



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA INTERCONEXIÓN DE UN
SITIO DE CELDA GSM EN ÚLTIMA MILLA DE ACUERDO A SU DEMANDA
DE TRÁFICO Y POSICIÓN GEOGRÁFICA**

Jorge Eduardo Monterroso Eufragio

Asesorado por el Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, octubre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA INTERCONEXIÓN DE UN
SITIO DE CELDA GSM EN ÚLTIMA MILLA DE ACUERDO A SU DEMANDA
DE TRÁFICO Y POSICIÓN GEOGRÁFICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE EDUARDO MONTERROSO EUFRAGIO

ASESORADO POR EL ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Mendez
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA INTERCONEXIÓN DE UN SITIO DE CELDA GSM EN ÚLTIMA MILLA DE ACUERDO A SU DEMANDA DE TRÁFICO Y POSICIÓN GEOGRÁFICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha julio del 2008.



Jorge Eduardo Monterroso Eufragio

Guatemala 19 de junio del 2014

Ing. Carlos Guzman
Coordinar Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador:

Por este medio hago de su conocimiento de que he revisado el trabajo de graduación **“FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA INTERCONEXIÓN DE UN SITIO DE CELDA GSM EN ÚLTIMA MILLA DE ACUERDO A SU DEMANDA DE TRÁFICO Y POSICIÓN GEOGRÁFICA”**, desarrollado por el estudiante **Jorge Eduardo Monterroso Eufragio**; con base a la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha cumplido los objetivos propuestos por lo cual el estudiante y mi persona nos hacemos responsables de contenido del mismo.

Sin otro particular, me suscribo ante usted.

Atentamente.



Ing. Enrique Ruiz Carballo
No. Colegiado 2225

Enrique E Ruiz C
INGENIERO ELECTRICISTA
NOL No 2225



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 85. 2014
Guatemala, 30 de JULIO 2013.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA
INTERCONEXIÓN DE UN SITIO DE CELDA GSM EN ÚLTIMA
MILLA DE ACUERDO A SU DEMANDA DE TRÁFICO Y
POSICIÓN GEOGRÁFICA,** del estudiante **Jorge Eduardo
Monterroso Eufragio,** que cumple con los requisitos establecidos para
tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



STO



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 85. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; JORGE EDUARDO MONTERROSO EUFRAGIO titulado: FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA INTERCONEXIÓN DE UN SITIO DE CELDA GSM EN ÚLTIMA MILLA DE ACUERDO A SU DEMANDA DE TRÁFICO Y POSICIÓN GEOGRÁFICA, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 13 DE NOVIEMBRE 2013.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

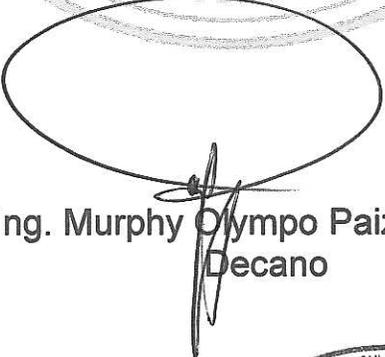


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 592.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA INTERCONEXIÓN DE UN SITIO DE CELDA GSM EN ÚLTIMA MILLA DE ACUERDO A SU DEMANDA DE TRÁFICO Y POSICIÓN GEOGRÁFICA**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Eduardo Monterroso Eufragio**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 29 de octubre de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Mis esposa

Jenniffer Paola Rodríguez Leal.

Mi hija

Ana Lucía Monterroso Rodríguez.

Mis padres

Margarito de Jesús Monterroso Morales y Marta
Julia Eufragio de Monterroso.

Mis hermanos

Luis Fernando Monterroso Eufragio, Marta
Maria Monterroso Eufragio, Maria Fernanda
Monterroso Eufragio y Jose Pablo Monterroso
Eufragio.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la vida y por todas las bendiciones que recibo día a día.
- Mi esposa** Jenniffer Rodríguez, por su increíble amor incondicional, su apoyo y motivación en cada fase de nuestra vida, por estar a mi lado compartiendo los momentos de felicidad e impulsándome día a día a alcanzar nuevas metas, por ser comprensiva, tolerante, cariñosa y especial, gracias por ser mi complemento.
- Mi hija** Ana Lucía Monterroso, por ser ese rayito de sol cada mañana que me despierta e impulsa a superarme para ser una mejor persona, padre y profesional.
- Mis padres** Margarito Monterroso y Marta Julia Eufragio, por darme la vida, brindarme su apoyo incondicional, ser un ejemplo a seguir de perseverancia y entusiasmo alentándome a alcanzar mis objetivos, por apoyarme en mis decisiones, su paciencia, comprensión y su amor día a día y por ser los mejores padres que Dios me pudo dar.

Mis hermanos

Luis Fernando Monterroso Eufragio, por ser ejemplo de fortaleza. Marta María Monterroso Eufragio, por ser ejemplo de lucha y entrega. María Fernanda Margarita Monterroso Eufragio, por ser ejemplo de alegría y entusiasmo. José Pablo Monterroso Eufragio, por ser ejemplo de entrega, dedicación y perseverancia.

Amigos

Por apoyarme e impulsarme en terminar esta fase de mi vida, especialmente a Javier Alay, Freddy Álvarez, Mario Silvestre, Kelvin Silvestre, David Crocker, Eduardo Alvarado, Alejandra Carrillo, Karla Morataya, Tatiana, Josué, Andrea, Ricardo Del Cid, Luis Mejía, Fernando Mazariegos, Carlos Yac, Pedro Pérez, Mario Mérida y Victor Vega.

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, por los buenos catedráticos que de forma desinteresada brindan sus conocimientos y dedicación para la buena formación de profesionales.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. DESCRIPCIÓN DE GSM	1
1.1. Reseña histórica.....	1
1.2. Arquitectura de GSM	3
1.2.1. Estación móvil.....	4
1.2.2. Radio base de transmisión	5
1.2.3. Controlador de estaciones base	8
1.2.4. Central de conmutación móvil.....	9
2. INGENIERÍA DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA CELDA GSM.....	11
2.1. Jerarquía digital plesiócrona PDH	11
2.1.1. Descripción de E1.....	12
2.1.2. Trama de primer orden PDH (E1).....	14
2.2. Tráfico.....	15
2.2.1. Descripción de tráfico	15
2.2.2. Medición de tráfico.....	15
2.2.2.1. Definición de Erlang.....	19
2.2.3. Dimensionamiento de una celda GSM	22

3.	ANÁLISIS TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL RADIO ENLACE DE MICROONDAS	25
3.1.	Espectro de radio frecuencia.....	25
3.2.	Conceptos básicos de microondas	28
3.2.1.	Zona de fresnel	34
3.3.	Estructura de un radio enlace	35
3.4.	Planificación del radio enlace.....	37
3.4.1.	Cálculo del enlace	37
3.4.1.1.	Pérdidas en la alimentación	37
3.4.1.2.	Pérdidas de trayectoria	38
3.4.1.3.	Pérdidas por desvanecimiento	39
3.4.1.4.	Ganancias	41
3.4.1.5.	Cálculo de la ecuación de enlace.....	42
3.4.2.	Selección de la mejor ruta	43
3.4.2.1.	Topografía.....	44
3.5.	Costos	47
3.6.	Ventajas y desventajas del radio-enlace	51
4.	ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA FIBRA ÓPTICA.....	53
4.1.	Teoría de la fibra óptica.....	54
4.1.1.	Fibra multimodo.....	57
4.1.2.	Fibra monomodo	58
4.2.	Estructura de un enlace de fibra óptica	59
4.2.1.	Pérdidas en la fibra óptica	60
4.2.2.	Cálculo del enlace con fibra óptica.....	63
4.2.2.1.	Cálculo del cable	63
4.2.2.2.	Cálculo del margen	65
4.3.	Costos	66
4.4.	Ventajas y desventajas de la fibra.....	70

5.	ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO EN LOS ENLACES SATELITALES.....	73
5.1.	Bandas satelitales	74
5.2.	Estructura de un enlace satelital.....	75
5.2.1.	Estación terrena.....	75
5.2.2.	Modelo de enlace de subida	76
5.2.3.	Transpondedor	76
5.2.4.	Modelo de enlace de bajada.....	77
5.3.	Ganancia de la antena.....	77
5.3.1.	Ancho del haz.	78
5.4.	Temperatura equivalente de ruido.....	79
5.4.1.	Densidad de ruido.....	81
5.5.	Parámetros del sistema satelital.....	82
5.5.1.	Pérdida por reducción.....	82
5.5.2.	Potencia isotrópica radiada efectiva	83
5.5.3.	Pérdidas por propagación.....	84
5.5.4.	Densidad de potencia.....	85
5.5.5.	Potencia en el receptor.....	86
5.5.6.	Relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido.....	86
5.5.7.	Relación de la portadora a densidad de ruido	87
5.5.8.	Relación de la portadora a señal a ruido	87
5.5.9.	Relación de energía de bit a densidad de ruido.....	88
5.6.	Efectos atmosféricos en la propagación de la señal.....	90
5.6.1.	Atenuación por gases en la atmósfera	90
5.6.2.	Atenuación por hidrometeoros.....	92
5.7.	Cálculo de la relación ganancia a temperatura equivalente de ruido con lluvia.....	97
5.8.	Ecuaciones del enlace.....	98

5.8.1.	Enlace de subida.....	98
5.8.2.	Enlace de bajada.....	100
5.9.	Cálculo de la eficiencia total del sistema.....	102
5.10.	Costos	103
5.11.	Ventajas y desventajas del enlace satelital	105
6.	ANÁLISIS ENTRE SISTEMAS.....	107
6.1.	Radio enlace de micro ondas.....	107
6.2.	Fibra óptica	108
6.3.	Enlaces satelitales.....	109
CONCLUSIONES.....		111
RECOMENDACIONES		113
BIBLIOGRAFÍA.....		115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Arquitectura de GSM	4
2.	Tipos de sectorización en una BTS	6
3.	Jerarquía digital presíncrona PDH	14
4.	Trama de primer orden PDH (E1)	14
5.	Comportamiento del tráfico en un día	17
6.	Longitud de onda	26
7.	Espectro electromagnético.....	27
8.	Zonas de la atmósfera	30
9.	Modos normales de la propagación de ondas	31
10.	Propagación de ondas espaciales	32
11.	Absorción en dB/km según frecuencia.....	33
12.	Primera zona de fresnel.....	35
13.	Estructura de un radio enlace	36
14.	Ganancia del sistema	42
15.	Parámetros de la red Montúfar – San Pedro Sacatepéquez.....	45
16.	Parámetros del sistema (Tx, Rx, antena, ganancias y pérdidas)	46
17.	Perfil de radio enlace de microondas.....	46
18.	Enlace de Montúfar a San Pedro Sacatepéquez	47
19.	Fibra óptica	53
20.	Refracción entre dos materiales	56
21.	Ángulo crítico	57
22.	Tipos de fibra	59
23.	Esquema básico de un enlace de fibra óptica.....	60

24.	Atenuación en la fibra óptica según longitud de onda.....	61
25.	Modelo satelital	75
26.	Ángulo de 3 decibeles.....	78
27.	Factor de ruido.....	80
28.	Potencia de salida de un amplificador.....	83
29.	Gráfica del Índice de atenuación en dB/Km	91
30.	Atura de la atmósfera sobre el nivel del mar	91
31.	Desgaste de la señal por efectos de lluvia.....	93
32.	Relación diámetro de gota con longitud de onda	94
33.	Regiones de lluvia en el Continente Americano.....	96

TABLAS

I.	Multiplexación de PDH por región.....	12
II.	Erlang B	21
III.	Múltiplos de medidas	26
IV.	Espectro de radio frecuencia.....	27
V.	Pérdidas en el alimentador	38
VI.	Valores del margen de desvanecimiento	40
VII.	Valores de ganancia en dB de antenas parabólicas sólidas	41
VIII.	Costos de radio enlaces de 8, 11, 15 y 18 MHz.....	49
IX.	Potencia Tx (dBm) y umbrales de recepción (dB) de las frecuencias 6-8, 10-11, 13, 15, 18 y 23 GHz.....	50
X.	Tabla de postes, vanos y herrajes	67
XI.	Costos del tendido de la fibra óptica	68
XII.	Costos del tendido de 3 500 metros de F.O.....	69
XIII.	Bandas satelitales	74
XIV.	Costos del equipo de microondas	104

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
dB	Decibeles
Gbps	Giga bits por segundo
km	Kilómetros
km²	Kilómetros cuadrados
Kbits/s	Kilo bits por segundo
Mbits/s	Mega bits por segundo
° K	Grados Kelvin

GLOSARIO

A	Interfaz entre el MSC y el BSC en la arquitectura GSM.
Abis	Interfaz de comunicación entre el BSC y la BTS en la arquitectura GSM.
AMR	Adaptive Multi-Rate, codificador adaptativo de voz a múltiples velocidades, su rango de velocidades va desde 4,75 a 12,2 Kbit/s.
AUC	Authentication Center, (centro de autenticación).
BER	Bit Error Rate, (tasa de error de bit).
BH	Busy Hour, (hora más cargada de tráfico en el día).
BNC	Conector para uso en cable mini coaxiales.
BSC	Base Station Controller, (controlador de estaciones base).
BTS	Base Transceptor Station, (estación base transceptora).
<i>Busy Hour</i>	Es la hora más cargada de tráfico en un día.

E1	Es un protocolo de capa física de transmisiones de línea dedicada.
EDGE	Enhanced Data for Global Evolution (evolución de datos para la evolución global). Evolución de GPRS a tecnología de 3ra. generación.
EIR	Equipment Identity Register, (registro de identidad).
Erlang	Unidad de medición de tráfico.
ETSI	Instituto Europeo de Normativas y Telecomunicaciones.
Full Rate	Muestreo de la señal a su alta capacidad.
GEO	Geostacionary Earth Orbit, (órbita terrestre geoestacionaria).
GPRS	General Packet Radio System, (servicio general de paquetes vía radio).
GPS	Global Positioning System, (sistema de posicionamiento global).
GSM	Global System for Mobile Communication (sistema global para comunicaciones móviles).
Half Rate	Muestreo de la señal a capacidad media.

<i>Handover</i>	Traspaso del móvil de una celda a otra, sin perder la comunicación.
Hertz	Unidad de medida de la frecuencia, equivalente a una cantidad de ciclos en un segundo.
HLR	Home Location Register, es una base de datos donde se almacena la localización de cada usuario y la configuración de los servicios permitidos.
HPA	High power amplifier, (amplificador de alta potencia).
HR	High Rate, (tasa rápida).
IDU	Indoor Unit (unidad externa).
ISDN	Integrated Service Data Network.
LED	Light-emitting diode, (diodo emisor de luz).
LEO	Low Earth Orbit, (órbita baja terrestre).
LOS	Line Of Sight, (línea de vista).
MEO	Medium Earth Orbit, (órbita media terrestre).
MS	Mobile Station, (estación móvil).

MSC	Mobile Switching Center, (centro de conmutación móvil).
ODU	Outdoor Unit, (unidad externa).
OSS	Operation Support Subsystem (subsistema de operaciones).
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy (jerarquía digital presíncrona).
PIRE	Potencia isotrópica radiada efectiva.
PSK	Phase Shift Keying, (modulación por desplazamiento de fase).
PSTN	Public Switched Telephone Network, (red de telefonía pública conmutada). Es una red con conmutación de circuitos tradicional optimizada, para comunicaciones de voz en tiempo real.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation, (modulación de amplitud en cuadratura).
RBU	Radio Base Unit, (unidad de radio base).
RF	Radio Frecuencia.

Roaming	Es un concepto utilizado en comunicaciones inalámbricas, que está relacionado con la capacidad de un dispositivo para moverse de una zona de cobertura a otra.
SCP	Service Control Point.
SIM	Subscriber Identity Module, (módulo de identificación de usuario).
SMSC	Short Message Services Center, (central de servicio de mensajes cortos).
TCH	Traffic Chanel (canal de tráfico).
TDMA	Time Division Multiple Access, (acceso múltiple por división de tiempo).
TRX	Módulo de transmisión y recepción en la tecnología GSM.
Vano	Distancia entre dos puntos de apoyo.
VLR	Visitor Location Register, (registro local de visitantes).
VMS	Voice Mail System, (sistema de mensajes de voz).

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se provee la explicación de los conceptos básicos y las ecuaciones necesarias, para el desarrollo de los cálculos de las pérdidas y ganancias de cada uno de los medios de transmisión en la última milla de un sitio de telefonía GSM, con la intención de definir qué medio es el más indicado según sea la necesidad, adicionalmente se comparan los costos de los equipos y servicios de instalación, para determinar qué medio es el más adecuado según presupuesto.

Se principia con los conceptos básicos de la tecnología GSM, por ser el estándar de telefonía móvil de mayor difusión a nivel mundial, esto gracias a sus características y grandes beneficios que provee a los usuarios, dentro de las cuales se destaca la calidad de voz, eficiencia del espectro y la capacidad de transmitir datos. En el capítulo uno se describe el sistema GSM de forma general, sus elementos, su arquitectura de interconexión y sus cualidades que lo han convertido en el predilecto de los proveedores de telefonía móvil.

En el segundo capítulo se explican los cálculos y el método de dimensionamiento de una celda GSM, a nivel de capacidad de tráfico de voz y en consecuencia su necesidad de transmisión, adicionalmente se describe la tecnología usada en el transporte de la información PDH y su trama de primer orden.

En el tercer capítulo se explica y detalla el radio enlace de microondas, donde incluye los conceptos básicos como: la distribución del espectro radio eléctrico, la estructura del radio enlace y los cálculos de las pérdidas que sufre

la señal en su trayectoria. Todo esto para obtener la ecuación del enlace que definirá los parámetros y el tipo de enlace. Para hacer la selección de la mejor ruta del enlace, se emplea el programa radio mobile que crea un perfil del enlace entre los puntos, por último se calculan los costos del equipo e instalación del radio enlace.

En el cuarto capítulo se explica la fibra óptica que incluye los conceptos y fundamentos de su funcionamiento, los tipos que existen, la estructura de un tendido y los cálculos de las pérdidas del enlace en relación con la distancia y la cantidad de empalmes y conexiones en todo el trayecto, también se hacen los cálculos de los costos de los equipos y del tendido.

En el quinto capítulo se exponen los radio enlaces satelitales, que incluyen la explicación de las bandas satelitales y sus diferentes usos, la estructura del enlace y los cálculos de las ganancias y pérdidas que sufre la señal. Por último se detallan los costos de los equipos, instalación y servicios de este medio.

El sexto capítulo incluye la comparación de los 3 medios expuestos en este trabajo, resaltando sus ventajas uno sobre otro en diferentes casos.

OBJETIVOS

General

Describir técnica y económicamente los diferentes medios de comunicación propuestos para la implementación de la última milla de un sitio de telefonía móvil GSM.

Específicos

1. Describir la arquitectura básica de la red GSM, sus características y elementos que la forman.
2. Definir la forma del dimensionamiento de una celda GSM a partir de los parámetros característicos del lugar en el cual se brindará cobertura.
3. Describir las características técnicas y económicas para la ejecución de un enlace vía fibra óptica.
4. Describir las características técnicas y económicas para la ejecución de un enlace vía microonda.
5. Describir las características técnicas y económicas para la ejecución de un enlace satelital.
6. Definir, qué medio de comunicación es mejor según las condiciones necesarias de capacidad, posición y distancia en la última milla.

INTRODUCCIÓN

En estos tiempos las comunicaciones son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de las comunidades y pobladores, debido a esto, las empresas de telefonía móvil se ven en la tarea de expandir su cobertura de señal y servicios con el objetivo de satisfacer dicha necesidad. Para que este crecimiento sea eficiente y eficaz se debe hacer un correcto dimensionamiento de la tecnología a emplear.

Hoy en día las comunicaciones han evolucionado de una forma considerable. Desde los sistemas celulares analógicos a los sistemas digitales, una de estas tecnologías digitales móviles es GSM, que ofrece los servicios de voz y datos, usando el espectro de forma eficiente. El siguiente trabajo de investigación se enfoca en el estudio y análisis de la factibilidad técnica y económica para la implementación de los diferentes medios de interconexión de un sitio de celda GSM a una central controladora de voz y datos, con el objetivo de determinar qué tipo de medio de transmisión es el más adecuado, dependiendo de la cantidad de información a transmitir y del lugar del enlace.

Los medios de comunicación que se analizarán en el presente trabajo son: la fibra óptica, la microonda y los enlaces satelitales, dichos estudios se enfocarán al uso de los medios en un área rural, pero también, pueden ser usados en áreas urbanas según las necesidades que se presenten.

Al finalizar el estudio de este trabajo, el lector tendrá las herramientas y la capacidad de elegir con seguridad el medio a emplear en el transporte de

información, según sea su necesidad, tomando en cuenta todos los factores a los cuales estará sometido el enlace.

1. DESCRIPCIÓN DE GSM

El sistema global para las comunicaciones móviles (GSM) es un sistema estándar que además de proveer la comunicación telefónica, es capaz de conectar a un usuario a través de su teléfono con su computadora y enviar y recibir correos electrónicos, navegar por internet, acceder con seguridad a la red informática de una compañía (LAN/Intranet), así como utilizar otras funciones digitales de transmisión de datos, incluyendo el servicio de mensajes cortos o mensajes de texto.

1.1. Reseña histórica

En Europa a principios de los años 80 existía un gran número de diferentes sistemas celulares analógicos, con diferentes ventajas, pero se miraban disminuidas por la nula compatibilidad entre ellas. Esta situación no era agradable, porque no solo los sistemas móviles debían limitar su operatividad dentro de los confines nacionales, sino que también creaba un mercado muy limitado para su desarrollo tecnológico, debido a los diferentes sistemas usados entre compañía y países.

Con la necesidad de crear un sistema que permitiera a los usuarios la libre circulación (*roaming*) en toda Europa, en 1982 la Conferencia Europea de Correos y Telecomunicaciones (CEPT) formo un nuevo grupo de estudio, llamado Groupe Special Mobile (GSM), para el estudio y desarrollo de un sistema telefónico móvil estándar pan-europeo en la frecuencia de 900 mega hertz. Actualmente el acrónimo GSM esta para Global System for Mobile Communication o Sistema Global para comunicaciones móviles, donde se ha

querido utilizar el término global a causa de la adopción de este estándar en cada continente.

Entre 1982 y 1985, se planteó qué tipo de sistema construir: digital o analógico. Pero en 1985, tras numerosas discusiones, el grupo decidió implantar un sistema basado en tecnología digital. En 1987 se efectuaron en París pruebas de campo, en las que diferentes fabricantes propusieron soluciones diversas para elegir la técnica de acceso múltiple, pero en mayo de 1987, se eligió la solución de banda estrecha TDMA (*Time División Múltiple Access*). En 1989 fueron transferidas todas las responsabilidades de GSM al Instituto Europeo de Normativas y Telecomunicaciones (ETSI) y en 1990 se publicó la primera fase de las especificaciones GSM, para que al final, en el año de 1991 se lanzaran comercialmente los servicios de GSM, logrando una gran aceptación mundial, con 36 redes en 22 países en el transcurso de 2 años.

Las normativas se ampliaron enseguida para incluir una interfaz aérea también para la banda de 1 800 Mega Hertz (DCS1800) y de 1 900 mega hertz (PCS1900) para poder incluir a diversos países que ya tenían ocupada la banda de 900 mega hertz. En particular a Estados Unidos y Europa se le concedido la banda de 1 900 mega hertz y a los otros países la de 1 800 mega hertz.

