deberán tener una mayor cantidad de estaciones base por zonas de operación, respecto a los operadores que tienen frecuencias concesionadas más bajas. Esto lleva a que los operadores que necesitan más estaciones base para operar tienen planes de recuperación de inversión más estrictos y rigurosos.

Las frecuencias bajas cubren más espacio territorial y teóricamente les es más fácil poder evadir los obstáculos en su trayectoria (menor atenuación), en la realidad esto debe ser evaluado en campo (Drive Test) para verificar que toda la zona esperada tenga la cobertura necesaria para mantener una calidad óptima del servicio, dependiendo estas mediciones se podrá determinar si se necesita más estaciones base para poder brindar mejor calidad.

La Figura 30 muestra una comparativa entre dos operadores, uno operando en la banda de los 1900 MHz [17] y otro operando en la banda de 850 MHz [18], esta comparativa está basada en información de cobertura de la red de cada operador, cabe aclarar que en esta comparativa están involucrados otros parámetros aparte del alcance por frecuencias de operación, la comparativa se realiza entre la frontera “La Hachadura” y el desvío Kilo 5 de la carretera al puerto de acajutla. Podemos determinar a simple vista que el operador que opera en la banda de 1900 MHz (Izquierda) tiene una mayor cantidad de antenas para brindar cobertura en la misma área de carretera que un operador que trabaja en 850 MHz. Este parámetro no es estrictamente una limitación de diseño, dado que la cantidad de estaciones base por zona se determinará dependiendo de la cantidad de usuarios proyectados, tipo de tráfico y calidad del servicio.



Figura 30: Comparativa de cantidad de estaciones base para una red operando en la banda de 1900 MHz y en 850 MHz. (H. Torres, 2022)

Sectorización y rehúso de frecuencias: En [3] se muestra que en sistemas celulares la interferencia se puede distinguir en dos tipos:

Interferencia intracelular: Es cuando se tiene interferencia en las transmisiones de usuarios servidos por la misma celda.

Interferencia intercelular: Es cuando la interferencia afecta las transferencias a usuarios conectados a distintas celdas.

En LTE no existe la interferencia intracelular, el sistema consta de una función llamada scheduling la cual evita colisiones de multiusuario al estar en un canal común, la cual planea el uso de recursos de radio por usuario de manera dinámica, según las exigencias QoS.

En LTE si existe interferencias intercelulares para usuarios con el mismo recurso asignado servido de distintas celdas, lo que produce: Utilización de modulación y codificación más seguro, disminuyendo la eficiencia espectral y la cantidad de bits transmitidos. Aumento de la potencia de transmisión lo que genera un alto consumo de energía en el móvil y rápido desgaste de batería. Incremento de carga de señalización.

En GSM y 3G la interferencia intercelular se reducía con la planificación de frecuencias desde el despliegue inicial, en LTE dado que se busca una alta transmisión de datos y alta eficiencia espectral se tienen todos los recursos disponibles en todas las celdas de la red, esto es lo que provoca la alta interferencia intercelular. Para reducir esta interferencia se utiliza la función *InterCell Interference Coordination (ICIC)*, esta función gestiona de forma dinámica la interferencia entre celdas. Esto se logra controlando la potencia de transmisión de cada recurso en todos los eNodoB, estas restricciones que crea ICIC también las toma en cuenta la función Scheduling para evitar interferencia intracelular.

Los indicadores de interferencia usados por ICIC, estos son proactivos y reactivos. Los indicadores reactivos informan a los eNodoB vecinos que detecta una alta interferencia de un determinado recurso Y_i , los nodos vecinos regulan la potencia del mismo recurso Y_i disminuyendo así la alta interferencia. Los indicadores proactivos informan a los eNodoB vecinos que se hará uso de cierto recurso X_i en determinado momento con lo cual se busca que las celdas vecinas no hagan uso de ese mismo recurso X_i . La Figura 31 muestra el uso de estos indicadores ICIC [3].

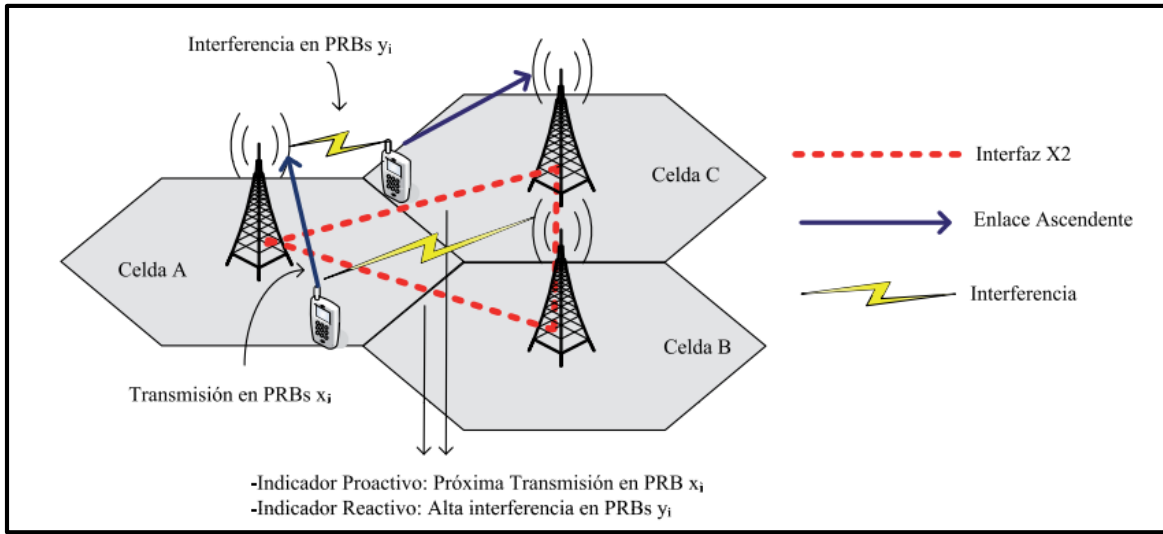


Figura 31: Uso de indicadores ICIC para limitar interferencia intercelular. (R. A. Comes, 2010).

Esta función permite que se genere un rehúso de frecuencias de manera dinámica en LTE, la cual limita el uso de una frecuencia en una celda mientras es utilizada en otra. este principio ha generado distintas maneras de utilizar las frecuencias en los grupos de eNodoBs, la Figura 32 muestra algunos esquemas de rehúso de frecuencias utilizados implementando estrategias ICIC.

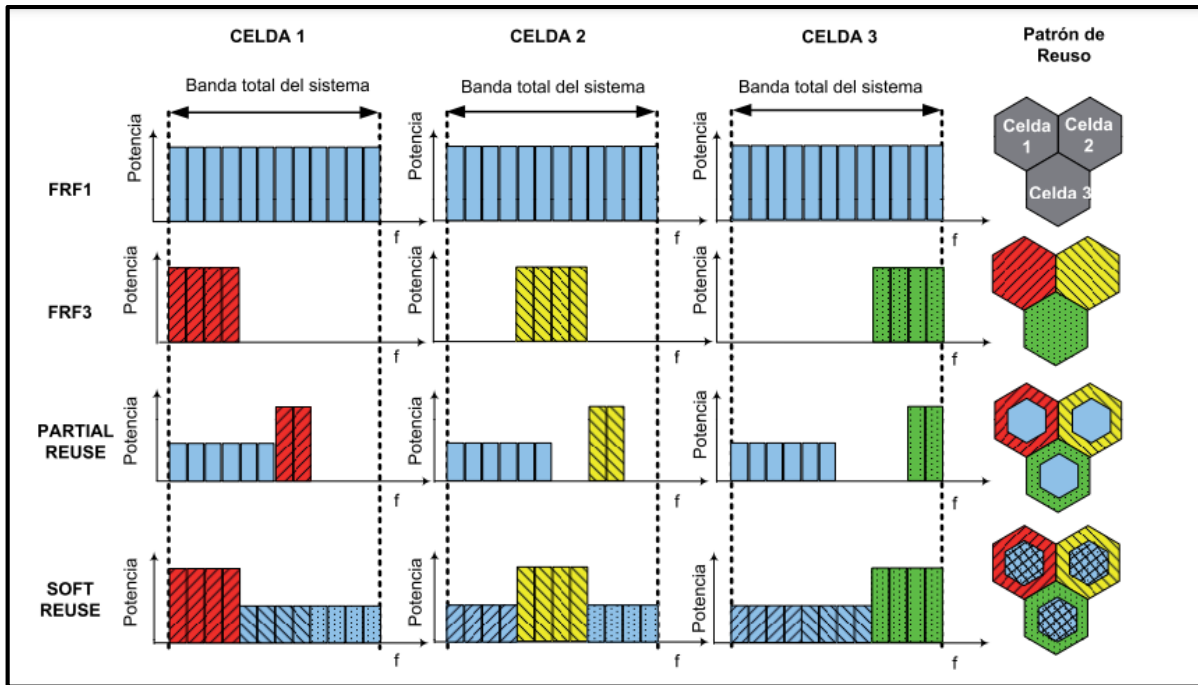


Figura 32: Esquemas de rehúso de frecuencias en LTE, mediante técnicas ICIC. (R. A. Comes, 2010)

MIMO en LTE: La diversidad espacial utilizando la tecnología MIMO es de las principales características de LTE, esta se logra mediante el equipamiento que brinda los proveedores de equipo, esta configuración la define por el operador cuando define los parámetros de E-UTRAN [28], actualmente en el país se utiliza configuraciones 2X2, 4X4. Estas configuraciones aplicadas a LTE

Advanced permiten alcanzar velocidades muy elevadas de transmisión las cuales son consideradas previas del 5G.

De [6], utilizando Tabla 7.1.7.1-1, Tabla 7.1.7.2.1-1, Tabla 7.1.7.2.2-1. Podemos determinar valores pico esperados de determinadas configuraciones MIMO para enlace descendente, la configuración MIMO 4X4 podría llegar a ser el doble de velocidad que la configuración 2x2. La Tabla 14 muestra un detalle de estas velocidades teóricas que puede alcanzar LTE utilizando configuraciones MIMO.

Ancho de banda portadora (MHz)	Bloque de recursos	SISO	MIMO 2X2	Up Link	
		Pico de DL (Mbps)	Pico de DL (Mbps)	Pico de UL (Mbps) 16 QAM	Pico de UL (Mbps) 64 QAM
1.4	6	4.4	8.8	3	4.4
3	15	11.1	22.1	7.5	11.1
5	25	18.3	36.7	12.6	18.3
10	50	36.7	75	25.5	36.7
15	75	55.1	110	37.9	55.1
20	100	75	150	51	75

Tabla 14: Velocidades máximas según ancho de banda y configuración MIMO para LTE. (3GPP, 2014)

La implementación de esta configuración viene en el equipamiento, se debe configurar el eNodeB con la característica MIMO deseada y complementar con el equipo radio adecuado y la antena compatible con dicho radio. El equipo de radio (RRU) tiene muchas variantes en el mercado, el ingeniero de diseño plantea las necesidades esperadas y se estudian propuestas de los proveedores para escoger la opción más conveniente. La Figura 33 podemos apreciar un RRU utilizado en estaciones base, conjuntamente se muestra las características principales de este equipo.

Características principales de la unidad de radio remota (RRU)

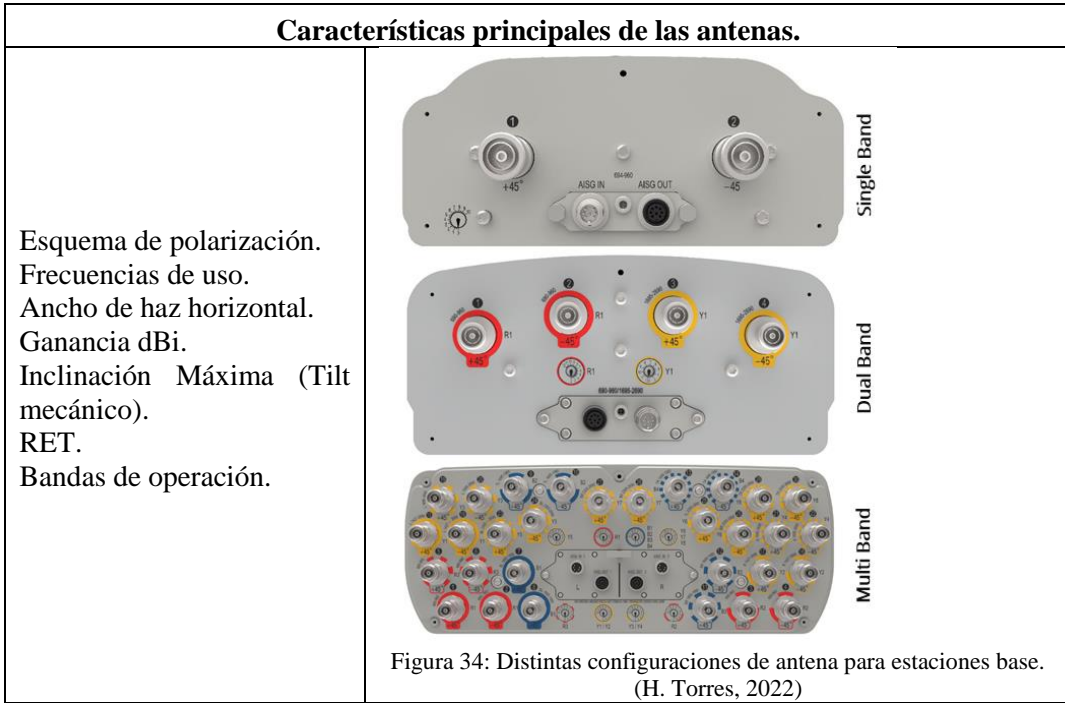
Bandas 3GPP compatibles.
Cantidad de portadoras para 2G.
Cantidad de portadoras para 3G.
Ancho de Banda max. Para LTE.
Esquema MIMO soportado.
Potencia máxima de salida.
Compatibilidad RET.



Figura 33: RRU utilizado en estaciones base. (H. Torres, 2022)

Las antenas al igual que los RRU son la parte esencial para el funcionamiento de la tecnología MIMO en LTE, dependiendo el diseño que el operador defina se pueden optar por diferentes modelos de antena disponible en el mercado, la Figura 34 muestra las diferentes configuraciones de antenas utilizadas para estaciones base y las principales características que definen los tipos de antena.

Según las necesidades de la implementación, el área de planificación del operador decidirá las características de RF que deberán tener los radios y antenas a instalar y en muchos casos como ya se habló anteriormente verificar que los equipos instalados sean compatibles para la realización de procedimientos de superposición LTE.



