



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO PARA UNA RED DE
TRANSMISIÓN DE VOZ Y DATOS A
TRAVÉS DE MICROONDAS UTILIZANDO
TECNOLOGÍA LTE ENTRE LOS CAMPUS
DE LA UNAM DE LA ZONA
METROPOLITANA**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N

JOSE FRANCISCO MATEO FIERROS

JAVIER TLATEMPA CRISPIN

y para obtener el título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A

JOSUE CORREA CORREA

DIRECTOR DE TESIS

M.C. EDGAR BALDEMAR AGUADO CRUZ



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

Gracias a Dios, a mis padres por darme la vida, amor, educación, apoyo durante mi formación académica y por la enseñanza de vida siendo ellos mi ejemplo a seguir, gracias a la chapulín por el apoyo moral, comprensión y amor, gracias a la UNAM por mi formación académica y a la Facultad de Ingeniería donde obtuve los conocimientos para ejercer laboralmente.

Jose Francisco Mateo Fierros

A mi Esposa. Agradezco su amor y paciencia
y a mi hijo ser el motor que me ayuda a superarme.

Javier Tlatempa Crispin

Agradezco primeramente a Dios que es el creador de este universo y el cual me ha permitido estar en donde estoy.

Así mismo agradezco a mis padres María de Lourdes Correa Esquivel y Carlos Correa García los cuales a lo largo de mi vida siempre han estado ahí apoyándome, aconsejándome, mostrándome lo que es crecer en el calor de un hogar, nunca dejándome solo estando en mis mejores y peores momentos, los cuales me han enseñado valores, inculcándome creencias que han marcado mi vida, por todo lo anterior y por mas es que les agradezco que sean mis padres.

Agradezco también a mi tío Ramón Correa Esquivel el cual siempre estuvo cuando lo necesitaba, que me vio desde chico, con el cual eh compartido sonrisas y momentos difíciles, al cual agradezco siempre haya estado ahí, así también espero estar yo siempre para usted.

Quizá falten muchas personas por mencionar, que han contribuido a mi desarrollo como persona, que han gastado su valioso tiempo en mí, las cuales si las menciono sin duda me tomaría unas cuantas cuartillas y si de por sí la tesis ya es un poco extensa, me basta con mencionar que la familia es lo de más valioso en esta vida y quiero mencionar que las familias Correa Esquivel y Correa García (los cuales hoy algunos de ellos ya no

están con nosotros) han sido un pilar muy grande para que yo hoy pueda obtener mi título de ingeniería, resaltando algo muy importante y que sé muy bien, es que nunca terminare de aprender de este gran camino la ingeniería.

Josue Correa Correa

Gracias al Programa de Apoyo a la Titulación (PAT), a nuestro asesor de tesis M.C. Edgar Baldemar Aguado Cruz, a los compañeros Germán Medina Hernández y Fernando Pichardo Hernández, egresados de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, por el apoyo brindado para la realización de esta tesis.

ÍNDICE.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo.....	1
1.2 Definición del problema.....	1
1.3 Justificación de la transmisión de voz y datos a través de microondas utilizando tecnología LTE.....	2
1.4 Descripción general del modelo propuesto.....	3
CAPÍTULO 2. BASES TEÓRICAS.....	6
2.1 Señales.....	6
2.1.1 Características.....	6
2.1.2 Medio de propagación.....	10
2.1.3 Tipos de onda.....	11
2.1.4 Uso.....	11
2.2 Teoría electromagnética.....	12
2.2.1 Introducción.....	12
2.2.1.1 Ecuaciones de Maxwell.....	12
2.2.1.2 Ecuaciones de Poisson y Laplace.....	14
2.2.2 Ondas electromagnéticas.....	16
2.2.2.1 Ecuación de la onda electromagnética.....	17
2.2.2.2 Regiones del espectro electromagnético.....	17
2.2.3 Uso de las ondas electromagnéticas.....	19
2.3 Radiofrecuencias.....	20
2.3.1 Tipos de radiofrecuencia.....	20
2.3.2 Banda de frecuencias y características.....	20
2.3.3 Medios de propagación.....	24
2.3.4 Filtros.....	29
2.3.5 Modulación y esquema.....	31
2.3.6 Técnicas de división de bandas.....	42
2.3.7 Uso.....	44

CAPÍTULO 3. ANTENAS.....	48
3.1 Introducción.....	48
3.2 Tipos de Antena.....	49
3.2.1 Antena dipolo.....	49
3.2.1.1 Resistencia de radiación.....	50
3.2.1.2 Longitud de dipolo.....	50
3.2.1.3 Resonancia de la antena.....	51
3.2.1.4 Q de la antena y ancho de banda.....	51
3.2.1.5 Antenas cónicas.....	52
3.2.1.6 Dipolos doblados.....	53
3.2.2 Antena conectada a tierra o antena de Marconi.....	53
3.2.3 Antenas de uso especial.....	54
3.3 Características generales de las antenas.....	56
3.3.1 Reciprocidad de antena.....	56
3.3.2 Patrones de antena.....	56
3.3.2.1 Potencia radiada.....	57
3.3.2.2 Atenuación en el espacio libre.....	58
3.3.3 Intensidad de la radiación.....	59
3.3.4 Impedancia.....	59
3.3.5 Ganancia directiva y directividad.....	60
3.3.6 Ganancia de potencia.....	60
3.3.7 Polarización.....	61
3.3.8 Adaptación (recepción).....	61
3.3.9 Área efectiva (recepción).....	62
3.4 Usos.....	62
CAPÍTULO 4. GENERALIDADES DE LAS MICROONDAS.....	63
4.1 Introducción.....	63
4.2 Rango de frecuencia.....	63
4.3 Características.....	64
4.4 Propagación.....	67

4.5 Atenuaciones.....	73
4.5.1 Análisis de ruido.....	74
CAPÍTULO 5. TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS.....	82
5.1 Antecedentes de las tecnologías de transmisión de datos.....	82
5.2 Sistemas de transmisión de datos.....	84
5.2.1 Comunicación digital y analógica.....	85
5.2.2 Radiocomunicación.....	86
5.2.2.1. Tecnologías alámbricas e inalámbricas para transmisión de voz y datos.....	86
5.3 Sistemas de telecomunicación de cuarta generación.....	91
CAPÍTULO 6. TECNOLOGÍA LTE.....	98
6.1 Historia de Tecnología LTE.....	98
6.2 Comparativo sistema LTE vs segunda y tercera generación.....	104
6.3 Características.....	111
6.4 Infraestructura y arquitectura.....	120
6.5 Estándares de tecnología LTE.....	133
6.6 Estado actual en México.....	143
CAPÍTULO 7. PROPUESTA DE DISEÑO DE ENLACE POR MEDIO DE MICROONDAS ENTRE CU Y LA FACULTADES DE ESTUDIOS SUPERIORES.....	150
7.1 Diseño de enlace punto a punto por medio de microondas.....	150
7.2 Estudio del tipo de suelo para selección de sitio.....	159
7.3 Análisis de enlace y selección de trayectoria.....	164
7.3.1 Línea de vista o trayectoria directa.....	166
7.3.2 Determinación de Azimut y ángulos de antenas.....	172
7.3.3 Ganancias y Pérdidas.....	173
7.3.3.1 Pérdida de Espacio Libre.....	173
7.3.3.2 Margen de desvanecimiento.....	174

7.3.3.3 Pérdida por difracción (knifeedge).....	175
7.3.3.4 Pérdidas por atenuación en las líneas de transmisión.....	177
7.3.3.5 Pérdidas por absorción (gases atmosféricos).....	178
7.3.3.6 Pérdida por lluvia.....	179
7.3.3.7 Pérdidas de inserción (conectores).....	180
7.4 Torres.....	181
7.4.1 Normatividad.....	185
7.4.2 Selección de torres.....	187
7.5 Antenas.....	190
7.6 Enlace de Microondas.....	191
7.6.1 Diagrama del sistema.....	194
7.6.2 Descripción y Diagrama de Equipos.....	195
7.6.3 Análisis de la Red LTE.....	204
7.6.3.1 Cálculo del área por Campus Universitario.....	209
7.7 Descripción del SITE.....	211
7.7.1 Sección de alimentación eléctrica.....	211
7.7.2 Generador de energía.....	212
7.7.3 UPS.....	212
7.8 Simulación de Enlaces.....	214
7.8.1 Simulación de enlaces microondas por medio del software radio mobile.....	214
7.8.2 Simulación de la red LTE.....	219
7.9 Estudio Financiero.....	227
CONCLUSIONES.....	233
GLOSARIO.....	238
ANEXOS.....	247
BIBLIOGRAFIA.....	265
MESOGRAFIA.....	267

ÍNDICE DE TABLAS.

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1 Ecuaciones de Maxwell en forma puntual.....	13
Tabla 2.2 Ecuaciones de Maxwell en forma integral y derivada.....	14
Tabla 2.3 Espectro electromagnético.....	18
Tabla 2.4 Designaciones de banda CCIR.....	22
Tabla 2.5 Tabla de verdad Modulador QPSK.....	38
Tabla 2.6 Tabla de verdad para modulador 8-PSK.....	39
Tabla 2.7 Tabla de verdad del Modulador 8-QAM.....	40
Tabla 2.8 Tabla de verdad Modulador 16-QAM.....	41

CAPÍTULO 5.

Tabla 5.1 Métodos de transmisión de datos.....	90
--	----

CAPÍTULO 6.

Tabla 6.1 Comparativo entre sistema LTE vs segunda y tercera generación.....	110
Tabla 6.2 Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE en la Release...117	
Tabla 6.3 Entidades de red e interfaces de E-UTRAN.....	125
Tabla 6.4 Tiempos de traspaso de interrupción.....	140
Tabla 6.5 Capacidad de VoIP.....	141

CAPÍTULO 7.

Tabla 7.1 Comparativo de coordenadas geográficas obtenidas por diferentes dispositivos.....	153
Tabla 7.2 Datos de ubicación geográfica de puntos de enlace.....	155
Tabla 7.3a Localización geográfica de los repetidores.....	159
Tabla 7.3b Análisis de línea de vista.....	159
Tabla 7.4 Tipo de suelo en la delegación Coyoacán.....	161
Tabla 7.5 Tipo de suelo para instalación de Torres.....	164
Tabla 7.6a Línea de visión óptica y visión efectiva para los puntos de enlace.....	165
Tabla 7.6b Elevación de puntos de enlace.....	165
Tabla 7.7a Cálculos de trayectoria directa.....	166

Tabla 7.7b Cálculos de zona de Fresnel.....	167
Tabla 7.7c Cálculos de altura de despeje.....	170
Tabla 7.8 Cálculos de elevación y valores de Azimut.....	172
Tabla 7.9 Resultados de ganancia y pérdida para los enlaces propuestos.....	177
Tabla 7.10 Nivel de atenuación permitido según la velocidad de transmisión para un cable UTP.....	178
Tabla 7.11 Resumen de ganancias y pérdidas en equipos transmisores.....	180
Tabla 7.12 Resumen de ganancias y pérdidas en equipos receptores.....	181
Tabla 7.13 Características de las torres.....	189
Tabla 7.14 Tipos de torres a instalar.....	189
Tabla 7.15 Equipos transmisores y receptores.....	192
Tabla 7.16 Distribución de equipos.....	204
Tabla 7.17 Bandas relevantes de uso oficial de acuerdo al IFT.....	205
Tabla 7.18 Distribución en bloques de la banda AWS.....	205
Tabla 7.19 Fragmento de tabla, bandas de frecuencia E – UTRA.....	205
Tabla 7.20 Fragmento de tabla de tecnologías compatible con LTE.....	206
Tabla 7.21 Presupuesto de enlace de bajada.....	207
Tabla 7.22 Presupuesto de enlace de subida.....	208
Tabla 7.23 Radio de celda y área de cobertura.....	209
Tabla 7.24 Áreas de los campus de la Red.....	210
Tabla 7.25 Consumos de potencia (Watts).....	213
Tabla 7.26 Estudio financiero 1.....	230
Tabla 7.27 Estudio financiero 2.....	230
Tabla 7.28 Estudio financiero 3.....	231
Tabla 7.29 Estudio financiero 4.....	232

ÍNDICE DE FIGURAS.

CAPÍTULO 1.

Figura 1.1 Equipo de Usuario (User Equipment, UE).....5

CAPÍTULO 2.

Figura 2.1 Periodo.....7

Figura 2.2 Longitud de onda.....8

Figura 2.3 Longitud de onda longitudinal.....8

Figura 2.4 Cresta y valle.....8

Figura 2.5 Rarefacción y compresión.....9

Figura 2.6 Amplitud.....9

Figura 2.7 Señal analógica y señal digital.....11

Figura 2.8 Ejemplo señal digital.....11

Figura 2.9 Arreglo típico de una pistola de electrones.....15

Figura 2.10 Generación de ondas electromagnéticas.....18

Figura 2.11 Espectro electromagnético.....18

Figura 2.12 Propagación de onda terrestre (debajo de 2MHz).....26

Figura 2.13 Propagación de onda celeste (de 2 a 30 MHz).....26

Figura 2.14 Propagación de línea de vista (LOS, arriba de 30 MHz).....27

Figura 2.15 Filtro Pasa Bajos.....30

Figura 2.16 Filtro Paso altas.....30

Figura 2.17 Filtro Paso Banda.....31

Figura 2.18 Resumen de las diversas técnicas de modulación.....33

Figura 2.19 Diagrama simplificado de bloques de un sistema electrónico de comunicaciones.....35

Figura 2.20 b) Diagrama fasorial QPSK (c) diagrama de constelación QPSK.....38

Figura 2.21 Diagrama fasorial modulación 8-PSK.....39

Figura 2.22 Diagrama de constelación 8-PSK.....39

Figura 2.23 Modulador 8-QAM (b) Diagrama fasorial ; (c) Diagrama de constelación.....41

Figura 2.24 Modulador 16-QAM (b) Diagrama Fasorial; (c) Diagrama de constelación.....	42
Figura 2.25 comparación de una señal OFDM en el dominio de la frecuencia y del tiempo.....	43
Figura 2.26 OFDM comparación con OFDMA.....	43
Figura 2.27 Comparación entre OFDMA y SC-FDMA.....	44
Figura 2.28 Evolutivo de la penetración de telefonía fija móvil en México.....	47
CAPÍTULO 3.	
Figura 3.1. Radiación de una línea de transmisión: (a) radiación de línea de transmisión, (b) conductores divergentes, (c)antena de Marconi, (d) antena de Hertz.....	49
Figura 3.2 Dipolo de media onda de 18 MHz.....	50
Figura 3.3 Antena cónica.....	53
Figura 3.4 Dipolo doblado.....	53
Figura 3.5 Onda estacionaria de voltaje y corriente de una antena aterrizada de cuarto de onda.....	54
Figura 3.6 Reflector parabólico.....	55
Figura 3.7 Dispersión de energía en los bordes de un paraboloid.....	55
Figura 3.8 Patrones de antena tridimensional.....	57
Figura 3.9 Polarización de antena (a) lineal.....	61
CAPÍTULO 4.	
Figura 4.1 Espectro de ondas electromagnéticas.....	64
Figura 4.2 Comunicación vía microondas.....	67
Figura 4.3 Repetidores y reflectores pasivos.....	70
Figura 4.4 Diagrama de enlace vía satélite.....	71
Figura 4.5 Cobertura satelital de la tierra con solo 3 satélites.....	72
Figura 4.6 Radar.....	73
Figura 4.7a Senoide sin ruido y 4.7b senoide con ruido.....	75
Figura 4.8 Efecto del ruido en una señal digital.....	81

CAPÍTULO 5.

Figura 5.1 Telégrafo diseñado por Samuel Morse.....	82
Figura 5.2 Radio diseñado por Marconi.....	82
Figura 5.3 Teléfono desarrollado por Alejandro Graham Bell.....	83
Figura 5.4 Evolución de la televisión.....	83

CAPÍTULO 6.

Figura 6.1 Línea del tiempo sobre la evolución de las comunicaciones móviles..	101
Figura 6.2 Esquema de Evolución de las IMT.....	105
Figura 6.3 Tráfico IP en millones de Terabytes por mes.....	106
Figura 6.4 Comparación de las tecnologías en velocidades.....	108
Figura 6.5 Multiplexación de usuarios en OFDMA.....	112
Figura 6.6 Ilustración del scheduling de paquetes en OFDMA.....	113
Figura 6.7 Eficiencia espectral media.....	120
Figura 6.8 Arquitectura del sistema LTE.....	122
Figura 6.9 Interfaces de E-UTRAN y EPC.....	122
Figura 6.10 Red de acceso E-UTRAN.....	123
Figura 6.11 Ilustración de los mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio.....	129
Figura 6.12 Control de los servicios portadores radio y S1 a través de la interfaz S1-MME.....	131
Figura 6.13 Cuadro de licitación de Espectro.....	144
Figura 6.14 Espectro a subastar el IFT.....	145

CAPÍTULO 7.

Figura 7.1 Ubicación de los sitios.....	150
Figura 7.2 Características de GPS Garmin.....	151
Figura 7.3 Verificación de sitio FES Zaragoza (Campus 1).....	151
Figura 7.4 Verificación de sitio FES Zaragoza (Campus 2).....	152
Figura 7.5 Verificación de sitio DGTIC, UNAM.....	152
Figura 7.6 Verificación de coordenadas en FES Cuautitlán Campus 4.....	153
Figura 7.7 Corroboración de coordenadas en FES Cuautitlán Campus 1.....	154

Figura 7.8	Diseño de enlace en forma de anillo.....	155
Figura 7.9	Análisis de diferencia de elevación.....	156
Figura 7.10	Análisis de diferencia de elevación.....	157
Figura 7.11	Diseño de enlace en forma de estrella.....	158
Figura 7.12	Tipos de suelos análisis más específico.....	160
Figura 7.13.a	Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace DGTIC-FESZC1....	167
Figura 7.13.b	Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace DGTIC-FESAR.....	168
Figura 7.13.c	Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace DGTIC-REP1.....	168
Figura 7.13.d	Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace REP 1-FESA.....	168
Figura 7.13.e	Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1-FESA.....	169
Figura 7.13.f	Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1-FESA.....	170
Figura 7.13.g	Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1-FESI.....	170
Figura 7.13.h	Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1-REP2.....	171
Figura 7.13.i	Trayectoria directa y zonas de Fresnel, enlace REP2 – FESCC1.....	171
Figura 7.13.j	Trayectoria directa y zonas de Fresnel, enlace REP2 – FESCC4.....	171
Figura 7.14	Elementos de un radioenlace.....	173
Figura 7.15	Representación gráfica de Gd (dB) como función de v.....	177
Figura 7.16	Atenuaciones en dB/km para el oxígeno y el vapor de agua.....	179
Figura 7.17	Torre Autosoportada.....	182
Figura 7.18	Torre tipo monopolo.....	182
Figura 7.19	Torre Arriostrada.....	183
Figura 7.20	Mástil para Antena.....	184
Figura 7.21	Soporte para antena.....	184
Figura 7.22	Mástil autosustentable.....	185
Figura 7.23	Relación entre la ganancia de potencia y la abertura del haz de una antena.....	190
Figura 7.24	Haz principal y lóbulos laterales de una antena.....	191
Figura 7.25	Repetidor de microondas.....	192
Figura 7.26	Equipos Radwin.....	193
Figura 7.27	Vista General enlaces DGTIC.....	194

Figura 7.28 Vista General Enlaces Repetidor 1.....	195
Figura 7.29 Vista General Enlaces Repetidor 2.....	195
Figura 7.30 Diagrama general de la red de microondas.....	196
Figura 7.31 Diagrama de equipos parte 1.....	197
Figura 7.32 Nokia Network in a box.....	200
Figura 7.33 Equipo eNodeB.....	200
Figura 7.34 Diagrama de equipos parte 2.....	202
Figura 7.35 Área Ciudad Universitaria.....	209
Figura 7.36 Área total Ciudad Universitaria.....	210
Figura 7.37 Planta Eléctrica.....	212
Figura 7.38 Diagrama General.....	215
Figura 7.39 Simulación Enlace DGTIC – FES Aragón.....	215
Figura 7.40 Simulación Enlace DGTIC –FES Zaragoza.....	216
Figura 7.41 Simulación Enlace DGTIC – Repetidor 1.....	216
Figura 7.42 Simulación Enlace Repetidor 1 – Repetidor 2.....	217
Figura 7.43 Simulación Enlace Repetidor 1 – FES Acatlán.....	217
Figura 7.44 Simulación Enlace Repetidor 1 – FES Iztacala.....	218
Figura 7.45 Simulación Enlace Repetidor 2 – FES Cuautitlán Campus 1.....	218
Figura 7.46 Simulación Enlace Repetidor 2 – FES Cuautitlán Campus 4.....	219
Figura 7.47 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).....	220
Figura 7.48 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Amarilla).....	221
Figura 7.49 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.....	221
Figura 7.50 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).....	222
Figura 7.51 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.....	222
Figura 7.52 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).....	223
Figura 7.53 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.....	223
Figura 7.54 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).....	224
Figura 7.55 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.....	224
Figura 7.56 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).....	225
Figura 7.57 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.....	225

Figura 7.58 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).....226
Figura 7.59 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.....226

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN.

1.1 Objetivo.

Diseñar una red interna de telecomunicaciones al servicio de la UNAM. Para ofrecer una alternativa de transmisión de voz y datos con base en tecnología LTE, a un bajo costo entre los campus universitarios de la zona metropolitana (Ciudad Universitaria, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Iztacala, Aragón, Cuautitlán, Zaragoza). Para atender la necesidades de comunicación en actividades de investigación, académicas, administrativas y culturales en tiempo real.

1.2 Definición del problema.

Actualmente la UNAM cuenta con el servicio de RedUNAM, que por medio de proveedores externos permite el flujo de información entre las Facultades de Estudios Superiores (FES) y Ciudad Universitaria (CU). Debido al crecimiento y desarrollo de la UNAM, ha incrementado el número de usuarios que tienen acceso a las redes de telecomunicación existentes generando bajo rendimiento, saturación de la red y en casos extremos fallas de la misma, por lo que surge la necesidad de implementar una nueva red de telecomunicación redundante a las ya existentes. Esta red de telecomunicación empleará nuevas tecnologías que permitirán realizar labores académicas como: seminarios a distancia, videoconferencias, subir y bajar información digital, telefonía, enlaces entre laboratorios, entre otros de una forma eficiente y segura.

El propósito de este trabajo de tesis es la transmisión de voz y datos entre las Facultades de Estudios Superiores (FES) y Ciudad Universitaria (CU), a través del uso de microondas y tecnología LTE (Long Term Evolution, por sus siglas en inglés, lo que en español se traduce como Evolución a Largo Plazo), para ampliar y mejorar los servicios de telecomunicaciones, lo que será redundante con los servicios actuales. Con el presente trabajo de tesis se logrará una transmisión de señal sin pérdidas ni interferencia a bajo costo y de fácil mantenimiento. Para el desarrollo de este proyecto de tesis es necesario realizar el análisis topográfico de

la región y de los componentes disponibles para poder realizar la transmisión de señal.

1.3 Justificación de la transmisión de voz y datos a través de microondas utilizando tecnología LTE.

La tecnología LTE significa una evolución de las tecnologías móviles GSM, EDGE, UMTS, HSPA Y HSPA+ que actualmente se utilizan exclusivamente por las compañías telefónicas para proveer servicio a sus subscriptores.

La evolución trae consigo un sin número de mejoras y alcances en el servicio móvil de aplicaciones de voz y datos.

De tal manera que documentar las especificaciones técnicas para la construcción de una red de microondas con tecnología LTE para entregar servicios dedicados o públicos contribuyen a mejorar los servicios actuales de comunicación móvil y da pasó a nuevos servicios globalizados que con las actuales tecnologías están limitados o simplemente no son compatibles.

Aplicaciones para esta tecnología; son todas debido a que es una evolución de las comunicaciones móviles por lo tanto estaríamos hablando de que en poco tiempo esta sería la única red en el mercado y como ya lo mencionamos anteriormente los alcances y las aplicaciones serian extensas.

Una aplicación muy viable y clave es que el uso eficaz de las telecomunicaciones para la enseñanza depende de escoger una combinación acertada de tecnologías asequibles para satisfacer las necesidades concretas de cada país y de sus sistemas educativos. Se resumen los costos y las ventajas y se analizan las fuentes de financiación. La clave es el acceso a las telecomunicaciones. Sin acceso a las telecomunicaciones, no es posible progresar. Con acceso a las telecomunicaciones y ciertos recursos, es posible lograr mucho.

La educación ha siempre sido el principal capital para el desarrollo económico y social, y es un factor indispensable para las economías del conocimiento que caracterizarán al siglo XXI. Las inversiones en enseñanza y formación son esenciales. La inversión idónea con el fin de sacar partido del potencial y el alcance de las tecnologías de la informática y las telecomunicaciones disponibles facilitará el camino hacia la meta de acceso generalizado a la enseñanza. Ahora

es posible combinar estos métodos simples con sistemas interactivos de multimedia que ofrecen voz, video y transmisión de datos en texto y gráficos a pedido del alumno. Estos sistemas informáticos de red introducen profundos cambios tanto en la aplicación como en el costo de las tecnologías disponibles para la enseñanza. Según un documento del Banco Mundial sobre América Latina y el Caribe: “la complejidad y el costo de estas tecnologías no debe ser un factor disuasivo para la experimentación innovadora, factor esencial previo a la aplicación en gran escala de dichas tecnologías en el ámbito de la enseñanza. Si se lleva a cabo una cuidadosa planificación, y dada la disminución continua de costos, es posible que estas tecnologías ofrezcan la mejor oportunidad que se ha tenido en muchas décadas de potenciar la educación. Asimismo, es posible aplicar estas tecnologías a todos los niveles de la enseñanza aún bajo las limitaciones presupuestarias actuales, siempre y cuando se desarrollen de manera estratégica y se planifiquen concienzudamente.

1.4 Descripción general del modelo propuesto.

La evolución de las redes de nueva generación en ambientes urbanos hacen más viable la implementación de redes LTE, gracias a la migración de redes HSPA (High Down load Speed Packet Access) a LTE, dando soporte a las necesidades actuales de los usuarios de convergencia de servicios y tiempos de descarga más altas, manejando anchos de banda de 180KHz durante un 1ms, logrando calidad de servicio y la experiencia del usuario como medio de ayuda a la mejora de las condiciones de la red para mejorar la calidad del Servicio QoS (por sus siglas en inglés), con el uso de controladores de la red de Radio.

El objetivo de LTE es proporcionar un radio acceso de alta velocidad de datos, baja latencia y optimizado de paquetes tecnología de apoyo a los despliegues flexibles de ancho de banda. En la red de forma paralela, la nueva arquitectura está diseñada con el objetivo de apoyar el tráfico de conmutación de paquetes, calidad del servicio y una latencia mínima (Coral, 2013)

Derivado de las afirmaciones en los párrafos anteriores, se puede definir que el diseño para una red de transmisión de voz y datos a través de microondas utilizando tecnología LTE entre los campus de la UNAM de la zona metropolitana

tiene como objetivo proporcionar la infraestructura necesaria para la transmisión de comunicación entre sus respectivos campus.

La red que se instalara deberá tener alta confiabilidad ya que se contemplara como red redundante de la actual infraestructura que tiene la UNAM para la intercomunicación entre sus campus, lo cual permitirá que si se presenta fallo en algún equipo de comunicación no se vea interrumpido el servicio en el resto de los elemento de la red. Aunado a esto deberá tener un ancho de banda considerable y suficiente para el correcto flujo de información entre los campus de la UNAM.

La red de comunicaciones dará solución a la comunicación y conectividad de datos, video y telefonía. Todo esto deberá permitir la escalabilidad de la red y mantener calidad en el servicio.

Componentes del sistema

En las comunicaciones móviles existen tres componentes básicos para la operación de los sistemas, los cuales son (Coral, 2013):

- Equipo del usuario
- Red de acceso
- Red troncal

A continuación describiremos de manera general cada componente:

Equipo del usuario

Es el dispositivo que permite tener acceso a los servicios que ofrece una red LTE a través de una interfaz de radio. El equipo del usuario (user equipment. UE) contiene dos elementos básicos: un módulo de subscripción del usuario (SIM/USIM) y el equipo móvil propiamente dicho (Mobile Equipment, ME). Adicionalmente, las funciones del equipo móvil se agrupan en dos entidades funcionales: la terminación móvil (Mobile Terminal, MT) y el equipo terminal (Terminal Equipment, TE).

La figura 1.1 describe de manera general cada módulo.

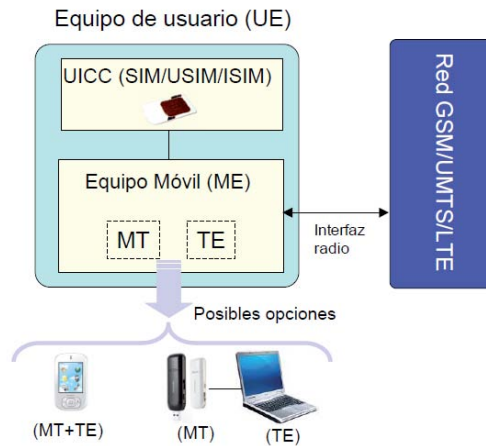


Figura 1.1 Equipo de Usuario (User Equipment, UE).

Red de acceso

Es la que soporta la transmisión de radio entre el equipo del usuario y la red troncal. La red de acceso gestiona el uso de los recursos radio disponible para la provisión de servicios portadores de forma eficiente. La activación de los recursos de transmisión en la red de acceso se controla generalmente desde la red troncal. La red de acceso está formada por estaciones base y en los sistemas móviles actuales 2G y 3G, también por equipos controladores de las estaciones base.

Red troncal

Esta red se encarga de aspectos tales como control de acceso a la red celular (autenticación de los usuarios del sistema), gestión de la movilidad de los usuarios, gestión de las sesiones de datos o circuitos que transportan la información de los usuarios, mecanismos de interconexión con otras redes, etc. También pueden formar parte de la red troncal las funciones asociadas con el control de los servicios finales ofrecidos a los usuarios (control y señalización asociada al servicio de telefonía). La red troncal está formada por equipos que albergan funciones de conmutación de circuitos, encaminamiento de paquetes (routing), bases de datos, etc (Coral, 2013).

Nuestro diseño contempla los tres componentes básicos, los cuales serán detallados a lo largo de este trabajo de tesis, así mismo nos aseguraremos que los componentes contemplados para el diseño de nuestra red, tengan los suficientes recursos para soportar toda la transferencia de información que pudiese necesitarse entre los campus de la UNAM en la zona metropolitana.

CAPÍTULO 2.

BASES TEÓRICAS.

2.1 Señales.

Una señal es una representación matemática de la evolución de una magnitud física (o una medida) respecto de algún o algunos parámetros; generalmente tiempo o espacio. Esta magnitud física puede ser voltaje, intensidad eléctrica, presión, temperatura, intensidad lumínica, etc.; e incluso puede que ni tan siquiera tenga un sentido físico claro. Lo realmente interesante del estudio de las señales es que suponen una abstracción respecto a la magnitud física concreta, pasando está a ser considerada como una función matemática, $x(\cdot)$, que tiene como variables independientes los parámetros con respecto a los cuales varía (Gonzalez & Rodriguez, 2007).

Uno de los aspectos fundamentales del nivel físico es transmitir información en forma de señales electromagnéticas. La información que utilizan las personas o las aplicaciones no está en un formato que se pueda transmitir por una red. El medio de transmisión funciona transmitiendo energía en forma de señales electromagnéticas. La información debe ser convertida a señales electromagnéticas, para poder ser transmitida.

Todos los formatos de información considerados (voz, datos, imágenes, vídeo) se pueden representar mediante señales electromagnéticas. Dependiendo del medio de transmisión y del entorno donde se realicen las comunicaciones, se pueden utilizar señales analógicas o digitales para transporta la información.

La representación de los datos en los sistemas informáticos es digital y binaria. La transmisión de datos tiene restricciones muy severas en la admisión de errores de transmisión (www.mfbarcell.es/redes_de_datos/tema_07/tema07_senales.pdf, 17-04-16).

2.1.1 Características.

Las principales características de las señales son:

- Frecuencia
- Periodo
- Longitud

- Cresta y valle
- Amplitud
- Velocidad de propagación

A continuación describiremos brevemente cada una de ellas.

Frecuencia

La frecuencia corresponde a la cantidad de oscilaciones que ocurren en una unidad de tiempo. Si la unidad de tiempo es el segundo (s), la frecuencia se mide en Hertz, que se abrevia Hz.

Entre periodo y frecuencia hay una relación matemática, y es:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Ec.2.1})$$

De la relación se entiende que

$$1\text{hertz} = \frac{1}{1\text{segundo}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La frecuencia y el periodo, son magnitudes inversamente proporcionales.

Periodo

Corresponde al tiempo que tarda un punto, del medio donde se propaga la onda, en completar una oscilación. Se mide en unidades de tiempo, preferentemente el segundo (s).

También corresponde al tiempo que tarda una onda en propagarse una distancia equivalente a una longitud de onda.

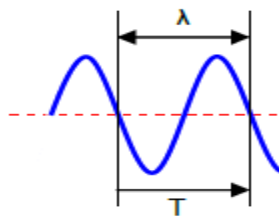


Figura 2.1 Periodo.

Longitud

Corresponde a la distancia, en línea recta, entre dos puntos de una onda que tienen la misma posición relativa. Esto ocurre, por ejemplo, entre dos crestas sucesivas, o también entre dos valles sucesivos. Se mide en unidades de longitud, preferentemente el metro (m).

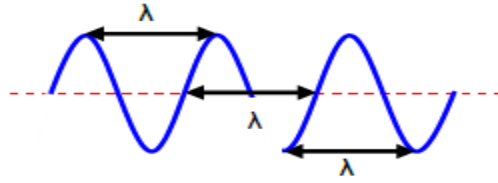


Figura 2.2 Longitud de onda.

En una onda longitudinal, la longitud de onda corresponde a la distancia, en línea recta, entre dos zonas de compresión consecutivas o dos zonas de rarefacción consecutivas.

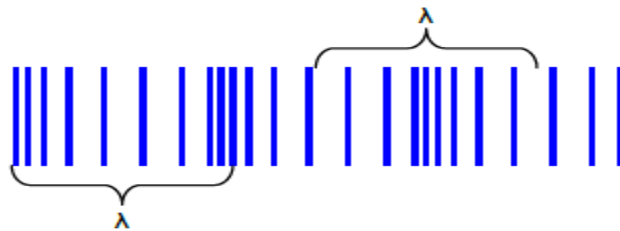


Figura 2.3 Longitud de onda longitudinal.

Cresta y valle

El monte o cresta, es el punto que está más alejado de la posición de equilibrio del medio donde se propaga una onda. Suele representarse con esa nominación al punto que se dibuja en la parte de arriba de la onda.

El valle también es el punto más alejado de la posición de equilibrio de una onda, pero en el lado opuesto al lugar donde se ubican los montes o crestas.

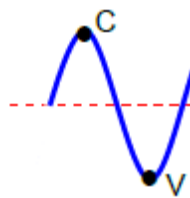


Figura 2.4 Cresta y valle.

En una onda longitudinal el monte o cresta recibe el nombre de zona de compresión y el valle se denomina rarefacción.



Figura 2.5 Rarefacción y compresión.

Amplitud

En una onda transversal, corresponde a la distancia máxima que se puede separar una partícula del medio que oscila, medida en forma perpendicular a la línea que representa la posición de equilibrio del medio. Se mide en unidades de longitud, preferentemente el metro (m).

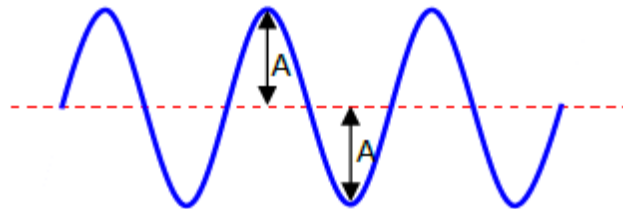


Figura 2.6 Amplitud.

Velocidad de propagación

Representa la distancia que recorre una onda en cada unidad de tiempo, se determina con la relación:

$$v = \frac{\lambda}{t} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Y, como

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La velocidad también se puede determinar con la relación:

$$v = \lambda * f \quad (\text{Ec.2.5})$$

Y, si se conoce la distancia, d , que se propaga una onda y el tiempo, t , que tarda en hacerlo, también se puede determinar la velocidad de propagación de ella con la relación(http://www.hverdugo.cl/conceptos/conceptos/caracteristicas_de_las_ondas.pdf, 20-04-2016):

$$v = \frac{d}{t} \quad (\text{Ec.2.6})$$

2.1.2 Medio de propagación.

Tanto las señales analógicas como las digitales se pueden transmitir si se emplea el medio de transmisión adecuado. El medio de transmisión en concreto determinará cómo se tratan estas señales.

Una señal analógica es una onda electromagnética que varía continuamente y que, según sea su espectro, puede propagarse a través de una serie de medios; por ejemplo, a través de un medio guiado como un par trenzado, un cable coaxial, un cable de fibra óptica, o a través de medios no guiados, como la atmósfera o el espacio. Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión que se puede transmitir a través de un medio conductor; por ejemplo, un nivel de tensión positiva constante puede representar un 0 binario y un nivel de tensión negativa constante puede representar un 1.

La principal ventaja de la señalización digital es que en términos generales, es más económica que la analógica, a la vez de ser menos susceptible a las interferencias de ruido. La principal desventaja es que las señales digitales sufren más con la atenuación que las señales analógicas. Debido a la atenuación, o reducción, de la energía de la señal que sufren las frecuencias altas, los pulsos se hacen más pequeños a la vez que se suavizan. Esta atenuación puede implicar perder con facilidad la información contenida en la señal propagada.

Una señal digital sólo se puede transmitir a una distancia limitada debido a la atenuación y al ruido. Para transmitir señales digitales a mayores distancias se usan repetidores. Un repetidor recibe la señal digital, regenera el patrón de ceros y unos, y los retransmite. De esta manera se evita la atenuación. La señal que se recibe diferirá de la señal transmitida debido a varias adversidades y dificultades sufridas en la transmisión. En las señales analógicas, estas dificultades pueden degradar la calidad de la señal. En las señales digitales, se generarán bits erróneos: un 1 binario se transformará en un 0 y viceversa.

Las dificultades más significativas son:

- La atenuación y la distorsión de atenuación.
- La distorsión de retardo.
- El ruido (Stallings, 2004).

2.1.3 Tipos de onda.

La información viaja a través de un sistema de telecomunicaciones en forma de señales electromagnéticas. Las cuales son de dos tipos (Figura 2.7):

- Señales continuas o analógicas
- Señales discretas o digitales

Las señales continuas o analógicas son aquellas en que la intensidad de la señal varía suavemente en el tiempo. Las variaciones de la señal pueden tomar cualquier valor en el tiempo (Gonzalez & Rodriguez, 2007)

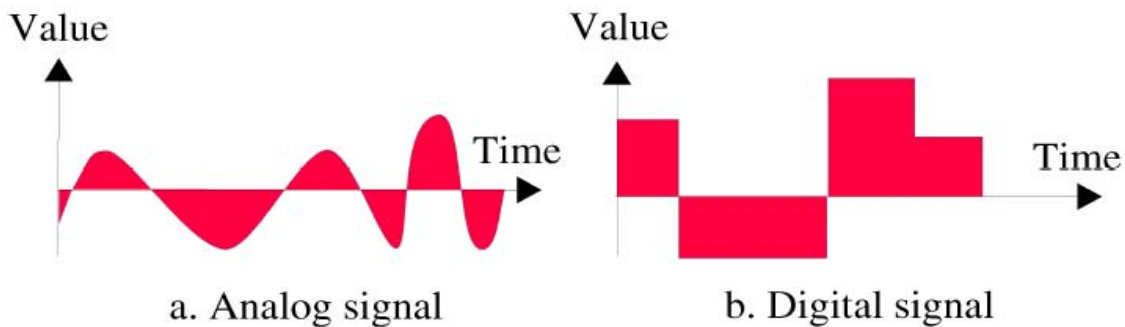


Figura 2.7 Señal analógica y señal digital.

Las señales discretas o digitales son aquellas que la intensidad se mantiene constante durante un intervalo de tiempo, tras el cual la señal cambia a otro valor constante. Las variaciones de la señal sólo pueden tomar valores discretos (Figura 2.8) (Gonzalez & Rodriguez, 2007).

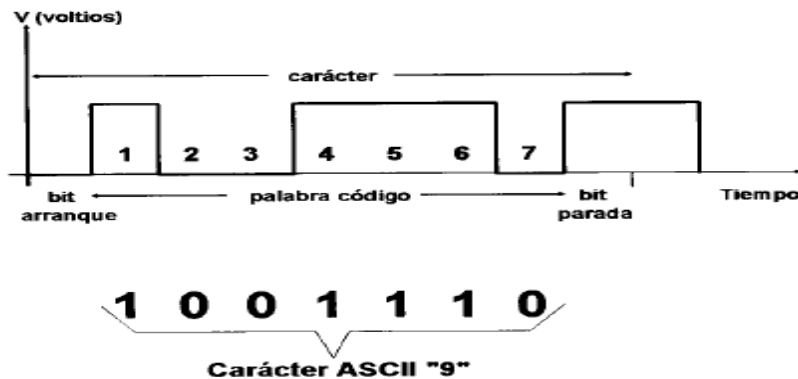


Figura 2.8 Ejemplo señal digital.

2.1.4 Uso.

Los usos de las distintas bandas del espectro vienen determinadas por el hecho de que, a mayor frecuencia de la onda, mayor cantidad de información es capaz

de transportar. Por esto se utilizan mayores frecuencias en la televisión que envía señales de imagen y sonido, que en la radio que sólo envía señales de sonido.

Las ondas emitidas por las antenas emisoras deben llegar a los receptores. Las ondas se propagan por el espacio en todas direcciones y llegan a los receptores directamente o mediante reflexiones, en la superficie terrestre o en la capa de la atmósfera llamada ionosfera. En la ionosfera se reflejan las ondas de radio, sobre todo las de las bandas de LF y MF.

Los teléfonos móviles tienen un emisor-receptor que enlaza con un "radioenlace" que es capaz de recibir y reenviar los mensajes dentro de su zona de cobertura. Los teléfonos móviles utilizan en Europa frecuencias entre 900 y 1800 MHz y cada número de móvil corresponde a una frecuencia. Un problema importante es cómo conseguir el mayor número de frecuencias disponibles, evitando las interferencias entre ellas. El uso del teléfono móvil se inició en la Segunda Guerra Mundial y desde entonces se han desarrollado varios sistemas hasta su popularización. Actualmente se ofrece la cuarta generación (4G) con el sistema LTE avanzado.

El **radar** (***RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging*) utiliza microondas SHF para localizar la posición y la velocidad de los aviones, barcos, nubes u otros objetos. Está formado por una antena que emite pulsos electromagnéticos y que actúa también como receptora de la onda reflejada por el objeto.

La absorción y la atenuación de las ondas hace necesario establecer redes de repetidores y radioenlaces, tanto terrestres como desde satélites de comunicaciones, entre los 800 MHz y los 42 GHz en la banda de microondas (http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/3_a_plicaciones_de_las_ondas_electromagneticas_telecomunicaciones.html, 23-04-2016).

2.2 Teoría electromagnética.

2.2.1 Introducción.

2.2.1.1 Ecuaciones de Maxwell.

Los campos eléctricos y magnéticos son fundamentalmente campo de fuerzas que se originan a partir de cargas eléctricas. Los campos de fuerza se denominan eléctrico, magnético o electromagnético debido al estado de movimiento de las

cargas eléctricas con relación a un punto en que se hacen las observaciones del campo, es entonces que un campo electrostático (independiente del tiempo) se debe a cargas eléctricas en reposo, un campo magnético se debe a cargas eléctricas que se mueven a velocidades constantes y el campo electromagnético son movimientos acelerados que producen los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (Reitz, Milford, & Christy, 2001).

La relación de los campos eléctricos y magnéticos con su carga y fuentes de corriente la proporciona un conjunto de relaciones, conocidas como ecuaciones de Maxwell. Las principales implicaciones sobre el movimiento de corrientes de las ecuaciones de Maxwell son las siguientes:

- Interdependencia del campo eléctrico y magnético.
- Existencia de ondas electromagnéticas.
- Velocidad finita de propagación de ondas electromagnéticas.
- Propagación en espacio vacío a la velocidad de la luz, en si la luz es una onda electromagnética.

Para entender la importancia de estos conceptos y la contribución de Maxwell a la teoría electromagnética, es necesario observar las ecuaciones del campo electromagnético como existían antes de la introducción del desplazamiento de corrientes por parte de Maxwell (Ida, 2000).

Ecuaciones de campo antes de las modificaciones de Maxwell	Ecuaciones de campo antes de las modificaciones de Maxwell
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ 2.7	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ 2.11
$\nabla \times H = J$ 2.8	$\nabla \times H = J + \frac{\delta D}{\delta t}$ 2.12
$\nabla \cdot D = \rho$ 2.9	$\nabla \cdot D = \rho$ 2.13
$\nabla \cdot B = 0$ 2.10	$\nabla \cdot B = 0$ 2.14

Tabla 2.1 Ecuaciones de Maxwell en forma puntual.

Al comparar las ecuaciones se observa que la principal diferencia entre estas es la ecuación 2.12, en donde se incluye el concepto de desplazamiento de la corriente eléctrica. Las formas integrales de las ecuaciones de Maxwell son más fáciles de reconocer en términos de las leyes experimentales de las cuales se han

deducido a través de un proceso de generalización. Los experimentos deben tratar con cantidades físicas macroscópicas y sus resultados tienen que expresarse en términos de relaciones integrales. Es importante recordar que una ecuación diferencial siempre representa una teoría. En la siguiente tabla se presentan las ecuaciones de Maxwell en forma derivada e integral (Ida, 2000).

Ecuación de Maxwell	Forma diferencial	Forma integral	Enunciado
Ley de Faraday	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ 2.15	$\oint_c E \cdot dl = -\frac{\partial B}{\partial t}$ 2.16	La fuerza electromotriz (fem) inducida en un circuito, depende de las variaciones temporales del flujo magnético alrededor del circuito.
Ley de Ampere	$\nabla \times H = J + \frac{\delta D}{\delta t}$ 2.17	$\oint_c H \cdot dl = \int_s \left(J + \frac{\delta D}{\delta t} \right) \cdot ds$ 2.18	La tasa de cambio temporal, eléctrico, corriente estacionaria generada por cargas en movimiento, depende del campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada.
Ley de Gauss	$\nabla \cdot D = \rho$ 2.19	$\oint_c D \cdot ds = Q$ 2.20	El flujo del campo eléctrico en una superficie cerrada es proporcional a la carga dentro de la misma
Monopolo	$\nabla \cdot B = 0$ 2.21	$\oint_s B \cdot ds = 0$ 2.22	El flujo magnético neto sobre una superficie cerrada es cero (Ida, 2000., Perea, 2012).

Tabla 2.2 Ecuaciones de Maxwell en forma integral y derivada.

2.2.1.2 Ecuaciones de Poisson y Laplace.

Estas ecuaciones permiten encontrar campos de potencial dentro de regiones encerradas por potenciales o densidades de carga conocidas. Consideremos el

caso de una pistola de electrones, empleada para generar un rayo de electrones en un tubo de microondas para comunicación satelital (figura 2.9), si queremos evaluar el movimiento de los electrones debemos tomar en cuenta dos factores el campo y el movimiento de los electrones, por lo que se deben resolver las ecuaciones que definen estos fenómenos de forma simultánea ya que la carga de los electrones en el espacio afecta el campo (Carter, 1992).

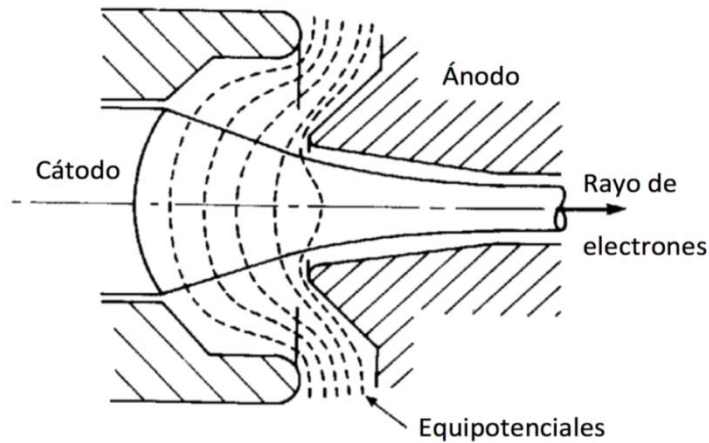


Figura 2.9 Arreglo típico de una pistola de electrones.

(Modificada de (Carter, 1992))

Para resolver este tipo de problemas se puede emplear la ecuación diferencial de la ley de Gauss (ec 2.26) y la ecuación de para calcular el potencial de campo eléctrico (ec 2.27)

$$\left(\frac{\delta E_x}{\delta x} + \frac{\delta E_y}{\delta y} + \frac{\delta E_z}{\delta z} \right) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

$$\mathbf{E} = - \left(x \frac{\delta V}{\delta x} + y \frac{\delta V}{\delta y} + z \frac{\delta V}{\delta z} \right) \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Esta es la ecuación de Poisson que se puede escribir de la siguiente forma:

$$\nabla^2 V = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

En donde ∇^2 se da en coordenadas cartesianas por

$$\nabla^2 = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Cuando no hay carga libre presente la ecuación toma la forma de la ecuación de Laplace (Carter, 1992):

$$\nabla^2 V = \frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

2.2.2 Ondas electromagnéticas.

El estudio de las ondas es fundamental ya que la energía de cualquier tipo puede transmitirse mediante ondas. Existen dos tipos básicos de ondas:

- Ondas mecánicas, las cuales dependen de la energía y cantidad de movimiento y se transportan mediante una perturbación del medio, la perturbación se propaga debido a las propiedades elásticas del mismo.
- Ondas electromagnéticas: se deben fundamentalmente a vibraciones de campos eléctricos y magnéticos.

La onda se propaga en el medio con las siguientes propiedades:

- La onda se propaga en el medio o a través del medio a velocidad finita. Por ejemplo una onda de sonido se propaga en el agua a una velocidad de 1500m/s, mientras que el aire se propaga a una velocidad de 340 m/s.
- La onda se propaga con atenuación. Después de que la onda se genera en la fuente esta se propaga hacia fuera y pierde fuerza. Por ejemplo el sonido pierde intensidad conforme se aleja de la fuente.
- La onda transporta energía.
- La propagación de la onda es direccional.
- Las ondas se pueden reflejar, refractar y difractar.
- Las ondas se pueden clasificar de acuerdo a su dirección de propagación, una onda transversal es aquella en la que las partículas oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. Una onda longitudinal es aquella en la que las partículas oscilan paralelamente a la dirección de propagación (<http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo/teo7.pdf>, 17-04-2016) (Ida, 2000).

Para entender como estas propiedades de las ondas se manifiestan, tomemos por ejemplo la onda de sonido generada por una cuerda de guitarra que se puede definir en la ecuación siguiente:

$$\frac{\delta^2 y}{\delta t^2} = \frac{Tg}{w} \frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = v^2 \frac{\delta^2 y}{\delta x^2} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

En donde T es la tensión de la cuerda en (N), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2) y w es el peso por longitud de la cuerda (N/m), el término Tg/w se expresa en (m^2/s^2) y por lo tanto es la velocidad al cuadrado. Esta es la velocidad de propagación de la onda en la cuerda. Esta ecuación también se puede expresar de manera vectorial:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\delta^2 \mathbf{A}}{dt^2} = \frac{\delta^2 \mathbf{A}}{dz^2} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

En donde **A** se refiere a un campo de vectores, v es la velocidad de propagación de la onda, que para este caso, se asume que se propaga en dirección z (Ida, 2000).

2.2.2.1 Ecuación de la onda electromagnética.

Existen dos tipos de ecuación de onda electromagnética, la primera es una ecuación sin fuente de generación llamada ecuación de onda homogénea y la segunda es una ecuación completa que incluye la fuente de generación y se denomina ecuación de onda no homogénea.

Las ecuaciones de ondas electromagnéticas pueden ser dependientes del tiempo, en su forma no homogénea se expresa de la siguiente forma.

$$\nabla^2 A = \frac{\delta^2 A}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 A}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 A}{\delta z^2} = -\mu J + \mu \epsilon \frac{\delta^2 A}{dt^2} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

Si la fuente no existe, se obtiene la siguiente ecuación de la onda homogénea para el vector magnético (Ida, 2000).

$$\frac{\delta^2 A}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 A}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 A}{\delta z^2} = \mu \epsilon \frac{\delta^2 A}{dt^2} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

2.2.2.2 Regiones del espectro electromagnético.

Las ondas electromagnéticas se generan por vibraciones de campos eléctricos y magnéticos. Son doblemente transversales, debido a que el campo magnético y el campo eléctrico son perpendiculares entre si y a su vez perpendiculares a la dirección de propagación. Se propagan a la velocidad de la luz. Su origen se fundamenta en el hecho de que toda carga eléctrica acelerada emite energía en forma de radiación electromagnética (<http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo/teo7.pdf>, 17-04-2016).

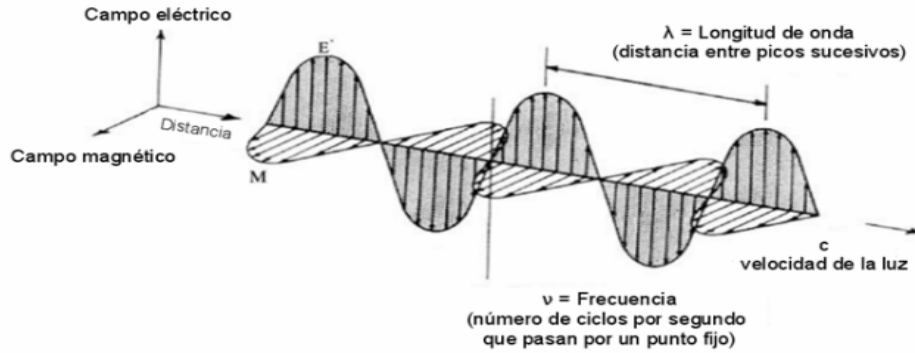


Figura 2.10 Generación de ondas electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas cubren un espectro amplio de longitudes de onda y frecuencia. Dentro de estas se incluyen las ondas de radio y televisión, la luz visible, la radiación infrarroja y ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. En la tabla 2.3 se presentan las características del espectro electromagnético.

Región	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda (m)
Rayos gamma	10^{22} - 10^{19}	10^{-11} - 10^{-14}
Rayos -X	10^{17} - 10^{20}	10^{-8} - 10^{-11}
Ultravioleta	10^{15} - 10^{17}	10^{-6} - 10^{-8}
Visible	10^{14} - 10^{15}	4×10^{-6} - 7×10^{-6}
Infrarrojo	10^{11} - 10^{14}	10^{-3} - 10^{-5}
Microondas	10^9 - 10^{11}	10^{-1} - 10^{-3}
Ondas de radio	10^3 - 10^9	10^5 - 10^{-1}

Tabla 2.3 Espectro electromagnético.

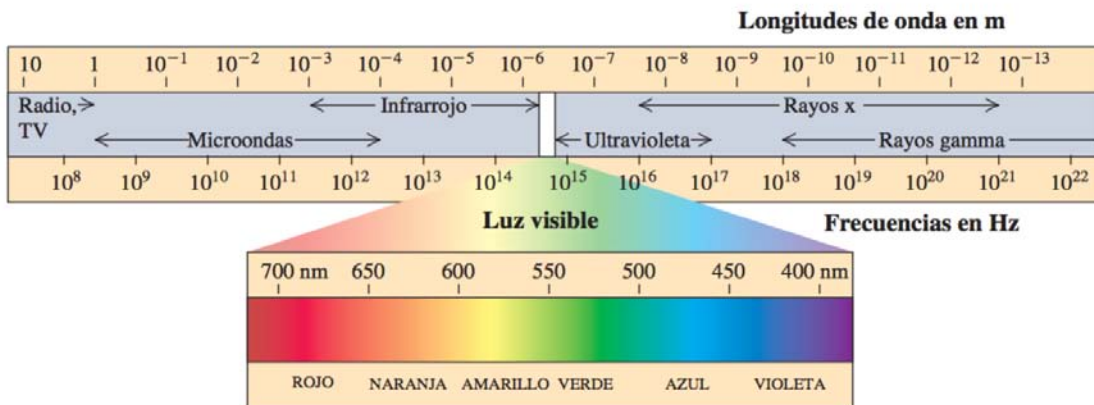


Figura 2.11 Espectro electromagnético.

2.2.3 Uso de las ondas electromagnéticas.

Rayos gamma

Corresponden a la región de fotones más energéticos del espectro electromagnético y están asociados a los rayos cósmicos, que son partículas cargadas altamente energéticas que chocan con la atmósfera terrestre (Fontal, 2005). Los rayos gamma se emiten desde formas radioactivas del elemento cobalto (cobalto 60) o del elemento cesio (cesio 137). La radiación gamma se usa en forma rutinaria para esterilizar productos médicos, dentales y para el hogar y también para el tratamiento de radiación contra el cáncer (<http://www.fda.gov/downloads/Food/IngredientsPackagingLabeling/UCM262298.pdf>, 17-04-2016).

Rayos X

Los rayos X (o rayos Röntgen en honor a su descubridor) son una forma radiación ionizante, por lo que puede ser peligrosa. Rayos X con longitud de onda mayor que 0.1 nm se llaman *rayos X suaves*. A longitudes de onda menores se llaman *rayos X duros*. Estos rayos X duros se solapan con los rayos γ de baja energía. La distinción entre los dos rayos depende es de la fuente de radiación y no de la longitud de onda: los rayos X son generados por procesos electrónicos energéticos y los rayos γ por transiciones en los núcleos atómicos. (Fontal, 2005) Los rayos X se pueden usar para irradiar alimentos, aunque su uso principal es en la rama médica para producir imágenes de estructuras internas(<http://www.fda.gov/downloads/Food/IngredientsPackagingLabeling/UCM262298.pdf>, 17-04-2016 FDA, 17-04-2016).

Microondas

Son ondas electromagnéticas con longitud de onda mayores que el infrarrojo, pero menores que las ondas de radio. Las microondas tienen longitud de onda aproximadamente en el rango de 30 cm (frecuencia = 1GHz) a 1 mm (300 GHz). El rango de microondas incluye: frecuencia ultra alta (UHF) (0,3 – 3 GHz), súper alta frecuencia (SHF) (3- 30 GHz) y extremadamente alta frecuencia (EHF) (30- 300 GHz). La región entre 1000 GHz y 3000 GHz (submilímetro (<1 milímetro) y 100 micrómetros) se denomina la radiación terahertzio (onda terahertzio, rayos- T,

luz-T y THz). Por encima de 300 GHz hasta 3000 GHz, la atmósfera de la Tierra absorbe fuertemente la radiación electromagnética, lo que limita su utilización en comunicaciones. La región de microondas tiene varias aplicaciones: hornos de microondas para calentar y cocinar alimentos; en transmisiones de radiodifusión y telecomunicaciones, por ejemplo televisión vía microondas, comunicación satelital, entre otras.

Ondas de radio

La radio frecuencia son ondas electromagnéticas de menores frecuencias y mayores longitudes de onda que se generan por una corriente alterna que se introduce en una antena. Sus principales usos son: aplicaciones en radio astronomía, radiodifusión AM, FM y televisión, monitores de bebés, etc (Fontal, 2005)

2.3 Radiofrecuencias.

2.3.1 Tipos de radiofrecuencia.

Las ondas de radio pertenecen a la familia de la radiación electromagnética, que incluye a los rayos x, luz ultravioleta y luz visible, formas de energía que utilizamos a diario. Así como las delicadas ondas que se forman al arrojar una piedra en un lago en calma, las señales de radio se irradian hacia afuera, o se propagan, desde una antena de transmisión. Las ondas de radio se propagan a la velocidad de la luz, no así las ondas de agua en el lago. Como ya antes se definió una onda de radio está compuesta por su amplitud, frecuencia y longitud de onda, algo que es importante resaltar es que mientras la frecuencia aumenta, la longitud de onda disminuye y viceversa. En el espectro de radiofrecuencia, el rango de frecuencia utilizable para ondas de radio se extiende desde aproximadamente 20 KHz (ligeramente sobre las ondas sonoras) a 30,000 MHz. La longitud de onda de 20 KHz tiene 15 kilómetros de largo. En una de 30,000 MHz, la longitud de onda es únicamente de 1 centímetro (<http://documents.mx/documents/comunicaciones-de-radio-en-la-era-digital.html>, 21-04-16).

2.3.2 Banda de frecuencias y características.

Para transmitir información entre dos o más lugares, se necesita convertir la información original a energía electromagnética, para transmitirla a continuación a

una o más estaciones receptoras, donde se reconvierte a su forma original. La energía electromagnética se puede propagar en forma de voltaje o corriente, a través de un conductor o hilo metálico, o bien en forma de ondas de radio emitidas hacia el espacio libre, o como ondas luminosas a través de una fibra óptica. La energía electromagnética se distribuye en un intervalo casi infinito de frecuencias. La frecuencia no es más que la cantidad de veces que sucede un movimiento periódico, como puede ser una onda senoidal de voltaje o de corriente, durante determinado periodo como anteriormente ya se había mencionado. Cada inversión completa de la onda se llama ciclo. La unidad básica de frecuencia es el hertz (Hz), y un hertz es igual a un ciclo por segundo (1 Hz = 1 cps). En electrónica se acostumbra usar prefijos métricos para representar las grandes frecuencias. Por ejemplo, se usa el kHz (kilohertz) para indicar miles de hertz, y el MHz (megahertz) para indicar millones de hertz.

El espectro total útil de radiofrecuencias (RF) se divide en bandas de frecuencia más angostas, a las que se dan nombres y números descriptivos, y algunas de ellas se subdividen a su vez en diversos tipos de servicios. Las designaciones de banda según el Comité consultivo internacional de radio (CCIR) se muestran en la tabla 2.4 (Tomasi, 2003).

Numero de banda	Intervalo de frecuencias *	Designación
1	30 Hz-300 Hz	ELF (frecuencias extremadamente bajas)
3	0.3 kHz-3 kHz	VF (frecuencias de voz)
4	3 kHz-30 kHz	VLF (frecuencias muy bajas)
5	30 kHz-300 kHz	LF (bajas frecuencias)
6	0.3 MHz-3 MHz	MF (frecuencias intermedias)
7	3 MHz-30 MHz	HF (frecuencias altas)
8	30 MHz-300 MHz	VHF (frecuencias muy altas)
9	300 MHz-3 GHz	UIIF (frecuencias ultra altas)
10	3 GHz-30 GHz	SHF (frecuencias super altas)
11	30 GHz-300 GHz	EHF (frecuencias extremadamente altas)
12	0.3 THz-3 THz	Luz infrarroja
13	3 THz-30 THz	Luz infrarroja
14	30 THz-300 THz	Luz infrarroja

15	0.3 PHz-3 PHz	Luz visible
16	3 PHz-30 PHz	Luz ultravioleta
17	30 PHz-300 PHz	Rayos X
18	0.3 EHz-3 EHz	Rayos gamma
19	3 EHz-30 EHz	Rayos cósmicos

Tabla 2.4 Designaciones de banda CCIR.

* 10^0 , hertz (Hz); 10^3 , kilohertz (kHz); 10^6 , megahertz (MHz); 10^9 , gigahertz (GHz); 10^{12} , terahertz (THz); 10^{15} , petahertz (PHz); 10^{18} , exahertz (EHz).

Frecuencias extremadamente bajas (ELF, por sus siglas en inglés). Son señales en el intervalo de 30 a 300 Hz, y comprenden las señales de distribución eléctrica (60 Hz) y las de telemetría de baja frecuencia.

Frecuencias de voz (VF, por sus siglas en inglés). Son señales en el intervalo de 300 a 3000 Hz, e incluyen a las que generalmente se asocian a la voz humana. Los canales telefónicos normales tienen un ancho de banda de 300 a 3000 Hz, y con frecuencia se llaman canales de frecuencia de voz, o canales de banda de voz.

Frecuencias muy bajas (VLF por sus siglas en inglés). Son señales dentro de los límites de 3 a 30 kHz, que comprenden al extremo superior del intervalo audible humano. Las VLF se usan en algunos sistemas especiales, del gobierno y militares, como por ejemplo las comunicaciones con submarinos.

Frecuencias bajas (LF, por sus siglas en inglés). Son señales en el intervalo de 30 a 300 kHz, y se usan principalmente en la navegación marina y aeronáutica.

Frecuencias intermedias (MF, por sus siglas en inglés). Son señales de 300 kHz a 3 MHz, y se usan principalmente para emisiones comerciales de radio AM (535 a 1605 kHz). Frecuencias altas (HF, por sus siglas en inglés). Señales en el intervalo de 3 a 30 MHz, con frecuencia llamadas ondas cortas. La mayoría de las radiocomunicaciones en dos sentidos usa este intervalo, y la Voz de América y la Radio Europa Libre transmiten en él. También los radio aficionados y la banda civil (CB) usan señales de HF.

Muy altas frecuencias (VHF, por sus siglas en inglés). Son señales de 30 a 300 MHz, y se usan en radios móviles, comunicaciones marinas y aeronáuticas,

emisión comercial en FM (de 88 a 108 MHz) y en la emisión de televisión, en los canales 2 a 13 (54 a 216 MHz).

Frecuencias ultra altas (UHF, por sus siglas en inglés). Son señales entre los límites de 300 MHz a 3 GHz. y las usa la emisión comercial de televisión, en los canales 14 a 83, en los servicios móviles de comunicaciones terrestres, teléfonos celulares, algunos sistemas de radar y de navegación, y los sistemas de radio por microondas y por satélite. Hablando con generalidad, se considera que las frecuencias mayores que 1 GHz son de microondas, y eso incluye al extremo superior del intervalo de UHF (Tomasi, 2003).

Frecuencias súper altas (SHF, por sus siglas en inglés). Son señales de 3 a 30 GHz, donde está la mayoría de las frecuencias que se usan en sistemas de radiocomunicaciones por microondas y satelitales.

Frecuencias extremadamente altas (EHF, por sus siglas en inglés). Son señales entre 30 y 300 GHz. y casi no se usan para radiocomunicaciones, a excepción de aplicaciones muy complicadas, costosas y especializadas.

Infrarrojo. Las frecuencias del infrarrojo son señales de 0.3 a 300 THz, y por lo general no se les considera como ondas de radio. Infrarrojo indica una radiación electromagnética que en general se asocia con el calor. Las señales infrarrojas se usan en sistemas de guía de proyectiles con blancos térmicos, o con la fotografía electrónica y la astronomía.

Luz visible. En la luz visible se incluyen las frecuencias electromagnéticas captadas por el ojo humano (0.3 a 3 PHz). Las comunicaciones con ondas luminosas se usan en los sistemas de fibra óptica, que en los últimos años han llegado a ser un medio principal de transmisión en los sistemas electrónicos de comunicaciones.

Rayos ultravioleta, rayos X. rayos gamma y rayos cósmicos: tienen poca aplicación en las comunicaciones electrónicas y en consecuencia no se describirán.

Cuando se manejan ondas de radio se acostumbra usar unidades de longitud de onda, y no de frecuencia. La longitud de onda es la distancia que ocupa en el espacio un ciclo de una onda electromagnética, es decir, la distancia entre los

puntos correspondientes en una onda repetitiva. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda, y directamente proporcional a su velocidad de propagación. Se supone que la velocidad de propagación de la energía electromagnética en el espacio libre es 3×10^8 m/s. La relación entre frecuencia, velocidad y longitud de onda se expresa en forma matemática de la siguiente manera (Tomasi, 2003):

$$\text{longitud de onda} = \frac{\text{velocidad}}{\text{frecuencia}} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Donde

λ = longitud de onda (metros por ciclo)

c = velocidad de la luz (300 000 000 metros por segundo)

f = frecuencia (hertz).

2.3.3 Medios de propagación.

En general, las ondas son medios de transporte de energía o información, los ejemplos comunes de ondas electromagnéticas son las ondas de radio, las señales de televisión, los haces de radar y los rayos luminosos. Todas las formas de energía electromagnética comparten tres características fundamentales:

- Se desplazan a gran velocidad.
- Al desplazarse a gran velocidad adoptan propiedades de ondas.
- Irradian hacia afuera desde una fuente sin la ayuda de ningún vehículo físico discernible.

Las características de propagación de las ondas electromagnéticas utilizadas en los canales inalámbricos son altamente dependientes de la frecuencia. Las características de propagación resultan de los cambios en la velocidad en las ondas de radio como una función de la altitud y las condiciones limitantes. La velocidad de onda depende de la temperatura aérea, la densidad en el aire y los niveles de ionización aéreos.

La ionización (electrones libres) del aire en grandes altitudes tiene un efecto dominante en la propagación de ondas en las bandas de media (MF) y alta frecuencia (HF). La ionización se origina por la radiación ultravioleta del Sol, así

como por los rayos cósmicos. Lo que ocasiona varias capas con distinta densidad de ionización ubicadas a varias alturas alrededor de la Tierra (Couch, 2008).

Las regiones ionizadas dominantes son las capas D, E, F₁ y F₂. La capa D es la más cercana a la superficie terrestre, a una altitud de aproximadamente 45 o 55 millas. Para $f > 300$ kHz, la capa D actúa como una esponja de radiofrecuencia (RF) que atenúa dichas ondas de radio. La atenuación es inversamente proporcional a la frecuencia y se reduce para frecuencias por encima de 4 MHz. Para $f < 300$ kHz, la capa D provoca refracción (flexión) de ondas de RF (Couch, 2008).

La capa D es la más pronunciada durante las horas diurnas, con una ionización máxima cuando el Sol está en su punto más alto, pero casi desaparece en la noche. La capa E tiene una altitud de 65 a 75 millas y una ionización máxima alrededor del mediodía (tiempo local) y prácticamente desaparece después del anochecer. Ésta provoca reflexión de frecuencias HF durante las horas diurnas. La capa F varía en altitud entre 90 y 250 millas y se ioniza rápidamente al amanecer; alcanza su ionización máxima al inicio de la tarde y decae lentamente después del anochecer. La región F se divide en dos capas, F₁ y F₂, durante el día, y se combinan para formar una capa durante la noche. La región F es el medio más predominante para proveer reflexión de ondas de HF.

La figura 2.12 ejemplifica la propagación de ondas terrestres. En este caso, la onda electromagnética tiende a seguir el contorno de la Tierra. Esto es, la difracción de la onda causa su propagación a lo largo de la superficie terrestre. Este es el modo de propagación utilizado en la difusión por AM, donde la cobertura local sigue el contorno de la Tierra y la señal se propaga sobre el horizonte visual (Couch, 2008).

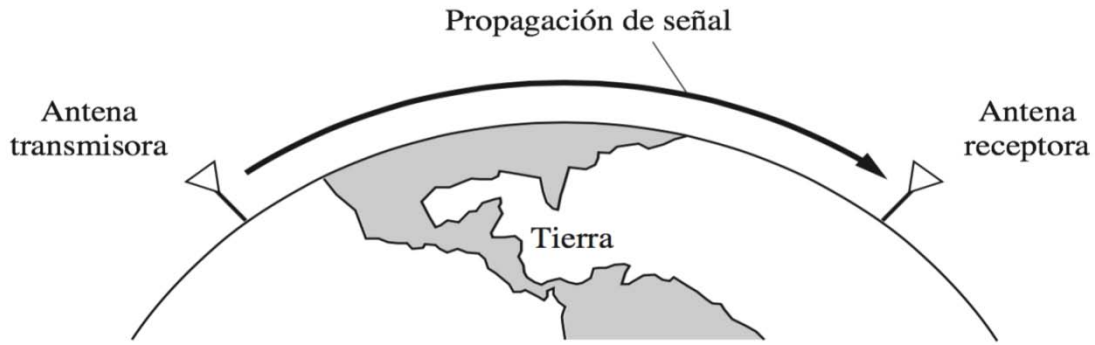


Figura 2.12 Propagación de onda terrestre (debajo de 2MHz).

En la figura 2.13 ilustra la propagación de una onda celeste. Este es el modo dominante de propagación en el rango de frecuencias de 2 a 30 MHz. En este caso, la cobertura de larga distancia se obtiene mediante la reflexión de la onda en la ionosfera y los límites terrestres. En realidad, las ondas se refractan (o se flexionan) en la ionosfera gradualmente en una forma de U invertida, debido a que el índice de refracción varía de acuerdo a la altitud conforme la densidad de ionización cambia. El índice de refracción de la ionosfera se explica en la siguiente ecuación.

$$n = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

En donde n es el índice de refracción, N es la densidad de electrones libres y f es la frecuencia de onda en Hertz (Couch, 2008).

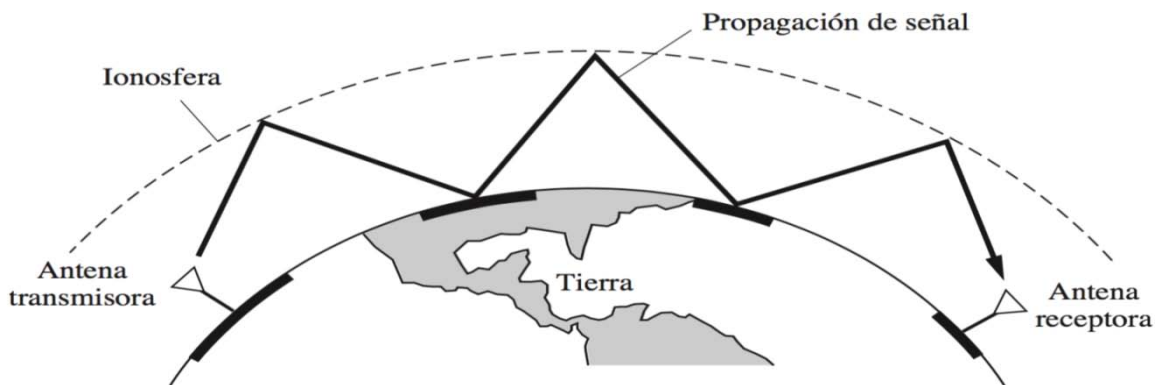


Figura 2.13 Propagación de onda celeste (de 2 a 30 MHz).

La propagación de LOS (línea de vista) (figura 2.14) es el modo dominante para las frecuencias arriba de 30 MHz. En este caso, la onda electromagnética se

propaga en una línea recta. Por tanto, $f \gg 81N$, tal que $n \approx 1$ y existe muy poca refracción por la ionosfera. De hecho, la señal se propagará a través de la ionosfera. Las comunicaciones por satélite utilizan esta propiedad (Couch, 2008).

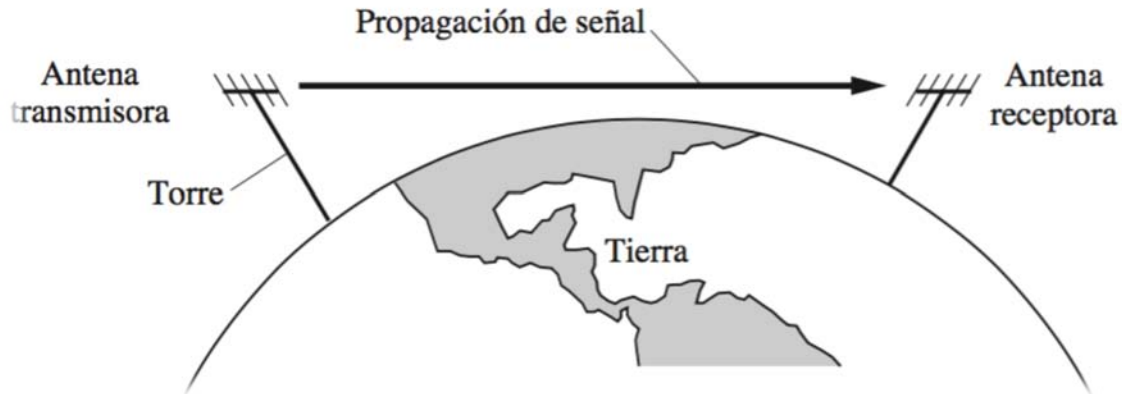


Figura 2.14 Propagación de línea de vista (LOS, arriba de 30 MHz).