El estándar GSM utiliza la tecnología de acceso por división de frecuencia (FDMA), combinada con la de acceso por división de tiempo (TDMA): 8 canales vocales (*Full Rate*) o bien 16 (*Half Rate*) multiplexadas en un único canal de radio, junto a las informaciones de control de error necesarias para disminuir la interferencia debida al ruido y a las informaciones de sincronización y señalización.

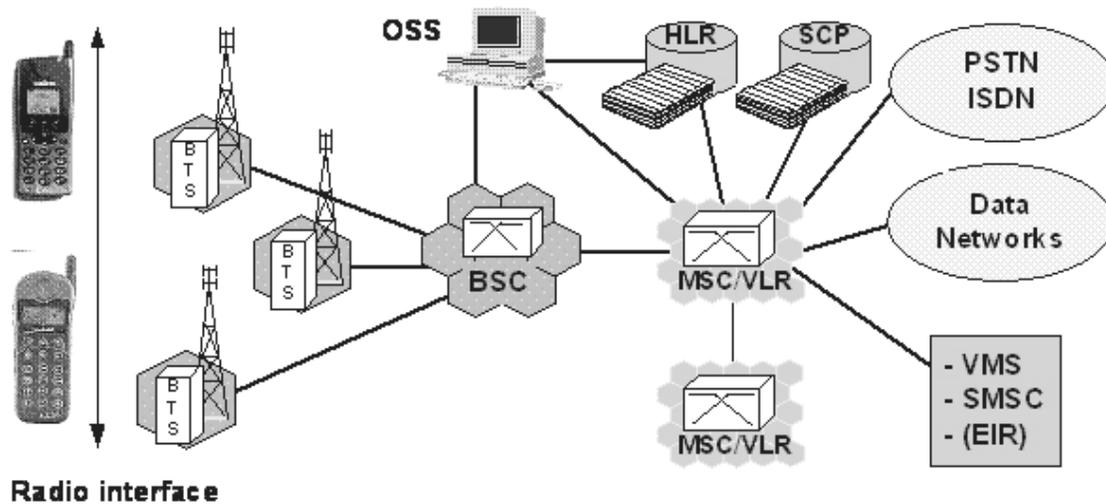
Alguna de las ventajas de una red GSM es el uso optimizado del espectro, colocando más abonados en un espacio más reducido de frecuencia, utilizando diferentes códec de voz, mejorando la calidad y capacidad, adicionalmente se tienen los servicios de datos de GPRS y EDGE con velocidades de 35-40 kilo bits por segundo y 110-130 kilo bis por segundo en promedio respectivamente otro beneficio, es el bajo costo en comparación a sus anteriores tecnologías.

1.2. Arquitectura de GSM

La arquitectura básica de la red GSM tiene como objetivo proporcionar comunicación inalámbrica móvil a todos los usuarios GSM en una región geográfica extensa, motivo por el cual la estructura de la red se subdivide en pequeñas celdas o áreas de cobertura, que son integradas por una red de Estaciones Base de Transmisión (BTS's), capaces de proporcionar la cobertura requerida. Todas estas estaciones son interconectadas a una estación base de control (BSC), que tiene la función del monitoreo y gestión de la red, otra parte fundamental en la arquitectura de la red, es el centro de conmutación móvil (MSC), que tiene como función la interconexión de la red móvil GSM con otras redes, como las de datos, redes telefónicas de conmutación públicas (PSTN), y el resto de redes telefónicas a nivel mundial. Existe además una base de datos Home Location Register (HLR) y Visitor Location Register (VLR) donde están alojados todos los datos y servicios de los subscriptores locales y visitantes, respectivamente.

En la figura 1, se muestra un esquema en la cual se detallan los elementos que conforman una red GSM.

Figura 1. **Arquitectura de GSM**



Fuente: BARBOZA, Luis Fernando. *Sub sistema de estaciones base*. Capítulo 3.

1.2.1. Estación móvil

La estación móvil (*Mobile Station, MS*) es el elemento de radio móvil que porta el abonado, con la función de generar y recibir llamadas a través de la red GSM, está compuesto por dos elementos diferentes:

- El terminal móvil, que es el teléfono propiamente dicho.
- La SIM o módulo de identidad del usuario, que es una tarjeta removable la cual contiene toda la información del usuario.

1.2.2. Radio base de transmisión

La radio base de transmisión (*Base Transceiver Station*, BTS) es el elemento encargado de mantener la comunicación de las estaciones móviles (MS) con la central controladora de estaciones base (BSC), en la interconexión entre la BTS y la BSC, se pueden emplear diferentes medios de transmisión como la fibra óptica, radio enlaces y enlace satelital, dependiendo de la situación y necesidades.

Una BTS esta compuesta por un conjunto de hardware y software, de los cuales se pueden mencionar los módulos digitales de codificación y decodificación de los canales de radio, amplificadores de potencia de RF, módulos de radio, sistema radiante y módulos de alarmas, con la capacidad de transmitir y recibir la señal de los móviles. Dentro de esta señal, se incluyen la información del usuario (voz y datos), parámetros de sincronía, señalización, nivel de potencia del móvil, niveles de potencia de las celdas vecinas medidas por el móvil, etcétera.

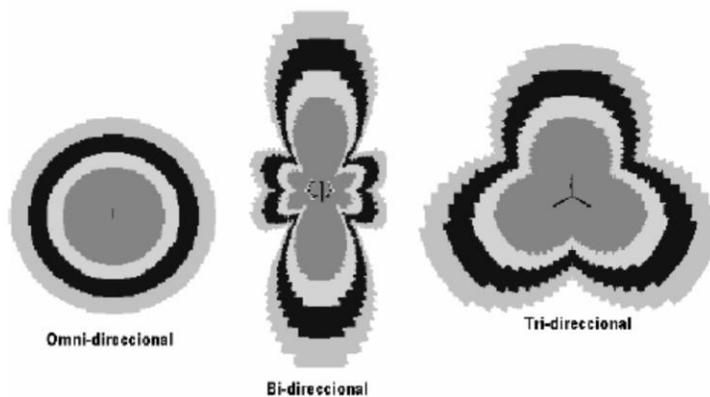
Por otro lado, los módulos de radio transceptores (TRX) son capaces de controlar como máximo, ocho comunicaciones de voz simultánea a velocidad máxima, esto depende del tipo de codificación que se este empleando, la codificación Adaptive Multi-Rate (AMR), determina si se manejan ocho llamadas a *full rate* o el doble de 16 llamadas a *half rate* por TRX, pero sacrificando la calidad de voz y dependiendo de las condiciones de radio.

Otro parámetro muy importante, es la cantidad de tráfico que la celda va a manejar, ya que determina los cálculos del dimensionamiento de los equipos en la estación, y de la capacidad de las interfaces de conexión entre la estación base con la estación controladora (BSC).

Una estación base garantiza la cobertura radioeléctrica a un área determinada, a esta área se le llama comúnmente célula o celda. Para cubrir el área de una celda se instala una serie de antenas con una configuración establecida, para formar un patrón de radiación sectorizado con el objeto de distribuir el tráfico.

En la figura 2, se observan los diferentes tipos de sectorización de una estación con sus respectivos patrones, existen tres tipos de sectorización: omnidireccionales, usados en áreas de muy poco tráfico de baja capacidad y con una cobertura de 360 grados, las bidireccionales son usadas para cubrir dos áreas específicas de la célula, este tipo se puede modificar en el sentido de la orientación de sus lóbulos de radiación, y las tridireccionales son las que tienen 120 grados de separación entre sus lóbulos de radiación, este tipo es el más empleado en las celdas con alto nivel de tráfico, con el objetivo de distribuir los usuarios en los tres sectores y así eliminar el congestionamiento de la estación base y de los sectores.

Figura 2. **Tipos de sectorización en una BTS**



Fuente: Nortel Networks, GSM System and Product Overview.

Otro factor muy importante para determinar la capacidad de la estación base es la densidad de usuarios con respecto al área de cobertura alrededor de ella. La superficie de una célula varía enormemente entre los espacios urbanos y los espacios rurales. En los urbanos, donde la densidad de tráfico es mayor, el tamaño de la célula debe ser pequeño para aumentar la capacidad de comunicación por unidad de superficie y disminuir la saturación de usuarios en una sola celda. El radio de una célula en este entorno, puede llegar a su límite más bajo, de unos 200 metros. Tomando en cuenta los factores físicos como: infraestructura, topología y condiciones climáticas para la propagación de las ondas de radio.

Por el contrario, en los espacios rurales, la densidad de tráfico es mucho menor y, por lo tanto, las dimensiones de las células son mucho mayores, alrededor de unos 30 kilómetros, siendo la potencia de las unidades móviles las que determinen el límite. Por otro lado una estación base, se puede controlar localmente o de forma remota a través de su controlador de estaciones base (BSC).

Las funciones de una estación base BTS, son las siguientes:

- La transmisión radio-eléctrica según el formato GSM
- La codificación/descodificación de los canales GSM
- Manejo de *Handover*
- Control de potencia de los móviles
- Salto de frecuencias

1.2.3. Controlador de estaciones base

El controlador de estaciones base (*Base Station Controller*, BSC), se encarga de gestionar una o varias estaciones base. Cumple diferentes funciones de comunicación y de gestión, para el tráfico de los usuarios procedente de las estaciones base y el que proviene de la central de conmutación (MSC), se comporta como un concentrador de llamadas y actúa como un enrutador hacia la estación base destinataria. La BSC como elemento gestor de la red, funciona como repetidor de alarmas y estadísticas procedentes de las estaciones base a su cargo que son destinadas al centro de control y mantenimiento de la red (OSS), adicionalmente es una base de datos para la configuración de parámetros y versiones de software de las BTS asociadas a ella, el operador puede cambiar esos parámetros por medio de comandos de forma remota desde la BSC.

El controlador de estaciones base gestiona igualmente los procesos de cambio de celda en el momento, cuando una estación móvil atraviesa la frontera entre dos celdas. En este punto, la celda en la cual el abonado se encuentra enganchado, traspasa toda la información del abonado a la celda vecina, para que ella se haga cargo de él. Igualmente, el controlador notifica a la base de datos HLR la nueva localización del abonado. A este traspaso de llamada entre celdas se le conoce como *Handover*.

En resumen, las funciones de una BSC son las siguientes:

- Gestión de las estaciones base BTS
- Gestión de los recursos de radio (canales de tráfico, canales de señalización)

- Gestión de llamadas (establecimiento, supervisión y liberación de la comunicación)
- Gestión de la transferencia de llamadas entre celdas a su cargo (*Handover*)
- Gestión de la potencia de las emisiones de radio
- Gestión de parámetros, mantenimiento y control del sistema
- Gestión de software y reconfiguración
- Gestión de alarmas y supervisión de los equipos

1.2.4. Central de conmutación móvil

La central de conmutación móvil (*Mobile Switching Center, MSC*) es el centro de la red GSM, se encarga de la interconexión de grupos vecinos de BSC a través de un enlace terrestre punto a punto. La MSC controla la señalización, enrutamiento y proceso de las llamadas y coordina las transferencias de las mismas entre celdas vecinas, también proporciona el enlace de la red móvil con la red de telefonía pública (PSTN) y demás redes telefónicas globales.

El conmutador o *Switch* funciona como un nodo muy importante que proporciona acceso hacia el centro de autenticación de derechos de abonados (AUC) y también interactúa conjuntamente con los registros de abonados, los cuales son: el registro de abonados locales (HLR) y el registro de abonado visitante (VLR), que son las bases de datos donde se aloja toda la información de servicios y permisos relacionados al abonado, a esta información estática se le asocia otra información, como la última localización del abonado y el estado de la terminal móvil (en servicio, en comunicación, en reposo, fuera de servicio, etcétera). El MSC, también es el suministro de todos los servicios ofrecidos por

la red, como por ejemplo; los servicios de valor agregado, mensajería, acceso a Internet por medio de GPRS, entre otros.

Las funciones básicas de la central de conmutación MSC son:

- Procesamiento de llamadas
- Enrutamiento de llamadas y proceso de *handover* entre MSC
- Señalización
- Interconexión hacia redes de telefonía pública
- Interconexión entre BSC y MCS

2. INGENIERÍA DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA CELDA GSM

Para el dimensionamiento de una celda es necesario hacer dos tipos de análisis; uno para calcular la capacidad de tráfico que pueda manejar la celda, basándose en el estudio de mercado de los posibles usuarios y el otro es el cálculo de capacidad de la transmisión en relación con el tráfico proyectado.

2.1. Jerarquía digital plesiócrona PDH

La jerarquía digital plesiócrona, conocida como PDH, es una tecnología usada en telecomunicación tradicionalmente para telefonía que permite enviar varios canales telefónicos sobre un mismo medio (ya sea cable coaxial, fibra óptica y microondas) usando técnicas de multiplexación por división de tiempo y equipos digitales de transmisión.

PDH funciona en un estado donde las diferentes partes de la red están casi pero no completamente sincronizadas, por ello, permite la transmisión de flujos de datos que, nominalmente están funcionando a la misma velocidad, pero permitiendo una cierta variación alrededor de la velocidad nominal gracias a la forma en la que se forman las tramas.

Los canales a multiplexar denominados módulos de transporte o contenedores virtuales, se unen formando tramas o módulos de nivel superior a velocidades estandarizadas de 2, 8, 34, 140 y 565 mega bits por segundo hablando del sistema europeo.

En la tabla I se muestran los distintos niveles de multiplexación PDH utilizados en Norteamérica, Europa y Japón.

Tabla I. **Multiplexación de PDH por región**

Nivel	Norteamérica			Europa			Japón		
	Canales	Mbit/s		Canales	Mbit/s		Canales	Mbit/s	
1	24	1,544	(T1)	30	2,048	(E1)	24	1,544	(J1)
2	96	6,312	(T2)	120	8,448	(E2)	96	6,312	(J2)
3	672	44,736	(T3)	480	34,368	(E3)	480	32,064	(J3)
4	2016	274,176	(T4)	1920	139,264	(E4)	1440	97,728	(J4)

Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Descripción de E1

El E1 es un protocolo de capa física de transmisiones de líneas dedicadas, para que exista una comunicación a nivel E1 es necesario de dos transceptores y un medio físico que los interconecta, este medio puede ser: hilos de cobre, fibra óptica o radio enlaces, su velocidad básica de transferencia de información consta de un flujo de datos de 2,048 mega bits por segundo (generalmente conocido de forma abreviada por 2 mega bits por segundo).

Es empleado comúnmente para transmisiones de voz, se digitaliza la señal mediante un micrófono, usando una frecuencia de muestreo de 8 kilo hertz (una muestra por cada 125 microsegundos) y cada muestra se codifica con 8 bits, con lo que se obtiene una velocidad binario de 64 kilo bits por segundo.

Agrupando 30 canales de voz, más otros 2 canales de 64 kilo bits por segundo, utilizados para señalización y sincronía, se forma un flujo PDH E1 de primer orden. De forma alternativa es posible también utilizar el flujo completo E1, para transmisión de datos.

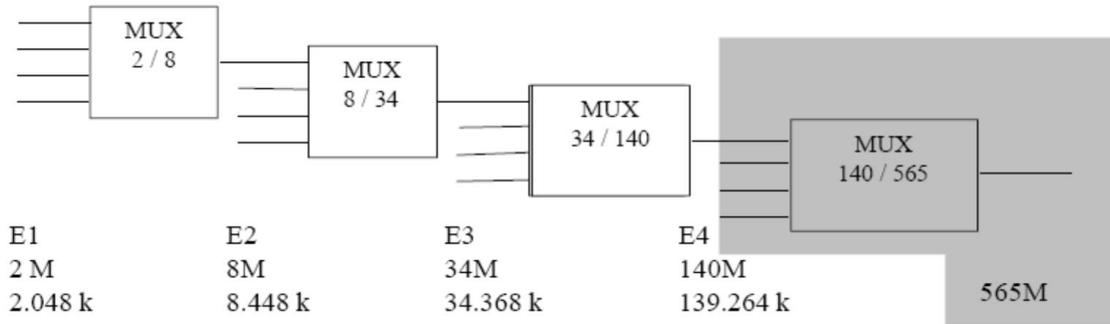
Con el fin de poder transportar múltiples tramas de E1 de un lugar a otro, estos son combinados o multiplexados en grupos de cuatro en un equipo multiplexor. La multiplexación se lleva a cabo tomando un bit del flujo 1, seguido por un bit del flujo 2, luego otro del 3 y finalmente otro del 4.

El multiplexor, además añade bits adicionales con el objetivo de permitir al demultiplexor del extremo distante, decodificar qué bits pertenecen a cada flujo de 2 megas y así reconstituir los flujos originales. Estos bit adicionales son, por un lado, los denominados bits de justificación o de relleno y por otro una combinación fija de unos y ceros que es la denominada palabra de alineamiento de trama que se transmite cada vez que se completa el proceso de transmisión de los 30+2 canales de los 4 flujos de 2 mega bits por segundo, que es lo que constituye una trama del orden superior de 8 mega bits por segundo.

Con procedimientos similares, se llega a los siguientes niveles, el tercero esta constituido por 4 flujos de 8 mega bits por segundo a una velocidad de 34 mega bits por segundo y cuarto de cuatro ráfagas de 34 mega bits por segundo forman la trama de cuarto orden de 140 mega bits por segundo.

En la figura 3, se puede apreciar gráficamente las diferentes jerarquías de PDH y la forma en que se generan.

Figura 3. Jerarquía digital presiódrona PDH

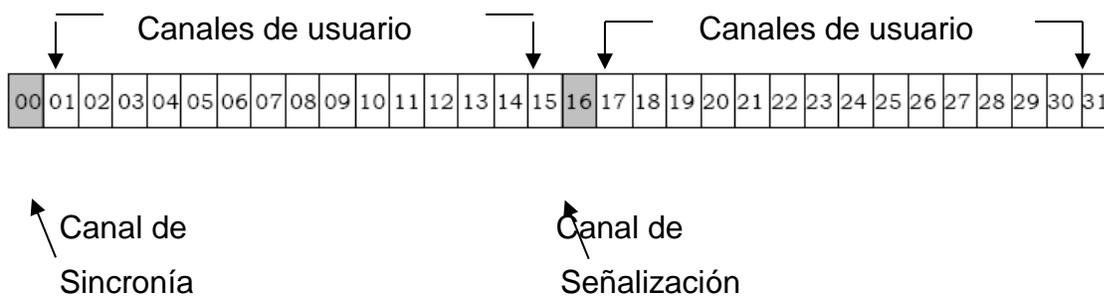


Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Trama de primer orden PDH (E1)

La trama de primer orden está formada por 32 canales; de los cuales son 30 de información, uno de sincronía y uno de señalización.

Figura 4. Trama de primer orden PDH (E1)



Fuente: elaboración propia.

8 KHz de muestreo de la voz * 8 bits de codificación = 64 Kbits/s

64 Kbit/s * 32 canales = 2 048 Kbits/s = 2 Mbits/s

2.2. Tráfico

El tráfico telefónico se asocia al concepto de ocupación. Se dice que un circuito telefónico está cursando tráfico, cuando está ocupado por una llamada de voz o datos, nunca si está libre.

2.2.1. Descripción de tráfico

Cuando se produce una comunicación telefónica entre 2 abonados, se ocupan los 2 aparatos de los abonados y además una serie de órganos o circuitos intermedios, tanto en las estaciones de transmisión (BTS) y centrales de control (BSC), como en las uniones entre las mismas. Estos órganos o circuitos, también cursan tráfico cuando están ocupados.

El tráfico telefónico es medible en términos de tiempo o tiempo de ocupación, que depende del número de comunicaciones y de la duración de las mismas.

2.2.2. Medición de tráfico

El volumen de tráfico cursado por un abonado o circuito telefónico durante un determinado período de tiempo, es igual al tiempo de ocupación de dicho abonado o circuito, durante dicho período.

Como se ha mencionado, los móviles, conmutadores y centrales telefónicas son conectados por los troncales. Uno de los pasos más importantes en la ingeniería de planeación de las telecomunicaciones, es determinar el número de los troncales requeridos en una conexión entre los conmutadores, centrales y estaciones de transmisión. Para dimensionar correctamente una

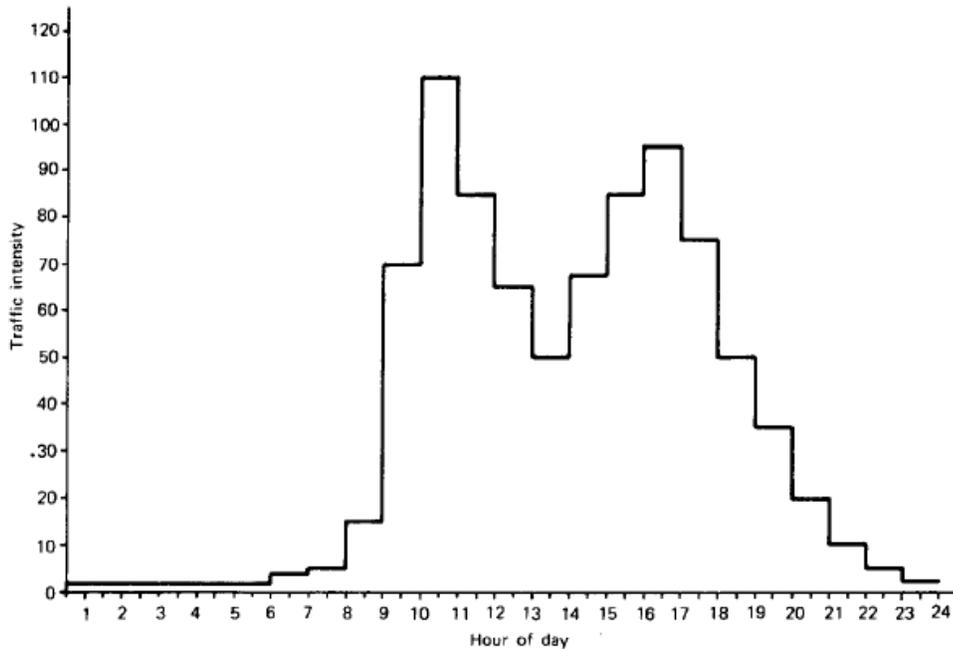
ruta, se debe tener cierta idea de su uso, es decir, cuántas personas desearán hablar simultáneamente sobre una ruta. El uso de la ruta se puede definir por dos parámetros:

- Velocidad de llamadas o el número de veces que una ruta de tráfico se utiliza por período unitario.
- El tiempo de llamadas, que es igual a la duración de la ocupación de una ruta del tráfico por una llamada o la duración media de la ocupación de una o más rutas por llamadas.

Una ruta de tráfico es igual a un canal, una ranura de tiempo, una banda de frecuencia, una línea, una troncal, un conmutador, o un circuito de comunicación. El tráfico cursado es el volumen de tráfico llevado realmente por un conmutador y el tráfico ofrecido es el volumen de tráfico ofrecido a un conmutador. Para dimensionar un camino de tráfico o en este caso dimensionar la capacidad de transmisión para una BTS, se debe hacer como primer paso un estudio de densidad poblacional para evaluar la inversión según el mercado de los posibles clientes de telefonía móvil, después se hace un estudio de radio-frecuencia, que determina la posición óptima de la celda con las orientaciones de los sectores según la concentración de población.