Capacidad de equipamiento: Los equipos utilizados en una estación base LTE (eNodeB) pueden ser de diferentes proveedores, en la actualidad dos proveedores de equipo están siendo utilizados en El Salvador principalmente, Huawei y Ericsson. Estos proveedores dan a los operadores un eNodeB que físicamente es una tarjeta electrónica a la cual se le cargan las configuraciones del funcionamiento del eNodeB, esta tiene comunicación directa con el equipo radio y sirve de conexión a las demás interfaces del sistema. La Figura 35 muestra equipamiento utilizado en redes de telefonía.

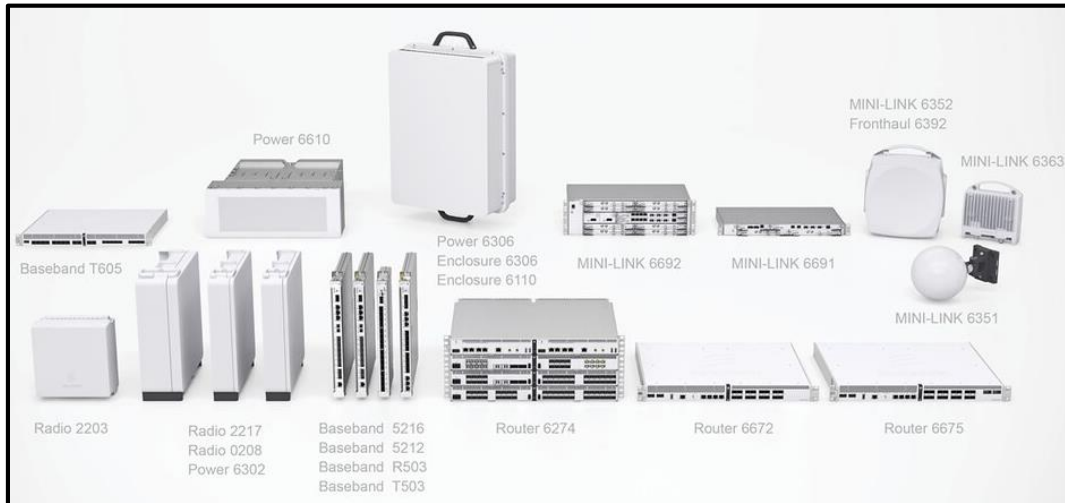


Figura 35: Equipamiento utilizado en redes de telefonía. (Imagen libre, 2022).

El uso de estos equipos es mediante una licencia, la cual limita entre otros parámetros la cantidad de usuarios que pueden estar conectados, es decir la limitación de usuarios no solo es por la configuración de parámetros de RF sino también las restricciones con las que se compra el equipo de operación. La Tabla 15 muestra las capacidades de los equipos controladores que los fabricantes venden a los operadores, el ingeniero de planeación tiene que decidir los equipos que se adecuen a la estrategia de despliegue y planes económicos empresariales.

Capacidades LTE para tarjeta controladora	
Sistema	Radio Macro
Duplexación LTE	FDD y TDD
Usuarios conectados	4000
Enlace descendente	600 Mbps
Enlace ascendente	250 Mbps
VoIP FDD	1000
VoIP TDD	500
Celdas	12
Antena	480 MHz BW

Tabla 15: Capacidades máximas de tarjeta controladora de LTE. (3GPP, 2014).

Interconexión de estaciones base: En este criterio se evalúa el medio por el cual se interconecta un eNodeB al resto de la red, se limitará esta explicación a lo que llamaremos última milla de conexión del eNodeB que permitirá como máximo un salto en el camino físico hacia el nodo, este paso es importante para el diseño por el costo que involucra.

En el país se utilizan dos medios para la interconexión de última milla de los eNodeB:

- **Fibra óptica:**

Una conexión de fibra óptica del eNodeB es la opción más favorable dado que no presenta problemas de limitantes en capacidad ni rendimiento como otros métodos de interconexión. Dada la pequeña extensión territorial del país las líneas de fibra óptica tienen cubierta toda la zona urbana y ha alcanzado muchas zonas en el área rural, la limitante principal para la introducción de fibra óptica en una determinada zona es la complejidad del terreno para la instalación de postes y las regulaciones municipales. La instalación de postes para líneas telefónicas o de fibra óptica para telecomunicaciones no tiene una regulación directa por un ente de gobernación, más que el municipal, estas regulaciones muchas veces complican el desarrollo de este método de interconexión, como el factor económico juega un papel importante en cada parte del proceso de diseño de la red, en el caso de la transmisión no es la excepción dado que se debe considerar que el país las municipalidades pueden llegar a cobrar hasta \$10.00 mensuales por poste instalado para estos fines. Aun con estas limitaciones de implementación de fibra los operadores hacen grandes apuestas para seguir interconectando sus nodos existentes y nuevos a través de fibra óptica, tanto así que algunos operadores en el país cuentan con más del 50% de conexiones de estaciones base a través de fibra óptica [33]. La Figura 36 muestra los hilos de fibra normalmente utilizados para la interconexión física de eNodeBs.



Figura 36: Hilos de fibra óptica utilizados para la interconexión de eNodeBs. (Imagen libre, 2022).

- Enlaces microonda:

A pesar que la fibra óptica sigue ganando terreno en los métodos de interconexión de eNodeB, los enlaces microonda siguen siendo una solución viable para la implementación de LTE. Esta es la mejor opción para poder llegar a lugares que difícilmente se llegaría con fibra o el costo de llevar fibra hasta la zona sobrepasa el presupuesto para la implementación. Las condiciones del enlace se ven afectadas en calidad debido a las condiciones climáticas, los anchos de haz de antenas son muy angostos (1 grado y medio) por lo que existen requisitos especiales para la instalación, alineación y sujeción robusta ante el viento. En el caso de LTE se puede crear un efecto de interferencia por RF esto debido a anchos de banda grandes y modulaciones de orden superior, los cuales se ven aumentados considerablemente con LTE advanced, por lo que si no se realiza un buen diseño previo podría presentar problemas una vez instalado el eNodeB, de manera general para LTE se recomienda el uso de fibra óptica para las interconexiones. La Figura 37 muestra un ejemplo de interconexión de estaciones base por enlace microonda.

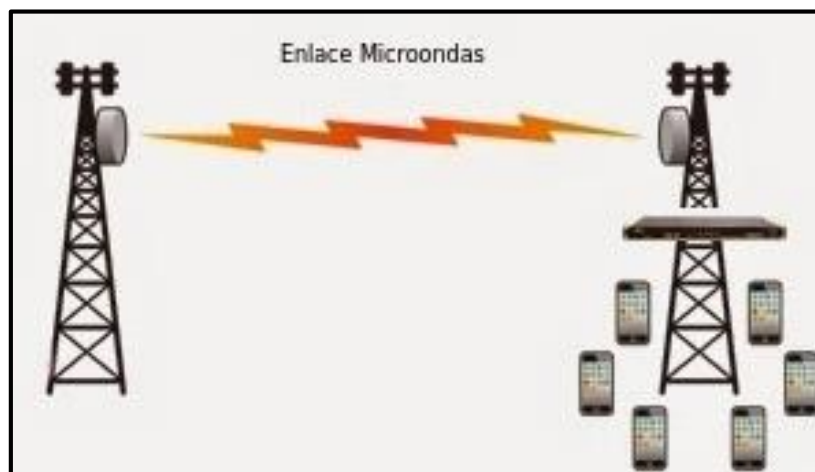


Figura 37: Interconexión de estaciones base por enlace microonda. (Imagen libre, 2022)

Infraestructura externa a los operadores: Dado que los operadores deben estar buscando siempre como mejorar sus redes para mantener a sus usuarios y ganar nuevos suscriptores, es de gran ayuda analizar las propuestas de ubicaciones que brindan empresas dedicadas a la construcción y mantenimiento de estructuras para telecomunicaciones, así el operador puede verificar el lugar óptimo para la instalación de sus equipos, arrendarlo y montarse en la zona en un tiempo mucho menor que realizar un procedimiento de instalación de torre propia. Ejemplo de ello es la empresa estadounidense SBA [34], la cual brinda soluciones a los operadores nacionales y a otros países de la región.

Para poder tener un panorama general de las soluciones que brindan estas empresas, se ha revisado la aplicación de uso libre en la app store para Android llamada sitios SBA [34], en la cual se pueden observar los sitios que tienen instalados en el país y un operador fácilmente puede solicitar información e iniciar un proceso de arrendamiento en alguna zona que se desee mejorar la calidad o alcanzar nuevas zonas sin cobertura. La Figura 38 muestra la interfaz de los sitios instalados en centro américa.

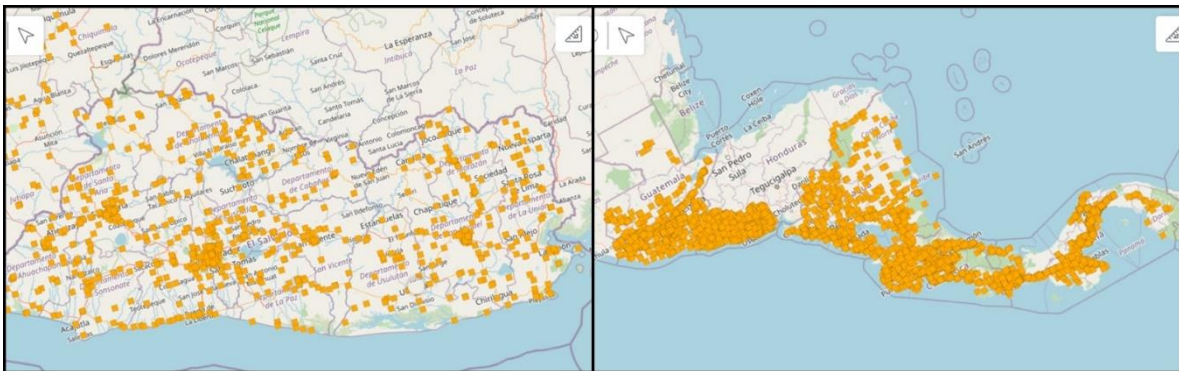


Figura 38: Imagen satelital de los sitios para telecomunicaciones en El Salvador y Centro América. (SBA, 2022).

Algunos beneficios del arrendamiento de estructura de telecomunicaciones son:

- Pagos municipales son realizados por el dueño de la infraestructura.
- Eliminación del costo de mantenimiento de perímetro y estructura.
- Reducción de costos de implementación.
- Implementación rápida.

Algunas desventajas son:

- La co - ubicación con otros operadores restringe a ubicarse en la altura de torre que el dueño tenga disponible.
- El costo de ubicación es variable, según sea la zona, tipo de infraestructura y altura en torre.
- En muchos casos no es viable que sean nodos principales, dado que el operador no tiene acceso libre.

Simulaciones de red

Cuando un operador decide la ampliación necesaria en una zona determinada, luego de la instalación de infraestructura o contrato de arrendamiento, se procede a realizar verificaciones en sitio:

Inspección en sitio: Es el procedimiento mediante el cual el operador hace un reconocimiento de la infraestructura donde se instalará, se realiza el levantamiento de adecuación, secuencias de fotografías a la altura designada para tener un panorama de línea vista 360°. Con esto se ayuda a los Ingenieros de planificación para determinar los parámetros de RF, azimuth, Tilt eléctrico y mecánico. Todo este procedimiento se pudiese realizar a través de herramientas de simulación y satélite. Con estos datos se realiza el documento de inspección, el cual contiene la información recolectada en el sitio y la propuesta de instalación, esta se lleva a evaluación a gerencia, puede ser aprobada o modificada y aprobada para implementación. Las características más importantes del reporte de inspección son:

- Detalle de levantamiento en sitio.
- Propuesta de adecuación e instalación en sitio.

El Ingeniero de planeación en base a la información obtenida, realiza una simulación de la instalación ingresando los parámetros determinados y configurando según sea la necesidad en la zona. Los parámetros de azimuth, tilt eléctrico y mecánico son determinado mediante software de simulación con Licencia, como Atoll.

Los parámetros más importantes en el diseño y simulación de una estación base para LTE son:

- Identificación del sitio (MNC, MCC, Nombre, ID, TAC, Cluster).
- Ubicación exacta (Latitud, longitud, elevación respecto al mar).
- Cantidad de portadoras.
- Ancho de banda de portadora.
- Cantidad de sectores.
- Máxima potencia de transmisión por sector.
- Configuración MIMO.
- Frecuencia de operación (earfcnDL y earfcnUL).
- Parámetros de RF (Altura de antena, azimuth, tilt mecánico, tilt eléctrico, RRU, Configuración de antena, ancho de haz de antena, método de propagación).
- Parámetros de tráfico: Servicios, tipo de movilidad esperada, tipo de UE, perfiles de usuario, zonas rurales, urbanas, sub urbanas.
- Método de propagación.

Se debe determinar qué tipo de zona y tráfico de usuarios es el que se planea tener en una zona, se pueden hacer varias distinciones entre los escenarios de implementación, en El Salvador algunos operadores dividen el tráfico de tres maneras [19]:

- Diseño para cobertura de capacidad y calidad. Se priorizará la calidad de señal brindada a cada usuario, por lo cual se instalan celdas pequeñas para cubrir demandas de áreas pequeñas, aumentando la calidad de los usuarios en esa zona, ejemplo de ellos son los centros comerciales, en los cuales puede haber antenas secuenciales brindando capacidad de mantener a todos los suscriptores conectados a la vez.
- Diseño para cobertura de señal. Se priorizará la cobertura en un área mayor, cuando exista una saturación de usuarios la velocidad de navegación individual de un UE se verá reducida,

los eNodoB tienen la capacidad de informar que están llegando a su límite de capacidad, esta está determinada por la capacidad física del equipo y la licencia obtenida por el operador para su funcionamiento. Ejemplo de estas zonas son algunos tramos de la carretera a Comalapa y la carretera longitudinal del norte.

- Zonas VIP. Las zonas VIP son las consideradas como las zonas de alta actividad comercial. Los operadores se preocupan por brindar la mejor experiencia para el usuario en esas zonas debido a distintos factores entre ellos las capacidades económicas de poder tener acceso a UE con categorías altas, alto tráfico de datos de zonas empresariales, embajadas, etc. Estas zonas se debe implementar las mejores configuraciones que el operador tenga para brindar altas expectativas de la red. Existen también zonas VIP para el operador y no siempre estas zonas son Urbanas. Un operador menciona que su zona VIP en el país es la zona de metapan, una zona en que tienen alto ingresos prepagos y por ello la empresa está invirtiendo grandes cantidades en mejoramiento de la calidad de la red.