El modo de LOS posee la desventaja de que, para una comunicación entre dos estaciones terrestres (Tierra), la trayectoria de la señal debe ser por encima del horizonte. De otra manera, la Tierra bloquearía la trayectoria de LOS. Por lo tanto, las antenas deben colocarse en torres altas para que la antena receptora pueda ver a la antena transmisora. Una fórmula para la distancia al horizonte, d , como función de la altura de la antena se obtiene con la siguiente fórmula:

$$d^2 + r^2 = (r + h)^2 \quad (\text{Ec. 2.36})$$

$$d^2 = 2rh + h^2 \quad (\text{Ec. 2.37})$$

Donde r es el radio de la Tierra y h es la altura de la antena por encima de la superficie terrestre. En esta aplicación h^2 , es despreciable con respecto a $2hr$. El radio de la Tierra es de 3 960 millas. Sin embargo, a radiofrecuencias de LOS el radio efectivo de la Tierra es de $\frac{4}{3}(3\,960)$ millas.

Por lo tanto, la distancia al horizonte de radio es de:

$$d = \sqrt{2hm} \text{ millas} \quad (\text{Ec. 2.38})$$

Donde h sea la altura de la antena medida en pies y d corresponde a millas terrestres. Además del modo de propagación de LOS es posible tener una propagación por dispersión ionosférica. Este modo ocurre en el rango de frecuencias de 30 a 60 MHz cuando la señal de radiofrecuencia se dispersa

debido a irregularidades en el índice de refracción de la baja ionosfera (aproximadamente 50 millas arriba de la superficie de la Tierra). Debido a esta dispersión pueden realizarse comunicaciones a través de trayectorias con longitud de 1,000 millas, aun cuando ésta sea mayor a la distancia de LOS (Couch, 2008). De la misma manera, la dispersión troposférica (dentro de 10 millas por encima de la superficie de la Tierra) puede propagar señales de radiofrecuencia que estén en el rango de 40 MHz a 4 GHz a través de trayectorias de varios cientos de millas (Couch, 2008). Cuando se propagan ondas electromagnéticas se debe tomar en cuenta fenómenos como la reflexión y la refracción. La reflexión se presenta cuando una onda plana uniforme incide en la frontera entre las regiones que se componen de dos materiales diferentes. Nos enfocaremos en el fenómeno de refracción (Stallings, 2004).

La refracción se produce debido a que la velocidad de las ondas electromagnéticas es una función de la densidad del medio atravesado. En el vacío, una onda electromagnética (por ejemplo la luz o una onda de radio) se propaga aproximadamente a 3×10^8 m/s. Ésta es la constante c , denominada velocidad de la luz, aunque en realidad se está refiriendo a la velocidad de la luz en el vacío cuyo valor exacto es 299.792.458 m/s. En el aire, agua, cristal o cualquier otro medio transparente, o parcialmente transparente, las ondas electromagnéticas viajan a velocidades menores que c .

Cuando una onda electromagnética pasa de un medio con una densidad a otro con densidad distinta, su velocidad cambia. El efecto de esto es desviar la dirección de la onda en la separación entre los dos medios. Al pasar de un medio menos denso a otro con densidad mayor, la onda se desviará hacia el medio más denso. Este fenómeno se puede observar sumergiendo parcialmente un palo en agua.

El índice de refracción de un medio respecto a otro es igual al seno del ángulo de incidencia dividido entre el seno del ángulo de refracción. El índice de refracción es también igual al cociente entre las velocidades respectivas en los dos medios. El índice absoluto de refracción de un medio se calcula en comparación con el del

vacío. El índice de refracción varía con la longitud de onda, de forma tal que la refracción sufrida por señales con distintas longitudes de onda será diferente.

$$\text{Índice de refracción} \rightarrow n = \frac{\text{velocidad de la luz en el vacío}}{\text{velocidad de la luz en el medio}} \rightarrow n = \frac{c}{v} \quad (\text{Ec. 2.39})$$

$$\text{Ley de Snell} \rightarrow \frac{v_1}{\text{sen } i} = \frac{v_2}{\text{sen } r} \rightarrow \frac{c/n_1}{\text{sen } i} = \frac{c/n_2}{\text{sen } r} \rightarrow n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } r \quad (\text{Ec. 2.40})$$

Aunque en una separación discreta entre dos medios la desviación de la onda será abrupta y de una vez, si se trata de una separación continua, en la que el índice de refracción varíe gradualmente, la onda se desviará gradualmente. Bajo condiciones normales de propagación, el índice de refracción de la atmósfera disminuye con la altura, por lo que las ondas de radio viajan más lentamente cerca de la tierra que a alturas mayores. Como consecuencia, se tiene que las ondas de radio se desvían suavemente hacia la tierra (Stallings, 2004).

2.3.4 Filtros.

Los filtros son dispositivos que toman una forma de onda de entrada y modifican el espectro de frecuencia para producir la forma de onda de salida. Pueden clasificarse de varias maneras, y una de ellas es por ejemplo el tipo de material empleado, como elementos LC o de cristal de cuarzo. Otra clasificación es por el tipo de función de transferencia que se lleva a cabo.

Los filtros utilizan elementos de almacenamiento de energía para obtener una discriminación de frecuencia. En cualquier filtro físico los elementos de almacenamiento de energía son imperfectos. Por ejemplo, una bobina o Inductor físico posee cierta resistencia en serie e inductancia, mientras un condensador o capacitor tiene algunas resistencias a fugas y capacitancia.

En base a la función principal de los filtros que es permitir el paso libre de la banda de frecuencias que se desea, mientras que deben presentar una atenuación elevada para las frecuencias indeseables, estos pueden ser:

- Pasa Bajos
- Pasa Altas
- Pasa Banda
- Supresor de Banda

Filtros pasa bajos. Son aquellos que permiten el paso de señales de frecuencias cero hasta un cierto valor predeterminado que se denomina "frecuencia de corte superior" del filtro.

Entendiendo por frecuencia de corte, a aquella para la cual la atenuación que produce el filtro es de 3 [db]. Esto significa que en ese lugar la mitad de la potencia de entrada es eliminada (Miyara, 2006).

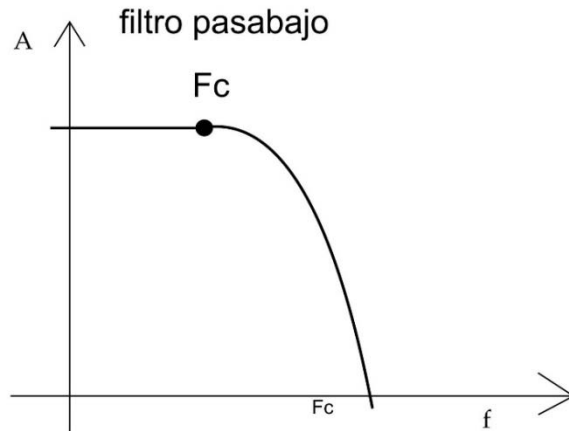


Figura 2.15 Filtro Pasa Bajos.

En dónde; F_c = frecuencia de corte

Filtros pasa altos. Son aquellos que permiten el paso de señales desde una frecuencia denominada "frecuencia de corte inferior" hasta una superior, que teóricamente es un filtro ideal que se extiende hasta el infinito.

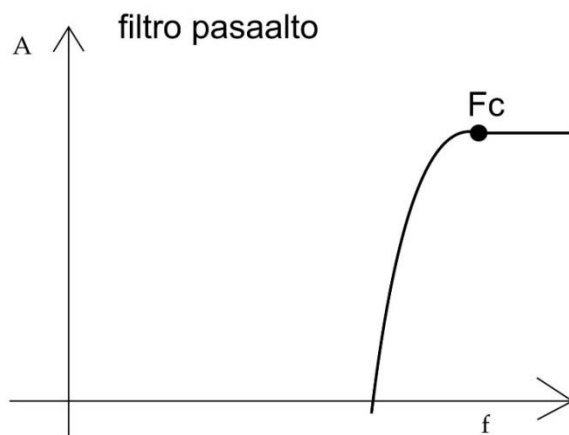


Figura 2.16 Filtro Paso altas.

En donde; F_c = frecuencia de corte

Filtros pasa banda. Son aquellos que permiten el paso de señales cuyas frecuencias se encuentran comprendidas entre dos, denominadas "frecuencia de corte superior e inferior" respectivamente. Se puede construir un pasa banda o suprime banda, mediante la combinación de pasa baja y pasa alta (Miyara, 2006).

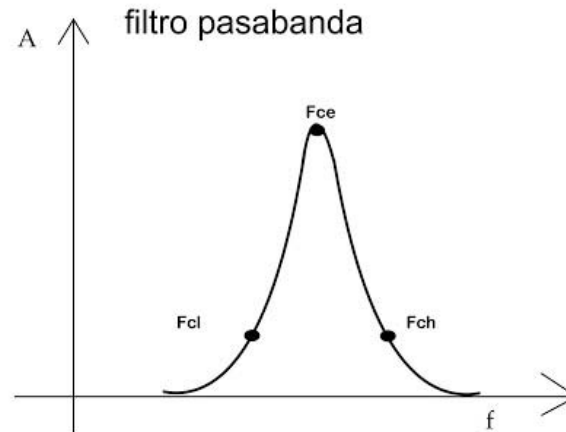


Figura 2.17 Filtro Paso Banda.

En donde; Fcl: frecuencia de corte inferior (low)

Fch: frecuencia de corte superior (high)

Fce: frecuencia central

2.3.5 Modulación y esquema.

Como a menudo no es práctico propagar señales de información a través de cables metálicos o de fibra óptica, o a través de la atmósfera terrestre, con frecuencia es necesario modular la información de la fuente, con una señal analógica de mayor frecuencia, llamada portadora. En esencia, la señal portadora transporta la información a través del sistema. La señal de información modula a la portadora, cambiando su amplitud, su frecuencia o su fase. Modulación no es más que el proceso de cambiar una o más propiedades de la portadora, en proporción con la señal de información.

Los dos tipos básicos de comunicaciones electrónicas son analógico y digital. Un sistema analógico de comunicaciones es aquel en el cual la energía se transmite y se recibe en forma analógica: una señal de variación continua, como por ejemplo una onda senoidal. En los sistemas analógicos de comunicaciones, tanto la información como la portadora son señales analógicas.

Sin embargo, el término comunicaciones digitales abarca una amplia variedad de técnicas de comunicación, que incluyen transmisión digital y radio digital. La transmisión digital es un sistema digital verdadero, donde los pulsos digitales (con valores discretos, como +5V y tierra) se transfieren entre dos o más puntos en un sistema de comunicaciones. Con la transmisión digital no hay portadora analógica, y la fuente original de información puede tener forma digital o analógica. Si está en forma analógica se debe convertir a pulsos digitales antes de transmitirla, y se debe reconvertir a la forma analógica en el extremo de recepción. Los sistemas de transmisión digital requieren una instalación física entre el transmisor y el receptor, como por ejemplo un conductor metálico o un cable de fibra óptica.

La radio digital es la transmisión de portadoras analógicas moduladas digitalmente, entre dos o más puntos en un sistema de comunicaciones. En la radio digital, la señal moduladora y la señal demodulada son pulsos digitales. Estos pulsos se pueden originar en un sistema digital de transmisión, en una fuente digital, como por ejemplo una computadora, o pueden ser una señal analógica codificada en binario. En los sistemas digitales de radio, el medio de transmisión puede ser una instalación física o el espacio libre (es decir, la atmósfera terrestre). Los sistemas analógicos de comunicaciones fueron los primeros en ser desarrollados; sin embargo, en tiempos recientes, se han popularizado más los sistemas digitales de comunicaciones.

La ecuación 2.41 es la descripción general de una onda senoidal de voltaje, variable en el tiempo, como puede ser una señal portadora de alta frecuencia. Si la señal de información es analógica, y la amplitud (V) de la portadora es proporcional a ella, se produce la modulación de amplitud (AM, por amplitud de modulación). Si se varía la frecuencia (f) en forma proporcional a la señal de información, se produce la modulación de frecuencia (FM, de frecuencia modulada); por último, si se varía la fase en proporción con la señal de información, se produce la modulación de fase (PM, de por sus siglas en inglés) (Tomasi, 2003).

$$v(t) = V \text{sen}(2\pi ft + \theta) \text{(Ec. 2.41)}$$

donde: $v(t)$ = voltaje variable senoidalmente en el tiempo.

V = amplitud máxima (volts)

f = frecuencia (hertz)

θ = desplazamiento de fase (radianes)

Si la señal de información es digital, y la amplitud (V) de la portadora se varía proporcionalmente a la señal de información, se produce una señal modulada digitalmente, llamada modulación por conmutación de amplitud (ASK, por sus siglas en inglés). Si la frecuencia (f) varía en forma proporcional a la señal de información se produce la modulación por conmutación de frecuencia (FSK, por sus siglas en inglés), y si la fase (θ) varía de manera proporcional a la señal de información, se produce la modulación por conmutación de fase (PSK, por sus siglas en inglés). Si se varían al mismo tiempo la amplitud y la fase en proporción con la señal de información, resulta la modulación de amplitud en cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés). Los sistemas ASK, FSK, PSK y QAM son formas de modulación digital.

A continuación se muestra en la imagen 2.18 el resumen de las diversas técnicas de modulación (Tomasi, 2003).

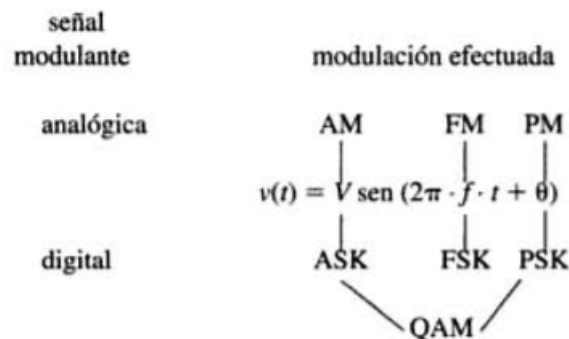


Figura 2.18 Resumen de las diversas técnicas de modulación.

La modulación se hace en un transmisor mediante un circuito llamado modulador. Una portadora sobre la que ha actuado una señal de información se llama onda modulada o señal modulada. La demodulación es el proceso inverso a la modulación, y reconvierte a la portadora modulada en la información original (es decir, quita la información de la portadora). La demodulación se hace en un receptor, con un circuito llamado demodulador.

Hay dos razones por las que la modulación es necesaria en las comunicaciones electrónicas: 1) Es en extremo difícil irradiar señales de baja frecuencia en forma de energía electromagnética con una antena, y 2) ocasionalmente, las señales de la información ocupan la misma banda de frecuencias y si se transmiten al mismo tiempo las señales de dos o más fuentes, interferirán entre sí. Por ejemplo, todas las estaciones comerciales de FM emiten señales de voz y música que ocupan la banda de audiofrecuencias, desde unos 300 Hz hasta 15 kHz. Para evitar su interferencia mutua, cada estación convierte a su información a una banda o canal de frecuencia distinto. Se suele usar el término canal para indicar determinada banda de frecuencias asignada a determinado servicio. Un canal normal de banda de voz ocupa más o menos 3 kHz de ancho de banda, y se usa para transmitir señales como las de voz; los canales comerciales de emisión en AM ocupan una banda de frecuencias de 10 kHz, y en los canales de radio de microondas y vía satélite se requiere un ancho de banda de 30 MHz o más.

La figura 2.19 es el diagrama simplificado de bloques de un sistema electrónico de comunicaciones, donde se ven las relaciones entre la señal moduladora, la portadora de alta frecuencia y la onda modulada. La señal de información (que a veces se llama en inglés señal de inteligencia) se combina con la portadora en el modulador, y se produce la onda modulada. La información puede estar en forma analógica o digital, y el modulador puede efectuar modulación analógica o digital, En el transmisor se hace una conversión elevadora de las señales de información, de bajas frecuencias a altas frecuencias, y se hace una conversión descendente en el receptor, de altas frecuencias a bajas frecuencias. El proceso de convertir una frecuencia, o banda de frecuencias, y pasarla a otro lugar en el espectro total de frecuencias, se llama translación de frecuencia. La translación de frecuencia es una parte intrincada de las comunicaciones electrónicas, porque se deben hacer muchas veces las conversiones elevadoras y descendentes cuando se transportan a través del sistema llamado canal. La señal modulada se transporta hasta el receptor a través de un sistema de transmisión. En el receptor se amplifica la señal modulada, se convierte en frecuencia menor y a continuación se demodula, para reproducir la información original de la fuente (Tomasi, 2003).

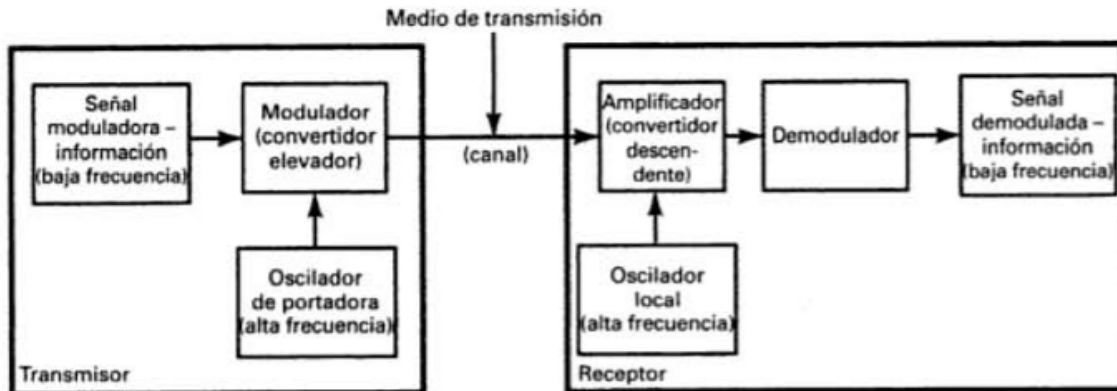


Figura 2.19 Diagrama simplificado de bloques de un sistema electrónico de comunicaciones.

Modulación Digital de Amplitud

La propiedad que distingue un sistema de radio digital (o sistema digital de radio) de un sistema convencional de radio AM, FM o PM es la naturaleza de la señal moduladora. Los sistemas digitales y analógicos de radio usan, ambos, portadoras; sin embargo, en la modulación analógica la señal moduladora es analógica, y en la modulación digital la señal moduladora es digital. Sin embargo, téngase en cuenta que tanto en la modulación analógica como en la digital, la fuente de información original podría haber sido analógica o digital.

Modulación por desplazamiento de fase

La manipulación por desplazamiento de fase (PSK, por sus siglas en inglés) es una forma de modulación digital angular de amplitud constante. En la PSK la señal de entrada es una señal digital binaria, y es posible tener una cantidad limitada de fases de salida.

Manipulación por desplazamiento binario de fase

En la manipulación por desplazamiento binario de fase (BPSK por sus siglas en inglés), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia portadora ("binario" significa "2"). Una fase de salida representa un 1 lógico, y la otra un 0 lógico. Cuando la señal de entrada digital cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre dos ángulos que están desfasados 180°. Otros nombres del BPSK son manipulación por inversión de fase (PRK, por sus siglas en inglés) y modulación en bifase. La BPSK es una forma de modulación de onda

cuadrada con portadora suprimida de una señal de onda continua (CW, por sus siglas en inglés).

Codificación M-aria

M-ario (eme ario) es un término derivado de la palabra binario. M sólo es un dígito que representa la cantidad de condiciones o combinaciones posibles para determinada cantidad de variables binarias. Por ejemplo la modulación digital (FSK binaria y BPSK) los cuales son sistemas binarios; codifican bits individuales y sólo hay dos condiciones posibles de salida. La FSK produce 1 lógico o frecuencia de marca, o un 0 lógico o frecuencia de espacio, y la BPSK produce una fase de 1 lógico o una fase de 0 lógico. Los sistemas FSK y BPSK son M-arios en los que $M = 2$.

Muchas veces conviene, en la modulación digital, codificar a un nivel mayor que el binario (que a veces se dice más allá del binario, o más alto que el binario). Por ejemplo, un sistema PSK (PSK = manipulación por desplazamiento de fase) con cuatro fases de salida posibles es un sistema M-ario en el que $M = 4$. Si hay ocho fases posibles de salida, $M = 8$, etcétera. La cantidad de condiciones de salida se calcula con la ecuación

$$N = \log_2 M \quad (\text{Ec.2.42})$$

en donde N = cantidad de bits codificados

M = cantidad de condiciones posibles de salida con N bits

Por ejemplo, con FSK binaria, cada bit de entrada actúa en forma independiente sobre la portadora y produce una de las dos frecuencias posibles de salida. Así,

$$N = \log_2 2$$

$$2^N = 2$$

Esto se pasa a logaritmos y se despeja N

$$\log 2^N = \log 2$$

$$N \log 2 = \log 2$$

$$N = \frac{\log 2}{\log 2}$$

$$N = 1$$

Con la BPSK, cada bit de entrada también actúa en forma independiente sobre la portadora y, en consecuencia. $N = 1$.

Si entran dos bits codificados juntos, y a continuación se dejan modificar la portadora en forma simultánea, la cantidad de condiciones de salida es

$$M = 2^2$$

$$M = 4$$

Ósea $\text{sen}^2 w_c t = (1 - \cos 2w_c t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2w_c t$ (este último termino se filtra y se elimina)

Y solo queda $\text{salida} = +\frac{1}{2} V = 1 \text{ lógico}$ (Ec. 2.43)

En donde $w_c =$ frecuencia de la portadora en radianes (radianes por segundo)

Se puede ver que la salida del modulador balanceado contiene un voltaje positivo, $[(1/2) V]$ y una onda cosenoide del doble de la frecuencia de la portadora, $2w_c$, El filtro de pasabajas tiene una frecuencia de corte mucho menor que $2w_c$, y por ello bloquea la segunda armónica de la portadora y sólo pasa el componente constante positivo. Un voltaje positivo representa un 1 lógico demodulado.

Para una señal de entrada BPSK de $-\text{sen } w_c t$ (un 0 lógico), la salida del modulador balanceado es:

$$\text{salida} = (-\text{sen } w_c t)(\text{sen } w_c t) = -\text{sen}^2 w_c t$$

$$\text{osea } -\text{sen}^2 w_c t = -\frac{1}{2}(1 - \cos 2w_c t) = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2w_c t$$

$$\text{y queda salida} = -\frac{1}{2} v = 0 \text{ lógico} \quad (\text{Ec. 2.44})$$

La salida del modulador balanceado contiene un voltaje negativo, $-(1/2) V$, y una onda cosenoide del doble de la frecuencia de la portadora, es decir, $2w_c$. De nuevo, el filtro pasabajas bloquea la segunda armónica de la portadora y sólo pasa el componente constante negativo. Un voltaje negativo representa un 0 lógico demodulado.

Manipulación por desplazamiento cuaternario de fase

La manipulación por desplazamiento cuaternario de fase (QPSK, por sus siglas en inglés), o PSK de cuadratura como a veces se le llama, es otra forma de modulación digital angular y de amplitud constante. La QPSK es una técnica M-aria de codificación en la que $M = 4$ (de ahí el nombre “cuaternario”, que significa “4”). Con esta codificación, son posibles cuatro fases de salida para una sola

frecuencia de portadora. Como hay cuatro fases distintas de salida, debe haber cuatro condiciones distintas de entrada. Ya que la entrada digital a un modulador PQSK es una señal binaria (base 2), para producir cuatro condiciones distintas de entrada se necesita más de un solo bit de entrada. Con dos bits hay cuatro condiciones posibles: 00,01, 10 y 11. En consecuencia, en la QPSK, los datos binarios de entrada se combinan en grupos de dos bits, llamados dibits. Cada dibit de código genera una de las cuatro fases posibles de salida. Así, para cada dibit de dos bits sincronizado en el modulador, se obtiene un solo cambio en la salida. Entonces, la rapidez de cambio en la salida (baudios) es la mitad de la rapidez de entrada de bits (Tomasi, 2003).

Entrada binaria		Fase de salida QPSK
Q	I	
0	0	-135°
0	1	-45°
1	0	+135°
1	1	+ 45°

Tabla 2.5 Tabla de verdad Modulador QPSK.

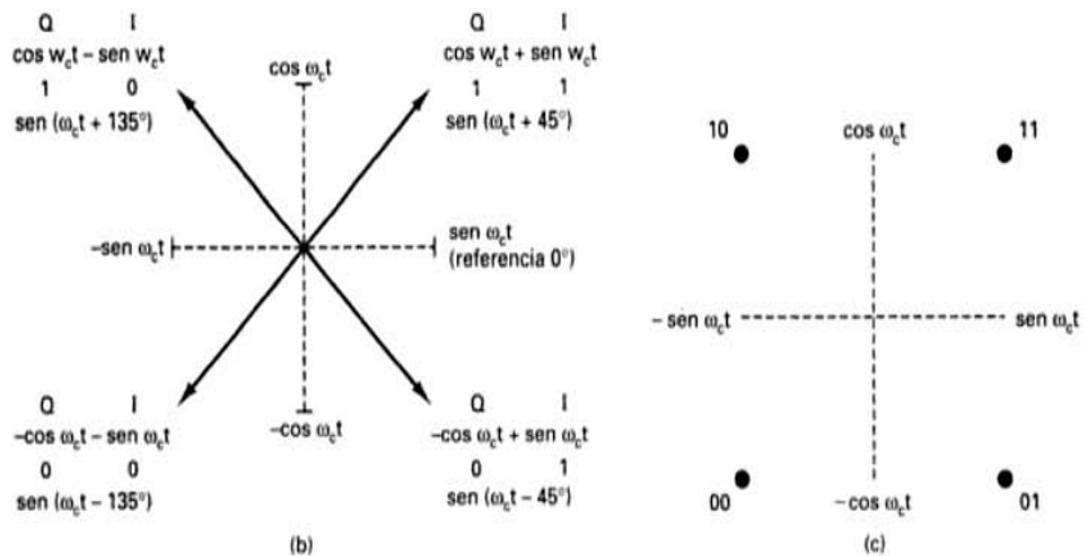


Figura 2.20 (b) Diagrama fasorial QPSK (c) diagrama de constelación QPSK.

Entrada binaria			Fase de salida 8-PSK
Q	I	C	
0	0	0	-112.5 °
0	0	1	-157.5 °
0	1	0	-87.5 °
0	1	1	-22.5 °
1	0	0	+112.5 °
1	0	1	+157.5 °
1	1	0	+67.5 °
1	1	1	+22.5 °

Tabla 2.6 Tabla de verdad para modulador 8-PSK.

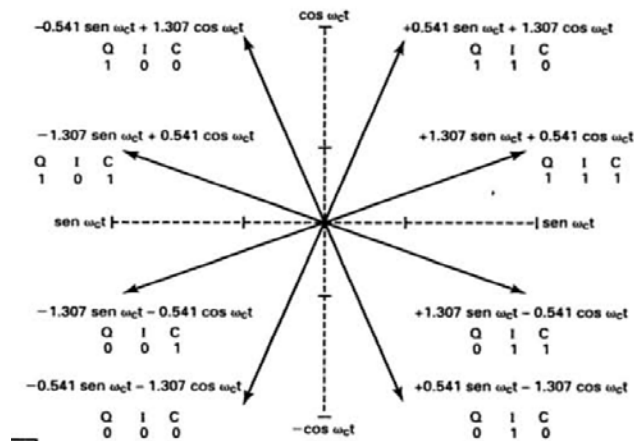


Figura 2.21 Diagrama fasorial modulación 8-PSK.

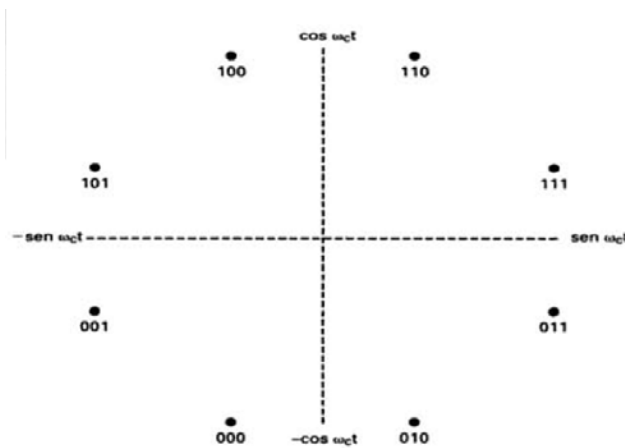


Figura 2.22 Diagrama de constelación 8-PSK.

PSK de dieciséis fases (16-PSK, de sixteen-phase phase shift keying).

La manipulación por desplazamiento de fase de dieciséis fases, es una técnica de codificación M-aria, en la que $M = 16$; hay 16 fases posibles de salida. Un modulador 16-PSK actúa sobre los datos de entrada, en grupos de cuatro bits ($2^4 = 16$) llamados cuadbits. La fase de salida no cambia sino hasta que hayan entrado cuatro bits al modulador. En consecuencia, la rapidez, de cambio de salida (los baudios) y el ancho mínimo de banda son iguales a la cuarta parte de la rapidez de bits que llegan.

En la 16-PSK, la separación angular entre las fases adyacentes sólo es 22.5° y, en consecuencia, una señal 16-PSK puede sufrir un desplazamiento de fase hasta de $\pm 11.25^\circ$ durante su transmisión y seguir reteniendo su integridad. Por esta causa, la 16-PSK es muy susceptible a irregularidades introducidas en el medio de transmisión, así es que, casi no se usa.

Modulación de amplitud en Cuadratura (QAM siglas en ingles).

Es una forma de modulación digital, donde la información digital está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida.

Ocho QAM (8-QAM).

Es una técnica de codificación M-aria en la que $M = 8$. A diferencia de la 8-PSK, la señal de salida de un modulador 8-QAM no es una señal de amplitud constante (Tomasi, 2003).

Entrada binaria			salida 8-QAM	
Q	I	C	Amplitud [v]	Fase
0	0	0	0.765	-135 °
0	0	1	1.848	- 135 °
0	1	0	0.765	-45 °
0	1	1	1.848	-45 °
1	0	0	0.765	+ 135 °
1	0	1	1.848	+ 135 °
1	1	0	0.765	+ 45 °
1	1	1	1.848	+ 45 °

Tabla 2.7 Tabla de verdad del Modulador 8-QAM.

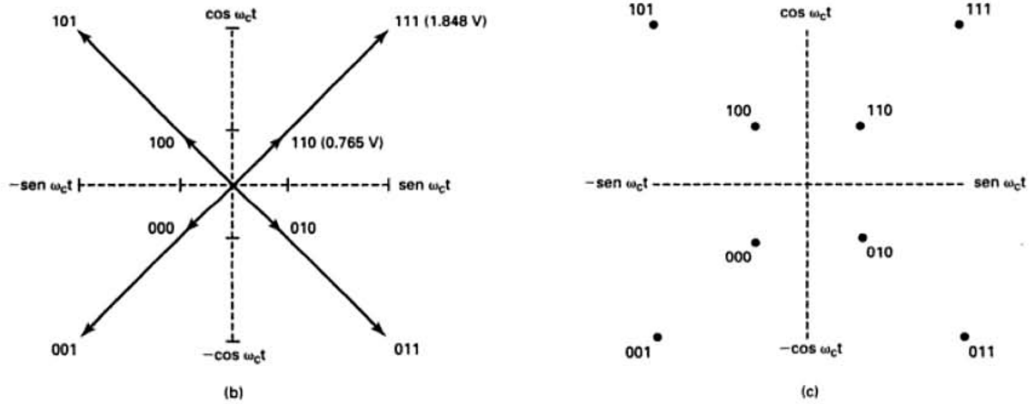


Figura 2.23 Modulador 8-QAM (b) Diagrama fasorial ; (c) Diagrama de constelación.

Dieciséis QAM.

Como en la manipulación 16-PSK, la 16-QAM es un sistema M-ario en el que $M=16$. Los datos de entrada se manejan en grupos de cuatro ($2^4 = 16$). Como en 8-QAM, se varían tanto la fase como la amplitud de la portadora de transmisión (Tomasi, 2003).

Entrada Binaria				Salida 16-QAM	
Q	Q'	I	I'	Amplitud [V]	Fase
0	0	0	0	0.311	-135°
0	0	0	1	0.850	-165°
0	0	1	0	0.311	-45°
0	0	1	1	0.850	-15°
0	1	0	0	0.850	-105°
0	1	0	1	1.161	-135°
0	1	1	0	0.850	-75°
0	1	1	1	1.161	-45°
1	0	0	0	0.311	135°
1	0	0	1	0.850	165°
1	0	1	0	0.311	45°
1	0	1	1	0.850	15°
1	1	0	0	0.850	105°
1	1	0	1	1.161	135°
1	1	1	0	0.850	75°
1	1	1	1	1.161	45°

Tabla 2.8 Tabla de verdad Modulador 16-QAM.

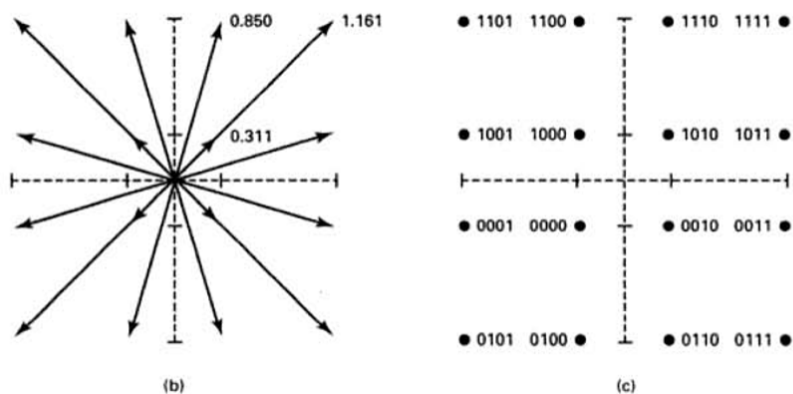


Figura 2.24 Modulador 16-QAM (b) Diagrama Fasorial; (c) Diagrama de constelación.

2.3.6 Técnicas de división de bandas.

Antes de analizar OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) comencemos viendo los principios de OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) el cual es un esquema de modulación digital multiportadora ampliamente utilizado en los sistemas inalámbricos pero relativamente nuevos en los sistemas celulares. Utiliza cientos o miles de subportadoras que se transmiten paralelamente, cada subportadora se modula con métodos convencionales como QPSK, 16QAM o 64QAM.

La Figura 2.25 se compara una señal OFDM en el dominio de la frecuencia y del tiempo. En la frecuencia, múltiples tonos adyacentes se modulan independientemente con los datos. En el dominio del tiempo, los intervalos de guarda se insertan entre cada uno de los símbolos para prevenir interferencias como retardos por multirutas en el canal de radio (Piedrahita, 2011).

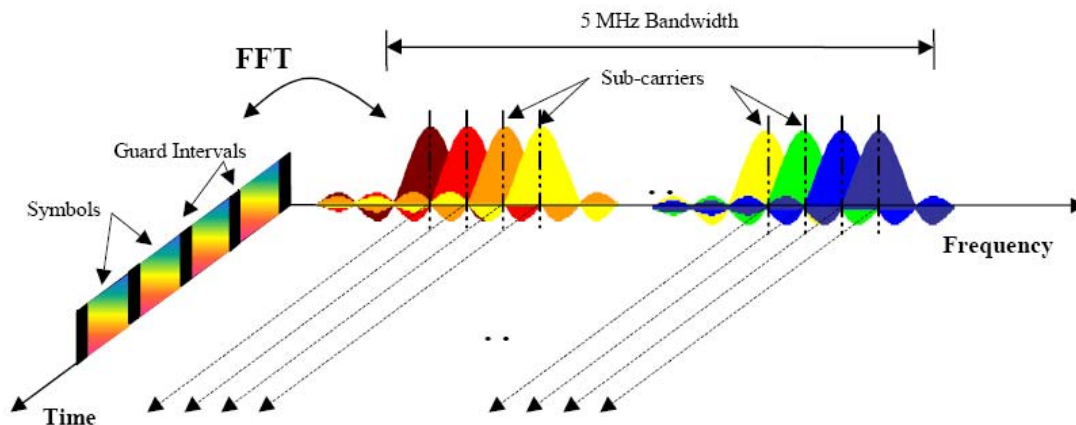


Figura 2.25 comparación de una señal OFDM en el dominio de la frecuencia y del tiempo.

OFDM

OFDM no había sido utilizada en los sistemas celulares porque necesita una gran capacidad de procesamiento computacional, pero actualmente con los avances tecnológicos esta capacidad de procesamiento digital se logra fácilmente y por esto este método ha sido seleccionado para el estándar LTE que veremos más adelante.

OFDMA permite que los subconjuntos de subportadoras se asignen dinámicamente entre los diferentes usuarios de un canal tal como se muestra en la Figura 2.26, obteniéndose un sistema mejorado y robusto. Debido a la eficiencia de la troncalización de los usuarios con velocidades bajas y a la habilidad para programar usuarios por frecuencia, lo cual brinda resistencia al desvanecimiento selectivo de frecuencia (Piedrahita, 2011).

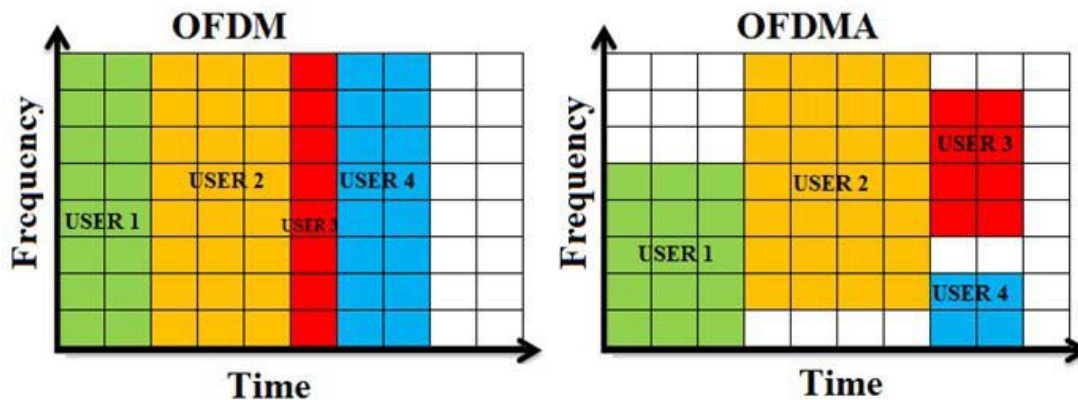


Figura 2.26 OFDM comparación con OFDMA.

Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal de portador simple (SC-FDMA)

SC-FDMA se utiliza porque el alto PAR de la señal OFDMA la hace inadecuada para su utilización en equipos móviles porque su gran consumo energético la diferencia entre estas dos tecnologías de acuerdo con la Figura 2.27 en OFDMA los símbolos se transmiten en paralelo mientras que en SCFDMA los símbolos se transmiten en series a cuatro veces la velocidad. De acuerdo con la gráfica la señal OFDMA luce como una señal multiportadora mientras que la SC-FDMA luce como de portadora simple de allí el nombre de “portadora simple”; esta característica hace que la señal SC-FDMA tenga un PAR menor que la señal OFDMA y por lo tanto, sea adecuada para el canal ascendente (Piedrahita, 2011).

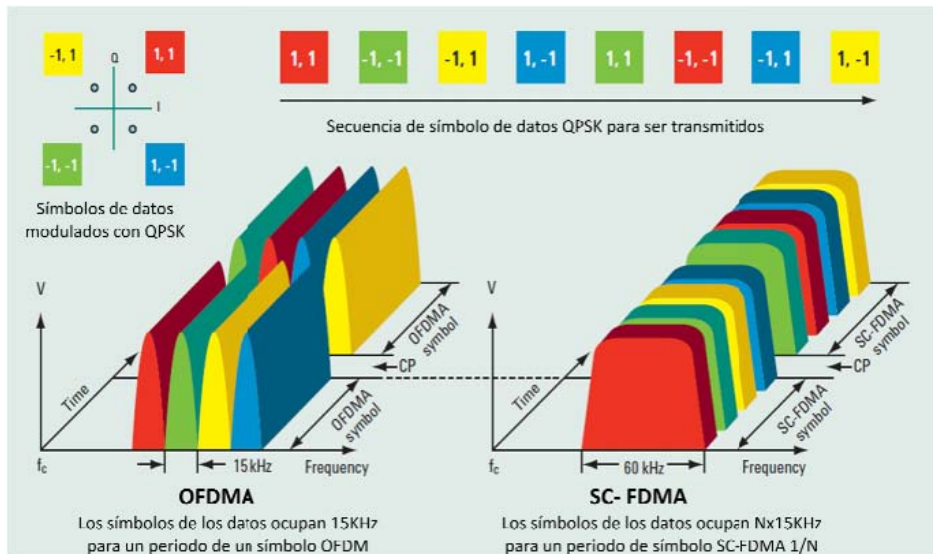


Figura 2.27 Comparación entre OFDMA y SC-FDMA.

2.3.7 Uso.

Para comenzar a hablar del uso de las radio frecuencias tocaremos primeramente la UIT el cual es definido como el organismo especializado de las Naciones Unidas para las Tecnologías de la Información y la Comunicación, el cual atribuye el espectro radioeléctrico y las órbitas de satélite a escala mundial, elabora normas técnicas que garantizan la interconexión continua de las redes y las tecnologías, y planea mejoras en el acceso a las TIC de las comunidades insuficientemente atendidas de todo el mundo.

La Constitución de la UIT, instrumento fundamental de la Unión, establece en el numeral 2 de su Artículo 44 lo siguiente:

“En la utilización de bandas de frecuencias para los servicios de radiocomunicaciones, los Estados Miembros tendrán en cuenta que las frecuencias y las órbitas asociadas, incluida la órbita de los satélites geoestacionarios, son recursos naturales limitados que deben utilizarse de forma racional, eficaz y económica, de conformidad con lo establecido en el Reglamento de Radiocomunicaciones, para permitir el acceso equitativo a esas órbitas y a esas frecuencias a los diferentes países o grupos de países, teniendo en cuenta las necesidades especiales de los países en desarrollo y la situación geográfica de determinados países.”

Por otro lado, respecto al empleo de nuevas tecnologías, la misma Constitución de la UIT en el numeral 1 de su artículo 44 establece lo que a la letra dice:

“Los Estados Miembros procurarán limitar las frecuencias y el espectro utilizado al mínimo indispensable para obtener el funcionamiento satisfactorio de los servicios necesarios. A tal fin, se esforzarán por aplicar, con la mayor brevedad, los últimos adelantos de la técnica.”

La Ley General de Bienes Nacionales “LGBN” en su artículo 13 señala que los bienes sujetos al régimen de dominio público de la Federación son inalienables, imprescriptibles e inembargables y no estarán sujetos a acción reivindicatoria o de posesión definitiva o provisional, o alguna otra por parte de terceros.

Asimismo, el artículo 16 de la LGBN, por lo que hace a las concesiones, permisos y autorizaciones sobre bienes sujetos al régimen de dominio público de la Federación, señala que estos no crean derechos reales, sino que otorgan simplemente frente a la administración y sin perjuicio de terceros, el derecho a realizar los usos, aprovechamientos o explotaciones, de acuerdo con las reglas y condiciones que establezcan las leyes y el título de la concesión, el permiso o la autorización correspondiente.

El uso, aprovechamiento o explotación del espectro radioeléctrico según su clasificación, podrá realizarse mediante concesiones, permisos o asignaciones

otorgadas por el Ejecutivo Federal, de acuerdo con las reglas y condiciones que establezca la regulación aplicable.

De conformidad con lo estipulado en el artículo 11 de la LFT, se requiere concesión de la Secretaría para usar, aprovechar o explotar una banda de frecuencias en el territorio nacional para espectro radioeléctrico de uso determinado y experimental. El concesionamiento de espectro radioeléctrico de uso determinado y experimental, sólo se otorgará a personas físicas y morales de nacionalidad mexicana, esto de conformidad con lo previsto en el numeral 12 de la LFT.

En el caso del espectro para uso determinado, el artículo 14 de la LFT refiere que la concesión sobre dichas bandas se otorgará mediante licitación pública, en este último caso, la Secretaría establecerá y publicará periódicamente un programa sobre las bandas de frecuencias del espectro para usos determinados, con sus correspondientes modalidades de uso y coberturas geográficas, que serán materia de licitación pública (artículo 15 de la LFT) (https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/res/R-RES-R.69-2015-PDF-S.pdf, 19-04-2016).

Estado Actual del espectro en México

En los últimos años el crecimiento del servicio móvil ha sido exponencial en todo el país, en parte por los avances tecnológicos experimentados por el sector, la facilidad de uso de los nuevos dispositivos móviles, así como la estructura de precios implementada por cada operador, todos estos, factores que han contribuido al crecimiento del mercado.

La proyección del servicio móvil ha sido tal que su penetración ha superado a la correspondiente al servicio fijo. Aun cuando la penetración del servicio fijo es alto en algunas ciudades, el acceso a servicios de telefonía fija en las zonas rurales tiende a ser limitada, en gran medida por factores geográficos y políticos (En México, el 36% de la población mexicana vive en zonas rurales, cuya principal problemáticas es que no cuenta con alternativas suficientes para generar ingresos sostenibles. Diagnóstico: Alternativas de la población rural en pobreza para generar ingresos sostenibles, SEDESOL, Mayo 2010.), cubriendo apenas a 24.1 millones de habitantes (Sexto Informe de Gobierno, Septiembre 2012). Por su

parte, los servicios de prepago brindan acceso a quienes no cuentan con ingresos estables, lo que ha permitido superar los niveles de penetración de líneas fijas, panorama que se estima se traslade al mercado de banda ancha.

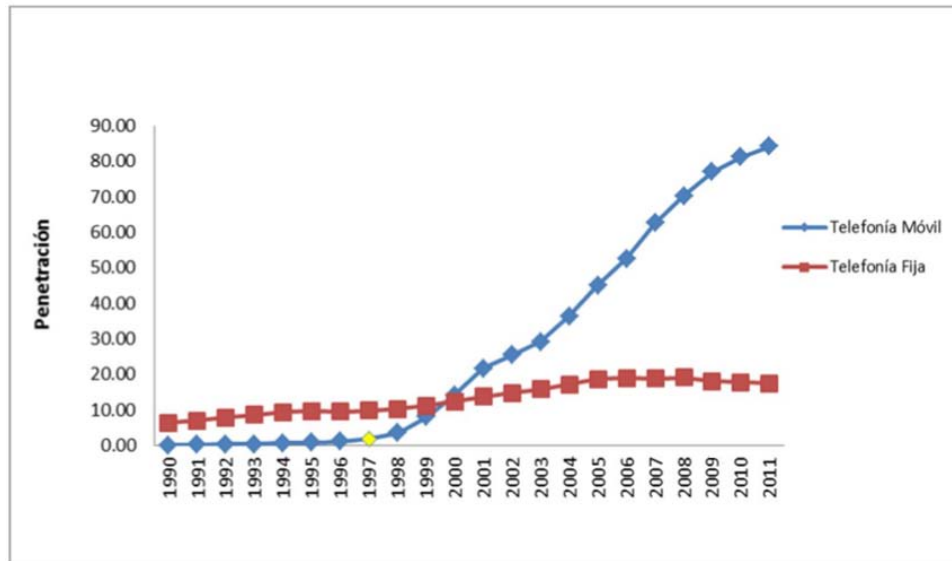


Figura 2.28 Evolutivo de la penetración de telefonía fija móvil en México.

Bandas Identificadas como IMT en UHF

Segmento 698-806 MHz La Comisión trabaja en el proceso de transición de la TV analógica a la digital. La transición y la liberación de espectro en la banda de 700 MHz facilitarán la introducción de servicios móviles avanzados con plataformas tecnológicas como LTE.

Existen trabajos en progreso en el 3GPP para estandarizar un perfil de LTE para la banda 450-470 MHz, sobre todo impulsados por Brasil, quien ya ha licitado la banda para aplicaciones de banda ancha rural.

El desarrollo de estándares LTE para banda ancha en la banda de 450-470 MHz se encuentra en una etapa temprana de trabajo, deberá darse seguimiento a tales trabajos para evaluar el potencial de desarrollo de tecnologías IMT en la banda.

Actualmente en México se cuenta con las siguientes bandas con perfil LTE: (698-806, 806-824/851- 869, 896-960, 1452-1492, 1710-1770/2110-2170, 1910-1920/1990-2000, 2300-2400, 2500-2690, 3400-3700) [MHZ] (www.ift.org.mx , 2012, 20-04-16) (Baca, 2016)

CAPÍTULO 3.

ANTENAS.

3.1 Introducción.

Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas y corrientes que los crean. La solución general de las ecuaciones, en el caso variable en el tiempo, es en forma de ondas, que pueden estar ligadas a una estructura, como es el caso de una línea de transmisión o guía de ondas, o bien libres en el espacio, como ocurre con las producidas por las antenas.

El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. La función de la antena es radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas a la aplicación. Aunque las antenas son muy variadas, todas las antenas tienen en común el ser una región de transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre, a la que puede además asignar un carácter direccional (Aznar, 2002).

Las ondas estacionarias en una línea de transmisión definen el funcionamiento básico de una antena (Figura 3.1a). La inversión de fase hace que se irradie algo del voltaje incidente, sin reflejarse hacia la fuente. La energía radiada se propaga alejándose de la antena, en forma de ondas electromagnéticas transversales. La eficiencia de irradiación de una línea de transmisión abierta es extremadamente baja. Es la relación de la energía irradiada entre la energía reflejada. Para irradiar más energía tan sólo se apartan entre sí los conductores. A la antena obtenida así se le llama un dipolo (quiere decir dos polos) (Figura 3.1b).

Como se puede observar en la Figura 3.1c, los conductores se apartan en una línea recta a la distancia de un cuarto de onda. Esta antena se conoce como antena de cuarto de onda o monopolo vertical (también se conoce como antena de Marconi). Por último un dipolo de media onda se llama antena de Hertz (Figura 3.1d) (Tomasi, 2003).

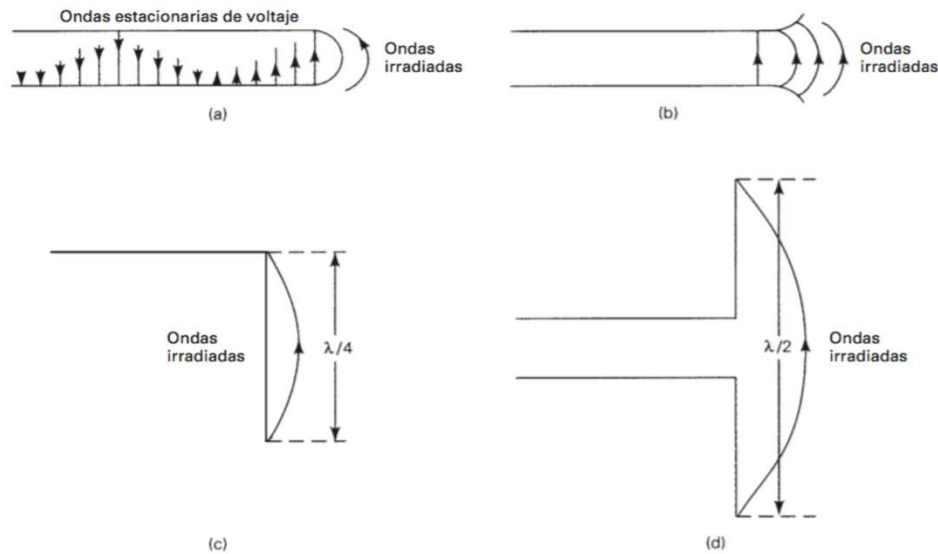


Figura 3.1 Radiación de una línea de transmisión: (a) radiación de línea de transmisión, (b) conductores divergentes, (c) antena de Marconi, (d) antena de Hertz.

3.2 Tipos de Antena.

Una antena puede ser un tramo de alambre, una barra metálica o un pedazo de tubo. La longitud del conductor depende de la frecuencia de operación. Las antenas radian con más eficacia cuando su longitud está relacionada directamente con la longitud de onda de la señal transmitida. Muchas antenas tienen una longitud que es una fracción de una longitud de onda. Las más comunes son la de media y un cuarto de longitud de onda. Los tipos más comunes de antenas que se emplean en comunicaciones se basan en un dipolo básico y la mayor parte de ellos son modificados de un dipolo de media longitud de onda.

Las antenas alámbricas, están construidas con hilos conductores que soportan las corrientes que dan origen a los campos radiados. Este tipo de antenas se caracterizan por corrientes y cargas que varían de forma armónica con el tiempo y con amplitudes que también varían a lo largo de los hilos (Aznar, 2002).

3.2.1 Antena dipolo.

Este tipo de antena se denomina antena Hertz, una antena dipolo es dos tramos de alambre, barra o tubo que es de un cuarto de longitud de onda en la frecuencia resonante de operación. Los dipolos de alambre están soportados con vidrio,

cerámica o aisladores de plástico en los extremos y en el centro (Figura 3.2) (Frenzel, 2003).

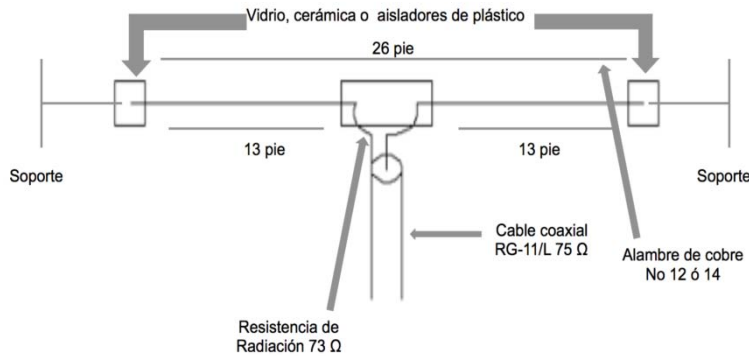


Figura 3.2 Dipolo de media onda de 18 MHz.

3.2.1.1 Resistencia de radiación.

La línea de transmisión se conecta en el centro. Allí, el dipolo tiene una impedancia de 73Ω , la cual representa la resistencia de radiación. En la frecuencia de resonancia, la antena aparece como resistencia pura de 73Ω . Para una transferencia de máxima potencia la impedancia de la línea de transmisión debe ser igual a la de la carga.

La resistencia de radiación del dipolo es idealmente de 73Ω si el conductor es muy delgado y la antena está en el espacio libre. Su impedancia real varía según el grosor del conductor, la relación diámetro a longitud y la proximidad del dipolo a otros objetos, en especial la tierra.

A mayor altura, menor será el efecto de la tierra y los objetos circundantes en ella, y más cerca de la resistencia de radiación teórica ideal. Dado que la resistencia de radiación está afectada por varios factores, a menudo varía de 73Ω . De todas maneras, un cable coaxial de 75Ω proporciona un buen acoplamiento, como lo logra uno de 50Ω a menores alturas y conductores más gruesos (Frenzel, 2003).

3.2.1.2 Longitud de dipolo.

Las antenas son sensible a la frecuencia, para llevar el dipolo a resonar a la frecuencia de operación, de: la longitud física debe ser un poco más corta que la mitad de longitud de onda ($\lambda = 492/f$), ya que la longitud de onda real está

relacionada con la razón de longitud a diámetro, la forma del conductor, el Q, el dieléctrico y un fenómeno llamado efecto de punta. En frecuencias de hasta 30 MHz, el efecto de punta reduce la longitud de la antena en 5%. Por lo tanto dicha longitud anual es sólo un 95% de la longitud calculada

$$L = \frac{467.4 \times 0.95}{f} = \frac{467.4}{f} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

En donde L= longitud de una antena dipolo de media longitud de onda (Frenzel, 2003).

3.2.1.3 Resonancia de la antena.

Debido a que la antena es de media longitud de onda en una sola frecuencia, actúa como circuito resonante. La inductancia representa el campo magnético, la capacitancia el campo eléctrico y la resistencia es la resistencia de radiación. Si la señal aplicada a la antena es tal que ésta es de media longitud de onda, el circuito equivalente será resonante y la reactancia inductancia cancelará la reactancia capacitiva. Sólo estará presente el efecto de la resistencia de radiación y la señal será radiada.

Si la frecuencia de operación y la longitud de la antena no concuerdan, el circuito equivalente no será resonante. En el caso de que la frecuencia de operación sea muy baja, la antena será muy corta y la impedancia equivalente será capacitiva porque la reactancia capacitiva es mayor en las frecuencias más bajas. Cuando la frecuencia de operación es demasiada alta, la antena será muy larga y la impedancia equivalente será inductiva porque la reactancia es mayor a frecuencias más altas (Frenzel, 2003).

3.2.1.4 Q de la antena y ancho de banda.

El ancho de banda de una antena lo determinan la frecuencia de operación y el Q de la antena según la relación familiar del ancho de banda $BW = f_r / Q$. A mayor Q más angosto será el ancho de banda, al bajar el Q se amplía el ancho de banda. En circuitos resonantes, generalmente se prefiere un Q mayor a 10, debido a que hace el circuito más selectivo.

Para una antena, es mejor un Q bajo porque proporciona mayor ancho de banda y así la antena opera en un intervalo más amplio de frecuencias con una **SWR (relación de onda estacionaria)** razonable. En general si un dipolo se usa en una

frecuencia diferente a su frecuencia de diseño, la SWR sube y se pierde energía, ya que la impedancia de la antena no será igual a la impedancia de la línea de transmisión.

En UHF y frecuencias de microondas, las antenas están construidas por lo regular de conductores cortos y gruesos, como tubos (aproximadamente 0.5 pulgadas de diámetros). El resultado es un ancho de banda mayor. El ancho de banda de algunas veces se expresa como porcentaje de la frecuencia de resonancia de la antena. Un porcentaje pequeño indica mayor Q y una banda más angosta significa un porcentaje menor. Por ejemplo una antena típica de alambre tiene un ancho de banda en el intervalo de 3 a 6 % de la frecuencia de resonancia. Si se usan conductores más gruesos, puede incrementarse el intervalo entre 7 – 10%, lo cual da menor Q y ancho de banda más amplio.

El Q y el ancho de banda de una antena también están afectados por otros factores. En tipos de antenas múltiples con muchos conductores, el Q es afectado por el número de conductores y su espaciamiento con el dipolo. En general estas antenas tienen Q altos y anchos de banda angostos, por lo que su operación fuera de frecuencia genera cambios mayores en la SWR de los que se tienen con antenas de menor Q (Frenzel, 2003).

3.2.1.5 Antenas cónicas.

Las antenas cónicas son un tipo de antena dipolo cuya función es aumentar el ancho de banda. Su longitud de onda es de 0.73λ , es más larga que la antena dipolo tradicional de media longitud de onda, pero su aspecto físico cambia las dimensiones necesarias para resonancia. La resistencia de radiación central de una antena cónica es mucho más alta que los 7Ω encontrados cuando se usan alambre recto o tubos, como conductores. A pesar de que los conos son caros y difíciles de fabricar, la principal ventaja de las antenas cónicas es su abundante ancho de banda, logran mantener una impedancia constante y ganancia dentro de un intervalo de frecuencias de 4:1 (Figura 3.3) (Frenzel, 2003).



Figura 3.3 Antena cónica.

3.2.1.6 Dipolos doblados.

Este tipo de antena es de media longitud de onda de largo, consta de dos conductores paralelos conectados en los extremos y con un lado abierto en el centro para conexión a la línea de transmisión. Estas antenas son muy comunes para recepción de televisión (Figura 3.4). Tienen una impedancia de 300Ω , el espacio entre los dos conductores paralelos es inversamente proporcional a la frecuencia. El patrón de radiación y la ganancia de un dipolo doblado son los mismos que los del dipolo estándar, sin embargo los dipolos doblados ofrecen mayor ancho de banda (Frenzel, 2003).

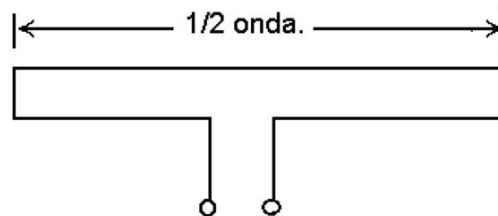


Figura 3.4 Dipolo doblado.

3.2.2 Antena conectada a tierra o antena de Marconi.

Es una antena monopolo de un cuarto de longitud de onda, montada en dirección vertical con el extremo inferior conectado en forma directa al suelo, o aterrizada a través de la red de acoplamiento de la antena (Figura 3.5). Sus máximos de corriente se presentan en los extremos aterrizados, lo que hace que pase una gran corriente por el suelo. Para reducir las pérdidas, el terreno debe ser buen conductor como por ejemplo un suelo rico en arcilla. Si es mal conductor (suelo arenoso o rocoso), se necesita un sistema de plano de tierra artificial. La ventaja

de esta tipo de antena sobre una de Hertz de tener la mitad de longitud, sin embargo su desventaja es que debe estar cerca del suelo (Tomasi, 2003).

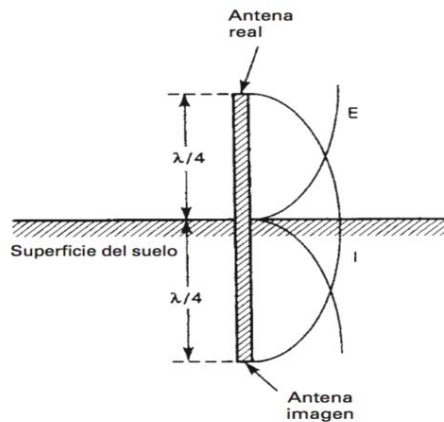


Figura 3.5 Onda estacionaria de voltaje y corriente de una antena aterrizada de cuarto de onda.

3.2.3 Antenas de uso especial.

Son antenas con características específicas para diferentes funciones, algunos ejemplos de estas son:

Antenas de apertura y reflectores. En este tipo de antena la generación de la onda radiada se consigue a partir de una distribución de campos soportada por la antena y se suelen excitar con guías de ondas. Son antenas de apertura las bocinas (piramidales y cónicas), las aperturas y las ranuras sobre planos conductores, y las bocas de guía. Se caracterizan por los campos eléctricos y magnéticos de la apertura, variables armónicamente con el tiempo. El empleo de reflectores, asociados a un alimentador primario, permite disponer de antenas con las prestaciones necesarias para servicios de comunicaciones a grandes distancias, tanto terrestres como espaciales. El reflector más común es la antena parabólica (Aznar, 2002). El reflector de disco parabólico aprovecha el hecho de que las ondas electromagnéticas son reflejadas por una lámina conductora (Sadiku, 2003).

Antenas con reflector parabólico, se emplean extensamente en sistemas de comunicaciones a frecuencias en la parte alta de la banda de UHF (a partir de 800 MHz) y en las bandas de SHF y EHF. El reflector parabólico es un paraboloides de

revolución, generado girando una parábola alrededor de su eje. En la Figura 3.6 se presenta el principio básico de una antena con reflector parabólico (Vega, 2007).

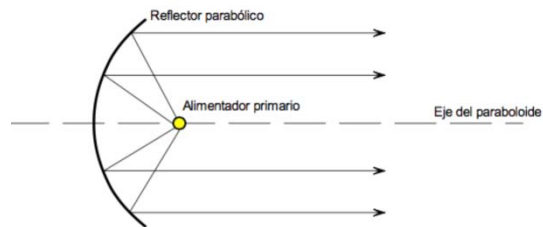


Figura 3.6 Reflector parabólico.

Como otra característica de este tipo de antena es el efecto de dispersión en los bordes y de obstrucción por los soportes (Figura 3.7), así como las características no ideales del alimentador primario, hacen que no radie hacia adelante toda la energía que incide sobre el paraboloide, reduciendo por consecuencia su eficiencia. En la práctica suele suponerse que la eficiencia de una antena parabólica es del 55%, si bien en algunos casos pueden conseguirse eficiencias mayores, hasta cerca de 70% (Vega, 2007).

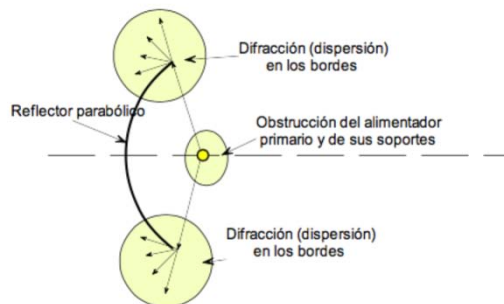


Figura 3.7 Dispersión de energía en los bordes de un paraboloide.

A continuación se mencionan otros tipos de antenas de uso especial, no se entrara en detalles de estas:

- Dipolo doblado
- Antena de torniquete
- Antena log-periódica
- Antena de cuadro
- Antenas de conjunto enfasado
- Antena helicoidal
- Antena de cuerno cónico

Agrupaciones de antenas. En ciertas aplicaciones se requieren características de radiación que no pueden lograrse con un solo elemento; sin embargo, con la combinación de varios de ellos se consigue una gran flexibilidad que permite obtenerlas. Estas agrupaciones pueden realizarse combinando, en principio, cualquier tipo de antena (Aznar, 2002).

3.3 Características generales de las antenas.

3.3.1 Reciprocidad de antena.

Este término significa que las características y el funcionamiento de una antena son iguales, ya sea que la antena radie o intercepte una señal electromagnética. Una antena transmisora toma voltaje del transmisor y lo convierte en una señal electromagnética. Una antena receptora tiene un voltaje inducido por la señal electromagnética que pasa a través de ella. El voltaje después se conecta al receptor. En ambos casos las propiedades de la antena (ganancia, directividad, frecuencia de operación, etc.) son las mismas. Es importante resaltar que una antena transmisora de alta se debe construir con materiales que puedan soportar voltajes y corrientes altos para un funcionamiento eficiente, mientras que su antena receptora, sin importar el diseño, puede hacerse de materiales básicos. En la mayor parte de los sistemas de comunicación, se usa la misma antena para transmitir y recibir, fenómeno que suele suceder en tiempos diferentes o de manera simultánea, siempre y cuando se disponga de algo para mantener la energía del transmisor fuera de la entrada del receptor. Para esta propósito se usa un dispositivo llamado diplexor (Frenzel, 2003).

3.3.2 Patrones de antena.

El patrón de antena también se conoce como patrón de radiación, es un diagrama tridimensional de la radiación de la antena en un campo lejano (Sadiku, 2003). Generalmente se emplea una sistema de coordenadas esféricas, con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia el campo eléctrico se expresa en función de las variables angulares (θ , ϕ) (Aznar, 2002). Sin embargo para evitar el trazado del diagrama tridimensional del patrón de antena, se trazan por separado el $[E_s]$ normalizado contra θ con ϕ constante (patrón del plano E o patrón vertical) y el $[E_s]$ normalizado contra ϕ con $\theta = \pi/2$ (patrón del plano E o

patrón horizontal).

En el caso de dipolo hertziano el $[E_s]$ se obtiene de la ecuación independiente de ϕ

$$f(\theta) = |\text{sen}\theta| \quad (\text{Ec. 3.2})$$

De esta ecuación se obtiene el patrón del plano E. En cuanto al patrón del plano H, se fija como $\theta = \pi/2$ para que $f(\theta) = 1$, lo cual equivale a un círculo de radio 1. De la combinación de los campos bidimensionales obtenidos con las ecuaciones anteriores resulta el patrón de campo tridimensional (Figura 3.8) (Sadiku, 2003).

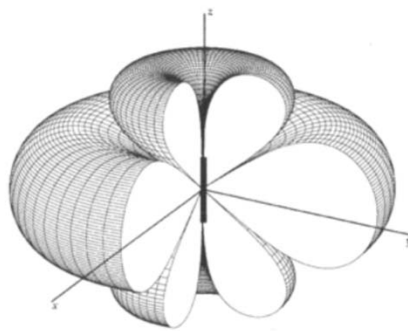


Figura 3.8 Patrones de antena tridimensional.

3.3.2.1 Potencia radiada.

La potencia radiada es aquélla que trasmite una antena al espacio en forma de ondas electromagnéticas. Por lo general, las antenas tienen ganancia, aunque este concepto no debe entenderse como que una antena amplifica la señal que recibe. La ganancia de una antena está asociada con la propiedad de concentrar la energía electromagnética en determinadas regiones del espacio y esa ganancia da una medida de tal capacidad de concentración respecto a una antena ideal que radiara la energía por igual en todas direcciones. Este tipo de antena ideal se denomina isotrópica.

Para determinar la potencia radiada de una antena se emplea la siguiente fórmula:

$$W_{RAD} = GW_A \quad (\text{Ec. 3.3})$$

En donde se indica que en una dirección particular, radía G watts más que lo que radiaría una antena isotrópica alimentada con la misma potencia W_A , aunque en otras direcciones es posible que no radie nada de energía. W_{RAD} se define como la

potencia isotrópica radiada equivalente o efectiva (PIRE). Si la ganancia se da respecto a un dipolo, la potencia radiada se designa como potencia radiada aparente (PRA o PAR) (Vega, 2007):

$$\text{PIRE}_{\text{dB}} = W_A (\text{dBw}) + G_A (\text{dBi}) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$\text{Pra}_{\text{dB}} = W_A (\text{dBw}) + G_A (\text{dBd}) \quad (\text{Ec. 3.5})$$

3.3.2.2 Atenuación en el espacio libre.

Se entiende por espacio libre la condición en que la energía electromagnética se propaga sin obstáculos de ninguna clase. Una antena isotrópica radia energía por igual en todas direcciones en forma de una onda esférica. A una distancia r de la antena, puede considerarse que toda la potencia radiada está distribuida sobre una esfera de área $4\pi r^2$, de modo que puede definirse una densidad de flujo de potencia a esa distancia r como:

$$S = \frac{W_{\text{rad}}}{4\pi r^2} \text{ watt/m}^2 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

En donde W_{rad} es la potencia isotrópica equivalente radiada.

Si a esa distancia r se coloca otra antena isotrópica, esta interceptará a la energía electromagnética y se inducirá en ella un voltaje que será proporcional a la densidad de flujo de potencia en el punto de recepción y a una magnitud designada como área efectiva o área equivalente, A_e que, para una antena isotrópica se define:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

La potencia recibida por la antena es:

$$W_{\text{Riso}} = W_{\text{RAD}} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

La atenuación entre dos antenas isotrópicas se define como:

$$\alpha_{\text{EL}} = \frac{W_{\text{Riso}}}{W_{\text{RAD}}} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Al convertir a unidades logarítmicas esta última ecuación se obtiene una ecuación ampliamente usada

$$L_{\text{EL}} = 32.45 + 20 \log(r_{\text{km}}) + 20 \log(f_{\text{MHz}}) \quad (\text{Ec. 3.10})$$

En donde la distancia se expresa en Km y la frecuencia en MHz (Vega, 2007).

3.3.3 Intensidad de la radiación.

Una de las características fundamentales de una antena es su capacidad para radiar con una cierta direccionalidad, es decir, para concentrar la energía radiada en ciertas direcciones del espacio (Aznar, 2002). La intensidad de radiación de una antena se define como:

$$U(\theta, \phi) = r^2 \mathcal{P}_{\text{prom}} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

La potencia radiada total promedio puede expresarse como:

$$\begin{aligned} P_{\text{rad}} &= \oint_s \mathcal{P}_{\text{prom}} dS = \oint_s \mathcal{P}_{\text{prom}} r^2 \sin\theta d\theta d\phi \\ &= \int_s U(\theta, \phi) d\Omega \\ &= \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) d\Omega \quad (\text{Ec. 3.12}) \end{aligned}$$

Donde $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ es el ángulo sólido diferencial, en estereorradianes (sr). De ahí que la intensidad de radiación de $U(\theta, \phi)$ es la potencia radiada total dividida entre 4π sr; es decir (Sadiku, 2003).

$$U_{\text{prom}} = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

3.3.4 Impedancia.

La antena debe conectarse a un transmisor y radiar la máxima potencia posible con un mínimo de pérdidas en ella. Generalmente el transmisor se localiza alejado de la antena y la conexión se hace mediante una línea de transmisión o guía de ondas por lo que se debe tomar en cuenta la impedancia, atenuación y longitud.

A la entrada de la antena se define la impedancia de entrada Z_e a través de relaciones tensión corriente. En notación fasorial de régimen permanente sinusoidal poseerá una parte real $R_e(\omega)$ y una imaginaria $X_e(\omega)$, ambas dependientes de la frecuencia. Si Z_e no presenta una parte reactiva a una frecuencia, la antena es resonante. Como la antena radia energía, hay una pérdida neta de potencia hacia el espacio debida a radiación, que se denomina resistencia de radiación R_r :

$$P_{\text{radiada}} = I^2 R_r \quad (\text{Ec. 3.14})$$

La potencia entregada a la antena es la suma de las potencias radiada y de pérdidas en la antena. Todas las pérdidas pueden globalizarse en una resistencia

de pérdidas R_{Ω} .

$$P_{\text{entreada}} = P_{\text{radiada}} + P_{\text{perdidas}} = I^2 R_2 + I^2 R_{\Omega} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

La impedancia de entrada es un parámetro de gran trascendencia, ya que condiciona las tensiones de los generadores que se deben aplicar para obtener determinados valores de corriente en la antena y, en consecuencia, una determinada potencia radiada. Si la parte reactiva es grande, hay que aplicar tensiones elevadas para obtener corrientes apreciables; si la resistencia de radiación es baja, se requieren elevadas corrientes para tener una potencia radiada importante.

La existencia de pérdidas en la antena hace que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se puede definir un rendimiento o eficiencia de la antena η_{ℓ} , mediante la relación entre la potencia radiada y la entregada, o equivalentemente entre la resistencia de entrada de esa antena, si hubiera sido ideal (sin pérdidas), y la que presenta realmente (Aznar, 2002).

$$\eta_{\ell} = \frac{P_{\text{radiada}}}{P_{\text{entregada}}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

3.3.5 Ganancia directiva y directividad.

La ganancia directiva de una antena es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección particular (θ, ϕ) y depende del patrón de la antena. Usualmente se obtiene como la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada (θ, ϕ) a la intensidad de radiación promedio:

$$G_d(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\text{prom}}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{rad}}} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Se entiende por directividad de una antena (D) es la razón de la intensidad de radiación máxima a la intensidad de radiación promedio (Sadiku, 2003):

$$D = \frac{U_{\text{máx}}}{U_{\text{prom}}} = G_{d, \text{máx}} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

$$D = \frac{4\pi U_{\text{máx}}}{P_{\text{rad}}} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

3.3.6 Ganancia de potencia.

El concepto de ganancia directiva no considera la pérdida óhmica de potencia P_{ℓ} de la antena. P_{ℓ} se debe a que el conductor del que está hecha la antena es de

conductividad finita. La ganancia de potencia de la antena se define como (Sadiku, 2003):

$$G_p(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{ent}} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

En donde $P_{ent} = P_\ell + P_{rad}$ (Ec. 3.21).

3.3.7 Polarización.

La polarización de una antena no es más que la orientación del campo eléctrico que se irradia de ella. Una antena puede estar polarizada linealmente (en general, horizontal o verticalmente, suponiendo que los elementos de la antena están en un plano horizontal o en uno vertical), elípticamente o circularmente. Si una antena irradia una onda electromagnética verticalmente polarizada, se define a la antena como verticalmente polarizada (o polarizada verticalmente). Si una antena irradia una onda electromagnética horizontalmente polarizada, se dice que la antena está polarizada horizontalmente; si el campo eléctrico gira describiendo una elipse, está elípticamente polarizada; si el campo eléctrico gira en forma circular, está circularmente polarizada (Figura 3.9) (Tomasi, 2003).

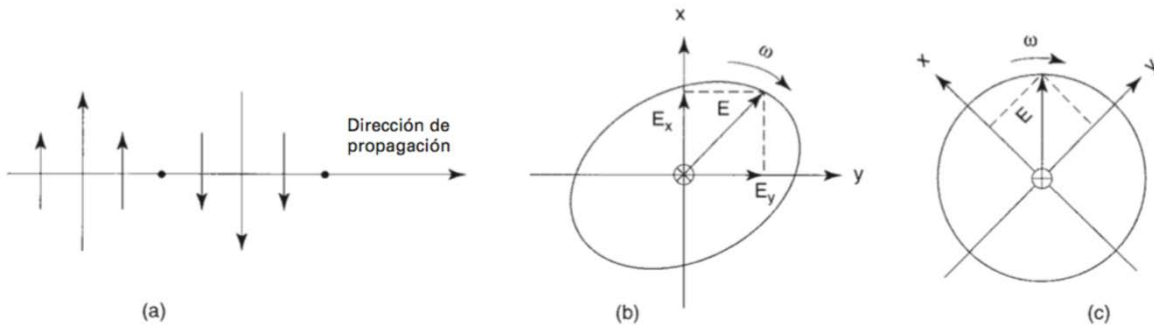


Figura 3.9 Polarización de antena (a) lineal.