El comportamiento del tráfico es muy diverso, puede tener variaciones mensuales, semanales por día y por hora. El comportamiento del tráfico en un día normal, se puede apreciar en la figura 5.

Figura 5. **Comportamiento del tráfico en un día**



Fuente: SANTA CRUZ, Oscar M. *Conceptos Básicos Plantel Externo Telefónico*. p.8.

La hora más ocupada con el más alto tráfico en el día se le denomina hora pico (*Busy Hour, BH*), y es usado en las telecomunicaciones para el dimensionamiento y ampliación de un sitio de celda, según la demanda de tráfico. En la figura 5 se muestra una variación típica del tráfico hora-por-hora, para una radio base de telefonía móvil. Se puede apreciar que el período más ocupado esta entre las 10 y las 11 de la mañana, según un día de trabajo normal, pero este comportamiento puede variar entre un 20 o un 25 por ciento, dependiendo de elementos externos impredecibles como eventos de alta concentración de personas, desastre natural y eventos de entretenimiento.

Si se define definimos tráfico telefónico como la generación de llamadas sobre un grupo de circuitos o troncales con respecto a la duración de cada una

de ellas y la cantidad de llamadas, se puede decir, que ese flujo de tráfico (A) es:

$$A = C \times T \quad (1)$$

Donde C es la cantidad de llamadas por hora y T es la duración de la llamada promedio. De esta fórmula aparecería que la unidad del tráfico sería llamada-minutos o llamada-horas. Suponiendo que el tiempo medio de llamada sea 2,5 minutos, la cantidad de llamadas en la BH en un día determinado, es de 237. El flujo sería entonces $237 \times 2,5 = 592,5$ llamadas-minutos. La unidad preferida del tráfico es el Erlang y es adimensional.

Un Erlang de intensidad del tráfico es la ocupación continua de un circuito en el transcurso de una hora. Para un grupo de circuitos, la intensidad del tráfico en Erlangs es el número de los segundos de la llamada por segundo o el número de las horas de la llamada por hora. Si supiera que en un grupo de 10 circuitos se tiene una intensidad de la llamada de 5 Erlangs, se esperaría que la mitad de los circuitos estuvieran ocupados en la hora medida.

La congestión, las llamadas pérdidas, y el grado del servicio, se pueden ejemplificar en una central de telefonía que sirve a 5 000 suscriptores y que no más del 10 por ciento de los suscriptores desean servicio simultáneamente. Por lo tanto, el conmutador o central se dimensiona con el suficiente equipo para dar servicio a 500 conexiones simultáneas. Cada conexión estaría, por supuesto, entre cualquiera de los 5 000 suscriptores. Ahora si el suscriptor número 501, desea originar una llamada, él no podría, porque todos los equipos estarían ocupados, aunque la línea que él desea alcanzar este ociosa. Esta llamada del suscriptor 501, se llama una llamada pérdida o llamada bloqueada.

La probabilidad de la congestión es un parámetro importante en la ingeniería del tráfico de los sistemas de telecomunicaciones. El grado de servicio expresa la probabilidad de encontrar congestión durante la BH y se expresa por la letra p. Un típico grado de servicio en las telecomunicaciones móviles es de $p = 0,02$. Esto significa que en promedio, dos llamadas de 100 puede ser bloqueadas o pérdidas durante la BH.

2.2.2.1. Definición de Erlang

Cuando se dimensiona una ruta, se desea encontrar el número de circuitos que servirán en esa ruta. Existen varias fórmulas disponibles para determinar el número de circuitos basados en la carga de tráfico en la BH. Los factores que determinan el cálculo, son los siguientes:

- Llamadas entrantes y tiempo de duración.
- Número de fuentes de tráfico
- Disponibilidad
- Manejo de las llamadas perdidas.

La fórmula más utilizada en el mundo, actualmente es la Erlang B. La pérdida significa la probabilidad de bloqueo en el conmutador, debido a la congestión o a la totalidad de líneas troncales ocupadas. Esto se expresa como grado de servicio E_b o la probabilidad de encontrar x canales ocupados. Los otros dos factores en la fórmula Erlang B, son el promedio del tráfico ofrecido y el número de líneas troncales de servicios disponibles.

$$E_b = \frac{A^n / n!}{1 + A + \frac{A^2}{2!} + \frac{A^n}{n!}} \quad (2)$$

Donde:

n = número de troncales de servicio

A = promedio de tráfico ofrecido

E_b = grado de servicio usando la fórmula Erlang B

Esta fórmula asume que:

- El tráfico se origina en un número infinito de fuentes.
- Las llamadas pérdidas son borradas asumiendo un tiempo de retención cero.
- El número de troncales de canales de servicio es limitado.
- Existe completa accesibilidad.

Se debe diferenciar muy bien entre:

- Congestión de tiempo: se refiere a la fracción decimal de una hora, durante la cual todas las troncales están bloqueadas simultáneamente.
- Congestión de llamadas: se refiere al número de llamadas pérdidas en el primer intento, que se denominan llamadas pérdidas.

La tabla II, se basa en la fórmula Erlang B y brinda la información del dimensionamiento de las troncales para ciertos grados de servicio, desde 0,001 hasta 0,05 y desde 1 a 50 troncales. La tabla usa unidades UC que son de intensidad de tráfico y se miden en ccs o sea 100 llamadas por segundo, y las unidades de intensidad de tráfico (TU), se miden en Erlangs, de donde 1 Erlang = 36 ccs. Como ejemplo, se supone que una ruta lleva 16,68 Erlangs con un grado de servicio deseado de 0,001; se nota que se requerirán 30 troncales.

Tabla II. Erlang B

TRNCs	GS 0,001		GS 0,002		GS 0,005		GS 0,01		GS 0,02		GS 0,05	
	UC	TU	UC	TU	UC	TU	UC	TU	UC	TU	UC	TU
1	0,04	0,001	0,07	0,002	0,2	0,005	0,4	0,01	0,7	0,02	1,8	0,05
2	1,8	0,05	2,5	0,07	4	0,11	5,4	0,15	7,9	0,22	14	0,38
3	6,8	0,19	9	0,25	13	0,35	17	0,46	22	0,6	32	0,9
4	16	0,44	19	0,53	25	0,7	31	0,87	39	1,09	55	1,52
5	27	0,76	32	0,9	41	1,13	49	1,36	60	1,66	80	2,22
6	41	1,15	48	1,33	58	1,62	69	1,91	82	2,28	107	2,96
7	57	1,58	65	1,8	78	2,16	90	2,5	106	2,94	135	3,74
8	74	2,05	83	2,31	98	2,73	113	3,13	131	3,63	163	4,54
9	92	2,56	103	2,85	120	3,33	136	3,78	156	4,34	193	5,37
10	111	3,09	123	3,43	143	3,96	161	4,46	183	5,08	224	6,22
11	131	3,65	145	4,02	166	4,61	186	5,16	210	5,84	255	7,08
12	152	4,23	167	4,64	190	5,28	212	5,88	238	6,62	286	7,95
13	174	4,83	190	5,27	215	5,96	238	6,61	267	7,41	318	8,83
14	196	5,45	213	5,92	240	6,66	265	7,35	295	8,2	350	9,73
15	219	6,08	237	6,58	266	7,38	292	8,11	324	9,01	383	10,63
16	242	6,72	261	7,26	292	8,1	319	8,87	354	9,83	415	11,54
17	266	7,38	286	7,95	318	8,83	347	9,65	384	10,66	449	12,46
18	290	8,05	311	8,64	345	9,58	376	10,44	414	11,49	482	13,38
19	314	8,72	337	9,35	372	10,33	404	11,23	444	12,33	515	14,31
20	339	9,41	363	10,07	399	11,09	433	12,03	474	13,18	549	15,25
21	364	10,11	388	10,79	427	11,86	462	12,84	505	14,04	583	16,19
22	389	10,81	415	11,53	455	12,63	491	13,65	536	14,9	617	17,13
23	415	11,52	442	12,27	483	13,42	521	14,47	567	15,76	651	18,08
24	441	12,24	468	13,01	511	14,2	550	15,29	599	16,63	685	19,03
25	467	12,97	495	13,76	540	15	580	16,12	630	17,5	720	19,99
26	493	13,7	523	14,52	569	15,8	611	16,96	662	18,38	754	20,94
27	520	14,44	550	15,28	598	16,6	641	17,8	693	19,26	788	21,9
28	546	15,18	578	16,05	627	17,41	671	18,64	725	20,15	823	22,87
29	573	15,93	606	16,83	656	18,22	702	19,49	757	21,04	858	23,83
30	600	16,68	634	17,61	685	19,03	732	20,34	789	21,93	893	24,8
31	628	17,44	662	18,39	715	19,85	763	21,19	822	22,83	928	25,77
32	655	18,2	690	19,18	744	20,68	794	22,05	854	23,73	963	26,75
33	683	18,97	719	19,97	774	21,51	825	22,91	887	24,63	998	27,72

Continuación de la tabla II.

34	711	19,74	747	20,76	804	22,34	856	23,77	919	25,53	1033	28,7
35	739	20,52	776	21,56	834	23,17	887	24,64	951	26,43	1068	29,68
36	767	21,3	805	22,36	864	24,01	918	25,51	984	27,34	1104	30,66
37	795	22,03	834	23,17	895	24,85	950	26,38	1017	28,25	1139	31,64
38	823	22,86	863	23,97	925	25,69	981	27,25	1050	29,17	1175	32,63
39	851	23,65	892	24,78	955	26,53	1013	28,13	1083	30,08	1210	33,61
40	880	24,44	922	25,6	986	27,38	1044	29,01	1116	31	1246	34,6
41	909	25,24	951	26,42	1016	28,23	1076	29,89	1149	31,92	1281	35,59
42	937	26,04	981	27,24	1047	29,08	1108	30,77	1182	32,84	1317	36,58
43	966	26,84	1010	28,06	1078	29,94	1140	31,66	1215	33,76	1353	37,57
44	995	27,64	1040	28,88	1109	30,8	1171	32,54	1248	34,68	1388	38,56
45	1024	28,45	1070	29,71	1140	31,66	1203	33,43	1282	35,61	1424	39,55
46	1053	29,26	1099	30,54	1171	32,52	1236	34,32	1315	36,53	1459	40,54
47	1083	30,07	1129	31,37	1202	33,38	1268	35,21	1349	37,46	1495	41,54
48	1111	30,88	1159	32,2	1233	34,25	1300	36,11	1382	38,39	1531	42,54
49	1141	31,69	1189	33,04	1264	35,11	1332	37	1415	39,32	1567	43,54
50	1170	32,51	1220	33,88	1295	35,98	1364	37,9	1449	40,25	1603	44,53

Fuente: SANTA CRUZ, Oscar M. *Conceptos Básicos Plantel Externo Telefónico*. p.12.

2.2.3. Dimensionamiento de una celda GSM

Como ya se mencionó antes, posteriormente al estudio de mercado en el poblado, se determinaron las áreas a cubrir con la cantidad de posibles futuros usuarios a partir de la densidad poblacional. Como ejemplo se va a tomar la densidad poblacional a nivel capital en la ciudad de Guatemala, que es de 1 195 habitantes por kilómetro cuadrado.

La torre que se tomará de ejemplo, será trisectorial de altura de 45 metros, con antenas de apertura horizontal de 65 grados, ajustando los parámetros mecánicos y eléctricos, se cubre un área 0,8 kilómetros cuadrados por sector.

Suponiendo que la densidad del poblado a cubrir es de 400 clientes kilómetros cuadrados. Haciendo los cálculos por cada sector, se obtiene un total de 320 posibles usuarios. Según estadísticas, la cantidad de Erlangs promedio que consume una persona, es de 25 mili Erlags, al hacer el cálculo por sector, se obtiene 8 Erlags-sector, asumiendo que todos los móviles se conectan al mismo tiempo *Busy Hour* y haciendo referencia a la tabla II de Erlang B, con un grado de servicio de 0,02, indica que se debe tener como mínimo 14 canales para tráfico de voz (TCH, cada canal de 16Kbps) para poder abastecer la demanda de tráfico de cada sector, con esa cantidad de canales calculados, se llegará a una utilización del 100 por ciento (suponiendo que todos los móviles se conecten a la hora pico).

Adicional al cálculo efectuado, se debe tomar en cuenta el crecimiento del tráfico en la celda, generalmente se toma un 30 por ciento más sobre la cantidad calculada, al final se calculan 19 canales de tráfico de voz, adicionalmente a los canales de tráfico, se deben tomar en cuenta los canales de control (un BCCH), señalización (un SDCCH) y los canales de tráfico de datos (cuatro PDTCH), para hacer un total de 25 canales que equivalentes a 4 transceptores por sector (cada transceptor tiene 8 canales de 16 Kbps cada uno, para hacer un total de $8 * 16 \text{ Kbps} = 128 \text{ Kbps}$ por transceptor). La configuración de la celda será de 3 sectores, cada uno con 4 transceptores. Haciendo un total de 12 transceptores en toda la celda.

Para la transmisión de la información de la celda, se hará uso de un E1, debido a que la celda con 12 transceptores, hace uso de 1 536 Kbps ($12 \text{ Trx} * 128 \text{ Kbps} = 1536 \text{ Kbps}$) de 2 048 Kbps que es capaz de transmitir el E1, sin tomar en cuenta los canales de señalización y de sincronía propios del E1.

En este punto, es donde se hace el análisis de la factibilidad técnica y económica del medio a emplear en la transmisión de la información, tomando en cuenta los factores de la capacidad del medio, la topografía del terreno, los factores climáticos y económicos. En el siguiente capítulo, se describirá y analizarán las pérdidas de los medios que se pueden emplear en la interconexión de un sitio de celda con una central de control.

3. ANÁLISIS TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL RADIO ENLACE DE MICROONDAS

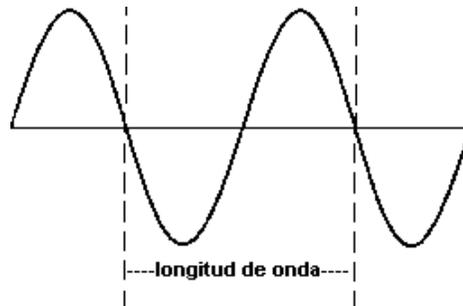
Se denomina radio enlace de microonda a cualquier transmisión efectuada entre dos puntos distantes, usando las ondas electromagnéticas como medio de transmisión a través del espacio libre (en este caso el aire), y cuyo rango de frecuencias oscila entre 1 a 50 Giga Hertz.

Este sistema está conformado en forma resumida por un par de radios transmisor/receptor con sus respectivas antenas alineadas una con la otra, con el objetivo de establecer un sistema de comunicación confiable de bajas pérdidas.

3.1. Espectro de radio frecuencia

Antes de empezar con las características de cada banda de frecuencias, conviene aclarar, que se denomina espectro radioeléctrico a la porción del espectro electromagnético ocupado por las ondas de radio, en este caso, las usadas para telecomunicaciones. El espectro electromagnético esta compuesto por las ondas de radio, las infrarrojas, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamas, todas estas son formas de energía similares, pero se diferencian en la frecuencia y la longitud de su onda (figura 6).

Figura 6. **Longitud de onda**



Fuente: <http://arieldx.tripod.com/manualdx/bandas/bandas.htm>. Consulta: 2 de mayo de 2008.

En telecomunicaciones, se usan los siguientes múltiplos de esta medida para las frecuencias de radio:

Tabla III. **Múltiplos de medidas**

Múltiplo	Abreviatura	Hertz	también denominado:
Kilo-Hertz	KHz	1,000Hz	Kilociclos (Kc/s)
Mega-Hertz	MHz	1,000KHz	Megaciclos (Mc/s)
Giga-Hertz	GHz	1,000MHz	Gigaciclos (Gc/s)

Fuente: elaboración propia.

La longitud de la onda, se obtiene de dividir la velocidad de la luz entre la frecuencia en Hertz.

$$\lambda = c/f \quad (3)$$

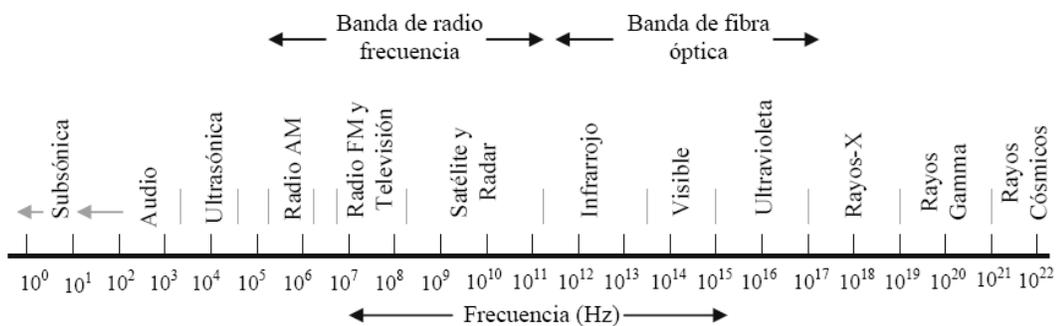
Donde:

λ = longitud de onda [metros]

C = velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

f = frecuencia [Hertz] o [1/s]

Figura 7. Espectro electromagnético



Fuente: ALVARADO SÁNCHEZ, J. A. 2005. *Estudio de las principales técnicas de modulación para el canal de radio.* p. 7.

Tabla IV. Espectro de radio frecuencia

Banda	Banda	Longitud de Onda	Frecuencia	Características	Uso Típico
VLF	Very low Frecuencias Frecuencias Muy Bajas	30,000 - 10,000mt.	10KHz a 30KHz	Propagación por onda de tierra, atenuación débil. Características estables.	Enlaces de radio a gran distancia
LF	Low Frecuencias Frecuencias Bajas	10,000 - 1,000mt.	30KHz - 300KHz	Similar a la anterior, pero de características menos estables.	Enlaces de radio a gran distancia, ayuda a la navegación aérea y marítima.
MF	Medium Frecuencias Frecuencias Medias	1,000 - 100mt.	300KHz - 3MHz	Similar a la precedente pero con una absorción elevada durante el día. Prevalece propagación ionosférica durante la noche.	Radiodifusión

Continuación de la tabla IV.

HF	High Frecuencias Frecuencias Altas	100 - 10mt.	3MHz - 30MHz	Prevalece propagación ionosférica con fuertes variaciones estacionales y en las diferentes horas del día y de la noche.	Comunicaciones de todo tipo a media y larga distancia.
VHF	Very High Frecuencias Frecuencias Muy Altas	10 - 1mts.	30MHz - 300MHz	Prevalece propagación directa, ocasionalmente propagación ionosférica o Troposférica.	Enlaces de radio a corta distancia, televisión, frecuencia modulada.
UHF	Ultra High frecuencias Frecuencias Ultra Altas	1 - 10cm.	300MHz - 3MHz	Solamente propagación directa, posibilidad de enlaces por reflexión o a través de satélites artificiales.	Enlaces de radio, ayuda a la navegación aérea, radar, televisión y telefonía celular.
SHF	Super High Frecuencias Frecuencias Superaltas	10 - 1cm.	3GHz - 30GHz	Solamente propagación directa, posibilidad de enlaces por reflexión o a través de satélites artificiales.	Radar, microondas terrestres y satelitales.
EHF	Extra High Frecuencias Frecuencias Extra-Altas	1cm. - 1mm.	30GHz - 300GHz	Solamente propagación directa, posibilidad de enlaces por reflexión o a través de satélites artificiales.	Radar, microondas terrestres y satelitales.
EHF	Extra High Frecuencias Frecuencias Extra-Altas	1 - 0.1mm.	300GHz - 3,000GHz	Solamente propagación directa, posibilidad de enlaces por reflexión o a través de satélites artificiales.	Radar, microondas terrestres y satelitales.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Conceptos básicos de microondas

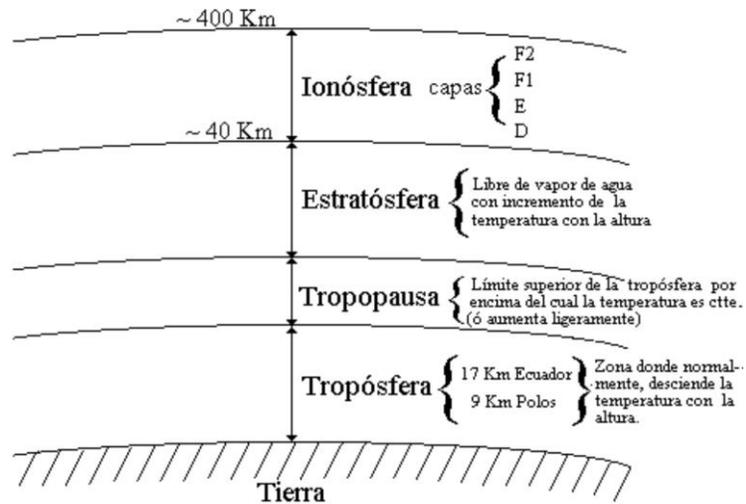
Para poder comprender la transmisión de información por medio de un radio enlace de microondas, se debe conocer el concepto de onda electromagnética, en forma resumida una onda electromagnética, se produce aplicando una corriente alterna de radiofrecuencia a una antena. La antena es un conductor eléctrico de características especiales, que debido a la acción de la señal aplicada, genera campos magnéticos y eléctricos variables a su alrededor, produciendo la señal de radio frecuencia en forma de ondas electromagnéticas.

Para hacer posible la transmisión de información, se emplean dos señales, la señal portadora y la moduladora, la señal portadora se encarga de fijar la frecuencia de transmisión y la señal moduladora, es en si la información que se quiere transmitir, que a su vez se encarga de modificar la señal portadora en amplitud, frecuencia, fase o una combinación de ellas, al proceso de modificar la señal portadora con la moduladora se le denomina modulación.

El radio enlace establece un concepto de comunicación del tipo *full-dúplex*, de donde se deben transmitir dos portadoras moduladas: una para la transmisión y otra para la recepción. Al par de frecuencias asignadas para la transmisión y recepción de las señales se le denomina radio-canal.

Idealmente las transmisiones se hacen a través del espacio libre (vacío), pero en la realidad el radio-enlace de microondas terrestre esta inmerso dentro de las diversas capas de la atmósfera y la tierra. En la figura 8, se muestran las diversas zonas de la atmósfera.

Figura 8. Zonas de la atmósfera

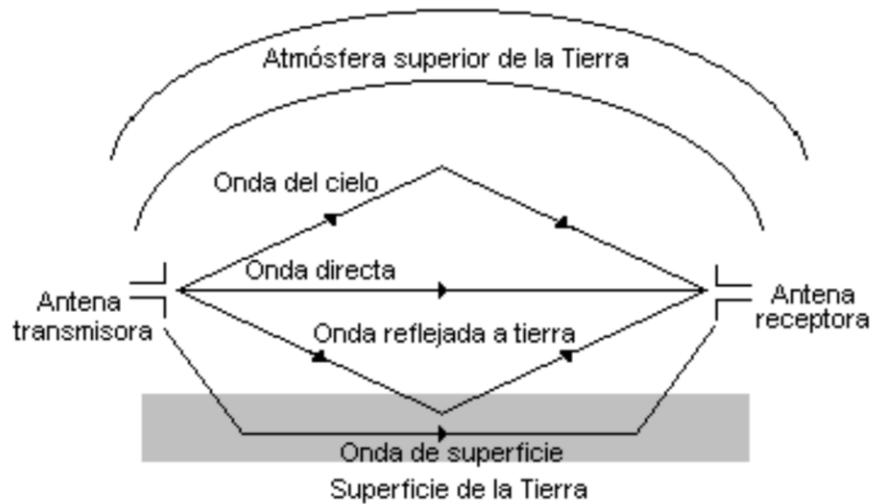


Fuente: <http://www.geocities.ws/abianchi04/textoradioenlaces/cap1.pdf>. Consulta: 20 de julio de 2008.