Se trata de aplicar el concepto de gemelo digital en una red LTE mediante la cual podemos simular y predecir el comportamiento de los eNodoB que se agregan a la red. La simulación que se realiza a continuación es para predecir el comportamiento de la cobertura en la zona de centro comercial las terrazas San Salvador, en la zona determinado operador está presentando degradación en la red LTE por lo que se ha decidido implementar un nuevo eNodoB. Se simulará y predecirá el funcionamiento a través del modelo digital. Para que la simulación sea más apegada a la realidad se han agregado 2 eNodoB más cercanos y se compara el funcionamiento de la red antes y después de la implementación.

Para la simulación de redes LTE es común que los operadores utilicen el software con uso bajo *licencia* llamado Atoll. En este trabajo se limitó a utilizar el software para diseño y presentar los resultados. Las características del eNodoB simular están incluidas en la Tabla 16.

Configuraciones de eNodeB para simulación	
Duplexacion	FDD
Sectores	3
Banda de operación	1900 MHz
BW DL/UL	15 MHz
Azimuth	85/140/310
Tilt mecánico	0
Tilt eléctrico	0/4/3
MIMO	2X2
Altura de antenas	21 m
Antenas	65 / 18 dBi
Modelo de propagación	Erceg-Greenstein.
Rango de celda	15000 m
Tipo de trafico	Dense Urban

Tabla 16: Parámetros de configuración eNodeB LTE. (H. Torres, 2022).

La simulación consiste en predecir el comportamiento de un eNodeB nuevo en la zona del centro comercial las terrazas, donde los usuarios se quejan de bajas velocidades de transmisión. Se analizará el gráfico de RSRP y RSRQ. Se han agregado dos sitios vecinos para verificar el comportamiento antes de la instalación. La Figura 39, muestra dos eNodeB con relleno oscuro en la imagen, son los eNodeB existentes, el eNodeB sin relleno es el que se va a predecir el funcionamiento.

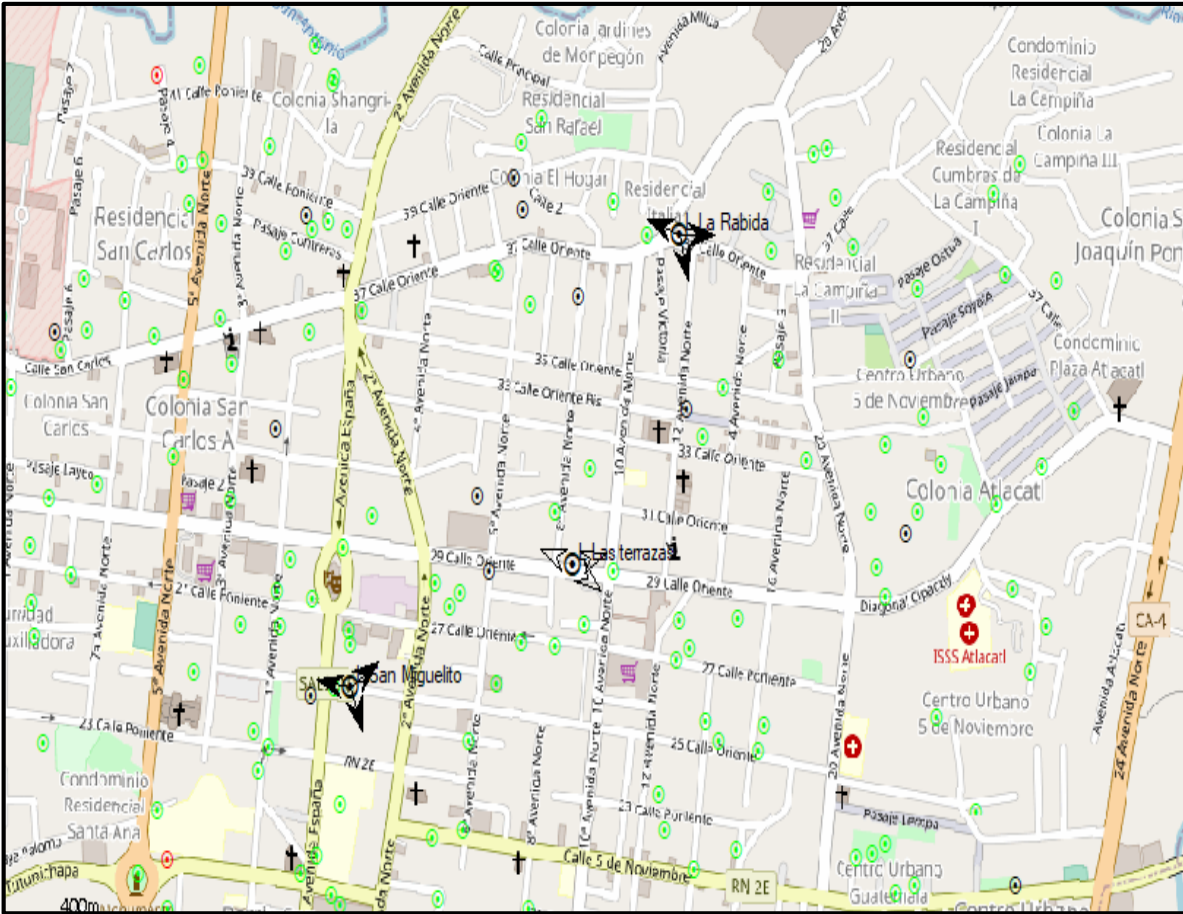


Figura 39: eNodeBs a implementar en la simulación. (H. Torres, 2022)

En la Figura 40, podemos observar los valores de recepción de la señal de referencia RSRP, la muestra zona del centro comercial las terrazas como borde de celda lo que provoca interferencias y un bajo rendimiento a los usuarios cercanos, por la elevación del terreno se ve que es afectada la cobertura del eNodeB San Miguelito. La recepción de la calidad de la señal de referencia antes de la implementación es mala en la zona de estudio.

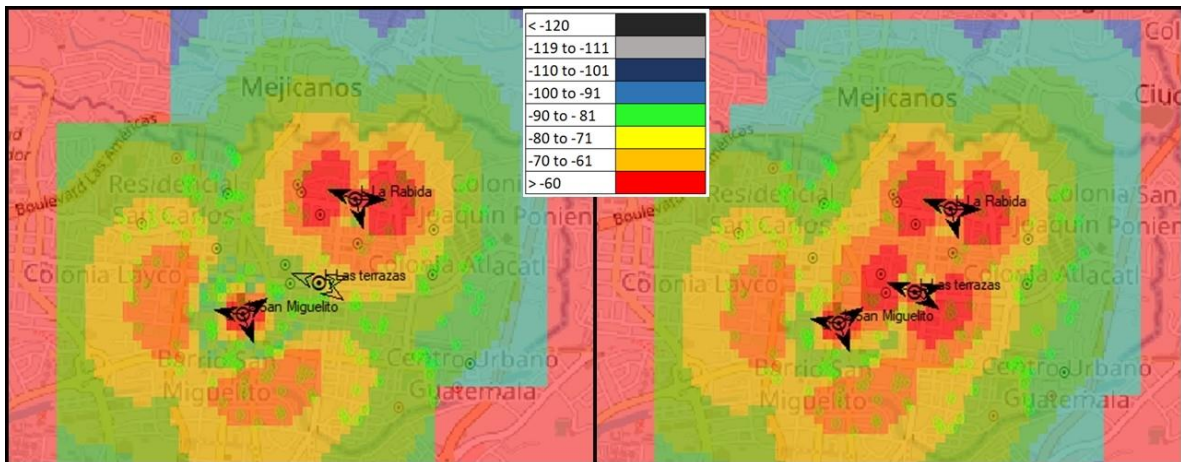


Figura 40: Valor de RSRP esperado en la zona. (H. Torres, 2022).

La calidad de la señal de referencia RSRQ en el lado derecho de la Figura 41, muestra que la zona del centro comercial la terraza si se tiene una alta degradación en la calidad de la señal y al instalar el nuevo eNodoB la calidad de la señal aumenta en la zona, pero se presenta una alta degradación en la calidad de la señal en la zona de la colonia Atlacatl y el Instituto Nacional INFRAMEN.

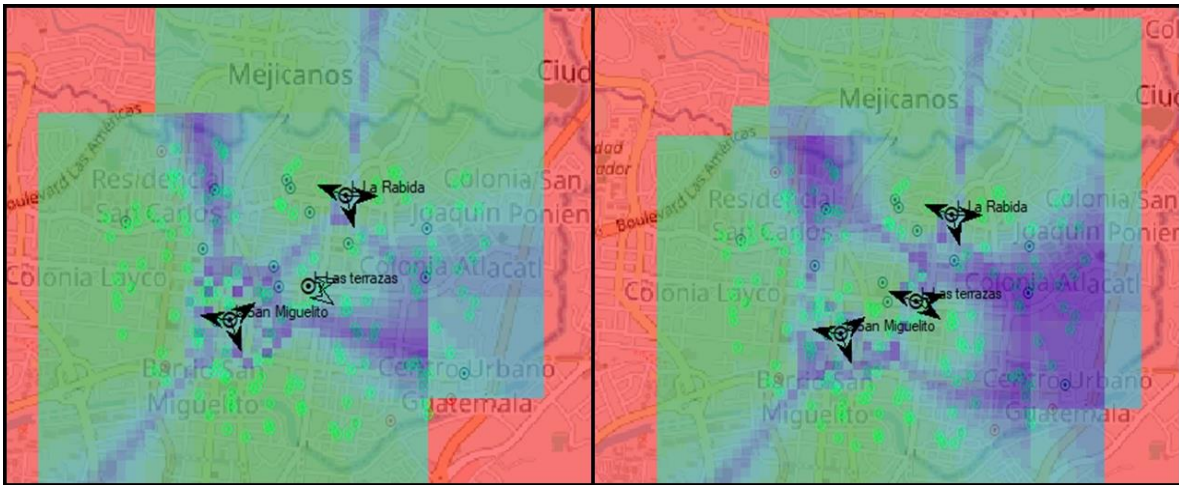


Figura 41: Valor de RSRQ esperado en la zona. (H. Torres, 2022).

La decisión de proceder con la instalación depende de muchos factores y en algunas ocasiones no se tiene opción de modificar la ubicación física del eNodoB y solo queda optimizar para que el sitio tenga el mayor rendimiento posible.

Legislación especial nacional.

Reestructuración por políticas del Gobierno: Las compañías de telefonía además de mantenerse al margen de los estándares internacionales para la implementación y expansión de su red, están obligados a cumplir las políticas de Gobierno que se propongan. En la memoria de Labores junio 2020 – mayo 2021 de El Gobierno de El salvador, SIGET comenta sobre dos proyectos muy importantes en los cuales se está trabajando.

Estos proyectos de Gobierno llevan a una reestructuración de la red por parte de los operadores, la cual debe implementarse dentro del tiempo establecido por SIGET. La Figura 42 muestra a personal de SIGET verificando la calidad de la señal de telefonía móvil en la zona costera del país.

Disminución de la Brecha Digital en la zona costera del país.

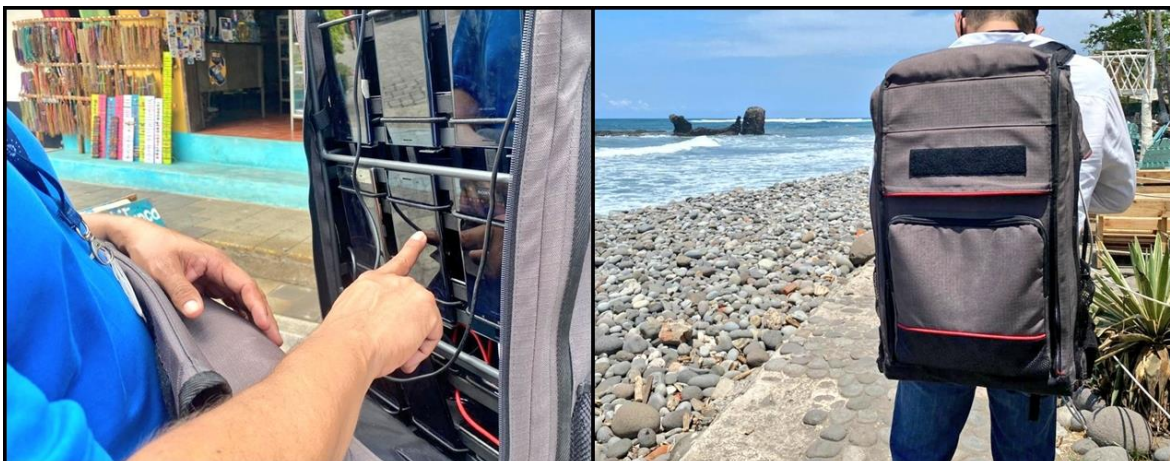


Figura 42: SIGET realiza mediciones de la calidad de señal antes del mundial de Surf “ISA World Surfing Games 2021” en playas de la Libertad. (SIGET El Salvador, 2021).

Tras el anuncio de proyecto de desarrollo turístico del Gobierno “Surf City” los operadores tuvieron que iniciar con la modernización de sus sitios en la zona costera, uno de los entrevistados para este trabajo comento que a los sitios de las zonas costeras se agregó capacidad en LTE y 3G para llamadas, agregando sitios expansión e implementando LTE advanced los operadores que tienen mayor asignación de espectro, entre otras mejoras realizadas a las estaciones base se les agregó capacidad de respaldo en baterías para mantener el servicio activo en caso de fallas de energía comercial y la creación de anillos de fibra óptica para la interconexión de sitios minimizando las afectaciones por falla. La mejora de la zona costera también incluía la modernización del sistema eléctrico promoviendo el desarrollo económico en la zona.

Inhibición de señales dentro de centros penitenciarios.