3.3.8 Adaptación (recepción).

La impedancia de una antena receptora es la misma que la impedancia de la misma antena actuando como transmisora. Cuando la antena se encuentra en recepción, esta se conecta a una línea de transmisión o directamente a un receptor. Para que haya máxima transferencia de potencia, la impedancia de antena y la impedancia de carga deben ser complejas conjugadas (Aznar, 2002).

3.3.9 Área efectiva (recepción).

La antena extrae potencia del frente de onda incidente, por lo que presenta cierta área de captación o área efectiva A_{ef} definida como la relación entre la potencia que entrega la antena a su carga y la densidad de potencia de la onda incidente

$$A_{ef} = \frac{P_L}{p} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Que representa físicamente la porción del frente de onda que la antena ha de interceptar y drenar de él toda la potencia contenida hacia la carga (Aznar, 2002).

3.4 Usos.

Las antenas constituyen una parte fundamental de los sistemas radioeléctricos de comunicaciones. En la actualidad, las antenas son elementos indispensables para transmitir y recibir señales de radiodifusión sonora y televisión, bien sea de sistemas radioeléctricos terrestres, de satélite, microondas o cable. En telefonía móvil, sistemas de apertura y cierre de puertas o de identificación en almacenes, etc. Lo anterior nos indica la importancia de la aplicación de las antenas a la vida diaria (Vega, 2007).

CAPÍTULO 4.

GENERALIDADES DE LAS MICROONDAS.

4.1 Introducción.

Debido al aumento en la necesidad del uso de comunicaciones electrónicas el espectro de frecuencias se ha saturado, por lo que se necesita mayores anchos de banda y usos de frecuencias nuevas.

El espectro electromagnético es un recurso natural finito que lo hemos venido usando con rapidez. Por eso ha sido necesario mover las comunicaciones de radio más arriba del espectro. La expansión principal es hacia VHF y UHF en el intervalo de 1 a 300 GHz el cual ofrece importantes anchos de banda para comunicaciones y otras aplicaciones.

Las señales de microondas, a causa de sus altas frecuencias, tienen longitudes de onda relativamente pequeñas, de ahí el nombre de “microondas”.

Microondas comprende las frecuencias ultra altas, super altas y mucho muy alta, directamente arriba de los intervalos de frecuencia más bajas donde se dan ahora la mayor parte de las comunicaciones de radio y debajo de las frecuencias ópticas que cubren las frecuencias infrarrojas, visibles y ultravioletas (Gupta, 1983).

4.2 Rango de frecuencia.

Se denomina microondas a las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias determinado; generalmente de entre 300 MHz y 3 GHz, que supone un período de oscilación de 3ns (3×10^{-9} s) a 3ps (3×10^{-12} s) y una longitud de onda en el rango de 1 m a 1 mm.

El rango de las microondas está incluido en las bandas de radiofrecuencia, concretamente en las de UHF 0,3–3 Ghz, SHF 3–30 Ghz y EHF 30–300 Ghz (Figura 4.1).

Otras bandas de radiofrecuencia incluyen ondas de menor frecuencia y mayor longitud de onda que las microondas. Las microondas de mayor frecuencia y menor longitud de onda —en el orden de milímetros— se denominan ondas milimétricas.

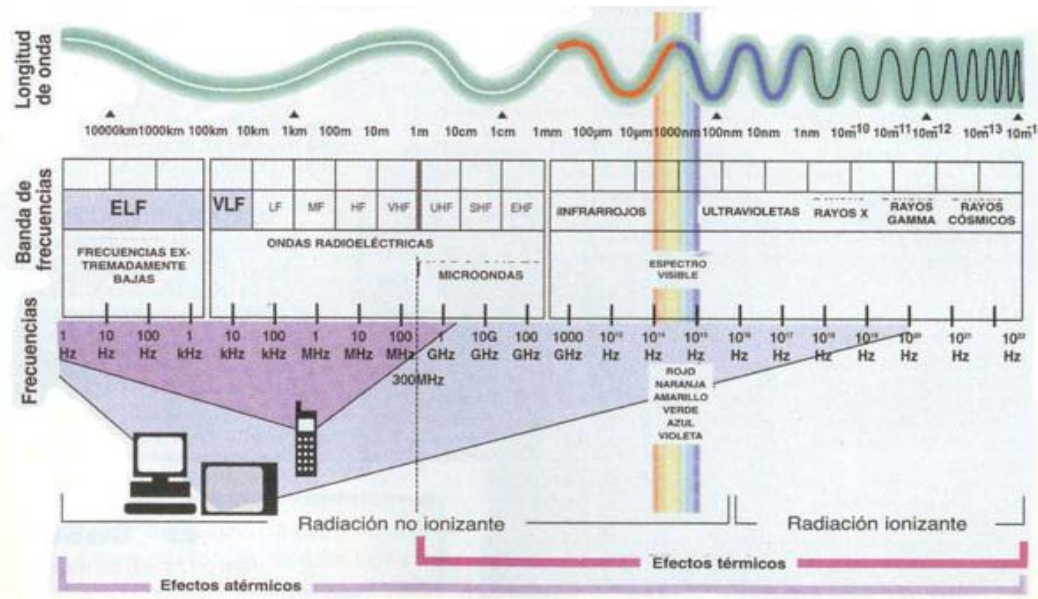


Figura 4.1 Espectro de ondas electromagnéticas.

4.3 Características.

Las principales características de las microondas son las siguientes (<https://es.scribd.com/document/317251939/UNIDAD-VI-TIC-s-APLICADAS-A-MOVILES>):

- Frecuencias muy altas de 3 GHz a 300 GHz.
- Longitud de onda muy pequeña.
- Antenas parabólicas.
- Receptor y transmisor en línea visual.
- A 100m de altura se alcanzan unos 80 Km sin repetidores.
- Rebotan en los metales (radar).

La radiocomunicación por microondas se refiere a la transmisión de datos o voz a través de radiofrecuencias con longitudes de onda en la región de frecuencias de microondas (Gupta, 1983).

Las hay de dos tipos:

Satelitales: Se realizan a través de bases terrestres con antenas que envían señales al satélite, este se encarga de direccionarlas hacia la estación receptora con la onda amplificada para evitar pérdidas.

Terrestres: Se basan en conexiones denominadas punto a punto, ya que sus antenas deben estar sin obstáculos físicos para evitar fallas en la transmisión

(<https://es.scribd.com/document/317251939/UNIDAD-VI-TIC-s-APLICADAS-A-MOVILES>).

La gran mayoría de los sistemas actuales de radio de microondas es de modulación de frecuencia, que es de naturaleza analógica. Sin embargo, en fechas recientes se han elaborado nuevos sistemas que usan modulación por conmutación de fase, o por amplitud en cuadratura, que son formas básicamente de modulación digital. También se habla de sistemas satelitales que usan **PCM (modulación por impulsos codificados)** o **PSK (modulación por desplazamiento de fase)**, estos dos sistemas son similares a los sistemas terrestres de radio de microondas, sin duda los dos sistemas comparten muchas frecuencias.

La diferencia principal entre los sistemas satelitales y terrestres de radio, es que los sistemas satelitales propagan señales fuera de la atmósfera terrestre, por lo que son capaces de llevar señales mucho más lejanas, usando menos transmisores y receptores (<http://documents.mx/documents/radiocomunicacion-por-microondas.html>).

Las torres de microondas terrestres son parte de una amplia red de estructuras que proporcionan comunicación inalámbrica y fija a usuarios de todo el mundo. Estas torres funcionan con satélites para retransmitir las señales de comunicación digital.

Mediante un enlace de microondas podemos conectar puntos distantes transportando canales dedicados de internet banda ancha desde las torres de conexión de Internet hasta sus oficinas, o simplemente conectar redes privadas de comunicaciones entre los centros de operaciones de su empresa (<https://es.scribd.com/document/317251939/UNIDAD-VI-TIC-s-APLICADAS-A-MOVILES>).

Las microondas pueden ser generadas de varias maneras, generalmente divididas en dos categorías: dispositivos de estado sólido y dispositivos basados en tubos de vacío.

Los dispositivos de estado sólido para microondas están basados en semiconductores de silicio o arseniuro de galio, e incluyen transistores de efecto

campo (FET), transistores de unión bipolar (BJT), diodos GUNN y diodos **IMPATT (tiempo de tránsito por avalancha con ionización por choque)**. Se han desarrollado versiones especializadas de transistores estándar para altas velocidades que se usan comúnmente en aplicaciones de microondas.

Los dispositivos basados en tubos de vacío operan teniendo en cuenta el movimiento balístico de un electrón en el vacío bajo la influencia de campos eléctricos o magnéticos, entre los que se incluyen el magnetrón, el klystrón, el tubo de onda viajera (TWT) y el gyrotrón (Fontal, 2005).

Ventajas

- Sin necesidad de cables.
- Múltiples canales disponibles.
- Antenas relativamente pequeñas son efectivas.
- El ancho de banda, que va de 2 a 24 GHz.
- A estas frecuencias las ondas de radio se comportan como ondas de luz, por ello la señal puede ser enfocada utilizando antenas parabólicas y antenas de embudo, además pueden ser reflejadas con reflectores pasivos.

Desventajas

- Línea de visión se verá afectado si cualquier obstáculo, tales como edificios de nueva construcción, están en el camino.
- Señal de absorción por la atmósfera. Las microondas sufren de atenuación debido a las condiciones atmosféricas.
- Las torres son caras de construir.
- Las frecuencias son susceptibles a un fenómeno llamado disminución de multicamino lo que ocasiona que disminuya la intensidad de señal recibida (<https://es.scribd.com/document/317251939/UNIDAD-VI-TIC-s-APLICADAS-A-MOVILES>).

Algunos ejemplos de la aplicación de estas ondas son los siguientes:

- Aeronáutica:
 - lanzamiento de misiles
 - tripulación de aviones
- Comunicaciones:
 - televisión

- telemetría
- sistema satelital
- radionavegación
- Medicina:
 - diatermia
- Uso doméstico:
 - hornos y calentadores
 - Investigación:
 - meteorología
 - física nuclear

4.4 Propagación.

Básicamente un enlace vía microondas consiste en tres componentes fundamentales: el transmisor, el receptor y el canal aéreo(Figura 4.2).El transmisor es el responsable de modular una señal digital a la frecuencia utilizada para transmitir, el canal aéreo representa un camino abierto entre el transmisor y el receptor, y como es de esperarse el receptor es el encargado de capturar la señal transmitida y llevarla de nuevo a señal digital.

El factor limitante de la propagación de la señal en enlaces microondas es la distancia que se debe cubrir entre el transmisor y el receptor, además esta distancia debe ser libre de obstáculos. Otro aspecto que se debe señalar es que en estos enlaces, el camino entre el receptor y el transmisor debe tener una altura mínima sobre los obstáculos en la vía, para compensar este efecto se utilizan torres para ajustar dichas alturas (<http://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-4/>, 23-05-16).



Figura 4.2 Comunicación vía microondas.

Guía de onda.

En electromagnetismo y en telecomunicación, una guía de onda es cualquier estructura física que guía ondas electromagnéticas.

Algunos sistemas de telecomunicaciones utilizan la propagación de ondas en el espacio libre, sin embargo también se puede transmitir información mediante el confinamiento de las ondas en cables o guías. En altas frecuencias las líneas de transmisión y los cables coaxiales presentan atenuaciones muy elevadas por lo que impiden que la transmisión de la información sea la adecuada, son imprácticos para aplicaciones en HF o de bajo consumo de potencia, especialmente en el caso de las señales cuyas longitudes de onda son del orden de centímetros, esto es, microondas.

La transmisión de señales por guías de onda reduce la disipación de energía, es por ello que se utilizan en las frecuencias denominadas de microondas con el mismo propósito que las líneas de transmisión en frecuencias más bajas, ya que se presentan poca atenuación para el manejo de señales de alta frecuencia.

Este nombre, se utiliza para designar los tubos de un material de sección rectangular, circular o elíptica, en los cuales la energía electromagnética ha de ser conducida principalmente a lo largo de la guía y limitada en sus fronteras. Las paredes conductoras del tubo confinan la onda al interior por reflexión, debido a la ley de Snell en la superficie, donde el tubo puede estar vacío o relleno con un dieléctrico. El dieléctrico le da soporte mecánico al tubo (las paredes pueden ser delgadas), pero reduce la velocidad de propagación.

En las guías, los campos eléctricos y los campos magnéticos están confinados en el espacio que se encuentra en su interior, de este modo no hay pérdidas de potencia por radiación y las pérdidas en el dieléctrico son muy bajas debido a que suele ser aire. Este sistema evita que existan interferencias en el campo por otros objetos, al contrario de lo que ocurría en los sistemas de transmisión abiertos (<http://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-4/>, 23-05-16).

Principios de operación.

Dependiendo de la frecuencia, se pueden construir con materiales conductores o dieléctricos. Generalmente, cuanto más baja es la frecuencia, mayor es la guía de onda. Por ejemplo, el espacio entre la superficie terrestre y la ionosfera, la atmósfera, actúa como una guía de onda. Las dimensiones limitadas de la Tierra

provocan que esta guía de onda actúe como cavidad resonante para las ondas electromagnéticas en la banda ELF.

Las guías de onda también pueden tener dimensiones de pocos centímetros. Un ejemplo puede ser aquellas utilizadas por los satélites de EHF y por los radares.

Los modos de propagación dependen de la longitud de onda, de la polarización y de las dimensiones de la guía. El modo longitudinal de una guía de onda es un tipo particular de onda estacionaria formado por ondas confinadas en la cavidad.

Los modos transversales se clasifican en tipos distintos:

Modo TE (Transversal eléctrico), la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es nula.

Modo TM (Transversal magnético), la componente del campo magnético en la dirección de propagación es nula.

Modo TEM (Transversal electromagnético), la componente tanto del campo eléctrico como del magnético en la dirección de propagación es nula.

Modo híbrido, son los que sí tienen componente en la dirección de propagación tanto en el campo eléctrico como en el magnético.

En guías de onda rectangulares el modo fundamental es el TE_{1,0} y en guías de onda circulares es el TE_{1,1}.

El ancho de banda de una guía de onda viene limitado por la aparición de modos superiores. En una guía rectangular, sería el TE_{0,1}. Para aumentar dicho ancho de banda se utilizan otros tipos de guía, como la llamada "Double Ridge", con sección en forma de "H" (<http://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-4/>, 23-05-16).

Antenas y torres de microondas.

Para la comunicación de microondas terrestres se deben usar antenas parabólicas, las cuales deben estar alineadas o tener visión directa entre ellas, además entre mayor sea la altura mayor el alcance, sus problemas son la pérdida de datos por atenuación e interferencias, y es muy sensible a las malas condiciones atmosféricas.

La distancia cubierta por enlaces microondas puede ser incrementada por el uso de repetidoras, las cuales amplifican y redireccionan la señal, es importante

destacar que los obstáculos de la señal pueden ser salvados a través de reflectores pasivos. La Figura 4.3 muestran cómo trabaja un repetidor y como se ven los reflectores pasivos.

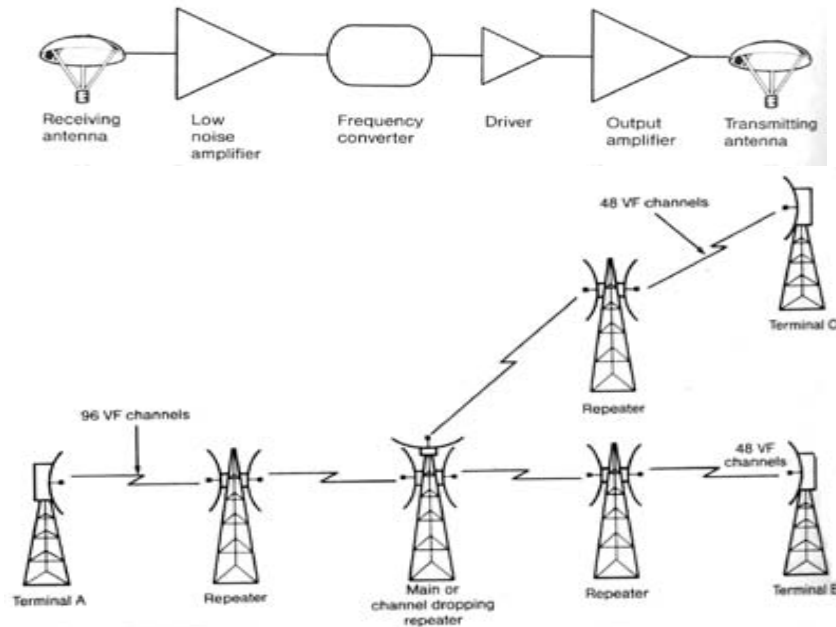


Figura 4.3 Repetidores y reflectores pasivos.

Las principales aplicaciones de un sistema de microondas terrestre son las siguientes:

- Telefonía básica (canales telefónicos)
- Datos
- Telegrafo/Telex/Facsímile
- Canales de Televisión.
- Video
- Telefonía Celular (entre troncales)

Un sistema de microondas consiste de tres componentes principales: una antena con una corta y flexible guía de onda, una unidad externa de RF (Radio Frecuencia) y una unidad interna de RF.

La siguiente es una lista de frecuencias utilizadas por los sistemas de microondas:

Common Carrier Operational Fixed(banda de operación fija)

- 2.110 2.130 GHz
- 1.850 1.990 GHz
- 2.160 2.180 GHz
- 2.130 2.150 GHz

- 3.700 4.200 GHz
- 2.180 2.200 GHz
- 5.925 6.425 GHz
- 2.500 2.690 GHz
- 10.7 11.700 GHz
- 6.575 6.875 GHz
- 12.2 12.700 GHz

Comunicación por satélite.

Básicamente, los enlaces satelitales son iguales a los de microondas excepto que uno de los extremos de la conexión se encuentra en el espacio, como se había mencionado un factor limitante para la comunicación de microondas es que tiene que existir una línea recta entre los dos puntos pero como la tierra es esférica esta línea se ve limitada en tamaño, entonces, colocando el receptor o el transmisor en el espacio se cubre un área más grande de superficie.

La Figura 4.4 muestra un diagrama sencillo de un enlace vía satélite, nótese que los términos **UPLINK(subida)** y **DOWNLINK(bajada)** aparecen en la Figura 4.4, el primero se refiere al enlace de la tierra al satélite y la segunda del satélite a la tierra (<http://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-4/>, 23-05-16).

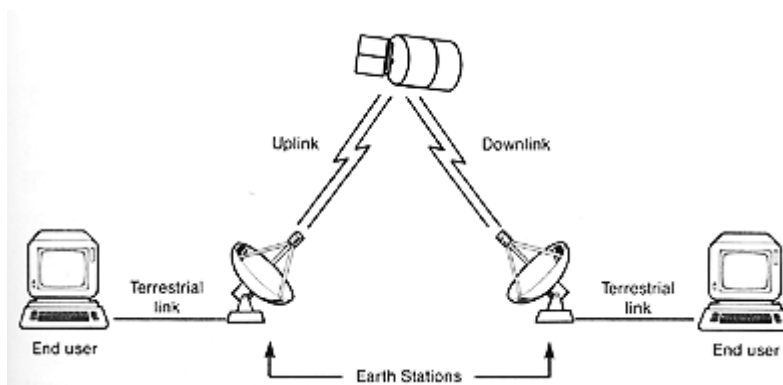


Figura 4.4 Diagrama de enlace vía satélite.

Un satélite para estar en este tipo de órbitas debe ser posicionado a 13.937,5 Km. de altura, con lo que es posible cubrir a toda la tierra utilizando solo tres satélites como lo muestra la Figura 4.5

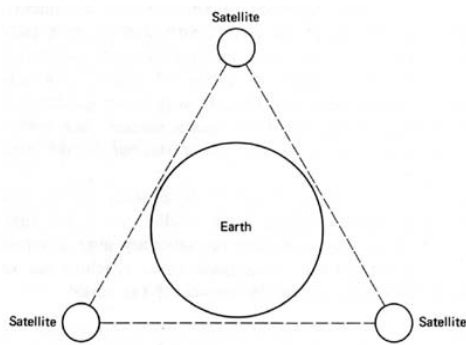


Figura 4.5 Cobertura satelital de la tierra con solo 3 satélites.

Un satélite no puede retransmitir una señal a la misma frecuencia a la que es recibida, si esto ocurriese el satélite interferiría con la señal de la estación terrestre, por esto el satélite tiene que convertir la señal recibida de una frecuencia a otra antes de retransmitirla, para hacer esto lo hacemos con algo llamado **Transponders (dispositivo inalámbrico de control)**.

Al igual que los enlaces de microondas las señales transmitidas vía satélites son también degradadas por la distancia y las condiciones atmosféricas.

Existen satélites que se encargan de regenerar la señal recibida antes de retransmitirla, pero estos solo pueden ser utilizados para señales digitales, mientras que los satélites que no lo hacen pueden trabajar con ambos tipos de señales (Análogas y Digitales) (<http://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-4/>, 23-05-16).

Radar

El **radar (término derivado del acrónimo inglés radio detection and ranging, detección y medición de distancias por radio)** es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno. Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe típicamente en la misma posición del emisor. A partir de este "eco" se puede extraer gran cantidad de información. El uso de ondas electromagnética con diversas longitudes de onda permite detectar objetos más allá del rango de otro tipo de emisiones (luz visible, sonido, etc.)

Entre sus ámbitos de aplicación se incluyen la meteorología, el control del tráfico aéreo y terrestre y gran variedad de usos militares (<http://telecomunicaciones2.webnode.mx/>, 23-05-16).



Figura 4.6 Radar

4.5 Atenuaciones.

La señal de microondas transmitida es distorsionada y atenuada mientras viaja desde el transmisor hasta el receptor, estas atenuaciones y distorsiones son causadas por una pérdida de poder dependiente a la distancia, reflexión y refracción debido a obstáculos y superficies reflectoras, y a pérdidas atmosféricas.

El ruido es una fuente interna de variaciones aleatorias de la señal, generado en mayor o menor medida por todos los componentes electrónicos. Típicamente se manifiesta en variaciones aleatorias superpuestas a la señal de eco recibida.

Cuanta menor sea la potencia con que llega la señal de interés, más difícil será diferenciarla del fondo de ruido. Por tanto, la más importante fuente de ruido aparece en el receptor, por lo que debe dedicarse un gran esfuerzo a tratar de minimizar estos factores. La figura de ruido es una medida del ruido producido por el receptor en comparación con un receptor ideal y debe ser minimizada (https://www.ecured.cu/Comunicaci%C3%B3n_v%C3%ADa_microondas, 24-04-2016).

Distorsión de atenuación.

La distorsión de atenuación es un problema mucho menor para las señales digitales. La energía de la señal digital decae rápidamente con la frecuencia; la mayor parte de sus componentes están concentradas en torno a la frecuencia fundamental o velocidad de transmisión (en bits/segundo o bps) de la señal.

Distorsión de Retardo.

La distorsión de retardo es un fenómeno debido a que la velocidad de propagación de una señal a través de un medio guiado varía con la frecuencia. Para una señal limitada en banda, la velocidad tiende a ser mayor cerca de la frecuencia central y disminuye al acercarse a los extremos de la banda. Por tanto, las distintas componentes en frecuencia de la señal llegarán al receptor en instantes diferentes de tiempo, dando lugar a desplazamientos de fase entre las diferentes frecuencias. Este efecto se llama distorsión de retardo, ya que la señal recibida está distorsionada debido al retardo variable que sufren sus componentes. La distorsión de retardo es particularmente crítica en la transmisión de datos digitales. Supóngase que se está transmitiendo una secuencia de bits, utilizando una señal analógica o digital. Debido a la distorsión de retardo, algunas de las componentes de la señal en un bit se desplazarán hacia otras posiciones, provocando interferencia entre símbolos. Este hecho es un factor (de gran importancia) que limita la velocidad de transmisión máxima en un canal de transmisión.

Para compensar la distorsión de retardo también se pueden emplear técnicas de equalización (Stallings, 2004).

4.5.1. Análisis de ruido.

Se define al ruido eléctrico como cualquier energía eléctrica indeseable que queda entre la banda de paso de la señal. Por ejemplo, en la grabación de audio se consideran como ruido todas las señales eléctricas no deseadas que están dentro de la banda de frecuencias de audio, de 0 a 15 kHz, que interfieren con la música. La Figura 4.7 muestra el efecto que tiene el ruido sobre una señal eléctrica. En la Figura 4.7a se ve una senoide sin ruido, y en la Figura 4.7b se ve la misma señal, pero con la presencia de ruido.

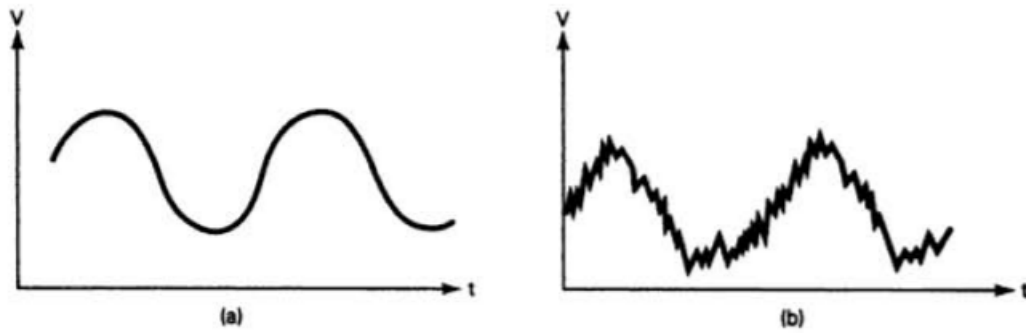


Figura 4.7a senoide sin ruido y 4.7b senoide con ruido.

Se puede clasificar al ruido en dos categorías: correlacionado y no correlacionado. La correlación implica una relación entre la señal y el ruido. Por consiguiente, el ruido correlacionado sólo existe cuando hay una señal. Por otra parte, el ruido no correlacionado está presente siempre, haya o no una señal.

Ruido no correlacionado

El ruido no correlacionado está presente independientemente de si haya una señal o no. Se puede seguir subdividiendo en dos categorías generales: externo e interno.

Ruido externo. El ruido externo es el que se genera fuera del dispositivo o circuito. Hay tres causas principales del ruido externo: atmosféricas, extraterrestres y generadas por el hombre.

Ruido atmosférico. El ruido atmosférico se origina en perturbaciones eléctricas naturales que se generan dentro de la atmósfera terrestre. Al ruido atmosférico se le suele llamar electricidad estática, parecido al de las frituras, que se oye con frecuencia en una bocina cuando no tiene señal. La fuente de la mayor parte de la electricidad estática se encuentra en las condiciones eléctricas naturales, como por ejemplo los rayos. A veces, la electricidad estática está en forma de pulsos que dispersan energía dentro de una amplia gama de frecuencias. Sin embargo, la magnitud de esta energía es inversamente proporcional a su frecuencia. Por consiguiente, el ruido atmosférico es relativamente insignificante a frecuencias mayores de más o menos 30 MHz.

Ruido extraterrestre. El ruido extraterrestre consiste en señales eléctricas que se originan fuera de la atmósfera de la Tierra y, en consecuencia, a veces se le llama

ruido de espacio profundo. El ruido extraterrestre se origina en la Vía Láctea, en otras galaxias y en el Sol. También se subdivide en dos categorías: solar y cósmico.

El ruido solar lo genera en forma directa el calor solar. Hay dos partes de este ruido: la producida por una condición de calma, cuando existe una intensidad relativamente constante de radiación, y de gran intensidad, ocasionado por perturbaciones esporádicas debidas a manchas solares y a protuberancias solares. La magnitud del ruido esporádico causado por la actividad de manchas solares tiene una variación cíclica que se repite cada 11 años.

Las fuentes de ruido cósmico están distribuidas continuamente en las galaxias. Como las fuentes del ruido galáctico son mucho más lejanas que nuestro Sol, su intensidad de ruido es relativamente pequeña. Al ruido cósmico se le llama con frecuencia ruido de cuerpo negro, y se distribuye con bastante uniformidad por el cielo.

Ruido causado por el hombre. Las fuentes principales de este ruido son los mecanismos que producen chispas, como por ejemplo los conmutadores de los motores eléctricos, los sistemas de encendido automotriz, el equipo generador y conmutador de energía eléctrica y las lámparas fluorescentes. El ruido producido por el hombre tiene naturaleza de pulsos, y contiene una amplia gama de frecuencias, que se propagan por el espacio del mismo modo que las ondas de radio. Este ruido es más intenso en las metrópolis más densamente pobladas, y en las áreas industriales, por lo que a veces se le llama ruido industrial.

Ruido interno. El ruido interno es la interferencia eléctrica generada dentro de un dispositivo o circuito. Hay tres clases principales de ruido generado internamente: de disparo, de tiempo de tránsito y térmico.

Ruido de disparo. Este ruido se debe a la llegada aleatoria de portadoras (agujeros y electrones) al elemento de salida de un dispositivo electrónico, como por ejemplo un diodo, un transistor de efecto de campo o un transistor bipolar. El ruido de disparo se observó por primera vez en la corriente anódica de un amplificador de tubo al vacío, y W. Schottky lo describió matemáticamente en 1918. Los portadores de corriente (tanto para ca como cd) no se mueven en un

flujo continuo y estable, porque la distancia que recorren varía debido a sus trayectorias aleatorias. El ruido de disparo varía en forma aleatoria, y se superpone a cualquier señal que haya. Cuando se amplifica, este ruido se oye como balines de metal que caen en un techo de lámina. A veces, al ruido de disparo se le llama ruido de transistor, y se suma al ruido térmico.

Ruido de tiempo de tránsito. Cualquier modificación a una corriente de portadores, cuando pasan de la entrada a la salida de un dispositivo (como por ejemplo, desde el emisor al colector de un transistor) produce una variación irregular y aleatoria, que se clasifica como ruido de tiempo de tránsito. Cuando el tiempo que tarda un portador en propagarse por un dispositivo es parte apreciable del tiempo de un ciclo de la señal, este ruido se hace perceptible. El ruido de tiempo de tránsito en los transistores se determina por la movilidad de los portadores, el voltaje de polarización y la clase de transistor. Los portadores que van del emisor al colector padecen demoras de tiempo en emisor, demoras de tiempo básico de tránsito y demoras de tiempo de recombinación y de propagación. Si las demoras de tránsito son excesivas en altas frecuencias, puede ser que el dispositivo agregue más ruido que amplificación de la señal.

Ruido térmico. Este ruido se asocia con el movimiento rápido y aleatorio de los electrones dentro de un conductor, producido por la agitación térmica. Este movimiento fue observado por primera vez por Robert Brown, botánico inglés. Observó primero pruebas de la naturaleza de la materia como partículas en movimiento, en los granos de polen. El movimiento aleatorio de los electrones fue reconocido por primera vez en 192, por J. B. Johnson de los Bell Telephone Laboratories. Los electrones en el interior de un conductor portan una carga negativa unitaria y la velocidad cuadrática media de uno de ellos es proporcional a su temperatura absoluta. En consecuencia, cada paso de un electrón entre choques con moléculas produce un corto pulso de corriente, que produce un voltaje pequeño a través del componente resistivo del conductor. Como este tipo de movimientos del electrón es totalmente aleatorio y es en todas direcciones, el voltaje promedio en la sustancia debido a esos movimientos es 0 Vcd. Sin embargo, ese movimiento aleatorio sí produce una componente de ca.

La componente de ca debida a la agitación térmica tiene varios nombres, que incluyen al de ruido térmico, porque depende de la temperatura; también movimiento browniano, por su descubridor, ruido de Johnson, en honor de quien relacionó el movimiento browniano de las partículas con el movimiento de los electrones y, ruido blanco, porque el movimiento aleatorio se produce en todas las frecuencias. Por consiguiente, el ruido térmico es el movimiento aleatorio de los electrones libres dentro de un conductor, causado por la agitación térmica.

Johnson demostró que la potencia del ruido térmico es proporcional al producto del ancho de banda por la temperatura. En forma matemática la potencia del ruido es:

$$N = KTB \quad (\text{Ec. 4.1})$$

- donde N = potencia del ruido (watts)
- B ancho de banda (hertz)
- K = constante de proporcionalidad de Boltzmann (1.38×10^{-23} joules por grado kelvin)
- T = temperatura absoluta, en grados kelvin (la temperatura ambiente = 17°C o 290°K) Para convertir de $^\circ\text{C}$ a grados kelvin sólo se suma 273° . Por consiguiente. $T = ^\circ\text{C} + 273$.

Así, la ecuación 4.2 se puede escribir, para cualquier ancho de banda a la temperatura ambiente, como sigue

$$\text{NdBm} = -174 \text{ dBm} + 10 \log B \quad (\text{Ec. 4.2})$$

El ruido aleatorio produce una densidad constante de potencia, en función de la frecuencia. y de acuerdo con la ecuación 4.1, la potencia disponible en una fuente de ruido térmico es proporcional al ancho de banda sobre cualquier intervalo de frecuencias. Esto se ha comprobado con frecuencias que van de 0 Hz hasta las máximas frecuencias de microondas que se usan en la actualidad. Así, si el ancho de banda es ilimitado, parece que la potencia disponible en una fuente de ruido térmico también es ilimitada. Eso, naturalmente, no es verdad, porque se puede demostrar que a frecuencias arbitrariamente altas la potencia de ruido térmico llega a bajar a cero. Como el ruido térmico se distribuye por igual en el espectro de frecuencias, a una fuente de ruido térmico se le llama a veces fuente de ruido

blanco, por ser análoga a la luz blanca que contiene todas las frecuencias de la luz visible. Por lo anterior, la potencia rms (efectiva) medida a cualquier frecuencia en una fuente de ruido blanco es igual a la medida en cualquier otra frecuencia de la misma fuente de ruido. De igual manera, la potencia total rms de ruido medida en cualquier ancho de banda fijo es igual a la potencia total rms de ruido, medida en un ancho de banda igual en cualquier lugar del espectro total de ruido. En otras palabras, la potencia rms de ruido blanco presente en la banda de 1000 Hz a 2000 Hz es igual a la presente en la banda de 1,001,000 a 1,002,000 Hz.

El ruido térmico es aleatorio y continuo, y se produce en todas las frecuencias. También, es predecible, aditivo, y está presente en todos los dispositivos. Por lo anterior, el ruido térmico es el más importante de todos los ruidos (Tomasi, 2003).

Diafonía.

La diafonía ha podido experimentar todo aquel que al usar un teléfono haya oído otra conversación; se trata, en realidad, de un acoplamiento no deseado entre las líneas que transportan las señales. Esto puede ocurrir por el acoplamiento eléctrico entre cables de pares cercanos o, en raras ocasiones, en líneas de cable coaxial que transporten varias señales. La diafonía también puede aparecer cuando las señales no deseadas se captan en las antenas de microondas; aunque estas se caracterizan por ser altamente direccionales, la energía de las microondas se dispersa durante la transmisión. Generalmente, la diafonía es del mismo orden de magnitud (o inferior) que el ruido térmico.

Los ruidos antes descritos son de magnitud constante y razonablemente predecibles. Así pues, es posible idear un sistema de transmisión que les haga frente.

Ruido de Intermodulación.

El ruido de intermodulación se produce cuando hay alguna no linealidad en el transmisor, en el receptor o en el sistema de transmisión. Idealmente, estos sistemas se comportan como sistemas lineales; es decir, la salida es igual a la entrada multiplicada por una constante. Sin embargo, en cualquier sistema real, la salida es una función más compleja de la entrada. El comportamiento no lineal puede aparecer debido al funcionamiento incorrecto de los sistemas o por

sobrecargas producidas al utilizar señales con mucha energía. Bajo estas circunstancias es cuando aparecen los términos suma o diferencia no deseados. (Stallings, 2004)

Ruido correlacionado

El ruido correlacionado es aquel que se relaciona mutuamente (se correlaciona) con la señal, y no puede estar en un circuito a menos que haya una señal de entrada. Dicho en términos sencillos: ¡no hay señal, no hay ruido! El ruido correlacionado se produce por amplificación no lineal, se incluye la distorsión armónica y de intermodulación, y que las dos son formas de distorsión no lineal. Todos los amplificadores son no lineales en cierto grado. Por consiguiente, toda amplificación de señal produce distorsión no lineal. Esta distorsión también se produce cuando pasan las señales a través de dispositivos no lineales, como son los diodos. El ruido correlacionado es una forma de ruido interno.

Interferencia

La interferencia es una forma de ruido externo y como el nombre indica, significa "perturbar o estorbar". Se produce interferencia eléctrica cuando las señales de información de una fuente producen frecuencias que caen fuera de su ancho de banda asignado, e interfieren con otras señales de otra fuente. La mayor parte de la interferencia se produce cuando las armónicas o las frecuencias de producto cruzado de una fuente llegan a la banda de paso de un canal vecino. Por ejemplo, los radios CB transmiten señales en el intervalo de 27 a 28 MHz. Sus frecuencias de segunda armónica (54 a 56 MHz) caen dentro de la banda asignada a la televisión VHF (en especial el canal 3). Si una persona transmite en un radio CB y produce una componente de segunda armónica con gran amplitud, podría interferir con la recepción de TV de otras personas (Tomasi, 2003).

Ruido Impulsivo.

El ruido impulsivo es no continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares de corta duración y de amplitud relativamente grande. Se generan por una gran diversidad de causas, por ejemplo, por perturbaciones electromagnéticas exteriores producidas por tormentas atmosféricas o por fallos y defectos en los sistemas de comunicación.

Generalmente, el ruido impulsivo no tiene mucha transcendencia para los datos analógicos. Por ejemplo, la transmisión de voz se puede perturbar mediante chasquidos o crujidos cortos, sin que ello implique pérdida significativa de inteligibilidad. Sin embargo, el ruido impulsivo es una de las fuentes principales de error en la comunicación digital de datos. Por ejemplo, un pico de energía con duración de 0,01 s no inutilizaría datos de voz, pero podría corromper aproximadamente 560 bits si se transmitieran a 56 kbps. La Figura 4.8 muestra un ejemplo del efecto del ruido sobre una señal digital. Aquí el ruido consiste en un nivel relativamente pequeño de ruido térmico más picos ocasionales de ruido impulsivo. Los datos digitales se recuperan muestreando la señal recibida una vez por cada intervalo de duración del bit. Como se puede observar, el ruido es a veces suficiente para convertir un 1 en un 0, o un 0 en un 1 (Stallings, 2004).

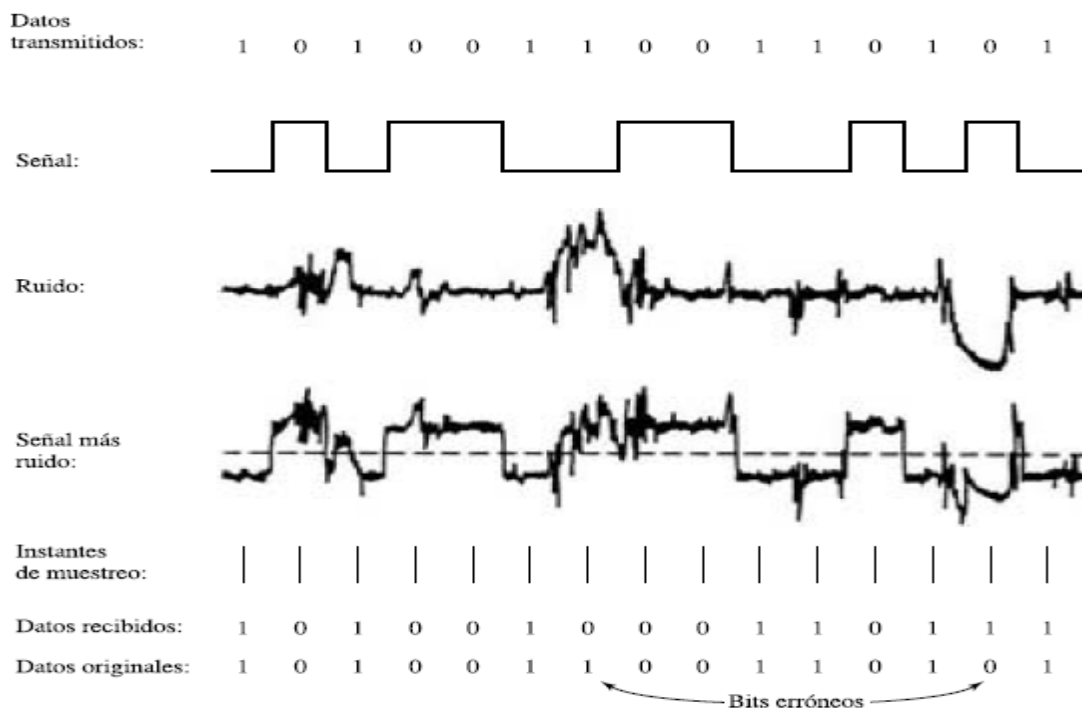


Figura 4.8 Efecto del ruido en una señal digital.

CAPÍTULO 5.

TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS.

5.1 Antecedentes de las tecnologías de transmisión de datos.

La transmisión de datos de manera general es transmitir datos de un punto A (transmisor) a través de un canal a un punto B (receptor). Históricamente la transmisión de datos se ha hecho por diferentes medios, por ejemplo: señales de humo, correo, el telégrafo y el teléfono.

En 1844 Samuel Morse desarrollo el telégrafo en donde los símbolos utilizados (puntos y rayas) son de naturaleza digital (Standage, 1998). En la figura 5.1 se muestra el telégrafo diseñado por Morse.

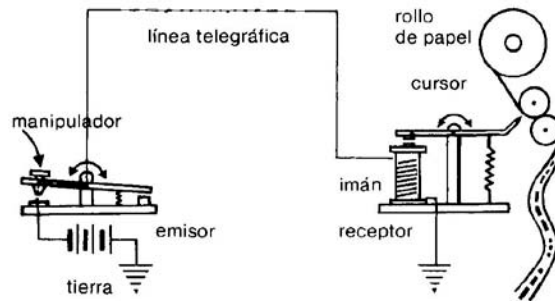


Figura 5.1 Telégrafo diseñado por Samuel Morse.

Marconi en 1897 desarrollo la idea de la transmisión de datos a través de la radio, que originalmente era un sistema telegráfico inalámbrico. En la década de los 20's incremento la popularidad de los radios, debido a que se empleaban como un medio transmisión de datos para información a la población (Aitken, 1976).



Figura 5.2 Radio diseñado por Marconi.

Después de la invención del telégrafo, Alejandro Graham Bell, inicio con la era de la transmisión analógica de señales de voz por medios telefónicos. El sistema telefónico suplantó al sistema telegráfico y dio pie al desarrollo de sistemas

analógicos de transmisión de información (Briceño, 2005). En la figura 5.3 se muestra el teléfono desarrollado por Alejandro Graham Bell.

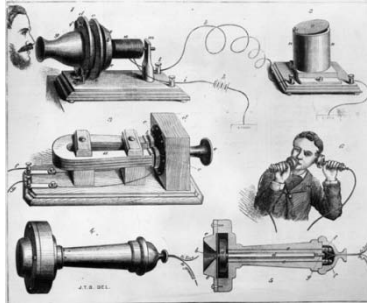


Figura 5.3 Teléfono desarrollado por Alejandro Graham Bell.

Deberían de pasar más de 30 años del desarrollo del teléfono para el desarrollo de la siguiente tecnología de transmisión de datos: la televisión. Aunque los primeros ensayos de transmisión de señal audiovisual a distancia se hicieron en los años 30's fue hasta la década de los 50's que la televisión llega a los principales países del mundo. En general la televisión es el resultado de la conjunción de tres descubrimientos: la fotoelectricidad que es la capacidad de ciertos cuerpos de transformar energía eléctrica en energía luminosa, los procedimientos de análisis de fotografías transformadas en líneas de puntos claros u oscuros y los procedimientos que permiten utilizar ondas hertzianas para la transmisión de las señales eléctricas correspondientes a cada punto de una imagen (Abramson, 1987).



Figura 5.4 Evolución de la televisión.

Otra tecnología de transmisión de datos, que cambio la forma de comunicarnos, es el internet. El internet público se desarrolló cuatro décadas después de la televisión. En 1991 la red mundial (worldwideweb) fue desarrollada por Tim

Berners-Lee como una forma de compartir información entre personas. El primer buscador fue desarrollado en 1993 por Marc Andreeseen, lo que permitió un flujo más rápido de imágenes y gráficos en línea lo que abrió más posibilidades a usuarios de internet (Anderson, 2005).

Debido al desarrollo de la tecnología de las computadoras y la necesidad de interconectar sistemas de procesamiento digital de la información, se aceleró el desarrollo de las tecnologías de transmisión de señales digitales (Briceño, 2005).

Los sistemas de comunicación digital se han convertido en el sistema de elección para las telecomunicaciones debido a la disponibilidad de componentes digitales y su bajo costo (Nassar, 2001).

5.2 Sistemas de transmisión de datos.

Como se mencionó anteriormente la transmisión de datos es el intercambio de datos entre dos dispositivos a través de alguna forma de medio de transmisión. Para que dicha transmisión sea posible los dispositivos de comunicación deben ser parte de un sistema de comunicación formado por hardware y software. La efectividad del sistema depende de tres factores:

- Entrega. El sistema debe entregar los datos en el destino correcto y deben ser recibidos por el dispositivo o usuario adecuado.
- Exactitud. El sistema debe entregar los datos correctos y sin errores.
- Puntualidad. Los datos entregados tarde son inútiles. En el caso particular del video, el audio y la voz, la entrega puntual significa entregar los datos a medida que se producen, esto se conoce como transmisión en tiempo real.

Un sistema de transmisión de datos está formado por cinco componentes:

- Mensaje. Son los datos a comunicar puede estar formado por texto, números, gráficos, sonido o vídeo.
- Emisor. Es el dispositivo que envía los datos del mensaje.
- Receptor. Es el dispositivo que recibe el mensaje.
- Medio. El medio de transmisión es el camino físico por el cual viaje el mensaje del emisor al receptor. Puede ser un cable de par trenzado, un cable coaxial, cable de fibra óptica, un láser u ondas de radio (terrestres o microondas de satélite)

- Protocolo. Es un conjunto de reglas que gobiernan la transmisión de datos. Representa un acuerdo entre los dispositivos que se comunican. Sin un protocolo, dos dispositivos puedan estar conectados pero no comunicarse (Forouzan, 2002).

5.2.1 Comunicación digital y analógica.

La comunicación digital es necesaria para transportar información codificada desde un punto a otro punto. Estos puntos pueden estar separados en el tiempo o en la distancia. La comunicación digital se divide entre categorías funcionales:

- Transmisión. Esta función proporciona la trayectoria sobre la cual fluye la información e incluye, si es necesario, operaciones de modulación y demodulación a efectos de compatibilidad dentro del sistema de portadora.
- Conversión. Esta función transforma las señales eléctricas utilizadas para transmitir información en formas que pueden ser usadas y reconocidas por los humanos o las máquinas.
- Procesamiento. Esta función garantiza el más eficiente, confiable y oportuno movimiento de la información. Esta función opera sobre la información o sobre caracteres de control que preceden, acompañan o siguen la información a fin de asignar la entrada, transmisión de esa información (Briceño, 2005).

La transmisión digital depende del contenido de la señal. La señal digital solo se puede transmitir a una distancia limitada, ya que la atenuación, el ruido y otros aspectos negativos pueden afectar a la integridad de datos transmitidos. Para conseguir distancias mayores se usan repetidores. Un repetidor recibe la señal digital, regenera el patrón de ceros y unos y los retransmite. De esta manera se evita la atenuación (Stallings, 2004).

La comunicación analógica varía de acuerdo al tiempo de forma continua. Algunos ejemplos de mensajes analógicos son la acústica presente cuando se habla, la intensidad de la luz en un algún de la imagen en la televisión. Como la información se encuentra en una forma de onda que varía de acuerdo al tiempo, un sistema de comunicación analógico debe entregar esta forma de onda con un grado específico de fidelidad (Carlson, B.Crilly, & Rutledge, 2002).

La transmisión analógica es una forma de transmitir señales analógicas con independencia de su contenido, estas señales pueden representar datos analógicos (voz) o datos digitales (datos binarios modulados en un módem). En cualquier caso la señal se irá atenuando con la distancia, para conseguir distancias más largas, el sistema de transmisión analógico incluye amplificadores que inyectan energía en la señal, sin embargo el uso de amplificadores genera ruido. En el caso de los datos analógicos, como la voz, se puede tolerar una pequeña distorsión, ya que en ese caso los datos siguen siendo inteligibles. Sin embargo, para los datos digitales los amplificadores en cascada introducirán errores (Stallings, 2004).

5.2.2 Radiocomunicación.

La radiocomunicación es la tecnología que permite la transmisión de señales mediante las ondas electromagnéticas, no requiere un medio físico para su propagación y se puede propagar a través del aire y del espacio vacío. Las ondas de radio se pueden clasificar de acuerdo a su uso:

- Bandas de radio
- Banda de televisión
- Redes móviles y bandas de microondas
- Enlaces de satélite, enlaces de repetidores de radio y redes de acceso inalámbrico de banda ancha

5.2.2.1. Tecnologías alámbricas e inalámbricas para transmisión de voz y datos

En la actualidad el incremento en la necesidad de comunicación personal de voz, video y datos ha impulsado el desarrollo de las telecomunicaciones alámbricas e inalámbricas, a continuación discutiremos algunas de las tecnologías existentes alámbricas e inalámbricas.

Sistemas telefónicos modernos

Los sistemas telefónicos modernos evolucionaron a partir del circuito analógico propuesto por Alejandro Graham Bell. En estos sistemas la oficina local de conmutación conecta a los dos usuarios mediante una conexión cableada entre

los dos lazos apropiados. El sistema analógico de lazo local proporciona un servicio telefónico simple (POTS, por sus siglas en inglés) (Couch, 2008).

Sistema DSL

La **DSL (línea digital de suscriptor)** es una tecnología moderna que usa líneas telefónicas existentes para transportar datos de gran ancho de banda, tales como multimedia y video, a suscriptores de servicios. La DSL proporciona acceso a la red pública de punto a punto dedicado. Esta conexión DSL generalmente se produce entre la oficina central de un proveedor de servicios de red **NSP (protocolo de sitio de red)** y el sitio del cliente, o en circuitos locales creados ya sea en edificios o campus.

El término xDSL designa a diversas formas de DSL que compiten entre sí (<http://www.cisco.com/web/LA/soluciones/la/dsl/index.html>, 09-05-16):

- HDSL línea de suscriptor digital de alta velocidad de bit
- SDSL línea de suscriptor digital simétrica
- ADSL línea de suscriptor digital asimétrica
- VDSL línea de suscriptor digital de muy alta velocidad de bit
- ISDN red digital de servicios integrados (Couch, 2008).

Sistemas de fibra óptica

Las fibras ópticas además de ser empleadas como medio de transmisión de información en telecomunicaciones se pueden emplear en otras aplicaciones como: transmisión de luz, en sensores e incluso se han desarrollado fibras que transmiten rayos láser de alta potencia para cortar y taladrar materiales (Briceño, 2005). En telecomunicaciones el cable de fibra óptica es el medio preferido de transmisión subterránea (Couch, 2008).

Sistemas de telefonía celular

Las redes móviles ofrecen transmisión de datos mediante conexiones inalámbricas, estas redes tienen una componente radio y también infraestructura fija para poder ofrecer todo tipo de servicios. La infraestructura final contiene:

- Estación base (BS)
- Terminales (MS) (Becvar, Mach, & Pravda, 2016)

Los conceptos clave de la radio celular se generaron en 1947 por **Bell Telephone Laboratories (Laboratorios Telefónicos Bell)**. Se determinó que, al subdividir un área geográfica relativamente grande del mercado, llamada zona de cobertura, en secciones más pequeñas, llamadas células o celdas, se podrían emplear el concepto de reutilización de frecuencia para aumentar en forma dramática la capacidad de un canal telefónico móvil. En esencia, los sistemas telefónicos celulares permiten que una gran cantidad de usuarios compartan una cantidad limitada de canales de uso común disponibles en una región (Tomasi, 2003).

Sistemas a través de microondas

Las microondas son ondas electromagnéticas cuya frecuencia va de aproximadamente 500 MHz a 300 GHz. Por lo tanto, las señales de microondas, a causa de sus altas frecuencias inherentes, tienen longitudes de onda relativamente cortas de ahí su nombre microondas. Para la operación dúplex (dos sentidos) que se requiere en general en los sistemas de comunicación por microondas, cada banda de frecuencias se divide a la mitad, y la mitad inferior es la banda baja mientras que la superior es la banda alta. En cualquier estación de radio dada, los transmisores funcionan normalmente en la banda baja o en la alta, mientras que los receptores funcionan en la otra.

La gran mayoría de los sistemas de comunicaciones establecidos desde mediados de la década de 1980 es de naturaleza digital y por consiguiente transporta información en forma digital, funcionando a distancias que varían de 8 a 6 500 km. Las capacidades de los sistemas de radio de microondas van desde menos de 12 canales de banda de voz hasta más de 22,000. Actualmente los sistemas cuentan con circuitos de banda de voz modulados por codificación de pulsos y multiplexados por división de tiempo; usan técnicas de modulación digital más modernas, como la modulación por conmutación de fase (PSK) o por amplitud en cuadratura (QAM) (Tomasi, 2003).

Microondas analógicas y digitales

La mayoría de los sistemas actuales de radio de microondas son de modulación de frecuencia (analógicas), sin embargo recientemente se han desarrollado

sistemas que usan modulación por conmutación de fase, o por amplitud en cuadratura, que son formas de modulación digital. Algunos ejemplos de sistemas de radio de microondas análogos sistema **FDM (multiplexación por división de frecuencias)** y FM, mientras que los sistemas digitales usan PCM y PSK. La diferencia principal entre los sistemas satelitales y terrestres de radio es que los primeros propagan señales fuera de la atmósfera terrestre, por lo que son capaces de llevar señales mucho más lejos, usando menos transmisores y receptores (Tomasi, 2003).

Redes inalámbricas de datos

Wi-Fi (protocolo estándar inalámbrico).

La red de tipo Wi-Fi o IEEE 802.11 es una **WLAN (red de área local inalámbrica)**. En la actualidad existe cobertura de Wi-Fi, conocida como puntos de conexión, en la mayoría de los campos universitarios y bibliotecas públicas, así como en muchos hoteles, cibercafés y cafeterías. Wi-Fi proporciona una conexión de alta velocidad a Internet (alrededor de 1.5 Mb/s²). Las redes Wi-Fi también son populares en los hogares donde dos o más computadoras se conectan a la red y a Internet.

Wi-Max(interoperabilidad mundial para acceso por microondas)

El concepto de Wi-Max es completamente diferente del de Wi-Fi, pues es más como un sistema de telefonía celular, a excepción de que se diseñó estrictamente para la transmisión de datos y se conecta a Internet. Wi-Max es una **WMAN (red de área metropolitana inalámbrica)**.

Las antenas de las estaciones base de Wi-Max se colocan en ubicaciones elevadas, como en el techo de edificios o torres, y pueden compartir espacio en las torres de telefonía celular.

Televisión

La televisión (TV) es un método para reproducir imágenes visuales fijas o en movimiento mediante señales electrónicas. Existen numerosos tipos de sistemas de TV (análogos y digitales) y se han adoptado diferentes estándares alrededor del mundo.

A continuación se mencionan algunos sistemas de televisión:

- Televisión en blanco y negro (analógica).
- Televisión a color.
- **HDTV (televisión de alta definición)** (Couch, 2008).

De manera general se puede concluir que las señales analógicas y las digitales se pueden transmitir si se emplea el medio de transmisión adecuado. El medio de transmisión determina como se tratan las señales, en la siguiente tabla se resumen los métodos de transmisión de datos (Stallings, 2004).

Datos y señales		
Datos	Señal analógica	Señal analógica
Analógicos	Hay dos alternativas (1) la señal ocupa el mismo espectro que los datos analógicos; (2) los datos analógicos se codifican ocupando una porción distinta del espectro.	Hay dos alternativas (1) la señal ocupa el mismo espectro que los datos analógicos; (2) los datos analógicos se codifican ocupando una porción distinta del espectro.
Digitales	Los datos digitales se codifican usando un módem para generar señal analógica.	Hay dos alternativas (1) la señal consiste en dos niveles de tensión que representan dos valores binarios (2) los datos digitales se codifican para producir una señal digital con las propiedades deseadas.
Tratamiento de señales		
Señal	Transmisión analógica	Transmisión analógica
Analógica	Se propaga a través de amplificadores; se trata de igual manera si la señal se usa para representar datos analógicos o digitales.	Se supone que la señal analógica representa datos digitales. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, los datos digitales se obtienen de la señal de entrada y se usan para regenerar una nueva señal analógica de salida.
Digital	No se usa	La señal digital representa una cadena de unos o ceros, los cuales pueden representar datos digitales o pueden ser resultado de la codificación de datos analógicos. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, se recupera la cadena de unos y ceros a partir de la señal de entrada, a partir de los cuales se genera la nueva cadena de salida.

Tabla 5.1 Métodos de transmisión de datos.

5.3 Sistemas de telecomunicación de cuarta generación.

Cuarta generación (4G).

Las comunicaciones móviles de cuarta generación, están caracterizadas por contar con dos tecnologías alternativas o complementarias, según la situación particular de cada operador móvil. Ambas comparten muchas similitudes e incluso podrían llegar a converger.

Las dos tecnologías que más adeptos tienen son: **LTE Advanced (evolución avanzada a largo plazo)** y **WirelessMAN-Advanced (red de área metropolitana inalámbrica avanzada)**. El eje de trabajo que se reporta a continuación lo constituyen el análisis del desarrollo que estas dos tecnologías tienen actualmente y su contribución a la implementación de soluciones 4G (Vásquez, 2012).

WirelessMAN-Advanced (802.16m).

El desarrollo de la plataforma Wi-MAX™ ha sido testigo de importantes contribuciones de los dos sectores que una vez trabajaron por separado: telefonía celular y banda ancha inalámbrica fija. Esto ha dado a Wi-MAX un enfoque dual que ha sido una fuerza, en términos de una plataforma que puede abarcar varios modelos de negocio.

Es una tecnología dentro de las conocidas como tecnologías de última milla, también conocidas como bucle local que permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio. El protocolo que caracteriza esta tecnología es el IEEE 802.16. Una de sus ventajas es dar servicios de bandaancha en zonas donde el despliegue de cable o fibra por la baja densidad de la población presenta unos costos por usuario muy elevados en zonas rurales. Wi-MAX puede proporcionar acceso de banda ancha inalámbrica (BWA) a 30 millas (50 km) para estaciones fijas, y 3 a 10 millas (5 - 15 km) para las estaciones móviles. En cambio, la norma Wi-Fi/802.11 inalámbrica de área de red local se limita en la mayoría de los casos a sólo 100 a 300 pies (30 – 100m).

Con Wi-MAX, los tipos de datos Wi-Fi son fácilmente compatibles, pero la cuestión de la interferencia es reducida. Wi-MAX opera en ambas formas: con y sin licencia de frecuencias, proporcionando un entorno regulado y un modelo económico viable para los operadores móviles. Wi-MAX es un protocolo de segunda

generación que permite un uso más eficiente de ancho de banda, para evitar interferencias, y está destinado a permitir mayores velocidades de datos a mayores distancias.

Hay consultoras y operadoras móviles que han venido cuestionando la supervivencia de Wi-MAX debido al avance en el desarrollo de LTE. Motorola anunció su solución evolutiva única para los accesos de radio (RAN) para los operadores Wi-MAX móvil (802.16e) para que puedan migrar a Wi-MAXAdvanced (802.16m) o a TD-LTE. Además, la solución permitiría que los operadores Wi-MAX móvil lanzarán en coexistencia una red LTE en una configuración FDD. Con esta solución los operadores pueden migrar a la siguiente iteración de la tecnología o incluso cambiar a LTE aprovechando la mayoría de los componentes instalados para Wi-MAX móvil.

Wireless MAN-Advanced (Marks 2010), forma parte del conjunto de estándares IEEE 802.16 (**Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, interfaz de aire para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha**) de ámbito metropolitano. Para cumplir con las especificaciones de la **UIT (unión internacional de telecomunicaciones)** sobre **IMT-Advanced (telecomunicaciones móviles internacionales avanzadas)**, el grupo de estudio desarrolló el estándar IEEE 802.16m, cuyo primer borrador se publicó en julio de 2009. Las características principales respecto a las versiones anteriores de IEEE 802.16 son:

- Estructura de trama basada en subtramas para retransmisión rápida (esquema HARQ) que reduce la latencia general en los planos de usuario y de control y mejora la experiencia VoIP. Esquemas mejorados de subcanalización para reducir encabezados y aumentar la eficiencia de transmisión.
- Transmisión multiportadora en portadoras contiguas y no contiguas con una única instancia MAC.

Esta característica permite utilizar anchos de banda de hasta 100 Mhz.

- Esquemas MIMO (Ericsson 2008) mejorados tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. En el enlace descendente

soporta MIMO de estación base única, MIMO con múltiple estaciones base y esquemas monousuario y multiusuario. En el enlace ascendente soporta MIMO monousuario con multiplexación espacial colaborativa (CSM, CollaborativeSpatialMultiplexing).

- Servicios de difusión y Multicast mejorados utilizando combinaciones de portadoras Mixtas (tráfico y difusión/multicast) y portadoras dedicadas para difusión/multicast (Vásquez, 2012).

LTE Advanced.

LTE, es considerado por muchos como el sucesor obvio para la actual generación de la tecnología 3G **UMTS (sistema universal de telecomunicaciones móviles)**, que está basado en **WCDMA(acceso múltiple por división de código de banda ancha)**, **HSDPA (paquetes de descarga de alta velocidad)**, **HSUPA (paquetes de carga/subida de alta velocidad)** y **HSPA (paquetes de acceso de alta velocidad)**. LTE no es un sustituto de UMTS en la manera en que UMTS fue un reemplazo para el **GSM (sistema global para comunicaciones móviles)**, sino más bien una actualización de la tecnología UMTS que le permitirá ofrecer velocidades de datos mucho más rápido tanto para la carga y descarga.

Para los consumidores, LTE permitirá a las aplicaciones existentes poder correr más rápido, además de poner a disposición de las nuevas aplicaciones de telefonía móvil, aplicaciones de vídeo mejorado y la presentación del teléfono móvil puede ser incluida.

LTE utiliza ondas de radio para tener más datos que se transfieren a través del mismo ancho de banda utilizado por equipos de 3G. Como resultado, los proveedores de servicios deberían ser capaces de llegar a la transferencia de datos fuera de sus celdas existentes y, posiblemente, reducir el costo para operar sus redes. Desde LTE se conecta a las redes existentes, los proveedores pueden planificar una transición sin problemas, y luego continuar el legado de utilizar las redes CDMA y GSM como copias de seguridad.

El eje central de la investigación es ofrecer una visión general de los diferentes estándares y las iniciativas de la industria para ofrecer telefonía móvil de cuarta

generación a través del acceso LTE Advanced. La razón de esto es evitar la fragmentación en el mercado de terminales móviles.

La novedad de LTE es la interfaz radioeléctrica basada en **OFDMA (acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal)** para el enlace descendente (DL) y **SCFDMA (acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única)** para el enlace ascendente (UL). La modulación elegida por el estándar **3GPP (asociación del proyecto para tercera generación)** hace que las diferentes tecnologías de antenas **MIMO (múltiple entrada – múltiple salida)** tengan una mayor facilidad de implementación, esto favorece según el medio de hasta cuadruplicar la eficacia de transmisión de datos.

Para conseguir una mayor eficiencia, el sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos, proporcionando una mayor eficiencia espectral que OFDM

Al igual que Wi-MAX, esta tecnología ofrecerá servicios de banda ancha inalámbrica como **EV-DO (evolución optimizada de datos)**, pero en vez de transmitir señales a través de microondas, LTE utiliza una plataforma de radio. Se necesitará un módem LTE para acceder a la red, que puede ser en formato **USB(dispositivo de almacenamiento de datos)**, **ExpressCard (dispositivo de tarjeta para almacenamiento de datos)**, **PCMCIA (tarjeta de memoria para PC)**, o incrustado en una computadora portátil, y probablemente también se presentará como la conexión a Internet en los **PDA (asistente digital personal)** y los teléfonos.

Esta red logrará velocidades de descarga pico de 100Mbps. LTE va a proporcionar una alternativa a DSL, cable, satélite e internet de acceso telefónico, que beneficiará a las personas que viven en zonas que actualmente no están atendidos por una red de alta velocidad.

Las redes HSPA+ requieren de 50 a 100 Mbps por estación base y las redes LTE requieren 100 a 200 Mbps por estación base – una magnitud de orden muy

superior a la necesitada para las redes 2G o 3G. Además, este tráfico está predominantemente basado en IP. Los sistemas de radio tradicional TDM no pueden manejar este tráfico backhaul y el alquiler de circuitos E1 no es efectivo en su relación costo-beneficio. Los operadores están evaluando ahora tecnologías para el backhaul que puedan reunir los requerimientos de sus nuevas ofertas de servicio. Las dos tecnologías que están primordialmente en consideración son las microondas y la fibra. Además, las opciones de onda de 60-80 GHz están en evaluación para algunas aplicaciones limitadas.

Las características principales de LTE-Advanced son las siguientes:

- Está basado en LTE y permite una evolución gradual para los operadores móviles. Es espectralmente compatible con LTE.
- Conserva el sistema de acceso SC-FDMA para el enlace ascendente y mejora la tasa de transmisión mediante MIMO.
- Permite operación multiportadora con portadoras en diferentes bandas (contiguas y no contiguas) y agregación de tráfico para manejar anchos de banda de hasta 100 MHz.
- Permite operación MIMO mejorada. En el enlace descendente permite MIMO de alto orden (hasta 8x8) y MIMO multiusuario para manejar la interferencia de antenas correlacionadas. En el enlace ascendente soporta MIMO monousuario de hasta 4x4.
- Permite comunicaciones multi-salto, en capa física para aumento de la cobertura y en capa de red para backhauling y mejoramiento del desempeño en el borde las celdas (Vásquez, 2012).

UIT y 4G.

La UIT ha recibido seis propuestas de tecnologías candidatas para las comunicaciones móviles de cuarta generación. Las seis propuestas alineadas alrededor de la LTE 3GPP Versión 10 y posteriores (LTE-Advanced) y la tecnología IEEE 802.16m, fueron evaluadas con los requisitos de la UIT-R mediante un proceso de evaluación definido.

A raíz del anuncio de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) de definir oficialmente las dos tecnologías mundiales de banda ancha inalámbrica

móvil 4G (IMT Advanced), en octubre pasado, el Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R) completó la evaluación de seis tecnologías para banda ancha móvil 4G. La armonización de estas propuestas dio lugar a dos tecnologías, LTE-Advanced y WirelessMAN-Advanced, designadas oficialmente con la denominación “IMT-Advanced” y calificadas como verdaderas tecnologías 4G (Vásquez, 2012).

El dividendo digital y su relación con 4G.

El momento en el que cese la difusión analógica y sea sustituida por la digital se ha dado en llamar apagón analógico. Cuando eso ocurra, las bandas que actualmente están siendo ocupadas por la televisión analógica convencional quedarán libres en gran parte, puesto que la televisión digital es del orden de seis veces más eficaz en cuanto al uso del espectro, pudiendo entonces ser asignadas a otros servicios.

Esta “liberación de ocupantes” de las frecuencias de difusión actuales en la banda UHF y la consiguiente liberación de la banda de VHF, se conoce como “dividendo digital”.

En Europa se han comenzado a implantar redes LTE Advanced que hacen uso del dividendo digital para operar. Por ejemplo Deutsche Telekom lanzará a finales de año un servicio 4G en Alemania utilizando espectro del ‘dividendo digital’ y tecnología de Nokia Siemens Networks.

Aunque las proyecciones nos permiten percibir claramente que LTE Advanced contara con mayores asociados a nivel mundial y que será la base sobre la que operaran las comunicaciones móviles de cuarta generación; WirelessMAN-Advanced no dejara de jugar un papel importante en el engranaje de las conexiones entre redes WI-FI, 2G/3G, LTE y WIMAX.

Al igual que el paso de 2G a 3G, la introducción de la tecnología LTE no conlleva una migración, sino que las tecnologías coexisten y se superponen. La clave no es pensar en una persona navegando a 100Mbps, sino pensar en el impacto de cien personas navegando a 1Mbps.

Para implementar LTE Advanced hay necesidad de contar con un espectro muy amplio para poder aprovechar al máximo todas sus prestaciones. LTE Advanced

presenta como ventaja que se puede utilizar desde menos de 2 MHz hasta 20 MHz, y ciertamente cuanto menos espectro se utilice menos velocidades se obtienen. Lo que realmente importa es mencionar que LTE Advanced es muy flexible en el uso del espectro.

Cuando hablamos de WCDMA, la especificación dice que se deben utilizar 5 MHz por portadora; ya se está hablando en las asociaciones que estandarizan la tecnología la posibilidad de utilizar dos portadoras con la utilización de 10 MHz con lo que en HSPA+ se podrían alcanzar velocidades de 100Mbps.

La tecnología LTE Advanced ya es una realidad. Su interoperabilidad y funcionamiento ha quedado demostrado en las pruebas que llevan realizando operadores de todo el mundo y con los lanzamientos en el Norte de Europa, donde TeliaSonera ya ofrece servicio de forma comercial con la tecnología. Aún así, la tecnología debe acoplarse a las redes existentes 2G y 3G, y encontrar espectro donde poder ser acomodada. La tecnología puede servir a los operadores para poder competir incluso con los operadores fijos de banda ancha incrementando su capacidad y reduciendo el costo por kilobyte.

LTE Advanced goza de diferentes ventajas que hacen que sea el sistema a utilizar en el futuro con total seguridad y fiabilidad. Entre estas ventajas destaca el poder ofrecer servicios más rápidos y económicos, aumentando la velocidad y eficiencia espectral. Con esto disminuirá la latencia y reducirá el costo por bit.

La respuesta la podemos predecir a partir de la experiencia que estamos observando en la actualidad. En Estados Unidos se llevó a cabo la licitación de la banda de los 700Mhz y en Suecia se está licitando la de los 2.6Ghz. En algunos casos veremos la reutilización del espectro y en otros será un nuevo espectro; todo esto unido, al uso del dividendo digital que cada país le dé a sus bandas (Vásquez, 2012).

CAPÍTULO 6.

TECNOLOGÍA LTE.

6.1 Historia de Tecnología LTE.

Actualmente la metodología utilizada para recibir y enviar datos (protocolos de conexión) en lo equipos está evolucionando para cubrir las necesidades en cuanto a ancho de banda y velocidad de transmisión. En la siguiente sección se presenta dicha evolución.

- 1G (Primera Generación)

Puesta en funcionamiento a principios de los años 80, empleaba estándares como el **NMT (telefonía móvil Nórdica)**, **AMPS (sistema telefónico móvil avanzado)**, **TACS (sistemas de comunicación de acceso total)**, entre otros.

- 2G (Segunda Generación)

El Sistema Global de Comunicaciones Móviles (2G o GSM), fue el protocolo encargado de estandarizar y proporcionar un marco de compatibilidad a las conexiones móviles. Comenzó a desarrollarse en 1982 en Europa, sin embargo las primeras implementaciones del protocolo fue hasta los 90s. El principal problema fue su compatibilidad entre dispositivos y operadoras. Entre las mejores características de GSM se encuentra la velocidad de transferencia, mucho más alta que 1G, alcanzando hasta los 97 Kb/s teóricos. También con GSM se hizo realidad el sistema de **SMS (servicio de mensajes cortos)**, la posibilidad de enviar y recibir correo electrónico y navegar por Internet, entre otros.

- 2.5G

El llamado Servicio General de Paquetes Vía Radio, más conocido por GPRS, es básicamente una extensión del sistema GSM desarrollado para la transmisión de datos mediante conmutación de paquetes.

Este sistema, considerado por algunos como 2.5G, ofreció la posibilidad de obtener una significativa mejora en las tasas de transferencia de datos en redes GSM, ya que mediante esta extensión se podían alcanzar hasta 32 Kb/s reales, lo que permitió que se pudieran transmitir datos y voz en forma simultánea, además de acceso a datos que no estuvieran en la red GSM.

Mediante la implementación de la tecnología GPRS, los usuarios de las redes GSM pudieron tener acceso a servicios como los mensajes multimedia (MMS), la mensajería instantánea y la posibilidad de usar el teléfono como modem para la PC mediante la conexión USB.

- **EDGE (tasas de datos mejoradas para la evolución de GSM).**

Es la evolución de GSM, es una tecnología que puede ser vista como una especie de puente entre 2G y 3G. Con una velocidad de transmisión teórica que puede llegar hasta los 480 Kb/s.

- 3G (Tercera Generación)

Actualmente, la tecnología 3G es la de mayor penetración en el mercado, debido a su velocidad de subida y descarga. Implementada en el año 2001 por el consorcio UMTS, este estándar permitió que sus usuarios pudieran contar con una forma más eficiente de navegar por Internet y hacer uso de servicios como las redes sociales, la mensajería instantánea entre otras.

Sin embargo, la implementación de 3G fue lenta, debido principalmente a que las operadoras telefónicas no realizaban las inversiones necesarias para adaptar su infraestructura a este nuevo protocolo, por lo cual todavía muchos países no cuentan con una cobertura total 3G de su territorio, disminuyendo así la expansión del sistema, pero además provocando en el usuario una serie de problemáticas como un mayor gasto de batería de su dispositivo al estar continuamente en la búsqueda de señal.

- HSDPA

Como sucediera en el caso de GSM y GPRS, HSDPA puede considerarse como una especie de tecnología puente entre 3G y 4G, y fue desarrollada para mejorar el rendimiento del protocolo 3G. Esta tecnología fue lanzada en 2008 y permite velocidades teóricas de hasta 84 Mb/s.

HSDPA, también conocida como 3.5G, 3G+ o mini 3G, es capaz de mejorar drásticamente la tasa de transferencia máxima del sistema, que puede llegar a alcanzar, en su variante HSPA+, hasta los 84 Mb/s de descarga y 22 Mb/s de subida.

- 4G (Cuarta generación).

Conocida también como LTE, 4G es el estándar de comunicaciones móviles más moderno que existe, tanto que todavía no ha sido implementado en muchos países. La característica más importante de este nuevo protocolo es la alta tasa de transmisión que puede llegar a alcanzar, en teoría unos 300 Mb/s.

Este estándar de comunicaciones móviles fue desarrollado por la 3GPP, la asociación que desarrolló y mantiene GSM y UMTS. El interfaz radio (nivel físico) del sistema LTE es algo completamente nuevo, así que LTE es una nueva generación respecto a UMTS (tercera generación o 3G) y a su vez GSM (segunda generación o 2G).

4G fue diseñada con el propósito de satisfacer la demanda de los usuarios que requerían un mayor ancho de banda y capacidad para poder utilizar con comodidad servicios como la televisión móvil, web 2.0, videoconferencias y demás.

Si bien el primer servicio público de LTE se desplegó en las capitales escandinavas de Estocolmo y Oslo el 14 de diciembre de 2009, no ha sido implementada totalmente, por lo que muchos usuarios de telefonía móvil del mundo todavía no pueden beneficiarse (<http://www.informatica-hoy.com.ar/>, 02-06-2016).

Esta tecnología es capaz de mejorar significativamente la experiencia del usuario con total movilidad, que utilice el protocolo de Internet (IP) para realizar cualquier tipo de tráfico de datos de extremo a extremo con una buena calidad de servicio (QoS) y, de igual forma el tráfico de voz, apoyado en Voz sobre IP (VoIP) que permite una mejor integración con otros servicios multimedia. Así, con LTE se espera soportar diferentes tipos de servicios incluyendo la navegación web, FTP (protocolo de transferencia de archivos), videostreaming, voz sobre IP, juegos en línea, video en tiempo real, pulsa y habla (push-to-talk) y pulsar para ver (push-to-view, PTV)(<https://es.scribd.com/doc/211546810/LTE>, 02-05-2016).