Existen 3 modos de propagación de las ondas electromagnéticas:

- Propagación por onda terrestre
 - Onda superficial u onda de tierra
 - Onda espacial
- Propagación por onda troposférica dispersa
- Propagación por onda de cielo u onda ionosférica

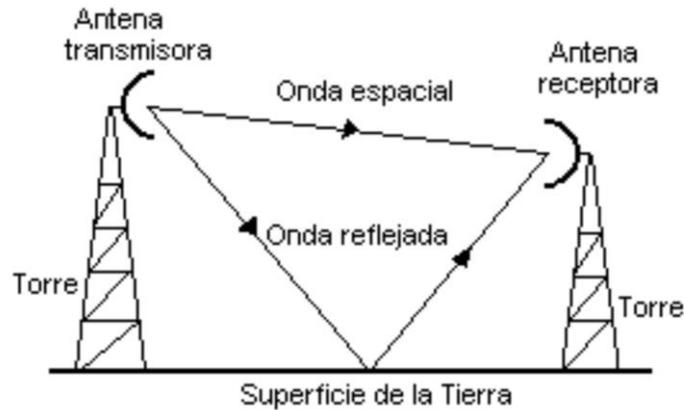
Figura 9. **Modos normales de la propagación de ondas**



Fuente: VILA BURGUETE, Carlos Alberto. *Simulación de Zonas de Fresnel para Enlaces de Microondas Terrestres*. p.13.

Los radio enlaces de microondas se encuentran en el rango de la onda espacial que se compone por la onda directa, el cual viaja esencialmente en línea recta entre la antena transmisora y la receptora, por lo que se le llama transmisión de línea de vista (LOS, *Line Of Sight*) o de visión directa, lo que limita su alcance debido a la curvatura de la tierra, y la onda reflejada, cuyo efecto de concurrir al punto de recepción conjuntamente con la onda directa, puede ser aditivo o substractivo, dependiendo del camino que recorra la onda reflejada, de su polarización, de las características de la superficie en el punto de reflexión.

Figura 10. **Propagación de ondas espaciales**



Fuente: VILA BURGUETE, Carlos Alberto. *Simulación de Zonas de Fresnel para Enlaces de Microondas Terrestres*. p.15.

La figura 10 ilustra un típico radio enlace de microondas, el rango de frecuencias usadas en este tipo son las HF, VHF, UHF y SHF.

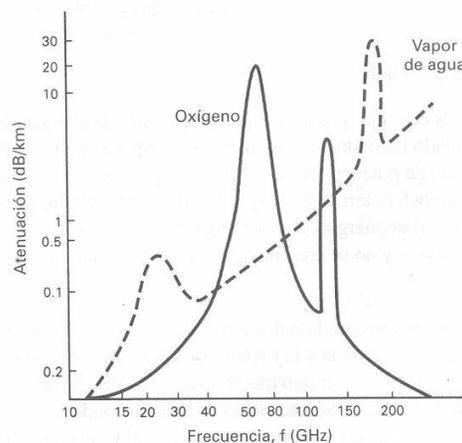
Cualquiera que sea la magnitud del sistema de microondas, para un correcto funcionamiento es necesario que el trayecto entre enlace tenga una altura libre y adecuada para la propagación en toda época climática del año, tomando en cuenta las variaciones de las condiciones atmosféricas de la región.

Una de las atenuaciones de la señal es la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire, ya que el aire no está vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas, causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas.

La medida en que una onda es absorbida en la atmósfera por sus distintas partículas, depende de su frecuencia, y es relativamente insignificante a menos de unos 10 gigahertz. Así también la absorción de una onda, depende del medio en el que se propague. Las pérdidas por absorción no dependen de la distancia a la fuente de radiación, sino más bien a la distancia total que la onda, se propaga a través de la atmósfera, es decir, cuando la onda se propaga a través de un medio homogéneo y cuyas propiedades son uniformes, las pérdidas por absorción en el primer kilómetro de propagación, son las mismas que en el último kilómetro.

En caso de contar con lluvias intensas y neblina densa, las ondas electromagnéticas tienden a ser absorbidas en mayor proporción que cuando se encuentran en una atmósfera normal. En la figura 11, se tiene la absorción en decibeles por kilómetro de una onda electromagnética en frecuencias de los 10 a 200 gigahertz cuando se propaga en oxígeno y vapor de agua.

Figura 11. **Absorción en dB/km según frecuencia**



Fuente: VILA BURGUETE, Carlos Alberto. *Simulación de Zonas de Fresnel para Enlaces de Microondas Terrestres*. p.12.

3.2.1. Zona de fresnel

La zona de fresnel es una zona de despeje adicional, que se debe tener en consideración en un enlace microonda punto a punto, además de la visibilidad directa entre las dos antenas. Este factor deriva de la teoría de ondas electromagnéticas, respecto de la expansión de las mismas al viajar en el espacio libre. Esta expansión resulta en reflexiones y cambios de fase al pasar sobre un obstáculo. El resultado es un aumento o disminución en el nivel de intensidad de la señal recibida.

Para poder recuperar la información transmitida, como mínimo se debe recuperar el 60 por ciento de la primera zona de fresnel. Para establecer las zonas de fresnel, primero se debe determinar la línea vista, que en términos simples es una línea recta entre la antena transmisora y la receptora. Ahora la zona que rodea el LOS son las zonas de fresnel.

La fórmula genérica de cálculo de las zonas de fresnel, se muestran en la siguiente expresión:

$$R_{fn} = 548 * \sqrt{\left(\left(n * d1 * d2 \right) / \left(D * f \right) \right)} \quad (4)$$

Donde:

R_{fn} es el radio de la enésima zona de fresnel [m].

$d1$ es la distancia desde el transmisor al objeto que obstruye en [km].

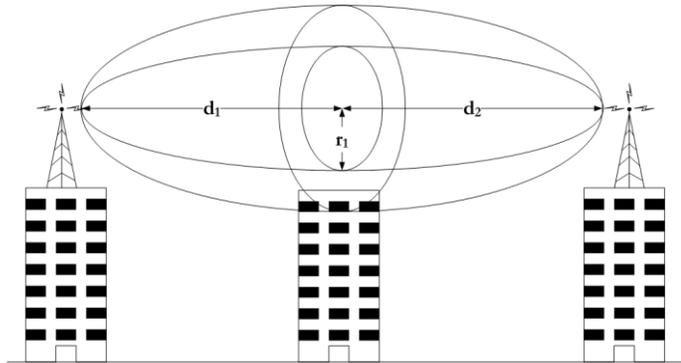
$d2$ es la distancia desde el objeto que obstruye al receptor en [km].

D es la distancia total del enlace en [km].

f es la frecuencia en [MHz].

En la figura 12, se muestra un diagrama con la primera zona de fresnel.

Figura 12. **Primera zona de fresnel**



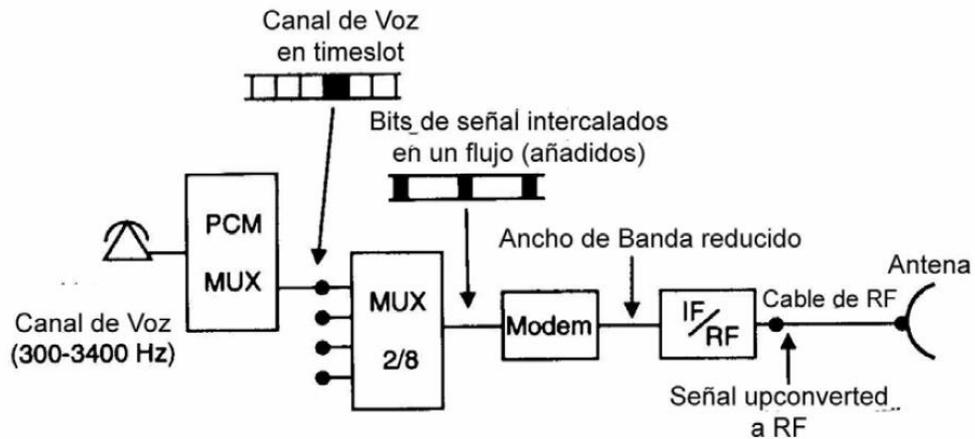
Fuente: BUETRICH, Sebastián. *Cálculo de radioenlace*. p.10.

3.3. Estructura de un radio enlace

La estructura básica de un radio enlace esta formada por las siguientes capas: muestreo: se encarga de tomar pequeñas muestras de la información (a esta información se le llama en banda base). Cuantización: se ocupa de cuantificar el valor de la muestra, codificación: se encarga de que cada muestra sea codificada, modulación: se encarga de modificar la frecuencia portadora (Radio Frecuencia, RF) con base en la información codificada, la modulación puede ser de forma directa e indirecta, la forma directa, es cuando la señal es modificada directamente según la información en banda base y la indirecta, es cuando existe una traslación de la banda base a una frecuencia intermedia (FI) para convertirla a RF.

Amplificadores de RF: se encargan de amplificar la señal de radio frecuencia, cables de RF: se encargan de transmitir la señal de RF desde el amplificador de RF hasta la entrada de la antena, y la antena se encarga de transformar la señal de RF en ondas electromagnéticas.

Figura 13. Estructura de un radio enlace



Fuente: <http://www.diagramasde.com/diagramas/otros2>. Consulta: 14 agosto de 2008.

Además de la estación transmisora y receptora existen las estaciones repetidoras y las nodales, donde se demodula la señal bajándose a banda base y en ocasiones se extraen o se insertan canales.

En cuanto a los repetidores, se les puede clasificar en activos o pasivos; los activos son aquellos que recibe la señal en la frecuencia portadora y se baja a una frecuencia intermedia (FI) para amplificarla y retransmitirla en la frecuencia de salida sin haber demodulación y los pasivos se comportan como espejos que reflejan la señal y se les puede dividir en pasivos convencionales, que son una pantalla reflectora y los pasivos *back-back*, que están constituidos por dos antenas espalda a espalda.

3.4. Planificación del radio enlace

En la planificación del enlace, se hacen los cálculos de las pérdidas y ganancias que sufre la señal en toda la trayectoria, con el objetivo de determinar las ganancias de los componentes para evitar la pérdida o desvanecimiento de la señal.

3.4.1. Cálculo del enlace

En un sistema de comunicaciones lo ideal es que la señal enviada desde el transmisor hasta el receptor tenga un nivel aceptable después de sufrir todas las pérdidas a las que estará sometido. Por suerte, no todas son pérdidas, puesto que las antenas tienen la función de actuar como amplificadores.

Por lo tanto, para saber si una instalación es viable, se debe realizar el cálculo del enlace, el que consiste en tomar la potencia de transmisión en términos de ganancia absoluta, sumarle las ganancias, restarle las pérdidas y determinar si el resultado es suficiente para sensibilizar al receptor.

3.4.1.1. Pérdidas en la alimentación

El alimentador se comporta como un atenuador con pérdida específica (L_a), conocida en función de la frecuencia que se usará en la transmisión y del tipo de alimentador.

Esta unidad interconecta la unidad de radio base (RBU- Radio Base Unit) con el radiante. Estos acoples tienen una pérdida cuya variable puede desprejarse y trabajar con pérdidas por acople tabulado, que incluye las pérdidas en el par de acoples del alimentador, uno en la RBU y el otro en el

lado del radiante. Finalmente en el alimentador la señal puede descomponerse en un conjunto de modos y frecuencias que se pueden ver como una pérdida por diversidad.

Como se ve en la tabla V, las pérdidas en el alimentador se tabulan en pérdidas cada 100 metros.

Tabla V. **Pérdidas en el alimentador**

Alimentador	Banda de operación GHz	Atenuación específica dB/100m	Perdida por diversidad dB	Perdida por par de acople dB
Coaxial	0,9	3,00	2	1,2
	0,9 – 1,5	4,80		
	1,5 – 1,9	5,00		
	1,9 – 2,2	5,40		
	2,2 – 2,4	5,80		
Guía de Onda	2,4 – 3,1	1,40	4	0,6
	3,1 – 4,4	2,10		
	4,4 – 6,2	3,60		

Fuente: MOROCHO, Marco y LUDENÑA, Patricia. *Planificación de radioenlaces con base en topografía digital*. p.2.

3.4.1.2. **Pérdidas de trayectoria**

Cuando la señal es enviada al espacio, esta sufre una atenuación en el medio hasta alcanzar el receptor en el destino. Las pérdidas que se producen en este tramo, están en función de la frecuencia f (Hz) y la distancia D (m). Relacionada con la velocidad de la luz en el vacío c (m/s), para condiciones ideales se considera que la velocidad viaja de modo rectilíneo y con

condiciones ideales en el medio, por tal razón, recibe el nombre de pérdida de trayectoria de espacio libre L_e , y queda expresada por:

$$L_e = \left(\frac{4\pi f D}{c} \right)^2 \quad (5)$$

Si se aplica la regla de la ganancia logarítmica en decibeles, se obtiene:

$$L_e \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{4\pi f D}{c} \right) \quad (6)$$

Al normalizar las unidades en Giga Hertz para la frecuencia y en kilómetro para la distancia, se tendrá la expresión:

$$L_e \text{ (dB)} = 92,44 + 20 \log f \text{ (GHz)} + 20 \log D \text{ (Km)} \quad (7)$$

3.4.1.3. Pérdidas por desvanecimiento

En condiciones reales, la propagación se produce en un espacio no ideal y mediante una trayectoria no libre de interferencias, además de la atenuación vista, se produce un efecto llamado *fading* o desvanecimiento que depende de las condiciones puntuales a las que esta sometida cada transmisión, por tanto se mide como una atenuación adicional, pudiendo ser prevenida si se asocia un margen para este. De allí que se llama *fade margin*. Factores como el tipo de suelo, el tipo de clima y el entorno que rodea la trayectoria y que produce diversidad modal que tiene una influencia directa en el cálculo del desvanecimiento.

También interviene el objetivo o factor de confiabilidad (R) que el enlace requiere, como el error de transmisión en un período de tiempo específico.

De tal forma que:

$$L_d(\text{dB}) = 30 \log D + \log 10 (6ABf) - 70 - 10 \log (1-R) \quad (8)$$

Tabla VI. **Valores del margen de desvanecimiento**

Termino	Significado	Factores
30 log D	La diversidad nodal	D Distancia visual entre antenas en Km
10 log (6 AB f)	El entorno de propagación	A Factor de rugosidad B Factor Climático F Frecuencia
10 log (1 – R)	El objetivo de confiabilidad	R Confiabilidad La confiabilidad esperada a convenida, como un decimal

Fuente: MOROCHO, Marco y LUDENÑA, Patricia. *Planificación de radioenlaces con base en topografía digital*. p. 2.

Factor de rugosidad (A):

- 4 = espejo de agua, ríos muy anchos.
- 3 = sembrados densos, pastizales, arenales.
- 2 = bosques (la propagación va por encima).
- 1 = terreno normal.
- 0,25 = terreno rocoso disparejo.

Factor climatológico (B):

- 1 = áreas marinas o con condiciones peores.
- 0,5 = áreas tropicales calientes y húmedas.
- 0,25 = área mediterráneas de clima normal.
- 0,125 = áreas montañosas de clima seco y fresco.

3.4.1.4. Ganancias

Las ganancias en decibeles provienen de las antenas y se determina de acuerdo con la frecuencia f (GHz) de transmisión y al tipo de antena utilizada, sea esta sólida de panel y parabólica o de grilla, con dimensiones en metros.

La ganancia directa de una antena parabólica para transmisiones punto a punto, se indica a continuación en la tabla VII.

Tabla VII. **Valores de ganancia en dB de antenas parabólicas sólidas**

Diámetro		Frecuencias de Operación				
(m)	(pies)	1,9 – 2,3	2,3 – 2,5	2,5 – 2,7	3,4 – 4,2	4,0 – 6,4
1,2	4	24,2	25	25,9		
1,8	6	28,1	28,6	29,4	33,1	36,4
2,4	8	30,6	31,3	31,9	35,4	38,9
3,0	10	32,5	33,2	33,9	37,4	40,8
3,7	12	34,1	34,8	35,5	39	42,44
4,6	15				40,9	44,6

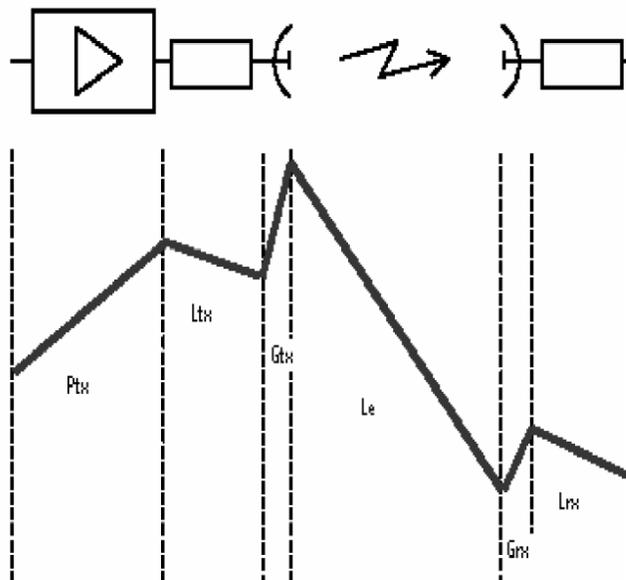
Fuente: MOROCHO, Marco y LUDENÑA, Patricia. *Planificación de radioenlaces con base en topografía digital*. p. 2.

3.4.1.5. Cálculo de la ecuación de enlace

Ya en el destino, el receptor tiene un margen de sensibilidad (S_r) establecida, como la máxima potencia (P_r) que puede llegar a la entrada del receptor para tener un nivel aceptable de la señal.

El cálculo del enlace, permite ver si la señal emitida con una potencia (P_{tx}) en el transmisor RBU-alimentador, luego de todas las pérdidas a las que está sujeto y de haber sido amplificada en las antenas, es aún capaz de sensibilizar el receptor.

Figura 14. **Ganancia del sistema**



Fuente: MOROCHO, Marco y LUDENÑA, Patricia. *Planificación de radioenlaces con base en topografía digital*. p. 3.

Al conjunto de pérdidas y ganancias de las antenas en la transmisión (Gatx) y recepción (Garx), que tendrá toda la instalación se llamará ganancia del sistema GS y se calculará como la máxima potencia que tendrá el sistema:

$$GS \text{ (dB)} = Lat + Le + Ld - Garx - Gatx \quad (9)$$

Estableciendo la condición de sensibilidad:

$$Pr \text{ (dB)} = Ptx(\text{dB}) - Gs(\text{dB}) > Sr(\text{dB}) \quad (10)$$

De este modo se asegurará que el receptor tenga una señal de nivel aceptable, con estos cálculos se puede determinar si el radio enlace, es capaz de cumplir con el objetivo de sensibilizar al receptor con la potencia necesaria para poder demodular la información transmitida.

3.4.2. Selección de la mejor ruta

Para la selección de la mejor ruta, se debe hacer un estudio topográfico, como primer paso se deben localizar las centrales o celdas más cercanas a la celda que se quiere interconectar, calculando la distancia de separación entre ellas, como segundo paso, determinar si existe línea vista auxiliándose de mapas de nivel topográfico o software para cálculo de radio enlaces, en el tercer paso hacer los cálculos de las pérdidas y ganancias del sistema a partir de las ecuaciones de la sección 3.4.1, para que al final se proporcione la mejor ruta acorde a la necesidad.

3.4.2.1. Topografía

La topografía es el estudio de las representaciones gráficas de las superficies de la tierra, de donde se determinan los mejores puntos georeferenciados obtenidos de mediciones a través de GPSs, mapas de elevaciones del terreno, software y/o fotos satelitales, con ubicación precisa de información específica de la zona (elevaciones, poblados, hidrografía, tipo de vegetación). En este punto se hace uso de la planificación del radio-enlace, donde el uso de topografía y climatología es muy importante a la hora de realizar los cálculos de propagación.

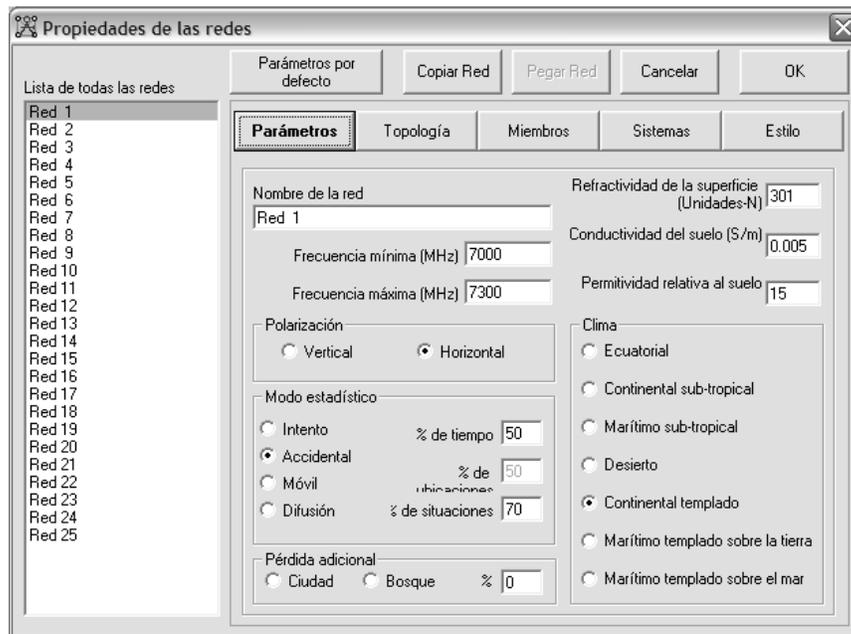
Cuando se emplea software para la predicción del patrón de radiación, perfil de la trayectoria y pérdidas del radio enlace, se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros, figuras 15 y 16:

- Determinar frecuencia de operación.
- Tipo de equipos a utilizar, potencia de transmisión y umbral de recepción.
- Pérdidas del cable.
- Identificar coordenadas de origen y destino.
- Tipo de antena y ganancia.
- Altura de las antenas.
- Tipo de clima donde se montara el radio enlace.