Marco Legal: La ley penitenciaria de El Salvador en su artículo No. 63 expresa textualmente “... SE PROHÍBE LA CONSTRUCCIÓN O INSTALACIÓN DE CUALQUIER EQUIPO DE TRANSMISIÓN DE TELECOMUNICACIONES EN UN RADIO DE MIL METROS, EXCEPTUÁNDOSE AQUELLOS EQUIPOS CON EL FIN ESPECÍFICO DE BLOQUEAR O INHIBIR LAS SEÑALES PARA CADA CENTRO PENITENCIARIO, O AQUELLOS TÉCNICAMENTE NECESARIOS PARA VIABILIZAR LA ANULACIÓN DE SERVICIOS DE COMUNICACIÓN HACIA LOS CENTROS PENITENCIARIOS [35]”

El Gobierno de El Salvador trabaja desde hace mucho tratando de inhibir las señales cerca de los centros penales, en 2015 entró en vigencia la Ley anti extorsiones la cual también obligaba a los operadores a eliminar la cobertura en esas zonas y castigaba con duras multas a por cada día que mantuvieran la señal activa y se detallaba que se podía llegar hasta el retiro de permisos de operación por la falta de cumplimiento de la ley. En 2016 la asamblea legislativa de El Salvador aprobó el decreto legislativo “Disposiciones especiales transitorias y extraordinarias en los centros penitenciarios, granjas penitenciarias, centros intermedios y centros temporales de reclusión”, tras la sanción del presidente de la republica los operadores procedieron a bloquear la señal en 7 penales del país y en acciones propias del Gobierno a través de la policía nacional civil se realizaron desconexiones de antenas de manera forzada para evitar el tráfico de señal.

Estas acciones llevaron a los operadores a buscar soluciones para sus usuarios fuera de estos recintos, dado que rangos de hasta 5 km de los centros penitenciarios se veían afectados por el corte de señal y desmontaje de sectores que apuntaban directamente a los penales. Actualmente el operador brinda soluciones más óptimas para reducir el impacto sobre los usuarios aledaños, instalando sectores directivos hacia el centro penitenciario. La Figura 43 muestra una antena aledaña a un centro penitenciario, en el cual se redujo la altura de las antenas radiantes y se instaló un sector mudo.



Figura 43: Antena de telecomunicaciones ubicada contiguo a centro penitenciario de Usulután, con antenas radiantes a baja altura y sector mudo instalado en estructura. (H. Torres, 2022).

La solución a la problemática de los usuarios aledaños se trata de mitigar con la instalación de inhibidores o bloqueadores de señal en el perímetro de los recintos carcelarios, esto mediante la implementación de “sectores ficticios” también son conocidos como Jammers, estos sectores son mudos, estos sectores aparentemente brindar cobertura a un equipo celular pero no permite la transmisión ni recepción de datos. Con esto se brinda la oportunidad a los operadores de reducir el área de afectación del servicio, mejorando la capacidad de los sitios no cercanos (Mas allá de 1 kilometro) para tratar de brindar la mejor cobertura posible en los alrededores del centro penitenciario. La Figura 44 muestra un sector mudo implementado en el contorno de un centro penitenciario.



Figura 44: Sector mudo instalado afuera de un centro penitenciario. (H. Torres, 2022).

Actualmente los operadores han proporcionado al Gobierno equipos de monitoreo en cada centro penitenciario, así se puede monitorear segundo a segundo la actividad de las redes dentro de los centros penitenciarios. El bloqueo de señales dentro de los penales se volvió una preocupación seria para los operadores quienes mantienen su compromiso de apoyar al buen funcionamiento de los bloqueadores y equipos de monitoreo, los cuatro operadores nacionales tienen centros penales asignados por los cuales responder ante problemas en equipos, es decir están en la obligación de responder ante fallas y resolverlos en el menor tiempo posible, estos se atienden con máxima urgencia por parte del operador.

CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES LTE.

Drive Test de desempeño.

Drive Test es un procedimiento mediante el cual los operadores realizan recorridos en vehículos por las calles de la zona donde se quiere evaluar el desempeño de un eNodeB. Para realizar una Drive Test se necesita:

- Laptop con software de registro de datos, comúnmente utilizado en El Salvador por la mayoría de los operadores, TEMs Investigations.
- Unidades celulares de alta gama.
- Equipo de monitoreo.

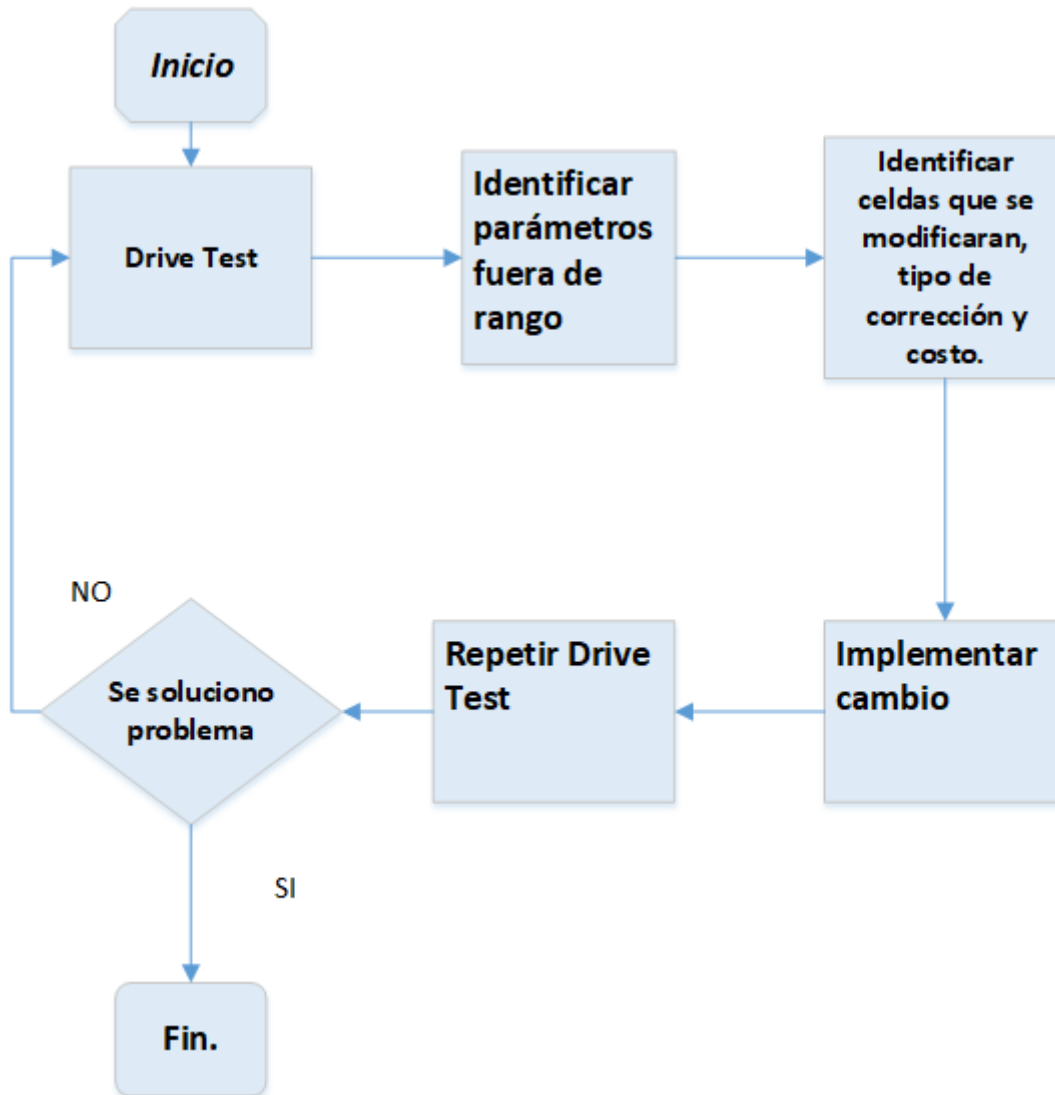
La Figura 45, muestra distintas imágenes del proveedor de equipo y software TEMs [36] para la realización de estos Drive Test.



Figura 45: Equipos para realización de Drive Test. TEMs Investigation. (H. Torres, 2022)

El drive test se realiza para medir la cobertura y desempeño de una red celular en alguna tecnología, cada una de estas tiene parámetros a medir que serán interpretados por la sección de RF del operador para tomar decisiones de modificación de parámetros, implementaciones o configuraciones en los eNodeBs. Se puede hacer en zonas urbanas, rurales y en entornos indoor. Con esta información se pueden tomar decisiones sobre cobertura, calidad, capacidad y reducción de costos en la red. Existen diversas maneras de realizar estas mediciones dependiendo de lo que se desee medir, se pueden dividir en 3 tipos de Drive Test: Análisis de rendimiento, Integración de sitios y evaluación comparativa. Se realiza verificaciones de cobertura, calidad de servicio y pruebas de interferencia.

En el Diagrama de flujo 2, se muestra el proceso de optimización de la red que utilizan los operadores en el país, logrando el mayor rendimiento de la red [40].



Utilizando el software para celulares Android GNet-Track [37] en su versión LITE se realizó la medición de cobertura RSRP y velocidad de usuario final antes de la instalación de un eNodeB en una red LTE de un operador nacional y luego de haber sido agregado, este software tiene una versión de paga con la cual se pueden obtener datos en mapa y Excel de RSRP, RSRQ y PCI. La red en la que se realizó la medición opera en la Banda 2 (B2) 1900 MHz.

Se realizó un recorrido previo en la zona donde se planeaba instalar un eNodeB, esta medición previa se utiliza para determinar los parámetros físicos de RF que llevara el eNodeB (Azimuth, tilt eléctrico, tilt mecánico, altura idónea de las antenas), además se utiliza para determinar las características de cantidad de recursos necesarios en base a las necesidades o demandas proyectadas. La medición se llevó a cabo en el contorno de la zona del centro comercial las terrazas san salvador, algunas características particulares de la medición se muestran en la Tabla 17:

	Fecha	Hora	UE CAT	Max DL UE	Max UL UE
Drive Test 1	3/2/2022	12:00	7	300 Mbps	150 Mbps
Drive Test 2	10/2/2022	12:00	7	300 Mbps	150 Mbps

Tabla 17: Características de Drive Test realizados. (H. Torres, 2022)

Donde:

Drive Test 1: Hace referencia a la primera medición realizada antes de la implementación del eNodeB.

Drive Test 2: Hace referencia a la segunda medición realizada luego de la implementación del eNodeB.

UE CAT: Categoría del equipo de usuario (User equipment), categoría del celular con el cual se realizó la medición.

Max UL/DL UE: Hace referencia a la capacidad máxima de velocidad en UL y DL que soporta el equipo de usuario, según la categoría.

Las mediciones de cobertura en el Drive test inicial refleja que valores fuera del rango están predominando en esa zona, existe desvanecimiento de la señal al contorno y dentro del centro comercial, es considerada por el operador en ese momento como un borde de celda deficiente, debida a la alta cantidad de personas reunidas en esa zona se decidió implementar un eNodoB según se indica en la Figura 46:

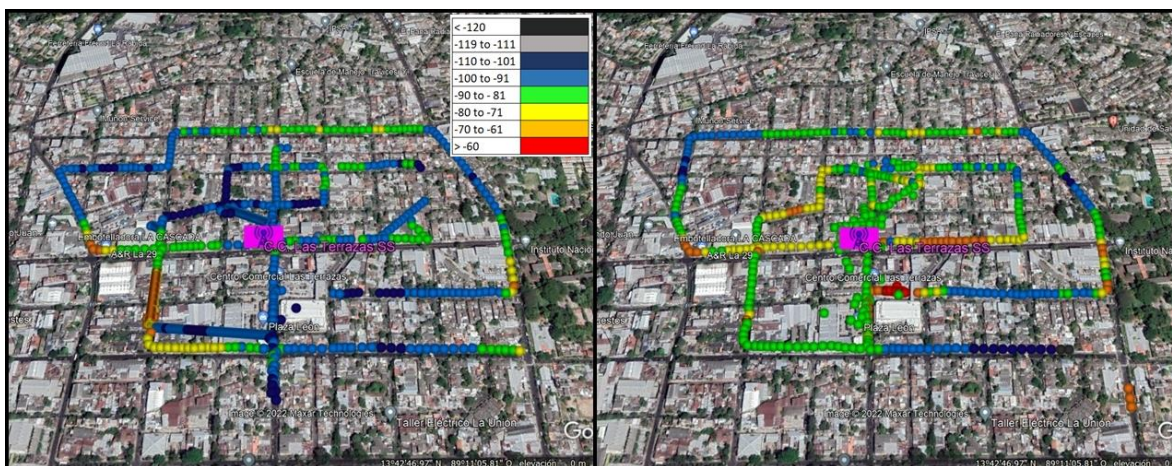


Figura 46: Medición de RSRP antes y posterior a la implementación de un nuevo eNodoB. (H. Torres, 2022).

Algunas de las características del eNodoB implementado se muestran en la Tabla 18:

eNodeB	Duplexacion	Sectores	Banda de operación	BW DL/UL	Azimuth	MIMO
Terraza	FDD	3	1900 MHz	15 MHz	85°/140°/310°	2X2

Tabla 18: Características del eNodeB implementado. (H. Torres, 2022).

Las pruebas de velocidad han sido comparadas antes y después en distintos puntos de la zona donde se realizó el Drive Test, también se muestra la latencia en el plano de usuario. En la siguiente figura se muestra los puntos donde se realizó mediciones de velocidad en UL y DL para un usuario final en específico. La Figura 47, muestra los puntos donde se realizaron las mediciones de velocidad en DL y UL.



Figura 47: Puntos de medición UL/DL para el usuario final. (H. Torres, 2022).

En la Tabla 19, se han organizado los doce puntos de medición de velocidad en DL y UL antes de la implementación del eNodeB. En la Tabla 20, se han organizado los doce puntos de medición de velocidad en UL y DL posterior a la implementación.

Prueba de velocidad previo a implementación de eNodeB.					
Detalle	Latitud	Longitud	DL Mbit/s	UL Mbit/s	Ping (Latencia ms)
Punto 1	13.712968	-89.18569	0.78	3.3	102
Punto 2	13.713689	-89.186225	0.65	1.93	94
Punto 3	13.713227	-89.185401	1.3	1.53	106
Punto 4	13.711345	-89.18567	0.63	1.53	80
Punto 5	13.7116	-89.187592	0.28	2.63	111
Punto 6	13.713517	-89.187255	0.17	1.39	100
Punto 7	13.714492	-89.18543	0.64	1.73	91
Punto 8	13.713971	-89.184426	1.38	9.59	79
Punto 9	13.715245	-89.184173	5.38	8.57	81
Punto 10	13.712766	-89.183312	1.01	5.43	80
Punto 11	13.711755	-89.183273	0.74	2.34	91
Punto 12	13.71194	-89.184993	0.85	1.54	81

Tabla 19: Medición de velocidad previo a la implementación de eNodeB. (H. Torres, 2022).