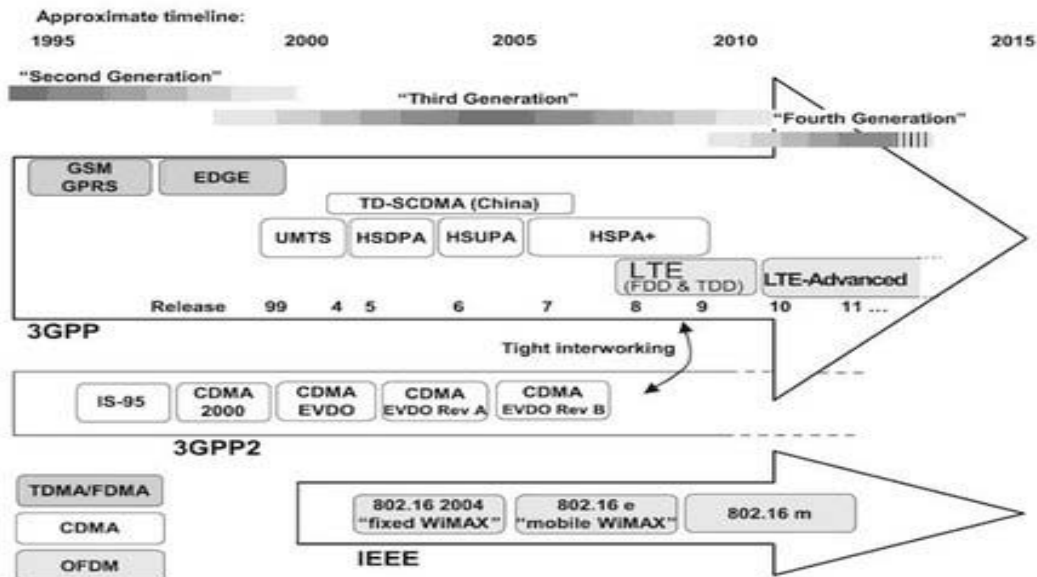


Figura 6.1 Línea del tiempo sobre la evolución de las comunicaciones móviles.

A continuación se enlistan una serie de acontecimientos importantes sobre el lanzamiento de la tecnología 4G:

- En 2002, el UIT establece la visión estratégica de 4G.
- En 2005, se escoge la tecnología de transmisión OFDMA.
- En Febrero de 2007, la firma japonesa NTT DoCoMo probó un sistema prototipo de 4G con 4x4 MIMO llamado **VSF-OFCDM (códigos ortogonales con factor de extendido variable)** a 100 Mbit/s en movimiento, y 1 Gbit/s detenido.
- En Marzo de 2009, la empresa LRTC anuncia a la primera red 4G operativo en los países Bálticos.
- En Diciembre de 2009, se anuncia la primera implementación comercial de LTE, en Estocolmo y Oslo, a través de TeliaSonera. El modem ofrecido fue manufacturado por Samsung.
- En Febrero de 2010, la empresa EMT inaugura la red LTE 4G en régimen de prueba, en Estonia.
- En Junio de 2010, Sprint Nextel lanza el primer celular inteligente WiMax de Estados Unidos, conocido como el HTC Evo 4G.

- En Julio de 2010, MTS implementa LTE en Tashkent.¹⁵
- En Agosto de 2010 en Letonia la empresa LMT inaugura la red LTE 4G a modo de prueba en 50% de su territorio.
- En Diciembre de 2010, en el Seminario Mundial de Radiocomunicaciones, UIT establece que LTE y WiMax, así como otras tecnologías evolucionadas del 3G pueden ser consideradas 4G.
- En Diciembre de 2010, VivaCell-MTS lanza en Armenia un test comercial 4G/LTE.
- En Julio de 2011, Movistar Ecuador lanza el servicio 4G para la ciudad de Guayaquil.¹⁷ Luego en Agosto de 2011 lanza el servicio en Quito y 5 ciudades más del país.
- En Noviembre de 2011 la empresa ANTEL de Uruguay anuncia que la tecnología 4G/LTE estará por primera vez en América Latina en Uruguay, más precisamente en Punta del Este a partir de la primera quincena de Diciembre de 2011, siendo así el primer país del continente con tecnologías de cuarta generación (ya se ofrecían servicios HSPA+ desde hacía un tiempo).
- En Noviembre de 2011, Claro Argentina anuncia el despliegue de la red HSPA+ en todo el territorio nacional, con una velocidad máxima de 5 Mbps
- En Noviembre de 2011 (Movistar Venezuela) anuncia pruebas 4G/LTE en el Edo. Aragua con una duración de 3 meses, cumpliendo con el periodo aprobado por el regulador estatal(conatel).
- En el año 2011 la empresa UNE EPM Telecomunicaciones anuncia el lanzamiento de la tecnología 4G/LTE en Colombia para el primer trimestre del año 2012 en la banda de 2.500 MHz, siendo así la segunda compañía en Latinoamérica en contar con dicha tecnología después de Uruguay.²⁰
- Guatemala. En diciembre del 2011 las compañías Claro Guatemala subsidiaria de América Móvil y movistar Guatemala subsidiaria de Telefónica, anuncian el lanzamiento de sus redes 4G disponible en inicialmente en la Ciudad de Guatemala con una velocidad máxima real de 5 mbps y en el departamento de Guatemala con una velocidad máxima de

8 mbps respectivamente, aptas para navegación por módem inalámbrico y telefonía móvil. En los primeros días de enero de 2012 TIGO Guatemala subsidiaria de Millicom anuncia el lanzamiento de la tecnología con una velocidad máxima de 8 mbps, con cobertura sobre el departamento de Guatemala. En el primer semestre del 2012 pretenden extender el servicio a todo el país.

- En Diciembre de 2011, se abre una licitación pública para ofrecer servicios 4G en Chile. Participan 3 operadores celulares y 24 OMV (operadores móviles virtuales). El operador Claro interpone acciones legales para defender supuestos derechos preferentes en la licitación, y el proceso retrasa la implementación efectiva de 4G en Chile hasta finales de 2012.
- El 24 de Enero de 2012, Tigo Honduras lanza la tecnología 4G en las principales ciudades del país (Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba), prometiendo velocidades de hasta 5Mbps de bajada y hasta 1Mbps de subida.
- En Abril de 2012, Digitel anuncia que empieza el desarrollo del despliegue de 4G/LTE en Venezuela, realizando pruebas en LTE con ayuda de ZTE y Huawei, en la banda de 1800 MHz.
- Para Julio de 2012 (Movistar Venezuela) realiza las segunda pruebas 4G/LTE en la capital de la República Venezolana utilizando las frecuencias AWS (1700.2100 MHz) y la Banda de 700 Mhz. donde LTE hasta ahora, sólo se encuentra disponible en 4 países de Latinoamérica –Colombia, Puerto Rico, Brasil y Uruguay
- En julio 2012 Orange Dominicana lanza el primer Internet 4G LTE de República Dominicana, con una inversión de más de US\$150 MM
- El julio 2012, La Subsecretaría de Transportes y Telecomunicaciones de Chile Subtel, declara ganadores de licitación pública para entregar servicio 4G en Chile a las empresas Claro, Movistar y Entel. Dichas compañías tendrán un año de plazo para dejar funcionamiento el servicio a nivel nacional.

- En México la red 4G LTE empezó a funcionar con Movistar en octubre de 2012 (<http://tecnologia4glte.wimax.blogspot.mx/>, 03-05-2016).

6.2 Comparativo sistema LTE vs segunda y tercera generación.

Las tecnologías de radio analógica son considerados sistemas de primera generación (1G). Para saber el punto de transición de los sistemas de primera a segunda generación se toma como base la conversión de una red de radio analógica a radios digitales, sin embargo para la 3G esta transición no es tan simple porque se desarrollaron varios estándares en particular para servicios de datos.

El principal cambio entre tecnología 2G y 3G fue la definición de los estándares de telefonía móvil basados en redes de normas nacionales y regionales para llevarlas a una base global. Debido a lo anterior en la Conferencia de 1992 de la UIT Mundial de la Radio se definió la banda de los 230 MHz del espectro radioeléctrico como el estándar futuro de comunicaciones Móviles Terrestres Públicas.

A continuación se describe a que, dio paso a la siguiente generación:

Con el fin de separar 3G y 2G, la UIT decidió subir los niveles de rendimiento definidos significativamente por encima de los obtenibles por las redes móviles 2G, en particular, las velocidades de datos mínimos, para diversos entornos de funcionamiento radioeléctrico específicos, se definieron normas IMT-2000, se basaron en las presentaciones de la industria que cumplieron con estas nuevas capacidades de requisitos de rendimiento más alto de la UIT.

La facilidad de evolución y coexistencia de 3G en la banda de frecuencia existente de un operador, permitió a los usuarios tanto 2G y 3G usar la misma banda de frecuencia.

Se creó para el estándar 3G la tecnología IMT-SC (EDGE) de la familia IMT-2000 siendo la base de GSM (2G), sin embargo la industria trabajó con la tecnología inalámbrica CDMA (3G) que fue la que prevaleció largo tiempo (https://www.itu.int/ITU-D/tech/FORMER_PAGE_IMT2000/Documents/IMT2000/What_really_3G.pdf, 08-05-2016).

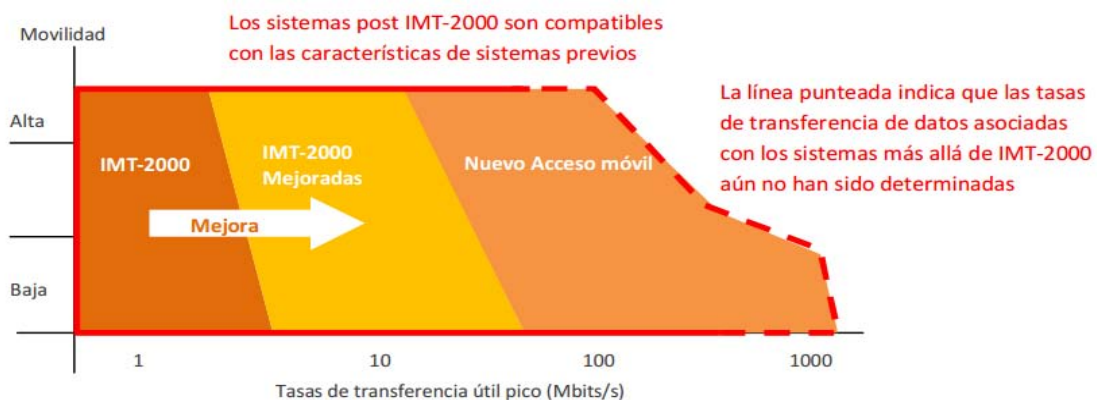
En el caso de la transición 3G a 4G, hay una cierta complicación causada por el aumento en el uso del término 4G, debido a que un número de las llamadas

tecnologías 4G son de hecho en realidad evoluciones de las tecnologías de 3G, por ejemplo, LTE de 3GPP y Ultra Mobile Broadband (**UMB, banda ancha ultra móvil**) de 3GPP2. Será difícil de definir la línea divisoria entre 3G y 4G. Uno de los controladores para el uso popular de 4G ha sido la promoción agresiva dentro de la industria de la norma móvil estándar IEEE 802.16e (Wi-Max). Una versión de este estándar fue, sin embargo, recientemente aceptado por la UIT como una adición a la familia IMT-2000 y, por tanto, es evidente que se debe considerar conjuntamente con las otras tecnologías 3G IMT-2000.

La UIT está estudiando futuras capacidades móviles de banda ancha bajo el nombre IMTAdvanced, que la UIT recientemente ha definido como la cuarta generación (4G) de las tecnologías móviles.

La designación genérica de IMT ahora es utilizada por la UIT en el Reglamento de Radiocomunicaciones, en su versión revisada por la CMR-07, para identificar el espectro que podría administrarse o que deseen implementar las IMT-2000 (3G) o IMT-Avanzadas (4G). El espectro recientemente la UIT en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR-07) identificó posibles frecuencias utilizables por debajo de 1 GHz, así como bandas adicionales por encima de 2 GHz, para un potencial uso IMT (Figura 6.2).

(https://www.itu.int/ITU-D/tech/FORMER_PAGE_IMT2000/DocumentsIMT2000/What_really_3G.pdf, 08-05-2016).



Fuente: Recomendación UIT-R M.1645¹⁷

Figura 6.2 Esquema de Evolución de las IMT.

A continuación se discutirá la importancia de un salto de tecnología para incrementar tasas de transferencia debido a la alta demanda de banda ancha móvil actual y en próximos años (ver Figura 6.3)

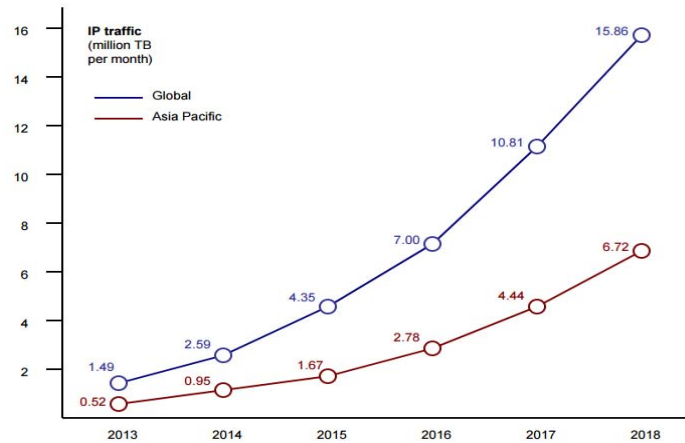


Figura 6.3 Tráfico IP en millones de Terabytes por mes.

4ª Generación o LTE.

El objetivo de LTE es proporcionar un acceso de radio capaz de alcanzar velocidades de tráfico de hasta 100 Mbps en Downlink y 50Mbps en Uplink. Esta tecnología opera en las mismas frecuencias que UMTS con BW variables de 20Mbps. Además ofrecerá menores tiempos de latencia lo que hace reducir los tiempos de acceso a un servicio y la respuesta de la red a cualquier solicitud.

En el aspecto económico, LTE incluye costos de despliegue y puesta en marcha del servicio. Los costos de implementación, incluye la migración de las redes UMTS a los nuevos requerimientos, ya que estos cambios no implican la red de radio sino el **CORE** de la red (**Network Core o Núcleo de red es la capa encargada de proporcionar conectividad entre los distintos puntos de acceso**). Para esto el grupo de trabajo del 3GPP denominado System Architecture Evolution, trata de encontrar la solución óptima de red, capaz de soportar estos cambios.

3GPP se ha dedicado a buscar nuevos métodos de transmisión y modelos de arquitectura. LTE no está basado en WCDMA al igual que UMTS, en el Downlink el método de transmisión escogido es OFDMA (OFDMA es también utilizado en

tecnologías como Wi-MAX). OFDMA ofrece una robusta transmisión de datos con una buena eficiencia espectral. En el Uplink el método usado por LTE es el SCFDMA que fue seleccionado por sus favorables características de señal. Las señales SCFDMA presentan menores factores de cresta que las OFDMA lo que facilita la etapa amplificadora de los móviles.

El empleo de antenas múltiples, conocido como MIMO es otra característica importante de LTE. Sobre todo el uso de dos antenas de transmisión y recepción en la estación base, en los móviles cobra especial relevancia. En un sistema MIMO, las antenas de transmisión disponibles transmiten simultáneamente cadenas de datos independientes al mismo recurso de radio, pudiendo pertenecer al mismo usuario o a otro. Los sistemas MIMO ofrecen tablas de transmisión de datos considerablemente superiores y son, por tanto, un componente fundamental de LTE.

Además de los métodos de transmisión física, la arquitectura del protocolo LTE ha sido completamente reformada. El objetivo es conseguir una arquitectura menos compleja que la existente para UMTS.

LTE no necesita de canales dedicados, los cuales asignan un recurso fijo al usuario durante toda la conexión. En vez de eso, la estación base informa al usuario, si es necesario del recurso que está disponible para la transmisión de datos. Este principio de compartición de canales es usado también en HSDPA y es ideal para la transmisión de servicios con arquitectura de paquetes. De igual modo, LTE emplea para la corrección de errores el método HARQ (**solicitud de repetición automática híbrida**) empleado en HSDPA y HSUPA. HARQ permite de forma rápida la retransmisión de paquetes recibidos de manera errónea.

LTE da la opción de trabajar con anchos de banda variables: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz. El uso de una canalización u otra marcará el límite de las tasas de transmisión. Para LTE se tienen diferentes bandas de frecuencia disponible.

Se mejora la eficiencia espectral con respecto a los sistemas anteriores, en un factor 3 aproximadamente. Esta mejora se debe principalmente a las técnicas de acceso que utiliza el sistema LTE. Estas son OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el ascendente (<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/>)

bmfcin322e/doc/bmfcin322e.pdf, 30-04-2016, 30-04-2016).

Es importante resaltar la velocidad que se tendrá en esta tecnología con sus predecesoras por lo que se presenta una imagen comparativa a continuación:

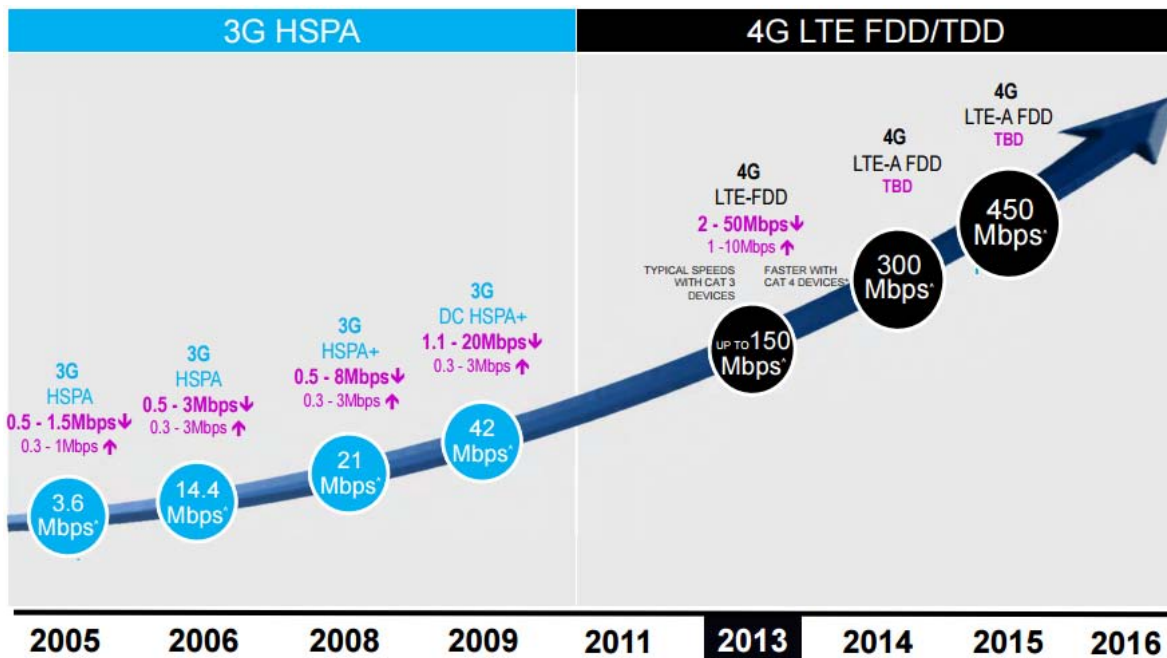


Figura 6.4 Comparación de las tecnologías en velocidades.

Como resumen de sus principales características a resaltar de esta tecnología cabe resaltar:

- Uso de varios tipos de modulación en función del estado del canal radio, que permitirán la obtención de diferentes velocidades. Estas modulaciones son QPSK, 16QAM y 64 QAM.
- Retardos de latencia de un máximo de 10 ms.
- Arquitectura plana basada en IP.
- Compatibilidad e inter-working con otros sistemas, sean 3GPP o no.
- Costo por bit reducido tanto para el operador como para el usuario (<http://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=en&year=2008&issue=10&ipage=39>, 08-05-2016).

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los estándares de tecnologías de sistemas de comunicación.

Generación	Estándares		Tecnología	Servicio	Multiplexación	Núcleo	Ancho de Banda
1G	AMPS	TACS	Analógica	Telefonía móvil (voz)	FDMA	PSTN	1.9 Kbps
		ETACS					
	OTROS	NMT					
		Hicap					
		Mobitex					
DataTAC							
2G	GSM/3GPP	GSM	Digital	Voz digital y mensajes cortos	TDMA, CDMA	PSTN	14.4 Kbps
		CSD					
	3GPP2	CdmaOne (IS-95)					
	AMPS	D-AMPS (IS-54, IS-136)					
	OTROS	CDPD					
		iDEN					
		PDC					
PHS							
2.5 G, 2.75G	GSM/3GPP	HSCSD	Digital	Mayor capacidad, paquetes de datos	TDMA, CDMA	PSTN y red de datos	14.4 Kbps
		GPRS					
		EDGE/EGPRS					
	3GPP2	CDMA2000 1xRTT (IS-2000)					
	OTROS	WIDEN					
3G (IMT-2000)	3GPP	UMTS (UTRAN)	Banda ancha CDMS y Tecnología IP	Integración de alta calidad de audio, video y datos	CDMA	Red de datos	2 Mbps
		WCDMA-FDD					
		WCDMA-TDD					
		UTRA-TDD LCR (TD-SCDMA)					
	3GPP2	CDMA2000 1xEV-DO					

		(IS-856)					
3.5G, 3.75G Y 3.9G	3GPP	HSDPA	Banda ancha CDMS y Tecnología IP	Integración de alta calidad de audio, video y datos	CDMA	Red de datos	
		HSUPA					
		HSPA +					
		LTE (E - UTRA)					
	3GPP2	EV-DO Rev. A					
		EV-DO Rev. B					
	OTROS	Mobile WiMAX (IEEE 802.16e-2005)					
Flash-OFDM							
IEEE 802.20							
4G (IMT- Advance)	3GPP	LTE Advanced	LAN/WAN/PAB y WLAN	Acceso a la información dinámica, dispositivos portátiles	CDMA	Internet	200 Mbps
	WiMAX	IEEE 802.16m					

Tabla 6.1 Comparativo entre sistema LTE vs segunda y tercera generación

6.3 Características.

A continuación se enumeran las principales características de LTE:

Utilización de OFDMA en el enlace descendente. Una tecnología que permite el acceso múltiple dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras (subcarriers) ortogonales que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios (https://www.xirio-online.com/help/es/lte_key_features.html, 04-05-2016).

La técnica de transmisión OFDM constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora consistente en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras. Con estas propiedades de ortogonalidad de dichas subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción.

Esta técnica, hoy en día es utilizada por sistemas como la Televisión Digital Terrestre según el estándar WiMAX o las redes inalámbricas de área local según los estándares IEEE 802.11a/g, a la vez que constituye la base para la técnica de acceso múltiple OFDMA empleada por el sistema LTE .

La técnica de acceso múltiple OFDMA, utilizada en el enlace descendente de LTE, surge a partir de la modulación OFDM presentada anteriormente al considerar la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. De esta forma, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes, tal y como se ilustra en el esquema de transmisión de la Figura 6.5 (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

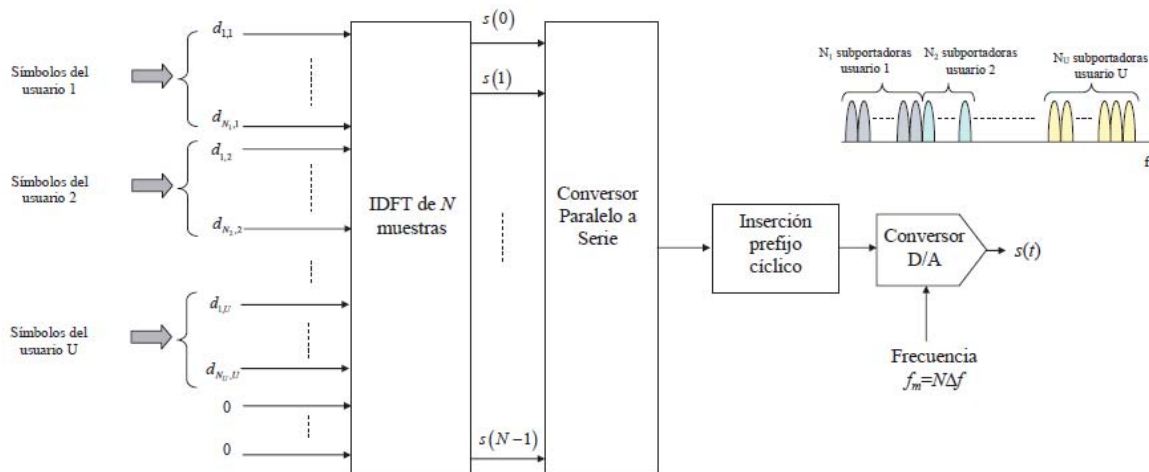


Figura 6.5 Multiplexación de usuarios en OFDMA.

Para conseguir un uso eficiente de los recursos radio disponibles, que en el caso de OFDMA son las diferentes subportadoras en que se subdivide la banda total, es preciso disponer de un conjunto de mecanismos de gestión para decidir cómo dichos recursos se distribuyen entre los diferentes usuarios y los servicios asociados, según sus requerimientos de calidad de servicio (QoS, Quality of Service). Estos mecanismos forman parte de la denominada gestión de recursos radio, en inglés Radio Resource Management (**RRM, administración de recursos de radio**).

Scheduling de paquetes

El mecanismo de scheduling de paquetes es el responsable de determinar, en cada momento, cuáles de las subportadoras se asignan a cada uno de los diferentes usuarios, o incluso a los diferentes flujos de información que pudieran existir de un mismo usuario, correspondientes a diferentes servicios.

El scheduling de paquetes es responsable de asociar las parejas subportadora/periodo de tiempo a cada uno de los usuarios.

Para llevar a cabo la decisión de la asignación, en general el algoritmo de scheduling tendrá en cuenta información sobre lo siguiente:

- Requisitos de QoS para los diferentes usuarios, en tanto que servicios que requieran de enviar más información deberán disponer de más subportadoras asignadas durante más tiempo.

- Información sobre el estado del canal para cada usuario en las diferentes subportadoras, de modo que se pueda evitar la asignación a un usuario de una subportadora en la que se sabe que el canal presenta una elevada atenuación o interferencia. Esta información se puede obtener de medidas efectuadas en el receptor del terminal móvil, será preciso disponer de la señalización apropiada en el enlace ascendente que permita enviar esta información desde el móvil hasta el nodo de la red en el que se ejecute el scheduling (y que en LTE será el eNB) (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

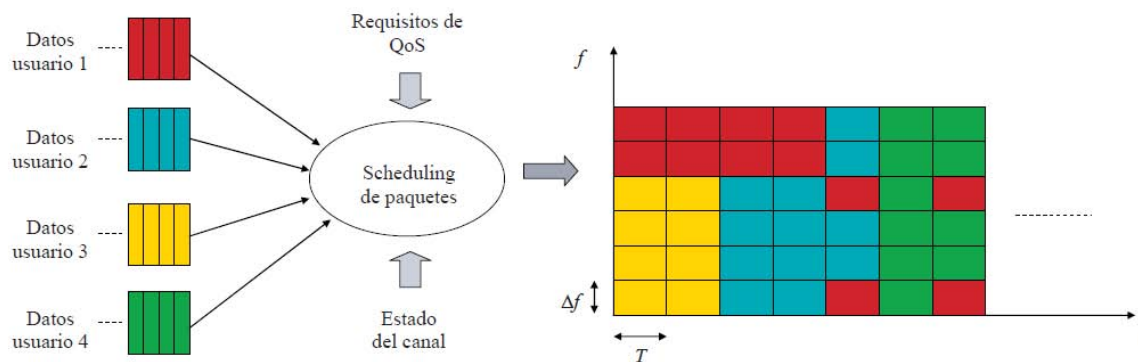


Figura 6.6 Ilustración del scheduling de paquetes en OFDMA.

Utilización de SCFDMA en el enlace ascendente. Una desventaja de OFDMA es la existencia de importantes variaciones de potencia en las señales de salida. Por ello es necesaria la utilización de amplificadores especialmente lineales, que poseen una baja eficiencia. El consumo de potencia es especialmente importante para el enlace ascendente por lo que se utiliza SC-FDMA, una alternativa más eficiente en términos de potencia que conserva la mayoría de las ventajas de OFDMA (https://www.xirio-online.com/help/es/lte_key_features.html, 04/05/2016)

Uno de los aspectos importantes a tener en cuenta en la elección de una modulación para un sistema de comunicaciones es la variación en la potencia instantánea de la señal transmitida, en tanto que si es muy grande la eficiencia de los amplificadores de potencia se reduce. Una métrica para caracterizar esta variación es el denominado factor de cresta o **PAPR (pico de relación de potencia media)**, que en definitiva mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media.

Señales con un valor de PAPR muy grande requieren amplificadores de potencia altamente lineales para evitar la distorsión asociada a la intermodulación. Para conseguir esta elevada linealidad, el amplificador debe operar bastante por debajo de su potencia de pico, lo que se traduce finalmente en una eficiencia reducida, entendida dicha eficiencia como la relación entre la potencia transmitida respecto de la potencia consumida.

Conseguir una eficiencia elevada es algo crítico para los amplificadores de los terminales móviles, en tanto que esto permite reducir tanto el consumo de potencia del terminal (y consecuentemente incrementar la duración de las baterías) como su coste. Si bien existen algunos métodos que permiten reducir el PAPR de la señal OFDMA (por ejemplo mediante la reserva de algunas subportadoras no utilizadas, o bien mediante técnicas de prefiltrado o precodificación de los símbolos antes de modularlos según OFDM), estos métodos también acostumbran a comportar un incremento significativo en la complejidad computacional o una reducción en las prestaciones obtenidas. Por este motivo, en el sistema LTE, la técnica de acceso múltiple OFDMA se emplea únicamente en el enlace descendente, en tanto que en la estación de base no son tan críticos ni la eficiencia ni el coste de los amplificadores.

Por el contrario, en el enlace ascendente, se ha optado por utilizar una técnica de acceso de portadora única (single carrier), la denominada SCFDMA (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

A la hora de seleccionar el esquema apropiado para el enlace ascendente de LTE, se intentaron conjugar las siguientes propiedades deseables:

- Variaciones reducidas en la potencia instantánea de la señal transmitida, en términos de un valor de PAPR reducido, para conseguir una mayor eficiencia en los amplificadores de potencia y un menor coste de los mismos.
- Posibilidad de llevar a cabo de forma sencilla mecanismos de ecualización en el dominio de la frecuencia, presentan una menor complejidad que la ecualización en el dominio temporal.

- Capacidad de proporcionar una asignación de banda flexible, que pueda variarse de forma sencilla de acuerdo con las diferentes necesidades de transmisión de los diferentes usuarios.

De acuerdo con los tres requerimientos anteriores, la técnica de acceso múltiple seleccionada SCFDMA de hecho se basa en unos principios de transmisión muy similares a los de OFDM, pero efectuando una precodificación de los símbolos a transmitir previa al proceso de transmisión OFDM, lo que permite reducir las variaciones en la potencia instantánea. Por otro lado, la capacidad de poder efectuar ecualización en el dominio de la frecuencia es algo inherente a la técnica OFDM con empleo de prefijo cíclico, mientras que la flexibilidad en la banda asignada también es intrínseca a OFDM simplemente a base de dedicar más o menos subportadoras a un usuario (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Flexibilidad del espectro. Es una de las características clave de LTE. La existencia de distintos marcos regulatorios dependiendo de la zona geográfica de despliegue, así como la coexistencia con otros operadores u otros servicios y sistemas, hacen necesaria la flexibilidad en el ancho de banda usado dentro de la banda de despliegue.

Idealmente además cualquier ancho de banda puede ser utilizado dentro de esta banda (en pasos de 180 kHz correspondientes al ancho de banda de un PRB). En LTE se definen unos anchos de banda nominales posibles de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz. LTE además es capaz de operar tanto en bandas pareadas (FDD) como no pareadas (TDD).

El sistema permite además un uso óptimo del espectro radioeléctrico por medio de técnicas de Asignación Dinámica del Espectro (Dynamic Spectrum Assignment, DSA). Básicamente el sistema es capaz, en función de las condiciones del canal en cada bloque de frecuencia e instante de tiempo, de seleccionar los usuarios en mejores condiciones (https://www.xirio-online.com/help/es/lte_key_features.html, 04/05/2016)

La flexibilidad del espectro es una de las características clave de LTE. Ésta consiste en varios pasos que incluyen la flexibilidad en la banda de despliegue, la

flexibilidad en el ancho de banda usado dentro de la banda de despliegue, y la flexibilidad propia de la interfaz radio basada en acceso OFDMA que permite una optimización de su uso por medio de técnicas de asignación dinámica de espectro DSA (Dynamic Spectrum Assignment). En este apartado se cubren cada uno de estos aspectos.

La interfaz radio LTE es relativamente independiente de la banda de despliegue y en principio se puede desplegar en las bandas ya identificadas para IMT-2000 como en otras nuevas bandas que puedan aparecer en el futuro. Tanto las bandas ya identificadas para LTE como futuras bandas pueden ser pareadas (para despliegues FDD: Duplexado por División en Frecuencia) o no pareadas (para despliegues TDD: Duplexado por División en Tiempo). La siguiente tabla muestra las bandas de operación que se han identificado hasta el momento para LTE.

Existen ciertas limitaciones en lo relativo a los requerimientos de radiofrecuencia asociados a una determinada banda. En concreto, estas restricciones se ven motivadas por:

- La coexistencia de los operadores en una misma zona geográfica. Estos operadores pueden desplegar distintas interfaces radio, y por lo tanto LTE debe especificar ciertos requerimientos que aseguren su coexistencia con otras tecnologías de acceso radio. También afecta a despliegues donde distintos operadores comparten un mismo emplazamiento.
- La coexistencia de LTE con otros servicios o sistemas desplegados en bandas adyacentes o en la frontera del país, donde cambia el marco regulador del espectro radioeléctrico.
- El hecho de que LTE sea un sistema abierto desde el punto de vista de la banda de operación, de forma que futuras versiones del estándar agregan nuevas bandas de operación. Eso supone que los terminales se tengan que diseñar asumiendo que podrían funcionar en un amplio margen de frecuencias.

Estos requerimientos se suelen definir en términos de la máxima potencia permitida, las emisiones espúreas, emisiones fuera de banda (Adjacent Channel

Leakage Ratio), etc (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016)

Banda LTE.	Banda para UL.	Banda para DL.	Tipo de duplexado.
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 – 894 Mhz	FDD
6	830 Mhz – 840 Mhz	875 Mhz – 885 Mhz	FDD
7	2500 Mhz – 2570 Mhz	2620 Mhz – 2690 Mhz	FDD
8	880 Mhz – 915 Mhz	925 Mhz – 960 Mhz	FDD
9	1749.9 Mhz – 1784.9 Mhz	1844.9 Mhz – 1879.9 Mhz	FDD
10	1710 Mhz – 1770 Mhz	2110 Mhz – 2170 Mhz	FDD
11	1427.9 Mhz – 1452.9 Mhz	1475.9 Mhz – 1500.9 Mhz	FDD
12	698 Mhz – 716 Mhz	728 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
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

Tabla 6.2 Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE en la Release.

Flexibilidad en el ancho de banda en uso.

La interfaz radio de LTE basada en OFDMA ofrece una gran flexibilidad a la hora de desplegar el sistema dentro de una determinada banda, donde idealmente cualquier ancho de banda puede ser usado (en pasos de 180 kHz correspondientes al ancho de banda de un PRB). No obstante, para facilitar la operación, LTE define un subconjunto de anchos de banda posibles. En concreto, se permiten bloques de espectro con 6, 15, 25, 50, 75 y 100 PRBs que se corresponden con anchos de banda nominales de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz respectivamente [34]. Nótese que ancho de banda de estos bloques sería algo menor que el ancho de banda nominal debido a las bandas de guarda para reducir las emisiones fuera de banda.

Esta flexibilidad en el ancho de banda en uso por parte de un operador permitirá, dentro del marco conocido como **spectrum refarming (reconfiguración del espectro)**, el despliegue gradual de LTE en bandas asignadas previamente a otros sistemas como GSM o UMTS. Por ejemplo, en un despliegue GSM de 15 MHz con radiocanales de 200 kHz sería posible introducir LTE en tres etapas, donde en cada etapa se despliega LTE en una porción de aproximadamente 5 MHz de radiocanales GSM, a medida que decrezca el tráfico cursado sobre GSM. Nótese que el refarming de LTE en bandas reservadas a sistemas previos se debe a que algunas de las bandas LTE presentadas en el apartado anterior coinciden dichas bandas (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Asignación dinámica de espectro

Las estrategias que se plantean para la planificación de frecuencia en LTE (FRF1, FRF3, etc.) están pensadas para distribuciones homogéneas del tráfico en el área de cobertura. Sin embargo, en el caso de distribuciones heterogéneas o variables, que en realidad son las que usualmente van a aparecer en escenarios de tipo práctico, estas estrategias se han mostrado claramente ineficientes, limitando la calidad de servicio en las celdas más cargadas o infrautilizando el espectro asignado en las menos cargadas. Por el contrario, la interfaz radio basada en OFDMA de LTE ofrece una excelente flexibilidad y abre un amplio abanico de

posibilidades a la hora de gestionar el espectro en un determinado despliegue. Así, las estrategias de asignación dinámica de espectro plantean cómo conseguir una mejor eficiencia espectral en términos de número de usuarios por unidad de banda (o equivalentemente el **throughput (rendimiento)** por célula y unidad de banda). Se introduce a este efecto una reutilización espacial variable de la banda asignada, a diferencia de lo que hasta ahora aparece en la literatura como esquemas fijos de asignación.

Se citan dos metodologías para dichos algoritmos: algoritmos heurísticos y algoritmos basados en **reinforcement learning (autoaprendizaje)**. Los primeros son algoritmos que tratan de resolver el problema de forma intuitiva, esto es, se decide el número de frecuencias por cada celda en función de su carga para cumplir con unos objetivos de calidad de servicio y posteriormente se trata de repartir estos recursos de forma que se reduzca la interferencia intercelular.

De esta manera, se mejora la eficiencia espectral cuando se compara con los esquemas clásicos (no dinámicos) de asignación de frecuencias. Por otro lado, los segundos algoritmos emplean la metodología de aprendizaje forzado para encontrar asignaciones de frecuencias por celda que tratan de optimizar un determinado indicador de recompensa. La metodología de aprendizaje forzado prueba distintas soluciones y aprende para converger a las mejores y descartar las peores en términos de recompensa. Por lo tanto, construyendo un indicador de recompensa que capture los objetivos de una asignación dinámica del espectro es posible aplicar esta metodología para encontrar asignaciones adecuadas.

La Figura 6.7 muestra una comparación en términos de incumplimiento de la calidad de servicio y eficiencia espectral entre los esquemas FRF1, FRF3 y las dos estrategias dinámicas descritas anteriormente. En estos resultados, se parte de una distribución homogénea del tráfico entre las celdas y a partir de los 30 minutos se pasa a una distribución heterogénea.

Observe como en este último caso, las estrategias dinámicas consiguen mantener la calidad de servicio en el sistema al mismo tiempo que se mantiene o mejora la eficiencia espectral (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016)

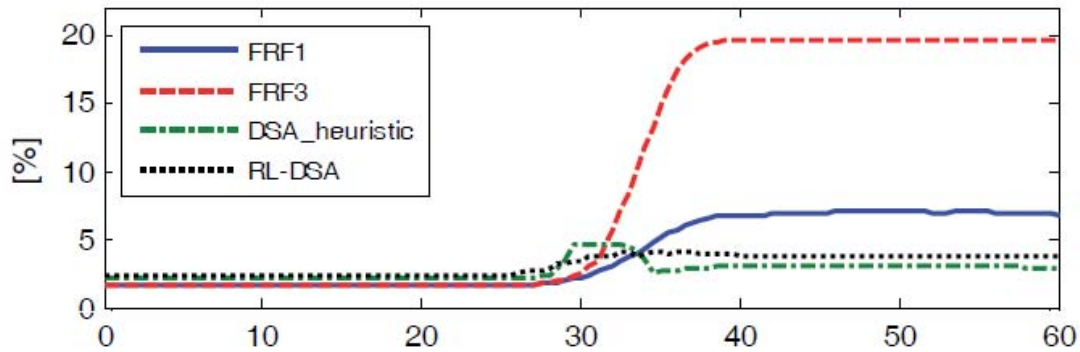


Figura 6.7 Eficiencia espectral media.

6.4 Infraestructura y arquitectura.

En la Figura 6.8 se ilustra de forma simplificada la arquitectura completa del sistema LTE, denominado formalmente en las especificaciones como Evolved Packet System (**EPS, sistema mejorado de paquete**). Los componentes fundamentales del sistema LTE son, por un lado, la nueva red de acceso **E-UTRAN (red evolutiva de radio terrestre)** y el nuevo dominio de paquetes EPC de la red troncal (denominado en adelante simplemente como red troncal EPC), y por otro, la evolución del subsistema IMS concebido inicialmente en el contexto de los sistemas UMTS. Los diferentes componentes han sido diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no resulta necesario disponer de un componente adicional para la provisión de servicios en modo circuito (en el sistema LTE los servicios con restricciones de tiempo real se soportan también mediante conmutación de paquetes). En este sentido, EPC constituye una versión evolucionada del sistema GPRS.

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y redes de paquetes externas tales como plataformas IMS y/o otras redes de telecomunicaciones como Internet. Las prestaciones de calidad de servicio (p. ej., tasa de datos en bits/s, comportamientos en términos de retardos y pérdidas) de un servicio de transferencia de paquetes IP puede configurarse en base a las necesidades de los servicios finales que lo utilicen, cuyo establecimiento (señalización) se lleva a cabo a través de plataformas de servicios externas (p. ej.,

IMS) y de forma transparente a la red troncal EPC. Formalmente, el servicio de transferencia de paquetes IP ofrecido por la red LTE entre el equipo de usuario y una red externa se denomina servicio portador EPS (EPS Bearer Service). Asimismo, la parte del servicio de transferencia de paquetes que proporciona la red de acceso E-UTRAN se denomina E-UTRAN Radio Access Bearer (ERAB).

En la Figura 6.9 se muestran las principales interfaces de E-UTRAN y EPC. La interfaz entre E-UTRAN y EPC se denomina S1 y proporciona a la EPC los mecanismos necesarios para gestionar el acceso de los terminales móviles a través de E-UTRAN. La interfaz radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN se denomina E-UTRAN Uu. Por otro lado, las plataformas de servicios como IMS y la conexión a redes de paquetes externas IP se lleva a cabo mediante la interfaz S-Gi de la EPC. La interfaz S-Gi es análoga a la interfaz Gi definida en las redes GPRS/UMTS y constituye el punto de entrada/salida al servicio de conectividad IP proporcionado por la red LTE (los terminales conectados a la red LTE son “visibles” a las redes externas a través de esta interfaz mediante su dirección IP). Los mecanismos de control de los servicios de transporte ofrecidos por EPC se sustentan en información proporcionada por otros elementos de la red troncal que no son exclusivos del sistema LTE sino que pueden dar soporte también a otros dominios de los sistemas 3GPP. En la Figura 6.8 se mencionan algunos de estos elementos comunes entre los que, a modo de ejemplo, se encuentra la base de datos del sistema con la información de suscriptores de sus usuarios (HSS) (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Otra característica fundamental del sistema LTE es que contempla también el acceso a sus servicios a través de UTRAN y GERAN así como mediante la utilización de otras redes de acceso que no pertenecen a la familia 3GPP (p. ej., CDMA2000, Mobile WiMAX, redes 802.11, etc). La interconexión de las redes de acceso alternativas, tanto 3GPP como no, se soporta a través de un conjunto de interfaces de la EPC (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

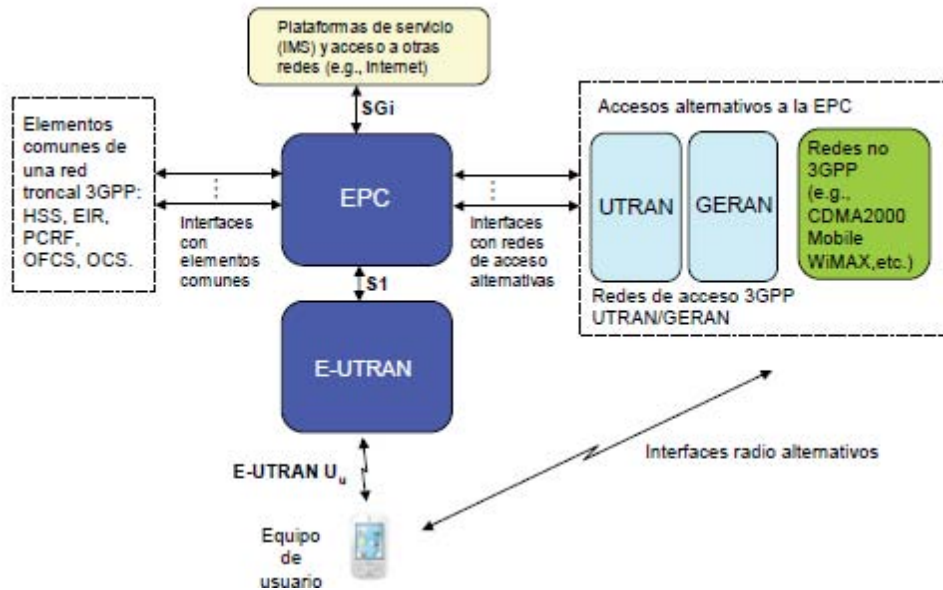


Figura 6.8 Arquitectura del sistema LTE.

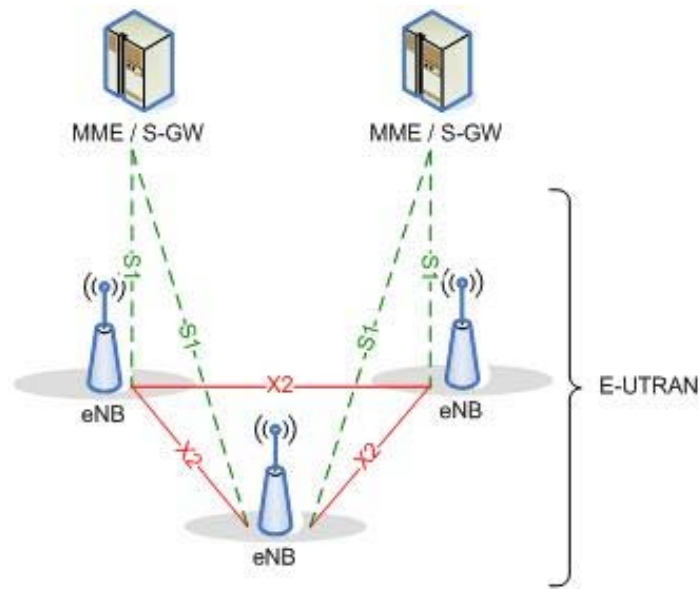


Figura 6.9 Interfaces de E-UTRAN y EPC.

Finalmente, aunque no quede reflejado en la Figura 6.8, es importante destacar que la interconexión de los diferentes equipos físicos donde se ubicarían las funciones tanto de la red troncal EPC como de la red de acceso E-UTRAN, se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP. De esta forma, la red física que se utiliza para interconectar los diferentes equipos de una red LTE, y que se denomina comúnmente como red de transporte, es una red IP convencional. Por tanto, la infraestructura de una red LTE, además de los equipos propios que

implementan las funciones del estándar 3GPP, también integra otros elementos de red propios de las redes IP tales como routers, servidores DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) para la configuración automática de las direcciones IP de los equipos de la red LTE y servidores DNS (Domain Name Server) para asociar los nombres de los equipos con sus direcciones IP (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Red de acceso evolucionada: E-UTRAN

Arquitectura de E-UTRAN

La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada evolved NodeB (eNB) que constituye la estación base de E-UTRAN. Así pues, la estación base E-UTRAN integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de las redes de acceso de GSM y UMTS compuestas por estaciones base (BTS, Nodo B) y equipos controladores (BSC y RNC).

Tal y como se ilustra en la Figura 6.10, una red de acceso E-UTRAN está formada por eNBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2 (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

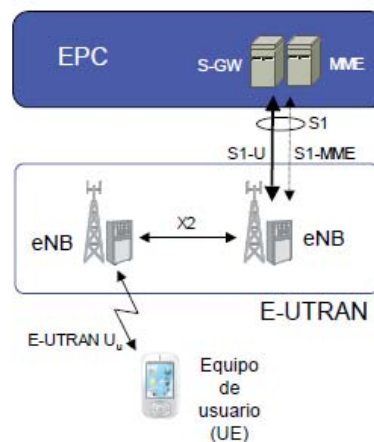


Figura 6.10 Red de acceso E-UTRAN.

La interfaz E-UTRAN Uu, también denominada LTE Uu o simplemente interfaz radio LTE, permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los equipos de usuario. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar

el envío de datos y controlar la operativa de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB.

El eNB se conecta a la red troncal EPC a través de la interfaz S1. Dicha interfaz está desdoblada en realidad en dos interfaces diferentes: S1-MME para sustentar el plano de control y S1-U como soporte del plano de usuario. La separación entre plano de control y plano de usuario es una característica importante en la organización de las torres de protocolos asociadas a las interfaces de la red LTE. Así pues, el plano de usuario de una interfaz se refiere a la torre de protocolos empleada para el envío de tráfico de usuario a través de dicha interfaz (p. ej., paquetes IP del usuario que se envían entre E-UTRAN y EPC a través de S1-U). Por otro lado, el plano de control se refiere a la torre de protocolos necesaria para sustentar las funciones y procedimientos necesarios para gestionar la operación de dicha interfaz o de la entidad correspondiente (p. ej., configuración de la operativa del eNB desde la red EPC a través de S1-MME). Esta separación entre plano de control y plano de usuario en la interfaz S1 permite realizar la conexión del eNB con dos nodos diferentes de la red troncal. Así, mediante la interfaz S1-MME, el eNB se comunica con una entidad de red de la EPC encargada únicamente de sustentar las funciones relacionadas con el plano de control (dicha entidad de red de la red troncal EPC se denomina Mobility Management Entity, MME). Por otro lado, mediante la interfaz S1-U, el eNB se comunica con otra entidad de red encargada de procesar el plano de usuario (dicha entidad de red de la EPC se denomina Serving Gateway, S-GW). Esta separación entre entidades de red dedicadas a sustentar el plano de control o bien el plano de usuario es una característica importante de la red LTE que permite dimensionar de forma independiente los recursos de transmisión necesarios para el soporte de la señalización del sistema y para el envío del tráfico de los usuarios (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Opcionalmente, los eNBs pueden conectarse entre sí mediante la interfaz X2. A través de esta interfaz, los eNB se intercambian tanto mensajes de señalización destinados a permitir una gestión más eficiente del uso de los recursos radio (p. ej., información para reducir interferencias entre eNBs) así como tráfico de los

usuarios del sistema cuando estos se desplazan de un eNB a otro durante un proceso de handover.

En la Tabla 6.3 se resumen las entidades de red e interfaces de E-UTRAN y se indican las principales especificaciones del 3GPP relacionadas con cada una de ellas (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

	Denominación	Descripción	Referencias 3GPP
Entidades de red	Involved NodeB (eNB)	Estación base de la red de acceso E-UTRAN	TS 36.300 (4) TS 36.401 (5)
	Denominación	Entidades de red asociadas	
Interfaces	E-UTRAN Uu (también denominada LTE Uu O interfaz de radio)	eNB UE	TS 36.300 (4) Documentos TS 36.2xx y TS 36.3xx
	X2	eNB eNB	Documentos TS 36.42xx y TS 29.281 (26)
	S1-MME	eNB Red troncal EPC (MME)	Documentos TS 36.41x
	S1-U	eNB Red troncal EPC (S-GW)	TS 29.281 (26)

Tabla 6.3 Entidades de red e interfaces de E-UTRAN.

Las referencias proporcionadas son las más representativas aunque no constituyen una lista exhaustiva de todos los documentos 3GPP relacionados con cada aspecto.

Entidades de red e interfaces

En este apartado se describen más detalladamente las funciones asociadas a un eNB y las principales características de las tres interfaces de E-UTRAN (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

E-UTRAN NodeB (eNB)

El eNB integra todas las funciones de la red de acceso. Por ello, en el eNB terminan todos los protocolos específicos de la interfaz radio. Mediante dichos protocolos, el eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia/desde los

equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina formalmente como servicio portador radio (Radio Bearer, RB). El eNB mantiene un contexto de cada uno de los equipos de usuario que tiene conectados. En dicho contexto se almacena la información necesaria para mantener los servicios de E-UTRAN activos (información sobre el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc.).

Sin duda, la funcionalidad clave de un eNB consiste en la gestión de los recursos radio. Así, el eNB alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad (p.ej, decisión de realizar un handover), asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente (denominadas funciones de scheduling), control de interferencias entre estaciones base, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, etc.

Otra función importante introducida en la funcionalidad de un eNB es la selección dinámica de la entidad MME de la red troncal EPC cuando un terminal se registra en la red LTE. Esta función otorga un grado de flexibilidad muy importante en la operativa de la red. En E-UTRAN, a diferencia de arquitecturas más jerarquizadas como GERAN o las primeras versiones de UTRAN, un eNB puede estar conectado simultáneamente a múltiples MMEs de la red troncal. El conjunto de MMEs a los que tiene acceso un NB se denomina su pool área. Así, mediante la selección de qué entidad MME va a controlar el acceso de cada usuario, es posible balancear la carga de señalización entre diferentes MMEs así como aumentar la robustez del sistema frente a puntos de fallo críticos. Esta opción se soporta mediante lo que se denomina la interfaz S1 flexible (S1-flex) (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Al igual que la posibilidad de interactuar con múltiples MMEs, un eNB puede enviar/recibir paquetes IP de los usuarios a los que sirve a través de diferentes pasarelas S-GW de la red troncal EPC. Ello conlleva que el eNB albergue funciones de encaminamiento del tráfico de los usuarios hacia la pasarela de red

S-GW correspondiente. La elección de S-GW en este caso compete a la entidad MME y no al eNB.

Un eNB puede gestionar una o varias celdas. Un caso típico es el uso de sectorización de forma que, el eNB ubicado en un emplazamiento soporta tantas celdas como sectores (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Interfaz radio

La interfaz radio soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNB. Los tres mecanismos citados se ilustran en la Figura 6.11 y se describen a continuación:

- Difusión (broadcast) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda. La información enviada permite a los equipos de usuario detectar la presencia del eNB y conocer sus parámetros básicos de operación (p. ej., potencia máxima que pueden utilizar los equipos de usuario en la celda) así como la identidad de los operadores de red a los que puede accederse a través del eNB. La información difundida corresponde tanto a información específica de la red de acceso (denominada información del Access stratum, AS) como de la red troncal (denominada información del non Access stratum, NAS). La difusión de señalización de control también sirve para forzar que un equipo de usuario que no tenga una conexión de control establecida con el eNB, inicie un acceso a la red (función de aviso o paging).
- Transferencia de paquetes IP de los usuarios a través del canal radio. Tal como se ha comentado anteriormente, los servicios de transferencia entre un eNB y un equipo de usuario se denominan servicios portadores radio (Radio Bearers, RB). Es importante destacar que los servicios portadores radio de E-UTRAN han sido diseñados específicamente para soportar tráfico IP y no permiten la transferencia de otros protocolos (p. ej., paquetes X.25, tramas Ethernet, etc.). Por ello, de cara a la optimización del envío de

tráfico IP a través de la interfaz radio, los servicios portadores albergan funciones como la compresión de cabeceras de los paquetes IP que permiten reducir el número de bytes enviados por la interfaz radio (las cabeceras de los paquetes IP pertenecientes a un mismo tipo de tráfico contienen un gran número de parámetros idénticos, p.ej, direcciones origen y destino, por lo que no resulta necesario enviar todos los bytes de la cabecera IP en cada uno de los paquetes).

- Transferencia de señalización de control dedicada entre el eNB y un equipo de usuario. El establecimiento de una conexión de control dedicada resulta imprescindible de cara a poder gestionar el uso de los servicios portadores radio así como para realizar cualquier gestión de señalización con la red troncal (p. ej., registro del terminal en la red). La conexión de control se soporta mediante el protocolo Radio Resource Control (RRC). A través de dicho protocolo se gestionan, además del establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores radio entre el eNB y el equipo de usuario, otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos radio. Entre dichos mecanismos cabe citar el control y envío de medidas radio desde los terminales hacia el eNB y el mecanismo de handover, que permite que un equipo de usuario cambie de celda manteniendo activos tanto la conexión de control como los posibles servicios portadores radio que esté utilizando. Los terminales que mantienen una conexión de control con E-UTRAN se dice que se encuentran en modo conectado o activo, en contraposición al denominado modo idle en que el terminal no tiene una conexión RRC y básicamente se encuentra monitorizando la información de control difundida por la red (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

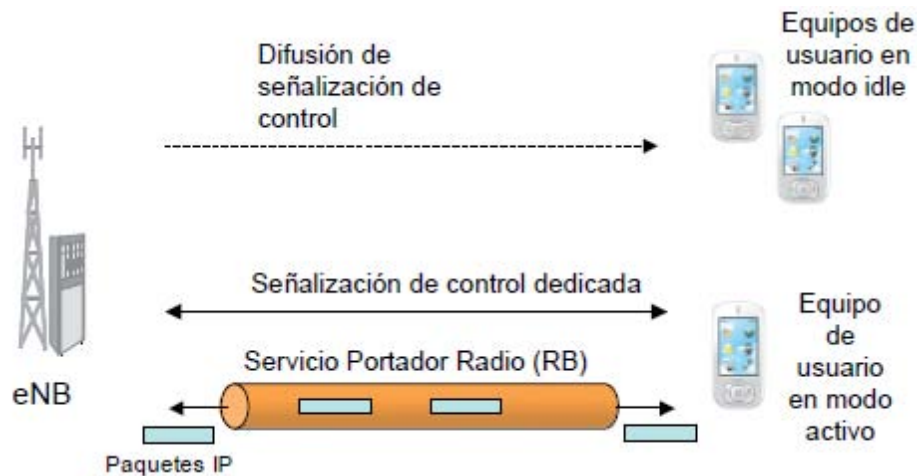


Figura 6.11 Ilustración de los mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio.

Respecto al envío de paquetes de usuario, cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos radio así como la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos radio (p. ej., scheduling).

La información enviada por la interfaz radio puede protegerse mediante funciones de cifrado que proporcionen confidencialidad e integridad. El servicio de confidencialidad permite que la información sea enviada de forma que ningún otro equipo que decodifique la señal transmitida por el canal radio sea capaz de conocer la información en claro. El servicio de integridad evita que la información transmitida pueda ser alterada de forma malintencionada en el camino entre eNB y equipo de usuario (p. ej., equipo radio que se ubique en medio de la transmisión). Las funciones de cifrado se aplican tanto al tráfico de usuario (paquetes IP) como a los mensajes de señalización RRC utilizados en la conexión de control dedicada (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Interfaz eNB ↔ EPC (S1)

El plano de usuario de esta interfaz, denominado S1-U (S1 User Plane), proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNB y S-GW sin garantías de entrega y que no soporta ni mecanismos de control de errores ni de control de flujo. Este servicio de transferencia a través de la interfaz S1-U se denomina servicio portador S1 (S1 bearer).

El plano de control, denominado S1-MME o también S1-C, se utiliza para soportar un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y la entidad MME de la red troncal. Concretamente, entre los procedimientos soportados en la interfaz S1 destacan:

- Procedimientos para establecimiento, modificación y liberación de recursos de los servicios portadores tanto en la interfaz radio (servicio portador radio o RB) como en la interfaz S1 (S1 bearer). La concatenación de un servicio portador radio y un servicio portador S1 constituye el servicio portador completo que ofrece la red de acceso E-UTRAN y que se denomina E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer). Es importante tener en cuenta que en LTE, el establecimiento de estos servicios portadores que constituyen el plano de usuario para la transferencia del tráfico IP se controla desde la red troncal, en particular desde la entidad de red MME. Por tanto, en LTE no se permite que un eNB o el propio equipo de usuario puedan iniciar por su cuenta el establecimiento de un servicio portador radio. En la Figura 6.12 se ilustra dicho control del plano de usuario por parte de la entidad MME.
- Procedimientos de handover entre eNBs. Si la red E-UTRAN decide que un terminal debe cambiar de eNB en el transcurso de una conexión, y no existe una interfaz X2 entre los dos eNBs involucrados, la interfaz S1-MME se utiliza para articular el procedimiento de handover. De esta forma, a través de la interfaz S1-MME, la entidad MME puede establecer un nuevo contexto en el eNB destino asociado al terminal que va a realizar el cambio con toda la información relativa a la configuración de los servicios portadores que tiene establecidos el usuario así como las claves de seguridad. De esta forma, el re-establecimiento del servicio a través del nuevo eNB puede hacerse mucho más rápidamente ya que se evita el tener que ejecutar de nuevo los mecanismos para el establecimiento de los servicios portadores en la interfaz radio así como los mecanismos de seguridad.
- Procedimiento de aviso (Paging). Una de las funciones básicas de la entidad MME es la gestión de la localización de los equipos de usuario en la

red. La gestión de localización permite conocer con cierta resolución en qué eNB o conjunto de eNBs (denominados áreas de seguimiento, Tracking áreas) puede ser localizado un usuario que se encuentre en modo idle, es decir, que no tenga establecida una conexión de control RRC con ningún eNB. Por ello, cuando el MME quiere forzar que un usuario en modo idle pase a modo activo, a través de la interfaz S1-MME se ordena la ejecución del mecanismo de aviso en todos los posibles eNBs en los que espera encontrar al terminal (Figura 6.12).

- Procedimiento de envío de forma transparente entre MME y eNB de los mensajes de señalización de control que fluyen entre el MME y el equipo de usuario. Dichos mensajes corresponden a los protocolos denominados como protocolos NAS (Non Access Stratum) (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

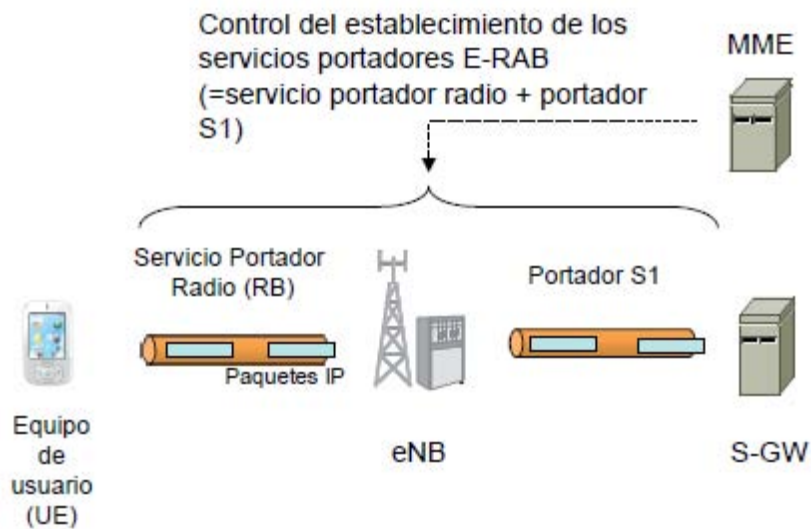


Figura 6.12 Control de los servicios portadores radio y S1 a través de la interfaz S1-MME.

Tal como se ha comentado en la descripción de las funciones de un eNB, la interfaz S1 permite que un eNB pueda estar conectado simultáneamente a múltiples equipos de la red troncal (múltiples MMEs y/o múltiples S-GWs). Esta característica se denomina comúnmente como S1-flex y presenta varias ventajas:

- La red es más robusta a fallos de los nodos de la red troncal: el correcto funcionamiento de un eNB no está ligado a un único nodo de la red troncal.

De esta forma, aunque se produzca un malfuncionamiento o parada de un nodo de la red troncal, los eNBs afectados pueden seguir ofreciendo servicio a través de otros nodos de la red troncal.

- Un eNB puede proporcionar acceso a nodos de redes troncales de diferentes operadores de red que comparten la red de acceso.
- Cada terminal registrado en la red LTE tiene asociado un nodo MME que realiza el “seguimiento” del estado de dicho terminal. La frecuencia a la que debe cambiarse el nodo MME que controla el servicio de un determinado equipo de usuario puede verse reducida gracias a la posibilidad de seguir accediendo al mismo MME desde un conjunto mayor de eNBs. Esta reducción del número de cambios de MME conlleva una reducción de la señalización en la red troncal necesaria para transferir la información de los usuarios de la base de datos HSS a la entidad MME que les da servicio.
- Es posible desplegar estrategias de balanceo de carga entre E-UTRAN y los nodos de la red troncal, atendiendo tanto a las capacidades de procesamiento de dichos nodos como a la capacidad de los enlaces de la red de transporte entre E-UTRAN y la EPC (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

Interfaz eNB ↔ eNB (X2)

Al igual que el plano de usuario de S1, el plano de usuario de la interfaz X2 proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNBs sin garantías de entrega y sin soporte de mecanismos de control de errores y de control de flujo. La transferencia de datos de usuario entre eNBs se realiza únicamente durante los procedimientos de handover en los que los paquetes de usuario almacenados en el eNB antiguo se transfieren al eNB nuevo. De esta forma, el cambio de eNB asociado a un procedimiento de handover puede resultar más transparente al usuario ya que se reduce la posible pérdida de paquetes durante el proceso. Nótese que, sobre todo en servicios de datos, el eNB antiguo podría tener acumulados en su buffer de transmisión paquetes IP del usuario en el momento del cambio. Dichos paquetes, cuando el usuario deja de estar accesible a través del eNB antiguo, podrían simplemente descartarse, con la consiguiente

penalización en retardo y posible reducción en la tasa de transferencia del servicio asociado ya que la recuperación de dicha información recaería en la operación de las capas superiores (p. ej., protocolo TCP en la capa de transporte). En cambio, si la propia red es capaz de transferir los paquetes IP del eNB antiguo al eNB nuevo, el impacto en el servicio puede reducirse notablemente.

Respecto al plano de control, entre las funciones y procedimientos soportados en la interfaz X2 destacan:

- Soporte del mecanismo de handover entre eNBs. En concreto, a través del plano de control se realiza la transferencia del contexto de un usuario del eNB antiguo al nuevo y se controla el mecanismo de transferencia de paquetes IP en el plano de usuario de X2. El contexto de usuario contiene información relativa a los servicios portadores radio que tiene establecidos el usuario, claves de seguridad así como los datos sobre las capacidades del terminal.
- Indicación del estado de carga del eNB. A través de dicha interfaz, eNBs que tengan celdas vecinas pueden transferirse información para llevar a cabo funciones de gestión de recursos radio como la coordinación de interferencias entre celdas que operen en el mismo canal (www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf, 04-05-2016).

6.5 Estándares de tecnología LTE.

Las tecnologías de la información y las comunicaciones en general y las comunicaciones móviles en particular tienen una incidencia decisiva en el crecimiento económico, la competitividad y la mejora de la productividad. El terminal móvil ha llegado a constituir hoy en día una parte esencial en la esfera de objetos personales. En este contexto, la industria de las comunicaciones móviles ha venido aportando soluciones al mercado, en la forma de sucesivas generaciones de sistemas. La globalización de los mercados y la búsqueda de economías de escala son algunos de los principales argumentos (esgrimidos ya en la concepción de la segunda generación de comunicaciones) que justifican el interés y el desarrollo de sistemas estándares, resultado del consenso entre los diferentes agentes implicados. Así, los diferentes organismos y foros de

estandarización adquieren una relevancia muy significativa en el marco general del negocio de las comunicaciones móviles. Los procesos de estandarización son costosos en tiempo y esfuerzo. Típicamente se inician con una primera fase en la que se establecen los requisitos que debe satisfacer el diseño del sistema que se pretende estandarizar. Tras ello, se decide la arquitectura del sistema, con sus principales bloques y correspondientes interfaces. Sobre ello, se procede a la especificación detallada, así como el test y la verificación que pueden iniciarse cuando las especificaciones alcanzan ya un alto nivel de estabilidad. El proceso es iterativo. Por ejemplo, pueden añadirse, modificarse o eliminarse requisitos a la vista de las soluciones técnicas que se vayan formulando. Similarmente, pueden modificarse las soluciones técnicas si se evidencian dificultades en la verificación práctica (<http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en>, 12-05-2016).

LTE

En el caso de LTE, las especificaciones emanan del, que surgió en 1998 con el objetivo de especificar 3G (UTRA-FDD y UTRA-TDD). También se encarga de mantener y desarrollar las especificaciones de GERAN (GSM EDGE RAN). La red de acceso radio se especifica en el marco del TSG RAN, que se organiza en cinco grupos de trabajo: WG1 (capa física), WG2 (capas 2 y 3), WG3 (interfaces fijos de la red de acceso), WG4 (aspectos de RF y RRM) y WG5 (conformidad de terminales). Los documentos del 3GPP se estructuran en Releases, cada una de ellas caracterizada por la incorporación de un conjunto de funcionalidades destacadas en relación a la versión anterior. Así, la que se llamó R99 (por el hecho de que se congeló en diciembre de 1999) supuso el primer conjunto de especificaciones UMTS. Seguidamente, tras la llamada R4, se completó en marzo de 2002 la R5 que incluye por ejemplo HSDPA. Tres años después se incorpora HSUPA así como MBMS en R6. En la R7 (septiembre de 2007) se incluye HSPA+, mientras que LTE/SAE se asocian ya a R8 y posteriores.

Puede decirse que el primer paso hacia LTE se llevó a cabo en noviembre de 2004, cuando 3GPP TSG RAN organizó un Workshop sobre "RAN Evolution" en Toronto (Canadá), en el que se presentaron unas 40 contribuciones con ideas, propuestas, etc. En el propio Workshop se identificaron una serie de requisitos de

alto nivel, como un coste por bit reducido, mejora en la provisión de servicios, flexibilidad en el uso de las bandas frecuenciales, arquitectura simplificada con interfaces abiertos, consumo de potencia en el terminal razonable, etc. También se puso de manifiesto que el esfuerzo de estandarización que esta evolución, bautizada como E-UTRAN (Evolved UTRAN), llevaría asociado sólo resultaría justificable si las mejoras fueran significativas (<http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en>, 12-05-2016).

En diciembre de 2004 se creó el Study Item "Evolved UTRA and UTRAN" para la evolución hacia una tecnología de acceso de elevada velocidad de transmisión, baja latencia y optimizada para la transmisión de paquetes, de modo que con ello quedase asegurada la competitividad de las soluciones 3GPP en un horizonte temporal largo. En particular, algunos de los objetivos de E-UTRA y E-UTRAN son:

- Velocidades de transmisión de pico de 100 Mbps en downlink y 50 Mbps en uplink, mejorando la velocidad de transmisión obtenible en el extremo de la célula.
- Mejora de la eficiencia espectral en un factor 2-4 con respecto a la Release 6.
- Latencia del plano de usuario en la red de acceso radio inferior a 10 ms.
- Ancho de banda escalable.
- Interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP.

Este primer periodo de trabajo concluyó con la aprobación del TR 25.912 en la reunión TSG-RAN #32 en junio de 2006. En TR 25.912 se recomendaba la creación de un Work Item sobre E-UTRA y E-UTRAN tomando como punto de partida el concepto de sistema reflejado en dicho documento, ya que los estudios realizados validaban su viabilidad. Tras considerarse y discutirse múltiples propuestas sobre la capa física, protocolos radio, arquitectura de red, aspectos de RF, consideraciones de complejidad, etc., algunas de las características principales incorporadas al concepto del TR 25.912 fueron:

- Esquema de acceso radio OFDMA en el downlink y SC-FDMA en el uplink.
- Soporte de packet scheduling en el dominio temporal y frecuencial
- Simplificaciones en la MAC y en el modelo de estados RRC, así como reducción del número de canales de transporte (no hay canales dedicados).
- Funcionalidades de packet scheduling, ARQ e HARQ terminadas en eNodeB.
- Simplificación de la arquitectura E-UTRAN y descentralización de la misma.

A partir de este estudio de factibilidad se pasó al desarrollo de tareas de especificación (Work Items). Para cada WI se establece un título y ámbito técnico, se define su resultado esperado (Technical Specification o Technical Report) e impacto sobre otros WIs así como el calendario de tareas. La primera versión completa de las especificaciones LTE se aprobó en diciembre de 2007. Durante 2008 el trabajo del 3GPP se centró en la finalización de Release 8, aunque también se han ido desarrollando con intensidad aspectos de Release 9 y Release 10, como se comentará en el apartado de LTE Advanced. Las especificaciones de Release 8 quedaron congeladas en diciembre de 2008, lo que significa que no se pueden añadir nuevas funcionalidades a esta versión, si bien se continúa el trabajo para completar los contenidos acordados.

Cabe destacar que las capacidades y prestaciones de E-UTRA y E-UTRAN establecidas corresponden a los objetivos fijados en la fase inicial de desarrollo de LTE, de manera que las prestaciones finalmente alcanzadas en muchos casos pueden superar los objetivos iniciales. Por ejemplo, la velocidad de pico teórica alcanzable en el downlink para 2x20 MHz (FDD), 64-QAM y 4x4 MIMO resulta de 326 Mbits/s. No obstante, si bien por la propia necesidad de sintetizar las capacidades de un sistema se tiende a proporcionar la velocidad de transmisión de pico, en términos de evaluación de prestaciones las principales métricas a considerar deben ser de otro tipo (por ejemplo, el percentil 95 de la distribución bits/s/MHz/célula). Así mismo, siendo una buena referencia la cota teórica a nivel de enlace, es fundamental evaluar las prestaciones a nivel de sistema en entornos

realistas (a través de simulaciones en una primera instancia y medidas de campo en una segunda).

En el contexto de la UIT, UTRA y E-UTRA (LTE) son el pariente europeo de la familia IMT-2000, ya que en realidad IMT-2000 no es una tecnología de acceso radio en sí misma, sino una familia de tecnologías que cumplen los requisitos establecidos por la UIT para IMT-2000 y que son aprobadas por la propia UIT. La principal recomendación IMT-2000 es UIT-R M. 1457J38], en la que se incluye una descripción de cada uno de los miembros de la familia IMT-2000 acompañada de una lista de referencias a las especificaciones detalladas. UIT-R WP5D se encarga de ir revisando dicha recomendación, dado el continuo desarrollo de los diferentes interfaces radio IMT-2000.

Cabe mencionar que en UIT-R M. 1457-7 (Revisión 7 del documento), aprobado en octubre de 2007, se incluyó también el estándar IEEE 802.16 (WiMAX), como un nuevo miembro de IMT-2000. Dentro también de las familias IMT-2000 se encuentra CDMA-2000 y UMB (Ultra Mobile Broadband), que constituyen el equivalente a UMTS y LTE en el marco de 3GPP2, y que en el recorrido desde 2G (con IS-95) hasta la evolución de 3G ha supuesto el principal polo de competencia a las tecnologías 3GPP. No obstante, el desarrollo de UMB ha quedado paralizado desde finales de 2008, cuando algunos de los principales motores de las comunicaciones móviles (Qualcomm, Verizon, etc) se inclinaron por LTE.

Veamos un fragmento de su prólogo del INFORME UIT-R M.2134 que se titula Los requisitos relacionados con el rendimiento técnico para la interfaz radioeléctrica IMT-Avanzadas.

IMT-Avanzadas se puede considerar desde múltiples perspectivas, incluyendo los usuarios, fabricantes, desarrolladores de aplicaciones, operadores de red y proveedores de servicios y contenidos de la Recomendación UIT-R M.1645 - Marco y en general los objetivos del futuro desarrollo de las IMT 2000 y sistemas posteriores a las IMT 2000 por lo tanto, se reconoce que las tecnologías para las IMT-avanzadas se pueden aplicar en una variedad de escenarios de implementación y pueden soportar una variedad de entornos, diferentes capacidades de servicios y opciones tecnológicas. La consideración de todas las

variantes para abarcar todas las situaciones, por lo tanto no es posible; sin embargo, el trabajo de la UIT-R ha sido determinar una visión representativa de las IMT-Avanzadas.

Los requisitos que se presentan en este documento son para el propósito de la definición consistente, especificación y evaluación de los candidatos para las IMT-Avanzadas en el UIT-R en relación con el desarrollo de Recomendaciones e Informes, tales como el marco y las características clave y las especificaciones detalladas de las IMT-avanzadas. La intención de estos requisitos es asegurar que las tecnologías IMT-Avanzadas son capaces de cumplir con los objetivos de IMT-Avanzadas y para establecer un nivel específico de rendimiento mínimo que cada tecnología propuesta tiene que alcanzar para ser considerado por el UIT-R para las IMT-Avanzadas.