A partir del ingreso de los anteriores parámetros, el software se encarga de determinar si el enlace es factible haciendo los cálculos del nivel de potencia de recepción, adicionalmente muestra el perfil topográfico del enlace, tomando en cuenta el despeje de la primera zona de fresnel. Uno de estos programas de predicción, es radio mobile, es un software gratuito que se puede obtener en la dirección <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>. En la figura 17, se muestra el

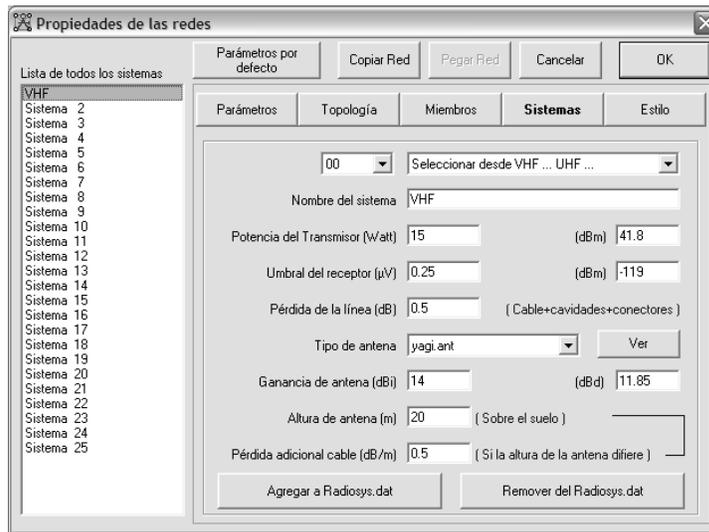
perfil de un radio-enlace desde la aldea Montufar, localizado en las coordenadas 14° 47' 53.8"N y 90° 38' 40.2"O y San Pedro Sacatepéquez en 14° 41' 12"N y 90° 38' 25"O.

Figura 15. **Parámetros de la red Montúfar – San Pedro Sacatepéquez**



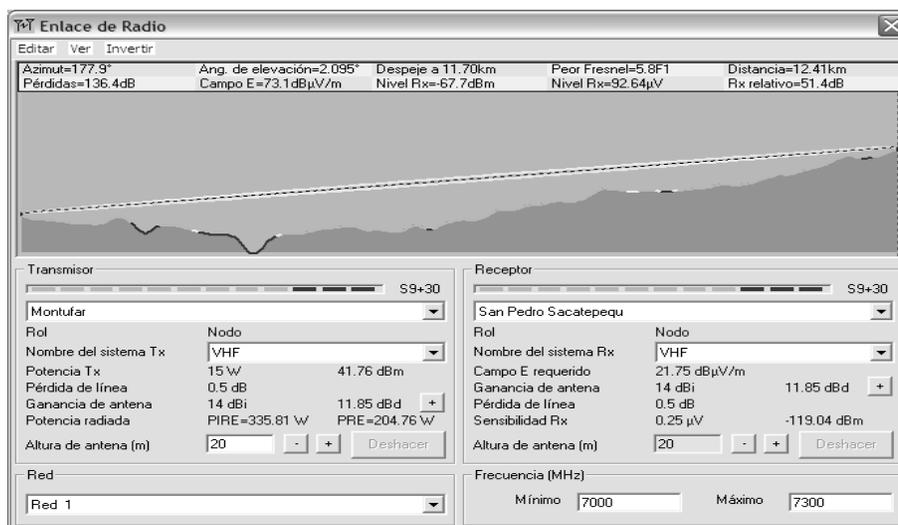
Fuente: Programa Radio Mobil.

Figura 16. **Parámetros del sistema (Tx, Rx, antena, ganancias y pérdidas)**



Fuente: Programa Radio Mobil.

Figura 17. **Perfil de radio enlace de microondas**

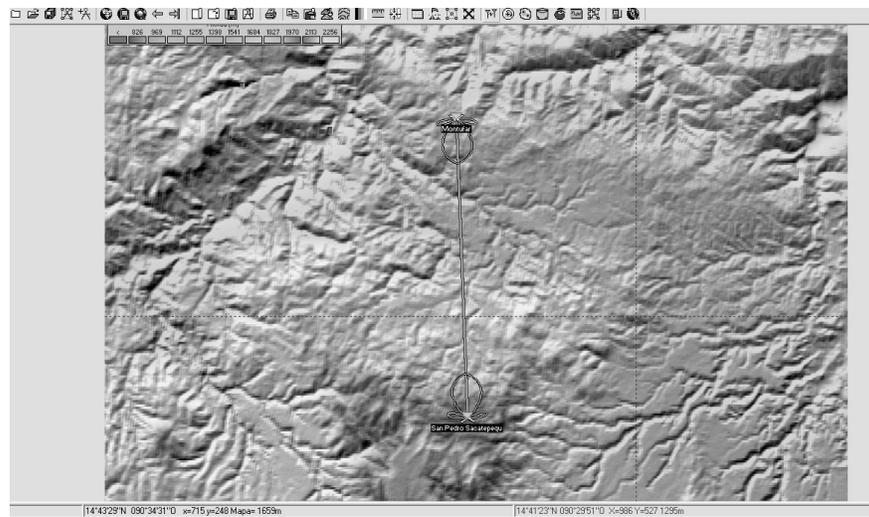


Fuente: Programa Radio Mobil.

Como se observa, el programa calcula la distancia entre antenas, pérdidas del enlace y el nivel de recepción en dBm y μV .

Según los parámetros ingresados, se observa que el enlace si es factible, si en algún caso el enlace no fuera posible debido a las pérdidas por desvanecimiento, frecuencia, distancia o cualquier otro parámetro que introduzca demasiada atenuación el programa, indicaría enlace fallado con una línea roja o amarilla según el nivel de recepción.

Figura 18. **Enlace de Montúfar a San Pedro Sacatepéquez**



Fuente: Programa Radio Mobil.

3.5. Costos

En este apartado, se tratarán los costos del equipo de un radio enlace de 8 mega hertz como ejemplo, adicionalmente se incluyen los precios de los equipos de 11, 15 y 18 mega hertz como referencia.

En la tabla VIII, se puede observar el costo de cada elemento del radio enlace, los principales elementos que conforman el radio enlace, son los módulos IDU (*Indoor Unit*), ODU (*Outdoor Unit*) y antena. En este caso el módulo IDU, se pueden emplear en las cuatro frecuencias expuestas.

Los módulos ODU varían según la frecuencia a usar en el radio enlace y se cotizan dos por sitio por ser un radio enlace 1+1, esto indica que el radio-enlace tiene respaldo o redundancia de un módulo ODU en el caso de que falle el principal, estas fallas son muy comunes en el caso de descargas atmosféricas sobre los equipos y antenas.

Otro elemento fundamental es la antena, que define parte de la ganancia en los cálculos de la sección 3.4.1.

Tabla VIII. Costos de radio enlaces de 8, 11, 15 y 18 MHz

Equipo de Microonda			(1+1), 16E1, 8 GHz HS Antenas 1.2m -					
Descripción	Unidad	Precio Unitario US\$	SITE 1		SITE 2		Cantidad Total	PRECIO DE VENTA TOTAL US\$
			Cantidad	Monto US\$	Cantidad	Monto US\$		
Radio PDH								
EQUIPO DE RADIO DIGITAL PDH								
ODU (Unidad Exterior)								
ODU (8GHz, 27dBm, 1+0, 17/34MB, 119MHz shift)	Unidad	1,673.00	2	3,346.00	2	3,346.00	4	6,692.00
ODU (11GHz, 1+0, 530MHz shift)	Unidad	1,673.00						
ODU (15GHz, 23dBm, 1+0, 420MHz shift)	Unidad	1,383.00						
ODU (18GHz, 23dBm, 1+0, 17/34MB, 1010MHz shift)	Unidad	1,383.00						
ODU (23GHz, 23dBm, 1+0, 17/34MB, 1008MHz shift)	Unidad	1,383.00						
1+1 HYB (8GHz, N-CONECTOR - PDR 84)	Juego	589.00	1	589.00	1	589.00	2	1,178.00
1+1 HYB (11GHz)	Juego	589.00						
1+1 HYB (15GHz)	Juego	307.00						
1+1 HYB (18GHz)	Juego	307.00						
POLE MOUNTING BRACKET PARA ODU 1+1 7/8 GHZ	Juego	99.00	2	198.00	2	198.00	4	396.00
ARRESTERS COAXIAL (N-type, TNC-type)	PIEZA	45.00	4	180.00	4	180.00	8	360.00
**** 1.1 Sub Total				4,313.00		4,313.00		8,626.00
IDU (Unidad Interior)								
IDU (1+1, 16 x 2MB, Bit rate free, with LAN)	Unidad	2,756.00	1	2,756.00	1	2,756.00	2	5,512.00
I/O Cable, Panel de distribución (16xE1)	Unidad	367.38	1	367.38	1	367.38	2	734.77
DC-DC Converter Unit (for +/-20 to +/-60V DC)	Unidad	917.00						
**** 1.2 Sub Total				3,123.38		3,123.38		6,246.77
** 1 Sub Total				7,436.38		7,436.38		14,872.77
SISTEMA AEREO								
ANTENAS PARABOLICAS, 7/8GHz								
ANTENAS (PDR84) (7/8GHz, DIA 1.2M, SIMPLE, High Performance)	Unidad	1,365.00	1	1,365.00	1	1,365.00	2	2,730.00
Strut adicional	Unidad	239.26	1	239.26	1	239.26	2	478.51
**** 2.1 Sub Total				1,604.26		1,604.26		3,208.51
ANTENAS PARABOLICAS, 11GHz								
ANTENAS (NC3) (11GHz, DIA 1.2M, SIMPLE, High Performance)	Unidad	1,091.00						
Strut adicional	Unidad	239.26						
**** 2.2 Sub Total								
ANTENAS PARABOLICAS, 15GHz								
ANTENAS (NC3) (15GHz, DIA 1.2M, SIMPLE, High Performance)	Unidad	1,091.00						
Strut adicional	Unidad	239.26						
**** 2.3 Sub Total								
ANTENAS PARABOLICAS, 18GHz								
ANTENAS (NC3) (18GHz, DIA 0.3M, SIMPLE, High Performance)	Unidad	236.00						
ANTENAS (NC3) (18GHz, DIA 0.6M, SIMPLE, High Performance)	Unidad	327.00						
ANTENAS (NC3) (18GHz, DIA 1.2M, SIMPLE, High Performance)	Unidad	1,091.00						
Strut adicional	Unidad	239.26						
**** 2.4 Sub Total								
CABLE COAXIAL Y CONECTORES PARA RADIO								
CABLE COAXIAL IF (ODU-IDU)	METRO	1.22	140	171.28	140	171.28	280	342.55
IL TYPE CONECTOR (LADO DE IDU)	JUEGO	33.00	2	66.00	2	66.00	4	132.00
ITYPE CONECTOR (LADO DE ODU)	JUEGO	20.00	2	40.00	2	40.00	4	80.00
RF CABLE E/W CONNECTORS(FOR 8GHz, 1.5M, N-N CONNECTORS)	PIEZA	30.00	2	60.00	2	60.00	4	120.00
TRANSICION N--PDR84	PIEZA	282.59						
GROUNDING KIT	PIEZA	9.30	6	55.79	6	55.79	12	111.57
**** 2.5 Sub Total				393.07		393.07		786.12
** 2 Sub Total				1,997.33		1,997.33		3,994.63
***** TOTAL *****				9,433.71		9,433.71		18,867.40
TOTAL POR EQUIPO DE ENLACE				\$18,867.42				

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Potencia Tx (dBm) y umbrales de recepción (dB) de las frecuencias 6-8, 10-11, 13, 15, 18 y 23 GHz**

Frequency band	6-8GHz	10-11GHz	13GHz	15GHz	18GHz	23GHz
Range(GHz)	5.925-8.5	10.15-11.7	12.75-13.25	14.2-15.35	17.7-19.7	21.2-23.6
Tx power(dBm)						
128QAM	25	21	21	21	19	19
32QAM						
16QAM	26	21.5	22.5	22.5	22	22
4PSK	29	25	25	23	24	24
Receiver threshold(dBm) at 10⁻⁶ BER						
156M/128Q	-69.5	-68.5	-68.5	-69.0	-69.0	-69.0
100M/32Q	-75.5	-74.5	-74.5	-75.0	-75.0	-75.0
80M/16Q	-77.0	-76.0	-76.0	-76.5	-76.5	-76.5
40M/16Q	-80.0	-79.0	-79.0	-79.5	-79.5	-79.5
20M/16Q	-83.0	-82.0	-82.0	-82.5	-82.5	-82.5
10M/16Q	-86.0	-85.0	-85.0	-85.5	-85.5	-85.5
40M/4PSK	-84.0	-83.0	-83.0	-83.5	-83.5	-83.5
20M/4PSK	-87.0	-86.0	-86.0	-86.5	-86.5	-86.5
10M/4PSK	-90.0	-89.0	-89.0	-89.5	-89.5	-89.5

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente a los gastos de los equipos, se deben tomar en cuenta los gastos de instalación y supervisión de cada sitio. El precio promedio de la instalación de un radio enlace, es de \$2 700,00 y el de la supervisión de cada sitio para el acondicionamiento del equipo, es de \$750,00.

Precio total del proyecto:

	Cantidad	Precio
Equipo del radio enlace	2	\$18 867,42
Supervision (<i>site survey</i>)	2	\$1 500,00
Instalación	1	\$2 700,00
Total del enlace		\$23 067,42

3.6. Ventajas y desventajas del radio-enlace

Como se pudo observar en la sección 3.4.1, donde se presentan las ecuaciones matemáticas para los cálculos del enlace, se observa que las mayores pérdidas son debido a la distancia, frecuencia y a las variaciones climáticas.

Estos factores son las limitantes del radio enlace y son las que determinan si es factible física y económicamente el empleo de un enlace de microondas para la transmisión de la información de una celda GSM en la última milla.

En la sección de costos, se observó que los precios de los equipos, expuestos son similares no importando la frecuencia en la que trabaje y que su promedio en el mercado oscila entre los \$18 900. La determinación del empleo de la microonda, depende de que se cumpla la inecuación 10, tomando como referencia los valores umbrales de recepción mostrados en la tabla IX.

A continuación se exponen las ventajas de los radio enlaces en comparación con los sistemas de línea física:

- Pueden superarse las irregularidades del terreno.
- Instalación más rápida y sencilla.
- Volumen de inversión inicialmente más reducido.
- Mantenimiento más económico y rápido.
- La regulación solo debe aplicarse al equipo, puesto que las características del medio de transmisión son esencialmente constantes en la anchura de banda de trabajo.

- Puede aumentarse la separación entre celdas haciendo uso de estaciones repetidoras e incrementando la altura de las torres.

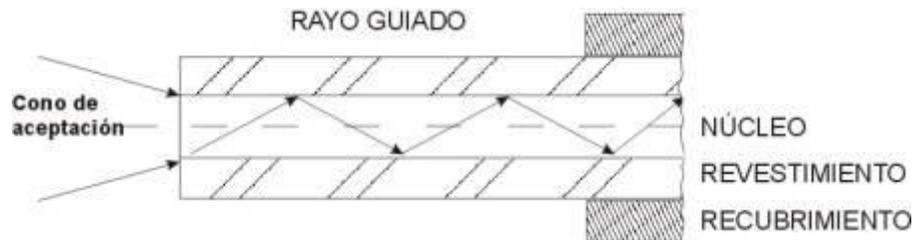
Por otra parte, estos sistemas presentan desventajas al compararlos con los de línea física:

- Diseño restringido a tramos con visibilidad directa para los enlaces convencionales.
- Este sistema de comunicación es muy susceptible a las condiciones atmosféricas de la región, debido a que las ondas son muy susceptibles al agua, que se puede presentar en forma de lluvia, nubes bajas, vapor y neblina. Las condiciones atmosféricas adversas puedan ocasionar desvanecimientos intensos y desviaciones del haz, lo que implica usar sistemas de diversidad con equipo auxiliar de conmutación incrementando los costos.
- Necesidad de acceso adecuado a las estaciones repetidoras en las que hay que disponer de energía y acondicionamiento para los equipos y servicio de mantenimiento. Sin embargo, se puede hacer uso de generadores eléctricos y baterías de celdas solares que incrementan el costo inicial pero se disminuye a largo plazo.

4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA FIBRA ÓPTICA

Una fibra óptica consiste en un filamento transparente cuyo diámetro interno está entre 8 y 600 micras, dependiendo del tipo de fibra óptica con un revestimiento exterior de cuarzo o plástico, más una cubierta protectora de material plástico. La función de la fibra óptica es transportar información en forma de haz de luz, incidente en un extremo de la fibra propagándose por su interior, sufriendo múltiples reflexiones y saliendo por el otro extremo, como se muestra en la figura 19. En una forma práctica, es un conducto de luz que se basa en la reflexión total interna.

Figura 19. **Fibra óptica**



Fuente: <http://platea.pntic.mec.es>. Consulta: 25 de julio de 2008.

En el espectro electromagnético, existen diferentes bandas ópticas, que se dividen de la siguiente forma:

- Ultravioleta: con longitudes de onda entre 0,6 y 380 nanómetros.
- Espectro visible: es la banda estrecha del espectro electromagnético, formada por las longitudes de onda a las que es sensible el ojo humano.

Corresponde al margen de longitudes de onda entre 350 y 750 nanómetros.

- Infrarrojo: con longitudes de onda entre 750 y 1 milímetro.

Los sistemas de comunicación óptica utilizan la parte de la banda infrarroja más cercana al espectro visible. La selección de la longitud de onda, se realiza teniendo en cuenta la disponibilidad de dispositivos adecuados (emisores y receptores) y fibras ópticas con bajas pérdidas.

4.1. Teoría de la fibra óptica

Los descubrimientos en el campo de la tecnología óptica, han hecho posible la transmisión de información mediante pulsos de luz. Un pulso de luz puede utilizarse para indicar un bit de valor 1, mientras que la ausencia de pulso indicará la existencia de un bit de valor 0. La luz visible tiene una frecuencia alrededor de 10^{14} mega hertz, por lo que el ancho de banda de un sistema de transmisión óptica presenta un potencial enorme.

Un sistema de transmisión óptica, consta de tres componentes: el medio de transmisión, la fuente de luz y el detector. El medio de transmisión se fabrica a base de una fibra ultra-delgada de vidrio llamada núcleo, recubierto por un revestimiento exterior con índice de refracción menor que el del núcleo. La fuente de luz puede ser un diodo LED, o un diodo láser, cualquiera de los dos, emite pulsos de luz cuando se le aplica una corriente eléctrica. El detector es un fotodiodo que genera un pulso eléctrico en el momento en el que recibe un rayo de luz.

Al colocar un LED o diodo láser en el extremo de una fibra óptica y un fotodiodo en el otro, se obtiene una transmisión de datos unidireccional que

acepta una señal eléctrica, la convierte y la transmite por pulsos de luz y, después, reconvierte la salida en una señal eléctrica en el extremo del receptor.

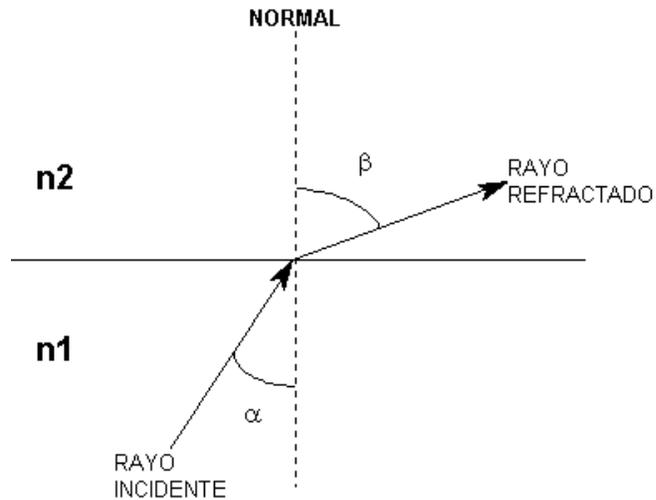
La fibra óptica es un medio físico diseñado para el transporte de señales luminosas, pero no se puede emplear para el transporte de señales eléctricas.

La luz no tiene la misma velocidad de propagación en cualquier medio, si no que su velocidad máxima ($c = 3 \times 10^8$ m/s) se consigue solamente en el vacío. En cualquier otro medio, la luz tiene una velocidad de propagación menor, determinándose el índice de refracción de cada medio, llamado índice de refracción (n) como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y su velocidad en dicho medio. Cuando un rayo de luz se transmite por un medio de índice de refracción n_1 e incide con un ángulo α sobre la superficie plana de otro medio con índice de refracción n_2 , el rayo se refracta en el nuevo medio con un ángulo β , cumpliéndose la ley de Snell.

$$n_1 * \text{sen } \alpha = n_2 * \text{sen } \beta \quad (11)$$

Si el rayo de luz pasa de un medio a otro con índices de refracción, tales que $n_1 > n_2$ ocurrirá, como se en muestra la figura 20, que el ángulo que forma la normal con el rayo refractado (β) será mayor que el ángulo que forma el rayo incidente (α) con la normal.

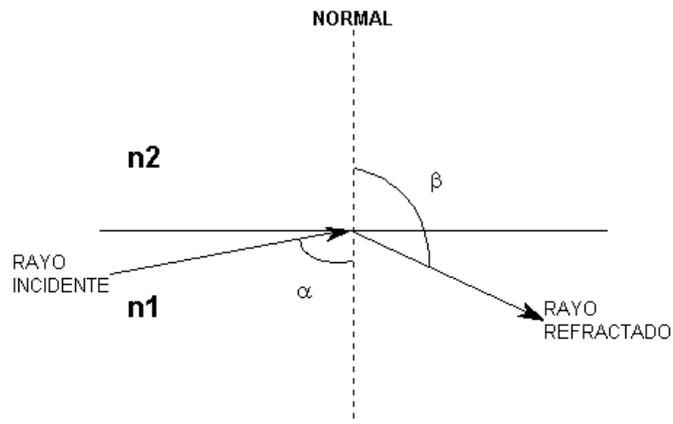
Figura 20. **Refracción entre dos materiales**



Fuente: <http://www.ctv.es/USERS/carles/PROYECTO/cap1/cap1.html>. Consulta: 14 de agosto de 2008.

Si se aumenta el ángulo de incidencia, llega un momento a partir del cual todos los rayos incidentes con un ángulo superior al ángulo crítico, no se refractan, sino que se vuelven a reflejar sobre el mismo medio como muestra la figura 21.

Figura 21. **Ángulo crítico**



Fuente: <http://www.ctv.es/USERS/carles/PROYECTO/cap1/cap1.html>. Consulta: 14 de agosto de 2008.

Esta propiedad física es la que se aprovecha para la transmisión de las señales luminosas a través de las fibras ópticas.

Todo rayo de luz que incida con un ángulo superior al ángulo crítico, se reflejará internamente, por lo tanto se puede utilizar fibras que transmitan simultáneamente rayos de información diferente, rebotando a distintos ángulos, a estas fibras, se les llaman multimodo y a las que solo transmiten un solo rayo monomodo. En la terminología técnica de fibra óptica, se emplea la palabra modo que denota los caminos que un haz de luz puede tomar dentro de la fibra óptica.

4.1.1. Fibra multimodo

Existen dos tipos para este modo, los cuales son multimodo-índice fijo y multimodo-índice gradual. El primer tipo es una fibra que tiene un ancho de

banda de 10 a 20 mega hertz y consiste de un núcleo de fibra rodeado por un revestimiento que tiene un índice de refracción de la luz muy bajo, la cual causa una atenuación aproximada de 10 decibeles por kilómetro. Este tipo de fibra es usado típicamente para distancias cortas menores de un kilómetro. Esta fibra viene en dos tamaños 62,5/125 micras.

Debido a que el diámetro exterior es de 1 milímetro, lo hace relativamente fácil de instalar y hacer empalmes. El segundo tipo índice gradual es un cable donde el índice de refracción cambia gradualmente, esto permite que la atenuación sea menor a 5 decibeles por kilómetro y pueda ser usada para distancias largas. El ancho de banda es de 200 a 1 000 mega hertz, el diámetro del cable es de 50/125 micras (el primer número es el diámetro del núcleo y el segundo es el diámetro del revestimiento).