Prueba de velocidad posterior a implementación de eNodeB					
Detalle	Latitud	Longitud	DL Mbit/s	UL Mbit/s	Ping (Latencia ms)
Punto 1	13.712968	-89.18569	17.22	24.76	79
Punto 2	13.713689	-89.186225	39.92	19.14	90
Punto 3	13.713227	-89.185401	6.4	25.34	79
Punto 4	13.711345	-89.18567	23.61	24.06	89
Punto 5	13.7116	-89.187592	0.61	3.75	96
Punto 6	13.713517	-89.187255	7.38	9.05	96
Punto 7	13.714492	-89.18543	7.1	14.58	79
Punto 8	13.713971	-89.184426	21.23	26.03	90
Punto 9	13.715245	-89.184173	23.61	21.36	87
Punto 10	13.712766	-89.183312	7.3	25.31	80
Punto 11	13.711755	-89.183273	3.57	1.57	96
Punto 12	13.71194	-89.184993	18.71	19.54	96

Tabla 20: Medición de velocidad pos a la implementación de eNodeB. (H. Torres, 2022).

La velocidad promedio de los puntos en DL antes de la implementación era de 1.15 Mbits y en UL era de 3.45Mbits, estas velocidades no son suficiente para satisfacer las necesidades actuales de los suscriptores de la red, actualmente las demandas de datos de video están aumentando y no se puede satisfacer las necesidades con esta velocidad. También podemos observar como la asignación de recursos es mayor en el enlace ascendente, se interpreta que los usuarios que están haciendo uso de la red están mayormente obteniendo datos y transmitiendo en menor cantidad.

Las velocidades promedio en DL/UL luego de la implementación son 14.72 Mbits y 17.87 Mbits correspondientemente, debemos recordar que la asignación de recursos en LTE no es la misma para cada usuario, LTE decide según las necesidades del usuario y según las condiciones del canal la cantidad de recursos por UE. Podemos observar que la mejora es significativa por usuario, a esta velocidad la navegación por internet y la transmisión de datos de video es más fluida, se puede observar también que la cantidad de datos de descarga sigue siendo mayor que el de subida, por lo que se puede asignar mayores recursos a quien lo necesite.

Las velocidades máximas del usuario final no solamente varían según las configuraciones de RF del eNodeB, sino también depende de la categoría de UE que se esté utilizando, la calidad del canal en un instante determinado, el tipo de modulación que se asigne según la calidad del canal y las limitaciones interpuestas por la red según el tipo de contrato obtenido (Restricción de recursos).

Evaluación del desempeño a través de simulaciones.

Evaluación del desempeño utilizando Software Atoll. En el despliegue de una red LTE se debe tomar en cuenta diversos factores que afectaran directamente a la percepción del usuario final, de esto dependerá la satisfacción que tenga por el servicio.

Para evaluar el desempeño esperado de una red LTE, se simulará el despliegue de una red en una zona rural del país. Esta red muestra la implementación de eNodeBs a los cuales se les realizarán diversas simulaciones variando diversos parámetros configurables dentro del sistema, verificando así el resultado en el plano de rendimiento de usuario final.

Para realizar estas simulaciones se utilizará el Software Atoll, en este documento se limita a hacer uso del software para simulaciones y evaluación de resultados, se detallarán únicamente los parámetros relevantes para este propósito. Para poder conocer sobre el funcionamiento y características del software ver [38] [39]. La red LTE implementada en esta simulación está basada en el Release 8 de 3GPP.

Para la simulación de este despliegue dividiremos los parámetros de configuración de la red en tres secciones:

- Parámetros fijos: Estos parámetros fundamentales se pueden mantener fijos en el despliegue de una red, dado que involucra configuraciones de anchos de banda y frecuencias de operación que son variables entre operadores y varían según la cantidad de espectro concesionado. Dado que las configuraciones MIMO tienen que ver según el equipamiento se mantendrán fijo, esto porque no se acostumbra tener equipamiento distinto en un despliegue inicial. El modelo de propagación a utilizar es Erceg-Greenstein (SUI) en [9] se define las características de este modelo, se ha escogido por considerarse el modelo más apropiado para la banda de frecuencia donde se desarrollará el despliegue.
- Parámetros variables: Los parámetros de RF se variarán para optimizar la red y se evaluará el rendimiento de celda disponible para cada usuario final. Los parámetros de RF (Azimutl, tilt eléctrico, tilt mecánico) influyen grandemente en la cobertura y calidad del servicio en la zona deseada, por lo que los ingenieros de planeación recurren a realizar Drive Test para tener mediciones reales del comportamiento de la red en la zona. Aquí realizaremos una simulación con valores estándar de estos parámetros de RF y se comparará el rendimiento con la optimización propuesta por el software para aumentar las capacidades del sistema. El scheduler realiza técnicas de programación de paquetes, esto para la asignación dinámica de recursos, en El Salvador los usuarios reciben recursos según el plan de servicios contratados, es por ello que se decidió evaluar la red con un método dinámico de asignación de recursos, proportional fair.
- Resultados: En los resultados mostraremos gráficas del comportamiento de los parámetros de RF y del throughput de celda, para determinar el funcionamiento que tendrá nuestra red implementada.

La Tabla 21, muestra los parámetros que hemos establecido como fijo y su configuración para todas las simulaciones siguientes.

Parámetros fijos de simulación de red LTE.	
Banda de Frecuencia (MHz)	1900
Ancho de Banda (MHz)	15
Cantidad de sectores	3
Multiplexacion	FDD
Antena	65 grados 18 dBi ganancia
Potencia de transmisión	-49 dB
Altura de antena	30
MIMO	2X2
Scheduler	Proportional Fair
Modelo de propagación	Erceg-Greenstein (SUI)

Tabla 21: Parámetros fijos para simulaciones de red LTE. (H. Torres, 2022)

Tabla 22, muestra los parámetros que estaremos variando en estas simulaciones, para los valores de RF (Azimuth, tilt mecánico, tilt eléctrico) se analizaran dos entornos, el primero se colocaran valores estándar para un despliegue inicial y también se realizara una optimización automática por parte del software y se evaluarán los resultados con parámetros de RF modificados. Las características de simulación según la zona de implementación y tráfico se definen en la Tabla 23:

Parámetros variables en la simulación de red LTE	
Tipo de trafico	-
Azimuth	-
Tilt mecánico	-
Tilt eléctrico	-

Tabla 22: Parámetros que se variaran en las distintas simulaciones. (H. Torres, 2022).

Usuarios	Rural
Estándar fijo	20
Estándar peatonal	10
Estándar a 50 km/h	10
Comercio fijo	
Comercio peatonal	
Comercio a 50 km/h	
Total de usuarios por km²	40

Tabla 23: Características de escenarios de implementación para simulación. (H. Torres, 2022).

El entorno de simulación a se le variara los parámetros de RF para comparar resultados, las simulaciones serán realizadas en el área urbana de San Luis La Herradura. Como se muestra en la Tabla 24:

Simulación	Escenario	Lugar	Área de estudio	Cantidad de eNodeB
1	Rural	San Luis la Herradura	17.33 km ²	2

Tabla 24: Escenarios de simulación. (H. Torres, 2022).

Esta simulación de entorno rural como un despliegue inicial, el cual contiene dos eNodeB, con valores de parámetros de RF estándar y ubicación de dos sitios separados 2.5 Km. El área bajo estudio es de 17.77 km² del municipio de San Luis La Herradura, se muestra en la Figura 48.

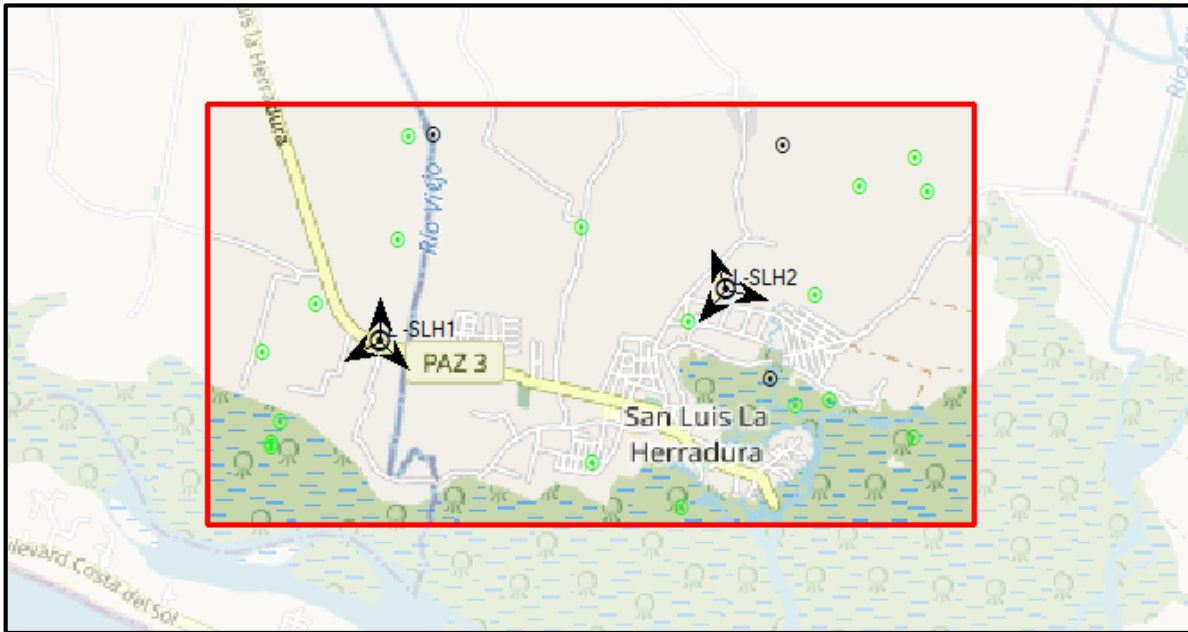


Figura 48: Zona de estudio para simulación y rendimiento de la red. (H. Torres, 2022).

En este capítulo se realiza una comparación de las condiciones de RF sin optimizar y las condiciones de RF a aplicar optimización automática del Software utilizado. Esta optimización automática varía parámetros de RF para poder obtener por lo menos un 90% de RSRP aceptable y que por lo menos 85% de RSRQ aceptable para el área de interés. La Tabla 25, muestra las modificaciones generadas por el software en el proceso de optimización.

eNodeB	Condición	Escenario	Azimuth (deg)	Tilt mecánico (deg)	Tilt eléctrico (deg)	Scheduler
1	Inicial	Rural	0/120/240	5/5/5	0/0/0	Erceg-Greenstein
2	Inicial	Rural	0/120/240	5/5/5	0/0/0	Erceg-Greenstein
1	Optimizada	Rural	1/135/240	2/2/2	0/0/0	Erceg-Greenstein
2	Optimizada	Rural	340/105/220	2/2/2	0/0/0	Erceg-Greenstein

Tabla 25: Parámetros de RF antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022).

Resultados de simulación.

La Figura 49, muestra que modificando los parámetros de RF según nos indica el software, se puede aumentar en un 7.8% el valor de RSRP óptimo, lo que representa en kilómetros un aumento de cobertura de 1.38 km², teniendo la capacidad en un entorno virtual de alcanzar 55 nuevos usuarios. Para el entorno rural de la simulación se espera tener 40 suscriptores por kilómetros cuadrado, nuestra área de cobertura con valor RSRP aceptable es de 13.62 km², lo que nos indica que se pueden esperar un estimado de 544 usuarios en toda la zona, teniendo en consideración que el despliegue incluye 2 eNodeB, cada uno de ellos debe tener la capacidad de brindar servicio a un estimado de 270 usuarios, este dato es de relevancia dado que de ello depende la licencia de operación que el operador debe comprar para sus equipos. La Figura 50, muestra las mejoras en dB que se lograron para RSRP en el proceso de optimización.

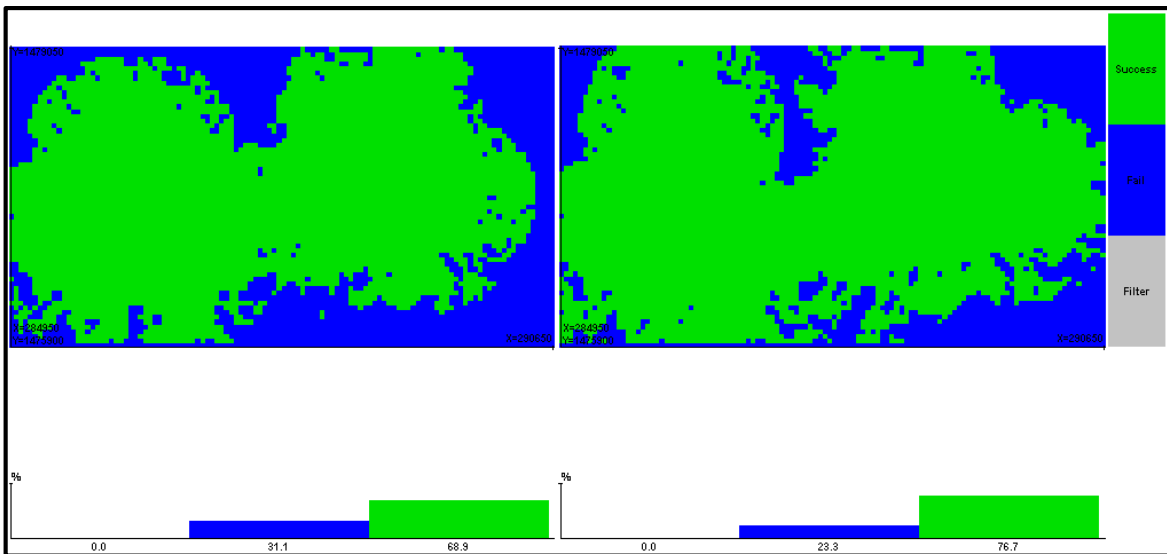


Figura 49: Comparación de RSRP antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022).