Estos requisitos no pretenden restringir la gama completa de capacidades o prestaciones que las tecnologías candidatas para las IMT-Avanzadas podrían alcanzar, ni tiene la intención de describir cómo las tecnologías IMT-Avanzadas pueden realizar en las implementaciones reales en condiciones de funcionamiento que podrían ser diferentes del presentado en las Recomendaciones e Informes sobre las IMT avanzadas del UIT-R.

Los requisitos son para ser evaluados de acuerdo con los criterios definidos en el Informe UIT-R M.2135 - Requisitos, criterios de evaluación, y las plantillas de presentación para el desarrollo de las IMT-Avanzadas.

Requisitos del informe:

Los siguientes requisitos son para una tecnología de interfaz de radio (RIT) o un conjunto de tecnologías de interfaz de radio (SRIT).

Pico eficiencia espectral

La eficiencia espectral de pico es la más alta velocidad de datos teórica (normalizado por el ancho de banda), que es los bits de datos recibidos suponiendo condiciones libres de errores asignables a una sola estación móvil, cuando se utilizan todos los recursos de radio disponibles para la dirección de enlace correspondiente (es decir, excluyendo recursos de radio que se utilizan

para la sincronización de la capa física, señales de referencia o pilotos, bandas de seguridad y tiempos de guarda).

Los requisitos mínimos para eficiencias espectrales de pico son como sigue:

- La eficiencia del enlace descendente pico espectral es de 15 bits / s / Hz
- Pico de enlace ascendente eficiencia espectral es de 6.75 bits / s / Hz.

Estos valores fueron definidos suponiendo una configuración de antena de enlace descendente de 4 x 4, enlace ascendente 2 x 4.

Ancho de banda

Ancho de banda escalable es la capacidad de la RIT candidato para operar con diferentes asignaciones de ancho de banda. Este ancho de banda puede ser apoyado por las portadoras de RF individuales o múltiples.

El RIT apoyará un ancho de banda escalable hasta e incluyendo 40 MHz.

Se alienta a los proponentes a considerar extensiones para soportar el funcionamiento en anchos de banda más amplios (por ejemplo, hasta 100 MHz).

Control de latencia plano

Plano de control (C-Plane) latencia se mide típicamente como el tiempo de transición de diferentes modos de conexión, por ejemplo, desde el ralentí a estado activo. Un tiempo de transición (con exclusión de retardo de enlace descendente de paginación y de la red de telefonía fija de retardo de señalización) de menos de 100 ms será alcanzable de un estado inactivo a un estado activo de tal manera que se establece el plano de usuario.

Latencia plana de usuario

La latencia del plano de usuario (también conocido como retardo de transporte) se define como el tiempo de tránsito en un solo sentido entre un paquete de SDU está disponible en la capa IP en la estación terminal de usuario / base y de la disponibilidad de este paquete (unidad de datos de protocolo, PDU) en la capa IP en el terminal de la estación base / usuario. Usuario retardo de paquete plano incluye retardo introducido por protocolos asociados y el control de señalización asumiendo que el terminal de usuario está en el estado activo. Los sistemas IMT-avanzadas serán capaces de lograr una latencia plano de usuario de menos de 10 ms en condiciones sin carga (es decir, un único usuario con un único flujo de

datos) para los paquetes IP pequeños (por ejemplo, 0 byte de carga útil + cabecera IP) tanto para el enlace descendente y el enlace ascendente.

Movilidad

Se definen las siguientes clases de movilidad:

- Estacionario: 0 kmh
- Peatones:> 0 km / ha 10 kmh
- Vehicular: de 10 a 120 kmh
- Alta velocidad vehicular 120 350 km / h

Handover

El tiempo de entrega interrumpido (The handover interruption time) se define como la duración de tiempo durante el cual un terminal de usuario no puede intercambiar paquetes del plano de usuario con cualquier estación base. El tiempo de entrega interrupción incluye el tiempo necesario para ejecutar cualquier procedimiento de acceso por radio a la red, el protocolo de señalización de control de recursos de radio, u otros intercambios de mensajes entre el equipo de usuario y la red de acceso de radio, según sea aplicable a la RIT candidato o SRIT. A los efectos de determinar el tiempo de entrega de interrupción, las interacciones con la red central (es decir, entidades de la red más allá de la red de acceso de radio) se supone que se producen en el tiempo cero. También se supone que todos los atributos necesarios del canal de destino (es decir, se logra la sincronización de enlace descendente y procedimientos de acceso de enlace ascendente, en su caso, se haya realizado correctamente) se conocen en la iniciación de la transferencia desde el canal que sirve para el canal de destino (<http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en>, 12-05-2016).

Tipo de traspaso	Tiempo de interrupción (ms)
Intra-frecuencia	27.5
Inter-frecuencia	
- Dentro de una banda de espectro	40
- Entre las bandas del espectro	60

Tabla 6.4 Tiempos de traspaso de interrupción.

Capacidad VoIP

Se deriva suponiendo una 12,2 kbit/ s codificada con un factor de actividad de 50%, tal que el porcentaje de usuarios de corte es menor que 2%, cuando se define un usuario debe haber experimentado un corte de voz de menos de 98% de los paquetes de VoIP, si se han entregado con éxito al usuario dentro de un retardo de acceso de radio de una manera unida de 50 ms se considera dentro de rango.

La capacidad de VoIP es el mínimo de la capacidad calculada para cualquier dirección de enlace dividido por el ancho de banda efectivo en la respectiva dirección de enlace.

Estos valores se definen asumiendo una configuración de antena de 4 x 2 en el enlace descendente y 2 x 4 en el enlace ascendente. Sin embargo, la configuración de la antena no es un requisito mínimo.

Entorno de prueba	la capacidad mínima de VoIP (Los usuarios activos / sector / MHz)
Indoor	50
Microcelular	40
Base cobertura urbana	40
Alta velocidad	30

Tabla 6.5 Capacidad de VoIP.

LTE Advanced

Al tiempo que las especificaciones de UMTS R99 se estaban completando, la UIT inició las primeras consideraciones en la concepción de soluciones más allá de IMT-2000, conocido actualmente como IMT-Advanced y referido como 4G. La Resolución 228 (WRC-2000 y revisada en WRC-03) invitó a la UIT-R a estudiar en detalle los aspectos técnicos y operativos relativos al futuro desarrollo de IMT-Advanced. El marco general y los objetivos están definidos en la Recomendación UIT-R M.1645.

Por su parte, la Resolución UIT-R 57 establece los principios y criterios esenciales para el desarrollo de Recomendaciones para la interfaz radio IMT-Advanced. La UIT-R Circular Letter 5/LCCE/2 de marzo de 2008 invita a la presentación de propuestas candidatas para la interfaz radio IMT-Advanced. La Revisión 1 del documento IMT-ADV/2-E de agosto de 2008 establece el calendario de desarrollo de IMT-Advanced. El 7 de octubre de 2009 el 3GPP presentó la propuesta "LTE

Release 10 & beyond (LTE-Advanced)”, completando así el Step 3 de dicho proceso (recepción de candidatos). El documento de referencia para el 3GPP en este punto lo constituye la TR 36.912 v9.0.0.

Previendo el inicio del proceso IMT-Advanced en el seno de UIT, el 3GPP inició en marzo de 2008 el Study Item LTE-Advanced. El calendario del 3GPP está alineado con el calendario de la UIT, de manera que se espera completar las especificaciones de la Release 10 en la primera parte de 2011. Sin embargo, la visión dentro del 3GPP es que LTE-Advanced no debe limitarse a cumplir los requerimientos de IMT-Advanced, sino que debe perseguir unos objetivos mucho más ambiciosos.

LTE se concibe como el punto de inicio para una transición suave hacia el acceso radio 4G (esto es, IMT-Advanced) o, en otras palabras, LTE-Advanced es la evolución de LTE. En este sentido, LTE-Advanced debe asegurar toda una serie de requisitos en relación a la compatibilidad hacia atrás con LTE Release 8. En cuanto a compatibilidad espectral, LTE-Advanced debería poderse desplegar en bandas ocupadas por LTE. Así mismo, el equipamiento LTE debería poder incorporar las funcionalidades LTE-Advanced con una complejidad y coste razonablemente bajos.

Los requerimientos de LTE-Advanced establecidos en TR 36.913 [45] distinguen diferentes categorías: generales, capacidades (velocidad de transmisión de pico, latencias), prestaciones del sistema (eficiencia espectral, throughput en el extremo de la célula, movilidad, cobertura, etc), despliegue (espectro, coexistencia e interoperación con legacy RATs, etc), arquitectura E-UTRAN y migración, complejidad, coste, etc.

Para poder satisfacer los requerimientos establecidos (por ejemplo, soporte de velocidades de pico de hasta 1 Gbit/s en downlink y 500 Mbit/s en uplink), son necesarias una serie de mejoras técnicas con respecto a LTE (Release 8). Algunas de las principales componentes técnicas de LTE-Advanced son (http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/, 12-05-16) (<http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en>, 12-05-2016):

- Agregación de banda hasta 100 MHz, por ejemplo a partir de agregar múltiples componentes de 20 MHz para poder alcanzar un ancho de banda de 100 MHz y así proporcionar las velocidades de transmisión más elevadas previstas en los requerimientos.
- Extensión de soluciones multi-antena, con hasta 8 niveles en el downlink y 4 niveles en el uplink, para así incrementar las velocidades de transmisión alcanzables sobre el enlace.
- Coordinated multipoint transmission and reception (CoMP), que permite mejorar las prestaciones observables en el extremo de la célula a través de efectuar la transmisión/recepción desde distintas células. CoMP es un término relativamente general, que incluye diferentes tipos de coordinación (packet scheduling, beam-forming, etc.) entre transceptores separados geográficamente.
- Repetidores, como mecanismo para mejorar la cobertura y reducir el coste de despliegue.

6.6 Estado actual en México.

El lanzamiento de la red 4G/LTE en México abrió una nueva etapa en términos de conectividad móvil, especialmente en los celulares. Las tres principales compañías de telefonía celular en México: Telcel, AT&T y Movistar que anuncian esta red en su oferta de planes de dispositivos móviles.

No todas las conexiones disponibles actualmente en el mercado son redes 4G/LTE. Aquí presentamos una vista general de las características de cada una: Iusacell, ahora AT&T, fue una de las primeras empresas en ofrecer Internet móvil y, como tal, ha desarrollado varias redes. Es por eso que actualmente ofrece su cuarta generación de red móvil, la cual es 4G por ser su cuarta generación, aunque no es LTE. La cuarta generación de tecnología móvil que actualmente utiliza Iusacell es (HSPA+). Es importante señalar que la red HSPA+ es una red 3G más evolucionada que llega a ser muy rápida, pero no se compara con la 4G/LTE.

En el caso de Movistar su conexión 4G sí es LTE, aunque en la realidad no han podido implementarla del todo. Porque aún no cuentan con la infraestructura de

redes suficiente, además de que no tienen el equipamiento necesario, ya que a diferencia de Telcel o AT&T, Movistar no ofrecen chips compatibles con LTE, que hace que el equipo se conecte a estas redes.

Telcel es la única compañía en México que ofrece una red 4G/LTE, que ofrece 20Mbps de velocidad de descarga y que es 10 veces más rápida.

El IFT (Instituto Federal de Telecomunicaciones) prepara la próxima subasta de espectro para servicios móviles de valor agregado, el regulador ha afirmado que en la siguiente licitación de señales se privilegiará el factor de la cobertura por el de la recaudación; pero en el otro, esta postura no termina de convencer a los operadores, que consideran que el espectro es demasiado caro en México.

Algunos de los potenciales interesados en la siguiente puja de espectro han instado al Instituto Federal de Telecomunicaciones a reconsiderar su estimado de recaudación de lo que será la siguiente adjudicación de 80 MHz en las bandas de 1.7 y de 2.1 GHz, conocidas como AWS, y que se encuentran entre las más viables para ofrecer servicios 4G LTE (Figura 6.13 y 6.14).

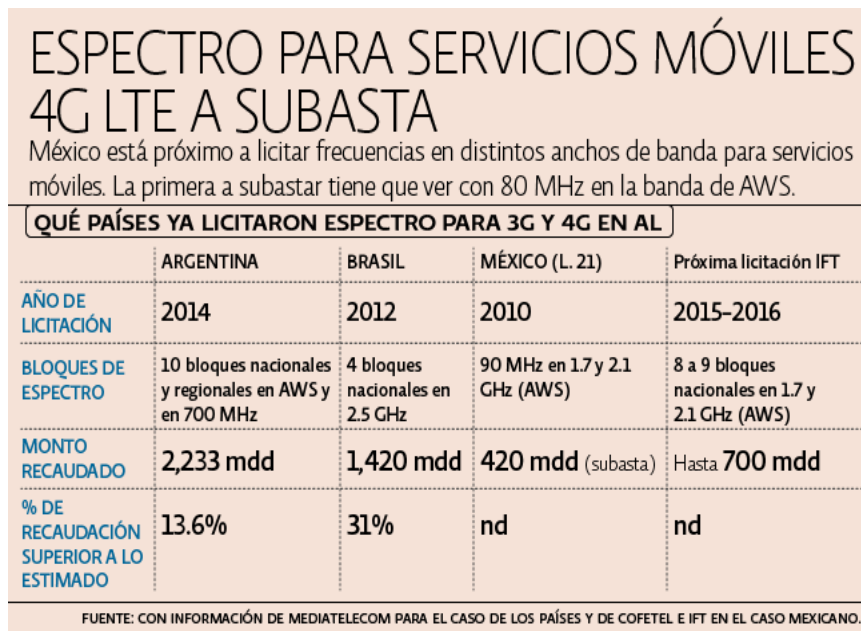


Figura 6.13 Cuadro de licitación de Espectro.

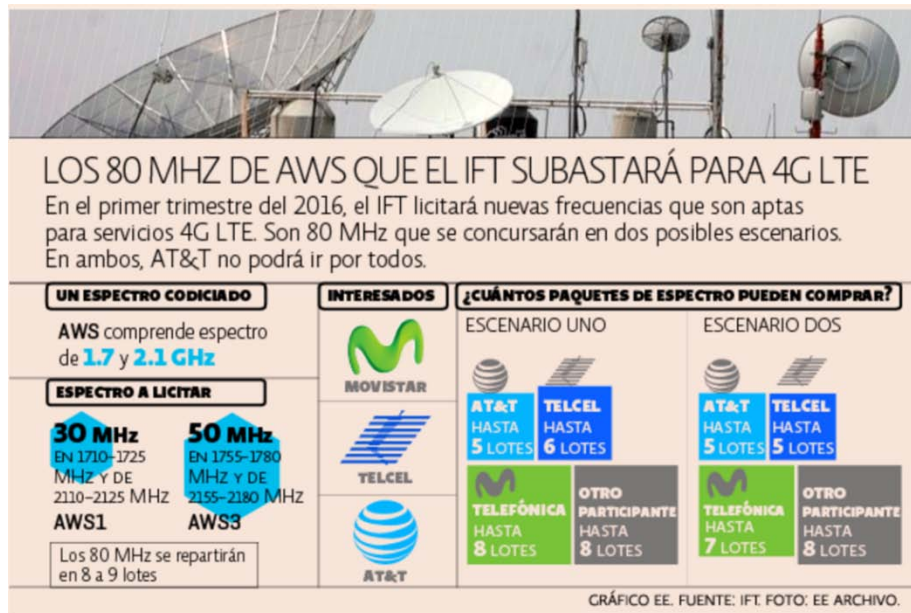


Figura 6.14 Espectro a subastar el IFT.

De esta manera, el tamaño de una población significará una importante variable, porque se traducirá como el potencial mercado que podrá ser atendido por el ganador del espectro en esas localidades.

El espectro es un recurso escaso. Es un bien que no está disponible siempre. Su precio se define por cómo ésta de competitivo el mercado y éste no es el mismo de hace unos años. Las empresas quisieran participar y pagar menos inversión, pero eso lo estará definiendo el mercado. Si el IFT pone muy altos los precios y si no hay competidores, bajarán los precios; pero cuando se haga la subasta, si hay dos o tres competidores como ellos (AT&T, Movistar, Telcel), el precio se puede multiplicar por varias veces (El Economista, 2015).

Actualmente en el país se está legislando para sustentar la bases jurídicas con la cual se pretende instalar una red compartida en la banda de frecuencia de los 700 MHz. Es un recurso muy bueno por su características que pudiera tener para su transmisión, a continuación se cita un fragmento de del diario oficial en el cual hace alusión a los acuerdos tomados para la red que se está proponiendo en México.

Modelo y uso de la banda de frecuencias de 700 MHz

1.1 Marco de actuación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

La SCT, conforme al artículo 36 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, tiene las siguientes atribuciones:

I. Formular y conducir las políticas y programas para el desarrollo del transporte y las comunicaciones de acuerdo a las necesidades del país;

I Bis.- Elaborar y conducir las políticas de telecomunicaciones y radiodifusión de Gobierno Federal; (...),XXVII. Las demás que expresamente le fijen las leyes y reglamentos.

Por otra parte, corresponde a la Subsecretaría de Comunicaciones (SSC), de conformidad con el punto 1.4 del apartado V del Manual de Organización General de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes:

- Dirigir, controlar y normar lo relativo a la administración, operación, prestación y fomento de los servicios de comunicaciones, con la finalidad de garantizar el acceso y ampliar la cobertura en materia de Telecomunicaciones.
- Otorgar los permisos y autorizaciones de los asuntos relativos a sus atribuciones; suscribir los contratos, convenios, acuerdos y documentos relativos a su competencia, (...), a fin de favorecer el desarrollo del país mediante el apoyo a tecnologías de comunicación más avanzadas.

En este contexto, dentro del Ejecutivo Federal, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y, en el seno de la misma, la Subsecretaría de Comunicaciones, es responsable de llevar a cabo el cumplimiento del artículo décimo sexto transitorio de la reforma constitucional en materia de telecomunicaciones¹, en coordinación con el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), que establece en lo conducente:

El Estado, a través del Ejecutivo Federal, en coordinación con el Instituto Federal de Telecomunicaciones, garantizará la instalación de una red pública compartida de telecomunicaciones (red compartida) (...).

- I. Iniciará la instalación antes de que concluya el año 2014, y estará en operación antes de que concluya el año 2018;
- II. Contemplará el aprovechamiento de (...) la banda 700 MHz (...) y de cualquier otro activo del Estado que pueda utilizarse en la instalación y

la operación de la red compartida; (...), 1.2 Activos del Estado para el desarrollo del proyecto red compartida

Un requisito fundamental para el desarrollo del proyecto es el asociado a la disposición de los activos del Estado, y particularmente, del espectro radioeléctrico en la banda de frecuencias de 700 MHz, a fin de integrar los mecanismos previstos en la legislación vigente que se traduzcan en elementos del proyecto que le otorguen certidumbre y que sienten las bases para garantizar su ejecución de manera exitosa².

La banda de 700 MHz es un segmento del espectro radioeléctrico identificado como “dividendo digital”, en virtud de su liberación por la transición a la Televisión Digital Terrestre (TDT).

Esta banda es idónea para servicios de comunicaciones móviles y por sus características de propagación es posible ofrecer una amplia cobertura.

En el artículo sexto, numeral décimo segundo, del “Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley del Impuesto al Valor Agregado; de la Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios; de la Ley Federal de Derechos, se expide la Ley del Impuesto sobre la Renta, y se abrogan la Ley del Impuesto Empresarial a Tasa Única, y la Ley del Impuesto a los Depósitos en Efectivo”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 11 de diciembre de 2013, se definió un proceso administrativo de valuación de derechos: “ el Estado, a través del Ejecutivo Federal, en coordinación con el Instituto Federal de Telecomunicaciones, una vez que se defina el modelo y uso asociado a las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico de 698 MHz a 806 MHz y de 2500 MHz a 2690 MHz, propondrá al Congreso de la Unión, en un plazo máximo de sesenta días naturales, los derechos por el uso, goce, aprovechamiento o explotación del espectro radioeléctrico, para que éste los apruebe en un plazo máximo de ciento veinte días.”

1.3 Consideraciones para el desarrollo del proyecto red compartida

En relación con la información que se ha expuesto en los numerales anteriores, se destaca que:

- El Constituyente fijó como fecha máxima para iniciar la instalación de la red compartida el 31 de diciembre de 2014[EN1].
- El proyecto red compartida implicará una inversión privada y, en su caso, pública aproximada de \$130,000 millones de pesos³ (10,000 millones de dólares aproximadamente).
- El artículo cuarto transitorio del Decreto de reforma constitucional mencionado estableció que el Congreso de la Unión habría de expedir la legislación secundaria en materia de telecomunicaciones a más tardar dentro de los ciento ochenta días naturales siguientes a la entrada en vigor de la reforma constitucional, siendo dicha legislación fundamental para la definición de diversos aspectos relativos a la red compartida.
- No obstante, el proceso legislativo se prolongó, dando como resultado que la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión se publicara en julio de 2014.
- El Ejecutivo Federal, por conducto de la SCT y el IFT, definirán el modelo y uso de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico de 700 MHz, a fin de desarrollar el procedimiento administrativo correspondiente para determinar los derechos a su uso, goce, aprovechamiento y explotación.
- 2.4 Compromisos del Pacto por México
- Al inicio de la actual administración federal, se firmó el Pacto por México entre la Presidencia de la República, los partidos políticos Acción Nacional, Revolucionario Institucional y de la Revolución Democrática.
- En cuanto a temas relacionados al internet se establecieron los siguientes compromisos:
- Compromiso 39. Derecho al acceso a la banda ancha y efectividad de las decisiones del órgano regulador
 - Se reformará la Constitución para reconocer el derecho al acceso a la banda ancha y con ello evitar que las empresas de este sector eludan las resoluciones del órgano regulador vía amparos u otros mecanismos litigiosos.
- Compromiso 41. Desarrollar una robusta red troncal del telecomunicaciones

- Se garantizará el crecimiento de la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), los usos óptimos de las bandas 700MHz y 2.5GHz y el acceso a la banda ancha en sitios públicos bajo el esquema de una red pública del Estado.
- Compromiso 42. Agenda digital y acceso a banda ancha en edificios públicos
 - Se creará una instancia específicamente responsable de la agenda digital que deberá encargarse de garantizar el acceso a internet de banda ancha en edificios públicos, fomentará la Inversión pública y privada en aplicaciones de telesalud, telemedicina y Expediente Clínico Electrónico, e instrumentará la estrategia de gobierno digital, gobierno abierto y datos abiertos.
- Compromiso 44. Competencia en telefonía y servicios de datos
 - Se regulará a cualquier operador dominante en telefonía y servicios de datos para generar competencia efectiva en las telecomunicaciones y eliminar barreras a la entrada de otros operadores, incluyendo tratamientos asimétricos en el uso de redes y determinación de tarifas, regulación de la oferta conjunta de dos o más servicios y reglas de concentración conforme a las mejores prácticas internacionales.
 - Se licitará la construcción y operación de una red compartida de servicios de telecomunicaciones al mayoreo con 90MHz en la banda de 700 MHz para aprovechar el espectro liberado por la Televisión Digital Terrestre.
 - Se reordenará la legislación del sector telecomunicaciones en una sola ley que contemple, entre otros, los principios antes enunciados.
- Los anteriores compromisos del Pacto por México han seguido los pasos requeridos para convertirse en políticas públicas al quedar debidamente establecidos en normas, planes y programas (Diario oficial de la Nación, 2013).

CAPÍTULO 7.

PROPUESTA DE DISEÑO DE ENLACE POR MEDIO DE MICROONDAS ENTRE CU Y LAS FACULTADES DE ESTUDIOS SUPERIORES.

7.1. Diseño de enlace punto a punto por medio de microondas.

Para realizar el diseño de una red de transmisión de voz y datos a través de microondas utilizando tecnología LTE, en primer instancia se identificaron las ubicaciones de las Facultades de Estudios Superiores (FES) y Ciudad Universitaria (Figura 7.1) mediante el uso del programa Google Earth versión 7.1.5.1557.



Figura 7.1. Ubicación de los sitios.

Con la finalidad de corroborar que los datos mostrados con Google Earth sean correctos, realizamos diferentes muestras, como se describe a continuación.

Mediante el uso de un GPS marca Garmin modelo nüvi 3590 LM y una aplicación móvil CommanderCompass Lite 3.7.11 se confirmó la ubicación de la FES Zaragoza campus 1 y 2, presentando valores iguales a los provenientes de Google Earth Versión 7.1.5.1557 siendo así que podemos confiar en dicho software para la localización de los sitios y proceder a realizar los enlaces.

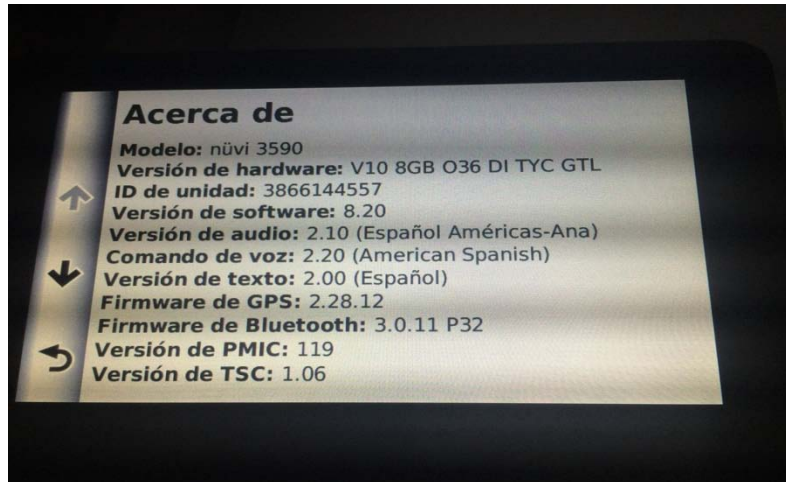


Figura 7.2. Características de GPS Garmin.

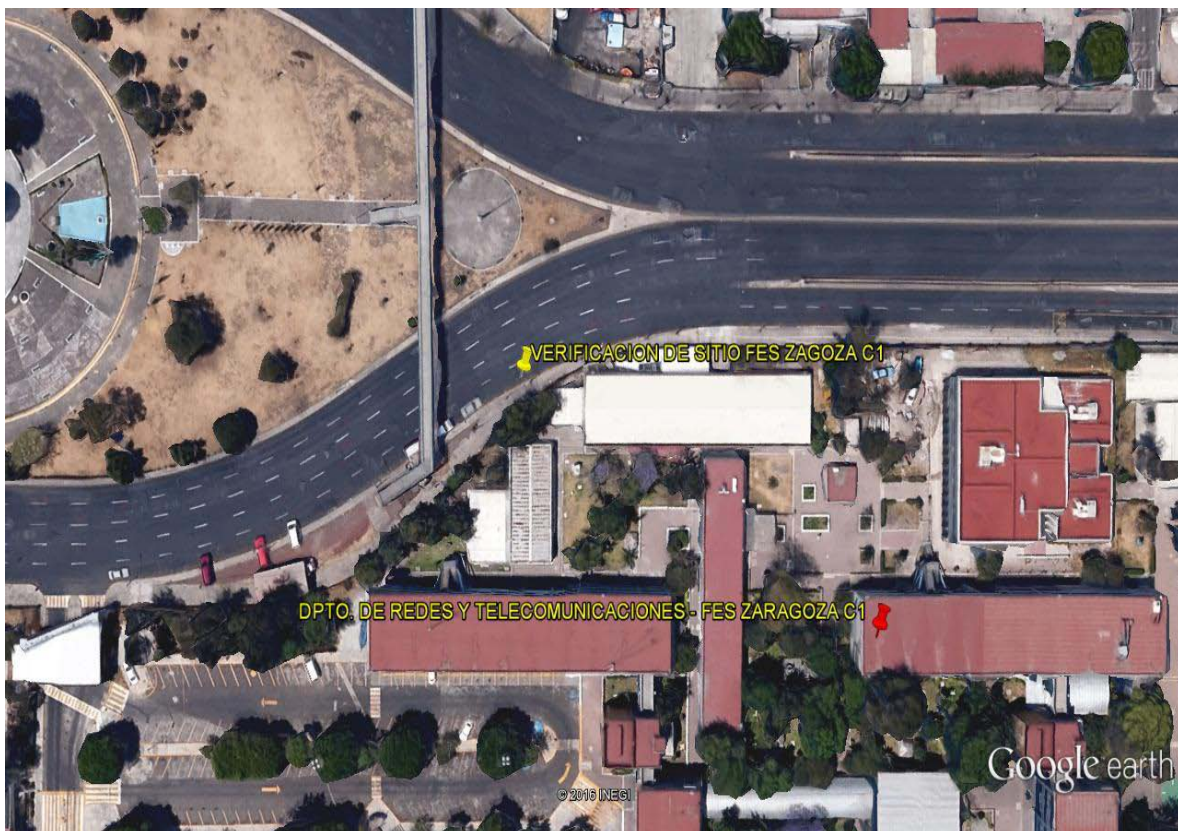


Figura 7.3. Verificación de sitio FES Zaragoza (Campus 1).



Figura 7.4. Verificación de sitio FES Zaragoza (Campus 2).

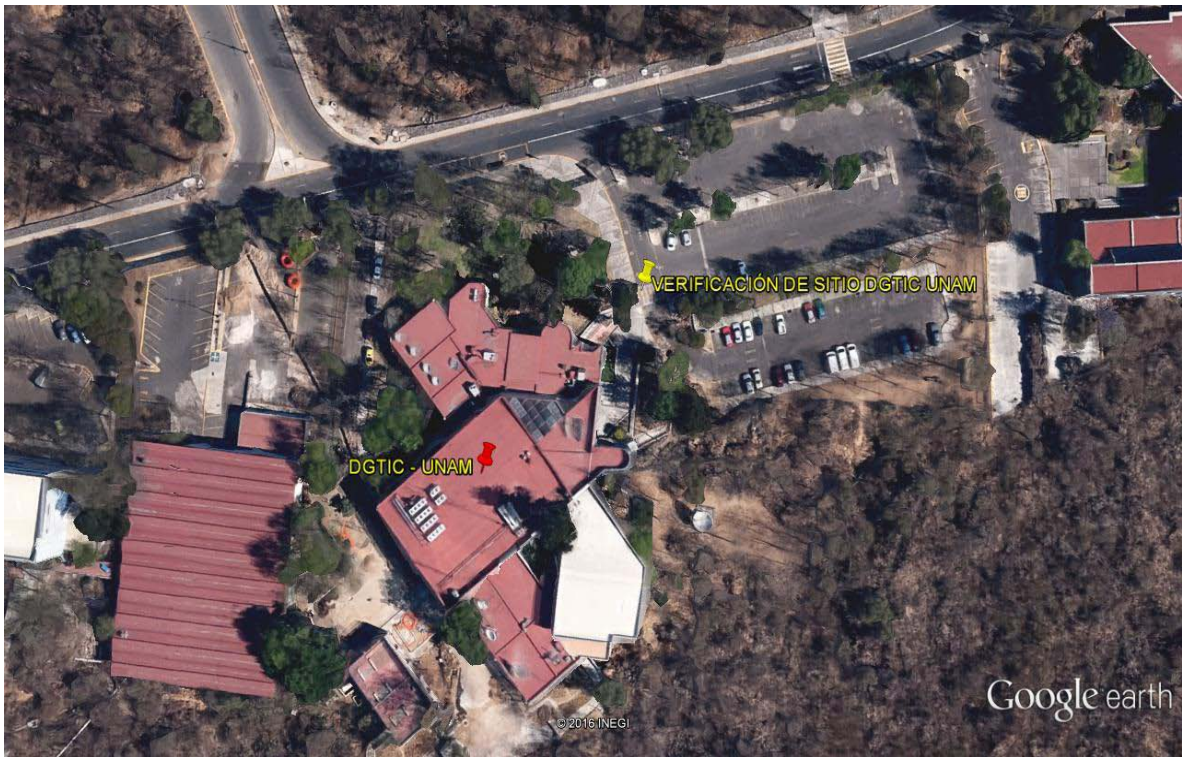


Figura 7.5. Verificación de sitio DGTIC, UNAM.

Sitio	Google Earth	GPS Garmin	CommanderCompass
FES Zaragoza (Campus 1)	19°23'0.58"N 99° 2'17.67"O	19°23'0.32"N 99° 2'18.3"O	19°23'0.0"N 99° 2'17"O
FES Zaragoza (Campus 2)	19°22'16.37"N 99° 2'10.72"O	19°22'26"N 99° 2'18"O	19°22'15"N 99° 2'11"O
DGTIC UNAM	19°19'21.22"N 99°11'3.77"O	19°19'34"N 99°11'06"O	19°19'21"N 99° 11'03"O

Tabla 7.1 Comparativo de coordenadas geográficas obtenidas por diferentes dispositivos.

De igual forma se corroboraron las coordenadas en sitio de las FES Cuautilán Campos 1 y 4 con la ayuda de la aplicación para smartphones Mobile Topographer, presentando valores iguales a los provenientes de Google Earth Versión 7.1.5.1557 (Figura 7.6 y 7.7)

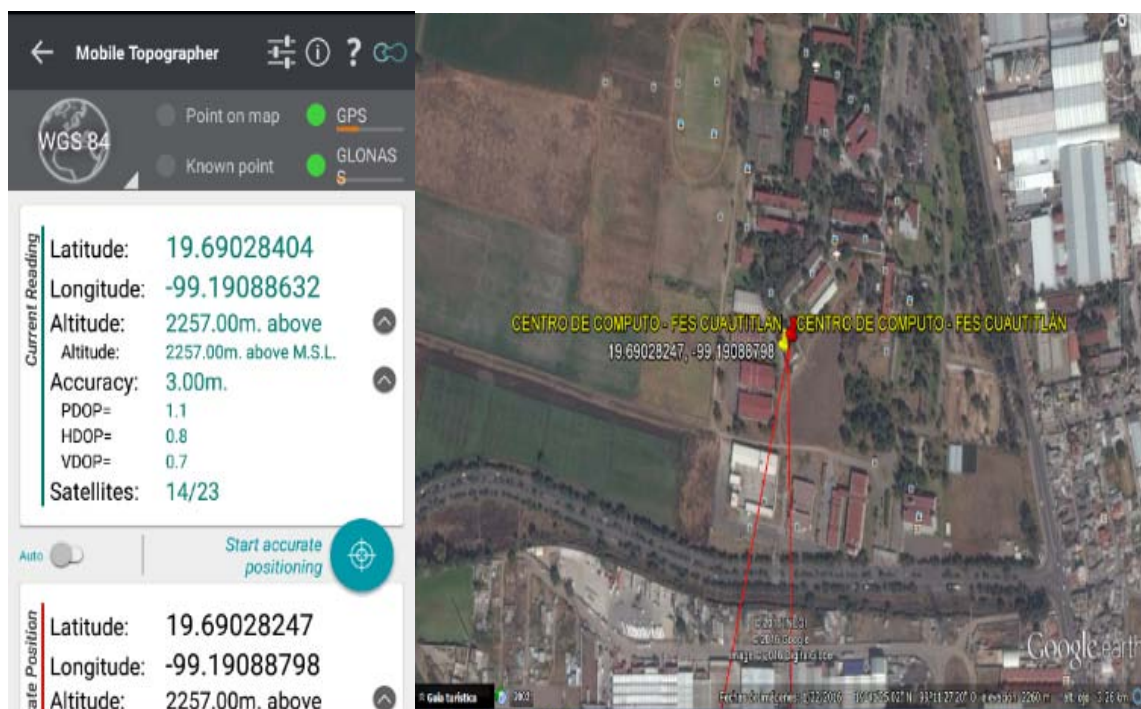


Figura 7.6 Verificación de coordenadas en FES Cuautilán Campus 4.

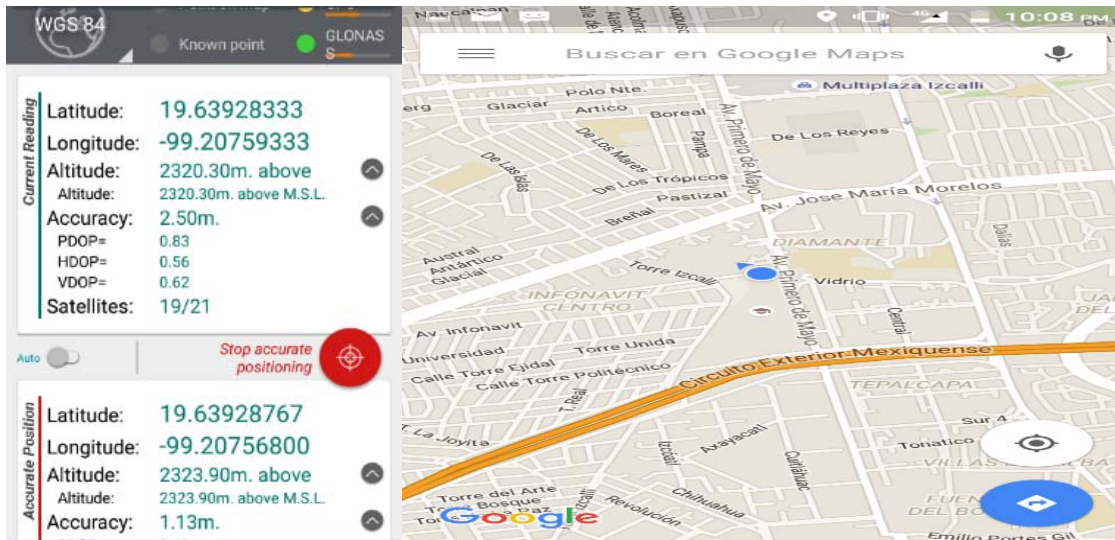


Figura 7.7 Corroboracion de coordenadas en FES Cuautitlán Campus 1.

En la Tabla 7.2 se presentan los datos de ubicación geográfica de los diferentes puntos de enlace.

Puntos de enlace	Abreviatura	Dirección	Coordenadas
Dirección General de Cómputo y de Tecnología de Información y Comunicación (DGTIC).	DGTIC	Ciudad Universitaria Circuito Exterior s/n, Coyoacán, 04510, Ciudad de México.	19°19'20.44"N 99°11'4.72"O
FES Acatlán Departamento del Centro de Desarrollo Tecnológico (CeDeTec).	FESA	Avenida Alcanfores y San Juan Totoltepec s/n, Col. Santa Cruz Acatlan, 53150 Naucalpan de Juárez, Edo de México.	19°29'8.25"N 99°14'49.88"O
FES Iztacala. Unidad de Sistemas, Telecomunicaciones y Computo.	FESI	Av. De los Barrios 1 Colonia Los Reyes Iztacala. 5409 Tlalnepantla. Estado de México.	19°31'31.94"N 99°11'19.13"O
FES Cuautitlán Campus 1 Centro de Cómputo	FESCC1	Av. 1ro de Mayo S/N, Santa María las Torres, 54740, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.	19°38'13.84"N 99°12'27.60"O
FES Cuautitlán Campus 3	FESCC3	Av. Dr Jorge Jiménez Cantú, INFONAVIT Norte	19°40'24.44"N 99°12'33.94"O

		54729 Cuautitlán Izcalli, Estado de México.	
FES Cuautitlán Campus 4 Centro de Cómputo	FESCC4	Km 2.5 Carretera Cuautitlán-Teoloyucan, Col. San Sebastián Xhala, 54714. Cuautitlán Izcalli, Estado de México.	19°41'30.43"N 99°11'23.92"O
FES Aragón Unidad de Sistemas y Servicios de Computo.	FESAR	Av. Rancho Seco s/n, Impulsora Popular Avícola, 57130 Nezahualcóyotl, Estado de México.	19°28'32.13"N 99° 2'45.15"O
FES Zaragoza Departamento de Redes y Telecomunicaciones (Campus 1).	FESZ1	Avenida Gelatao 66, Iztapalapa, Ejercito de Oriente, 09230 Ciudad de México.	19°22'54.94"N 99° 2'17.45"O
FES Zaragoza Edificio de Gobierno (Campus 2).	FESZ2	Batalla 5 de Mayo S/N, esquina Fuerte de Loreto, Iztapalapa, Ejercito de Oriente, 09230 Ciudad de México.	19°22'17.24"N 99° 2'7.47"O

Tabla 7.2 Datos de ubicación geográfica de puntos de enlace.

Inicialmente se realizó un diseño en forma de anillo (Figura 7.8). Se analizó la diferencia de elevación de punto a punto con ayuda del programa Google Earth, encontrando obstáculos en la trayectoria, de una magnitud tal que causarían interferencia a la señal transmitida.



Figura 7.8 Diseño de enlace en forma de anillo.

A continuación se presenta el análisis punto a punto de todo el anillo. En la figura 7.9 se presenta el análisis de diferencia de elevación entre CU y FESA que tiene una distancia de 19.4 km y se observa que en el kilómetro 9.19 hay un obstáculo de 82 metros. Se encontró otro obstáculo en el kilómetro 4.59 con una elevación de 149 metros (Figura 7.9c) entre FESI y FESCC4 con distancia de 18.6 km. De igual manera entre FESCC4 y FESAR con distancia de 28.6 km (Figura 7.10a) se encontró un obstáculo de 564 metros en el kilómetro 12.6. Es importante resaltar que en las trayectorias de FESA – FESI con distancia de 7.64 km (Figura 7.9b), FESAR – FESZC1 con distancia de 10.5 km (Figura 7.10b) y FESZC1 – DGTIC con distancia de 16.8 km (figura 7.10c) no se encontraron obstáculos.

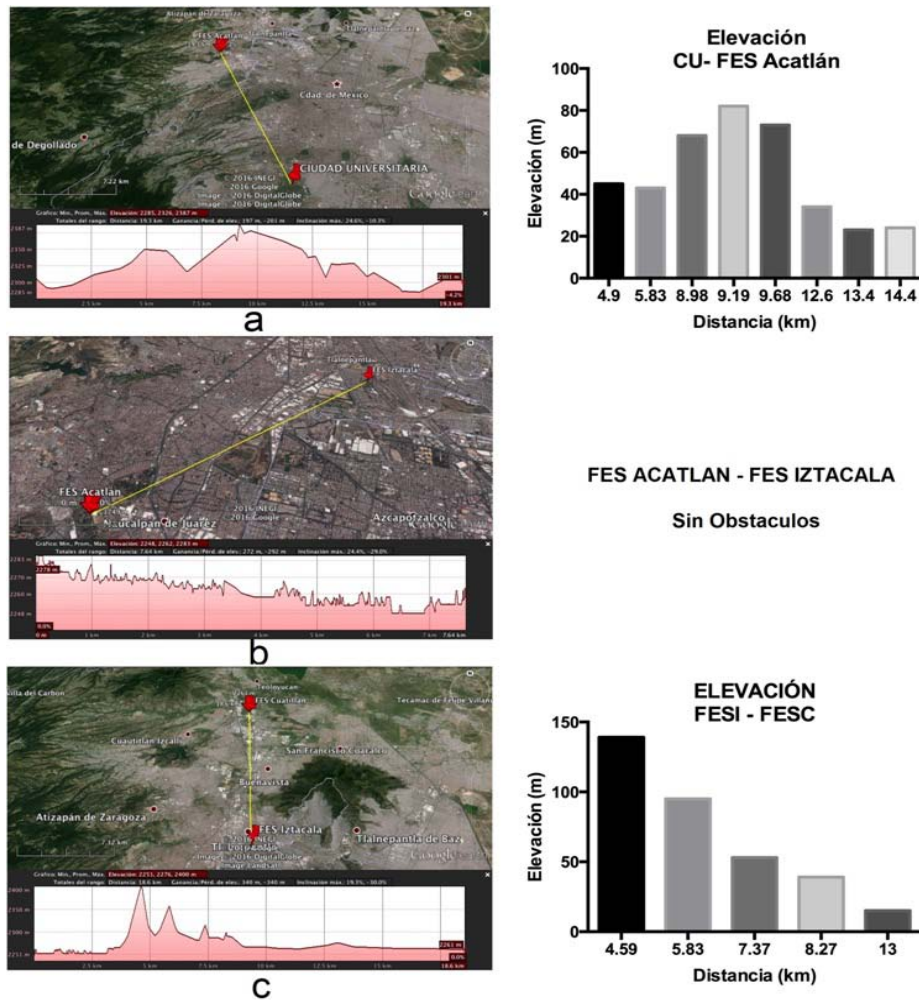


Figura 7.9 Análisis de diferencia de elevación.

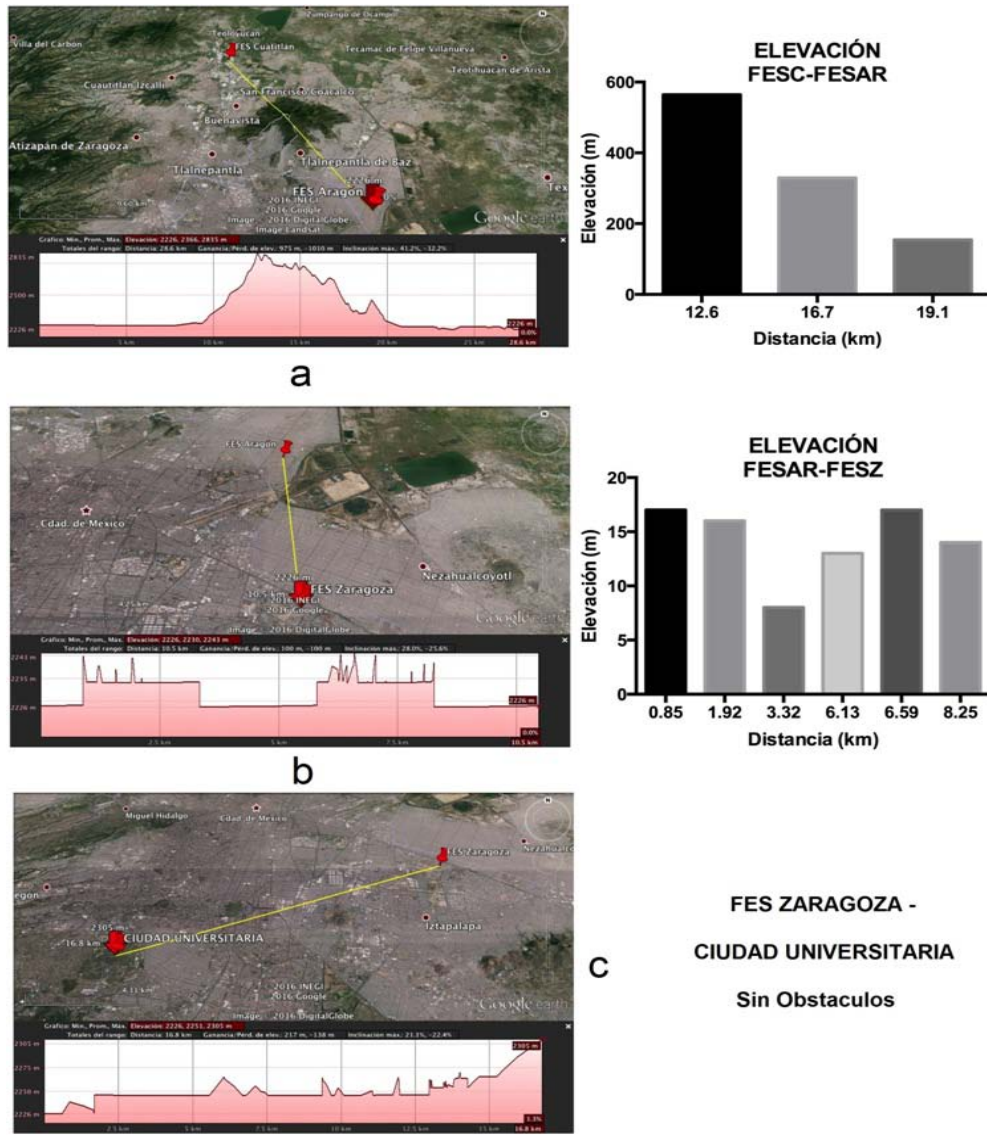


Figura 7.10 Análisis de diferencia de elevación.

Debido a lo anterior se optó por realizar otro diseño, tipo estrella, en el cual todas las FES se comunicarían con el sitio central DGTIC. Este se muestra a continuación (Figura 7.11).

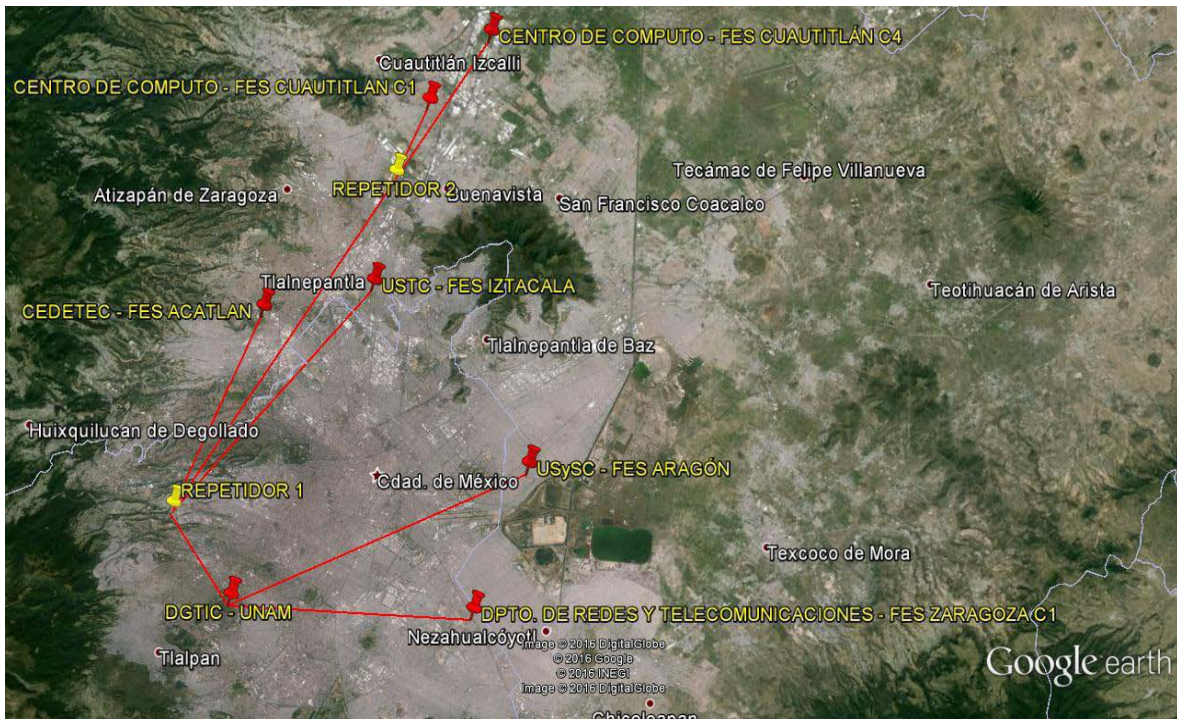


Figura 7.11 Diseño de enlace en forma de estrella.

En el caso particular de FES Zaragoza que consta de dos campus, únicamente se propone el enlace con el campus 1 debido a que el campus 2 es principalmente una instalación deportiva. De igual forma para la FES Cuautitlán que inicialmente contaba con 4 campus, únicamente se consideran los campus 1 y 4, debido a que campus 2 ya no existe; ya que pasó a formar parte del campus 4, y en campus 3 únicamente hay Centro de Idiomas y laboratorios de Ingeniería Agrícola y Mecánica.

Al igual que en el primer diseño se realizó un análisis de la elevación de punto a punto con el programa Google Earth, en el cual los únicos sitios en donde se puede realizar un enlace sin obstáculos es entre DGTIC – FES Zaragoza campus 1 y DGTIC – FES Aragón, sin embargo debido a la orografía donde se sitúan los demás sitios se proponen dos repetidores: repetidor 1 ubicado en Cda. Rancho Viejo casi esq. Av Centenario, Col. Llano Redondo, 1540, Alvaro Obregon, CDMX y repetidor 2 Cerro Barrientos, entre los límites de Tlalnepantla y Cuautitlan Izcalli, Estado de México. En la Tabla 7.3a se muestra la localización geográfica de los repetidores y en la Tabla 7.3b se presentan los resultados obtenidos de dicho análisis.

Puntos de enlace	Abreviatura	Dirección	Coordenadas
REPETIDOR 1.	REP1	Cda. Rancho Viejo casi esq. Av Centenario, Col. Llano Redondo, 1540, AlvaroObregon, CDMX	19°21'15.69"N 99° 14'38.11"O
REPETIDOR 2	REP2	Cerro Barrientos, entre los limites de Tlalnepantla y Cuautitlan Izcalli, Estado de México.	19°35'24.12"N 99° 12'23.94"O

Tabla 7.3a Localización geográfica de los repetidores.

ENLACE PUNTO A PUNTO					ELEVACIÓN MÁXIMA	
Origen	Elevación inicial (m)	Destino	Elevación final (m)	Distancia (km)	Altura (m)	Distancia (km)
DGTIC	2313	FESZC1	2243	16.9	2313	0
DGTIC	2313	FESAR	2241	22.5	2313	0
DGTIC	2313	REP1	2555	7.21	2555	7.21
REP1	2555	FESI	2259	20.3	2555	0
REP1	2555	FESA	2291	14.3	2555	0
REP1	2555	REP2	2437	26.7	2555	0
REP2	2437	FESC1	2315	5.27	2437	0
REP2	2437	FESC4	2266	11.3	2437	0

Tabla 7.3 b. Análisis de línea de vista.

7.2 Estudio del tipo de suelo para selección de sitio.

Los geólogos definen los suelos o terrenos como rocas alteradas, mientras que los ingenieros prefieren definirlos como el material que sostiene o carga el edificio por su base. Los materiales que están presentes en los suelos naturales se clasifican en cuatro tipos:

- arenas y grava
- limos
- arcillas
- materia orgánica.

Para hacer un análisis completo veremos cada delegación o Municipio en los que interviene nuestras radiobases.

Delegación Coyoacán.

En la mayor parte de superficie, Coyoacán presenta dos tipos de suelo: el de origen volcánico y una zona de transición (Tabla 7.4) ([http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/coyoacan\[1\].pdf](http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/coyoacan[1].pdf), 02-07-16).

Suelo	Clase	Tipo de suelo (resistencia)
Volcánico	Utosol, basalto de olivino	Suelo de alta compresión. Permeable 10 0 más duro
Transición	Feozem	Suelo de buena compresión. Permeable 9 0 más semiduro.

Tabla 7.4 Tipo de suelo en la delegación Coyoacán.

Municipio de Naucalpan.

Geológicamente el territorio de Naucalpan está formado por rocas del período Terciario de la era Cenozoica, y en menor medida, del período Cuaternario. La mayor parte de las rocas son ígneas extrusivas, volcanoclásticas y sedimentarias (http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/naucalpan/DocNaucalpan.pdf, 02-07-16).

Delegación Álvaro Obregón.

El relieve de la delegación comprende dos regiones: la de llanuras y lomeríos y la región de las montañas y los pedregales. La primera comprendida al oriente de la delegación, en sus límites con Benito Juárez y Coyoacán y al poniente hasta la base de la Sierra de las Cruces. Aquí están comprendidas las tierras bajas y llanas, casi al nivel del antiguo lago de Texcoco; los lomeríos pueden considerarse hasta los faldeos de las altas montañas del sur y del poniente. Las llanuras y los lomeríos no ofrecen grandes diferencias, pues la altura de las lomas, con respecto al nivel de la llanura, no excede los 100 m; tienen una altura sobre el nivel del mar de unos 2.265 m y los lomeríos de unos 2.340 m por término medio. Sus pendientes son de 1.5° y están constituidas por una red de barrancos que alternan con divisorias de anchura máxima de 100 m.

La llanura es la región más adecuada para la vida humana y para el desarrollo de las industrias; fueron los lugares más densamente poblados de la delegación.

La región de los pedregales se originó a partir de las erupciones del volcán Xitli, tiene una altitud de 3.050 msnm, su falda norte está cubierta de lava volcánica que se extendió hacia las poblaciones de Tizapán, Chimalistac, Copilco y Coyoacán, por el Oeste a San Jerónimo y Contreras y por el este a Tlalpan y Santa Úrsula. Este pedregal ocupa una superficie de 90 Km². La altura media de los pedregales es de 2.750 msnm; el espesor varía entre 4 y 10 m.

La descripción antes señalada se encuentra reflejada por la clasificación del Reglamento de Construcciones, ya que se conforma por la Zona II de Transición, en una pequeña porción al oriente de la delegación, coincidiendo con la zona de llanura y lomeríos, a la que pertenece la mayor parte de la Delegación y que abarca de la parte central hacia el poniente ([http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/alvaro\[1\].pdf](http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/alvaro[1].pdf), 02-07-16).

Municipio de Tlalnepantla.

El tipo de suelo predominante en la zona plana es regosol, acompañado de litosoles y de afloramiento de rocas de tepetate, mientras que en la Sierra de Guadalupe el suelo es de tipo feozem háplico, con una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes; aunque se erosiona con facilidad.

Los regosoles (del griego reghos, mamo) son suelos muy jóvenes, generalmente resultado del depósito reciente de roca y arena acarreadas por el agua; de ahí que se encuentren sobre todo al pie de las sierras, donde son acumulados por los ríos que descienden de la montaña cargados de sedimentos.

Litosol del griego lithos: piedra. Literalmente, suelo de piedra. Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido.

(http://pacmun.org.mx/wp-content/uploads/2012/02/TLALNEPANTLA_1.pdf, 02-07-16).

Municipio de Cuautitlán Izcalli.

La estructura geológica que presenta el municipio de Cuautitlán se encuentra conformada principalmente por rocas clásticas y volcanoclásticas, mismas que resultan principalmente de la actividad volcánica y por el relleno de depresiones.

Se identifican dos tipos de suelo que según su origen geológico son aluviones, formados a través del acarreo de las partes altas del municipio y suelos residuales, que se forman en el sitio. Los aluviones se ubican en la mayor parte del territorio municipal y las areniscas y tobas en los lomeríos (http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/cuautitlan/PMDUCUAUTITLaN.pdf, 02-07-16).

Municipio de Nezahualcóyotl.

El municipio de Nezahualcóyotl se encuentra asentado por entero sobre suelo de origen lacustre. Las características geológicas del municipio se refieren a los distintos materiales de origen aluvial arrastrados en las diferentes épocas geológicas. La roca madre (basalto), se encuentra a una profundidad de hasta 800 metros, bajo un acuitardo de arcillas expansivas.

(http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/nezahualcoyotl/DOCUMENTO%20NEZA%2002-09-04.pdf, 02-07-16).

Delegación Iztapalapa.

En superficie, la geología de la zona de la Delegación Iztapalapa, corresponde al valle lacustre, piedemonte y estructuras volcánicas. La zona del lago está formada por secuencias arcillosas, limos y arenas con diferentes grados de cementación y consolidación. La zona de transición, que corresponde a la franja que delimita la zona del lago, está dividida en abrupta y gradual o estratificada. La zona de lomas incluye las elevaciones mayores en Iztapalapa que corresponden a edificios volcánicos de la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués.

En la secuencia estratigráfica somera predominan los sedimentos de ambiente lacustre y en algunas zonas aledañas a los edificios volcánicos se encuentran depósitos de aluviales y coluviales (de pendiente) a diferentes profundidades. Las depresiones topográficas localizadas entre las edificaciones volcánicas no solo

presentan relleno sedimentario en el subsuelo, sino también secuencias compuestas por material piroclástico con diferentes grados de consolidación y rocas volcánicas.

(http://www.inapam.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/2612/Atlas_Estados/09007_IZTAPALAPA/1_ATLAS_DE_RIESGOS.pdf, 02-07-16).

Con esta información procederemos a clasificar el tipo de suelo en cada uno de los puntos de la instalación de las torres.

Radio base	Delegación	Tipo de suelo		Conclusión del Tipo de suelo
Ciudad Universitaria (DGTIC)	Coyoacán	Lomerío	Suelo Duro	Sólido
FES Aragón	Nezahualcóyotl	Lacustre	Suelo medio	Sólido
FES Zaragoza Campus 1	Iztapalapa	Lacustre	Suelo blando	Sólido poco estable
REPETIDOR 1	Álvaro Obregón	Lomerío	Suelo Duro	Sólido
FES Acatlán (CeDeTec)	Naucalpan de Juárez	Lomerío	Suelo Duro	Sólido
FES Iztacala	Tlalnepantla	Lomerío	Suelo Duro	Sólido
REPETIDOR 2	Tlalnepantla y Cuautitlán Izcalli	Lomerío	Suelo Duro	Sólido
FES Cuautitlán Campus 1	Cuautitlán Izcalli	Lomerío	Suelo Duro	Sólido
FES Cuautitlán Campus 4	Cuautitlán Izcalli	Lomerío	Suelo Duro	Sólido

Tabla 7.5 Tipo de suelo para instalación de Torres.

Como podemos ver el único punto donde podríamos tener problemas en la instalación de la torre es en Fes Zaragoza debido al terreno, más adelante veremos la especificación de las torres para ver si podría verse afectado el suelo.

7.3 Análisis de enlace y selección de trayectoria.

Para asegurar un diseño de enlace óptimo entre cada posición, se calculo la línea de visión óptica y la línea de visión efectiva con las siguientes ecuaciones, 7.1 y

7.2 respectivamente:

$$d = 3.57\sqrt{h} \quad (\text{Ec. 7.1}) \quad d = 3.57\sqrt{Kh} \quad (\text{Ec. 7.2}) \quad (\text{Stallings, 2004})$$

En donde d =distancia entre la antena y el horizonte en kilómetros, h es la altura de la antena en m y K es un factor de ajuste que toma en cuenta la refracción $K = 4/3$. En la tabla 7.6a se presentan los valores de LOS óptica y efectiva.

Punto de enlace	Línea de visión óptica (km)	Línea de visión efectiva (km)
DGTIC	172.4	199.1
FESAR	169.8	196.0
FESZC1	169.8	196.1
REP1	181.5	209.6
FESA	171.6	198.2
FESI	170.4	196.8
REP2	177.0	204.3
FESCC1	172.5	199.2
FESCC4	170.7	197.1

Tabla 7.6a Línea de visión óptica y visión efectiva para los puntos de enlace.

En la tabla 7.6a se observan resultados de LOS óptica y LOS efectiva, indicando que el diseño propuesto, permite realizar los enlaces. Por lo anterior se proponen torres de 20m a excepción de REP1 (30m) debido a su orografía. En la tabla 7.6b se presentan las elevaciones de los puntos de enlace.

Punto de enlace	Elevación nivel del suelo (m)	Altura de edificio (m)	Altura de torre (m)	Elevación total (m)
DGTIC	2303	10	20	2333
FESAR	2230	11	20	2261
FESZC1	2233	10	20	2263
REP1	2555	NA	30	2585
FESA	2285	6	20	2311
FESI	2250	9	20	2279
REP2	2437	NA	20	2457
FESCC1	2309	6	20	2335
FESCC4	2260	6	20	2286

Tabla 7.6b Elevación de puntos de enlace.

7.3.1 Línea de vista o trayectoria directa.

Para determinar la trayectoria directa entre dos puntos se emplea la ecuación de la recta (Ec. 7.3a)

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (\text{Ec. 7.3a})$$

En la cual al despejar y se obtiene lo siguiente:

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_i + y_1 [m] \quad (\text{Ec. 7.3b})$$

En donde:

y = trayectoria directa

x_i = distancia (m)

y_1 = elevación del punto inicial (m)

x_1 = distancia del punto inicial (m)

y_2 = elevación del punto final (m)

x_2 = distancia del punto final (m)

A continuación se presentan los cálculos de trayectoria directa para el enlace de DGTIC- FESZC1, en donde (x_1, y_1) es (0, 2333) y (x_2, y_2) es (16900, 2263):

$$y = \frac{2263 - 2333}{16900} x_i + 2333 [m]$$

En donde x_i serán los valores de distancia que contienen las alturas máximas del enlace. En la Tabla 7.7a se presentan los resultados de este cálculo.

Distancia (m)	Trayectoria directa (m)
0	2333
2500	2322.6
5000	2312.3
7500	2301.9
11600	2285.0
12500	2281.2
16900	2263

Tabla 7.7a Cálculos de trayectoria directa.

Se realizó este cálculo para cada uno de los enlaces para corroborar que la altura de antenas propuestas sea la óptima, también se determinó la zona de Fresnel (Ec. 7.4) (Pérez, 2007).

$$r = 547 \sqrt{\frac{d_r d_r}{fd}} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

En donde:

d_T = distancia del transmisor al punto de reflexión (km)

d_R = distancia del receptor al punto de reflexión (km)

d = distancia total entre transmisor y receptor (km) ($d_T + d_R$)

f = frecuencias en MHz

r = radio de la primera zona de Fresnel (m)

Continuando con el ejemplo del enlace DGTIC-FESZC1, al sustituir la ecuación para la distancia de 2.5 km se obtiene lo siguiente:

$$r = 547 \sqrt{\frac{2.5 \times 14.4}{2500 * 16.9}}$$

(Distancia)km	dt	dr	Zona de Fresnel (m)
0	0	16.9	0
2.5	2.5	14.4	16.0
5	5	11.9	20.5
7.5	7.5	9.4	22.3
11.6	11.6	5.3	20.9
12.5	12.5	4.4	19.7
16.9	16.9	0	0

Tabla 7.7b Cálculos de zona de Fresnel.

Se realizó el cálculo de la zona de Fresnel para todos los puntos. Con los cálculos de trayectoria directa y zona de Fresnel se generaron las siguientes figuras:

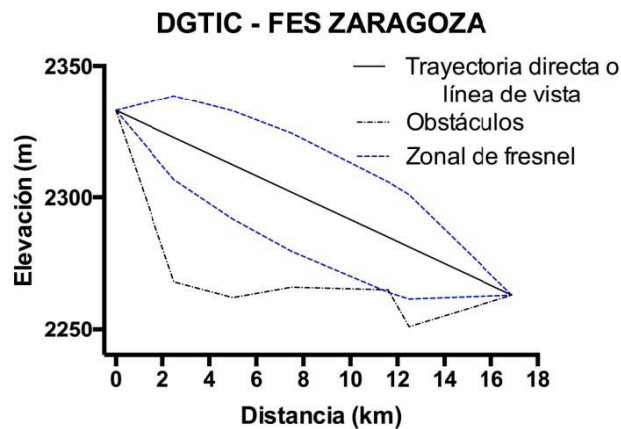


Figura 7.13a Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace DGTIC-FESZC1.

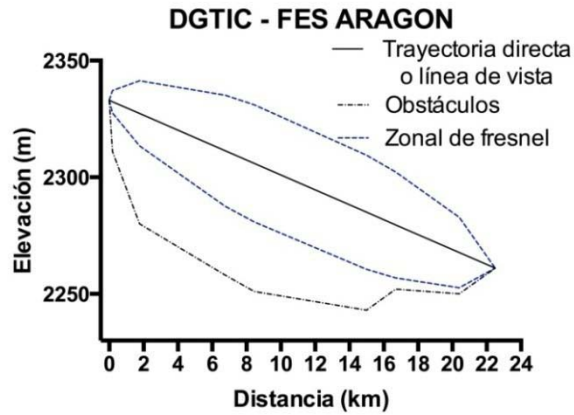


Figura 7.13b Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace DGTIC-FESAR.

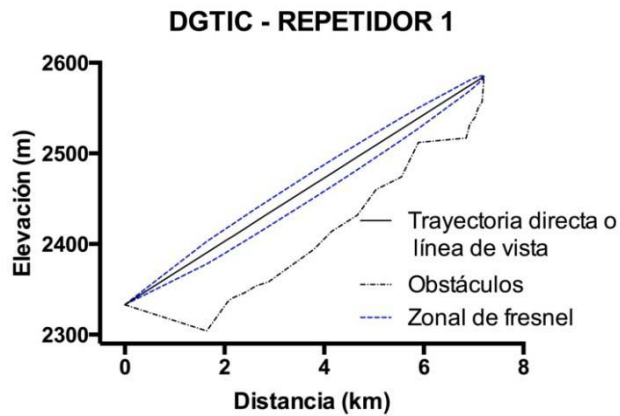


Figura 7.13c Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace DGTIC-REP1.

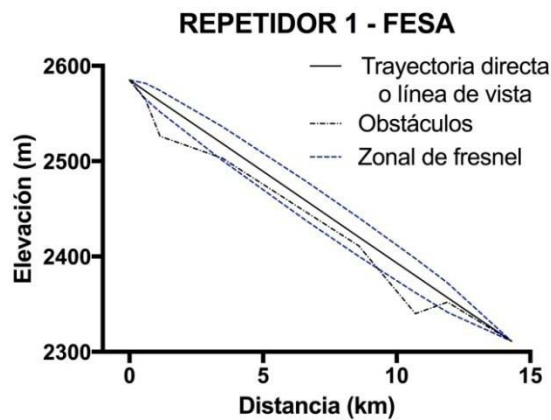


Figura 7.13d Trayectoria directa y zona de Fresnel del enlace REP 1 - FESA.

De acuerdo a la Figura 7.13d se observa que la altura del obstáculo no interfiere con la línea de vista pero si con la zona de Fresnel, por lo que se reduce al 60% y se observa que sigue habiendo interferencia (Figura 7.13e), por lo que se opta por calcular la altura de despeje lo que nos permitirá librar el obstáculo con zona de Fresnel al 60%.

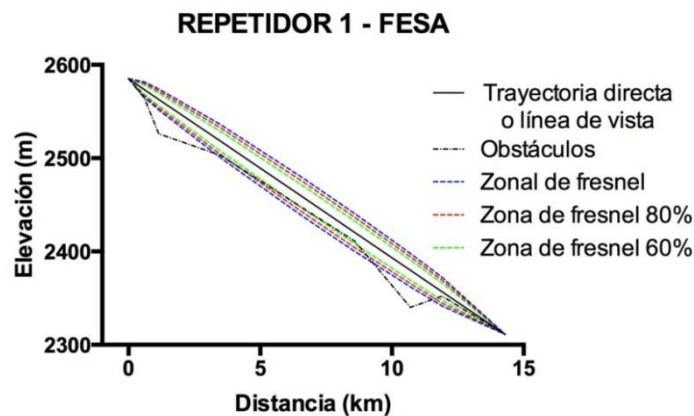


Figura 7.13e Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1- FESA.

De acuerdo a los cálculos y gráficos para el enlace entre REP1- FESA (Figura 7.13d) se encontró que el obstáculo de 2411 m interfiere con la transmisión de la señal, por lo que se realiza un despeje de altura (Ec. 7.5) para determinar una nueva altura de antena en sitio FESA.

$$H_{des} = \left(H_1 + \left(\frac{d_1}{d_1+d_2} (H_2 - H_1) \right) - \left(H + \frac{d_1 d_2}{2ka} \right) \right) [m] \quad (\text{Ec. 7.5})$$

En donde:

H_{des} = Despeje sobre un obstáculo (m)

H = altura del obstáculo (m)

H_1 = Altura del punto de transmisión (m)

H_2 = Altura del punto de recepción (m)

d_1 = Distancia desde el punto de transmisión al punto de cálculo (m)

d_2 = Distancia desde el punto de transmisión al punto de recepción (m)

d = Distancia total del trayecto (m), $k = 4/3$, $a = 6370000$

En la Tabla 7.7c se muestran los cálculos de despeje para el sitio de FESA.

Altura edificio (m)	Altura Torre 1 (m)	Altura Torre 2 (m)	Altura de obstáculo (m)	H ₁ (m)	H ₂ (m)	H _{des} (m)	H _{des} - radio Fresnel
6	30	20	2411	2585	2311	6.52	-5.64
6	30	28	2411	2585	2319	11.33	-0.83
6	30	30	2411	2585	2321	12.53	0.37

Tabla 7.7c Cálculos de altura de despeje.

Como se muestra en la Tabla 7.7c es necesario colocar una antena de 30 metros en FESA para librar el obstáculo con una zona de Fresnel del 60% (Figura 7.13f).

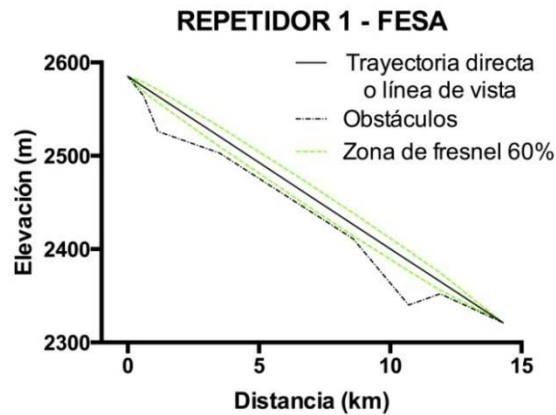


Figura 7.13f Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1 - FESA.

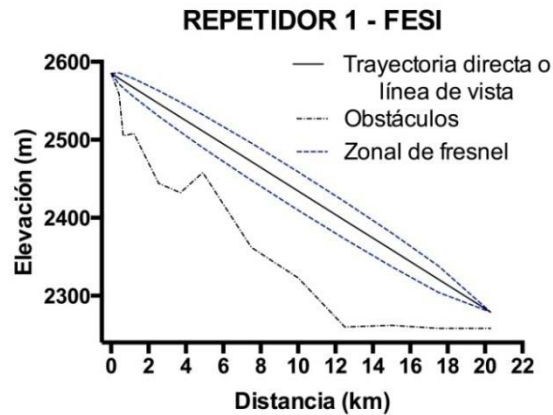


Figura 7.13g Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1 - FESI.

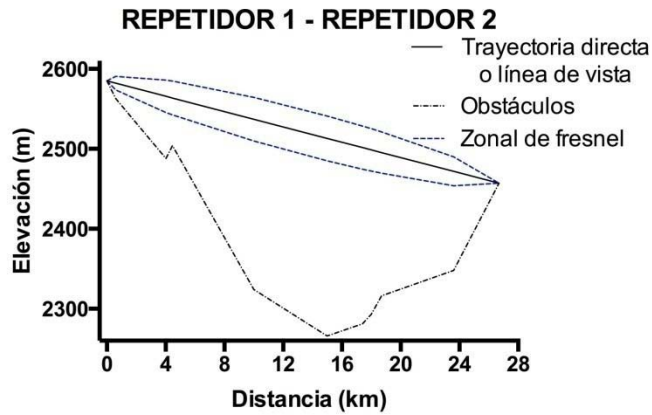


Figura 7.13h Trayectoria directa y zonas de Fresnel del enlace REP 1 - REP2.

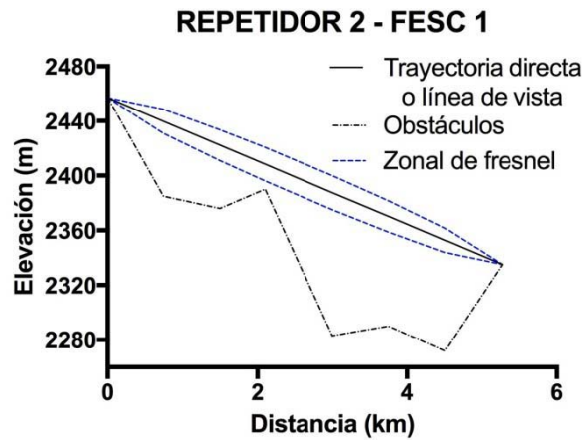


Figura 7.13i Trayectoria directa y zonas de Fresnel, enlace REP2 – FESCC1.

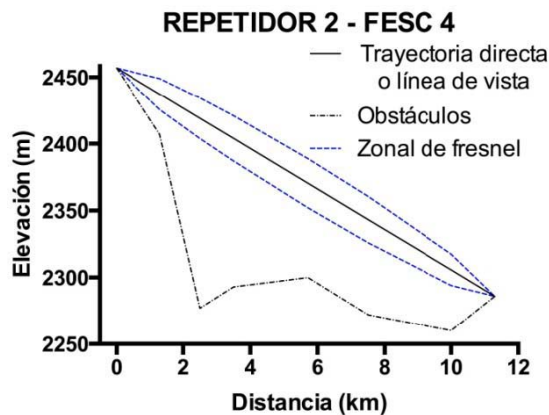


Figura 7.13j Trayectoria directa y zonas de Fresnel, enlace REP2 – FESCC4.

Con los resultados obtenidos se corrobora que el diseño de enlace propuesto es óptimo para la transmisión de voz y datos entre CU y Campus de la UNAM.