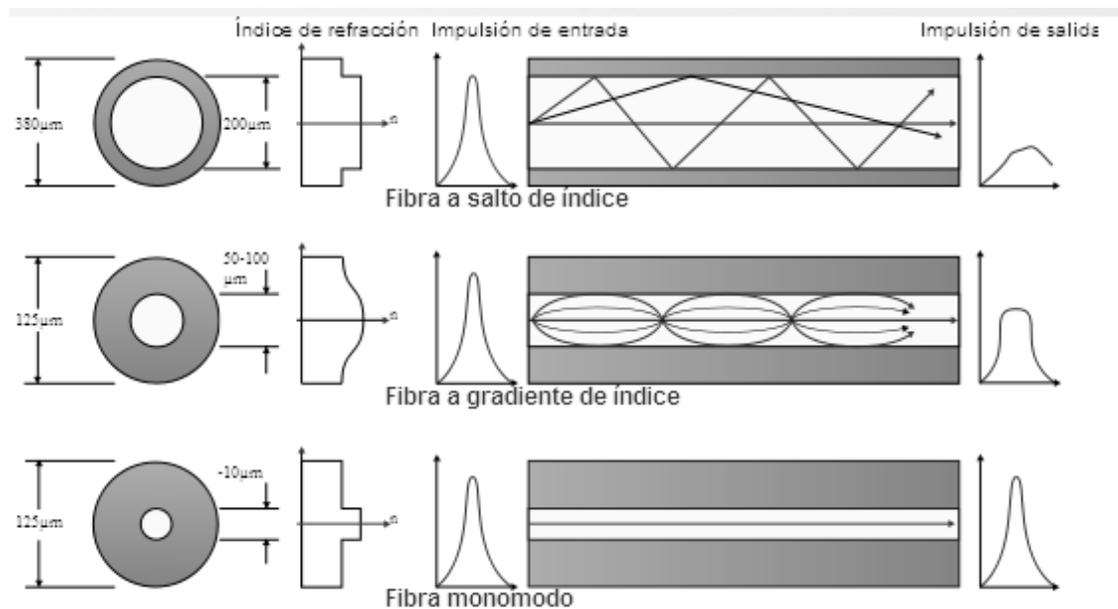
Los empalmes utilizados para conectar ambos extremos de las fibras, causan también una pérdida de la señal en el rango de 1 decibel. Así también los conectores o interfaces incurrir en pérdidas de 1 decibel o más. Los haces de luz (LED) son transmitidos en el orden de 150 Mbps. El láser en cambio transmite en el orden de Giga bit por segundo. Los LED son típicamente más confiables que el láser, pero el láser en cambio provee más energía a una mayor distancia. Debido a que el láser tiene una menor dispersión, son capaces de transmitir a velocidades muy altas en el modo de transmisión simple. Sin embargo, necesitan estar térmicamente estabilizados y recibir mantenimiento constante por personal especializado.

4.1.2. Fibra monomodo

Es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra, hasta un tamaño de 8,3 a 10

micrones, que sólo permite un modo de propagación. Su transmisión es paralela al eje de la fibra. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias de hasta 100 kilómetros máximo, mediante un láser de alta intensidad y transmitir elevadas tasas de información (decenas de giga bits por segundo).

Figura 22. Tipos de fibra



Fuente: <http://platea.pntic.mec.es>. Consulta: 28 de agosto de 2008.

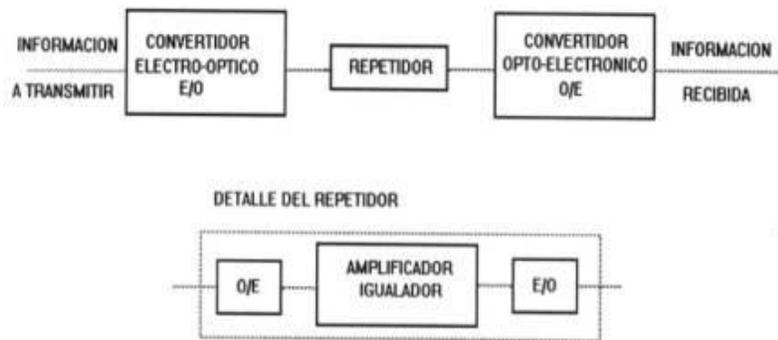
4.2. Estructura de un enlace de fibra óptica

Estos sistemas están compuestos por un transmisor, cuya misión es la de convertir la señal eléctrica en señal óptica susceptible, para ser enviada a través de una fibra óptica. En el extremo opuesto de la fibra óptica, se

encuentra el receptor, cuya misión es la de convertir la señal óptica en señal eléctrica nuevamente.

La señal en forma de luz que se propaga a través de la fibra óptica, se degrada por la atenuación y restricción de la anchura de banda de la fibra, en este caso es preciso regenerar la señal transmitida. El mejor método es tratar la señal en forma eléctrica. Por lo tanto, los conversores eléctricos ópticos y los ópticos eléctricos, son componentes indispensables en un repetidor óptico. En la figura 23, se muestra un esquema básico de la arquitectura de un enlace por medio de fibra óptica al igual que el de un repetidor.

Figura 23. **Esquema básico de un enlace de fibra óptica**



Fuente: <http://platea.pntic.mec.es>. Consulta: 28 de agosto de 2008.

4.2.1. Pérdidas en la fibra óptica

La atenuación sufrida por una señal luminosa (en función de la longitud de onda) en el interior de una fibra óptica, corresponde a la figura 24, donde se observa que a mayor longitud de onda menor la atenuación.

Figura 24. **Atenuación en la fibra óptica según longitud de onda**



Fuente: <http://platea.pntic.mec.es>. Consulta: 28 de agosto de 2008.

Actualmente se trabaja en las tres bandas de frecuencia marcadas en la figura 24, y que se conocen con el nombre de ventanas:

1^a ventana: 850 nm

2^a ventana 1 300 nm

3^a ventana 1 550 nm

- Atenuación: la transmisión de luz en una fibra óptica, no es 100 por ciento eficiente. La pérdida de luz en la transmisión, es llamada atenuación. Varios factores influyen, tales como la absorción por materiales dentro de la fibra, disipación de luz fuera del núcleo de la fibra y pérdidas de luz fuera del núcleo causado por factores ambientales.

La atenuación en una fibra es medida al comparar la potencia de salida con la potencia de entrada. La atenuación es medida en decibeles por unidad de longitud. Generalmente esta expresada en decibeles por kilómetro.

- **Dispersión:** es la distorsión de la señal, resultante de los distintos modos (simple y multimodo), debido a los diferentes tiempos de desplazamiento de una señal a través de la fibra. En un sistema modulado digitalmente, esto causa que el pulso recibido, se ensanche en el tiempo. No hay pérdida de potencia en la dispersión, pero se reduce la potencia pico de la señal. La dispersión aplica tanto a señales analógicas como digitales. La dispersión es normalmente especificada en nanosegundos por kilómetro.

La dispersión de una energía óptica cae en dos categorías: la dispersión modal y la dispersión espectral.

- **Dispersión modal:** la luz viaja en trayectorias diferentes para cada modo en una fibra. Cada ruta varía la longitud óptica de la fibra para cada modo. En un cable largo, el estiramiento y sumatoria de todos los modos de la fibra, tienen un efecto de longitud sobre el pulso óptico.
- **Dispersión espectral:** el índice refractivo es inversamente proporcional a la velocidad de la luz que viaja en un medio y su velocidad varía con respecto a su longitud de onda. Sin embargo, si dos rayos tienen diferentes longitudes de onda, son enviados simultáneamente sobre la misma trayectoria, estos arribarán ligeramente a diferentes tiempos. Esto causa los mismos efectos de la dispersión modal, ensanchando el pulso

óptico. La dispersión modal puede ser minimizada reduciendo el ancho del espectro de la fuente óptica.

4.2.2. Cálculo del enlace con fibra óptica

Para una correcta planificación de la instalación de fibras ópticas es necesario considerar la atenuación total del enlace. Para el cálculo de atenuación de enlace, se consideran 2 métodos:

- Cálculo del cable de fibra óptica.
- Cálculo del margen de enlace con cable de fibra óptica seleccionado.

4.2.2.1. Cálculo del cable

La atenuación total del cable, considerando longitud total del tramo más reservas, conectores, empalmes y pérdidas de los conectores y de los empalmes, se expresa con la siguiente fórmula:

$$a_t = La_L + n_e a_e + n_c a_c + a_r L \quad (12)$$

Donde:

L = longitud del cable en km

a_L = coeficiente de atenuación en dB/km

n_e = número de empalmes

a_e = atenuación por empalme

n_c = número de conectores

a_c = atenuación por conector

a_r = reserva de atenuación en dB/km

La reserva se considera para empalmes futuros y reparaciones. La magnitud de la reserva depende de la importancia del enlace y particularidades de la instalación, se adopta valores entre 0,1 y 0,6 decibeles por kilómetro.

Las pérdidas en los empalmes se encuentran por debajo de 0,1 decibeles por kilómetro y no superan 0,5 decibeles por kilómetro.

El enlace será proyectado para un margen de potencia igual a la máxima atenuación antes de ser necesario un repetidor.

$$P_M = P_t - P_u \quad (13)$$

Donde:

P_M = margen de potencia en dB (máxima atenuación permisible).

P_t = potencia del transmisor en dB.

P_u = potencia de umbral en dB (dependiente de la sensibilidad del receptor).

La potencia de salida del transmisor, es el promedio de la potencia óptica de salida del equipo generador de luz, empleando un patrón estándar de datos de prueba.

El umbral de sensibilidad del receptor para una tasa de error de bit (BER), es la mínima cantidad de potencia óptica necesaria para que el equipo óptico receptor obtenga el BER deseado dentro del sistema digital. En los sistemas analógicos, es la mínima cantidad de potencia de luz necesaria para que el equipo óptico obtenga el nivel de señal a ruido (S/N) deseado.

Por lo tanto de la expresión de:

$$a_t = P_M \quad (14)$$

$$a_L = \frac{P_M - n_e a_e - n_c a_c + a_r L}{L} \quad (15)$$

Donde:

a_L Fija la máxima atenuación por km para el cable a ser seleccionado.

4.2.2.2. Cálculo del margen

Tomando en consideración que ya se tiene seleccionado el tipo de fibra a usar, este cálculo indicará el margen de atenuación máximo permisible para degradaciones futuras del enlace.

La atenuación total en dB sin considerar reserva del cable será:

$$a_t = La_L + n_e a_e + n_c a_c \quad (16)$$

Siendo: $P_M = P_t - P_u$

El margen de enlace M_e en dB será:

$$M_e = P_m - a_t \quad (17)$$

4.3. Costos

A continuación se presenta una serie de pasos para el análisis de costos de un tendido de fibra óptica aéreo, junto con las tablas de control y costo de todos los elementos a emplear en el tendido:

- Determinar la distancia total del tendido de fibra.
- Localizar la posición de cada poste con coordenadas.
- Determinar qué tipo de suspensión es necesaria en cada poste.
- Determinar los tipos de vano entre cada poste.
- Calcular las reservas de fibra en todo el recorrido.

Posterior a los cálculos de ganancias y pérdidas, se hace el estudio del presupuesto de campo de los materiales y de la mano de obra del proyecto. A continuación se presenta en tabla X, un formato de posicionamiento de cada poste, tipo de poste, vano entre postes, el acumulado del tendido y los tipos de herrajes para la suspensión de la fibra. Existen dos tipos de suspensión: el primero es el conjunto completo de suspensión que se emplea entre postes con la misma dirección que no tiene ningún ángulo entre ellos, y el segundo es el biconjunto de remate que se emplea entre postes, formando un ángulo entre ellos, en otra palabras, cuando el tendido cambia de dirección.

Tabla X. **Tabla de postes, vanos y herrajes**

TABLA DE POSTES, VANOS Y HERRAJERÍA						
NUMERACION DE POSTES	POSICION	TIPO DE POSTE (35 pies)	VANO (METROS)	ACUM. (METROS)	HERRAJES	
					CONJUNTO SUSPENSION	BICONJUNTO REMATE
1	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera		0		1
2	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera	50	50	1	
3	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera	60	110		1
4	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera	40	150	1	
5	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera	150	300	1	
6	Lat. Xxx Lon. Xxx	Concreto	110	410	1	
7	Lat. Xxx Lon. Xxx	Concreto	200	610	1	
8	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera	90	700	1	
9	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera	80	780		1
10	Lat. Xxx Lon. Xxx	Madera	45	825		1
...
				Total del tendido (mts)	xx	xx

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XI, se presenta los costos reales del 2009 de los materiales que se emplean en un enlace de fibra, según el tipo que fibra, vano y herrajes. Con estos precios se puede hacer el presupuesto del tendido.

Tabla XI. Costos del tendido de la fibra óptica

PRESUPUESTO TENDIDO DE FO			
Concepto	Cantidad a emplear	Precio unitario (\$)	TOTAL (\$)
Cable fibra óptica			\$ Total de F.O.
Fibra óptica vano 300 (16 F.O)	xx	1,26	
Fibra óptica vano 500 (16 F.O)	xx	1,20	
Fibra óptica vano 650 (16 F.O)	xx	1,36	
Fibra óptica vano 800 (16 F.O)	xx	1,44	
Fibra óptica vano 1000 (16 F.O)	xx	1,71	
Fibra óptica vano 1500 (16 F.O)	xx	2,16	
Herrajes			\$ Total por herrajes
Suspensión vano 100	xx	20,00	
Herrajes de tensión vano 100 (biconjunto), incluye conector "D" chico para cinta bandit	xx	54,00	
Herrajes de Suspensión vano 300	xx	18,00	
Herrajes de tensión vano 300 (biconjunto)	xx	62,00	
Herraje de tensión vano 500 (biconjunto)	xx	62,00	
Herraje de suspension vano 800	xx	32,22	
Herraje de tensión vano 800 (biconjunto)	xx	104,00	
Herraje de tensión vano 1000 (biconjunto)	xx	104,00	
Herraje de tensión vano 1500 (biconjunto)	xx	250,00	
Amortiguador	xx	4,95	
Herraje Pole Clamp	xx	9,95	
Chapas de remate	xx	2,74	
Bandejas	xx	32,00	\$
Mufas Coyote Runt	xx	140,00	\$
Mano de obra (tendido por metro FO)	xx	1,00	\$
ODF (unidades)	xx	800,00	\$
Gabinete y/o Racks (unidades)	xx	3 125,00	\$
M.O. instalación de postes	xx	45,00	\$
Instalacion de Retenidas (Incluye materiales)	xx	70,00	\$
Postes de Madera de 35"	xx	152,00	\$
Transporte de Postes	xx	35,00	\$
M.O Cimentaciones por poste	xx	127,55	\$
Supervisión por día	xx	116,07	\$
TOTAL DESARROLLO DE PROYECTO			\$ xx xxx,xx

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente a los gastos de instalación, se deben tomar en cuenta el costo del equipo de fibra óptica. El equipo que se cotizo es de dos fibras con salidas eléctricas E1, el promedio del precio es de \$1 100,00 y varía dependiendo de la capacidad de E1's que se requieran en la celda.

En forma de comparar y ejemplificar los costos entre un enlace de fibra óptica y uno de microondas, se calculará un enlace de fibra que iguale los costos ya calculados de microondas en el capítulo 3, para determinar la máxima distancia de tendido que se podría alcanzar.

Tabla XII. **Costos del tendido de 3 500 metros de F.O**

PRESUPUESTO TENDIDO DE F.O.				
Concepto	Cantidad	Precio C/U (\$)	Sub total (\$)	TOTAL (\$)
Fibra óptica vano 300 (16 F.O)	3 500	1,60	4 410,00	
Cable fibra óptica				4 410,00
Suspensión vano 100	34	20,00	680,00	
Herrajes de tensión vano 100 (biconjunto)	6	54,00	324,00	
Herrajes de suspensión vano 300	4	18,00	72,00	
Herrajes de tensión vano 300 (biconjunto)	2	62,00	124,00	
Herrajes				1 200,00
Bandejas	2	32,00		64,00
Mufas Coyote Runt	1	140,00		140,00
Mano de obra (tendido por metro FO)	3 400	1,00		3 400,00
ODF (unidades)	2	800,00		1 600,00
M.O. instalación de postes	46	45,00		2 070,00
Instalacion de retenidas	6	70,00		420,00
Postes de madera de 35"	46	152,00		6 992,00
Transporte de postes C/U	46	35,00		1 610,00
Supervisión por día	2	116,07		232,14
Total del tendido				21 906,00
Equipo de transmision OP-34, 16xE1				3 000,00
Total del proyecto				24 906,00

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en el ejemplo, los costos del tendido de fibra son demasiado elevados en comparación con un enlace de microondas. La máxima distancia calculada del tendido es de 3,5 kilómetros tratando de igualar los costos entre ambos, esto demuestra que los costos de la fibra óptica son mucho mayores en comparación con los enlaces de microondas, pero en capacidad, seguridad y confiabilidad, la fibra aventaja a la microondas.

4.4. Ventajas y desventajas de la fibra

A continuación se citarán las ventajas y desventajas de la transmisión de información por medio de la fibra óptica, todos estos criterios dependen de las necesidades y de los lugares a emplear este medio de comunicación:

- Ventajas
 - Elevado ancho de banda: el empleo de fuentes de luz monocromática, pueden facilitar el uso de frecuencias de portadora del orden de 10^5 Mega Hertz, frente a los 100 Mega Hertz que se pueden alcanzar con un cable coaxial.
 - Bajas pérdidas: actualmente las fibras para uso comercial, presentan una atenuación del orden de 0,2 decibeles por kilómetro. Además, la respuesta de atenuación en la fibra (respuesta en frecuencias), es independiente de la frecuencia en toda la banda de paso. Esta característica deriva del elevado ancho de banda de la fibra.
 - Bajo peso, flexibilidad y tamaño: un cable conteniendo 8 o 10 fibras, tiene un diámetro exterior, incluyendo las protecciones de

alrededor, de 15 milímetros, un peso de 50 kilogramos por kilómetro y un radio de curvatura del orden de 150 milímetros, lo cual contribuye a la facilidad de su tendido.

- Interferencia electromagnética nula ni de químicos corrosivos dispersos en el aire.
- Seguridad de la información transmitida por la fibra: por sus propias características, sería un trabajo sumamente dificultoso intervenir una fibra óptica.
- Desventajas
 - El costo de instalación es elevado y se incrementa proporcionalmente a la distancia.
 - La alta fragilidad de las fibras.
 - Necesidad de usar transmisores y receptores más caros.
 - Los empalmes entre fibras son difíciles de realizar, especialmente en el campo, lo que dificulta las reparaciones en caso de rupturas.
 - No puede transmitir electricidad para alimentar repetidores intermedios.
 - La necesidad de efectuar, en muchos casos, procesos de conversión eléctrica-óptica.

- La fibra óptica convencional no puede transmitir potencias elevadas.
- No existen memorias ópticas.
- No hay una estandarización de los productos, lo que plantea problemas de compatibilidad entre ellos.
- La instalación de los conectores es compleja y requiere personal con formación adecuada.

5. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO EN LOS ENLACES SATELITALES

Las comunicaciones vía satélite han sido una tecnología muy utilizada para proveer comunicaciones en áreas alejadas y de difícil acceso. Un satélite de comunicaciones puede definirse como un repetidor radioeléctrico ubicado en el espacio, que recibe señales generadas en la tierra, las amplifica y las envía de vuelta a otra parte de la tierra.

Debido a la escasa y en muchos casos nula infraestructura terrestre de comunicaciones (fibra óptica, radio enlace o líneas de cobre) en las zonas remotas, las comunicaciones vía satélite abren una ventana hacia al resto del mundo que permiten transmitir múltiples servicios, como voz, datos y video a velocidades en el orden de mega bits por segundo. Las terminales satelitales hacen posible las comunicaciones donde otros medios no pueden penetrar debido a la topografía y largas distancias.

Existen satélites de todo tipo, los hay geoestacionarios (GEO, *Geostacionary Earth Orbit*), aquellos que giran a una órbita natural a 36 000 kilómetros de la superficie de la tierra. Este tipo de satélites proveen comunicaciones fijas para aplicaciones de voz, datos y video en las bandas C y Ku principalmente. Existen satélites en órbitas bajas (LEO, *Low Earth Orbit*) de 500 a 900 kilómetros y orbitas medias (MEO, *Medium Earth Orbit*) de 5 000 a 12 000 kilómetros que dan varias vueltas a la tierra y que para cubrir casi toda la superficie, están agrupados en constelaciones de satélites. Muchos de estos satélites proveen aplicaciones móviles de voz, censado remoto, meteorología,

determinación de la posición (GPS). La mayoría de estos trabajan en la banda móvil L.

5.1. Bandas satelitales

Dentro del espectro de radio frecuencia, se subdividen las bandas asignadas a las comunicaciones satelitales, en la tabla XIII, se refleja la división de espectro, su denominación y los usuarios a los que van designados.

Tabla XIII. **Bandas satelitales**

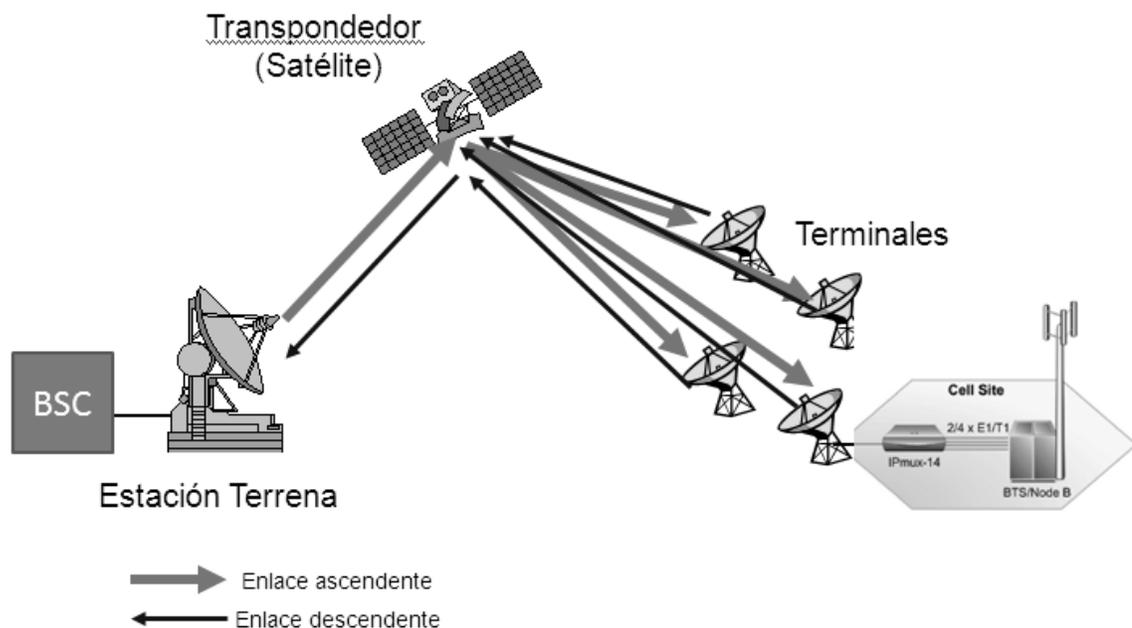
Designación	Rango	Servicio	Observaciones
Banda L	1-2GHz	Servicio móvil	Baja atenuación en el espacio libre
Banda 2	2-4GHz	Subsistema teledirigida y telecomando	
Banda C	6GHz (UL) 4GHz (DL)	Servicio fijo	Es el segmento más saturado
Banda X	8GHz (UL) 7GHz (DL)	Uso militar	
Banda Ku	14/12GHz 17/12GHz	Servicio fijo DBS	Ampliación de servicios banda C
Enlaces entre satélites (ej. IRIDIUM).	18GHz (UL) 27GHz (DL)	Enlaces entre satélites (ej. IRIDIUM).	Enlaces entre satélites (ej. IRIDIUM).
Banda Ka	27-40 GHz	Uso militar.	
Milimétricas	60 GHz	Servicio móvil de banda ancha.	Videoconferencias, etc.

