



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**ÁREA ACADÉMICA DE SISTEMAS
COMPUTACIONALES**

**"ENLACE DE COMUNICACIONES
POR MICROONDAS CIUDAD
UNIVERSITARIA (PACHUCA) –
CAMPUS ACTOPAN UA EH".**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
PRESENTAN:**

GONZÁLEZ HERNÁNDEZ JAVIER

MÉNDEZ CASTILLO ALEJANDRO DAVID

ING. MARIANO ARUMIR RIVAS
Director de Tesis

PACHUCA, HIDALGO, 27 DE OCTUBRE DEL 2005.

Índice general

1. INTRODUCCION A LAS COMUNICACIONES RADIOELECTRICAS	13
1.1. Introducción	13
1.2. El Espectro Electromagnético	15
1.2.1. Frecuencias de Transmisión	17
1.3. Ancho de Banda y Capacidad de Información	18
1.4. Modos de Transmisión	20
1.5. Tipos de Ruido	22
1.5.1. Ruido de disparo	22
1.5.2. Ruido correlacionado	23
1.5.3. Ruido de intermodulación	24
1.5.4. Varios tipos de ruido	24
2. PROPAGACION DE ONDAS RADIOELECTRICAS	28
2.1. Introducción	28
2.2. Haz radioeléctrico y frentes de ondas	29
2.3. Propiedades ópticas de las ondas de radio	30
2.3.1. Refracción	31
2.3.2. Reflexión	34
2.3.3. Difracción	36
2.3.4. Interferencia	37
2.3.5. Propagación de ondas	38
2.3.6. Propagación de ondas de Tierra	39
2.3.7. Propagación de ondas espaciales	40
2.3.8. Propagación de ondas de cielo	43
2.3.9. Frecuencia crítica y ángulo crítico	45
3. TRANSMISION DIGITAL	46
3.1. Introducción	46
3.2. Modulación y demodulación	46
3.3. Limite de Shannon para la capacidad de información	49
3.4. Diversidad.	50
3.5. Modulación PSK	54
3.6. Modulación BPSK	54
3.7. Modulación QPSK	54

3.8.	Modulación por amplitud en cuadratura (QAM)	56
3.9.	Multicanalización	56
3.9.1.	Acceso Multiple por División de Frecuencia (FDMA)	56
3.9.2.	Acceso Multiple por División de Tiempo (TDMA)	56
3.9.3.	Espectro disperso	56
3.10.	Control de errores	58
3.11.	Conmutación de protección	59
4.	GENERALIDADES DEL EQUIPO DEL SISTEMA DE MICROONDAS	64
4.1.	Introducción	64
4.2.	Antena	64
4.3.	Antena de UHF y Microondas	65
4.3.1.	Antena reflectora parabólica	66
4.3.1.1.	Reflectores parabólicos.	66
4.3.2.	Mecanismos de alimentación.	73
4.3.2.1.	Sistemas de antenas	77
4.4.	Polarización de antena	78
4.5.	Ancho de haz de la antena	78
4.5.1.	Ancho de banda de la antena	79
4.5.2.	Impedancia de entrada de la antena	80
4.5.3.	Guías de onda	80
4.5.4.	Cable Coaxial	81
4.6.	Mezcladores	82
4.7.	Amplificadores	83
4.8.	Repetidores	84
4.9.	Torres	85
4.10.	Ganancia del sistema	88
4.10.1.	Atenuación en el espacio libre.	92
4.11.	Distorsión por retardo.	92
4.12.	Suministro de energía	93
5.	CALCULOS DE DISEÑO PARA EL ENLACE DE COMUNICACION POR MICROONDAS	94
5.1.	Introducción	94
5.2.	Definición de ruta y carta topográfica.	95
5.2.1.	Perfil Topográfico	97
5.2.2.	Diagramas de la ruta	101
5.2.3.	Estudio de campo	104
5.2.3.1.	Influencia del clima	105
5.2.3.2.	Influencia de la lluvia y niebla en altas frecuencias	105
5.2.3.3.	Atenuación por gases atmosféricos	106
5.2.4.	Influencia del terreno y obstaculos	107
5.2.4.1.	Zona de Fresnell	108
5.2.4.2.	Primera zona de Fresnell	110

5.3.	Cálculos y características de la trayectoria.	112
5.3.1.	Características técnicas del enlace.	113
5.3.1.1.	Anchura de banda.	114
5.3.1.2.	Especificaciones del Enlace.	116
5.4.	Características del equipo del sistema	128
5.4.1.	Antena	129
5.4.2.	Transmisor - Receptor	131
5.4.3.	Repetidor pasivo	134
5.4.4.	Torre arriostrada	135
5.4.5.	Cable coaxial para radiofrecuencia	136
6.	NORMATIVIDAD Y SEGURIDAD EN EL SISTEMA DE ENLACE.	138
6.1.	Introducción	138
6.2.	Organismos internacionales	138
6.3.	Canales de emisión	139
6.4.	Estabilidad de frecuencias	140
6.5.	Cobertura y áreas del enlace	140
6.6.	Normatividad	141
6.7.	Seguridad y protección de las instalaciones	142