7.3.2 Determinación de Azimut y ángulos de antenas.

El azimut indica la dirección en el plano horizontal en que se debe apuntar la antena. El azimut de los puntos se determinó con el programa de Google Earth. La elevación indica la inclinación que debe tener cada antena con respecto al plano vertical. La elevación se determinó con las siguientes ecuaciones:

$$a_1 = \text{angtan} \left(- \left(\frac{(h_1 - h_2) + \frac{d}{2ka}}{d} \right) \right) \quad (\text{Ec. 7.6})$$

$$a_2 = \text{angtan} \left(- \left(\frac{(h_2 - h_1) + \frac{d}{2ka}}{d} \right) \right) \quad (\text{Ec. 7.7})$$

En donde:

h_1 = Altura de la primera antena (m) α_2 = Ángulo de elevación que tendrá la torre ubicada en 1
 h_2 = Altura de la segunda antena (m)
 α_1 = Ángulo de elevación que tendrá la torre ubicada en 1 d = Distancia total del trayecto (m)
 $ka = 8490$

En la Tabla 7.8 se muestran los cálculos de elevación y valores de Azimut.

	Sitio	Azimut*	Elevación
ENLACE	DGTIC	66.04°	-0.24°
	FESZC1	246.07°	0.23°
ENLACE	DGTIC	40.47°	-0.19°
	FESAR	220.50°	0.18°
ENLACE	DGTIC	229.95°	2.0°
	REP1	119.94°	-2.0°
ENLACE	REP1	358.77°	-1.1°
	FESA	178.71°	1.1°
ENLACE	REP1	16.65°	-0.87°
	FESI	196.67°	0.86°
ENLACE	REP1	8.41°	-0.28°
	REP2	188.48°	0.27°
ENLACE	REP2	358.80°	-1.3°
	FESCC1	178.88°	1.3°
ENLACE	REP2	8.48°	-0.9°
	FESCC4	188.51°	0.9°

*el azimut se mide en grados desde el norte geográfico hacia el este

Tabla 7.8 Cálculos de elevación y valores de Azimut.

7.3.3 Ganancias y Pérdidas.

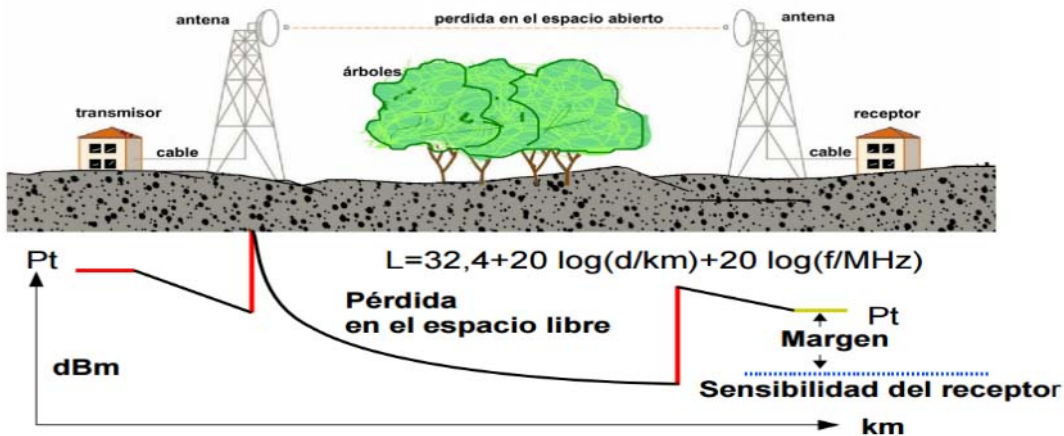


Figura 7.14 Elementos de un radioenlace.

7.3.3.1 Pérdida de Espacio Libre.

Se define a Perdidas en la trayectoria en espacio libre (a veces llamadas Perdidas por dispersión) como la perdida incurrida por una onda electromagnética al propagarse en línea recta a través del vacío, sin energía de absorción o reflexión debido a objetos cercanos. Las pérdidas en la trayectoria en espacio libre dependen de la frecuencia, y aumenta con la distancia. La ecuación para determinar estas pérdidas es la siguiente.

$$L_p = \left[\frac{4\pi D}{\lambda} \right]^2 = \left[\frac{4\pi f D}{c} \right]^2 \quad (\text{Ec. 7.8})$$

En donde

L_p = pérdida en la trayectoria en espacio libre (adimensional)

D = distancia (metros)

f = frecuencia (Hertz)

c = velocidad de la luz en el espacio libre (3×10^8 m/s)

Al pasar a dB se obtiene:

$$L_{p(dB)} = 10 \log \left[\frac{4\pi f D}{c} \right]^2$$

$$L_{p(dB)} = 20 \log \left[\frac{4\pi f D}{c} \right]$$

$$L_{p(dB)} = 20 \log \frac{4\pi}{c} + 20 \log f + 20 \log D \quad (\text{Ec. 7.9})$$

Cuando la frecuencia está en GHz y la distancia en Km

$$L_{p(dB)} = 92.4 + 20\log f_{(GHz)} + 20\log D_{(km)} \quad (\text{Ec. 7.10})$$

El ejemplo del cálculo para el enlace entre Ciudad Universitaria – Repetidor 1 es el siguiente:

$$L_{p(dB)} = 92.4 + 20\log(5) + 20\log(7.20) = 123.56 \text{ dB}$$

7.3.3.2 Margen de desvanecimiento.

En esencia el margen de desvanecimiento es un “factor ficticio” que se incluye en la ecuación de ganancia del sistema, para tener en cuenta las características no ideales y menos predecibles de la propagación de las ondas de radio, por ejemplo, la propagación por múltiples trayectorias (Pérdida por multitrayectoria) y la sensibilidad del terreno. Estas Características son causa de condiciones atmosféricas temporales y anormales que alteran las pérdidas en la trayectoria en espacio libre y, por lo general, son perjudiciales para la eficiencia general del sistema. El margen de desvanecimiento también tiene en cuenta los objetivos de confiabilidad de un sistema. Por lo anterior, el margen de desvanecimiento se incluye como pérdida en la ecuación de ganancia del sistema. Matemáticamente el margen de desvanecimiento es igual a:

$$Fm = 30\log D + 10\log(6ABf) - 10\log(1 - R) - 70 \quad (\text{Ec. 7.11})$$

En donde:

Fm = margen de desvanecimiento (dB)

D = distancia total del enlace (km)

f = frecuencia (Gigahertz)

R = factor de confiabilidad en decimales (99.9% = 0.999)

A = factor aspereza ($A=4$ sobre agua o un terreno muy liso, $=1$ sobre terreno promedio, $=0.25$ sobre terreno áspero y montañoso).

B = factor para convertir la probabilidad del peor de los meses es probabilidad anual ($B = 1$ para convertir una disponibilidad anual a la base del peor de los meses, $= 0.5$ para áreas cálidas o húmedas, $= 0.25$ para áreas continentales promedio, $= 0.125$ para áreas secas y montañosas).

El ejemplo del cálculo para el enlace entre Ciudad Universitaria – Repetidor 1 es el siguiente:

$$Fm = 30 \log(7.20) + 10 \log(6 * 1 * 1 * 5) - 10 \log(1 - 0.999) - 70 = 0.49$$

7.3.3.3. Pérdida por difracción (knifeedge).

La difracción ocurre debido a que una onda puede rodear un obstáculo en su propagación alejándose del comportamiento de los rayos rectilíneos. Los Efectos de la difracción son regularmente pequeños.

$$L_{dissff} = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(1/2 - C(v))^2 + (1/2 - S(v)^2)} \right) \quad (\text{Ec. 7.12})$$

$$v = -\sqrt{2} \frac{C}{F_1} \quad (\text{Ec. 7.13})$$

En donde:

$v =$ es el límite de la integral de Fresnel.

$C =$ es el valor del despeje, se calcula con la línea de vista menos la altura del primer obstáculo.

$F_1 =$ es la primera zona de Fresnel.

$C(v)$ y $S(v) =$ son los valores de las integrales de Fresnel

$$F_1 = -17.32 \sqrt{\frac{d_1 \times d_2}{F \times d}}$$

En donde:

$d_1 =$ distancia del transmisor al primer obstáculo.

$d_2 =$ distancia del obstáculo al receptor

$d =$ distancia total del trasmisor al receptor

$$v = -\sqrt{2} \frac{C}{F_1} =$$

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$$

$$S(v) = \int_0^v \text{sen}\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$$

$$L_{dissff} = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(1/2 - C(v))^2 + (1/2 - S(v)^2)} \right) \quad (\text{Ec. 7.14})$$

En la práctica, las soluciones gráficas y numéricas son calculadas para obtener la ganancia de difracción. En la figura 7.15 se muestra una representación de como función de v , así también una solución aproximada para la ecuación anterior está dada por:

$$\begin{aligned}
 G_d \text{ (dB)} &= 0 & v &\leq -1 \\
 G_d \text{ (dB)} &= 20\log(0.5 - 0.62v) & -1 &\leq v \leq 0 \\
 G_d \text{ (dB)} &= 20\log(0.5\exp(-0.95v)) & 0 &\leq v \leq 1 \\
 G_d \text{ (dB)} &= 20\log(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}) & 1 &\leq v \leq 2.4 \\
 G_d \text{ (dB)} &= 20\log(0.225/v) & v &> 2.4
 \end{aligned}$$

v = parámetro de difracción Fresnel - Kirchoff y está dado por

$$v = h\sqrt{2(d_1 + d_2)/\lambda d_1 d_2} \quad (\text{Ec. 7.15})$$

En donde:

h = altura del obstáculo.

d_1 = es la distancia del transmisor al obstáculo.

d_2 = distancia entre el obstáculo y la antena receptora.

λ = longitud de onda.

El ejemplo del cálculo del parámetro de difracción Fresnel - Kirchoff para el enlace entre Ciudad Universitaria – Repetidor 1 es el siguiente:

$$h = -26.6019 \text{ m}$$

$$d_1 = 7.17 \text{ km}$$

$$d_2 = 7.21 - 7.17 = 0.04 \text{ km}$$

$$\lambda = 300000 \text{ km/s} / 5000000 \text{ Hz} = 0.06 \text{ m}$$

$$V = -26.60 \left(\sqrt{\frac{2(7.17 + 0.04)}{0.06 * 7.17 * 0.04}} \right) = -770.01$$

Enlace	Pérdida de espacio libre (dB)	Margen de desvanecimiento (dB)	Difracción Fresnel-Kirchoff (dB)	Ganancia por difracción*
DGTIC – REP1	123.56	0.49	-770.01	0
REP1 – FESA	129.41	9.26	-122.11	0
REP1 – REP2	134.85	17.41	-143.33	0
REP2 – FESCC1	120.77	-3.69	-43.04	0
REP2 – FESCC4	127.43	6.29	-163.24	0
REP1 - FESI	132.42	13.77	-185.59	0
DGTIC – FESAR	133.42	15.27	-74.14	0
DGTIC - FESZ	130.99	11.63	-60.30	0

* La ganancia de difracción se determinó con la siguiente fórmula: $G_d \text{ (dB)} = 0$ si $v \leq -1$

Tabla 7.9 Resultados de ganancia y pérdida para los enlaces propuestos.

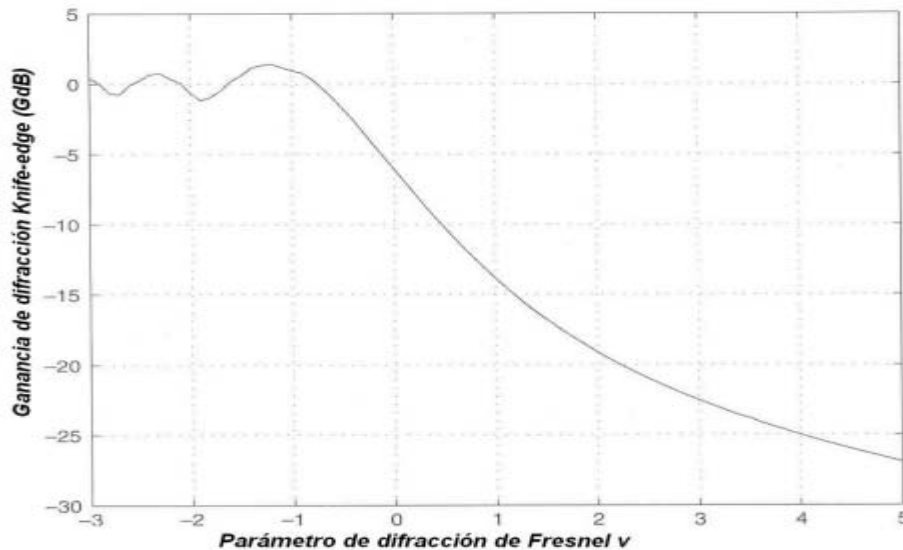


Figura 7.15 Representación gráfica de G_d (dB) como función de v .

7.3.3.4 Pérdidas por atenuación en las líneas de transmisión.

Pérdidas debido a la atenuación es importante considerar:

- El cable de la antena debe ser lo más corto posible
- Dependientes de la Frecuencia
- Controlar la hoja de datos y verificar
- Los valores típicos de pérdidas varían entre 1 dB/m hasta < 0.1 dB/m
- Menores pérdidas => cable más costoso

Para este caso en particular se utilizarán cables UTP (Ethernet RJ45), por que las atenuaciones son mínimas e incluso no hay pérdidas.

Velocidad de transmisión de datos (Mbps)	Nivel de atenuación para 100m (dB)
4	13
10	20
16	25
100	67

Tabla 7.10 Nivel de atenuación permitido según la velocidad de transmisión para un cable UTP.

7.3.3.5 Pérdidas por absorción (gases atmosféricos).

Los vapores de agua y de oxígeno no condensados poseen líneas de absorción en la banda de frecuencias de microondas y de ondas milimétricas, causando atenuación en trayectos radioeléctricos terrenales y oblicuos. En concreto, existen frecuencias donde se produce una gran atenuación, separadas por ventanas de transmisión donde la atenuación es mucho menor. En el caso del vapor de agua, se producen fuertes líneas de absorción para longitudes de onda de 1,35 cm, 1,67 mm e inferiores. En el caso del oxígeno, las longitudes de onda de los picos de absorción son 0,5 y 0,25 cm.

La atenuación debida al efecto conjunto de los vapores de agua y oxígeno es aditiva. En aquellas bandas donde los valores de atenuación exceden los 10 dB/km el alcance de las comunicaciones se encuentra enormemente limitado. Pero escogiendo adecuadamente las frecuencias de trabajo es posible obtener niveles de atenuación mucho menores: por ejemplo, a 30 GHz la atenuación es inferior a 0,1 dB/km. Para frecuencias por encima de 300 GHz, en cambio, la atenuación mínima es todavía elevada (6 dB/km o más) e impone una gran restricción en el caso de enlaces terrestres con visión directa.

Para calcular la atenuación causada por los gases y vapores atmosféricos se debe acudir a la Recomendación UIT-R P.676. En este documento se indica que la atenuación de la señal radioeléctrica, LA(dB), puede calcularse como:

$$LA = y_r = (y_0 + y_w)r \quad (\text{Ec. 7.16})$$

Donde y_0 y y_w son las atenuaciones específicas en dB/km para el oxígeno y el vapor de agua, obtenidas de una gráfica como la mostrada en la Figura 7.16, y r es la longitud del trayecto radioeléctrico en km.

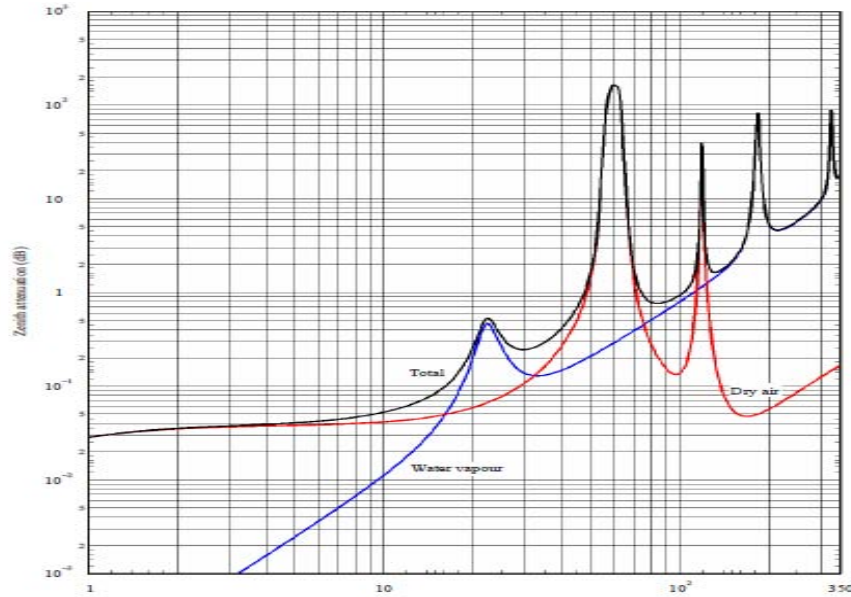


Figura 7.16 Atenuaciones en dB/km para el oxígeno y el vapor de agua.

Para el cálculo de agua se utiliza la tabla de atenuación específica por oxígeno y atenuación por agua.

$$y_0 = 0.007$$

$$y_w = 0.004$$

7.3.3.6 Pérdida por lluvia.

El fenómeno meteorológico más significativo en las pérdidas es la lluvia, para banda Ka puede haber pérdidas de hasta 20 [dB]. Se calcula con el producto de atenuación específica y la longitud que abarca la lluvia.

$$\gamma_D = kR_p^\alpha \quad (\text{Ec. 7.17})$$

En donde:

k, α = constantes que dependen de la frecuencia y polarización.

R_p = intensidad de la lluvia en mm/h.

Atenuación total

$$\psi = 3.39d^{0.821}R_p^{(-0.356 - \frac{0.107}{d})} \quad (\text{Ec. 7.18})$$

Se tienen valores para determinadas zonas del planeta para tomar en cuenta las pérdidas que la lluvia pueda provocar. Así que, la atenuación puede variar de acuerdo a la localización geográfica de la estación terrena, por lo que hay mapas de contornos de intensidad de lluvia. Estos efectos dependen principalmente de la frecuencia, localización y de las condiciones climatológicas. La atenuación por nubes y niebla no es significativa. Hay modelos empíricos que hacen más exactos los cálculos de atenuación, sin embargo, son más complicados, no obstante, sus efectos no son significantes en las bandas de frecuencia usadas, por lo que se pueden incluir en un margen para evitar errores.

7.3.3.7 Pérdidas de inserción (conectores).

Los conectores vienen en una gran variedad de formas y tamaños. Además de los modelos estándares, los conectores pueden tener polaridad inversa (géneros intercambiados) o roscas invertidas.

Para nuestro proyecto no aplican estas pérdidas debido a que se utilizan cables RJ45 entre la antena y equipo receptor (IDU).

A continuación se muestra en tablas un resumen de cálculos en pérdidas y ganancias para cada uno de los enlaces:

ENLACE	Ganancia de Tx dBm	Perdida en el cable Tx dB	Ganancia de Antena Tx dBi	Lp (perdida en el espacio libre) dB	Perdida en el cable Rx dB
DGTIC – REP 1	25	0	23	123.56	0
REP 1 - FESA	25	0	23	129.41	0
REP 1 – REP 2	25	0	23	134.85	0
REP 2 – FESCC1	25	0	23	120.77	0
REP 2 – FESCC4	25	0	23	127.43	0
REP 1 - FESI	25	0	23	132.42	0
DGTIC - FESAR	25	0	23	133.42	0
DGCTIC – FESZC1	25	0	23	130.99	0

Tabla 7.11 Resumen de ganancias y pérdidas en equipos transmisores.

ENLACE	Ganancia de Antena Rx dBi	Potencia de recepción dBm	Sensibilidad del receptor dBm	Margen dB	PIRE
DGTIC – REP 1	23	-52.56	-53.05	0.49	48
REP 1 - FESA	23	-58.41	-67.67	9.26	48
REP 1 – REP 2	23	-63.85	-81.26	17.41	48
REP 2 – FESCC1	23	-49.77	-46.08	-3.69	48
REP 2 – FESCC4	23	-56.43	-62.72	6.29	48
REP 1 - FESI	23	-61.42	-75.19	13.77	48
DGTIC - FESAR	23	-62.42	-77.69	15.27	48
DGCTIC – FESZC1	23	-59.99	-71.62	11.63	48

Tabla 7.12 Resumen de ganancias y pérdidas en receptores.

7.4 Torres.

Una radiobase se compone por diferentes equipos, entre ellos las antenas, que para su correcto funcionamiento se deben instalar a diferentes alturas, para lo cual se construyen estructuras que son capaces de soportar las cargas de los equipos y de las fuerzas externas a las que se somete durante su vida útil, como son viento y sismo. Dentro de las estructuras más comunes se encuentran las torres arriostradas, torres tipo monopolo, torres autoportadas y mástiles (autoportados, arriostrados y autosustentables). Como sus características principales se mencionan las siguientes:

Torres autoportadas: Son las más eficientes por su geometría. Con ellas podemos manejar alturas de hasta 81m en tramos múltiples de 6m y remate de 3m; se fabrican en planta y se instalan o arman en campo. Por lo general se usan para sitios en terreno natural o para sitios con difícil acceso en donde resulta complicado el uso de grúa. Su geometría en elevación es de forma piramidal y en planta triangular. Es posible el uso de torres autoportadas esbeltas de sección constante para alturas de hasta 42m (Figura 7.17).



Figura 7.17 Torre Autosoportada.

Torres tipo monopolo.- Su estructura consiste en tubos de sección circular o poligonal y en elevación puede ser de sección constante o cónica. Se utilizan para sitios en terreno natural y cuando el espacio disponible para la torre no es muy grande, ya que la cimentación de estas estructuras es más pequeña que la requerida para torres autosoportadas. Se fabrican para alturas de hasta 42m (no se limita para mayores alturas). Este tipo de estructura puede ser camuflajeada de manera que no cause un gran impacto visual; el camuflaje puede ser tipo árbol, palmera, pino, reloj monumental, poste de alumbrado, asta bandera, monopolo tipo cruz, campanario (Figura 7.18).



Figura 7.18 Torre tipo monopolo.

Torres arriostradas.- Estas estructuras se pueden utilizar cuando es necesario instalar una radiobase dentro de un inmueble existente como son casas y edificios, ya que es posible ubicarlas en las azoteas y en sitios donde no hay problemas de espacio, pues requiere grandes claros por la posición de las retenidas. Estas estructuras son de sección triangular en planta y en elevación de sección constante y para su estabilidad estructural óptima deben contar con 3 ó 4 retenidas. Estas estructuras son esbeltas y son una buena solución si el impacto visual no es relevante. Se pueden manejar alturas de hasta 60m para modelos T-90. Para alturas mayores a 60m se deberán usar los modelos T-120 o T-150, dependiendo de los parámetros de diseño, el propio análisis y el equipo a instalar. Se permite el uso de una torre arriostrada más esbelta por razón de aspecto, como lo puede ser la T-30, T-45 o T-60, las cuales deben ser utilizadas con cargas moderadas. Se instalan en tramos ya armados de 3 y 6m (Figura 7.19).



Figura 7.19 Torre Arriostrada.

Mástiles.- Por sus características de ligereza, facilidad de instalación y bajo costo, son una excelente opción para instalaciones en las que por la altura de la azotea no se requiere una torre; su altura será de acuerdo a las necesidades y al diseño, limitando el diámetro a 10". Deben ser utilizados para cargas moderadas. Los mástiles podrán ser autosoportados o arriostrados de acuerdo al proyecto de la Radiobase (Figura 7.20).



Figura 7.20 Mástil para Antena.

Soportes.- Usados cuando la altura del inmueble coincide con la solicitada por el área de Ingeniería. Sólo se emplea un tubo de 2.5m o 3.0m con diámetro de 2", que se instala directamente sobre pretil o fachada del Inmueble, para ciertos casos podrá llevar un herraje que permita el plomeo frontal y lateral (Figura 7.21).



Figura 7.21 Soporte para antena.

Mástiles Autosustentables.- Estructura del tipo ligero, fácil instalación y bajo costo, con altura de 4, 6, 8, 10 y 12m, con diámetro máximo de 10" que a diferencia del mástil de norma, su estabilidad se basa por medio de contrapesos colocados sobre la misma base del mástil (no se permite que la estabilidad o parte de ésta la aporte ningún tipo de anclaje mecánico, químico o de pegamentos). Los sobrepesos, así como la geometría y estructura autosustentable es parte del diseño propio de cada empresa que los desarrolle (Figura 7.22).

(http://www.ift.org.mx/sites/default/files/376_normativa_tecnica_capitulo_1.pdf, 18-07-16).



Figura 7.22 Mástil autosustentable.

7.4.1 Normatividad.

El primer requerimiento para la instalación de una radiobase es tener un permiso de uso de suelo para instalar infraestructura de telecomunicaciones, el cual en muchos casos es difícil de obtener debido a que si es un espacio tipificado para uso de suelo residencial no está permitido, Asimismo, se pueden sufrir retrasos en la construcción de la torre debido a los trámites que se deben que llevar a cabo para solicitar un cambio en el uso de suelo de un predio o bien obtener el visto bueno de autoridades y vecinos, de ser el caso.

Las autoridades municipales tienen atribuciones en cuanto a la administración del desarrollo urbano y uso de suelo de sus localidades, dentro de las cuales se han establecido criterios en cuanto al tipo de construcciones que se permite edificar en ciertas zonas y el uso de las mismas. Los permisos de construcción son requeridos para edificar la infraestructura de telecomunicaciones, sin embargo, no se mantienen criterios unificados de ordenamiento, fiscalización y desarrollo; situación que afecta la planeación de las inversiones en el despliegue de radiobases.

En el caso de zonas rurales la figura de propiedad en su mayoría está sujeta al régimen ejidal, situación que limita gravemente el despliegue de radiobases, ya que las decisiones para autorizar la construcción de infraestructura depende de una junta ejidal.

La falta de regulación en la materia añade muchos problemas, ya que en muchos casos las administraciones estatales y locales, al no conocer los alcances

operativos ni las características técnicas que implican la instalación y despliegue de radiobases, tienden a solicitar información innecesaria y a realizar requerimientos excesivos, lo cual hace que los trámites respectivos se extiendan en tiempo y costo, y por lo tanto que retrasen y encarezcan los proyectos de inversión y despliegue asociados a la expansión de las redes.

En muchos casos, la falta de normativa no sólo retrasa el trámite y el proceso de inversión para el despliegue de radiobases, sino que además constituye un elemento que da pauta a discrecionalidad en la actuación de algunas autoridades y a anomalías en el proceso administrativo correspondiente como por ejemplo la creación de trámites distintos para un mismo proceso, categorizar las solicitudes en trámites que no corresponden, requerimientos adicionales a los manifestados inicialmente, condicionamiento de los permisos, entre otros. En este sentido, es indispensable que las autoridades competentes cuenten con criterios uniformes, en la medida de lo posible, reconociendo la importancia del despliegue de infraestructura de telecomunicaciones, y así, ejercer sus competencias en la materia sin que sus acciones impidan u obstaculicen el eficiente desarrollo de las redes de radiocomunicación.

Existe una notable falta de homogeneidad regulatoria, sobre todo a nivel municipal, ya que los trámites a cumplir divergen en sus principios; lo anterior implica que el procedimiento para acceder a sitios para la instalación de radiobases puede ser tan diverso como el número de Municipios del país, si bien es cierto que la regulación del uso de suelo y permisos de construcción es facultad autónoma de los Municipios, también lo es que la uniformidad normativa en materia de regulación de infraestructura de telecomunicaciones, beneficia a la población en general.

El dinamismo político y los ciclos electorales contemplan el cambio de administraciones locales en un lapso de 3 años, lo cual impide en algunos casos dar continuidad a trámites iniciados en gestiones anteriores a la electa; además, por la falta de normativas fiscales, es frecuente que los cobros realizados con antelación se vuelvan a aplicar ante la nueva administración del municipio, desconociendo trámites, acuerdos y gestiones realizados ante administraciones

anteriores. (<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/politicaregulatoria/accionesparaelaccesoasitios19-06-2013-final.pdf>, 24-07-16).

7.4.2 Selección de torres.

Actualmente las industrias que se dedican a la instalación de torres ya ofrece todo lo requerido para dicha instalación, a continuación veremos los elementos que incluye cada torre y sus especificaciones.

(http://www.ift.org.mx/sites/default/files/376_normativa_tecnica_capitulo_1.pdf, 18-07-16).

Características generales para los diferentes tipos de torre.					
Torre (estructura)	Torre arriostrada	Torre autosoportada	Torre monopolo	Mástil	Soporte
Plataforma triangular ligera de 5mts. p/lado, con pasillo de 0.6 de ancho con marcos de ángulo y piso de malla de metal desplegado o similar.	Incluye	Incluye	Plataforma circular. Opción de plataforma triangular de 3m por lado.	No incluye	No incluye
12 soportes p/antena de 3m de altura y $\phi= 2'$, ced. 40	Incluye	Incluye	3 soportes (opción 9 soportes)	No incluye	No incluye
Escalera de ascenso hasta cúspide.	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye (opción de step bolts)	No incluye
Cama guía de onda de 12 barrenos. Se considera sobre el cuerpo de la torre más 6m horizontales y					

curva vertical en la transición de dirección.					
Cama guía de onda de 12 barrenos. Se considera sobre el cuerpo de la torremás 6m horizontales y curva vertical en la transición de dirección	Incluye	Incluye	Solo cama guía de onda horizontal (según sea el caso)	Incluye Herraje adecuado tipo cama.	Incluye
Anclas de dado de acuerdo a diseño.	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye
Triangulo estabilizador.	Incluye	No incluye	No incluye	No incluye	No incluye
Nudos crosby,, rozadera, grilletes, etc.	Incluye	No incluye	Incluye (en caso arriostrado).	Incluye (en caso arriostrado).	No incluye
Cable p/retenidas.	Incluye	No incluye	Incluye (en caso arriostrado).	Incluye (en caso arriostrado).	No incluye
Tubo p/cama guía de onda de $\phi=2\frac{1}{2}$ " ced. 40 a cada 2.5m anclados a suelo o macizos de concreto de 30x30x20cm.	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye
Tramo T 45 para pararrayos de 3m de altura aproximadamente.	Incluye	Incluye	No incluye	No incluye	No incluye
Mástil de tubo $\phi=4$ " ced. 40 de 3m de altura aproximadamente.	No incluye	No incluye	Incluye	Incluye	No incluye
Galvanizado de todos los elementos estructurales.	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye

Sistema de seguridad (para torres igual o mayores de 12m de altura).	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye	No incluye
Balizamiento diurno (pintura o sistema de iluminación)	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye	Incluye

Tabla 7.13 Características de las torres.

Basados en lo anterior podemos continuar a la selección de cada torre:

Para las radiobase que van arriba de edificios se escogieron torres arriostradas por su costo y el menor peso que se tiene, en comparación de una torre autosoportada la cual es más pesada y tiene mayor costo, la cual vale la pena poner cuando no se tiene cimientos rígidos. Anteriormente en el subtema del estudio de suelo, se mencionó que la única zona que no cuenta con un tipo de suelo tan estable era Iztapalapa, pero debido a que la antena se instalara sobre un edificio el cual ya tiene cimentación no habría ningún problema en instalarla en este, al ser un peso aproximado de todos los componentes de 100 kg.

Radio base	Altura de la Torre	Superficie en la que será instalada		Tipo de torre
		Largo [m]	Ancho [m]	
Ciudad Universitaria (DGTIC)	20	40	30	Torre Arriostrada
FES Aragón	20	30	30	Torre Arriostrada
FES Zaragoza	20	60	10	Torre Arriostrada
REPETIDOR 1.	30	40	30	Torre Autosoportada
FES Acatlán (CeDeTec)	20	20	20	Torre Arriostrada
FES Iztacala	20	30	30	Torre Arriostrada
REPETIDOR 2	20	Libre	Libre	Torre Autosoportada
FES Cuautitlán Campus 1	20	60	10	Torre Arriostrada
FES Cuautitlán Campus 4	20	No hay datos	Edificio Nuevo	Torre Arriostrada

Tabla 7.14 Tipos de torres a instalar.

7.5 Antenas.

Las antenas para UHF y para microondas deben ser muy direccionales. Una antena tiene ganancia aparente porque concentra la potencia irradiada en un haz delgado, mas que mandarlo por igual en todas direcciones; además la cobertura del haz disminuye al aumentar la ganancia de la antena. La relación entre el área, la ganancia y el ancho de banda de la antena se ve en la siguiente figura:

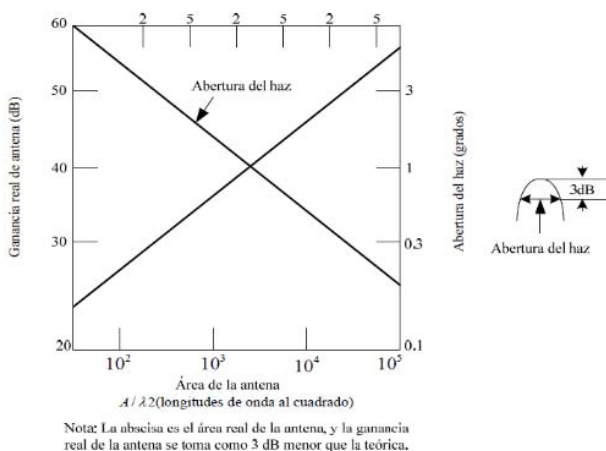


Figura 7.23 Relación entre la ganancia de potencia y la apertura del haz de una antena.

Toda la energía electromagnética emitida por una antena de microondas no se irradia en la dirección del lóbulo (haz) principal, algo de ellas se concentran en los lóbulos menores, llamados lóbulos laterales, que pueden ser fuentes de interferencia hacia o desde otras trayectorias de señal de microondas. La Figura 7.24 muestra la relación entre el haz principal y los lóbulos laterales, para una antena normal de microondas (Tomasi, 2003).

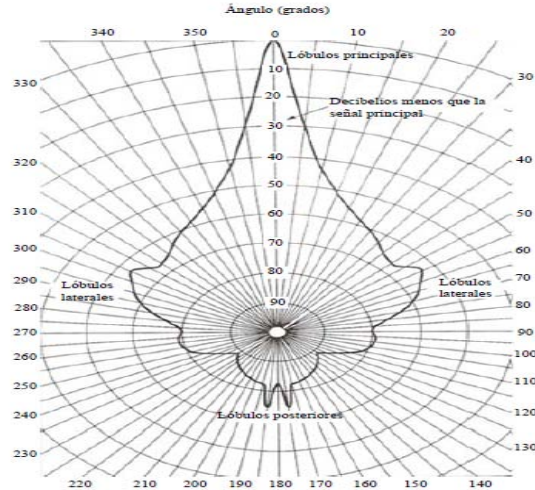


Figura 7.24 Haz principal y lóbulos laterales de una antena.

Las antenas direccionales (de alta frecuencia) se usan con los sistemas de microondas punto a punto, o entre puntos fijos. Al enfocar la energía radioeléctrica en un haz angosto que se puede dirigir hacia la antena receptora, la antena transmisora puede aumentar varios órdenes de magnitud la potencia efectiva irradiada, respecto a una antena no direccional. La antena receptora, en forma parecida a un telescopio, también puede aumentar la potencia efectiva recibida en una cantidad parecida (Tomasi, 2003).

7.6 Enlace de Microondas.

Repetidores.

La distancia admisible entre un transmisor de microondas y su receptor asociado depende de muchas variables del sistema, por ejemplo, de la potencia de salida del transmisor, umbral de ruido del receptor, terreno, condiciones atmosféricas, capacidad del sistema, objetivos de confiabilidad y expectativas de eficiencia.

En sistemas con más de 64 Km, o cuando hay obstrucciones geográficas, como un montaña, en la trayectoria de la transmisión, se necesitan repetidores, un repetidor de microondas es un receptor y un transmisor instalados espalda con espalda, o en tándem con el sistema. En Figura 7.25 se muestra un diagrama simplificado de bloques de un repetidor de microondas.

(<http://documents.mx/documents/sistema-de-radio-de-microondas-con-frecuencia-moduladadocx.html>, 25-06-2016).

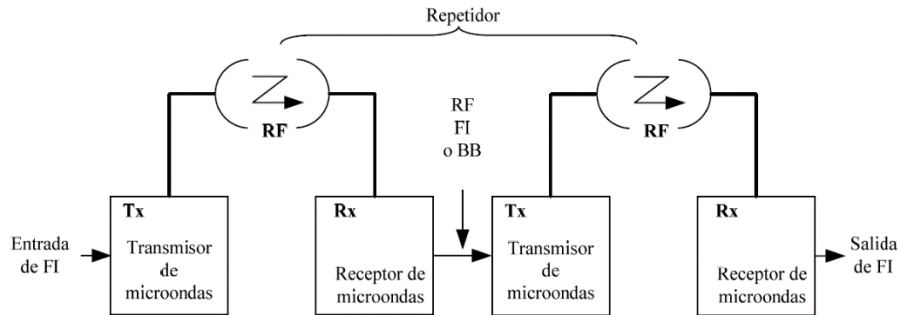


Figura 7.25 Repetidor de microondas.

Para nuestros enlaces de microondas, estamos considerando utilizar equipos marca Radwin Modelo 5000 Jet Punto a Multipunto en la frecuencia de 5 GHz. En la siguiente tabla se muestra la distribución de equipos entre los diferentes campus.

ENLACE PUNTO A PUNTO			
Origen	Equipo Transmisor	Destino	Equipo Receptor
DGTIC	Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET	FESZC1	Unidad para suscriptor de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
DGTIC		FESAR	Unidad para suscriptor de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
DGTIC		REP1	Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET
REP1	Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET	FESI	Unidad para suscriptor de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
REP1		FESA	Unidad para suscriptor de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
REP1		REP2	Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET
REP2	Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET	FESCC1	Unidad para suscriptor de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
REP2		FESCC4	Unidad para suscriptor de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET

Tabla 7.15 Equipos transmisores y receptores.

Como se puede observar en la tabla anterior, se proponen equipos **HBS** (Estación base de alta capacidad) Radwin 5000 JET para los sitios principales (DGTIC, REP1 y REP2), y para todas las FES se proponen equipos **HSU** (Unidad para

suscriptores de alta capacidad) Radwin 5000 JET. Cada campus estará recibiendo 100Mbps de velocidad.

RADWIN 5000 JET es una solución de formación de haces inteligentes punto-a-multipunto, excelente para operar en bandas sin licencia altamente congestionadas y bandas licenciadas donde los recursos de espectro son escasos. Este mismo equipo se utiliza como repetidor. Entregando hasta 750 Mbps por sector, RADWIN 5000 JET es la elección ideal para conectividad de última milla y aplicaciones de alta gama que requieren SLA garantizado.

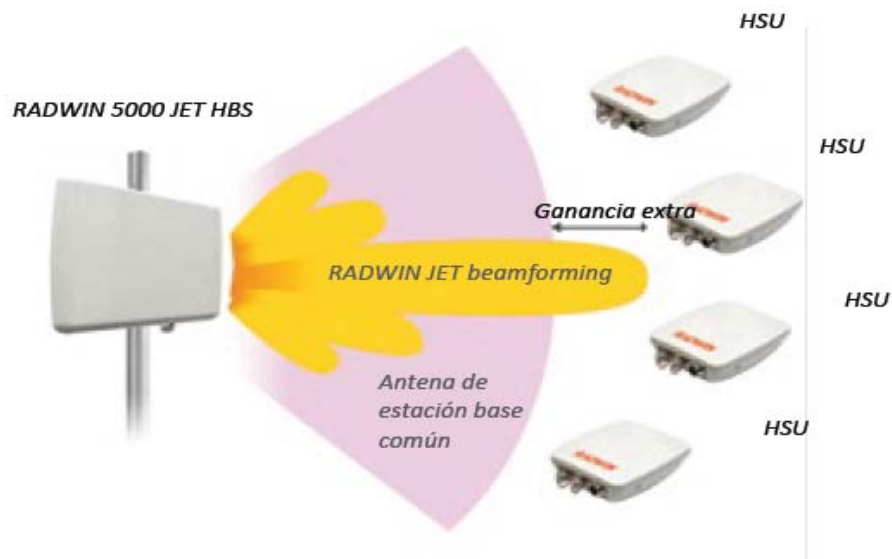


Figura 7.26 Equipos Radwin.

La estación base RADWIN 5000 JET proporciona potencia de transmisión fija y alta en todas las modulaciones. Al combinarse con una antena formadora de haces de alta ganancia e inmune a las interferencias, RADWIN 5000 JET entrega la mayor capacidad de subida y bajada por enlace, especialmente en espectro congestionado sin licencia. Al compararse con las soluciones punto a-multipunto convencionales, RADWIN 5000 JET cubre cuatro veces la distancia para la misma capacidad de bajada y el doble para la misma capacidad de subida.

La serie HSU incluye:

- Ultra-capacidad, entregando 100 o 250 Mbps (compatible con QAM256)
- Unidades de alta capacidad y bajo impacto visual, que entregan hasta 100 Mbps.

La capacidad de la unidad se puede actualizar remotamente mediante una clave de software, permitiendo baja inversión inicial, a la vez que asegurando la capacidad de crecimiento futuro.

Las hojas de datos técnicos de este equipo se encuentran dentro el apartado Anexos.

7.6.1 Diagrama del sistema.

Se generó un diagrama del sistema en 2D por enlace, la cual se enfocada únicamente en la presentación de los datos en alturas de las torres y distancias como veremos a continuación (Figura 7.27 – 7.29).

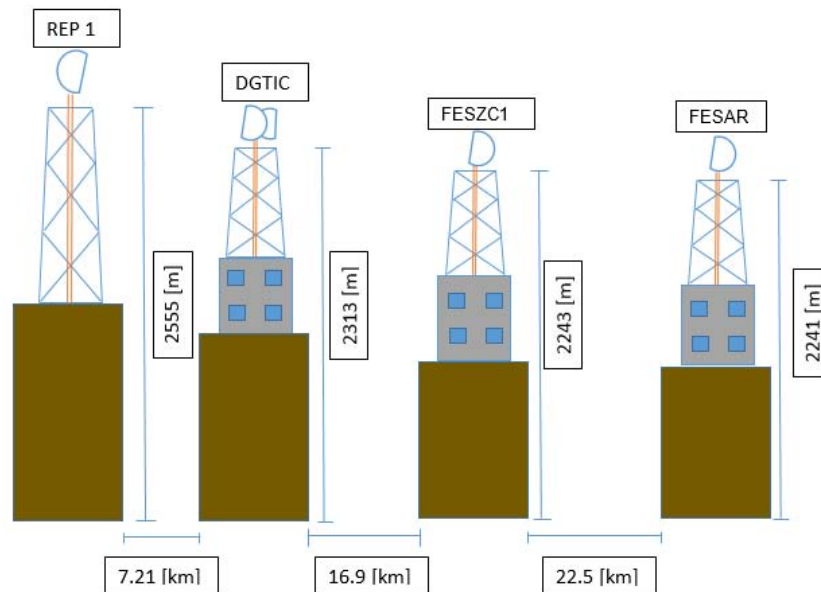


Figura 7.27 Vista General enlaces DGTIC.

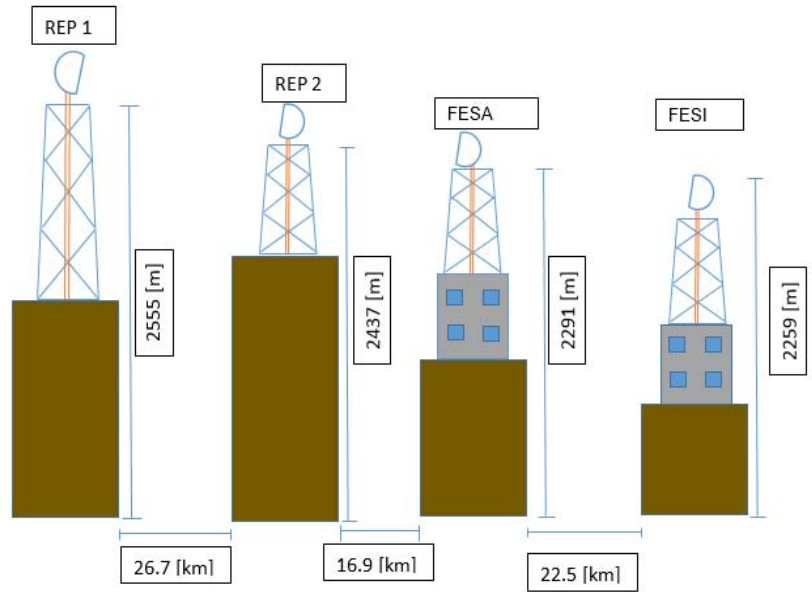


Figura 7.28 Vista General Enlaces Repetidor 1.

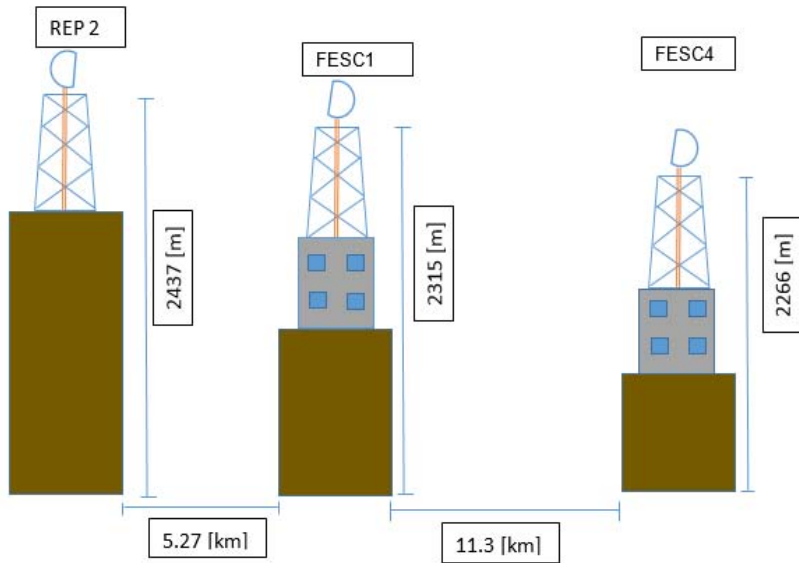


Figura 7.29 Vista General Enlaces Repetidor 2.

7.6.2 Descripción y Diagrama de Equipos.

A continuación se muestra el diagrama general de la red de microondas, como ya se mencionó anteriormente se propone utilizar equipos RADWIN 5000 JET.

**DIAGRAMA GENERAL DE LA
RED DE MICROONDAS**

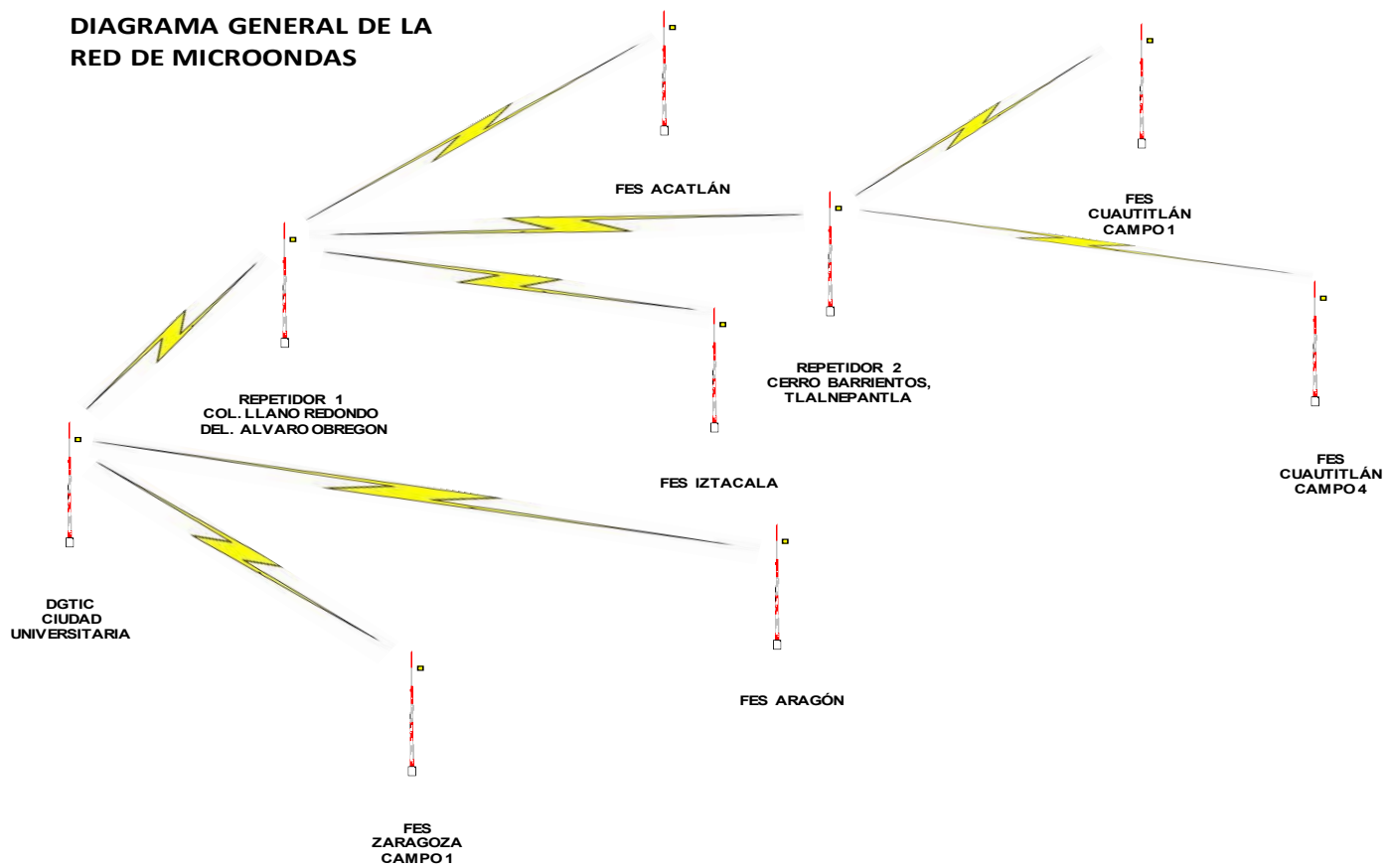


Figura 7.30 Diagrama general de la red de microondas.

DIAGRAMA DE EQUIPOS (PARTE 1)

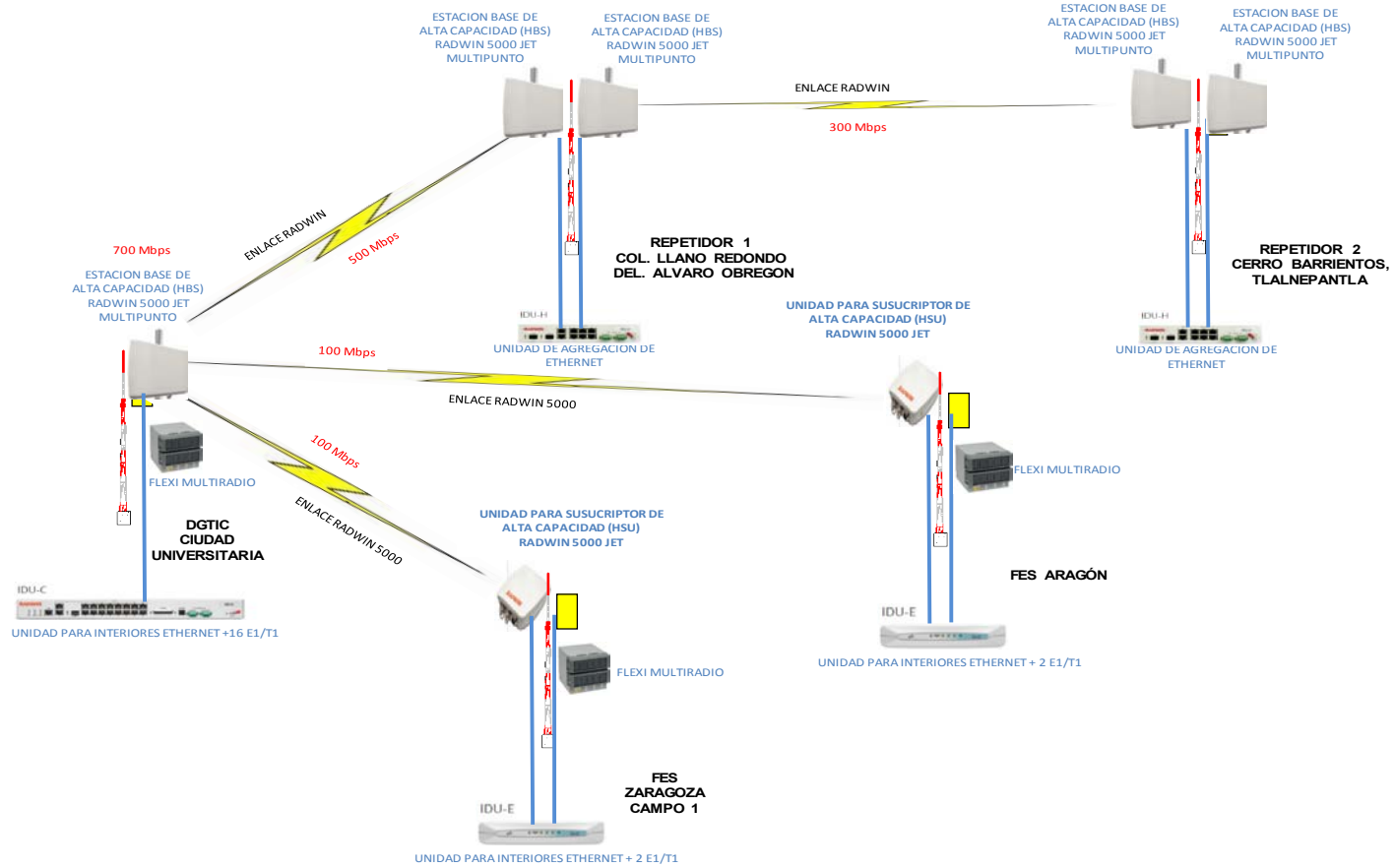


Figura 7.31 Diagrama de equipos parte 1.

En el diagrama anterior se muestran los equipos a utilizar para DGTIC, FES ZARAGOZA, FES ARAGÓN, REPETIDOR 1 Y REPETIDOR 2.

La distribución de equipos para cada campus será de la siguiente manera:
DGTIC.

- 1 Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET Multipunto
- 1 Unidad para interiores Ethernet + 16 e1/t1
- 1 Equipo Flexi Multiradio
- 3 Antena XPOL-2

FES ZARAGOZA

- 1 Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
- 1 Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1
- 1 Equipo Flexi Multiradio
- 3 Antena XPOL-2

FES ARAGÓN

- 1 Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
- 1 Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1
- 1 Equipo Flexi Multiradio
- 3 Antena XPOL-2

REPETIDOR 1

- 2 Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET Multipunto
- 1 Unidad de Agregación de Enlaces

REPETIDOR 2

- 2 Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET Multipunto
- 1 Unidad de Agregación de Enlaces

El enlace microondas se concentra en DGTIC por medio de un equipo HBS (Estación Base de Alta Capacidad) Radwin 5000 JET. RADWIN 5000 JET es una solución de formación de haces inteligentes punto-a-multipunto, excelente para operar en bandas sin licencia altamente congestionadas y bandas licenciadas donde los recursos de espectro son escasos. Entregando hasta 750 Mbps por sector, RADWIN 5000 JET es la elección ideal para conectividad de última milla y aplicaciones de alta gama que requieren SLA garantizado.

En la FES ZARAGOZA y FES ARAGÓN, existirá un equipo HSU (Unidad Suscriptor de Alta Capacidad) Radwin 5000 JET, estos equipos están comunicados directamente con DGTIC (HBS).

El enlace entre DGTIC Y EL REPETIDOR 1 se comunican mediante el equipo HBS Radwin 5000 JET en ambos sitios, el REPETIDOR 1 a su vez se comunica con el REPETIDOR 2 con otro equipo similar (HBS).

En los REPETIDORES 1 y 2 la señal de microondas bajara por medio de cable UTP (Ethernet) a los equipos llamados “Unidad de Agregación Ethernet”, la función principal de estos equipos es amplificar la señal recibida para ser retransmitida de forma ideal a los demás campus.

En cada una de las FES, la señal de microondas baja por medio de cable UTP a los equipos denominados Unidad para Interiores (IDU), el IDU a su vez se conecta por Ethernet al equipo Flexi Multiradio.

El equipo que se propone para crear una red LTE en los campus es un equipo muy compacto de la Marca Nokia. Originalmente estos equipos fueron creados para resolver caso emergencia en las comunicaciones. Comúnmente llamados “LTE in a Box, LTE en una caja” ofrecen características muy completas para crear una infraestructura de comunicación móvil.

La red de Nokia Networks tiene capacidad para brindar servicio a miles de usuarios, pesa 40 kilogramos y requiere un suministro de energía menor a 1 kW, el cual puede ser suministrado fácilmente por un coche o un pequeño generador portátil.

El Nokia Network in a Box (Figura 7.32) puede ser usada en exteriores sin necesidad de un gabinete adicional, de enfriamiento o refugio. El core integrado también elimina la necesidad de equipo extra relacionado o de cableado, permitiendo así un mayor ahorro de energía y espacio. El módulo puede soportar GSM / EDGE, WCDMA / HSPA +, LTE (FDD / TDD) / LTE-Advanced. La estación Base 10 Flexi Multiradio ofrece más de 10 Gbp/s en su configuración avanzada, 10 veces mayor que generaciones anteriores, permitiendo en sus módulos y submódulos actualizaciones de software. Además por si fuera poco Flexi Multiradio utiliza cerca de un 1 KW para servir todas las tecnologías actuales de

3GPP simultáneamente. La eficiente combinación de Hardware y software resulta en una reducción del 30% de consumo de energía. Todos los módulos IP65 al aire libre son compatibles mientras que los módulos de interior son mas compactos para caber en un gabinete de 19 pulgadas. El Modulo de sistema Flexi Multiradio 10 BS soporta actualizaciones de software para tecnologías LTE, LTE-Advanced y WCDMA.



Figura 7.32 Nokia Network in a box.

Nuestra propuesta ofrece crear una red LTE por cada Campus y con un solo equipo Flexi Multiradio de Nokia, de primera instancia estas redes serán redes locales LTE, es decir serán Nodos (eNodeB) únicos en cada campus (Figura 7.33).

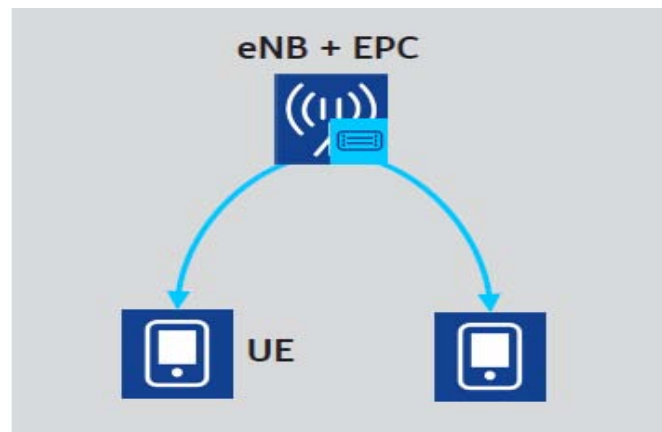


Figura 7.33 Equipo eNodeB.

En donde EPC habilita el acceso a usuarios (HSS) y los UE (usuarios) se pueden comunicar dentro del eNB. Sin embargo, como lo que se requiere es comunicar

todos los Campus se le asignaran conexiones externas de tipo troncal a cada módulo de Flexi Radio.

Las conexiones externas que se utilizaran serán las de proporciones los equipos de Microondas en cada sitio de tal manera se termine por implementar una configuración de tipo estrella para la red general.

Todo lo anterior es gracias a que LTE trabaja en un ambiente compatible con una amplia variedad de servicios de comunicación en tiempo real con una, banda ancha alta basada en una red con IP común.

Los equipos Flexi Multiradio soportan configuración de tres sectores y antenas con arreglo MIMO, en esta propuesta se utilizara un solo sector para cada sitio excepto para el campus de Ciudad Universitaria que se requiere de dos sectores debido al tamaño del área a cubrir. Flexi Multiradio es compatible con Multi fabricantes por esta razón proponemos emplear las antenas XPOL-2 la cual tiene su descripción en el anexo y cumple con nuestros requerimientos para la red LTE.

Las antenas XPOL-2 van a ser montadas sobre la torre con sus soportes y conectada a los equipos Flexi Multiradio a través de su cable de 5 metros con el que se adquiere la antena. Las hojas de datos técnicos de este equipo se encuentran dentro el apartado Anexos.

DIAGRAMA DE EQUIPOS (PARTE 2).

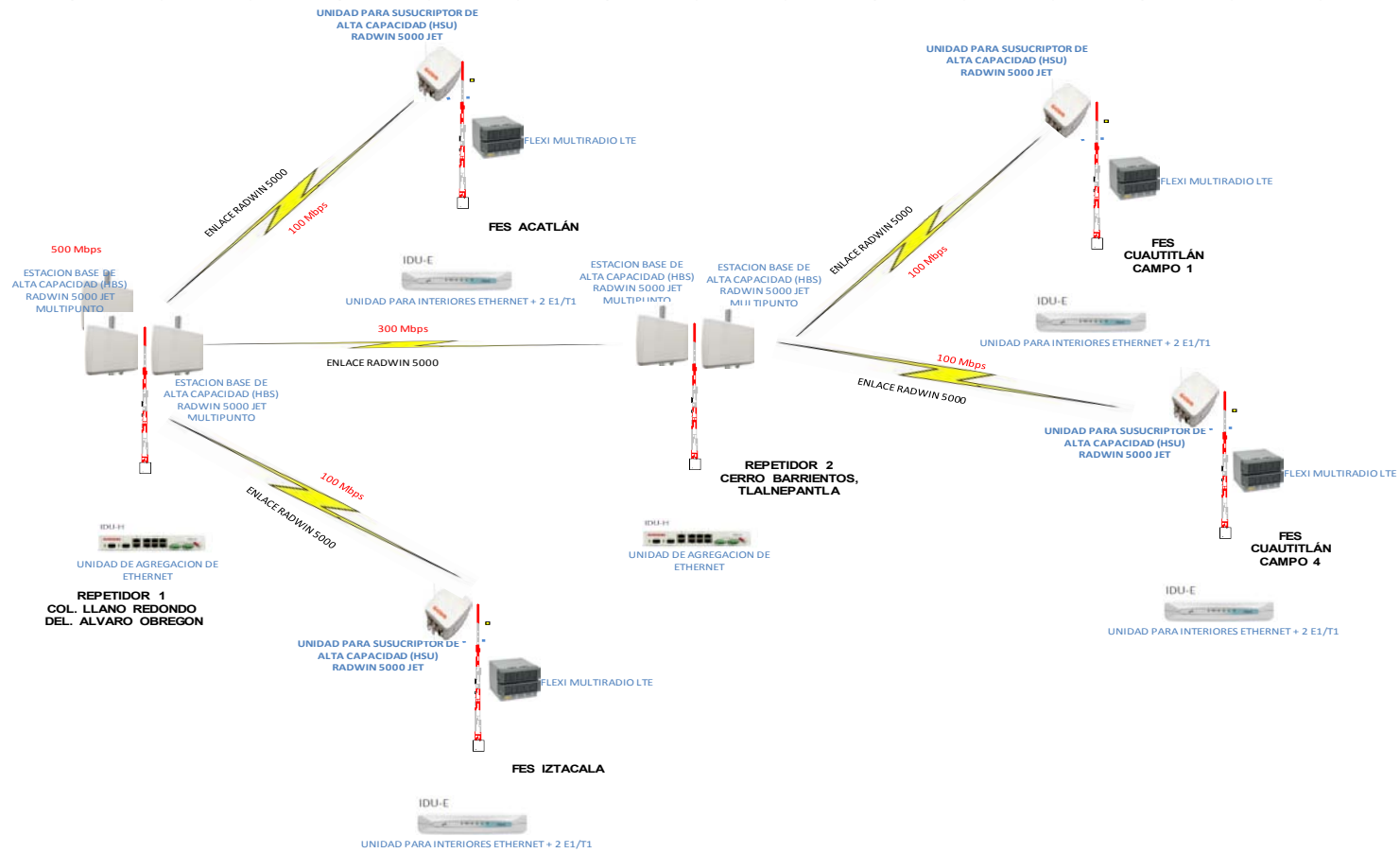


Figura 7.34 Diagrama de equipos parte 2.

En el diagrama anterior se muestran los equipos a utilizar para FES IZTACALA, FES ACATLAN, FES CUAUTITLAN CAMPUS 1 Y CAMPUS 4.

FES IZTACALA

- 1 Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
- 1 Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1
- 1 Equipo Flexi Multiradio
- 3 Antena XPOL-2

FES ACATLÁN

- 1 Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
- 1 Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1
- 1 Equipo Flexi Multiradio
- 3 Antena XPOL-2

FES CUAUTITLÁN CAMPUS 1

- 1 Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
- 1 Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1
- 1 Equipo Flexi Multiradio
- 3 Antena XPOL-2

FES CUATITLÁN CAMPUS 4

- 1 Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET
- 1 Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1
- 1 Equipo Flexi Multiradio
- 3 Antena XPOL-2

El REPETIDOR 1 proporcionará comunicación a los enlaces de las FES ACATLAN y FES IZTACALA.

El REPETIDOR 2 dará comunicación a las FES CUAUTITLÁN CAMPUS 1 Y 4.

En el apartado de Anexos se encuentra las hojas de especificaciones de cada uno de los equipos a utilizar.

En la siguiente tabla se muestran la distribución de equipos por sitio.








Equipos	SITIOS								
	DGTIC	FESZ	FESAR	REP1	REP2	FESI	FESA	FESC1	FESC4
Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET Multipunto 	X			XX	XX				
Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET 		X	X			X	X	X	X
Unidad para interiores Ethernet + 16 E1/T1 	X								
Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1 		X	X			X	X	X	X
Unidad de agregación de Enlaces 				X	X				
Equipo Flexi Multiradio 	X	X	X			X	X	X	X
Antena XPOL-2 	X	X	X	X			X	X	X

Tabla 7.16 Distribución de equipos.

7.6.3 Análisis de la red LTE.

Banda de operación

Como se mencionó anteriormente la red LTE en México ya se emplea, en nuestro diseño la cobertura será de acuerdo a las área de superficie de cada FES y Ciudad Universitaria. A continuación se presentan las bandas relevantes de uso oficial de acuerdo al Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT)(<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/espectro-radioelectrico-en-mexico-vp.pdf>, 14-08-16).

	Banda (MHz)		Banda (MHz)
1	136 – 174	8	1452 - 1492
2	406 – 512	9	1710 -1770/2110 - 2170
3	614 - 698	10	1910-1920/1990-200

4	698 – 806	11	2300 – 2400
5	806 – 824/851-869	12	2500 – 2690
6	824-825/869-870 , 845-846.5/890-891.5 y 846.5-849/891.5-894	13	3400 - 3700
7	896 -960		

Tabla 7.17 Bandas relevantes de uso oficial de acuerdo al IFT.

De las bandas relevantes de uso oficial de acuerdo a IFT, para el análisis de la red LTE elegimos la banda de 1710 – 1770 MHz (subida)/2110 – 2170 MHz (bajada), debido a que es una banda que cubre satisfactoriamente el perfil LTE y a diferencia de las otras bandas es de acceso público. De acuerdo a la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos de América el bloque comprendido entre 1719-1770 MHz/2110-2170 MHz se denomina banda **AWS (servicio inalámbrico avanzando)** extendida y se divide en tres bloques (Tabla 7.18)(https://transition.fcc.gov/bureaus/oet/ea/presentations/files/apr13/6b-AWS4_April_2013-SKJ.pdf, 14-08-16).

Bloque	Rango de frecuencias	
	Subida (MHz)	Bajada (MHz)
A	1710 – 1730	2110 – 2130
B	1730 – 1750	2130 – 2150
C	1750 – 1770	2150 – 2170

Tabla 7.18 Distribución en bloques de la banda AWS.

Por lo anterior, debido a la clasificación de las distintas bandas de operación de LTE (Tabla 7.19), se tiene que trabajar con la banda 4 con el ancho de banda de 10 MHz (<http://www.cs.columbia.edu/6181/hw/anritsu.pdf>, 14-08-16).

E- UTRA Banda de operación	Subida MHz	Bajada MHz	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	15 MHz	20 MHz	Modo dúplex	Despliegue en el mundo
4	1710- 1755	2110- 2155	X	X	X	X	X	FDD	Norte América y Sudamérica

Tabla 7.19 Fragmento de tabla, bandas de frecuencia E – UTRA. (3GPP, 2016-06).

En la Tabla 7.20 se indican las tecnologías compatibles con la banda 4 de LTE.

Banda LTE	Tasa de transferencia Mbps		Modulación		Ancho de banda de radiofrecuencia	Bajada MIMO
	Bajada	Subida	Bajada	Subida	Bajada	2 bloques
4	150	50	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM	1.4, 3, 5, 10 y 20 MHz	Sí

Tabla 7.20 Fragmento de tabla de tecnologías compatible con LTE (<http://www.cs.columbia.edu/6181/hw/anritsu.pdf>, 15-08-16).

Determinación de presupuesto de enlace.

El presupuesto de enlace nos permite dimensionar la cobertura, es necesario determinar el presupuesto de enlace de bajada y subida máximo permitido para la propagación en espacio libre. A continuación se presenta el presupuesto de enlace de bajada (Tabla 7.21) y subida (Tabla 7.22).

Presupuesto de enlace de bajada		
Canal PDSCH		
a	Banda de uso (MHz)	2100
b	Ancho de banda (MHz)	10
c	Modelo de canal	EPA 5Hz ¹
d	Scheduling	PF ²
e	Tipo de celda	Urbana
f	Rendimiento para el usuario (Kbps)	22920
Transmisor -eNodeB		
g	MIMO	2x2
h	Potencia de transmisión (dBm)	43
i	Ganancia de antena (dBi)	13
j	Perdida de cable (dB)	3.9
k	PIRE (dBm)	52.1
l	Altura promedio de antena + edificio (m)	29.7 ± 1.3
Equipo de Usuario		
m	Ruido de equipo de usuario (dB)	7
n	Ruido térmico (dBm)	-104.45
ñ	Receiver noise floor (dBm)	-97.45
o	Requerimiento SINR (dB)	8.61
p	Sensibilidad del receptor (dBm)	-88.84
q	Overhead (%)	23
r	Ganancia de antena usuario Rx (dBi)	0

s	Body loss	0
t	Uso de red (%)	90
u	Margen de interferencia (dB)	4.76
v	Perdida por uso de datos de usuario (dB)	0
w	Perdida por uso de voz por usuario (dB)	3
x	Perdida de señal por edificios (dB)	19.5
y	Probabilidad de encontrarse en interiores (%)	90
z	Desviación estándar de interiores (dB)	5
a ₁	Margen de shadowing (dB)	10
b ₁	Ganancia sobre shadowing (dB)	0
c ₁	Requerimiento de potencia isotrópica (dB)	-51.58
d ₁	Perdida máxima de trayectoria en espacio libre (dB)	103.68
¹ DL 2Tx-2RX, Enhanced pedestrian A 5Hz Channel Model, BLER=10%; ² Proporcional Fair.		

Tabla 7.21 Presupuesto de enlace de bajada.

Presupuesto de enlace de subida		
Canal PUSCH		
a	Banda de uso (MHz)	1700
b	Canal de banda (MHz)	10
c	Modelo de canal	EPA 5Hz ¹
d	Scheduling	PF ²
e	Tipo de celda	Urbana
f	Rendimiento para el usuario (Kbps)	4136
Transmisor		
g	Potencia de transmisión UE Tx. (dBm)	23
h	Ganancia de antena UE (dBi)	0
i	Body Loss	3
j	PIRE (dBm)	20
Receptor -eNodeB		
k	Ruido de equipo de eNodeB (dB)	2.2
l	Ruido térmico (dBm)	-105.43
m	Receiver noise floor (dBm)	-103.23
n	Requerimiento SINR (dB)	-0.64
ñ	Sensibilidad del receptor (dBm)	-103.87
o	Ganancia de antena Rx (dBi)	13
p	Uso de red (%)	90
q	Margen de interferencia ¹ (dB)	1.81
r	Perdida por cable (dB)	3.9

s	Perdida de señal por edificios (dB)	19.5
t	Probabilidad de encontrarse en interiores (%)	90
u	Desviación estándar de interiores (dB)	5
v	Margen de shadowing (dB)	10
w	Ganancia sobre shadowing (dB)	0
x	Requerimiento de potencia isotropica (dB)	-81.66
y	Perdida máxima de trayectoria en espacio libre (dB)	101.66
¹ DL 2Tx-2RX, Enhanced pedestrian A 5Hz Channel Model, BLER=10%; ² Proporcional Fair.		

Tabla 7.22 Presupuesto de enlace de subida.

Las formulas empleadas para determinar el presupuesto de enlace de bajada y subida se encuentran en la sección de anexos. Con los valores obtenidos de pérdida máxima de trayectoria en espacio libre de bajada y subida se determinó el radio de la celda con la siguiente ecuación del modelo COST-231 - HATA (Sainju, 2012):

$$PL = A + B \log_{10}(d) + C \quad (\text{Ec. 7.19})$$

En donde A, B y C son:

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_t) - h_u \quad (\text{Ec. 7.20})$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t) \quad (\text{Ec. 7.21})$$

$$C = -4.78 [\log_{10}(f_c)]^2 + 18.33 \log_{10}(f_c) - 40.98 \quad (\text{Ec. 7.22})$$

PL = pérdida máxima de trayectoria en espacio libre de bajada ó subida (dB).

f_c = frecuencia de bajada (2100MHz) ó frecuencia de subida (1700 MHz).

h_t =altura de antena + altura de edificio (m).

h_u =altura del receptor (1.5 m).

Y para determinar el área de cobertura se emplea la siguiente formula (Talukder, Islam, Mahjabeen, Ahmed, Rafique, & Rashid, 2013):

$$\text{Área} = \frac{3\sqrt{3} * d^2}{2} \quad (\text{Ec. 7.23})$$

En donde, d =radio de la celda.

En la tabla 7.23 se presentan los resultados obtenidos de área de celda y área de cobertura para los sitios en FES y Ciudad Universitaria.

Campus	Bajada		Subida	
	Radio de celda (km)	Área de cobertura (km ²)	Radio de celda (km)	Área de cobertura (km ²)
UNAM	0.97	2.44	0.96	2.41
FESI	0.96	2.41	0.95	2.34
FESAR	0.98	2.50	0.97	2.47
FESZC1	0.97	2.44	0.96	2.41
FESA	1.04	2.82	1.03	2.78
FESCC1	0.92	2.18	0.91	2.15
FESCC4	0.92	2.18	0.91	2.15

Tabla 7.23 Radio de celda y área de cobertura.

De acuerdo a la 3GPP se debe tomar en cuenta el valor de área de cobertura de subida para determinar el alcance total de la red LTE.

7.6.3.1 Cálculo del área por Campus Universitario.

Calculo del área de los Campus Universitarios del área Metropolitana.

El área se delimito por medio de Google Earth como se muestra en la siguiente figura:



Figura 7.35 Área Ciudad Universitaria.

Con la ayuda de la página freemaptools se carga el archivo generado en Google Earth y nos presenta datos como el área y el perímetro como se muestra a continuación.