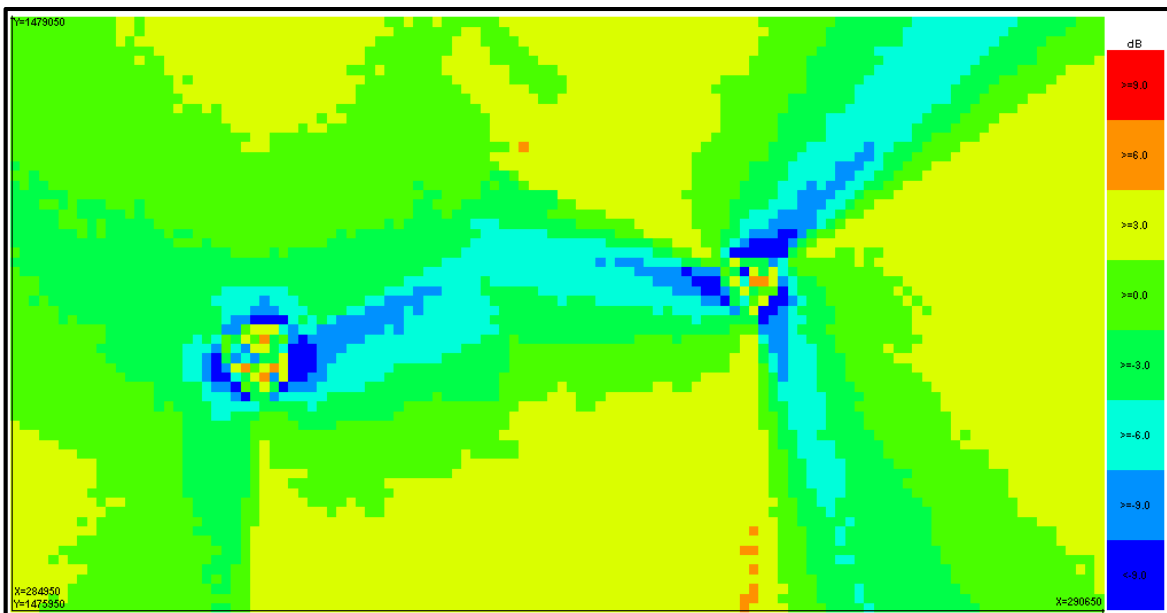


Figura 50: Modificación en dB del valor percibido de RSRP. (H. Torres, 2022).

En la Figura 51, se muestra la comparación de porcentajes de RSRQ óptimo, antes y después del proceso de optimización. Se observa en la figura que se ha reducido el área donde la calidad de la señal de referencia tiene parámetros fuera del rango aceptable. La mejora es de un 2%, la calidad de la señal de referencia tiene un 10.8% de diferencia con la cobertura de señal de referencia, lo cual se puede interpretar que para determinados valores RSRP degradado se puede mantener la calidad de RSRQ aceptable.

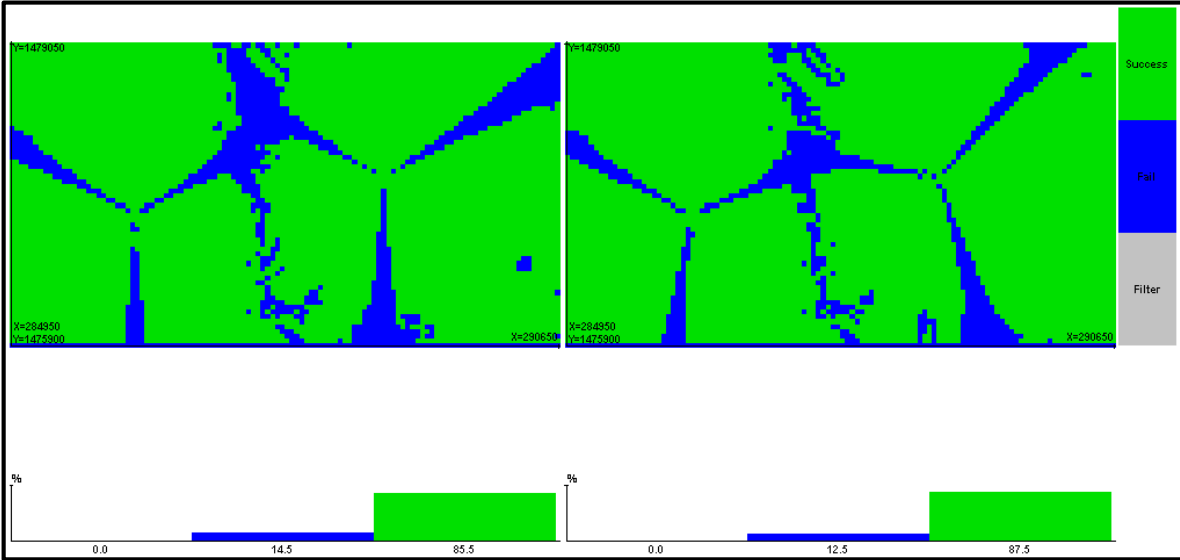


Figura 51: Comparación de RSRQ antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022).

SINR es la relación de interferencia de señal a ruido en LTE, se puede expresar como la cantidad de ruido en la señal recibida, si el valor de SINR se ubica por debajo de 0 la velocidad de conexión será lenta. En el proceso de optimización se observa la reducción de las zonas de alto ruido, pero siempre se mantendrá un alto ruido entre sectores de una celda y entre celdas, esto se combate con los packet scheduling que limitan los recursos en una celda A debido a que están siendo usados en una celda B. En la Figura 52, se muestra el comportamiento de la SINR antes y después de la optimización. En la Figura 53, se muestra la modificación en dB que se realizó en la zona en el proceso de optimización.

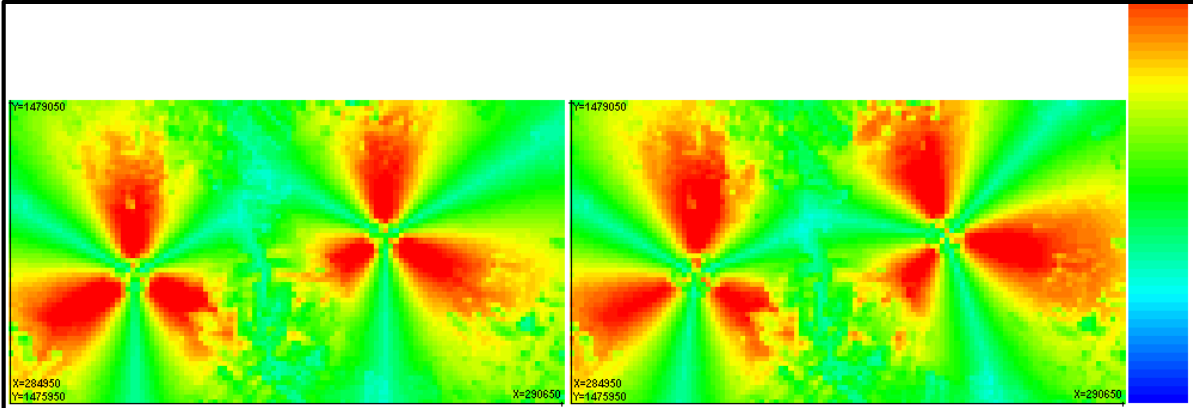


Figura 52: Comparación de SINR antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022).

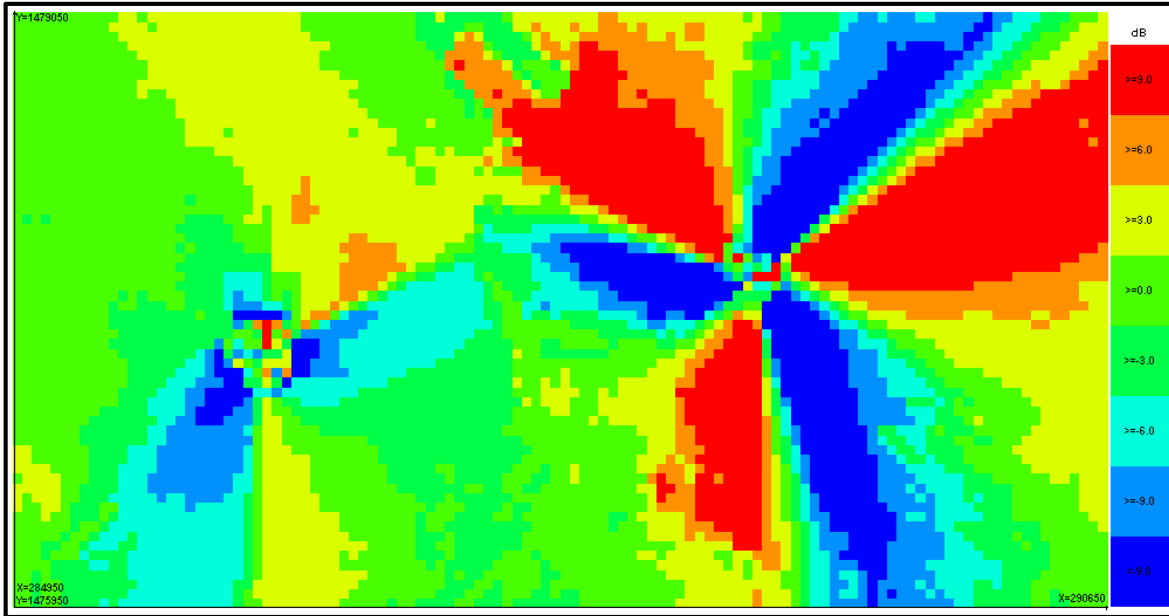


Figura 53: Modificación en dB de SINR en la zona de estudio. (H. Torres, 2022).

La superposición de celdas en servicio para LTE representa un punto de alta interferencia, dada la característica de rehusó universal de frecuencia, todos los recursos se encuentran disponibles en todas las celdas. Por lo que es importante reducir la cantidad superposición de transmisores en servicio. La Figura 54, muestra la comparación de la cantidad de transmisores en servicio antes y después de la simulación. Se puede observar que en los bordes de celda y entre sectores existen dos o más transmisores activos, luego de la optimización las zonas de doble transmisor activo se ha reducir en un 1.2%.

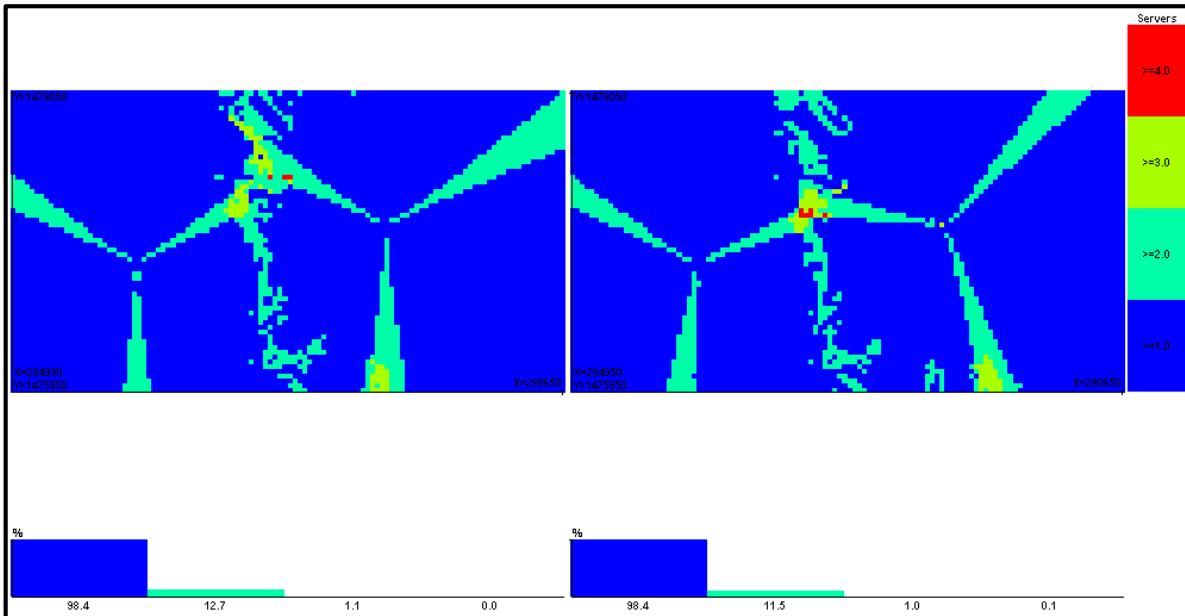


Figura 54: Superposición de transmisores activos antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022).

Los parámetros anteriores preparan un escenario de calidad de canal para poder realizar la transmisión de datos al usuario final, en la Figura 55, podemos apreciar las zonas esperadas en las que se pueden asignar distintos tipos de modulación, según la predicción tenemos zonas del área de estudio que no podrán alcanzar el más efectivo método de modulación para transmisión de datos. Los tipos de modulación esperados son 64 QAM, 16 QAM y QPSK. Podemos apreciar en la figura que con lo optimización se ha mejorado en un 2.18% las posibilidades que los usuarios tengan 64QAM en el enlace descendente. Con esta optimización se ha reducido el área de interferencia en los bordes de celda aumentando las probabilidades de tener un mejor método de modulación en DL.

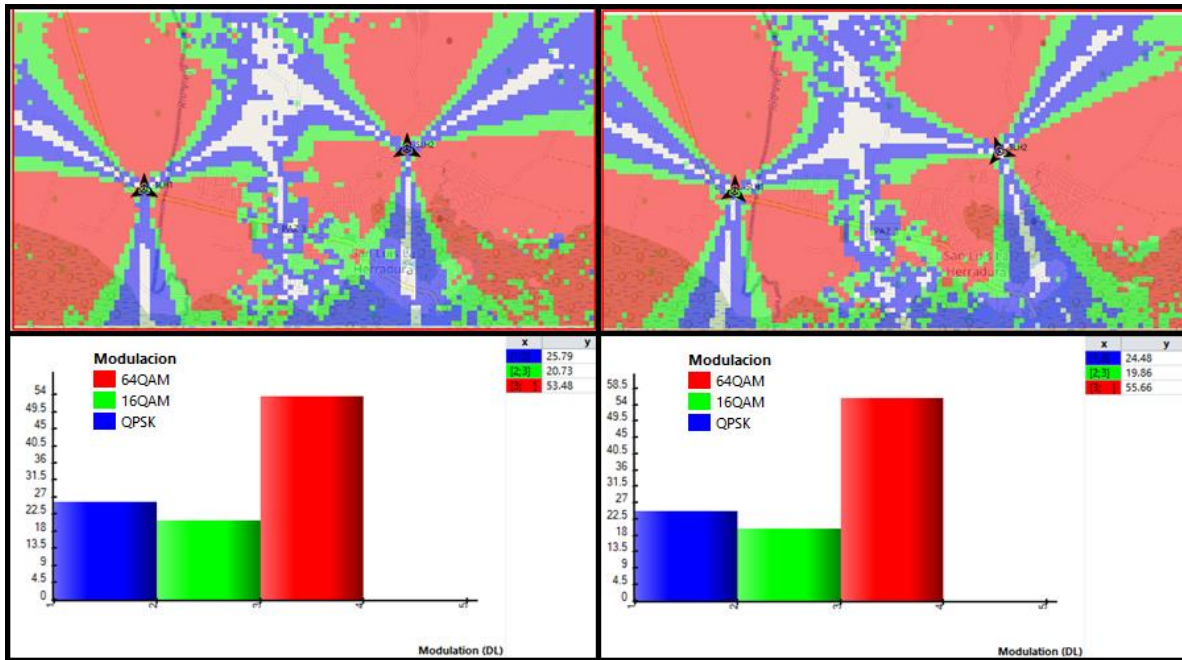


Figura 55: Modulación utilizada en zona de estudio antes y después de la optimización. (H. Torres, 2022).