Fuente: elaboración propia.

5.2. Estructura de un enlace satelital

Básicamente un enlace satelital, se conforma de tres etapas. Dos están ubicadas en las estaciones terrestres, a las cuales se les llaman modelos de enlace de subida o bajada y la tercera etapa estará ubicada en el espacio, donde la señal de subida cruzará por el transpondedor del satélite y será regresada a la tierra a una menor frecuencia con la que fue transmitida. En la figura 25, se muestra el modelo básico de un sistema satelital.

Figura 25. **Modelo satelital**



Fuente: <http://www.internet-satelital.com>. Consulta: 9 de julio de 2008.

5.2.1. Estación terrena

Los modelos tanto de subida como de bajada, requieren de una estación

terrena, ya sea para transmitir o para recibir una señal y básicamente están compuestas de cuatro segmentos. El primer segmento es un modulador de FI para transmisión y en el caso de recepción se ocupa un demodulador de FI. La segunda etapa es un convertidor elevador de FI a microondas RF para transmisión y para la recepción de un convertidor descendente de RF a IF. La tercera es un amplificador de alta potencia para transmisión y para recepción un amplificador de bajo ruido. Por último, la cuarta etapa son las antenas que conforman a la estación terrena.

5.2.2. Modelo de enlace de subida

El enlace de subida consiste en modular una señal de FI en banda base a una señal de frecuencia intermedia modulada, seguida por el convertidor elevador, el cual esta constituido por un mezclador y filtro pasa bandas, el cual convertirá la señal de IF a RF. Por último, la señal pasará por un amplificador de potencia, el cual le dará la potencia necesaria para que la señal llegue hasta el satélite.

5.2.3. Transpondedor

El transpondedor esta constituido por un filtro pasa bandas, el cual se encarga de limpiar el ruido que la señal adquiere en la trayectoria de subida, además de que servirá como seleccionador de canal, ya que cada canal satelital requiere un transpondedor por separado. Le sigue un amplificador de bajo ruido y un desplazador de frecuencia, el cual tiene la función de convertir la frecuencia de banda alta de subida, a banda baja de salida, después seguirá un amplificador de baja potencia, el cual amplificará la señal de RF para el enlace de bajada, la señal será filtrada y regresada hacia la estación terrena.

5.2.4. Modelo de enlace de bajada

El receptor de la estación terrena, contiene un filtro pasa banda, el cual limita la potencia de entrada que recibe el amplificador de bajo ruido, una vez amplificada la señal, será descendida de RF a frecuencias IF por medio de un convertidor descendente, después la señal será demodulada y entregada en banda base.

5.3. Ganancia de la antena

La ganancia de la antena es un factor muy importante en cualquier tipo de comunicaciones de radio e indispensable para el cálculo del enlace satelital. La definición de ganancia de la antena A_t , se refiere a la relación que existe entre la potencia radiada por una antena isotrópica, a una distancia y la densidad de potencia que radiaría la misma antena, pero en una sola dirección, con igual cantidad de potencia entregada.

La ecuación 18, muestra como se compone la ganancia de la antena:

$$A_t = \eta \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2 \quad (18)$$

Ganancia de la antena en decibeles:

$$A_t(dB) = 10 \text{Log} \left(\eta \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2 \right) \quad (19)$$

Donde:

A_t = ganancia de la antena (dB)

η = eficiencia de la antena (adimensional)

D = diámetro de la antena (metros)

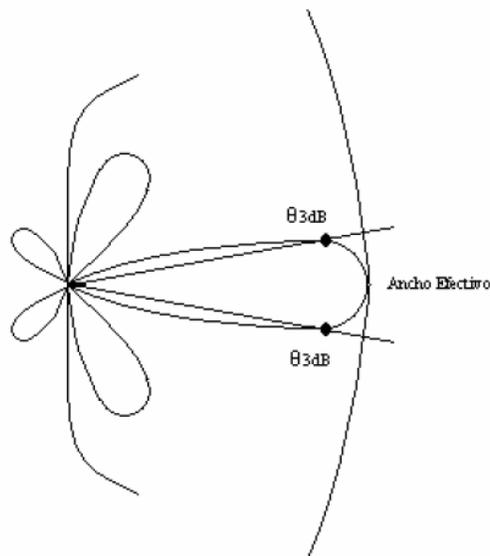
f = frecuencia de transmisión (GHz)

c = velocidad de la luz (3×10^8 Km/m²)

5.3.1. Ancho del haz

Existe otra manera de calcular la ganancia de la antena, esta es a través del ancho del haz. En la ecuación 20, se obtiene el ancho del haz, el cual es el ángulo donde la potencia del lóbulo principal disminuye a la mitad del máximo en la dirección deseada. En la figura 26, se muestra el ancho del haz, también conocido como ángulo a tres decibeles, que es el ancho efectivo del lóbulo principal radiado por una antena en una dirección.

Figura 26. **Ángulo de 3 decibeles**



Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Capítulo 3, p.7.

$$\theta_{3dB}(\text{grados}) = 75 \frac{\lambda}{D} \quad (20)$$

La ecuación 21, muestra como se obtiene la ganancia de la antena en función del ancho del haz.

$$At = \frac{30\,000}{(\Theta_{3dB})^2} \quad (21)$$

Donde:

At = ganancia de la antena

η = eficiencia de la antena (adimensional)

D = diámetro de la antena

λ = longitud de onda

c = velocidad de la luz

f = frecuencia de transmisor

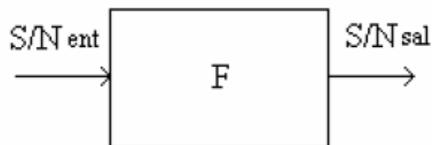
Θ_{3dB} = ancho del haz

5.4. Temperatura equivalente de ruido

En los sistemas de comunicación existe un parámetro que se conoce como índice de ruido, este es producido por todos los objetos cuya temperatura este por encima del cero absoluto. El ruido térmico también se conoce como ruido de Johnson. El índice de ruido es útil para sistemas de microondas terrestres, pero para las comunicaciones satelitales tiene que ser más preciso al calcular las variaciones de ruido.

Para efectuar el cálculo de la temperatura equivalente de ruido, se requiere de otros parámetros como la temperatura ambiente T , así como el factor de ruido F . La ecuación 24 dice cómo obtener el factor de ruido, que es el índice que servirá para saber cuánto se deteriora la relación señal a ruido que se genera cuando una señal pasa a través de un circuito electrónico. La figura 27, explica esta relación.

Figura 27. **Factor de ruido**



Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite.*

La ecuación 22, muestra la potencia de ruido generada por el amplificador N .

$$N = KTeB \quad (22)$$

Donde:

N_e = potencia de ruido en el amplificador de salida

N_i = potencia de ruido en el amplificador de entrada

A = ganancia de potencia del amplificador

La ecuación 23 muestra la potencia de ruido en el amplificador de salida N_e y se expresa de la siguiente manera:

$$N_e = AKB(T + T_e) \quad (23)$$

Sustituyendo la potencia de ruido en el amplificador de salida en la ecuación 23, se obtiene como resultado el factor de ruido.

$$F = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{ent}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{sal}} = \frac{\frac{S}{N_i}}{\frac{AS}{N_o}} = \frac{N_e}{AN_i} = \frac{AKB(T + T_e)}{AKTB} = 1 + \frac{T_e}{T} \quad (24)$$

La ecuación 25 muestra la temperatura equivalente de ruido T_e .

$$T_e = T(F - 1) \quad (25)$$

Donde:

- N = potencia total de ruido (watts)
- K = constante de Boltzmann (joules por Kelvin)
- A = ganancia de potencia del amplificador (adimensional)
- B = ancho de banda (Hertz)
- T = temperatura ambiente (Kelvin)
- T_e = temperatura equivalente de ruido (Kelvin)

5.4.1. Densidad de ruido

La densidad de ruido se conoce como la cantidad de potencia de ruido normalizado a un ancho de banda de 1 hertz, siendo esta la relación entre la

potencia de ruido generada por un amplificador. La ecuación 26 muestra la densidad de ruido.

$$N_o = \frac{N}{B} = \frac{KTeB}{B} = KTe \quad (26)$$

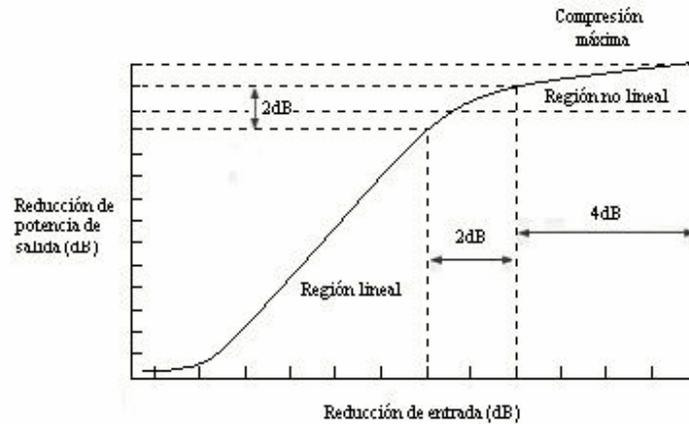
5.5. Parámetros del sistema satelital

Los parámetros del sistema satelital son todos aquellos elementos que conforman al modelo del enlace. Estos parámetros se encuentran en todas las partes del mismo en las que se generen pérdidas de potencia, ya sean provocadas por la forma del terreno o por los aspectos que generan que las señales de radio se desgasten al cruzar el espacio libre, así como la atmósfera.

5.5.1. Pérdida por reducción

Los amplificadores de potencia que se utilizan en las estaciones terrestres, así como los tubos de onda viajera que se usan en los satélites, son dispositivos no lineales; la ganancia de estos, depende de la potencia de entrada de la señal. La figura 28 muestra la gráfica característica de la potencia de salida en función de la potencia de entrada para un amplificador de potencia (HPA).

Figura 28. **Potencia de salida de un amplificador**



Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Capítulo 3, p. 11.

Para poder reducir la cantidad de distorsión por intermodulación, es necesario reducir la potencia de entrada unos cuantos decibeles, para que el HPA trabaje en una región más lineal.

5.5.2. **Potencia isotrópica radiada efectiva**

La potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) es una medida que indica la fuerza con que una señal es transmitida hacia un satélite o hacia una estación terrestre. La ecuación 27 muestra que la potencia isotrópica radiada efectiva es la combinación de la potencia del transmisor con la ganancia de la antena.

$$PIRE = P_t A_t \quad (27)$$

Potencia isotrópica radiada efectiva en decibeles

$$PIRE(dB) = 10Log(PtAt) \quad (28)$$

Donde:

PIRE = potencia isotrópica radiada efectiva (dB)

Pt = potencia de entrada a la antena (Watts)

At = ganancia de la antena de transmisión (dB)

Entre el amplificador y la antena, se generan pérdidas causadas por los cables que unen a estos dos elementos. La ecuación 29 muestra cómo se calculan las pérdidas generadas por cables.

$$Lc = 10 \log \rho \left(\frac{l}{\pi r} \right) \quad (29)$$

Donde:

Lc = pérdidas en el cable

l = longitud del cable

5.5.3. Pérdidas por propagación

El cálculo en el enlace de comunicaciones satelitales es necesario para determinar el balance de pérdidas y ganancias en potencia de la señal radiada. El diseño correcto de un enlace de radio, asegura la recepción de una señal de buena calidad, evitando así el desperdicio de recursos. Es por ello que se necesitan conocer todos los aspectos que afectan a las señales de radio, desde

que se transmiten hasta que se reciben. Por este motivo las pérdidas de propagación juegan un papel muy importante en el diseño de un enlace satelital.

Las pérdidas por propagación en el espacio libre L_p se refieren a que la energía se reparte mientras la señal se propaga alejándose de la fuente, por lo que se produce una menor densidad de potencia a mayor distancia. La ecuación 30, muestra las pérdidas por propagación en el espacio libre.

$$L_p(dB) = 10 \text{Log} \left(\frac{4\pi Df}{c} \right)^2 = 20 \text{Log} \frac{4\pi Df}{c} \quad (30)$$

5.5.4. Densidad de potencia

Para determinar la densidad de flujo a la distancia del satélite, se aplica la ecuación 31, tomando en cuenta que representa la distancia del radio enlace.

$$C'(dB) = 10 \text{Log} \left(\frac{P_{tx} A_{tx}}{4r^2 \pi} \right) \quad (31)$$

Donde:

C' = densidad de flujo (dBW/m²)

P_{tx} = potencia de transmisión

A_{tx} = ganancia de la antena transmisora

r = distancia del radioenlace (km)

5.5.5. Potencia en el receptor

Para obtener la potencia en el receptor de un enlace de radio, se requiere de la ganancia de la antena receptora, esto es con el fin de que la densidad de flujo de la potencia se convierta en potencia eléctrica. La ecuación 32 expresa como se muestra la potencia en el receptor a la distancia del satélite.

$$Pr_x(dB) = 10Log\left(\frac{P_{tx}A_{tx}A_{rx}}{4r^2\pi}\right) \quad (32)$$

Donde:

P_{rx} = potencia en el receptor (dBW/m)

P_{tx} = potencia de transmisión (dBW)

A_{tx} = ganancia de la antena transmisora

A_{rx} = ganancia de la antena receptora

r = distancia del radioenlace (km)

5.5.6. Relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido

La relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido G/T_e , es una cifra de mérito, que sirve para demostrar la calidad de recepción de un satélite o una estación terrena. La ecuación 33 se considera como la relación entre la ganancia de la antena receptora y la temperatura equivalente de ruido.

$$\frac{G}{T_e} = \frac{AR_x}{T_e} \quad (33)$$

Relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido en decibeles.

$$\frac{G}{T_e}(dB) = 10 \text{Log} \left(\frac{A_{rx}}{T_e} \right) \quad (34)$$

Donde:

G/T_e = ganancia a temperatura equivalente de ruido (dBK^{-1})

A_{rx} = ganancia de la antena receptora (adimensional)

T_e = temperatura equivalente de ruido ($^{\circ}\text{K}$)

5.5.7. Relación de la portadora a densidad de ruido

La relación de portadora a densidad de ruido C/N_0 es la relación de la potencia de portadora de banda ancha (potencia combinada de la portadora y sus bandas laterales asociadas), entre la densidad de ruido presente en un ancho de banda de 1 hertz. La ecuación 35 muestra la relación de portador a densidad de ruido.

$$\left(\frac{C}{N_0} \right) = \frac{C}{KT_e} \quad (35)$$

5.5.8. Relación de la portadora a señal a ruido

Para realizar el diseño correcto de un enlace satelital se requiere de todos los factores antes mencionados y, para poder calcular la cantidad de potencia que se transmite en una comunicación satelital, se utiliza la relación de la portadora a la señal de ruido C/N . Esta relación se encarga de reunir todos los tipos de pérdidas y ganancias mostrando la eficiencia de un enlace. La ecuación 36 sirve para saber la cantidad de potencia transmitida en el enlace.

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \frac{C}{N_0} - BW \quad (36)$$

5.5.9. Relación de energía de bit a densidad de ruido

Es importante mencionar que para que un HPA trabaje adecuadamente, tiene que estar al borde de la saturación. Para sistemas satelitales la potencia saturada de salida (P_t), se expresará generalmente en decibeles-watts. En la actualidad los satélites modernos utilizan los siguientes tipos de modulación: por conmutación de fase (PSK) y por amplitud cuadrática (QAM). Estos tipos de modulación pueden codificar varios bits en un solo elemento de señalización, por lo tanto, este puede ser un parámetro más indicativo que la potencia de la portadora. A este elemento se le conoce como energía por bit E_b . La ecuación 37 define la energía por bit.

$$E_b = P_t T_b$$

si

$$T_b = \frac{1}{f_b} \quad (37)$$

$$E_b = \frac{P_t}{f_b}$$

Donde:

E_b = energía por bit (joules por bit)

P_t = potencia total saturada de salida (watts o joules por segundo)

T_b = tiempo de un solo bit (segundo)

f_b = frecuencia de bits (bit/s)

La relación de energía de bit a densidad de ruido E_b/N_o sirve para comparar sistemas digitales que utilizan distintas frecuencias de transmisión, así como esquemas de modulación o técnicas de codificación. La ecuación 38 muestra que la relación energía de bit a densidad de ruido, esta dada de la siguiente manera.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{\frac{C}{fb}}{\frac{N}{B}} = \frac{CB}{Nfb} \quad (38)$$

Esta relación es adecuada para sistemas digitales, pero con fines de facilitación es más útil medir la relación de potencia de portadora de banda ancha a densidad de ruido y convertirla a E_b/N_o . De esto se obtiene la ecuación 39.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)\left(\frac{B}{fb}\right) \quad (39)$$

Se dice que la relación E_b/N_o es independiente de la técnica de codificación, del esquema de modulación y del ancho de banda, esto siempre y cuando no sea modificada la potencia total por portadora C y la velocidad, en bps, para no alterar la energía por bit E_b , al igual que se espera que la temperatura permanezca constante para que la densidad de ruido tampoco sea alterada.

5.6. Efectos atmosféricos en la propagación de la señal

Para fines de este trabajo de investigación, se explicará qué efecto tiene la atmósfera y las partículas que en ella se encuentran, sobre los enlaces satelitales, ya que es necesario conocer no solo los efectos básicos de propagación de las ondas de radio, sino también la ubicación en donde se efectuará el enlace para así poder definir cómo influyen los aspectos climáticos sobre el costo de los equipos del enlace y definir si es factible el empleo de este tipo de enlace. La atenuación de ondas de radio en la atmósfera, se debe principalmente a dos efectos:

- Atenuación por gases en la atmósfera L_g
- Atenuación por hidrometeoros L_r

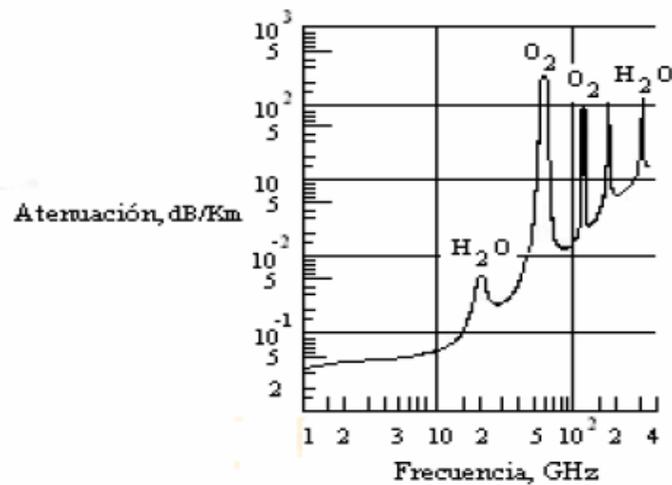
5.6.1. Atenuación por gases en la atmósfera

La atenuación por gases atmosféricos L_g se obtiene de calcular el índice de atenuación Abs de la curva que se muestra en la figura 29, la cual indica el índice en (dB/Km) contra la frecuencia de transmisión. Nótese que en la curva a frecuencias aproximadas a los 22,235, 53,5 y 65,2 giga hertz generan una gran cantidad de pérdidas en potencia, por lo que las bandas de comunicaciones comerciales han decidido desecharlas y no tomarlas en cuenta para efectos de comunicaciones satelitales.

El índice de atenuación será multiplicado por la distancia de la trayectoria atmosférica d_a . La ecuación 40 sirve para calcular la distancia de la trayectoria atmosférica, la cual depende del ángulo de elevación de la antena, así como de la altura de la atmósfera, las cuales se pueden observar en la figura 30.

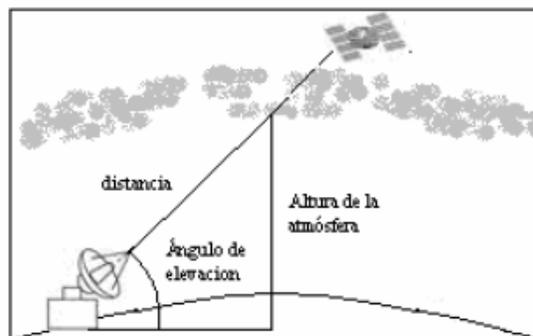
La altura será considerada de 10 kilómetros debido a que esta es la altura de la atmósfera a nivel del mar.

Figura 29. **Gráfica del índice de atenuación en dB/Km**



Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Capítulo 3, p. 19.

Figura 30. **Atura de la atmósfera sobre el nivel del mar**



Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Capítulo 3, p. 20.

La atenuación atmosférica por cielo claro (sin lluvia), se debe principalmente a efectos de absorción de energía de la onda de radio por efectos de resonancia en las moléculas de vapor de agua H₂O y de oxígeno O. La atenuación por cielo libre depende del ángulo de elevación de la antena, donde a ángulos bajos, se generan mayores pérdidas y a ángulos altos menores pérdidas.

$$da = \frac{10Km}{\text{sen}(Elevación)} \quad (40)$$

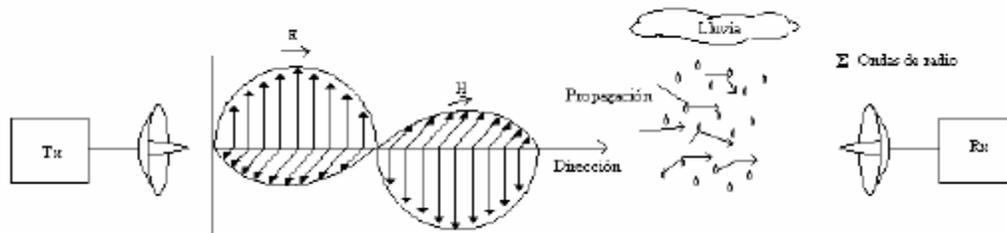
La ecuación 41 muestra cómo se obtiene el cálculo de las pérdidas por gases atmosféricos, y estas pérdidas son el producto de la curva del índice de atenuación por la trayectoria atmosférica. El resultado de las pérdidas por gases se obtendrá en decibeles.

$$Lg = (Abs)(da) \quad (41)$$

5.6.2. Atenuación por hidrometeoros

Como ya se mencionó en los enlaces de microondas, la atenuación por lluvia es un factor que puede llegar a disminuir una señal de radio considerablemente. La figura 31 muestra el desgaste que sufre la señal al cruzar por una cortina de lluvia.

Figura 31. **Desgaste de la señal por efectos de lluvia**

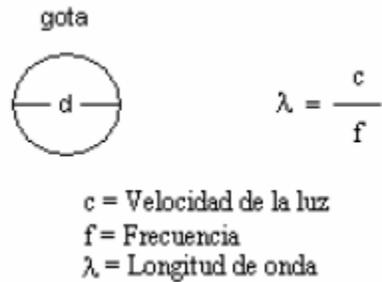


Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Capítulo 3, p. 21.