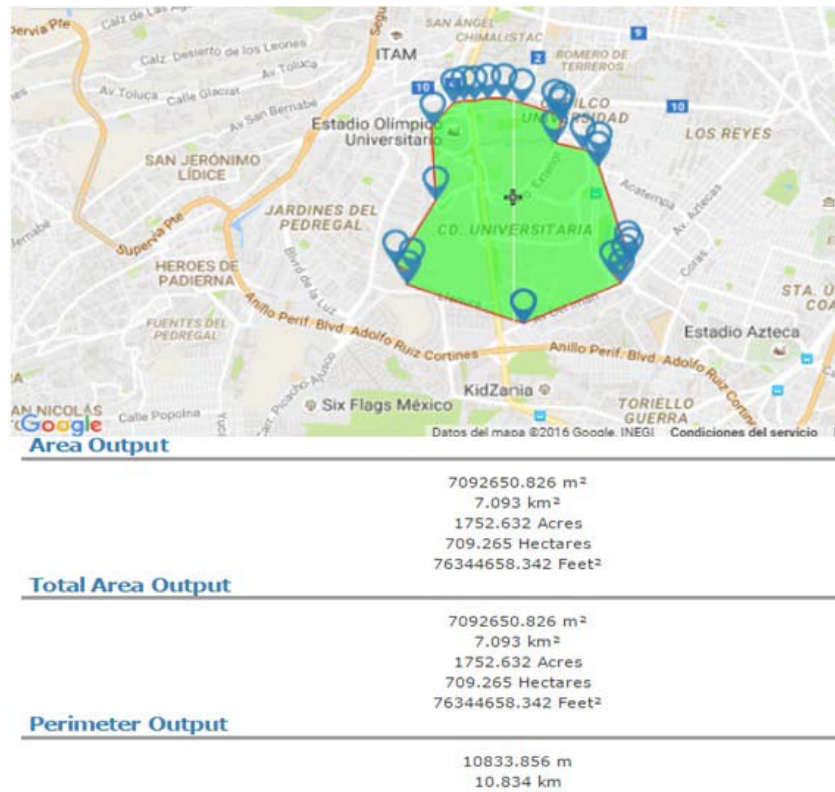


Figura 7.36 Área total de Ciudad Universitaria.

En la siguiente tabla se presentan las áreas de los campus y el área de cobertura LTE.

Campus	Área en [Km ²]	Área de cobertura LTE (km ²)
DGTIC Ciudad Universitaria	7.093	2.41
FES Iztacala	0.244	2.34
FES Aragón	0.346	2.47
FES Zaragoza Campus 1	0.058	2.41
FES Acatlán	0.295	2.78
FES Cuautitlán Campus 1	0.084	2.15
FES Cuautitlán Campus 4	0.364	2.15

Tabla 7.24 Áreas de los Campus de la Red.

Como se puede observar en la tabla anterior en el caso de las FES la cobertura de red LTE calculada es satisfactoria, sin embargo en el caso de Ciudad Universitaria

aunque es una extensión mayor de área (7.093 km²) y considerando que la cobertura LTE es de 2.41 km² correspondiente a un tercio del área total, ya que se emplean antenas con un diagrama de radiación que ocupan sólo 120 grados, se tendría un área total para el eNodeB de 7.23 km²; por lo tanto la cobertura de la red LTE calculada es satisfactoria.

7.7 Descripción del SITE.

El cuarto de telecomunicaciones (SITE) será de uso exclusivo de equipo asociado con el sistema de cableado de telecomunicaciones. El espacio del cuarto de comunicaciones no deberá ser compartido con instalaciones eléctricas que no sean de telecomunicaciones. También debe ser capaz de albergar equipo de telecomunicaciones, terminaciones de cable y cableado de interconexión asociado. La altura mínima recomendada del cielo raso es de 2.6 metros.

En cuartos que no tienen equipo electrónico la temperatura del cuarto de telecomunicaciones debe mantenerse continuamente 24 horas al día, 365 días al año entre 10 y 35 grados centígrados. La humedad relativa debe mantenerse menor a 85%.

Damos por hecho que cada uno de los sitios objeto de este proyecto cuentan con un SITE de telecomunicaciones y dado que nuestros equipos propuestos no ocupan mucho espacio, estos mismos se instalarán dentro del SITE de cada sitio, lo anterior con la finalidad de escatimar en costos, aunque también se podría cotizar la construcción de un SITE si así se requiriera.

7.7.1 Sección de alimentación eléctrica.

Uno de los aspectos más importantes que deben evaluarse al momento de diseñar un centro de procesamiento de datos (SITE) es el suministro eléctrico, ya que si no se efectúa un buen cálculo sobre la carga que se va a utilizar, esto podría ser causa de serios problemas al utilizar el equipo. Es imprescindible hacer un análisis con todos los equipos y dispositivos que se vayan a utilizar como si fuesen a trabajar todos al mismo tiempo, así podremos obtener la carga máxima que se pudiera llegar a utilizar.

Los equipos de telecomunicaciones forman parte de los equipos más sensibles a las variaciones de corriente eléctrica por lo tanto es necesario instalar equipos de protección, como los que se describen a continuación:

- Generador de energía
- UPS

7.7.2 Generador de energía

De manera espontánea se pierde la electricidad durante corto o largo periodo de tiempo. Para evitar esos largos periodos de corte se necesita una planta eléctrica que trabaje con base a algún combustible. Conforme las necesidades de electricidad aumenten así deberá ser la capacidad de la planta eléctrica.

Debido a que son muy pocos equipos de telecomunicaciones los que utilizaremos por cada sitio, y suponemos que cada uno de los sitios de la UNAM que forman parte de este proyecto cuentan con una planta eléctrica (Figura 7.37), no estamos considerando poner una planta eléctrica adicional.



Figura 7.37 Planta Eléctrica.

7.7.3 UPS.

Aunque la oficina tenga un servicio de energía regular es importante proteger el equipo electrónico por fluctuaciones de poder, altibajos o picos que pueden ocasionar daños al equipo.

Verificar todos los equipos conectados a él y dejarle un nivel de holgura mayor que al de una computadora normal. Por lo general se necesita conocer el tiempo de

duración a carga completa o media carga del UPS y que se disponga del tiempo suficiente para apagar los servicios de este (en caso de que no haya planta eléctrica), o que tenga el suficiente tiempo para: cuando la planta eléctrica se active sin sufrir ningún tipo de riesgo.

En este caso se puede utilizar cualquier marca de UPS de 3KVA – 1800 W, debido a que el consumo de potencia de los equipos es de tan solo 1082 W, como se muestra en la siguiente tabla.








EQUIPOS	ALIMENTACION	CONSUMO DE POTENCIA (WATTS)
Estación base de alta capacidad (HBS) Radwin 5000 JET Multipunto 	PoE	25
Unidad para suscriptores de alta capacidad (HSU) Radwin 5000 JET 	PoE	12
Unidad para interiores Ethernet + 16 E1/T1 IDU-C 	60 VCD, mediante eliminador conectado a la corriente de 120 VCA	10
Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1 IDU-E 	60 VCD, mediante eliminador conectado a la corriente de 120 VCA	10
Unida de agregacion de Enlaces IDU-H 	44 VCD, mediante eliminador conectado a la corriente de 120 VCA	15
Equipo Flexi Multiradio 	0 - 276 VCA	1000
Antena XPOL-2 	PoE	10
TOTAL		1082

Tabla 7.25 Consumos de potencia (Watts).

7.8 Simulación de Enlaces

7.8.1 Simulación de enlaces microondas por medio del software radio mobile.

Con la ayuda del software Radio Mobile se simularon los enlaces de microondas propuestos. Radio Mobile es un programa de simulación de radiopropagación para predecir el comportamiento de sistemas radio, simular radioenlaces y representar el área de cobertura de una red de radiocomunicaciones, entre otras funciones. El software trabaja en el rango de frecuencias entre 20 MHz y 20 GHz. Radio Mobile utiliza datos de elevación del terreno que se descargan gratuitamente de Internet para crear mapas virtuales del área de interés, vistas estereoscópicas, vistas en 3-D y animaciones de vuelo. Los datos de elevación se pueden obtener de diversas fuentes, entre ellas del proyecto de la NASA Shuttle Terrain Radar Mapping Misión SRTM) que provee datos de altitud con una precisión de 3 segundos de arco (100m).

Como se puede observar en las siguientes figuras (Figuras 7.39 – 7.46), en cada uno de los enlaces existe línea de vista, la zona de Fresnel está libre y los valores de Azimuth son casi idénticos a los obtenidos manualmente. Por lo anterior podemos asegurar que nuestro diseño es óptimo para un correcto funcionamiento y desempeño.

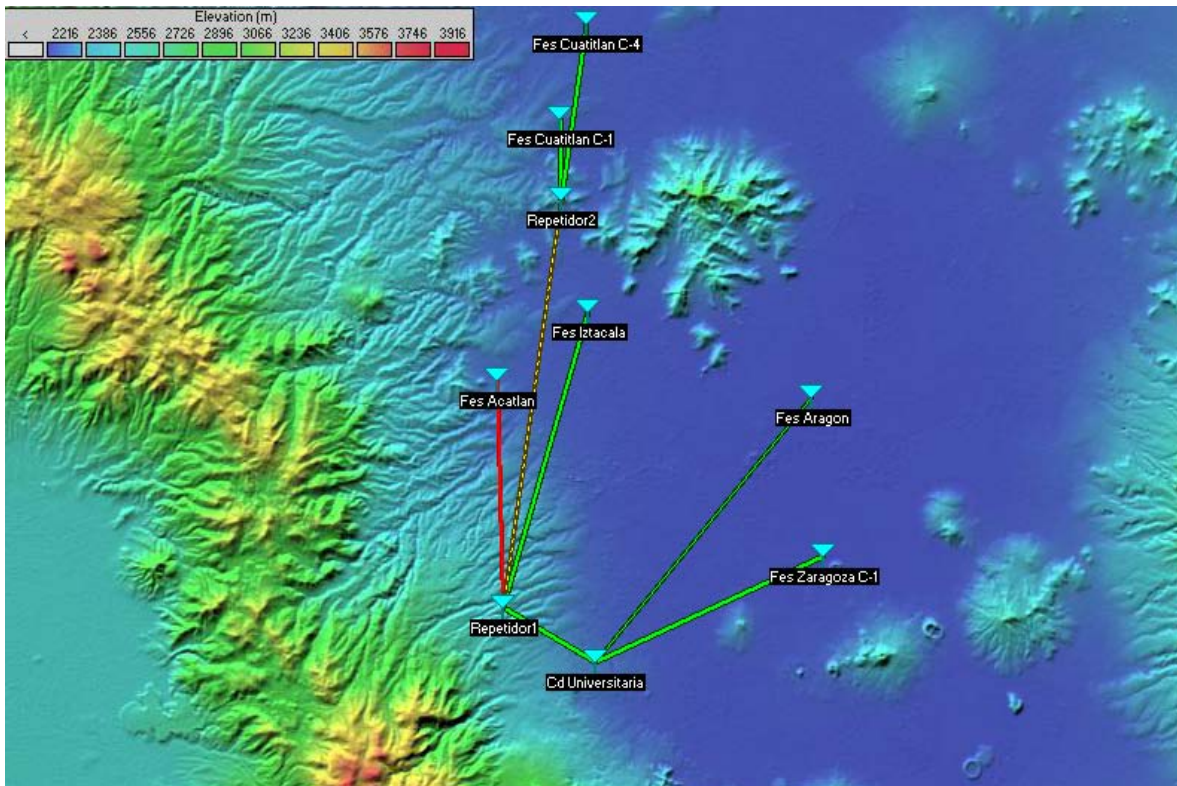


Figura 7.38 Diagrama General.

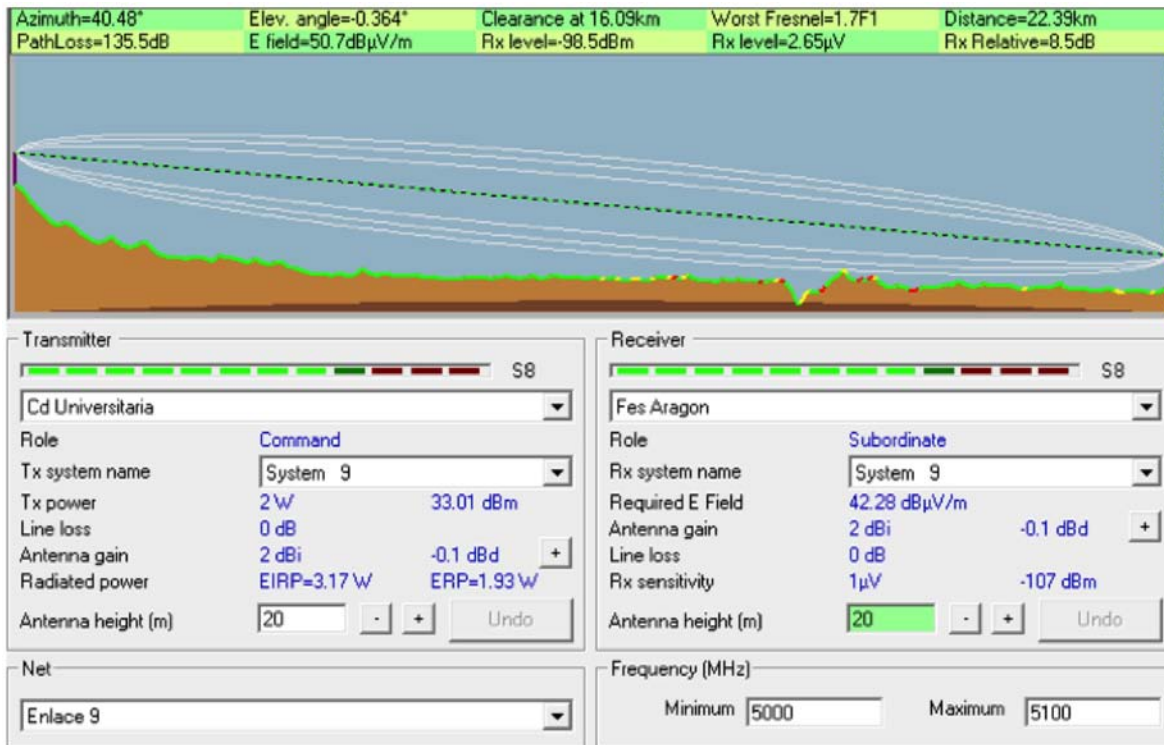


Figura 7.39 Simulación Enlace DGTIC – FES Aragón.

Azimuth calculado manualmente=40.47°

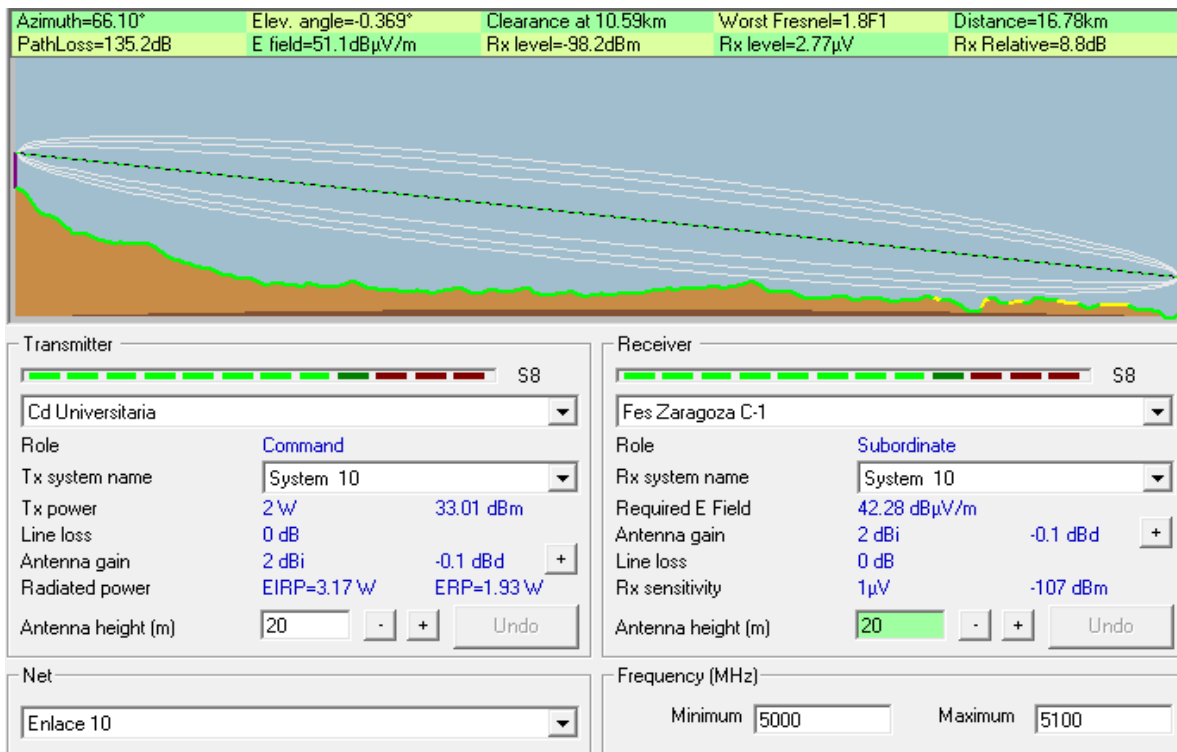


Figura 7.40 Simulación Enlace DGTIC – FES Zaragoza.

Azimuth calculado manualmente= 66.04°

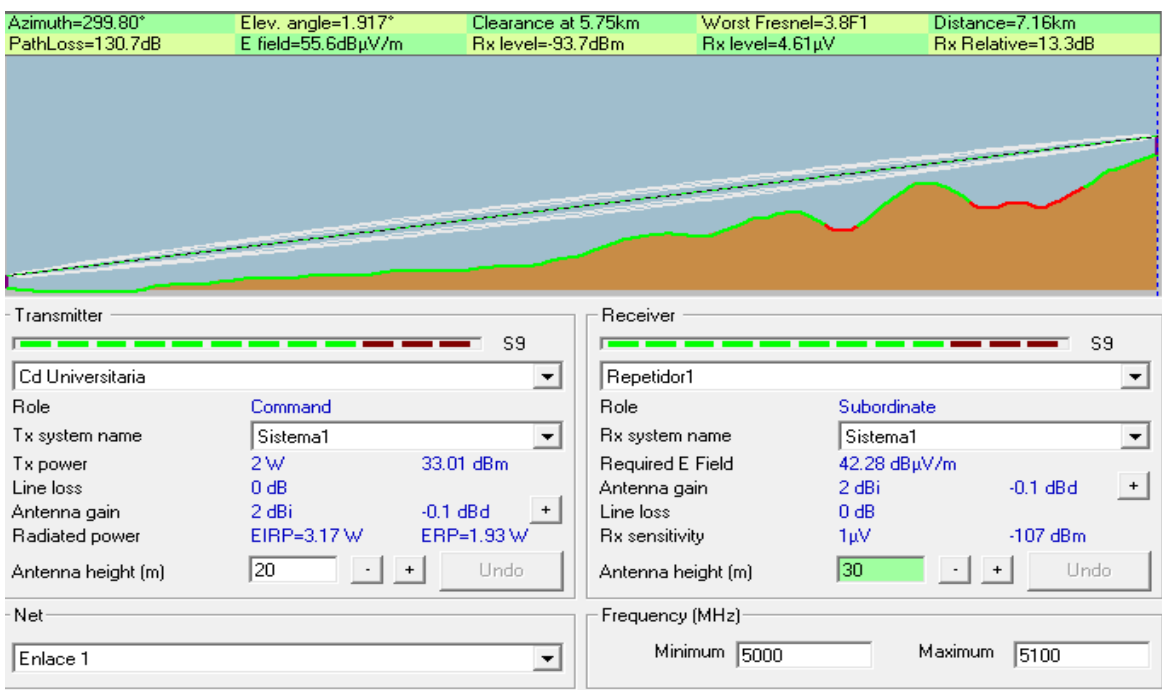


Figura 7.41 Simulación Enlace DGTIC – Repetidor 1.

Azimuth calculado manualmente= 299.95°

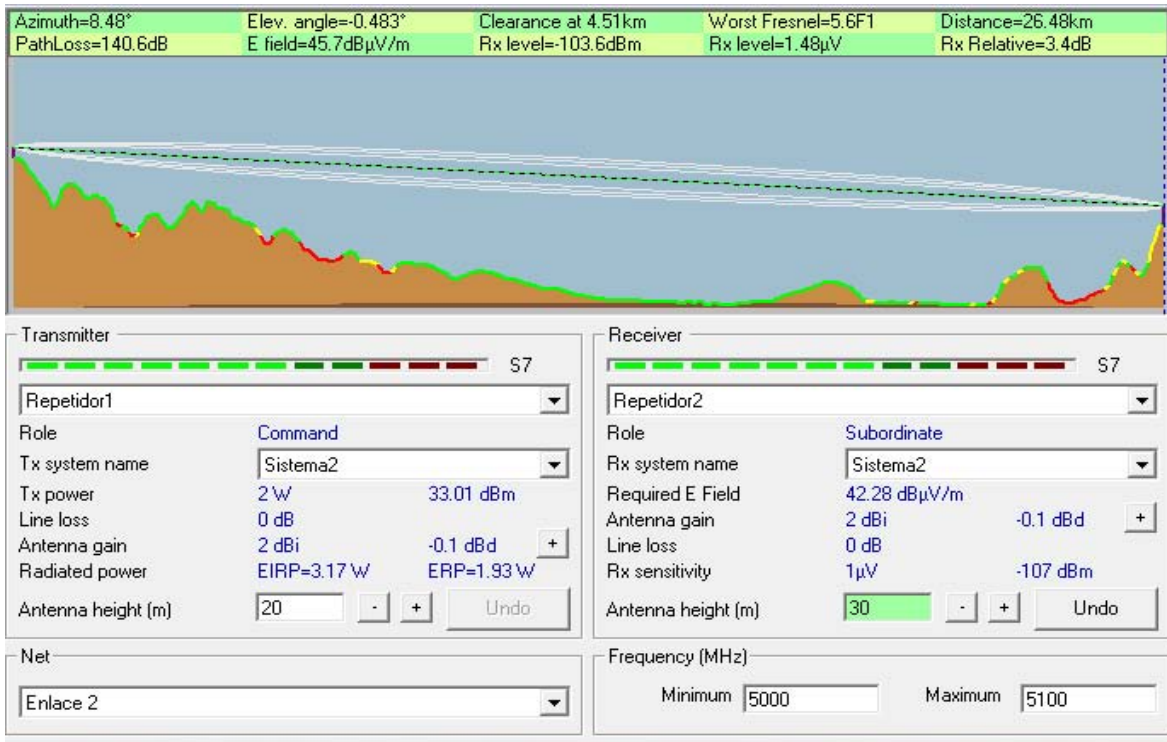


Figura 7.42 Simulación Enlace Repetidor 1 – Repetidor 2.

Azimuth calculado manualmente= 8.41°

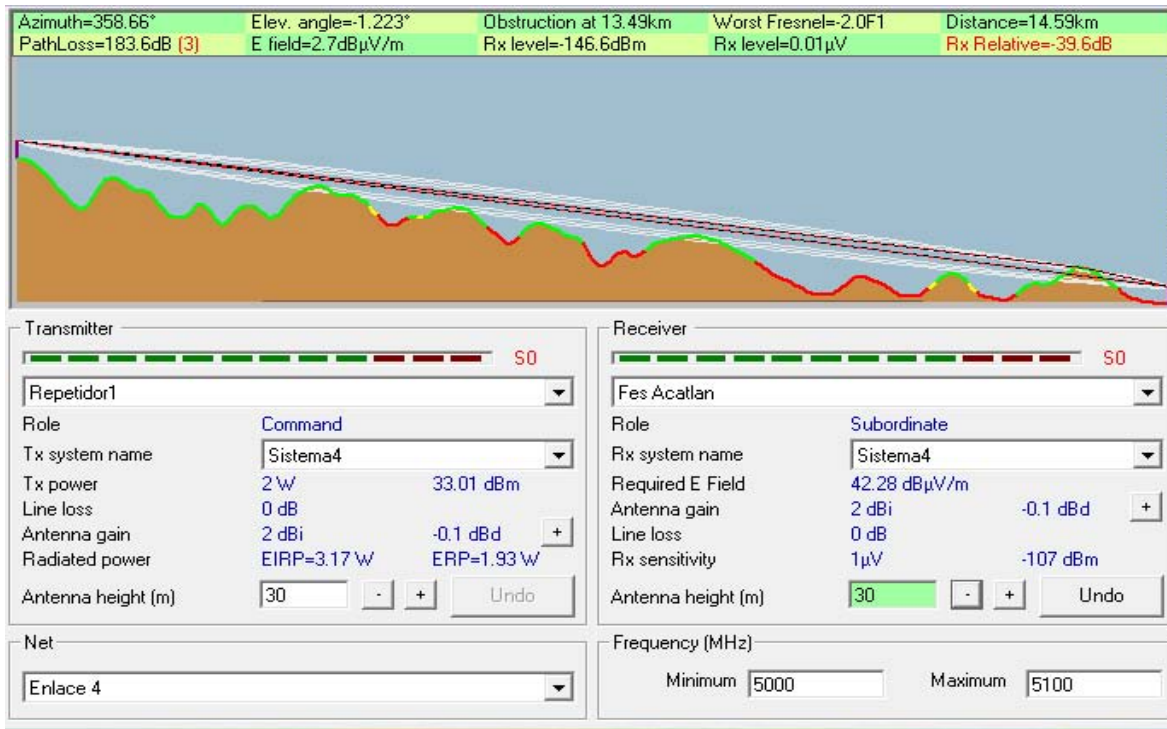


Figura 7.43 Simulación Enlace Repetidor 1 – FES Acatlán.

Azimuth calculado manualmente= 358.77°

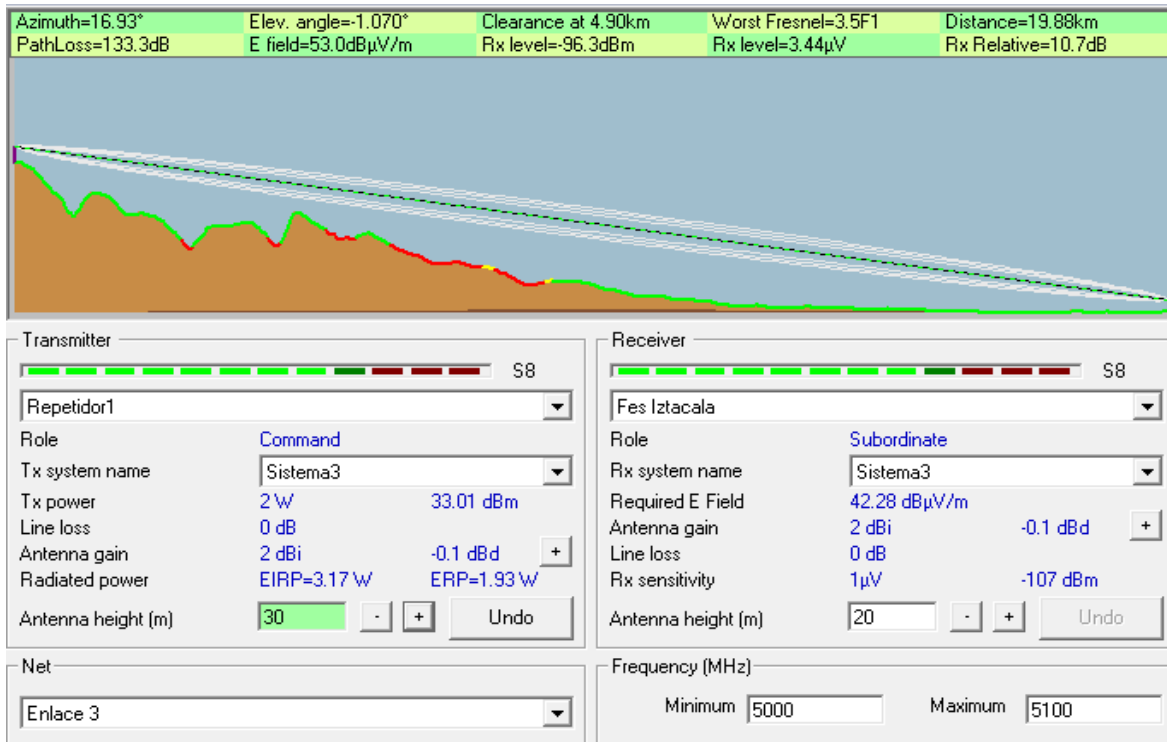


Figura 7.44 Simulación Enlace Repetidor 1 – FES Iztacala.

Azimuth calculado manualmente= 16.65°

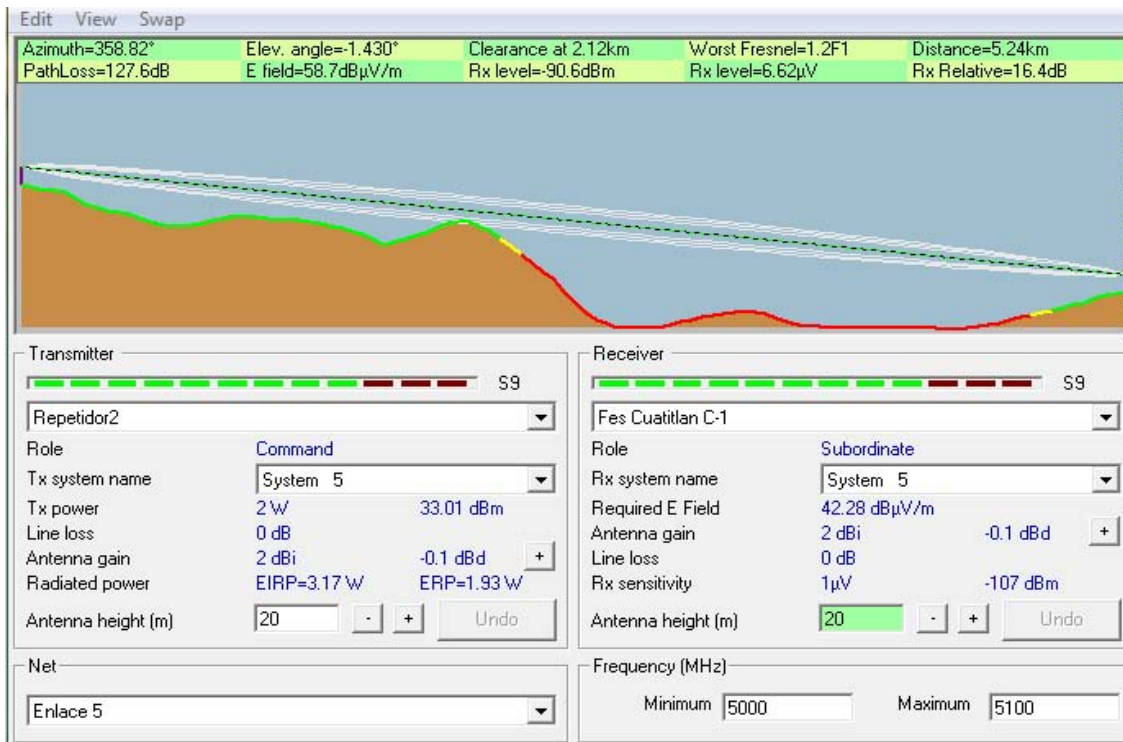


Figura 7.45 Simulación Enlace Repetidor 2 – FES Cuatitlán Campus 1.

Azimuth calculado manualmente= 358.80°

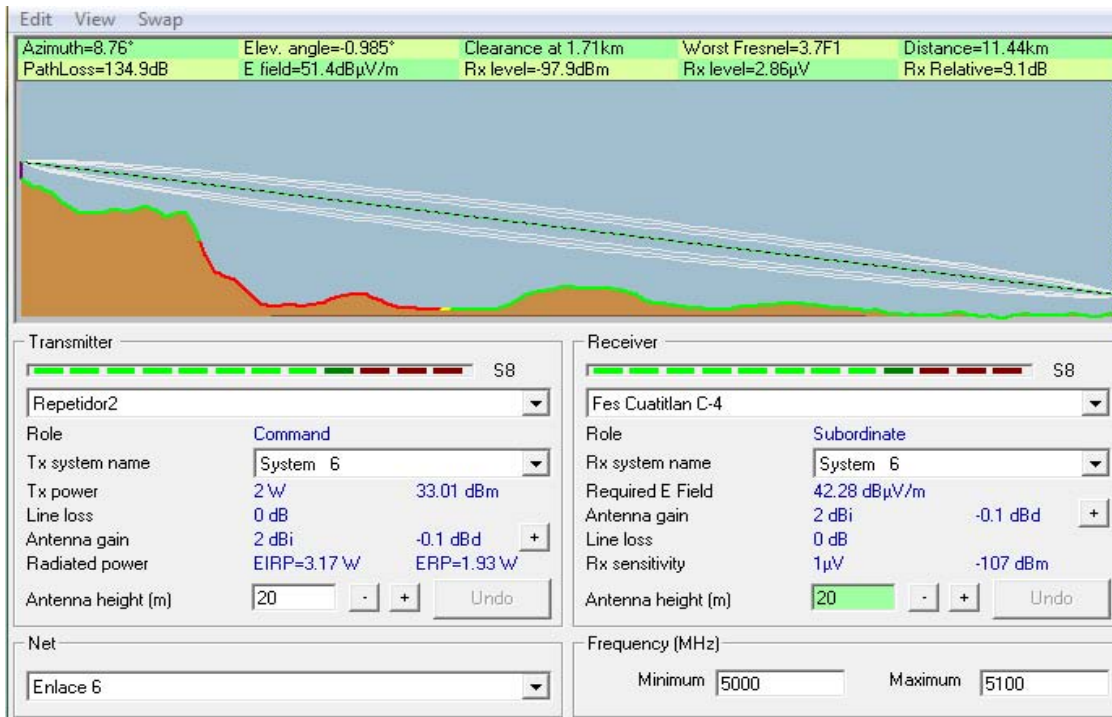


Figura 7.46 Simulación Enlace Repetidor 2 – FES Cuatitlán Campus 4.

Azimuth calculado manualmente= 8.48°

7.8.2 Simulación de la red LTE.

La herramienta de planificación Xirio on line es un producto de la compañía APTICA, la cual permite la realización de simulaciones de coberturas radioeléctricas Online. Su Sitio es [http:// www.xirio-online.com](http://www.xirio-online.com)

El ambiente que se ofrece es muy amigable y te lleva paso dependiendo los requerimientos. La configuración de los parámetros se obtiene de los utilizados y asignados en el apartado de Calculo de cobertura LTE.

En todos los campus se propone la misma configuración radioeléctrica es decir que estamos utilizando los mismos recursos y los alcances esperados son iguales excepto para el Campus de Ciudad universitaria debido a que el área es mucho mayor al de los otros Campus es necesario ampliar la red y esto lo logramos sectorizando el campo de radiación eléctrica.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la simulación de los Sitios de acuerdo a sus coordenadas.

En las figuras nos indica la asignación del color para visualizar las distintas zonas de acuerdo a la calidad de la señal cuantificada en dB's.

Dando por un hecho de que el Área Verde es la mejor zona de recepción de la señal. Cada zona tiene diferente valor de sensibilidad y las áreas también son diferentes en cuanto a forma y tamaño. Como se podrá observar en las siguientes figuras.

Por último se muestra las figuras de Google Earth la “mancha” panorámica de cobertura en el plano físico de cada sitio. En ellas se puede observar que la cobertura rebasa las zonas que ocupa el campus (excepto Ciudad Universitaria). Por lo tanto se puede ofrecer una cobertura muy amplia de la señal o bien se puede ajustar a los valores óptimos una vez puesta en marcha. Lo que por el momento nos ocupa es alcanzar la mejor cobertura.

En las siguientes figuras se presenta la cobertura, en verde (-92, infinito) dBm, en amarillo (-102, -92) dBm y en rojo (-112, -102) dBm.

Campus Zaragoza

A continuación se muestra el resultado para la FES Zaragoza

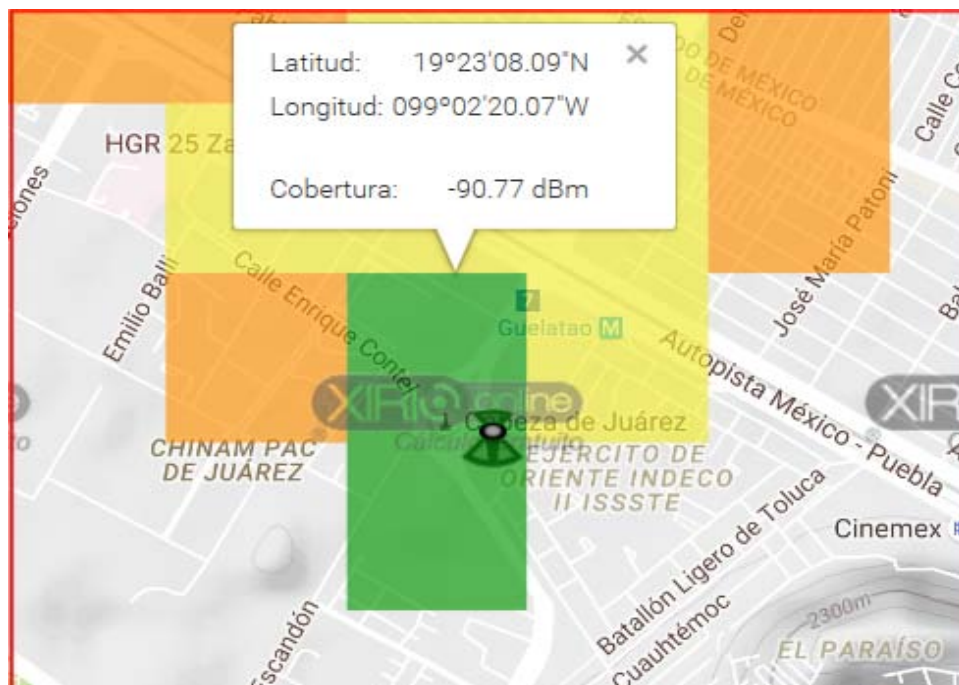


Figura 7.47 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).

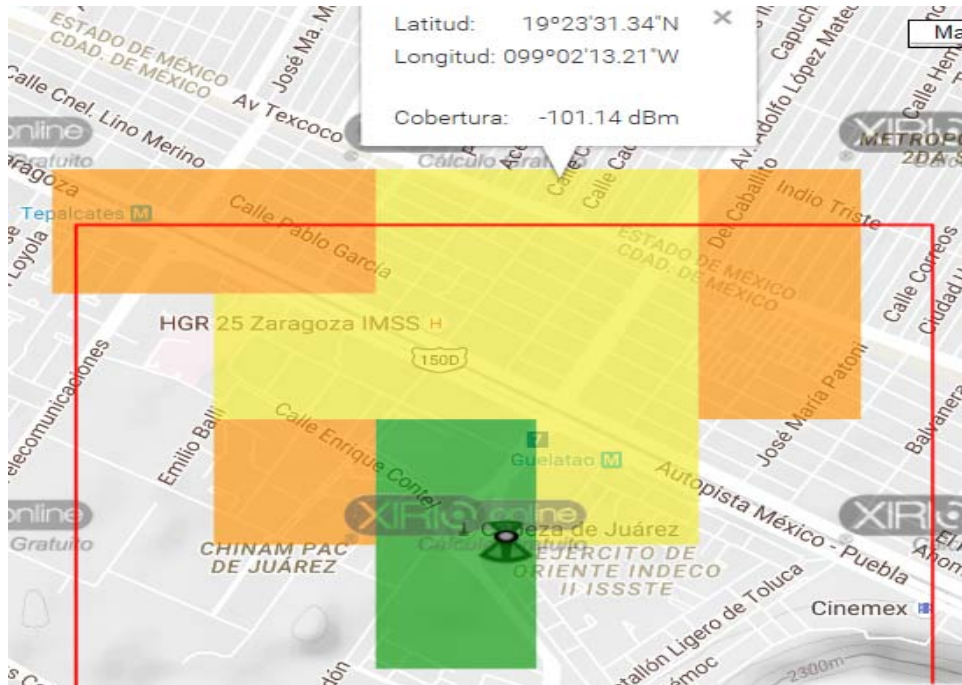


Figura 7.48 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Amarilla).



Figura 7.49 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.

Campus Aragón

A continuación se muestra el resultado para la FES Aragón

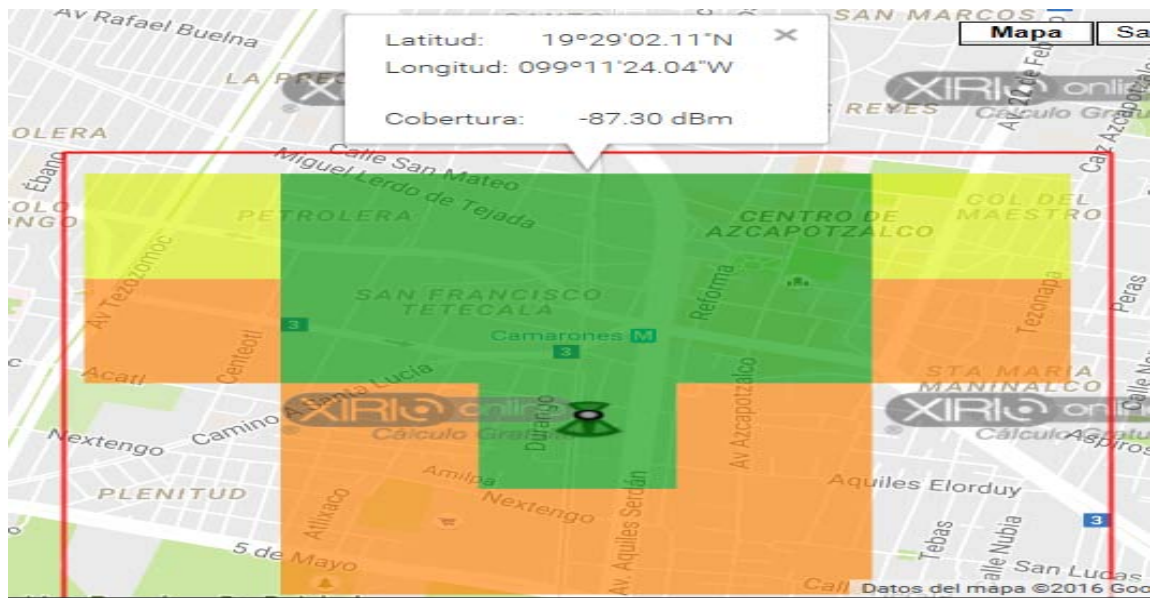


Figura 7.50 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).

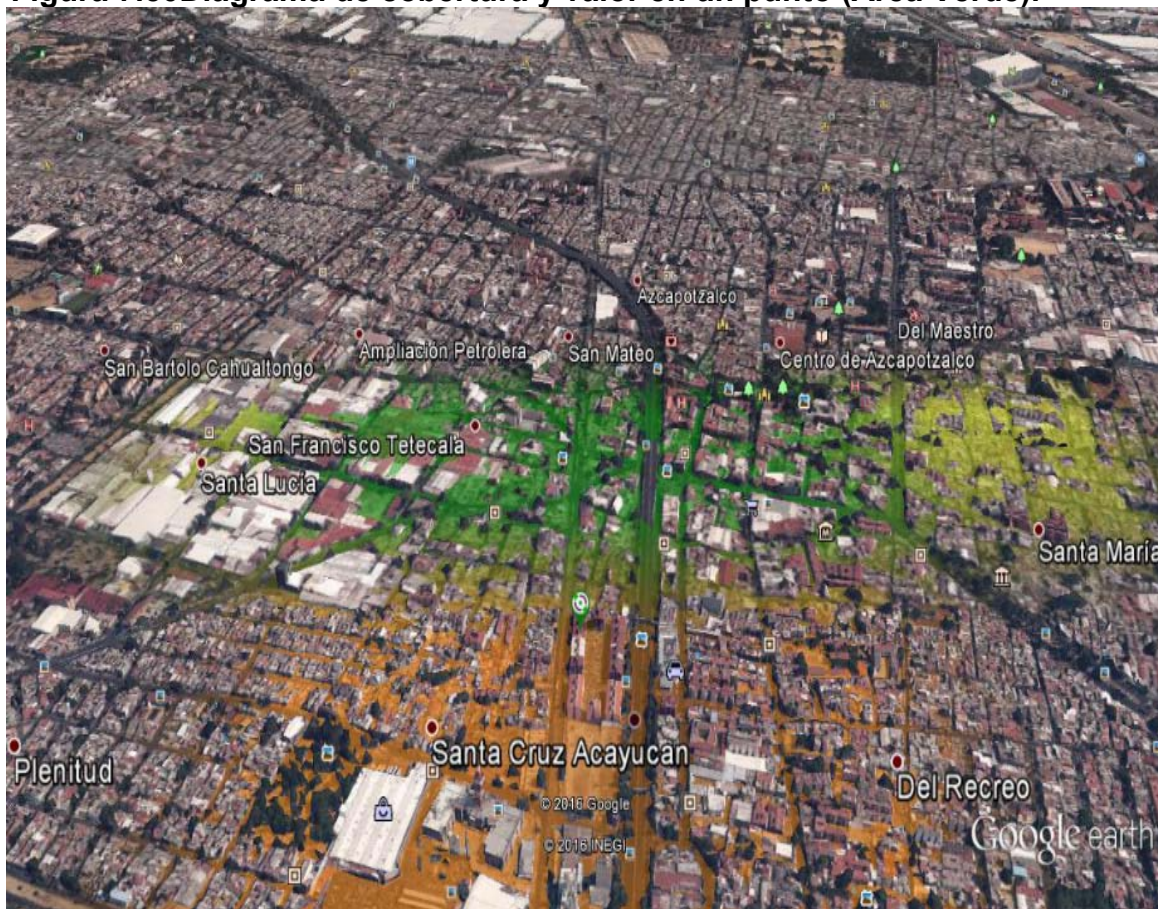


Figura 7.51 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.

Ciudad Universitaria DGTIC

A continuación se muestra el resultado para Ciudad Universitaria

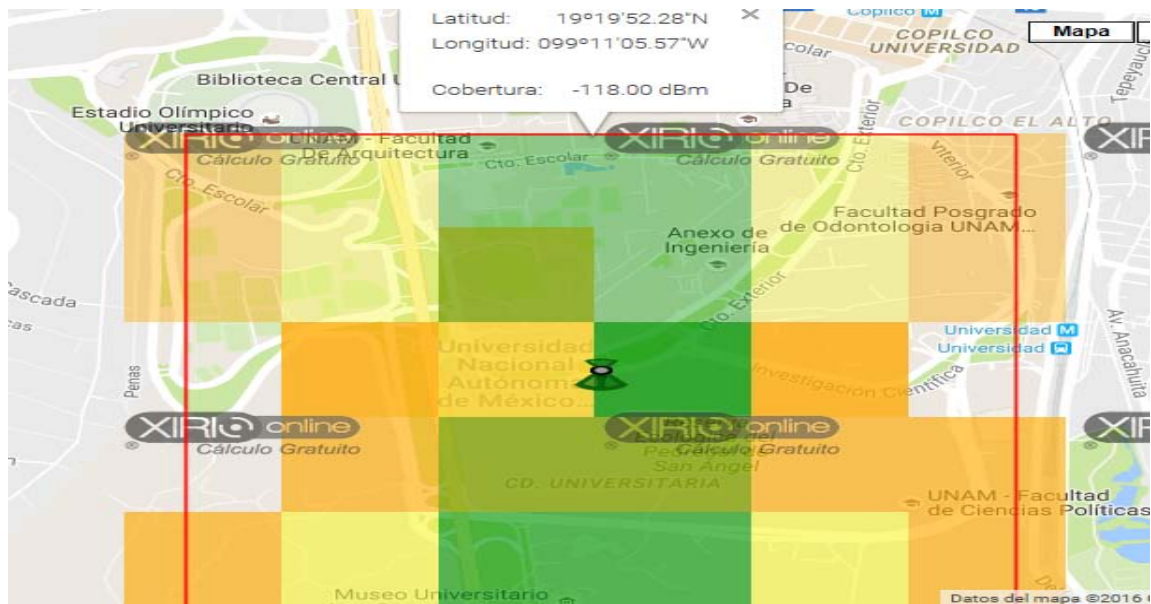


Figura 7.52 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).

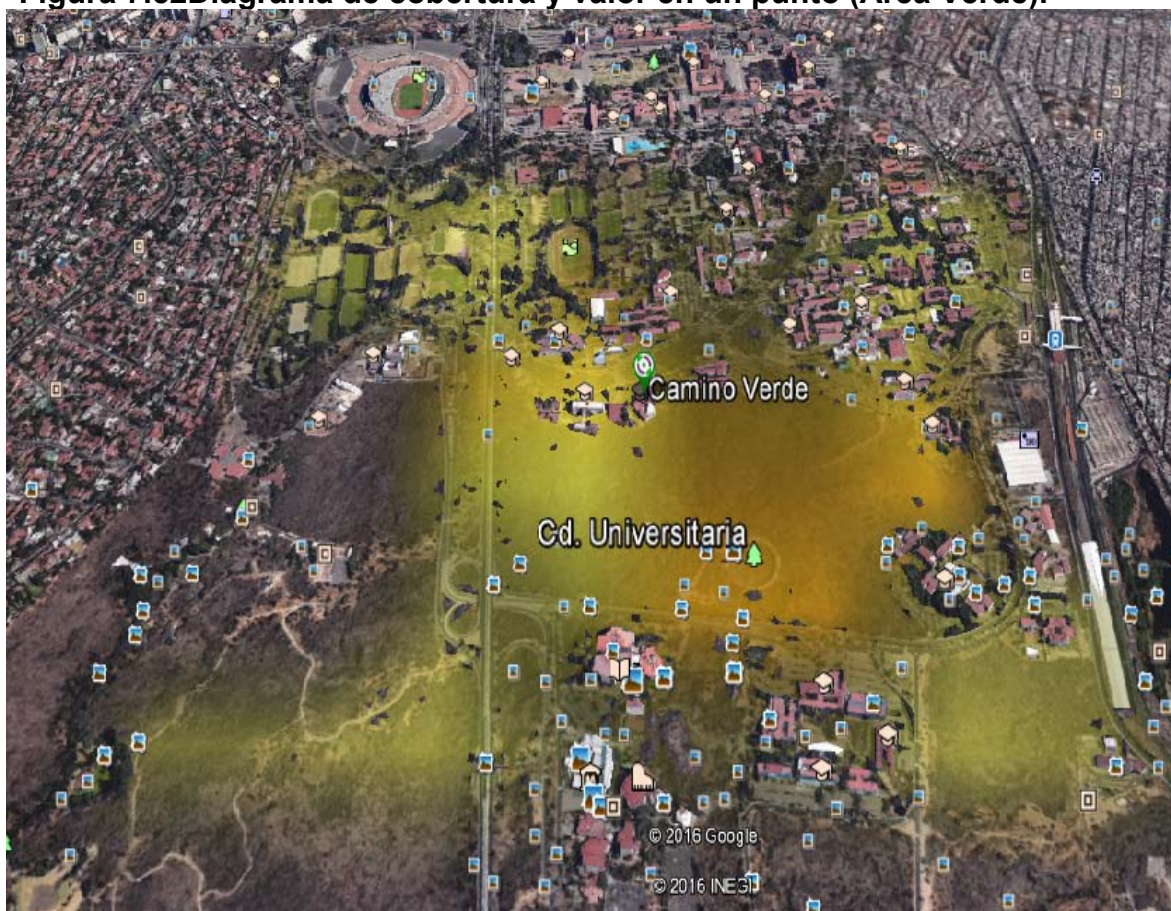


Figura 7.53 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.

Campus Iztacala

A continuación se muestra el resultado para la FES Iztacala

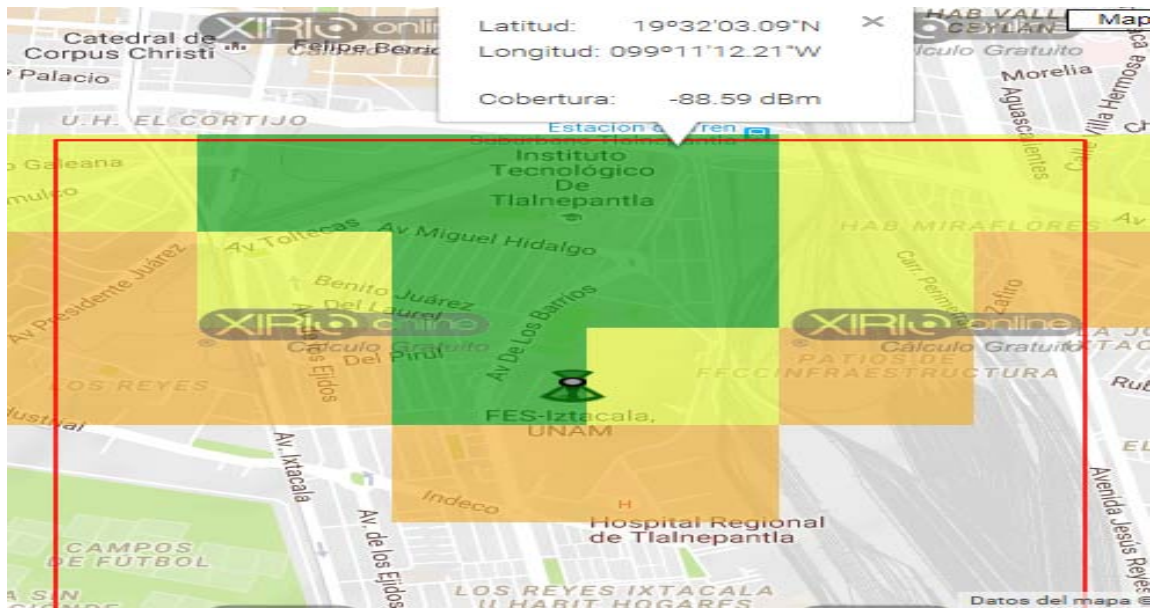


Figura 7.56 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).



Figura 7.57 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.

Campus Cuautitlan

A continuación se muestra el resultado para la FES Cuautitlan

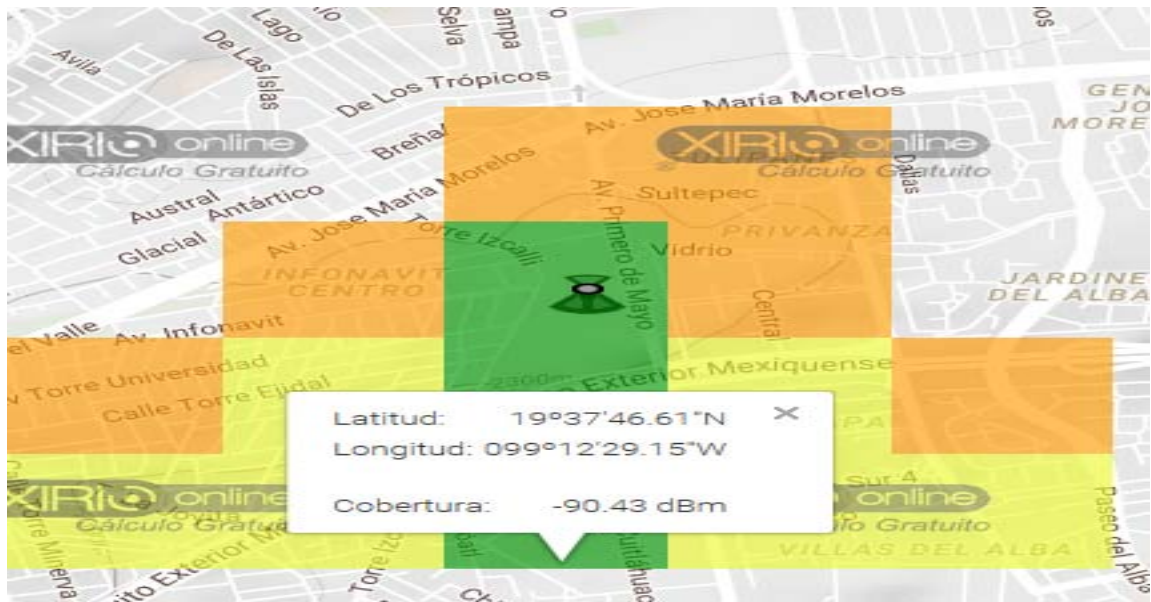


Figura 7.58 Diagrama de cobertura y valor en un punto (Área Verde).

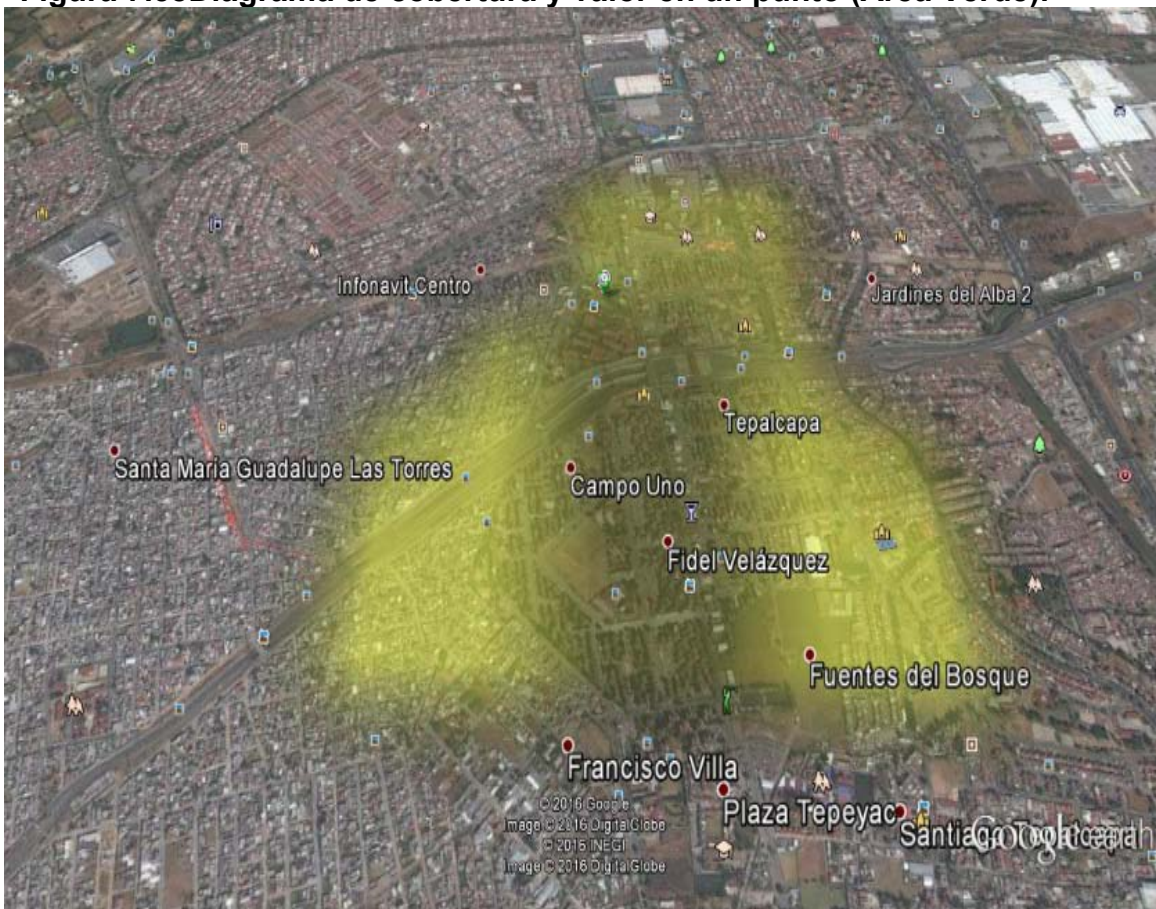


Figura 7.59 Diagrama de cobertura extrapolado a Google Earth.

7.9 Estudio Financiero.

La parte final de este proyecto de tesis contempla el análisis de costo que tendría que considerarse para que la solución tecnológica de LTE se ponga en operación. Comenzaremos con la parte base de la infraestructura en este caso las torres de comunicación para cada sitio. En esta parte se ha considerado torres arriostradas de 30m, lo anterior se debe a que las distancias y alturas de edificaciones entre los enlaces son considerables.

CANT	UM.	DESCRIPCION	PRECIO UNIT.MXN	PRECIO TOTAL MXN
		TORRE DE 20 METROS AT-45		
		SUMINISTRO DE TORRE ARRIOSTRADA DE 20 MTS DE ALTURA		
9	LOTE	TORRE DE 20 METROS 1 JGO BASE AT-45 CON ANCLAS "L". 10 PZA TRAMO AT-45. 1 PZA REMATE AT-45. 3 PZA PERNO ANCLA DE ¾" Ø x 1.80 M CON MUERTO. 3 JGO PLACAS IGUALADORAS DE ESFUERZO D-7G. 5 JGO HERRAJES PARA RETENIDA AT-45. 1 JGO BRAZO ANTITORSIÓN AT-45. 925 M CABLE DE ACERO TIPO RETENIDA DE Ø 1/4". 21 PZA TENSOR FORJADO DE Ø 1/2" x 6" DOBLE OJO. 21 PZA ROZADERA DE 5/16" P/CABLE DE ACERO 1/4". 132 PZA GRAPA PERRO DE ¼" D. 1 PZA LÁMPARA TIPO OL-2, FOCOS 116 W /8000 H, CURVA. 1 PZA FOTOCELDA DE 117 V, 15 A CON BASE Y MÉNSULA. 50 M CABLE USO RUDO 2 x 12 AWG. 30 PZA ABRAZADERA SIN FIN INOXIDABLE DEL # 24. 1 JGO TORNILLERÍA PARA TORRE (INCLUÍDA)	\$ 83,975.00	\$ 755,775.00
9	LOTE	SISTEMA DE PARARAYOS 1 PZA PARARRAYOS TIPO DIPOLO CORONA. 1 PZA MÁSTIL DE ALUMINIO DE 2" Ø x 3.0 M. 60 MTS CABLE THW 2/0 NEGRO 600V NO CORTE CONDULAC CARRETE 3 PZA REHILETE PARA SISTEMA DE TIERRA CON CONECTOR. 3 PZA INTENSIFICADOR "GEM" BULTO DE 11.36 KGS 25 LIBRAS 6 PZA COMPUESTO SALES LIQUIDAS PREPARACION DE TIERRA FISICA GALON 3.8 LTS	\$ 29,320.00	\$ 263,880.00

		<p>4 PZA CARGA NO.115 F-20 3 PZA REGISTRO 28CM X 16.2 F. DE VID DIAM.C/TAPA METÁLICA 200 PZA CINCHOS METALICOS 20 CENTIMETROS</p>		
9	LOTE	<p>SISTEMA DE TIERRA FÍSICA 1 PZA REHILETE PARA SISTEMA DE TIERRA CON CONECTOR. 45 MTS CABLE CAL.6 THW-LS KOBREX VERDE 20 MTS CABLE 1/0 CU AISLADO 19H METRO COBRE 19 HILOS 100 CM SOLERA 2" X 1/4" COBRE X CM 51mm ANCHO x 6.5mm (ESPESOR) 90 CM SOLERA DE ALUMINIO 4 PZA AISLADOR CAT.P300A22 F.DE VIDR IO 4 PZA TRAPECIO 1 PZA CARGA No.115 F-20 200 PZA CINCHOS METALICOS 20 CENTIMETROS 6 PZA ZAPATA TERM.CAT.YA6C-L PONCH.(6 AWG) 4 PZA ZAPATA TERM.CAT.QB1C CAL.(4-1) 3 PZA CONECTOR MEC.CAT.QT2C2C T; MCA .BURNDY ; 12 PZA TORNILLO DE BRONCE C/TUERCA Y ROLDANAS 12 JGO DE TORNILLO BRONCE/SILICIO 3/8" X 3/4". DOBLE RONDANA A PRESION Y TUERCA. 1 PZA REGISTRO 28cm x 16.2 F. DE VID DIAM.C/TAPA METÁLICA 1 PZA INTENSIFICADOR "GEM" BULTO DE 11.36 KGS 25 LIBRAS 2 PZA COMPUESTO SALES LIQUIDAS PREPARACION DE TIERRA FISICA SE VENDE POR GALON 3.8 LTS.</p>	\$15,228.33	\$ 137,055.00
9	LOTE	<p>ATERRIJAJE DE RETENIDAS 3 PZA VARILLA 5/8 X 1.5 MTS 3 PZA CARGA No.115 F-20 3 PZA CONECTOR MEC.CAT.QT2C2C T; MCA .BURNDY ; 3 PZA INTENSIFICADOR "GEM" BULTO DE 11.36 KGS 25 LIBRAS 6 PZA COMPUESTO SALES LIQUIDAS PREPARACION DE TIERRA FISICA, GALON 3.8 LTS 3 PZA CARGA No.115 F-20 3 PZA REGISTRO 28cm x 16.2 F. DE VID DIAM.C/TAPA METÁLICA</p>	\$ 12,161.67	\$ 109,455.00

		40 MTS CABLE 1/0 CU AISLADO 19H METRO COBRE 19 HILOS 40 PZA GRAPA PERRO DE ¼" D.		
9	LOTE	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CHAROLA DE 20 METROS ALUMINIO DE 15 CM DE ANCHO X 5 CM DE ALTO, INCLUYE BASES PARA CHAROLA.	\$ 25,433.33	\$ 228,900.00
9	LOTE	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE 60 METROS DE TUBERÍA PVC PARED GRUESA DE 2", PARA CNALIZACIÓN DE CABLE DE TIERRA FISICA, CABLE DE PARA PARARYOS	\$ 22,860.00	\$ 205,740.00
9	LOTE	TRANSLADO DE TORRE Y MATERIALES TRANSLADO DE TORRE.	\$ 4,450.00	\$ 40,050.00
			SUBTOTAL	1,740,855.00
		CALCULO ESTRUCTURAL DE TORRE		
9	LOTE	CALCULO ESTRCUTURAL DE TORRE.	\$ 29,533.33	\$ 265,800.00
9	LOTE	MEMORIA TÉCNICA, ENTREGA DE PLANOS DE TRAYECTORIAS DE LINEAS DE TRANSMISIÓN, PLANOS DE TUBERÍA DE TIERRA FISICA Y PLANOS DE TUBERIA DE PARARAYOS	\$ 8,333.33	\$ 75,000.00
			SUBTOTAL	340,800.00
		INSTALACIÓN		
9	LOTE	INST TORRE DE 30 METROS DE ALTURA SUMINISTRO Y APLICACIÓN DE PINTURA ESMALTE BASE AGUA MCA. SHERWING WILLIANS DE ACUERDO A NORMAS Y ESPECIFICACIONES DE LA S.C.T. Y D.G.A.C. INSTALACIÓN DE TORRE AT-45 DE 30 METROS DE ALTURA. INSTALACIÓN DE LUCES DE OBSTRUCCION. INSTALACIÓN DE TRINAGULO ANTITORSIÓN. INST DE PARARRAYOS REALIZACIÓN DE POZO. INSTALACIÓN DE TIERRA FÍSICA, PLACAS COLECTORAS DE TIERRAS Y POZO DE TIERRAS. INSTALACIÓN DE 4 SOPORTES TIPO BANDERA DE ANTENAS DE MICROONDAS. INST DE TUBERIA PARA ALIMENTACIÓN	\$ 93,100.00	\$ 837,900.00
			SUBTOTAL	837,900.00
		DADOS		
9	LOTE	DADO CENTRAL DE 50 CM DE DIAM. CONCRETO F`C=250 KG/CM2 Y ACERO DE REFUERZO FY= 4200 KG/CM2 DE 2,50 MTS Y ZAPATA DE DESPLANTE.	\$ 11,666.67	\$ 105,000.00

		INCLUYE: CEMENTO, PLANTILLA, GRAVA, ARENA, VARILLA, ALAMBRON, ALAMBRE RECOCIDO, CIMBRA, EXCAVACION, RELLENO Y MANO DE OBRA.		
27	LOTE	DADO PARA RETENIDA DE 30 CM. CONCRETO F' C=250 KG/CM2 Y ACERO DE REFUERZO FY= 4200 KG/CM2 DE 2,50 MTS Y ZAPATA DE DESPLANTE. INCLUYE: CEMENTO, PLANTILLA, GRAVA, ARENA, VARILLA, ALAMBRON, ALAMBRE RECOCIDO, CIMBRA, EXCAVACION, RELLENO Y MANO DE OBRA.	\$ 7,500.00	\$ 202,500.00
			SUBTOTAL	\$307,500.00
			SUBTOTAL	\$3,227,055.00

Tabla 7.26 Estudio financiero 1.

Una vez que tenemos la infraestructura que soportara la tecnología de nuestros enlaces, tomaremos en cuenta todo el equipo activo y pasivo que se necesitara para realizar la comunicación de punto a punto, para ejemplo de este proyecto de tesis se contempló tecnología radwin.

CANT	UM.	DESCRIPCION	PRECIO UNIT.MXN	PRECIO TOTAL MXN
		SUMINISTRO DE EQUIPO RADWIN PARA ENLACES DE MIRCOONDAS		
5	LOTE	Estación base de altacapacidad (HBS) Radwin 5000 JET Multipunto, RADWIN 5000 JET HPMP HBS 5BG5 Series Base Station Radio with 20 dBi Integrated antenna, supporting 5GHz 256QAM up to 750Mbps net aggregate throughput, factory default 4.9GHz FCC/IC	\$145,960.00	\$ 729,800.00
6	LOTE	Unidad para suscriptores de altacapacidad (HSU) Radwin 5000 JET, RADWIN 5000 JET HPMP HSU 5A0 Series Subscriber Unit Radio with 23 dBi integrated antenna, supporting 5.xGHz 256QAM up to 100Mbps net aggregate throughput, factory default 5.8GHz FCC/IC	\$ 21,000.00	\$ 126,000.00
1	LOTE	Unidad para interiores Ethernet + 16 E1/T1, IDU-C with 16 TDM ports, 2 Ethernet 10/100 BaseT interfaces and SFP port	\$ 37,800.00	\$ 37,800.00
6	LOTE	Unidad para interiores Ethernet + 2 E1/T1	\$ 13,660.00	\$ 81,960.00
2	LOTE	Unida de agregacion de Enlaces	\$ 11,560.00	\$ 23,120.00
			SUBTOTAL	\$ 998,680.00
INSTALACIÓN				
6	LOTE	INSTALACION DE EQUIPO DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN	\$ 25,000.00	\$ 150,000.00
			SUBTOTAL	\$ 150,000.00
			SUBTOTAL	\$ 1,148,680.00

Tabla 7.27 Estudio financiero 2.

Con toda la infraestructura antes contemplada ya tendríamos comunicación entre campus dentro de la UNAM, ahora nos avocamos a tomar en cuenta la última parte de la comunicación de nuestro proyecto de tesis, nos referimos específicamente a la tecnología LTE.

CANT	UM.	DESCRIPCION	PRECIO UNIT.MXN	PRECIO TOTAL MXN
		SUMINISTRO DE EQUIPO LTE		
7	LOTE	Estación base eNB	\$ 145,544.00	\$ 1,018,808.00
21	LOTE	Antenas RF (incluyendo feeders y conectores)	\$ 2,799.00	\$ 58,779.00
			SUBTOTAL	\$1,077,587.00
		INSTALACIÓN		
7	LOTE	INSTALACION DE EQUIPO LTE	\$ 20,000.00	\$ 140,000.00
			SUBTOTAL	\$140,000.00
			SUBTOTAL	\$1,217,587.00

Tabla 7.28 Estudio financiero 3.

Por último y como parte importante del soporte de la infraestructura se contempla los dispositivos para el site de cada sitio, en este punto se está contemplando que ya existe site en las edificaciones donde se encuentra las torres de transmisión y recepción, tomando en cuenta que las torres de los repetidores no tiene site y hay que considerarlo completo.

CANT	UM.	DESCRIPCION	PRECIO UNIT.MXN	PRECIO TOTAL MXN
		SUMINISTRO DE EQUIPO PARA SITE		
9	PZA	UPS 3 KVA	\$ 30,000.00	\$ 270,000.00
2	PZA	AIRE ACONDICIONADO 1 TONELADA	\$ 21,000.00	\$ 42,000.00
2		CUARTO DE COMUNICACIONES (SITE) OBRA CIVIL 4 X 4	\$ 50,000.00	\$ 100,000.00
9	LOTE	CONEXIONADO, ORGANIZADORES, CABLEADO Y MISCELANEA PARA LA INSTALACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS.	\$ 10,000.00	\$ 90,000.00
2	PZA	RACK PARA 20 UNIDADES RACK	\$ 13,000.00	\$ 26,000.00
			SUBTOTAL	528,000.00
		INSTALACIÓN		
9	LOTE	INSTALACION Y CONEXIONADO DE EQUIPO DENTRO DEL SITE	\$ 15,000.00	\$ 135,000.00
		6256322	SUBTOTAL	\$ 135,000.00
			SUBTOTAL	\$ 663,000.00

Tomando en cuanto todos los subtotales antes mencionados nuestro proyecto de tesis para ser implementado tendría un costo aproximado de:

TOTAL SIN IVA	\$6,256,322.00
I.V.A. 16%	\$1,001,011.52
TOTAL	\$7,257,333.52

Tabla 7.29 Estudio financiero 4.

Es importante mencionar que la parte de equipamiento que normalmente se maneja en dólares americanos se está contemplando en pesos a un tipo de cambio de 20 pesos por cada dólar (Radwin, Nplayservices).

CONCLUSIONES.

La realización del presente trabajo requirió de un gran esfuerzo y dedicación para reunir la información necesaria debido a que la literatura existente, para los enlaces de microondas terrestres y sobre de todo de la tecnología LTE, es limitada. Por otra parte, nos permitió conocer la forma en cómo se lleva a cabo la planeación, desarrollo y puesta en marcha de enlaces con microondas y usar la tecnología LTE para la comunicación entre Ciudad Universitaria y sus campus en el área metropolitana.

La importancia de utilizar enlaces de microondas dedicados para la comunicación entre los campus, radica en la forma de acrecentar y garantizar que la red LTE llegue de forma eficaz hacia los campus, con la versatilidad de poder ser controlado y administrado desde una central remota, en este caso DGTIC (Ciudad Universitaria), sin necesidad de establecer puntos de control en cada una de las FES.

Tomando como punto de partida el progreso de los sistemas de telefonía móvil en los últimos años, lo que implica que México debe estar preparado para adentrarse en la era de las nuevas tecnologías; como parte de la premisa de adecuar al país a un progreso de esta índole, nosotros como ingenieros, hemos dedicado nuestra investigación al diseño de redes microondas mediante tecnología LTE.

La propagación de la señal en cada uno de los campos mediante LTE, es innovador debido a que lo más común es propagarlo mediante WiFi, sin embargo, como se explicó durante la tesis, la tecnología LTE permite a los usuarios descargar y subir información más rápido, es fácil de implementar y a un costo muy bajo.

Para diseñar nuestra red de microondas tuvimos que realizar análisis del terreno, para la colocación de torres, mediante consulta de información del INEGI, también visitamos cada una de las FES involucradas en este diseño, con la finalidad de ubicar en donde se instalarán las torres, así como los equipos a utilizar. Se realizaron los cálculos manualmente para determinar el óptimo funcionamiento de nuestros enlaces tanto de microondas como de LTE.

Los equipos propuesto se eligieron en base a sus características y necesidades de nuestro proyecto, algunos factores que se tomaron en cuenta son; frecuencia, alcance (km), ancho de banda.

El objetivo de la presente tesis fue el diseño de una red interna de telecomunicaciones al servicio de la UNAM, para lograr este objetivo inicialmente se realizaron dos posibles propuestas de diseño de enlace por medio de microondas entre CU y las FES, una de estas era un diseño en forma de anillo, sin embargo esta propuesta no fue posible desarrollarla debido a que se encontraron obstáculos en la trayectoria que causarían interferencia en la señal transmitida; por lo que se optó por un diseño en forma de estrella la cual comunicará las FES con el sitio DGCTIC (CU), para esto fue necesario emplear dos repetidores debido a las largas distancias que se deben cubrir, el repetidor 1 (19°21'15.69"N, 99°14'38.11"O) permitirá el enlace con FES Iztacala, FES Acatlán y repetidor 2 (19°35'24.12"N, 99°12'23.94"O), y este último a su vez permitirá el enlace con FES Cuautitlán campus 1 y campus 4. Comprobamos la viabilidad de este diseño mediante el análisis de enlace, en donde observamos que la línea de visión óptica y efectiva con una refracción $K = 4/3$ permiten realizar estos enlaces.

Se determinó la zona de Fresnel para cada enlace, tomando en cuenta los puntos más elevados en la trayectoria y las alturas propuestas de las antenas, para así obtener el radio de la primera, segunda y/o tercera zona. Se observó que en los enlaces: DGTIC (CU) – FES Zaragoza, DCTIC (CU) – FES Aragón, DGTIC (CU) – Repetidor 1, Repetidor 1 – FES Iztacala, Repetidor 1 – Repetidor 2, Repetidor 2 – FES Cuautitlán Campus 1 y Repetidor 2 – FES Cuautitlán Campus 4 tienen una zona de fresnel al 100%, lo que indica que no hay ningún obstáculo que interfiera con ésta; sin embargo en el caso del enlace Repetidor 1 – FES Acatlán observamos que con la altura propuesta de antenas para el enlace existía un obstáculo que interfería con la zona de Fresnel, por lo que tuvimos que realizar el cálculo de despeje para determinar la altura de la antena para el sitio FES Acatlán. El resultado de este cálculo indico que es necesario la colocación de una antena de 30m en FES Acatlán permitiendo una zona de Fresnel al 60% lo que indica que enlace es factible. Lo anterior nos permite concluir que el diseño de estrella

propuesto con dos repetidores permite establecer una red de transmisión de voz y datos a través de microondas.