El Throughput que los usuarios pueden recibir dependen de diversos factores entre ellos la categoría del UE y las condiciones específicas de canal para cada usuario. En este apartado se mostrará una comparación de la zona de estudio antes y después de la optimización, en la cual se muestra las zonas en que los usuarios pueden tener un mayor Throughput en un escenario que solo se toman en cuenta la interferencia de intracelda e intercelda. En la Figura 56, podemos observar que con la optimización se ha alcanzado más área con el mayor throughput disponible, un 3.3% del área de cobertura ha aumentado la capacidad de poder brindar a los usuarios el mayor throughput disponible.

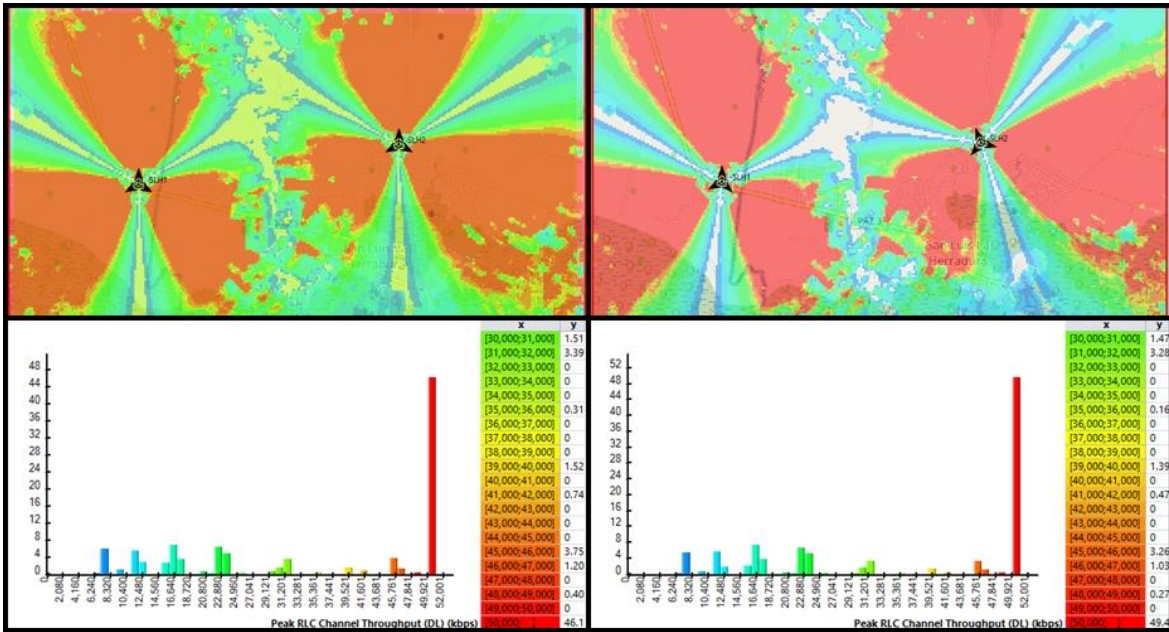


Figura 56: Comparación de throughput disponible en la zona de estudio antes y después de la simulación. (H. Torres, 2022).

BLER es el cociente entre la cantidad de bloque de bits con error y la cantidad total de bloque de bits enviados. En la Figura 57 en la derecha podemos observar que la mayor parte de bloque de bits con error se encuentra en la parte de borde de celda, esto obliga al sistema a utilizar un método de modulación más confiable y a aumentar la señalización por retransmisión, en el usuario final esto genera una reducción en la velocidad de transmisión de datos. Cerca del 85% de los usuarios según predicciones no percibirán pérdidas de bits, en la realidad se debe comprobar en campo dado que muchos usuarios se encuentran en zonas indoor, en vehículos, etc. Muchos de estos obstáculos evaluados para cada usuario pueden generar pérdida de bits.

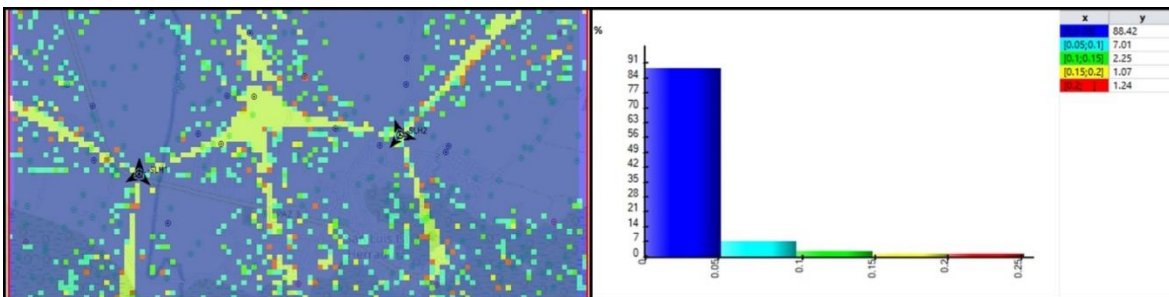


Figura 57: BLER en zona de estudio. (H. Torres, 2022).

Predicción de rendimiento de red LTE.

Nuestro software nos aporta una opción de predicción de funcionamiento, en el funciona prediciendo cantidad de usuarios haciendo uso de determinados servicios, se asigna el tipo de dispositivo que está utilizando y las condiciones de movilidad según sea el escenario de implementación. Según la ubicación del usuario el sistema predice las posibles interferencias y determina una calidad de canal en un momento específico, al cual se le asigna un método de modulación y se determina el throughput real en un instante para cada usuario.

La Figura 58 muestra una gráfica en la cual se puede observar el throughput máximo de canal disponible para cada usuario en un determinado momento, este throughput no es la velocidad promedio por usuario, sino la velocidad que dispone el usuario en ese canal, para utilizarlo dependerá de la saturación de la red y la cantidad de throughput que el usuario necesite. Según el Cuadro 2.6 la máxima velocidad de una configuración de LTE con 15 MHz de ancho de banda y MIMO 2X2 es 110 Mbps en DL y 55.1 Mbps el UL.

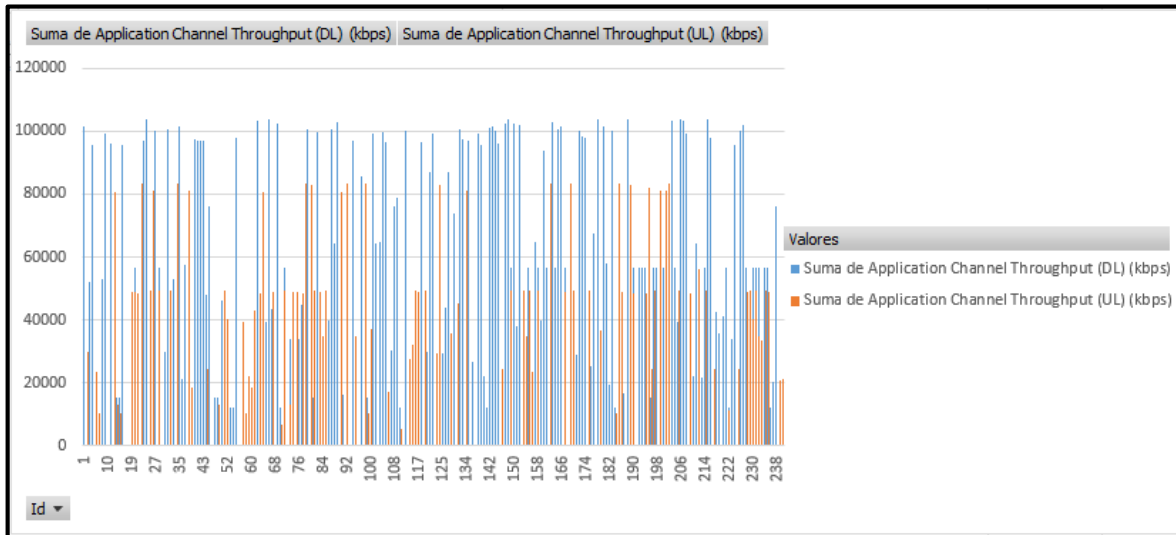


Figura 58: Throughput máximo disponible de canal para usuario. (H. Torres, 2022)

Monitoreo del desempeño de red LTE.

Los operadores tienen su centro de control de red en el cual se está monitoreando en tiempo real el desempeño de esta, existen diversos escenarios dentro de la red que deben ser evaluados y atendidos para mantener un buen funcionamiento. Los operadores utilizan diversos softwares propios de los proveedores de equipos que de manera remota les permite configurar diversos parámetros de la red e informarse de errores en las estaciones base. Estos pueden configurar el tilt eléctrico mediante la opción RET (Remote electric Tilt). Cada estación base tiene configurada una dirección IP de O&M con el cual se puede acceder al nodo y verificar cantidades de usuarios por sector, potencia de salida por sector, degradación en transmisión hacia otras capas a través de la interfaz S1, degradación de equipamiento, problemas de sincronización de eNodoB a través de la interfaz X2, etc.

Monitoreo remoto de parámetros de funcionamiento eNodoBs.

Las siguientes imágenes presentan una interfaz de interacción remota con un eNodeB, los parámetros que representan se muestran a continuación:

La Figura 59, muestra un sistema de acceso remoto a los eNodoB utilizado por $\frac{3}{4}$ partes de los operadores nacionales, mediante este software propio de cada suministrador de equipamiento se puede verificar es estado en tiempo real de un eNodoB (Up/Down), las alarmas que presenta dicho eNodoB, la imagen muestra una alarma por falta de activación de licencias, estos equipos pueden operar durante un tiempo de gracia con rendimiento reducido, pero para tener la máxima capacidad del equipamiento se debe comprar. Se verificar el desempeño en tiempo real según la cantidad de

usuarios por sectores, la imagen muestra la cantidad de usuarios por sector de una celda y las portadoras con las cuales está transmitiendo.

```

211219-13:22:05          MSRBS_NODE_MODEL_17.Q3_
-----
0          ManagedElement=
-----
dnPrefix
managedElementId
managedElementType      RadioNode
networkManagedElementId
release                  17.Q3
siteLocation
userLabel

Total: 1 MOS

L      > al

211219-13:22:09          MSRBS_NODE_MODEL_17.Q3_
collecting Alarms...

Date & Time (UTC)  S Specific Problem          MO (Cause/AdditionalInfo)
-----
2021-12-19 19:19:52 C License Key File Fault      Lm=1 (key file fault in Managed Element AI: eventId:1)
2021-12-19 19:20:10 m Ethernet Link Failure      EthernetPort=TN_B (Connected to physical port TNPort=TN_B)
>>> Total: 2 Alarms (1 Critical, 0 Major)

211222-14:30:23          MSRBS_NODE_MODEL_17.Q4_
colli>/
cellid #UE:s #Bearers
  1      35      35
  2      89      89
  3      19      19
colli>

```

Figura 59: Interfaz gráfica de software de monitoreo remoto de eNodeB en tiempo real. (H. Torres, 2022).

La Figura 60, muestra otras características que se pueden monitorear del eNodeB, nos brinda datos del equipamiento y su funcionamiento, acá nos muestra que uno de los sectores del eNodeB se encuentra DOWN, en modo deshabilitado. Así los operadores de O&M verifican las alarmas generadas por el sistema. Estos estados DOWN son contabilizados en horas fuera de servicio.

```

FRU      LNH      BOARD      RF  BP  TX (w/dBm)  VSWR (RL)  RX (dBm)  UES/RLs  Sector/AntennaGroup/Cells (State:cellIds:PCIS)
-----
RRU-S1B2 BXP_0  RRU2219B2* A  11          1.13 (24.4)  62/-      SE=S1B2* AG=S1B2 FDD=L (1:1:321)
RRU-S1B2 BXP_0  RRU2219B2* B  11          1.11 (25.3)  62/-      SE=S1B2* AG=S1B2 FDD=L (1:1:321)

RRU-S2B2 BXP_1  RRU2219B2* A  11          -           -/-       SE=S2B2* AG=S2B2 FDD=L (0:2:322)
RRU-S2B2 BXP_1  RRU2219B2* B  11          -           -/-       SE=S2B2* AG=S2B2 FDD=L (0:2:322)

RRU-S3B2 BXP_2  RRU2219B2* A  11          1.12 (24.7)  8/-       SE=S3B2* AG=S3B2 FDD=L (1:3:323)
RRU-S3B2 BXP_2  RRU2219B2* B  11          1.12 (24.8)  8/-       SE=S3B2* AG=S3B2 FDD=L (1:3:323)

-----
Tip: use option "a" or "af" to show the connected Antennasubunits and AntennaNearUnits.

211211-11:16:39          MSRBS_NODE_MODEL_17.Q4_

connected to          (SubNetwork=          ,ManagedElement=          )

Proxy  Adm State  Op. State  MO
-----
  1 (UNLOCKED)  1 (ENABLED)  ENodeBFunction=1,EUtranCellFDD=L
  1 (UNLOCKED)  0 (DISABLED) ENodeBFunction=1,EUtranCellFDD=L
  1 (UNLOCKED)  1 (ENABLED)  ENodeBFunction=1,EUtranCellFDD=L

```

Figura 60: Interfaz gráfica de software de monitoreo remoto de eNodeB en tiempo real. (H. Torres, 2022).

Monitoreo remoto de rendimiento de eNodoBs.

Las interacciones con los eNodoB en términos de rendimiento también se pueden medir en función del promedio de datos en Downlink y Uplink, para este fin los operadores utilizan software externo para el control en tiempo real del rendimiento de la celda. El software que proporciona el equipo si sirve para identificar fallas físicas que afectan el rendimiento, pero muchas veces el rendimiento se ve afectado por configuraciones lógicas y se puede observar la afectación en la reducción de la capacidad, que necesariamente se debe observar en un software que identifique la cantidad de datos que se están transmitiendo a través de la celda.

Para el monitoreo interactivo de la cantidad de datos transmitidos y para obtener reportes de bajo rendimiento algunos operadores utilizan herramientas generación de grafico de redes, estas aplicaciones son capaces de manejar redes LAN hasta redes de cientos de dispositivos. Estos softwares nos permiten ver los diferentes equipos que están siendo monitoreados en tiempo real, de los cuales se puede generar un reporte de funcionamiento.