Se le conoce como atenuación por hidrometeoros L_r a cualquier meteoro compuesto de agua, ya sea lluvia, granizo o nieve. La lluvia empieza a causar disminución de potencia a partir de frecuencias mayores de 3 giga hertz, esto ocurre debido a efectos de refracción y dispersión.

En comunicaciones de radio, es importante mencionar que la dispersión de la señal generada por lluvia depende de la comparación del tamaño de la longitud de onda de la señal y el diámetro de la gota de lluvia. Si el diámetro d de la gota de lluvia es menor a la longitud de onda λ la atenuación será pequeña, pero esta se acrecentará si el diámetro de la gota supera a la longitud de onda de la señal. La figura 32 muestra la relación entre la longitud de onda y el diámetro de la gota de lluvia. Generalmente la refracción se produce solamente a determinados ángulos. Este efecto es similar como el que le ocurre a la luz intentando atravesar la niebla.

Figura 32. **Relación diámetro de gota con longitud de onda**



Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Capítulo 1, p.4.

Dependiendo de la región geográfica donde se encuentre la estación terrena, la atenuación por lluvia puede ser menor o mayor, esto se basa en las estadísticas de intensidad de lluvia, tamaño de gota y presión atmosférica. En la figura 33, se muestran los porcentajes de lluvia en el continente americano.

La figura 33, muestra qué cantidad de lluvia R en (mm/hr) cae en cada zona distinta del continente. Al conocer la región de lluvia donde se encuentran las estaciones terrenas y se conocen las frecuencias de transmisión, se podrán obtener los valores de la atenuación por lluvia de ese lugar. La ecuación 42 se utilizará para obtener la atenuación por lluvia α . Este parámetro indicará la atenuación específica en (dB/Km). La ecuación 43 calculará la atenuación por hidrometeoros, esta se calcula como el producto del parámetro de atenuación por lluvia α por la distancia de trayectoria atmosférica da.

$$\alpha = aR^b \tag{42}$$

$$Lr = (\alpha)(da) = (aR^b)(da) \tag{43}$$

Los valores de a y b son coeficientes relativos de la señal de radio y se obtienen gracias a los siguientes intervalos:

Para a:

$$4.21 \times 10^{-5} \cdot f^{2.42}, \quad 2.9 = f > 54 \text{ GHz}$$

$$4.09 \times 10^{-2} \cdot f^{0.699}, \quad 54 < f = 180 \text{ GHz}$$

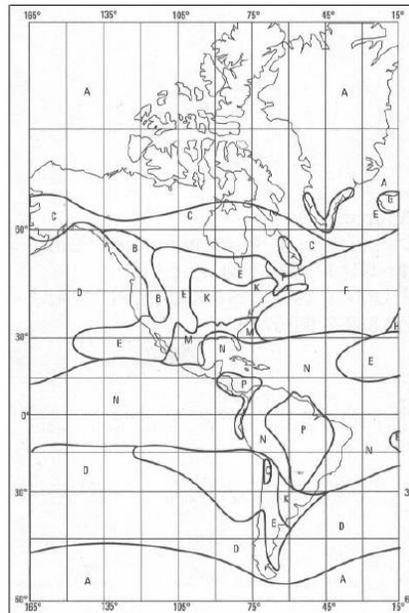
Para b:

$$1.41 \cdot f^{-0.0779}, \quad 8.5 = f > 25 \text{ GHz}$$

$$2.63 \cdot f^{-0.272}, \quad 25 < f = 164 \text{ GHz}$$

Los valores de f usados deberán estar en GHz.

Figura 33. **Regiones de lluvia en el continente americano**



Region de lluvia	Intensidad mm/Año	Porcentaje de 99.8%
A	6	0.3
B	12	0.5
C	15	0.7
D	19	0.9
E	22	1.1
F	28	1.4
G	30	1.5
H	32	1.7
J	35	1.8
K	42	2.2
L	60	3.2
M	63	3.4
N	98	4.8
P	145	5.8

Fuente: PEREDO, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Capítulo 3, p. 23.

5.7. Cálculo de la relación ganancia a temperatura equivalente de ruido con lluvia

Como ya se mencionó anteriormente, las pérdidas por lluvia generan grandes pérdidas en las señales de radio. Otro factor que se ve afectado por la lluvia es la temperatura equivalente de ruido, por lo cual se verá afectado todo el presupuesto de enlace. La ecuación 44 servirá para cambiar la temperatura equivalente de ruido constante de un sistema, cuando el sistema este siendo afectado por la lluvia.

$$Tr = To \left(1 - \frac{1}{Lr} \right) \quad (44)$$

Donde:

To = temperatura constante de 290 °k

Lr = pérdidas provocadas por lluvia (adimensional)

La ecuación 45, muestra la relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido con lluvia.

$$Te(ll) = Tsis - Tr \quad (45)$$

$$\frac{G}{Te} lluvia = \frac{Arx}{Te(ll)}$$

Relación ganancia a temperatura equivalente de ruido con lluvia expresada en decibeles.

$$\frac{G}{Te} lluvia(dB) = 10Log \frac{Arx}{Te(ll)} \quad (46)$$

5.8. Ecuaciones del enlace

Para poder analizar un enlace satelital, se utilizan las ecuaciones de enlace separándolas en dos secciones, subida y bajada. Estas ecuaciones consideran las ganancias y pérdidas por efectos de ruido, tanto en la atmósfera como en las estaciones terrenas y el transpondedor del satélite.

5.8.1. Enlace de subida

Como ya se dijo, en el enlace de subida se generan ganancias y pérdidas de una señal de radio. Todas estas pérdidas ya se han comentado antes y se denominan parámetros del enlace, estos parámetros ayudarán a definir la calidad de la señal que llega, en este caso de la estación terrena transmisora al satélite receptor. En la ecuación 47, se muestra la relación portadora a densidad de ruido. Para poder obtener esta relación será necesario transformar todos los parámetros de sus unidades naturales a decibeles para así poder saber de cuánta calidad es el enlace.

$$\left(\frac{C}{No} \right) = 10Log(AtPt)_u - 20Log\left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)_u + 10Log\left(\frac{G}{Te} \right)_u - 10Log(Lg)_u - 10Log(k)$$

$$\left(\frac{C}{No} \right)_{dB} = PIRE(dBW)_u - Lp(dB)_u + \left(\frac{G}{Te} \right)_{dBK^{-1}u} - Lg(dB) - K(dBWK) \quad (47)$$

A continuación, la ecuación 48 muestra la relación portadora señal a ruido con el cielo claro, la cual se utilizará para conocer la cantidad de potencia y la calidad de nuestro sistema.

$$\left(\frac{C}{N}\right) = 10\text{Log}(AtPt)_u - 20\text{Log}\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)_u + 10\text{Log}\left(\frac{G}{Te}\right)_u - 10\text{Log}(Lg)_u - 10\text{Log}(k) - 10\text{Log}(B)_u \quad (48)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{dB} = PIRE(dBW)_u - Lp(dB)_u + \left(\frac{G}{Te}\right)_{dBK^{-1}} - Lg(dB)_u - K(dBWK) - B(dB)_u$$

Si se desea saber qué cantidad de potencia se esta transmitiendo, cuando la señal se ve afectada por hidrometeoros, se realiza el cálculo mencionado anteriormente para obtener la atenuación Lr y la relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido afectada por lluvia G/T. Estos dos parámetros se utilizarán en el cálculo de la relación de portadora a ruido, como se ve en la ecuación 49.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{dB} = PIRE(dBW)_u - Lp(dB)_u + \left(\frac{G}{Te(l)}\right)_{dBK^{-1}} - Lg(dB)_u - K(dBWK) - B(dB)_u - Lr(dB)_u \quad (49)$$

Para obtener la potencia con la que se tiene que transmitir cuando esta lloviendo, simplemente se realiza la diferencia entre la relación portadora señal a ruido con cielo claro y la relación portadora señal a ruido con lluvia, obteniendo así la potencia que se requiere aumentar cuando llueve para que así llegue al transmisor la misma potencia en los dos casos.

La ecuación 50 sirve para obtener la relación de potencia de bit a densidad de ruido en decibeles.

$$\left(\frac{Eb}{No}\right)_{dB} = \left(\frac{C}{N}\right)_{dB} - 10 \text{Log}\left(\frac{B_u}{Rb_u}\right) \quad (50)$$

Donde:

PIRE_u = potencia radiada isotropicamente de subida (dBW)

L_{pu} = pérdidas por trayectoria de subida (dB)

(G/Te)_u = relación ganancia a temperatura equivalente de ruido de subida (dBK⁻¹)

L_{gu} = atenuación por gases atmosféricos de subida (dB)

K = constante de Boltzman (dBWK)

B_u = ancho de banda de subida (Mhz)

L_{ru} = pérdidas por lluvia de subida (dB)

5.8.2. Enlace de bajada

Para el enlace de bajada, se realizan los mismos pasos que para el enlace de subida, solamente que los parámetros que se utilizan son los que se encuentran en el modelo del enlace de bajada. De ahí se obtienen las siguientes ecuaciones:

La ecuación 51 muestra la relación portadora a densidad de ruido en el enlace de bajada con el resultado en decibeles.

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{dB} = PIRE(dBW)_a - Lp(dB)_a + \left(\frac{G}{Te}\right) dBK^{-1}_a - Lg(dB)_a - K(dBWK) \quad (51)$$

La ecuación 52 muestra la relación portadora señal a ruido con el cielo claro en el enlace de bajada con el resultado en decibeles.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{dB} = PIRE(dBW)_a - Lp(dB)_a + \left(\frac{G}{Te}\right) dBK^{-1}_a - Lg(dB)_a - K(dBWK) - B(dB)_a \quad (52)$$

La ecuación 53 muestra la relación portadora señal a ruido con lluvia en el enlace de bajada con el resultado en decibeles.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{dB} = PIRE(dBW)_a - Lp(dB)_a + \left(\frac{G}{Te(l)}\right) dBK^{-1}_a - Lg(dB)_a - K(dBWK) - B(dB)_a - Lr(dB)_a \quad (53)$$

La ecuación 54 muestra la relación de potencia de bit a densidad de ruido en el enlace de bajada con el resultado en decibeles.

$$\left(\frac{Eb}{No}\right)_{dB} = \left(\frac{C}{N}\right)_{dB} - 10 \text{Log} \left(\frac{B_d}{Rb_d}\right) \quad (54)$$

Donde:

$PIRE_d$ = potencia radiada isotrópica efectiva en el enlace de bajada (dBW)

Lp_d = pérdidas por trayectoria en bajada (dB)

$(G/Te)_d$ = relación ganancia a temperatura equivalente de ruido en

bajada (dBK⁻¹).

L_{gd} = atenuación por gases atmosféricos en bajada (dB)

K = constante de Boltzman (dBWK)

B_d = ancho de banda en bajada (Mhz)

L_{rd} = pérdidas por lluvia en bajada (dB)

5.9. Cálculo de la eficiencia total del sistema

Con el cálculo de la relación portadora señal a ruido, la relación portadora a densidad de ruido y la relación densidad de energía de bit a ruido, tanto como de subida y de bajada. Se puede calcular la eficiencia total del sistema mediante las siguientes ecuaciones. La ecuación 55 muestra la eficiencia total en el sistema de la relación portadora a densidad de ruido.

$$\left(\frac{C}{No}\right)_{sis} = \frac{\text{anti log}[0.1(C/No)u] \text{anti log}[0.1(C/No)d]}{\text{anti log}[0.1(C/No)u] + \text{anti log}[0.1(C/No)d]} \quad (55)$$

La ecuación 56 muestra la eficiencia total en el sistema de la relación densidad de energía de bit a ruido.

$$\left(\frac{Eb}{No}\right)_{sis} = \frac{\text{anti log}[0.1(Eb/No)u] \text{anti log}[0.1(Eb/No)d]}{\text{anti log}[0.1(Eb/No)u] + \text{anti log}[0.1(Eb/No)d]} \quad (56)$$

La ecuación 57 muestra la eficiencia total en el sistema de la relación de portadora a señal a ruido que se considerará para la ejecución del programa, debido a que en el modelo no existen otro tipo de interferencias.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{sis} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_u} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_d}} \quad (57)$$

La relación C/N total, depende no solo de las relaciones de portadora a ruido de subida y bajada, también dependen de otros factores como la relación por intermodulación $(C/N)_{im}$ y la interferencia de otros sistemas cercanos (C/I) . Por lo que la ecuación 58 queda de la siguiente manera:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{sis} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_u} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_d} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{im}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{I}\right)}} \quad (58)$$

5.10. Costos

Los costos de los equipos de un radio enlace satelital, se muestran en la tabla XIV, se debe tomar en cuenta el gasto mensual de los servicios de 2 mega-bits por segundo que es de \$550,00, si se hacen cuentas para igualar los gastos de un servicio satelital a uno de microonda de \$23 067,42, los servicios satelitales se podrían contratar por solo 3 años sin pasarse de esa cantidad, con estos cálculos se puede observar que a un largo plazo, los servicios satelitales son muy costosos para emplearlos en la transmisión de una celda GSM, en casos extremadamente necesarios, se emplea este tipo de medio de transmisión usando un servicio de menor ancho de banda para reducir costos.

Al usar este medio se debe tomar en cuenta de que si no se usa todo el ancho de banda, se sufre de una penalización por falta de uso.

Tabla XIV. **Costos del equipo de microondas**

Antena	
ODU	
IDU	
Guia de onda	
Equipo de instalación	
Costo del equipo satelital	\$1 845,00
Instalación	\$450,00
Costo mensual por servicios de 2Mbps	\$550,00
	\$2 845,00

Fuente: elaboración propia.

Como ejemplo para un término de 5 años, los costos del equipo y los servicios de un radio enlace satelital son de \$35 295,00, de esta forma se demuestra que los servicios son extremadamente caros para un ancho de un E1 (2Mbps).

5.11. Ventajas y desventajas del enlace satelital

A continuación se detallan las principales ventaja y desventajas de la transmisión de información por medio de los enlaces satelitales, las cuales de observaran que son muy similares a las de los enlaces de micro ondas.

- Ventajas
 - La cobertura no está limitada por la distancia de los puntos a comunicar.
 - No es necesario tener línea vista entre los puntos.
 - Se puede transportar gran cantidad de información.

- Desventajas
 - Altos costos de equipos en función proporcional a la frecuencia.
 - Altos costos según el ancho de banda requerido.
 - Este tipo de enlaces es muy susceptible a los cambios climático
 - Degradación o pérdida de la señal por hidrometeoros.
 - La información debe de ir convenientemente cifrada para evitar problemas de seguridad, ya que cualquiera puede sintonizar las frecuencias.

6. ANÁLISIS ENTRE SISTEMAS

Este capítulo se dedicara a hacer la comparativa entre los sistemas estudiados con el fin de resaltar las ventajas y desventajas de cana uno de los medios. Se evaluará su desempeño según las siguientes categorías: capacidad de transmisión, fiabilidad, susceptibilidad, distancia del enlace, proceso de instalación, mantenimiento y costo de la solución.

6.1. Radio enlace de microondas

Capacidad de transmisión: se ve limitada dependiendo de los equipos comprados y de la disponibilidad de canales en el espectro. Las capacidades van desde 4 E1s hasta 32 E1s.

Fiabilidad: la fiabilidad del radio enlace de microonda, depende de las condiciones climáticas, debido a que con la lluvia o cualquier tipo de condensación de agua, la señal sufre desvanecimiento intenso y desviación del haz lo que provoca perdida de la información e incremento de la taza de errores en los paquetes.

Susceptibilidad: como anteriormente se mencionó, es altamente susceptible a las condiciones climáticas, principalmente a las condensaciones de agua que provocan pérdidas y limitan la distancia entre los puntos.

Distancia del enlace: la mayor distancia del enlace, depende de la frecuencia empleada y que exista línea vista entre los 2 extremos, respetando el

espacio de la primera zona de fresnel. Se pueden alcanzar distancia hasta de 60 kilómetros.

Proceso de instalación y mantenimiento: en el proceso de instalación se debe tener mucho cuidado en la correcta alineación y polarización de las antenas para obtener la máxima potencia de recepción. Otro detalle importante en la instalación, es hacer de forma correcta los acoples dejándolos sellado para evitar pérdidas por humedad.

Costo de la solución: el costo es relativamente barato al compararlo con la solución de fibra donde su precio se incrementa con la distancia y en el caso satelital el costo se incrementa con el ancho de banda y tiempo de arrendamiento. Para el caso de radio enlaces de microondas, existen equipos modulares que facilitan el incremento de capacidad para futuras expansiones.

De esta forma se concluye que el enlace de microonda es óptimo para usos de larga distancia con línea vista y de media capacidad, limitado a un ancho de banda no mayor a 100 mega bits por segundo. No es recomendado para lugares lluviosos y su costo y mantenimiento es barato en relación a las otras soluciones.

6.2. Fibra óptica

Capacidad de transmisión: este medio se caracteriza por su gran ancho de banda en el rango de los gigahertz y su alta capacidad de transmisión del rango de las decenas de giga bits por segundo.

Fiabilidad: tiene un alto nivel de fiabilidad por sus bajas pérdidas y por su alta seguridad en el transporte de la información.

Susceptibilidad: es inmune a los cambios climáticos, a las interferencias electromagnéticas y a efectos corrosivos.

Distancia del enlace: con la fibra óptica se puede alcanzar decena de kilómetros y aumentar su distancia con el uso de regeneradores de señal.

Proceso de instalación y mantenimiento: el proceso de instalación es el más complicado y largo por la necesidad del tendido de la fibra, posteo y aprobación de permisos municipales y comunales. Esto hace que el proyecto se alargue y que a su vez incremente el costo de la solución. La fibra óptica no requiere mantenimiento a menos que exista un corte que implique fusionar dichas fibras.

Costo de la solución: el costo de los equipos es mínimo en comparación al costo de la instalación, que se incrementa proporcionalmente a la distancia y a los materiales a emplear.

De esta forma, se concluye que los enlaces de fibra óptica son óptimos para usos de alta capacidad, alta velocidad y alta seguridad por ser inmunes a los campos electromagnéticos, humedad y corrosión, también se pueden alcanzar distancias de cientos de kilómetros usando repetidores y regeneradores ópticos. Su principal desventaja es su alto costo de instalación en relación a la distancia.

6.3. Enlaces satelitales

Capacidad de transmisión: su capacidad se limita en relación al ancho de banda contratado y al presupuesto designado por los altos costos.

Fiabilidad: al igual que los enlaces de microondas, presentan pérdidas e incremento de errores ocasionados por cualquier fenómeno hídrico, adicionalmente se tiene un retraso entre la transmisión y recepción de la información.

Susceptibilidad: los enlaces satelitales son altamente susceptibles a la lluvia, neblina, granizo, nubes o cualquier otra interferencia de la tierra o del espacio ocasionando desvanecimiento de la señal o pérdida total del enlace.

Distancia del enlace: este tipo de solución no tiene límite en la distancia y supera cualquier tipo de irregularidad topográfica teniendo cobertura global.

Proceso de instalación y mantenimiento: conlleva los mismos cuidados que la instalación del enlace de microonda, con la diferencia que la antena se orienta al satélite que presta el servicio.

Costo de la solución: el costo inicial y el mantenimiento del servicio es elevado adicionalmente está ligado al ancho de banda contratado.

De esta forma se concluye que el uso del enlace satelital es óptimo en los casos donde el sitio esta en un área remota con irregularidades topográficas y donde su acceso es limitado, por ende ninguno de los otros medios es accesible. La desventaja es el alto costo inicial y el mantenimiento del servicio ligado al ancho de banda contratado o usado.

CONCLUSIONES

1. La implementación de una red telefónica móvil GSM en áreas rurales, impulsa al progreso y desarrollo de las comunidades por sus beneficios de comunicación y alta capacidad.
2. A partir del análisis técnico y económico de los posibles medios de comunicación empleados en la última milla en una red GSM, le es posible al lector elegir que medio es el más conveniente según sus necesidades y presupuesto.
3. La ingeniería del dimensionamiento de una celda GSM es fundamental e indispensable en la planificación de un sitio de celda, porque define la capacidad requerida para soportar la cantidad de posibles usuarios, cantidad de sectores y la capacidad necesaria en los equipos de transmisión.
4. Para distancias cortas no mayores a 3 kilómetros la fibra óptica es el mejor medio de transmisión en enlaces con características de alta capacidad, alta seguridad y alta fiabilidad.
5. Para enlaces no mayores a 100 kilómetros y con línea vista el mejor medio es el enlace de microondas, debido a que puede superar irregularidades del terreno, adicionalmente sus costos son menores en comparación a los costos de la fibra óptica.

6. Si no existe línea vista entre los puntos, el mejor medio es el enlace satelital por tener cobertura global pero a un costo elevado por la inversión inicial y el servicio de arrendamiento del ancho de banda.

7. En el caso de la comunicación por medio de microonda y enlaces satelitales el servicio puede ser afectado por las condiciones climáticas presentadas durante el día.

RECOMENDACIONES

1. Considerar entre el análisis del cálculo de las capacidades requeridas para una red GSM, la opción de estimar capacidad en la transmisión para futuras ampliaciones para servicios dedicados, como los enlaces empresariales de datos que incentiven la inversión en el lugar.
2. En este trabajo de investigación se presentó parte del uso del espectro radioeléctrico en las bandas de GSM (900, 1 800 y 1 900), por tanto se observa que el espectro esta saturando con varias tecnologías, debido a eso es necesario la evolución de cada una de ellas para hacer uso más eficiente del espectro radioeléctrico sin causarse interferencia y así brindar más y mejores servicios.
3. Debe de hacerse el uso de redundancia en la transmisión de enlaces de celdas o servicios VIP para garantizar el servicio al usuario.
4. Al dimensionar la transmisión de una celda se debe prever de un 30 por ciento más en la capacidad para posibles expansiones requeridas por incremento de tráfico.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Cálculo de enlace fibra óptica.* (en línea)
<http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/calculo-enlace>.
2. HERRERA. *Tecnologías y redes de transmisión de datos.* Balderas 95, México: Limusa y Grupo Noriega Editores. 305 p.
3. HUIDOBRO MOYA, Jose Manuel. *Redes y servicios de telecomunicaciones.* Thomson. Ed. 477 p.
4. MOROCHO Y., Marco V.; LUDENA G., Patricia J. *Planificación de radioenlaces con base en topografía digital.* Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. (en línea)
<http://sig.utpl.edu.ec/sigutpl/Staffpro/sig/radioenlace.PDF>
[Consulta: 14 de Agosto de 2008].
5. NORTEL. Curso 0SY1 - *GSM System And Product Overview.* 2002 Nortel Networks, agosto 2002. 121 p.
6. ----- . Curso 1061W - *GSM BSS System & Products Overview.* 2002 Nortel Networks. agosto 2002. 155 p.
7. LEDESMA, Rafael Omar. *Transmisión y recepción de dos canales de voz por fibra óptica con premodulación digital.* Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. 2005. 67 p.

8. PEREDO ALVAREZ, Sergio. *Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite*. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. 2004. 163 p.

9. SANTA CRUZ, Oscar M. *Conceptos básicos plantel exterior telefónico*. Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba. Disponible. (en línea) <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/PlantelExterior/Introdutelefonía.pdf> [Consulta: 20 de julio de 2008]