De igual manera se determinaron los requerimientos técnicos de enlaces como ubicación de nodos, tecnología empleada, frecuencia de operación (5GHz), también se calcularon las características que debe cumplir el enlace para la frecuencia de operación que es el PIRE (48dBm) y la pérdida en el espacio libre, estos valores indican las características para la selección de equipo.

En relación a las torres que se colocarán sobre edificios se decidió emplear torres arriostradas, debido a su menor peso y bajo costo, mientras que los sitios repetidor 1 y repetidor 2 se seleccionaron torres autosoportadas. La altura propuesta de las torres es de 20 metros con excepción de las torres que se colocarán en FES Acatlán y repetidor 1 que serán de 30 metros. La principal característica de las antenas propuestas es que estas deben ser direccionales, ya que la energía radioeléctrica es un haz angosto que se puede dirigir hacia la antena receptora y al ser antenas direccionales la magnitud de la potencia efectiva aumenta para la transmisión y recepción.

Con la ayuda del software Radio Mobile obtuvimos la simulación de nuestros enlaces de microondas, éste software te proporciona de manera gráfica la línea de vista, zona de Fresnel, así como los valores de Azimut. Comprobando que nuestros cálculos son correctos y que nuestro diseño es óptimo para un correcto funcionamiento y desempeño.

Se decidió emplear el equipo RADWIN 5000 JET por que brinda una gran capacidad de subida y bajada por enlace, otra ventaja de este equipo es que se puede usar como repetidor. Una vez hechos los enlaces por microondas se propone establecer una red local LTE por cada Campus, para esto se utiliza el equipo Flexi Multiradio 10 BS de la marca Nokia.

En el caso de la red LTE, de acuerdo a la normativas de la IFT en México para la transmisión de LTE se pueden emplear las bandas 1710 -1770/2110 – 2170 MHz, que corresponde a la banda 4 de LTE, que permite emplear un ancho de banda de 1.4, 3, 5, 15 y 20 MHz. De acuerdo a las especificaciones de equipo Flexi Multiradio 10BS de Nokia, para el presente estudio se empleó la banda de subida

de 2100 MHz y de 1700 MHz de bajada con un ancho de banda de 10MHz, con un modelo de canal EPA 5Hz, scheduling del tipo proportional fair con una celda de tipo urbana.

Para las condiciones de bajada consideramos un rendimiento de 22 920 Kbps, con PIRE de 52.1 dBm, sensibilidad del receptor -88.84 dBm, requerimiento de potencia isotrópica -51.58 dB y una pérdida máxima de trayectoria en espacio libre de 103.68 dB, con estos datos a través del modelo COST-231-Hata se determinó la distancia entre el transmisor y el borde de la celda para cada sitio (DGTIC (CU) 0.97 km, FES Izcala 0.96 km, FES Aragón 0.98 km, FES Zaragoza 0.97 km, FES Acatlán 1.04 km y para FES Cuautitlán Campus 1 y 4 es de 0.92 km). Con los valores de la distancia se determinó el área de cobertura para cada celda (DGTIC (CU) 2.44 km², FES Izcala 2.41 km², FES Aragón 2.50 km², FES Zaragoza 2.44 km², FES Acatlán 2.82 km² y para FES Cuautitlán Campus 1 y 4 es de 2.18 km²).

Para las condiciones de subida consideramos un rendimiento de 4136 Kbps, con PIRE de 20 dBm, sensibilidad del receptor -103.87 dBm, requerimiento de potencia isotrópica -81.66 dB y una pérdida máxima de trayectoria en espacio libre de 101.66 (dB), con estos datos se determinó la distancia radial (DGTIC (CU) 0.96 km, FES Izcala 0.95 km, FES Aragón 0.97 km, FES Zaragoza 0.96 km, FES Acatlán 1.03 km y para FES Cuautitlán Campus 1 y 4 es de 2.15 km). Con los valores de la distancia se determinó el área de cobertura para cada sitio (DGTIC (CU) 2.41 km², FES Izcala 2.34 km², FES Aragón 2.47 km², FES Zaragoza 2.41 km², FES Acatlán 2.78 km² y para FES Cuautitlán Campus 1 y 4 es de 2.15 km²).

Tomando en cuenta el área de los campus de la UNAM (DGTIC (CU) 7.093 km², FES Izcala 0.244 km², FES Aragón 0.346 km², FES Zaragoza 0.058 km², FES Acatlán 0.295 km², FES Cuautitlán Campus 1 (0.084 km²) y FES Cuautitlán Campus 4 es de 0.364 km²) y el área de cobertura de subida calculado, podemos concluir que nuestra propuesta de red LTE cubre las necesidades de los usuarios en los campus de la UNAM, en el caso de Ciudad Universitaria aunque es una extensión mayor de área (7.093 km²) y considerando que la cobertura LTE es de 2.41 km² correspondiente a un tercio del área total, ya que se emplean antenas con un diagrama de radiación que ocupan sólo 120 grados, se tendría un área

total para el eNodeB de 7.23 km²; por lo tanto la cobertura de la red LTE calculada es satisfactoria.

De igual forma nos apoyamos en la herramienta de planificación Xirio on line, para determinar las zonas de cobertura que brindarán nuestras antenas LTE. La configuración de los parámetros se obtiene de los utilizados y asignados en el apartado de Cálculo de cobertura LTE. Por lo anterior se da por hecho que la cobertura que proporcionan nuestros equipos LTE es apropiada para cada uno de los Campus.

Definitivamente consideramos que el presente trabajo es una herramienta accesible y entendible para estudiantes e interesados que pretendan ampliar sus conocimientos en este ramo de las telecomunicaciones e incluso tomarlo como referencia para el diseño de redes de microondas con tecnología LTE.

Finalmente podemos concluir que se cumplió con el objetivo de diseñar una red interna de telecomunicaciones al servicio de la UNAM, con la finalidad de ofrecer una alternativa de transmisión de voz y datos con base en tecnología LTE, a un bajo costo entre los campus universitarios de la zona metropolitana (Ciudad Universitaria, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Iztacala, Aragón, Cuautitlán, Zaragoza). Para atender la necesidades de comunicación en actividades de investigación, académicas, administrativas y culturales en tiempo real.

GLOSARIO.

A

Acoplador de antena sintonizado. (Antenna Coupler/Tuner). Dispositivo entre el transmisor y la antena que modifica las características de la carga presentada al transmisor, de forma que transfiera la máxima potencia a la antena.

ALE (Automatic Link Establishment). Establecimiento Automático de Enlace. Técnica que permite a las estaciones de radio enlazarse automáticamente unas con otras.

AM (Amplitude Modulation) Amplitud Modulada. Técnica usada para transmitir información, en la cual la amplitud de la frecuencia de la portadora es modulada por la entrada de audio, transmitiéndose la portadora completa y ambas bandas laterales.

AME (Amplitude Modulation Equivalent) Amplitud Modulada Equivalente. Método de transmisión en banda lateral única, en el cual la portadora se reinserta para permitir la recepción por parte de los receptores convencionales de AM.

Amplitud Magnitud pico a pico de una onda de radio.

Ancho de banda (Bandwidth). Rango de frecuencia ocupado por una señal dada.

Ángulo de despegue (Take Off Angle). Ángulo entre el eje del lóbulo principal de un patrón de antena y el plano horizontal de la antena de transmisión.

Antena biconica (Biconical Antenna). Antena utilizada para estaciones fijas; diseñada para cubrir el rango de 100 a 400 MHz.

Antena dipolo (Dipole Antenna). Antena versátil que usualmente es alimentada por un alambre en el centro de su longitud. Su orientación proporciona polarización horizontal o vertical.

Antena direccional (Directional Antenna). Antena que tiene mayor ganancia en una o más direcciones.

Antena látigo vertical (Vertical Whip Antenna). Antena omnidireccional que tiene pequeños ángulos de despegue y polarización Vertical.

Antena Omnidireccional (Omnidirectional Antenna). Antena cuyo patrón no es direccional en el acimut.

Área de cobertura (Footprint). Áreas de línea de vista (LOS) cubiertas por un satélite.

ARQ (Automatic Repeat Request). Solicitud de Repetición Automática. Técnica de transmisión de datos para transferencia de datos libres de errores.

Asincrónico (Asynchronous). Sistemas de comunicaciones de datos que añade elementos de señal de arranque y parada a la información, con el propósito de sincronizar caracteres de datos individuales o bloques.

ASK (Amplitud Shift Keying). Desplazamiento Codificado de Amplitud. Forma de modulación en la que una señal digital desplaza la amplitud de la portadora.

Atenuación (Attenuation). Atenuación, debilitamiento, disminución progresiva.

B

Banda ancha (Broadband). Término que indica la ocupación relativa del espectro de una señal, para distinguirla de una señal de banda angosta.

Una señal de banda ancha típicamente tiene un ancho de banda que excede el doble de la más alta frecuencia de modulación.

Banda lateral (Sideband). Energía espectral, distribuida sobre o debajo de una portadora, resultante de un proceso de modulación.

Baudio (Baud). Unidad de velocidad de señalización equivalente al número de símbolos; por ejemplo, señales discretas por segundo.

BER (Bit Error Ratio). Tasa de Erro res. Número de bitios erróneos dividido para el número total de bitios transmitidos.

F

Filtro adaptivo de excisión (Adaptive Excision Filter). Técnica de procesamiento de señales que mejora la transmisión de datos. Rastrea y suprime la interferencia de banda angosta en la entrada del demodulador y reduce los efectos de interferencia de canal compartido (interferencia en el mismo canal que está siendo utilizado).

Filtro pasabanda (Bandpass Filter). Filtro que pasa una banda limitada de frecuencias. Se lo utiliza para retirar señales de ruido y espurias generadas en el

excitador o en las armónicas de la frecuencia de salida del amplificador de potencia.

FLTSATCOM (Fleet SATCOM). Grupo de satélites navales de la Armada de los Estados Unidos.

FM (Frequency Modulation). Frecuencia Modulada. Forma de modulación en donde la frecuencia de una portadora varía en proporción a una señal de audio modulada.

Frecuencia (Frequency). Número de ciclos completos por segundo de una señal, medidos en hertzios (Hz).

FSK (Frequency Shift Keying). Desplazamiento Codificado de Frecuencia. Forma de modulación en la cual una señal digital desplaza la frecuencia de salida entre valores discretos.

G

Ganancia (Gain). Relación del valor de un parámetro de salida, tal como potencia, comparada con su nivel de entrada. Normalmente expresada en decibeles.

Generador de claves (Key Generator). Dispositivo o proceso que genera la variable para un sistema codificador criptográfico.

H

HF (High Frequency). Alta Frecuencia. Normalmente, la banda de 3 a 30MHz. En la práctica, el límite inferior de la banda HF se extiende a 1.6 MHz

Hz (Hertz). Hertzio. Unidad básica de frecuencia.

I

IF (Intermediate Frequency). Frecuencia Intermedia. Frecuencia usada dentro del equipo como paso intermedio en la transmisión o recepción.

Impedancia (Impedance). Oposición al flujo de corriente de una combinación compleja de resistencia y reactancia. Reactancia es la oposición al flujo de corriente CA por un capacitor o un inductor. Un acoplador de antena ideal actuará para cancelar la componente reactiva de la impedancia de la antena; por ejemplo, presentando una reactancia inductiva igual si la antena tiene una reactancia

capacitiva y por el contrario una reactancia capacitiva igual, si la antena presenta una reactancia inductiva.

IMT (International Mobile Telecommunication). IMT es la abreviación en inglés de Telecomunicaciones Móviles Internacionales, el cual es un término acuñado en el seno de la UIT que se asocia tanto a las bandas aptas para el despliegue de comunicaciones móviles de banda ancha, como a la caracterización de las tecnologías que les sirven de plataforma.

Intercalación (Interleaving). Técnica que incrementa la efectividad de los códigos FEC mediante la distribución aleatoria de errores en los canales de comunicación, caracterizados por ráfagas de errores.

Ionósfera (Ionosphere). Región de partículas cargadas con electricidad o gases en la atmósfera de la Tierra, que se extiende desde 50 a 600 kilómetros (aproximadamente 30 a 375 millas) sobre la superficie de la Tierra.

ISB (Independent Sideband). Banda Lateral Independiente. Transmisión de banda lateral doble en la que la información transportada por cada banda lateral es diferente.

K

KEK (Key Encryption Key). Llave de Clave de Encriptación. Utilizada en encriptación digital.

L

LF (Low Frequency). Baja Frecuencia. Rango de frecuencia de 30 a 300 KHz.

Llave de encendido - apagado (On- Off Keying). Dispositivo para encender o apagar la portadora con llave telegráfica (código Morse). Lo mismo que CW.

LNA (Low Noise Amplifier). Amplificador de recepción de bajo ruido.

Lóbulo (Lobe). Área de fuerte radiación.

Lóbulo principal (Main Lobe). En un patrón de radiación de antena, el lóbulo que contiene la dirección de máxima intensidad de radiación.

Longitud de onda (Wavelength). Distancia entre el punto máximo de la onda al punto correspondiente en la onda adyacente.

LOS (Line of Sight). Línea de Vista. Término que se refiere a la propagación de la señal de radio en línea recta desde el transmisor al receptor, sin refracción; generalmente se extiende al horizonte visible.

LPD (Low Probability of Detection). Baja Probabilidad de Detección. Técnica para minimizar la probabilidad que la señal transmitida sea detectada por personas no autorizadas.

LSB (Lower Sideband). Banda Lateral Inferior. Diferencia en frecuencia entre la señal portadora de AM y la señal de modulación.

LUF (Lowest Usable Frequency). Frecuencia Más Baja Utilizable. La frecuencia más baja en la banda HF en la cual la intensidad de campo recibida es suficiente para proveer la relación requerida de señal-ruido.

M

Mezclado (Scrambling). Técnica COMSEC que mezcla separando la señal de voz en un número de bandas, desplazando cada banda hacia un rango diferente de frecuencia de audio y combinando las bandas resultantes en una salida de audio compuesta que modula al transmisor.

Modem (Modulator-Demodulator). Modulador- Demodulador. Dispositivo que modula y demodula señales. El modem convierte señales digitales en formato analógico para transmisión y convierte las señales analógicas recibidas en formato digital.

Modem de tono paralelo (Parallel Tone Modem). Transporta la información sobre tonos de audio simultáneos, en los cuales cada tono es modulado a una baja velocidad de conmutación.

Modem de tono serial (Serial Tone Modem). Transporta la información digital en un tono único de audio.

Modulación (Modulation). Proceso, o resultado del proceso, de la variación de una característica de la portadora, de acuerdo con una señal proveniente de la fuente de información.

MUF (Maximum Usable Frequency). Frecuencia Máxima Utilizable. Límite superior de las frecuencias usadas en un tiempo determinado para transmisión de radio entre dos puntos, mediante la propagación de la ionósfera.

Multibanda (Multiband). Radios militares que combinan las capacidades de VHF y UHF, HF y VHF, o HF-VHF-UHF (Stallings, 2004).

O

OHM. Ohmio. Unidad de medición de resistencia. Su símbolo es Ω .

Onda corta (Short Wave). Frecuencia de radio sobre 3 MHz.

Onda de superficie (Surface Wave). Onda que viaja a lo largo de la superficie de la Tierra y puede llegar más allá del horizonte.

Onda directa (Direct Wave). Onda que viaja en línea recta, debilitándose mientras aumenta la distancia.

Onda espacial (Sky Wave). Onda de radio que es reflejada por la ionósfera.

Onda terrestre (Ground Wave). Onda de radio que se propaga sobre la Tierra y ordinariamente es afectada por la presencia del suelo.

Onda terrestre reflejada (Ground Reflected Wave). Porción de la onda propagada que se refleja desde la superficie de la Tierra entre el transmisor y el receptor.

Órbita geoestacionaria (Geostationary Orbit). La velocidad de una órbita satelital estacionaria depende de su distancia sobre la Tierra. Si se coloca un satélite en una órbita estacionaria a 35.786 kilómetros sobre la línea ecuatorial, el satélite deberá viajar lo suficientemente rápido para rotar alrededor de la tierra en 24 horas. Ya que ésta es exactamente la misma velocidad a la que rota la Tierra, un satélite colocado en esa órbita se mantendrá estacionario en el mismo lugar sobre la Tierra ya que los dos están rotando juntos. A esto se denomina órbita geoestacionaria.

OTAR (Over The Air-Rekeying). Reconmutación a Través del Aire.

Técnica desarrollada por Harris para eliminar la necesidad de cargar manualmente las claves de encriptación, permitiendo un método más seguro para el manejo de las mismas.

P

Patrón de radiación (Radiation Pattern). Característica determinada por el diseño de una antena e influenciada fuertemente por su ubicación con respecto al suelo. Los patrones de radiación dependen de la frecuencia.

Polarización (Polarization). Orientación de una onda relativa a un plano de referencia.

Portadora (Carrier). Señal de radiofrecuencia que puede ser modulada con señales de información.

Preámbulo (Preamble). Secuencia conocida de bits enviados al inicio de un mensaje, la que es utilizada por el receptor para sincronizarla con su reloj interno.

Propagación (Propagation). Movimiento de energía de radiofrecuencia a través de la atmósfera.

Propagación por conducción atmosférica /guía de onda natural (Ducting / Wave Ducting). Efecto que hace que las ondas de radio se doblen y viajen entre las capas de aire de diferentes densidades.

PSK (Phase Shift Keying). PSK es similar a FSK excepto que es la fase de la portadora, en lugar de la frecuencia, la que es modulada.

PSK M-ARIA (M-ary Phase Shift Keying). Código de Desplazamiento de Fase M-aria. Método para incrementar la velocidad de datos de las transmisiones de radio. "M" se refiere al número de fases utilizadas en el esquema de modulación.

R

RAU (Remote Access Unit). Unidad de Acceso Remoto.

Refacción (Refraction). Curvatura de una onda de radio al pasar oblicuamente de un medio a otro.

Ruido atmosférico (Atmospheric Noise). Ruido de radio ocasionado por procesos atmosféricos naturales (principalmente por las descargas eléctricas durante las tormentas).

Ruido cósmico (Cosmic Noise). Ruido aleatorio originado fuera de la atmósfera de la Tierra.

S

Salto de frecuencia (Frequency Hopping). Conmutación rápida (salto) de la frecuencia del sistema de radio tanto para el receptor como el transmisor, de frecuencia en frecuencia en patrones aleatorios aparentes, utilizando una referencia común de tiempo.

SATCOM (Satellite Communications). Comunicaciones Satelitales.

Sincrónico (S y n c h ronous). Forma de comunicaciones de datos que usa un preámbulo para alertar al receptor que está ingresando un mensaje y para permitir sincronizar a un reloj de bitios interno.

Sistema Asimétrico de claves (Asymmetrical Key System). Sistema de manejo de claves que permite comunicaciones seguras de doble vía entre todos los usuarios que tengan una clave pública y una clave privada.

Sistema simetrico de claves (Symmetric Key System). Sistema de manejo de claves en el cual la misma clave encripta y desencripta los datos.

SMC (Satellite Management Center). Centro de Administración Satelital. Regula y asigna los recursos satelitales a los usuarios.

SNR (Signal-to-Noise Ratio). Relación Señal/Ruido. La relación de la potencia de la señal deseada a la potencia del ruido en un ancho de banda especificado.

SSB (Single Sideband). Banda Lateral Única. Técnica de modulación en la cual la portadora y una banda lateral (superior o inferior) son suprimidas, de manera que toda la potencia se concentre en la otra banda lateral.

T

TACSAT. Satélite Táctico.

TCM (Trellis Coded Modulation). Modulación Codificada de Trellis. Técnica de codificación que proporciona la capacidad máxima de velocidad de datos a los flujos de datos PSK, mejorando el margen de ruido.

TDM (Time-Division Multiplexing). Multicanalización por División de Tiempo. Proceso de muestreo en el tiempo para combinar o multicanalizar diversas señales de información para su transmisión en una sola portadora o canal de comunicación.

TEK (Traffic Encryption Key). Clave de Encriptación de Tráfico. Usada en encriptación digital.

Texto cifrado (Cipher Text). Datos encriptados.

TIU (Telephone Interface Unit). Unidad de Interfaz Telefónico.

Tráfico (Traffic). La información pasada por un canal de comunicaciones.

Transceptor (Transceiver). Equipo que usa circuitos comunes con el fin de proveer las capacidades de transmisión y recepción .

TRANSEC (Transmission Security). Seguridad en Transmisión. Técnica que previene la detección de señales o el bloqueo de la trayectoria de transmisión.

Trayectoria múltiple (Multipath). Fenómeno de propagación resultante en que las señales de radio llegan a la antena receptora por dos o más trayectorias.

U

UHF (Ultra High Frequency). Ultra Alta Frecuencia. Parte del espectro de radio de 300 MHz a 3 GHz.

USB (Upper Sideband). Banda Lateral Superior. Banda portadora de información; es la frecuencia producida por la adición de la frecuencia de la portadora y la frecuencia de modulación.

V

VHF (Very High Frequency). Muy Alta Frecuencia. Parte del espectro de radio, de 30 a 300 MHz.

VOCODER. Dispositivo que convierte sonidos en una corriente de datos que pueden ser enviados en un canal HF. Abreviación de codificador descodificadorde voz.

ANEXOS.

Especificaciones y características de elementos de equipos para la transmisión de microondas y tecnología LTE.

RADWIN 5000 JET PUNTO A MULTIPUNTO.

COMPONENTES INALÁMBRICOS RADWIN 5000 JET

La estación base y las unidades para suscriptor RADWIN 5000 JET son robustecidas y cumplen con IP67 para operación de larga duración en condiciones difíciles. Funcionando a 4,9-5,8 GHz y 3,3-3,8/3,65 GHz, las unidades de radio cumplen con las regulaciones líderes del mercado. Todas las unidades de radio tienen bajo consumo de energía, alimentadas por Ethernet.

ESTACIONES BASE DE ALTA CAPACIDAD (HBS) RADWIN 5000 JET CON FORMACIÓN DE HACES DISRUPTIVA

La serie HBS RADWIN ofrece una estación base compacta para exteriores que incluye una antena formadora de haces MIMO 2x2, que cubre un sector de 90°.

- Funciona para aplicaciones fijas y nómadas.
- Suministro de energía por PoE o una unidad de agregación de datos dedicada (IDU-H).
- Incluye una antena y un receptor GPS incorporados para sincronización inter-sitio, simplificando el proceso de instalación.

Hay disponibles dos unidades HBS:

- Ultra-capacidad: Hasta 750 Mbps, opera en QAM 256 sobre un canal de 80 MHz
- Alta capacidad: Hasta 250 Mbps sobre un canal de 40 MHz

Unidades para suscriptor del alta capacidad (HSU) RADWIN 5000 JET

La serie HSU incluye:

- Ultra-capacidad, entregando 100 o 250 Mbps (compatible con QAM256)
- Unidades de alta capacidad y bajo impacto visual, que entregan hasta 100 Mbps.

La capacidad de la unidad se puede actualizar remotamente mediante una clave de software, permitiendo baja inversión inicial, a la vez que asegurando la capacidad de crecimiento futuro.



Especificaciones del producto

Máxima capacidad de red neta agregada

	Estación base		Unidades para suscriptor de alta capacidad			Unidades para suscriptor de ultra capacidad	
	750 Mbps (QAM256)	250 Mbps	10 Mbps	25 Mbps	50 Mbps	100 Mbps (QAM 256)	250 Mbps (QAM 256)
4,9-5,8 GHz							
3,3-3,8 GHz/3,65 GHz		250 Mbps	10 Mbps	25 Mbps	50 Mbps		

Configuraciones de antena

4,9-5,8 GHz	Antena formadora de haces: 20 dBi (5,1 - 5,8GHz), 17 dBi (4,9GHz)	Int. 17 dBi, 23 dBi, Con.	Int. 17 dBi, 23 dBi, Con.	23 dBi, Con.	23 dBi, Con.	23 dBi, Con.
3,3-3,8 GHz/3,65 GHz	Antena formadora de haces 17 dBi	Int. 13 dBi, 20 dBi, Con.	Int. 13 dBi, 20 dBi, Con.	Int. 20 dBi, Con.		

Radio	
Número de HSU por HBS	Hasta 32 ³ HSU simultáneamente
Alcance	Hasta 40 km (25 millas)
Bandas de frecuencia	Radio multibandas con frecuencias de 4,9-5,8 GHz o 3,3-3,8/3,65 GHz
Ancho de banda de canal	Configurable: 10, 20, 40, 80 ⁴ MHz, en 3,x GHz: también 5, 7, 14 MHz
Selección dinámica de ancho de banda de canal (D-CBS)	20/40/80 ⁴ MHz
Esquema de acceso de radio	2x2 MIMO OFDM
Modulación	BP5K/QP5K/QAM16/QAM64/QAM256 ³
Modulación y codificación adaptativa	Compatible
Gestión SLA	CIR, MIR, Mejor esfuerzo ⁴
Latencia integral	Típico: 3,5 ms para 2 HSU, 20 ms para 32 HSU
Tecnología dúplex	TDD
Asignación de ancho de banda de subida/bajada	Configurable: Simétrico o asimétrico
Potencia máxima de transmisión	HBS: 25 dBm @ 5,x GHz, 23 dBm @ 3,x GHz (en todos los esquemas de modulación) HSU: 25 dBm
DFS (FCC y ETSI)	Compatible
Diversidad	Compatible en HBS y HSU, MIMO auto/Diversidad por HSU
Visor de espectro	Compatible con HBS y HSU
Sincronización TDD	Sincronización inter/intra sitio (coexiste con RADWIN 2000 PtP), antena y receptor GPS incorporados
Cifrado	AES 128
Interfaces	
Interfaz Ethernet	HBS: Dos puertos para datos y administración, 10/100/1000BaseT HSU: 10/100BaseT
Redes	
Capa subconvergencia	Capa 2
QoS	Clasificación de paquetes en 4 colas de conformidad con 802.1p y Diffserv, prioridad estricta, TTL
VLAN	VLAN 802.1Q, QinQ y 4094
Administración	
Aplicación de administración	HBS y HSU: Administrador RADWIN y administración basada en web
Protocolo	SNMPv1, SNMPv3, Telnet, HTTP, IPv4 & IPv6, RADIUS para servidor AAA
Aplicación NMS	RADWIN NMS (RNMS) o integración con sistemas NMS de terceros mediante MIB estándares.

Nota 1: 4.9GHz disponible sólo con la estación base 750Mbps

Nota 3: Compatible con HBS y HSU de ultra alta capacidad

Nota 2: 64 HSU en el segundo trimestre de 2016

Nota 4: El servicio best effort estará disponible en el segundo trimestre de 2016

Energía	
Alimentación de energía	Se suministra por la interfaz PoE
Consumo de energía	HBS < 25 W, HSU < 12 W
Ambiente de operación	
Temperatura de operación	De 35°C hasta 60°C (desde 31°F hasta 140°F)
Humedad	100% condensación, IP67 (totalmente protegido contra polvo e inmersión hasta 1 metro)
Regulaciones de radio	
FCC	47CFR Parte 15 Subparte C y Subparte E. 47CFR Parte 90 Subparte Z – Modos restringidos y sin restricción
IC	RSS-210 edición B, RSS-192 edición 3, RSS-197 edición 1- Modo restringido
ETSI	EN 893 301, EN 2-326 302, EN 502 302
Seguridad	
FCC/IC (cTUVus)	UL 60950-1, UL 60950-22, CAN/CSA C 22.2 60950-1, CAN/CSA C22.2 60950-22
ETSI	EN/IEC 60950-1, EN/IEC 60950-22
EMC	
FCC	CFR47 Clase B, Parte 15, Subparte B
ETSI	4-489 301 EN ,1-489 301 EN
CAN/CSA	CISPR 22 - 10 Class B
AS/NZS	CISPR 22:- 2009 Class B




RADWIN
The Wireless Choice

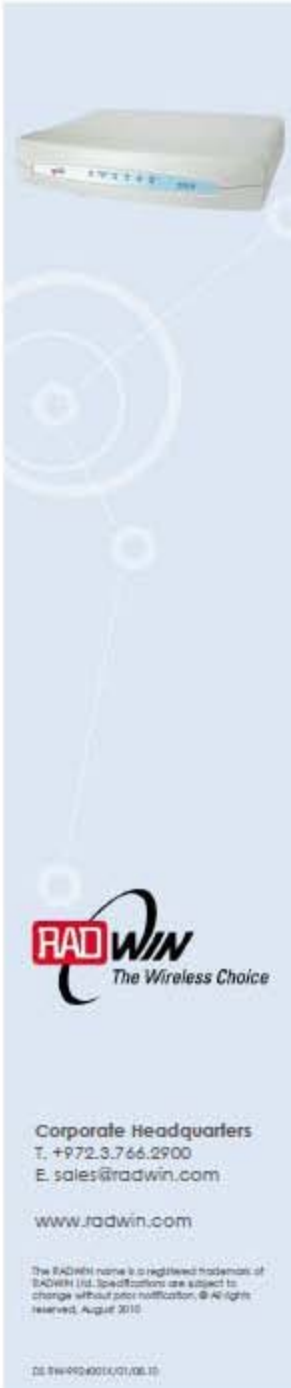
Corporate Headquarters
T. +972.3.766.2917
E. sales@radwin.com
www.radwin.com

The RADWIN name is a registered trademark of RADWIN Ltd. Specifications are subject to change without prior notification. © All rights reserved.

RADWIN IDU-C Specifications

RADWIN's IDU-C (RW-72XX-2000) is a carrier grade 1U 19" indoor device providing up to 16 E1/T1 (configurable) interfaces, 2 Ethernet ports and 1 SFP port. Supporting independent clock per each TDM port and dual wide range DC feed, IDU-C is a scalable, easy-to-use solution that is compatible with both RADWIN 2000 and WinLink 1000 radio series.

TDM Interface	
Number of Ports	16, 8, 4 ports or no TDM ports
Type	E1/T1; configurable by RADWIN Manager
Framing	Unframed (transparent)
Timing	Independent timing per port, Tx and Rx
Connector	RJ-45
Standards Compliance	ITU-T G.703, G.826
Line Code	E1: HDB3 @ 2.048 Mbps; T1: B8ZS/AMI @ 1.544 Mbps
Latency	Configurable 5-20 msec (default: 8 msec)
Impedance	E1: 120Ω, balanced; T1: 100Ω, balanced
Jitter & Wander	According to ITU-T G.823, G.824
Monitored Hot Standby 1+1	Supported
Ethernet Interface	
Ethernet ports	2x10/100BaseT ports Auto-Negotiation (IEEE 802.3u); Framing/Coding IEEE 802.3
Connector	RJ-45
Impedance	100Ω
SFP Interface	1 Port; Type Fast Ethernet
VLAN Support	Transparent
Maximum Frame Size	2048 Bytes
Bridge	Layer 2, self-learning of up to 2047 MAC addresses (IEEE 802.1Q), Hub/Bridge selectable mode
Latency	3 msec
Dry Contact Alarms	
	4 Outputs + 4 Inputs; configurable by RADWIN Manager
Mechanics	
Dimensions	43.6cm(W) x 21cm(D) x 4.4cm(H)
Weight	1.5 kg/3.3 lbs
Power	
Power Feeding	Dual feeding, -20 to -60VDC
Power Consumption	<10W
Environmental	
Operating Temperatures	0°C to 50°C / 32°F to 122°F
Humidity	90% non-condensing
Safety	
TUV	UL/EN/IEC 60950, CAN/CSA 60950 C22.2
EMC	
FCC	47CFR Class B, Part15, Subpart B
ETSI	EN 300 386, EN 301 489-4, EN 301 489-1
CAN/CSA-CEI/IEC; AS/NZS	CISPR 22
Ordering Information	
RW-7216-2000	IDU-C with 16 TDM ports, 2 Ethernet interfaces and SFP port
RW-7208-2000	IDU-C with 8 TDM ports, 2 Ethernet interfaces and SFP port
RW-7204-2000	IDU-C with 4 TDM ports, 2 Ethernet interfaces and SFP port
RW-7200-2000	IDU-C with 2 Ethernet interfaces and SFP port



IDU-E RW-71XX-2000

RW-71XX-2000 is part of the RADWIN Indoor Units Portfolio. The IDU-E product line comprises of carrier grade half 19" indoor devices providing two E1/T1 interfaces (configurable) and two Ethernet ports. Supporting independent clock per each TDM port and wide range DC feed, IDU-E is a scalable, easy-to-use solution that is compatible with both the RADWIN 2000 and WinLink 1000 radio portfolio.

Product Specifications

TDM Interface	
Number of Ports	2 ports or no TDM ports
Type	E1/T1; configurable by RADWIN Manager
Framing	Unframed (transparent)
Timing	Independent timing per port, Tx and Rx
Connector	RJ-45
Standards Compliance	ITU-T G.703, G.826
Line Code	E1: HD83 @ 2.048 Mbps; T1: 8B2S/AMI @ 1.544 Mbps
Latency	Configurable 5-20 ms (default: 8 ms at 20 MHz Channel Bandwidth)
Impedance	E1: 120Ω, balanced; T1: 100Ω, balanced
Jitter & Wander	According to ITU-T G.823, G.824
Ethernet Interface	
Number of Ports	Two Ethernet ports
Type	10/100 BaseT Auto-Negotiation (IEEE 802.3u); Framing/Coding (IEEE 802.3)
Connector	RJ-45
Impedance	100Ω
VLAN Support	802.1Q, QinQ Tagging
Maximum Frame Size	2048 Bytes
Bridge	Layer 2, self-learning of up to 1024 MAC addresses Hub/Bridge selectable
Latency	3 msec (typical at 20 MHz Channel Bandwidth)
ODU Interface	
Connector	RJ-45
Cable	Outdoor CAT-5e cable; Maximum cable length: 100 m
Dry Contact Alarms	
	4 Outputs + 4 Inputs; configurable by RADWIN Manager
Mechanical	
Dimensions	22cm(W) x 17cm(D) x 4.4cm(H)
Weight	0.5 kg/1.1 lbs
Power	
Power Feeding	110 – 240 VAC*, -20 to +60 VDC
Power Consumption	<5W
Environmental	
Operating Temperatures	0°C to 50°C / 32°F to 122°F
Humidity	Up to 90% non-condensing
Safety	
TUV	UL 60950-1, CAN/CSA-C22.2 No.60950-1
EN/IEC	60950-1
EMC	
FCC	47 CFR Class B, Part 15, Subpart B
ETSI	EN 300 386, EN 301 489-4
CAN/CSA	CISPR 22-04 Class B
AS/NZS	CISPR 22:2006 Class B

Ordering Information

RW-7102-2000	IDU-E with 2 TDM ports, 2 Ethernet interfaces and external alarms interfaces
RW-7100-2000	IDU-E with 2 Ethernet interfaces

*AC power adapters with plugs for various countries can be ordered separately (see product RW-9921-003X in RADWIN Product Catalog).



IDUH

IDUH Aggregation unit

RADWIN's IDUH (RW73002006) is part of the RADWIN Indoor Unit Portfolio. The IDUH product line comprises of carrier grade 1U 19" rack mounted half width indoor devices. An IDUH aggregates Ethernet traffic for up to six ODUs. It delivers their traffic to two high speed uplink Ethernet ports and two SFP ports.

RADWIN IDUH Main Features:

- A single source of power supporting up to six ODUs (all types)
- Supports Legacy PoE ports (10/100/1000Mbps)
- Two uplink Ethernet ports (10/100/1000baseT Ethernet)
- Two uplink 1000Mbps SFP ports

Product Specifications

Ethernet Interface	
PoE interfaces	6 x PoE in legacy mode ports (10/100/1000Mbps) , up to 25W per port ,Support all RADWIN ODUs*
Ethernet ports	2 x RJ45 PHY ports of 10/100/1000 Mbps Based T EthernetAuto negotiation 10/100/1000Mbps
SFP Interfaces	2 x SFP ports of 1000 Mbps (standard MSA)
LAN Interface Line Impedance	100Ω
MAC Address Entries	Up to 1K MAC Address entries (same as in IDU C)
Maximum Frame Size	2048 Bytes
Latency	3 msec
Mechanical	
Dimensions	1U x Half 19" width
Weight	<1.5 kg
Power	
Power Feeding	44VDC -56VDC, Dual redundant inputs, 3 pin female DC connector **
Power Consumption	< 15W @ Maximal Power feeding
Environmental	
Operating Temperatures	40°C to 60°C / 40°F to 140°F
Humidity	90% non-condensing
Storage Temperatures	40°C to 70°C / 40°F to 158°F, Humidity 95%
Safety	
TUV	UL/EN/IEC 60950
CAN/CSA	60950 C22.2
EMC	
FCC	47CFR Class B, Part15, Subpart B
ETSI	EN 300 386 V1.3.2; 301 489.4 V1.3.1; 301 489.1 V1.4.1; 55022:1998; 61000.3.2:2000; 61000.3.3:1995; 55024:1998
CAN/CSA/CEI/IEC; AS/NZS	CISPR 22.02

Nokia Siemens Networks Flexi Multiradio 10 Base Station

gearing up with ten times more capacity,
supports LTE-Advanced



Nokia Siemens Networks Flexi Multiradio 10 Base Station delivers unprecedented capacity to meet mobile broadband traffic growth.

Building on the market leading Flexi Multiradio Base Station, the new Flexi Multiradio 10 Base Station is the world's smallest high-capacity, software-defined, multi-technology base station. Just one System Module can support GSM/EDGE, WCDMA/HSPA+, LTE (FDD/TDD)/LTE-Advanced.

The Flexi Multiradio 10 Base Station can provide tremendous cost savings. Combining cutting edge performance hardware for high bandwidth LTE-Advanced sites with the world's most compact macro base station maximizes return on investment. Capacity and technology can evolve flexibly to very high capacity by chaining modules and also scale well in the smallest macro configurations. This enables communications service providers (CSPs) to add capacity easily to keep pace with growing mobile broadband traffic and make investments at the right time.

One module for GSM/EDGE, WCDMA/HSPA+, LTE (FDD/TDD)/LTE-Advanced

The Nokia Siemens Networks Flexi Multiradio 10 Base Station is the world's most compact macro base station. It combines a Flexi Multiradio System Module for baseband processing with either a multi-standard three-sector Flexi RF Module Triple or Remote Radio Heads (RRH).

The Flexi Multiradio 10 Base Station supports GSM, WCDMA, LTE (TDD & FDD)/LTE-Advanced using a single System Module. The module's multi-technology and multi-band capability makes it easy to evolve to future radio technologies and frequency bands. The base station also includes both indoor and outdoor variants.

Maintenance costs are reduced by eliminating many of the complex, application-specific base station products and cabinets.

The Flexi RF Module Triple offers three sectors in a 25 liter, IP65 certified outdoor unit with a total of 180 W at the antenna connector. The multi-carrier and multi-standard power amplifier for GSM, WCDMA and LTE allows CSPs to build base station sites for the lowest possible cost and provides an effortless way to expand capacity. The base station is complemented by a single-sector Multiple Input Multiple Output (MIMO)-capable Flexi RRH, complementing the three-sector Flexi RF Module Triple that provides the most compact MIMO site solution. This ensures the right solution is always available to provide a cost- and performance-optimized installation.

Unprecedented capacity

Flexi Multiradio 10 Base Station offers more than 10 Gbps capacity in its advanced configuration - ten times higher than previous generations. Adding new capacity is simple using software upgrades, sub-modules or module chaining. CSPs can start small and scale up with market demand.

Leaner and greener

Flexi Multiradio 10 Base Station uses only about 1 kW to serve all current 3GPP technologies simultaneously. The efficient combination of hardware and software results in a 30% reduction in power consumption, slashing base station operating costs. The equipment's small size and modularity also minimizes site investments and the carbon footprint resulting from logistics, transport and construction works.

An eye on the future

The Flexi Multiradio 10 Base Station delivers the highest mobile broadband performance for the lowest operational cost. CSPs can protect their investments by expanding their existing Flexi Base Stations with new Flexi Multiradio 10 Base Station units. All Flexi Base Station variants and generations can be interconnected to provide backwards compatibility and even higher combined capacity. All outdoor modules are IP65 compliant, while indoor modules are even lighter, and more compact to fit into any 19" cabinet.



The Flexi Multiradio System Module is LTE-Advanced ready, so today's WCDMA and LTE networks can be smoothly upgraded to future evolution of 3GPP with a software upgrade.

Built-in high-speed Ethernet interfaces support 3GPP-compliant Network Domain Security with an integrated wire-speed IPSec engine.

Customized services, more value

Tailored services, an exhaustive resource bank and efficient processes all combine to help CSPs perform better. We use our experience of successful deployments in multi-vendor environments, greenfield and modernization projects to improve the experience of our customers and their subscribers.

In line with all Nokia Siemens Networks network elements, Flexi Multiradio 10 Base Station is managed by the multi-technology, multi-vendor NetAct OSS platform which enables CSPs to manage all network operations from a single point.

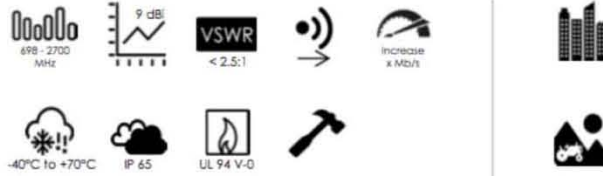
The Nokia Siemens Networks SON Suite supports GSM, WCDMA and LTE, as well as multi-vendor features using OSS support and open 3GPP interfaces. It boosts efficiency and improves the speed and quality of mobile communications. With Automated Neighbor Relations and SON Plug & Play accelerated rollout, Nokia Siemens Networks can automate and speed up integration of the base station with the network.

Technical Data

Installation options:	Indoor or outdoor installation; floor, wall, pole, mast-mountable; supports distributed and feederless sites.
Frequency bands:	Suitable for all 3GPP frequency bands
RF power amplifier technology:	Multistandard and Multi-carrier power amplifier (MCPA)
Three-sector Flexi RF Module Triple output power:	3 x 60 W at RF Module antenna connectors
Flexi RRH output power:	2 x 40 W at RRH antenna connectors
Maximum capacity:	<ul style="list-style-type: none">• GSM capacity of 216 transceivers• WCDMA about 13.6 Gbps downlink, 3.8 Gbps uplink and 18000 channel elements with chaining configuration• LTE 12 Gbps downlink and 4 Gbps uplink with chaining configuration
Interfaces:	<ul style="list-style-type: none">• OBSAI and CPRI• Transport Interface: Inbuilt high-speed Ethernet
Height x width x depth:	Outdoor variant: 133 x 447 x 560 mm. No need for cabinet Indoor variant: 88.1 x 447 x 300 mm. Fits any 19" rack
Volume net:	Three-sector Flexi RF Module Triple: 25 liters Flexi RRH: 25 liters Flexi Multiradio System Module: Outdoor variant: 25 liters Indoor variant: 12 liters
Weight:	Three-sector Flexi RF Module Triple: 25 kg Flexi RRH: 17 kg Flexi Multiradio System Module: Outdoor variant: 10.1 to 19.7 kg Indoor variant: 8.3 to 9.7 kg
Power supply:	40.5-57 VDC 0-276 VAC & 184 - 276 VAC with power module
Typical power consumption:	About 1 kW for GSM, WCDMA and LTE combined
Operational environment:	Outdoor variant: IP65, -35 to +55°C Indoor variant: IP20, -5 to +55°C

XPOL-2

698 - 2700 MHz HIGH GAIN CROSS POLARISED LTE MIMO ANTENNA



- Futureproof wideband LTE antenna and Wi-Fi operational frequencies.
- Backwards compatible with 3G, 2G technologies.
- Two cross polarised antennas in one enclosure for optimal LTE performance.
- Improves mobile network subscriber's user experience.
- Increased connectivity stability.
- Weather- and vandal resistant enclosure.

Product Overview

The antenna provides an innovative solution for 4G / 3G and 2G networks including Wi-Fi. It is a unique wall- or pole-mountable, dual polarised, full LTE band antenna. Incorporating two separately fed ultra wideband elements in a single housing, the antenna is equipped to provide client-side MIMO and diversity support for the networks of today and tomorrow. This is a cost effective solution for enhancing signal reception and throughput. The XPOL-2 antenna increases signal reliability, ensures higher data throughput for users and provides a stable, high quality connection. This improves subscriber user experience and secures client retention. It is ideal for any application using the GSM network (LTE/ HSPA/3G/EDGE/GPRS).

Features

- High gain directional antenna
- Broadband covering multiple operational frequencies
- Wall or pole mountable
- Lightweight
- Waterproof
- Two cross polarized antennas in one enclosure

Application areas

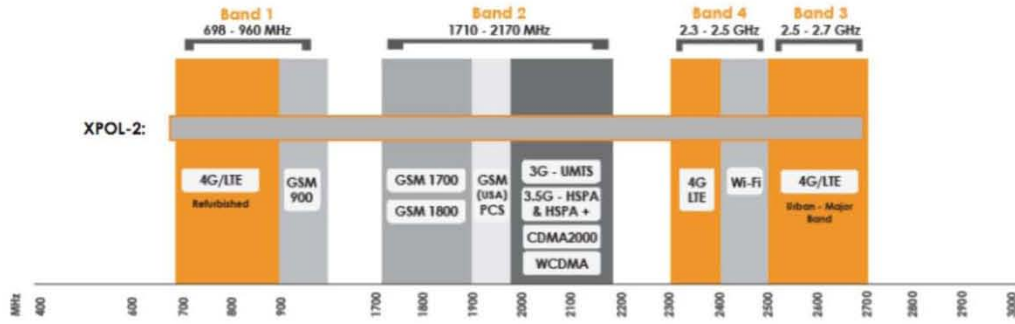
- Urban and rural areas
- Poor data signal reception (indoor or outdoor)
- Slow data transmission connection areas
- Unstable connection
- Increase system transmission reliability
- LTE fringe areas (close to an LTE area, but just out of reach)
- Network operator flexibility - as the antennas is wideband, a new antenna is not needed per network operator - works on most networks
- Regulatory



Frequency bands

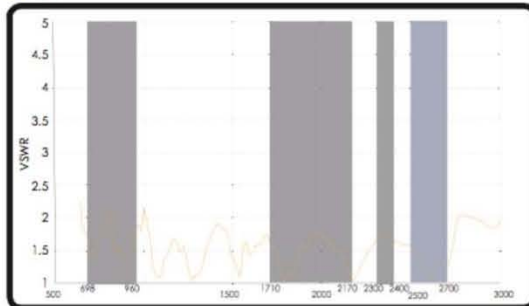
The XPOL-2 is a wide-band antenna that works from 698 - 2700 MHz

Indicates the bands on which this antenna works



Antenna Performance Plots

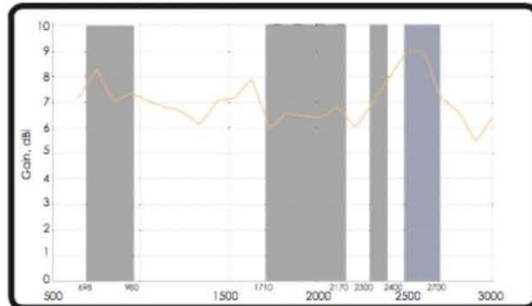
VSWR:



Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)

VSWR is a measure of how efficiently radio-frequency power is transmitted from a power source, through a transmission line, into a load. In an ideal system, 100% of the energy is transmitted which corresponds to a VSWR of 1:1. The XPOL-2 delivers superior performance across all bands with a VSWR of 2.5:1 or better.

Gain: (excluding cable loss)



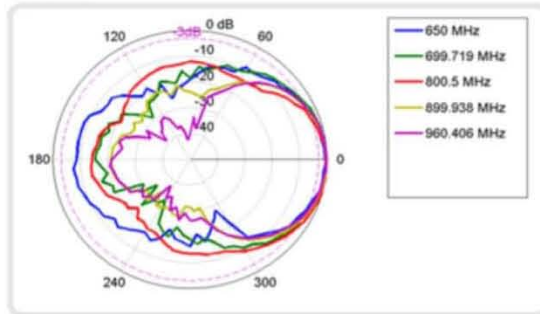
Gain* In dBi

9dBi is the peak gain across all bands from 698 - 2700 MHz
 Gain @ 698 - 960 MHz: 8 dBi
 Gain @ 1710 - 2170 MHz: 6.5 dBi
 Gain @ 2300 - 2400 MHz: 7 dBi
 Gain @ 2500 - 2700 MHz: 9 dBi

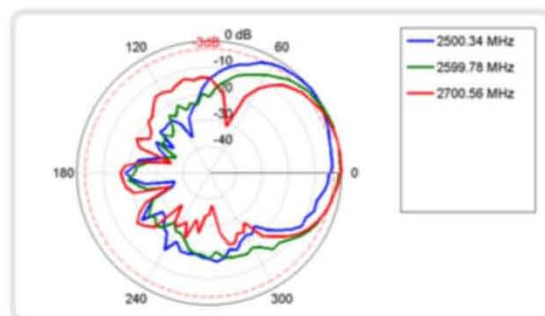
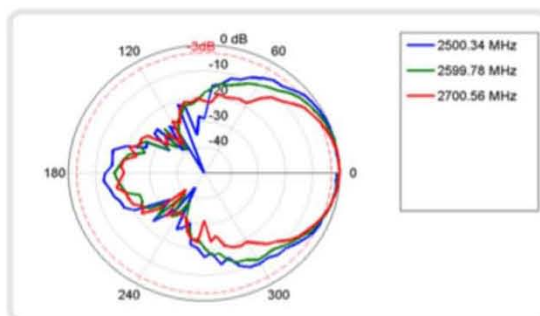
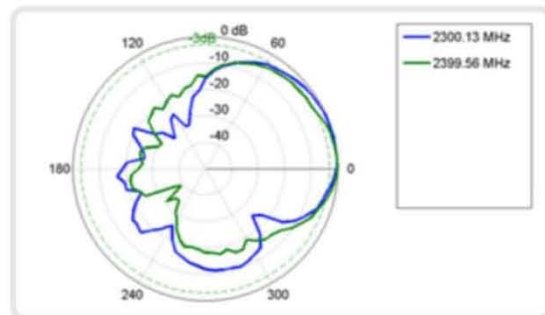
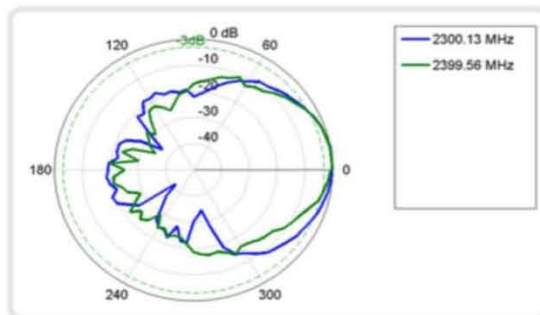
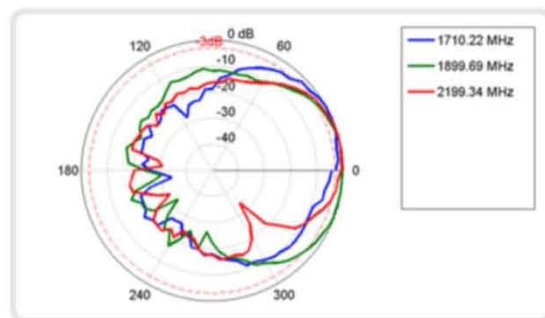
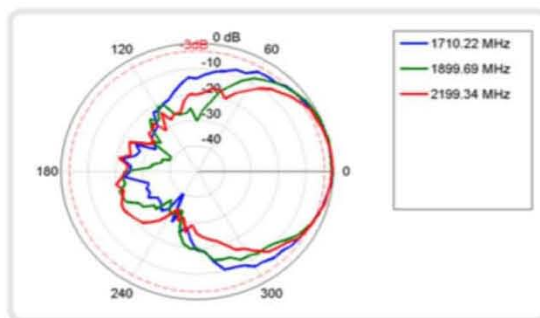
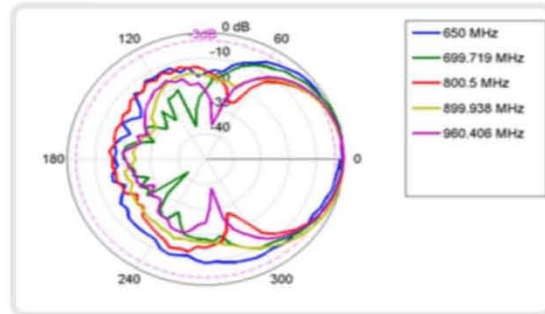
*Antenna gain measured with polarisation aligned standard antenna

Radiation Patterns

Azimuth:



Elevation:



Electrical Specifications

Frequency Bands:	698 - 960 MHz 1710 - 2170 MHz 2300 - 2400 MHz 2500 - 2700 MHz
Gain (Max):	9 dBi
VSWR:	< 2.5:1
Feed Power Handling:	10 W
Input impedance:	50 Ohm (nominal)
Polarisation:	0° and 90°
Port to Port Isolation:	>15dB
MIMO decorrelation:	< 0.3
Cable loss:	0.35dB/m @ 900 MHz 0.53dB/m @ 2000 MHz 0.6dB/m @ 2500 MHz
DC Short:	Yes

Environmental Specifications

Wind Survival:	<120km/h
Temperature Range (Operating):	-40°C to +70°C
Environmental Conditions:	Outdoor/Indoor
Operating Relative Humidity:	Up to 98%
Storage Humidity:	5% to 95% - non condensing
Storage Temperature:	-40°C to +70°C

Ordering Information

Commercial name:	XPOL-2
Order Product Code:	A-XPOL-0002-V2
EAN number:	6009693810051

Additional Accessories Available

Extension Cables:	Up to 10m HDF 195
Various connectors available	
Installation poles and brackets available	

For more detailed information and availability in your region, visit our web site: www.poyntingcommercial.com

Contact Poynting

Poynting Antennas (Pty) Ltd - Head Office

Unit 4, N1 Industrial Park
Landmarks Avenue,
Samrand, 0157
South Africa

Phone: +27 (0) 12 657 0050
E-mail: sales@poynting.co.za

Mechanical Specifications

Product Dimensions (L x W x D):	255 mm x 250 mm x 80 mm
Packaged Dimensions:	290 mm x 267 mm x 98 mm
Weight:	1,55 kg
Packaged Weight:	1,98 kg
Radome Material:	ABS (Halogen Free)
Radome Colour:	Pantone - Cool Gray (1C) RAL 7047

Product Box Contents

Antenna:	A-XPOL-0002-V2
Mounting Bracket:	1 x Z-shaped mounting bracket suitable for wall or pole mount
Cable Length:	5m
Cable Type:	Black twin siamese HDF 195
Connector:	2X SMA (M)Gold plated

The cables and connectors are factory mounted to the antenna



A-XPOL-0002-V2



Certification Approvals and Standards

Flammability rating:	UL 94-V0 EN 13823
Water Ingress Protection Ratio/Standard:	IP 65 (NEMA 4X)
Impact resistance:	IK 08
Salt Spray:	MIL-STD 810F/ASTM B117
Product Safety:	Complies with UL, CE, EN, CSA and IEC standards



Poynting Europe

Regus Business Center Neue Messe Riem
Kronstadter Straße 4
81677 München
Germany

Phone: +49 89 208026538
E-mail: sales-international@poynting.co.za

Características	LTE R9
MIMO	1Tx1T, 2Tx2R & 4Tx4R
Ancho de Banda máximo para DL.	20 MHz
Ancho de Banda máximo para UL.	20 MHz
Capacidad de Descarga a máxima configuración.	300 Mbps
Capacidad de Carga a máxima configuración.	150 Mbps
Cobertura en máxima capacidad.	5 Km.
Anchos de Banda Escalables.	1,4, 3, 5, 10 & 20 MHz
Capacidad en Usuarios a máxima configuración.	200 Usuarios activos.

1. Introduction

The initial planning of any Radio Access Network begins with a Radio Link Budget. As the name suggests, a link budget is simply the accounting of all of the gains and losses from the transmitter, through the medium (free space, cable, waveguide, fiber, etc.) to the receiver in a telecommunication system. In this page, we will briefly discuss link budget calculations for LTE.

2. LTE Radio Link Budgeting

2.1. Typical Parameter Values

The link budget calculations estimate the maximum allowed signal attenuation g between the mobile and the base station antenna. The maximum path loss allows the maximum cell range to be estimated with a suitable propagation model. The cell range gives the number of base station sites required to cover the target geographical area. The following table shows typical (practical) parameter values used for doing an LTE Radio Link Budget.

	Parameter	Typical Value
a	Base Station maximum transmission power. A typical value for macro cell base station is 20-69 W at the antenna connector.	43 – 48 dBm
b	Base Station Antenna Gain	Manufacturer Dependent
c	Cable loss between the base station antenna connector and the antenna. The cable loss value depends on the cable length, cable thickness and frequency band. Many installations today use RF heads where the power amplifiers are close to the antenna making the cable loss very small.	1 – 6 dB
d	Base Station EIRP, Calculated as A + B - C	
e	UE RF noise figure. Depends on the frequency band. Duplex separation and on the allocated bandwidth.	6 – 11 dB
f	Terminal noise can be calculated as: $"K \text{ (Boltzmann constant)} \times T \text{ (290K)} \times \text{bandwidth}"$ <p>The bandwidth depends on bit rate, which defines the number of resource blocks. We assume 50 resource blocks, equal 9 MHz, transmission for 1 Mbps downlink.</p>	-104.5 dBm for 50 resource blocks (9 MHz)
g	Calculated as E + F	
h	Signal-to-noise ratio from link simulations or measurements. The value depends on the modulation and coding schemes, which again depend on the data rate and the number of resource blocks allocated.	-9 to -7 dB
i	Calculated as G + H	
j	Interference margin accounts for the increase in the terminal noise level caused by the other cell. If we assume a minimum G-factor of -4 dB, that corresponds to $10 \times \text{Log}_{10}(1+10^{(4/10)}) = 5.5 \text{ dB}$ interference margin.	3 – 8 dB
k	Control channel overhead includes the overhead from reference signals, PBCH, PDCCH and PHICH.	10 – 25 % = 0.4 – 1.0 dB
L	UE antenna gain.	Manufacturer Dependent
M	Body loss	Device Dependent

2.2. Uplink Budget

The table below shows an example LTE link budget for the uplink from [1], assuming a 64 kbps data rate and two resource block allocation (giving a 360 kHz transmission bandwidth). The UE terminal power is assumed to be 24 dBm (without any body loss for a data connection). It is assumed that the eNode B receiver has a noise figure of 2.0 dB, and the required Signal to Noise and Interference Ratio (SINR) has been taken from link level simulations performed in [1]. An interference margin of 2.0 dB is assumed. A cable loss of 2 dB is considered, which is compensated by assuming a masthead amplifier (MHA) that introduces a gain of 2.0 dB. An RX antenna gain of 18.0 is assumed considering a 3-sector macro-cell (with 65-degree antennas). In conclusion the maximum allowed path loss becomes 163.4 dB.

Uplink Link Budget for 64 kbps with dual-antenna receiver base station

Data rate (kbps)		64
Transmitter – UE		
a	Max. TX power (dBm)	24.0
b	TX antenna gain (dBi)	0.0
c	Body loss (dB)	0.0
d	EIRP (dBm)	24.0 = a + b + c
Receiver – eNode B		
e	Node B noise figure (dB)	2.0
f	Thermal noise (dBm)	-118.4 = $k(\text{Boltzmann}) * T(290\text{K}) * B(360\text{kHz})$
g	Receiver noise floor (dBm)	-116.4 = e + f
h	SINR (dB)	-7.0 From Simulations performed in [1]
i	Receiver sensitivity (dBm)	-123.4 = g + h
j	Interference Margin (dB)	2.0
k	Cable Loss (dB)	2.0
l	RX antenna gain (dBi)	18.0
m	MHA gain (dB)	2.0
Maximum path loss		163.4 = d - i - j - k + l - m

The table below shows an example LTE link budget

2.3. Downlink Budget

The table below shows an example LTE link budget for the downlink from [1], assuming a 1 Mbps data rate (assuming antenna diversity) and 10 MHz bandwidth. The eNode B power is assumed to be 46 dBm, a value typical among most manufacturers. Again the SINR value is taken from link level simulations performed in [1]. A 3 dB interference margin and a 1 dB control channel overhead are assumed, and the maximum allowed path loss becomes 165.5 dB.

Downlink Link Budget for 1 Mbps with dual-antenna receiver terminal

Data rate (Mbps)		1
Transmitter – eNode B		
a	HS-DSCH power (dBm)	46.0
b	TX antenna gain (dBi)	18.0
c	Cable loss (dB)	2.0
d	EIRP (dBm)	62.0 = a + b + c

Receiver – UE		
e	UE noise figure (dB)	7.0
f	Thermal noise (dBm)	$-104.5 = k(\text{Boltzmann}) * T(290\text{K}) * B(360\text{kHz})$
g	Receiver noise floor (dBm)	$-97.5 = e + f$
h	SINR (dB)	-10.0 From Simulations performed in [1]
i	Receiver sensitivity (dBm)	$-107.5 = g + h$
j	Interference Margin (dB)	3.0
k	Control Channel Overhead (dB)	1.0
l	RX antenna gain (dBi)	0.0
m	Body Loss (dB)	0.0
Maximum path loss		$165.5 = d - i - j - k + l - m$

The table below shows an example LTE link budget

2.4. Propagation (Path Loss) Models

A propagation model describes the average signal propagation, and it converts the maximum allowed propagation loss to the maximum cell range. It depends on:

- Environment : urban, rural, dense urban, suburban, open, forest, sea...
- Distance
- Frequency
- atmospheric conditions
- Indoor/outdoor

Common examples include Free space, Walfish–Ikegami, Okumura–Hata, Longley–Rice, Lee and Young's models. The most commonly used model in urban environments is the Okumura-Hata model as described below:

For Urban Areas:

$$L_u = 69.55 + 26.16 * \log(f) - 13.82 * \log(h_B) - C_H + [44.9 - 6.55 * \log(h_B)] * \log(d)$$

For Small and Medium-sized cities:

$$C_H = 0.8 + (1.1 * \log(f) - 0.7) * h_M - 1.56 * \log(f)$$

For Large cities:

$$C_H = \begin{cases} 8.29 * (\log(1.54 * h_M))^2 - 1.1, & \text{if } 150 \leq f \leq 200 \\ 3.2 * (\log(11.75 * h_M))^2 - 4.97, & \text{if } 200 < f \leq 1500 \end{cases}$$

where:

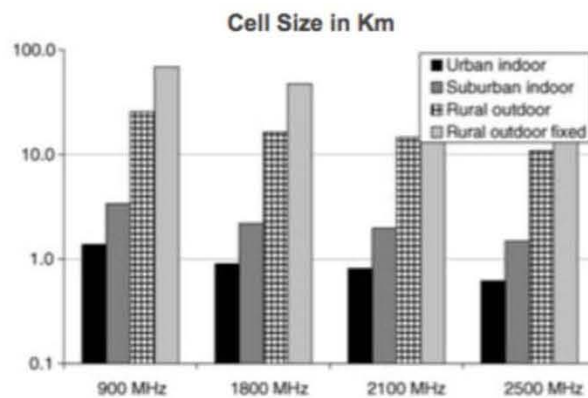
Parameters	Unit	Significance
L_u	dB	Path loss in Urban Areas
h_B	m	Height of base station Antenna
h_M	m	Height of mobile station Antenna
f	MHz	Frequency of Transmission
C_H	dB	Antenna height correction factor
d	km	Distance between Base station and MS

2.5. Mapping of Path Losses to Cell Sizes

For a path loss of 164 dB, based on the assumptions shown in the table below the following cell ranges can be attained with LTE. The cell range is shown for 900, 1800, 2100 and 2500 MHz frequency bands.

Assumptions

Okumura-Hata parameter	Urban Indoor	Suburban Indoor	Rural Indoor	Rural outdoor fixed
Base station antenna height (m)	30	50	80	80
Mobile antenna height (m)	1.5	1.5	1.5	5
Mobile antenna gain (dBi) 0	0.0	0.0	0.0	5.0
Slow fading standard deviation (dB)	8.0	8.0	8.0	8.0
Location probability (%)	95	95	95	95
Correction factor (dB)	0	-5	-15	-15
Indoor loss (dB)	20	15	0	0
Slow fading margin (dB)	8.8	8.8	8.8	8.8



2.6. Comparison to Other Radio Access Technologies

In comparison to other Radio Access Technologies such as GSM or UMTS, LTE does not provide a significant increase in cell size or path loss measurements, however, the data rate (services) provided is much superior. In contrast to HSPA link budgets, the LTE Link budgets show up to roughly 2 dB higher values, which is mainly a result of low interference margins that can be achieved with orthogonal modulation. For a detailed comparison please refer to [LTE Link Budget Comparison](#).

3. References

[1] H.Holma & A.Toskala, "WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE", John Wiley & Sons, 2010

[2] H.Holma & A.Toskala, "LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access", John Wiley & Sons, 2009

BIBLIOGRAFÍA

- 3GPP, P. 3. (2016-06). *3GPP TS36.104 V14.00*. Francia: 3GPP Organizational Partners' Publications Offices.
- Acústica y Sistemas de Sonido*2006Rosario, ArgentinaUNR Editora
- Análisis y estudio Técnico de la transferencia de tecnología para la prestación de servicios de telefonía y banda ancha móvil en Colombia a través de operadores móviles virtuales soportados por tecnología LTE*2011BogotáFI Universidad Nacional de Colombia
- Antenas*2002BarcelonaEDICIONS UPC
- Cell Coverage Evaluation for LTE and WiMAX in Wireless Communication System*2013Dhaka, BangladeshIDOSI Publications
- Communication Systems An introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*2002New YorkMcGraw Hill
- Comunicaciones Digitales*2007MadridPrentice - Hall
- Comunicaciones y redes de computadores*2004MadridEspañaPearson Educación
- Comunicaciones y Redes de Computadores*2004MadridPearson Educación S.A.de C.V.
- Couch, W. L. (2008). *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. México, México: Pearson Educación.
- Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457*2013BogotáFI Universidad Nacional de Colombia
- El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones*2005VenezuelaEscuela Venezolana para la Enseñanza de la Química
- Electromagnetism for Electronic Engineers*1992HolandaSpringer Netherlands
- Elementos de Electromagnetismo*2003MéxicoOxford University Press México
- Engineering Electromagnetics*2000New YorkSpringer
- Fundamentos de la Teoría Electromagnética*2001MéxicoS.A. Alhambra Mexicana
- History of Television, 1880-1941*1987JeffersonMcFarland
- Imaginingthe Internet: Personalities, Predictions, Perspectives*2005LanhamRowman & Littlefield

*Microondas*1983MéxicoLimusa

*Propuesta de asignación de la banda de 698-806 MHz (banda de 700 MHz) para los servicios de acceso inalámbrico de banda ancha.*2016MéxicoFI UNAM

*Redes Móviles*2016Praga, Czech RepublicInnovative Methodology for Promising VET Areas

Sainju, P. M. (2012). *LTE Performance analysis on 800 and 1800 MHz bands.* Finlandia: Tampere University of Technology.

*Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*2003MéxicoPearson Educación de México S.A de C.V.

*Sistemas de telecomunicación*2007CantabriaUniversidad de Cantabria

*Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*2003MéxicoAlfaomega Grupo Editor S.A de C.V.

*Synty and Spark: TheOrigins of Radio*1976New YorkWiley

*Telecommunications Demystified*2001Eagle Rock, VirginiaLLH Technology Publishing

*The Victorian Internet*1998New YorkWalker and Company

*Transmisión de Datos*2005MéridaTaller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, ULA

Transmisión de datos y redes de comunicaciones 2002EspañaMc Graw Hill Universidad Don Bosco Repositorio Digital

MESOGRAFIA.

Redes de datos, Conceptos sobre señales, Departamento de lenguajes y sistemas informáticos, 2006-2007, Manuel Fernández Barcell. Sitio Web: www.mfbarcell.es/redes_de_datos/tema_07/tema07_senales.pdf. Fecha de consulta: 17 de Abril del 2016.

Características de las Ondas, Hernán Verdugo Fabiani. Sitio Web: http://www.hverdugo.cl/conceptos/conceptos/caracteristicas_de_las_ondas.pdf. Fecha de consulta: 20 de Abril del 2016.

E-Educativa (en línea), Telecomunicaciones, aplicaciones de las ondas electromagnéticas, Sitio web: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/3_aplicaciones_de_las_ondas_electromagneticas_telecomunicaciones.html. Fecha de consulta: 23 de abril del 2016.

Castaño, A.R. 2008. "Ondas electromagnéticas". Notas de clases. FI Universidad Nacional del Nordeste. Sitio Web: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo7.pdf>. Fecha de consulta: 17 de abril del 2016.

Hechos sobre alimentos de la administración de medicamentos y alimentos de los Estados Unidos. Sitio Web: <http://www.fda.gov/downloads/Food/IngredientsPackagingLabeling/UCM262298.pdf>. Fecha de consulta: 17 de Abril del 2016.

Hal Herrick. (2000). COMUNICACIONES DE RADIO EN LA ERA DIGITAL VOLUMEN 2: TECNOLOGÍA VHF / UHF. junio 2000, de Harris Corporation. Sitio Web: <http://documents.mx/documents/comunicaciones-de-radio-en-la-era-digital.html>, fecha de consulta: 21 de Abril del 2016.

UIT (2015). RESOLUCIÓN UIT-R 69. Desarrollo e implantación de las telecomunicaciones públicas internacionales por satélite en países en desarrollo. Sitio Web: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/res/R-RES-R.69-2015-PDF-S.pdf. Fecha de consulta: 19 de Abril del 2016.

Tecnologías de la información en las organizaciones. TIC's aplicada a móviles. Sitio web: <https://es.scribd.com/document/317251939/UNIDAD-VI-TIC-s-APLICADAS-A-MOVILES>. Fecha de consulta: 22 de Abril del 2016.

Radiocomunicación por microondas, Mayo 2015. Sitio web: <http://documents.mx/>

documents/radiocomunicacion-por-microondas.html. Fecha de consulta: 7 de Mayo del 2016.

What really is a Third Generation (3G) Mobile Technology. IMT2000. Sitio Web: https://www.itu.int/ITU-D/tech/FORMER_PAGE_IMT2000/DocumentsIMT2000/What_really_3G.pdf. Fecha de consulta: 8 de Mayo del 2016.

Sitio Web: <http://www.cisco.com/web/LA/soluciones/la/dsl/index.html>. Fecha de consulta: 9 de Mayo del 2016.

Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Telecomunicaciones TIC's. Unidad 4 Microondas y satélites. Sitio Web: <http://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-4/>. Fecha de consulta: 23 de Mayo del 2016.

Comunicación Vía microondas. Sitito web: https://www.ecured.cu/Comunicaci%C3%B3n_v%C3%ADa_microondas. Fecha de consulta: 24 de Mayo del 2016.

LTE (Marzo 2014). Sitio Web: <https://es.scribd.com/doc/211546810/LTE>. Fecha de consulta: 25 de Mayo del 2016.

Carlos Alberto Rio Mejia. Tecnología revolucionaria: LTE y WIMAX. Sitio Web: <http://tecnologia4glte-wimax.blogspot.mx/>. Fecha de Consulta: 27 de mayo del 2016.

LTE (2012). Sitio Web: <http://www.xataka.com.mx/celulares-y-smartphones/que-es-la-tecnologia-lte>. Fecha de consulta: 30 de Mayo del 2016.

Soluciones móviles. 1G, 2G, GSM, 3G, EDGE, HPSA, 4G y LTE: La evolución de las conexiones móviles. Sitio web: <http://www.informatica-hoy.com.ar/soluciones-moviles/1G-2G-GSM-3G-EDGE-HPSA-4G-LTE-evolucion-conexionesmoviles.php>. Fecha de consulta: 2 de junio del 2016.

FI Universidad Austral de Chile. Evolución de 3G y su convergencia a 4G en comunicaciones móviles. Sitio Web: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfcin322e/doc/bmfcin322e.pdf>. Sitio Web: 30 de Abril del 2016.

Características de LTE. Sitio Web: https://www.xirio-online.com/help/es/lte_key_features.html. Fecha de consulta: 4 de Mayo del 2016.

LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Sitio web: www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf. Fecha de consulta: 4 de Mayo del 2016.

ITU (2008). Development of IMT-Advanced: The SMaRT approach. Sitio Web: (<http://www.itu.int/itunews/manager/display.asp?lang=en&year=2008&issue=10&ipage=39>). Fecha de consulta: 8 de Mayo del 2016.

UIT. (2008). Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s), de UIT Sitio web: <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en>, Fecha de consulta: 12 de Mayo del 2016.

3gpp. (2014). Overview of 3GPP Release 8 V0.3.3 (2014-09).Sitio web: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/. Fecha de consulta: 12 de Mayo del 2016.

Documento elaborado en conjunto por el Instituto Federal de Telecomunicaciones y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 28 de agosto de 2014. Sitio Web: <http://eleconomista.com.mx/industrias/2015/10/13/caro-espectro-4g-lte-mexico>. Fecha de consulta: 10 de Junio del 2016.

Diario oficial de la Nación, 2013. Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de los artículos 6°, 7°, 27, 28, 73, 78, 94 y 105 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de telecomunicaciones, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 11 de junio de 2013. Sitio Web: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5352323&fecha=14/07/2014. Fecha de consulta: 10 de Junio del 2016.

Dr. Jorge A. Capote Abreu (2012). La mecánica de suelos y las cimentaciones en las construcciones industriales. Sitio web: <http://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/CI/Cimentaciones.pdf>. Fecha de consulta: 2 de Julio del 2016.

SIDESO. (2011). PROGRAMA Delegacional de Desarrollo Urbano Delegacional. 02/07/2016, de SIDESO Sitio web: [http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/coyoacan\[1\].pdf](http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/coyoacan[1].pdf), [http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/alvaro\[1\].pdf](http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/alvaro[1].pdf). Fecha de consulta: 2 de Julio del 2016.

Secretaría de Desarrollo Urbano. (2006). Plan Municipal de Desarrollo Urbano. 02/07/2016, de Secretaría de Desarrollo Urbano Sitio web: http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/naucalpan/DocNaucalpan.pdf http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/cuautitlan/PMDUCUAUTITLaN.pdf

http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/nezahualcoyotl/DOCUMENTO%20NEZA%2002-09-04.pdf.

Fecha de consulta: 2 de Julio del 2016.

El Plan de Acción Climática Municipal. (2012). TLALNEPANTLA_1, de El Plan de Acción Climática Municipal Sitio web: http://pacmun.org.mx/wp-content/uploads/2012/02/TLALNEPANTLA_1.pdf. Fecha de consulta: 2 de Julio del 2016.

SEDESOL. (2011). Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Iztapalapa, México, D.F., 2011; de SEDESOL Sitio web: http://www.inapam.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/2612/Atlas_Estados/09007_IZTAPALAPA/1_ATLAS_DE_RIESGOS.pdf. Fecha de consulta: 4 de Julio del 2016.

Telcel. (2012). NORMAS, CARACTERISTICAS Y ACABADOS PARA TORRES TELCEL (NCATI), de IFT Sitio web: http://www.ift.org.mx/sites/default/files/376_normativa_tecnica_capitulo_1.pdf. Fecha de consulta: 18 de Julio del 2016.

IFT. (2013). acciones para el acceso a sitios 19-06-2013, de IFT Sitio web: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/politicaregulatoria/accionesparaelaccesoasitios19-06-2013-final.pdf>. Fecha de consulta: 24 de Julio del 2016.

Normas, características y acabados para torres TELCEL (NCATI). Sitio Web: (http://www.ift.org.mx/sites/default/files/376_normativa_tecnica_capitulo_1.pdf).

Fecha de consulta: 18 de Julio del 2016.

Sistema de radio de microondas con frecuencia modulada (2015). Sitio Web: <http://documents.mx/documents/sistema-de-radio-de-microondas-con-frecuencia-moduladadocx.html>. Fecha de consulta: 25 de Junio del 2016.

Equipos (2016) Sitio Web:http://www.radwin.com/?siteLang=9&404=1&err=err%201%20|,site_url. Fecha de Consulta: 17 de Agosto del 2016.

Nplayservices,