La Figura 61, muestra este software operando en una red LTE. Se puede apreciar el funcionamiento real de una celda en un área geográfica rural, por lo que podemos ver que la demanda de tráfico de datos es muy baja. El software nos presenta información en tiempo real de la cantidad de datos que están siendo transmitidos, dado que la medición está siendo vista desde el eNodoB el DL es visto hacia el nodo que desde el UE seria UL. Estas estadísticas de rendimiento ayudan al operador a determinar horas picos y determinar zonas de saturación de tráfico.

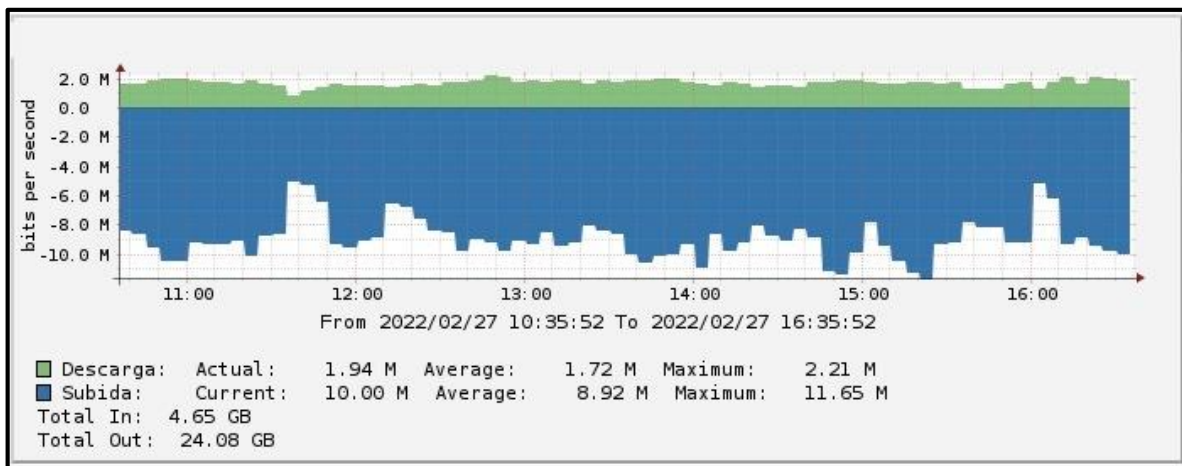


Figura 61: Gráfico de funcionamiento de red LTE. (H. Torres, 2022).

La Figura 62, muestra un escenario de una red LTE la cual está presentando degradación y la cual en determinado momento deja de funcionar en determinado momento, el bajo rendimiento de la red puede ser medido en la cantidad de datos transmitidos o recibidos en el eNodoB. Específicamente podemos observar en la imagen que el funcionamiento de la celda está limitado, dado que rendimiento máximo en la celda es de 1.77 Mbits/s, esta velocidad pico instantánea podría ser la que requiera un único UE para su funcionamiento, por lo cual se debe iniciar verificaciones del bajo rendimiento.

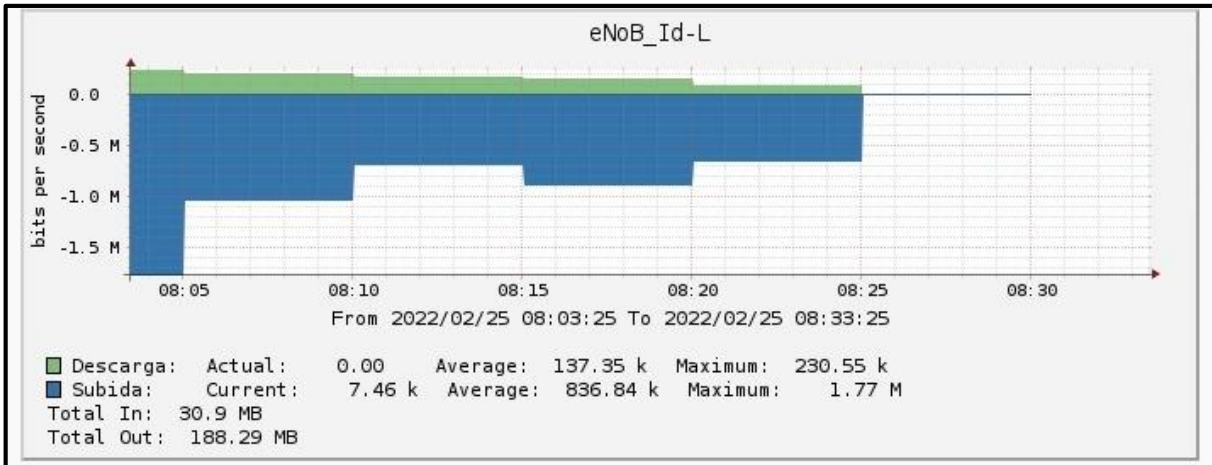


Figura 62: Gráfico de funcionamiento de red LTE. (H. Torres, 2022).

La Figura 63, muestra el funcionamiento normal de un eNodoB, en el cual se hace notar las horas pico de demanda de tráfico.

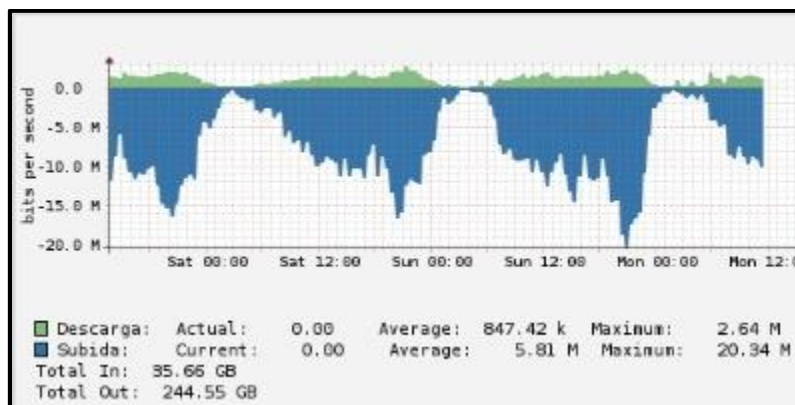


Figura 63: Funcionamiento de un eNodoB en UL y DL. (H. Torres, 2022).

CONCLUSIONES

- En El Salvador, el desarrollo de redes LTE que cumplan con metodologías de diseño teórico 100% apegado a los estándares internacionales se ve limitado por aspectos económicos, ya que se prioriza el uso de instalaciones ya existentes por ahorro de costos.
- La implementación de eNodoBs LTE requiere medios de conectividad de banda ancha que propicien los requerimientos de velocidad y fidelidad en la transmisión de datos; para ello lo recomendable es el uso de fibra óptica, sin embargo, en nuestro país esta alternativa se ve limitada por aspectos económicos, ya que no todos los operadores cuentan con este medio de conexión en la totalidad de sus eNodoBs LTE.
- La legislación especial nacional, limita obtener la cobertura LTE en todo el territorio nacional. Ejemplo de ello se encuentra en la carretera litoral, entre Zacatecoluca y Santa cruz porrillo en el departamento de San Vicente, debido al centro penal de máxima seguridad se tiene aproximadamente una afectación de señal sobre carretera de 6 kilómetros.
- Casi a nivel general los operadores cuentan con sistemas de monitoreo de la red en tiempo real e incluso algunos disponen de funcionalidades de autocorrección de algunas fallas, con lo cual se trata de brindar una calidad de servicio acorde a los estándares internacionales.
- Al momento de redactar el presente documento, la implementación del servicio LTE en nuestro país aún se encuentra por debajo del 50% (Aproximadamente), mientras que en países más desarrollados ya se inició la implementación del 5G. No obstante, la mayoría de operadores están haciendo fuertes inversiones para lograr la implementación del LTE - 4G tan pronto sea posible.
- Debido al tipo de usuario y características de tráfico, los operadores optan por no sobredimensionar la red, sino más bien se adaptan a la demanda de las distintas zonas. Esto es que la mayor parte de El Salvador los usuarios no demandan banda ancha (Principalmente por implicaciones económicas).
- La principal ventaja de la red LTE es brindar al usuario conectividad para transmisión de datos de alta velocidad, debido que en El Salvador no se utiliza VoLTE, lo anterior no afecta al de servicio de voz tradicional, el cual se brinda paralelamente a través de las tecnologías 2G y 3G.
- La característica de funcionamiento multi banda que las normas definen para el 4G, en nuestro país se ha visto limitada por el recurso radio eléctrico disponible, a tal punto que solo los operadores más fuertes han logrado adquirir nuevas bandas de operación.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] P. Cerwall, "Ericsson Mobility Report", Ericsson, Estocolmo, Suecia, EMR, noviembre 2021
- [2] J. M. Huidobro "Comunicaciones Móviles Sistemas GSM, UMTS, LTE", Madrid, España, RA-MA, 2014.
- [3] R. A. Comes, F. B. Alvares, F. C. Palacios, R. F. Ferre, J. P. Romero, O. S. Roig. "LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles" España, Fundación Vodafone España, 2010.
- [4] RFWirelessWorld. (2022) "difference between SC-FDMA and OFDM | SC-FDMA vs OFDM" [Online]. Disponible: www.rfwireless-world.com
- [5] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.", 3GPP, Sophia Antipolis, Francia, TS 36.101 version 14.3.0 Release 14
- [6] Proyecto asociación de tercera generación "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures", 3GPP, Sophia Antipolis, Francia, 3GPP TS 36.213 version 10.3.0 Release 10.
- [7]] Proyecto asociación de tercera generación "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)"; Radio Frequency (RF) system scenarios, 3GPP, Sophia Antipolis, Francia, TS 36.942 V8.2.0, 2009.
- [8] Proyecto asociación de tercera generación "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios", 3GPP, Sophia Antipolis, Francia, 3GPP TR 36.942 versión 10.2.0 Release 10
- [9] V. Erceg et al., "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 7, pp. 1205-1211, July 1999, doi: 10.1109/49.778178.
- [10] 3GPP (2008) "Long Term Evolution", [Online]. Disponible: www.3gpp.org.
- [11] Ruben Sanchez (2016). "Arquitectura 4G", Online. Disponible: www.rubensm.com
- [12] Proyecto asociación de tercera generación "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities", 3GPP, Sophia Antipolis, Francia, 3GPP TS 36.306 version 8.8.0 Release 8.
- [13] Wiley. E. Metsala, J. Salmelin. "LTE Backhaul: Planning an optimization", Espoo, Finland, Nokia Networks, 2015.
- [14] Rosque Pino. (2017, Feb. 14) "Digicel invertira \$450 mills. En implementar su red LTE" [Online]. Disponible: www.diario.elmundo.sv.
- [15] Tigo El Salvador. (2022) "Mapa de cobertura" [Online]. Disponible: www.tigo.com.sv.
- [16] Digicel Group. (2022) "Mapa de cobertura" [Online]. Disponible: www.digicelgroup.com.
- [17] Claro El Salvador. (2022) "Mapa de cobertura" [Online]. Disponible: www.coberturaclaro.com.
- [18] Telefonica moviles El Salvador. (2022) "Cobertura celular Movistar" [Online]. Disponible: www.movistar.com.sv.

- [19] E. Arevalo, Operador de telefonía, El Salvador (Comunicación privada). 2022.
- [20] Proyecto asociación de tercera generación “Overview of 3GPP Release 10”, 3GPP. Sophia Antipolis, Francia, Overview of 3GPP Release 10 V0.2.1 (2016-06).
- [21] Bnamericas. (2019, dic. 06) “Un vistazo a los ganadores de la subasta 4G en El Salvador”. [Online]. Disponible: www.bnamericas.com
- [22] Ookla, “Fastest mobile award El Salvador Q1 Q2 2018” SpeedTest, 2018.
- [23] Ookla, “Fastest mobile award El Salvador T2 T3 2021” SpeedTest, 2021.
- [24] Superintendencia general de electricidad y telecomunicaciones SIGET, “Cuadro nacional de atribución de frecuencias – CNAF”, SIGET, San Salvador, El Salvador. V2017.
- [25] Nicolas Larocca. (2020) “Subasta de AWS en El Salvador...” [Online]. Disponible: www.telesemana.com
- [26] A. Calderon , SIGET (Comunicación privada). 2022.
- [27] Union Internacional de telecomunicaciones, “Especificaciones detalladas de las interfaces radioelectricas terrenales de las telecomunicaciones moviles internacionales avanzadas (IMT Avanzadas)”, UIT, Ginebra, Suiza. Recomendación UIT-R M.2012-4, 2019.
- [28] Proyecto asociación de tercera generación “Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS); LTE; Requisitos para Evolved UTRA (E-UTRA) y UTRAN Evolucionado (E-UTRAN)”, 3GPP, Sophia Antipolis, Francia, TR 25.913 versión8.0.0 Release 8.
- [29] H. Holma y A. Toskala, “*LTE for UMTS evolution to LTE – Advanced*” Second edition, United Kingdom, John Wiley & Sons, lte. 2011.
- [30] Proyecto asociación de tercera generación “LTE; Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionado (E-UTRA); Capa física; Mediciones”, 3GPP, Sophia Antipolis, Francia, TS 36.214 versión 14.2.0 Release 14.
- [31] Aras Technologies. (2018, Dic. 10) “Niveles de potencia para LTE RSRP” [Online]. Disponible: www.arastechnologies.com.
- [32] Sección de radiocomunicaciones “Cálculo de atenuación en el espacio libre”, UIT, Ginebra, Suiza, Recomendación UIT-R P.525-4.
- [33] El economista “Tigo invierte en red de fibra óptica” [Online]. Disponible: www.eleconomista.net.
- [34] SBA Communications. “Sitios SBA”, SBA [Online] Disponible: www.playgoogle.com/SBASites.
- [35] Gobierno de El Salvador “Ley penitenciaria” Asamblea legislativa, San Salvador.
- [36] Infovista “Optimize customer experience with reliable, in-depth network testing” [Online]. Disponible: www.infovista.com.
- [37] GyokovSolutions “G-NetTrack Lite” G-NetTrack app [Online]. Disponible: www.playgoogle./G-NetTrackLite.

[38] Forks. (2011) *Atoll User Manual Radio Version 3.1.0*.

[39] Forks. (2011) *Technical Reference Guide Version 3.1.0*.

[40] Experto en optimización “Proceso general de optimización mediante Drive Test” [Conversación privada].