Índice de figuras

1.1.	Figura A.Sistema Unidireccional	14
1.2.	Figura B.Sistema Bidireccional	14
1.3.	Espectro de frecuencias electromagnéticas	16
1.4.	Espectro de la longitud de onda electromagnética	16
1.5.	Transmisión Simplex	20
1.6.	Transmisión Half Duplex	21
1.7.	Transmisión Full Duplex	21
1.8.	Transmisión Full / Full Duplex	22
1.9.	Índice de ruido;(a) amplificador ideal, libre de ruido; (b) amplificador con ruido generado internamente.	27
2.1.	Onda plana	29
2.2.	Frente de onda, desde una fuente puntual	30
2.3.	Refracción en una frontera plana entre dos medios	32
2.4.	Refracción de frente de onda en un medio gradiente	34
2.5.	La reflexión electromagnética en una frontera plana de dos medios	34
2.6.	Suma lineal de dos vectores con diferentes ángulos de fase	38
2.7.	Interferencia de onda electromagnética	38
2.8.	Propagación de ondas espaciales	41
2.9.	Ondas Espaciales y Radio Horizonte	42
2.10.	Propagación de Ducto	43
3.1.	Diagrama a bloques del sistema de comunicaciones	48
3.2.	Sistema de microondas con diversidad de frecuencia; (a) transmisor, (b) receptor.	51
3.3.	Sistema de microondas con diversidad de espacio: (a) transmisor; (b) receptor.	53
3.4.	Arreglos de conmutación (interruptor) de protección de microondas: respaldo en línea	61
3.5.	Arreglos de conmutación (interruptor) de protección de microondas: diversidad	62
4.1.	Haz principal y lóbulos laterales para una antena de microondas típica.	67
4.2.	Geometría de una parábola	69
4.3.	Antena parabólica con alimentación central.	74
4.4.	Antena parabólica con alimentación de corneta: (a) alimentación de corneta; (b) tipos de guía de onda de cornetas.	76
4.5.	Antena parabólica con una alimentación Cassegrain.	76
4.6.	Ancho del haz de la antena	79

4.7. Torre Arriostrada	86
4.8. Torre sobre viga metálica	86
4.9. Torre autoportada y su Cimentación	87
4.10. Torre monopolo y su Cimentación	88
4.11. Parámetros para la ganancia del sistema	90
4.12. Ganancias y pérdidas del sistema.	90
5.1. Carta Topográfica	96
5.2. Grafica de tres cuartos en MATLAB	98
5.3. Enlace UAEH-Actopan	101
5.4. Poligonal UAEH-C.Cumbres	102
5.5. Poligonal C.Cumbres-Puerto la Palma	102
5.6. Poligonal Puerto la Palma-Actopan	103
5.7. Diagrama de uso de frecuencias	103
5.8. Trayectorias de propagación	113
5.9. Dimensiones	130
5.10. Transmisor-Receptor	131
5.11. Repetidor pasivo	134
5.12. Torre Arriostrada	135

Índice de cuadros

1.1. Espectro de frecuencia de radio (RF)	18
3.1. Transformación de los bits de datos en la modulación QPSK	55
5.1. Elementos del perfil topográfico	97
5.2. Equipo contemplado	128
5.3. Características de la antena	129
5.4. Características técnicas de la transmisión	133

Introducción

Para poder tener una mejor concepción de lo que es un sistema de comunicación electrónica se debe tener algunos conocimientos generales en esta área, por lo que en el capítulo I hablamos acerca de los aspectos generales que involucran una comunicación en general.

No cabe duda que es de vital importancia estudiar la forma en que los fenómenos físicos afectan en la propagación de las ondas por medio de las cuales vamos a transmitir la información, de ahí la importancia de estar consciente de los posibles fenómenos y propiedades de las ondas al propagarse en un medio dado por esto es que en el capítulo II explicamos estas propiedades y algunas otras características que serán la base para realizar una comunicación entre estos dos puntos de manera eficiente.

Hoy en día la comunicación a distancia no sería posible sin el apoyo de equipo sofisticado para realizar esto de una manera rápida, fácil y eficiente, en el capítulo III hablamos del equipo que se requiere para hacer un enlace de comunicaciones.

En la mayoría de los casos la técnica en que se tenga planeada realizar la comunicación es factor fundamental de que ésta se lleve a cabo con éxito o no, como sabemos existen muchas técnicas para la transmisión de la información, en el capítulo IV hablamos de algunas de ellas.

En el capítulo V se describen la mayoría de las características de este trabajo ya que aquí están englobadas todos los factores que consideramos de importancia para el desarrollo de este trabajo de tesis.

Para mantener un orden en el aprovechamiento de los recursos que nos sirven para llevar a cabo nuestro enlace en el capítulo VI describimos la reglamentación que se sujeta este trabajo con respecto a la Ley Federal de Telecomunicaciones.

Antecedentes

El campo de las microondas es a menudo considerado como una disciplina madura porque los conceptos fundamentales del electromagnetismo fueron desarrollados desde hace 100 años, y probablemente el radar, que esta siendo la mayor aplicación de la tecnología de las microondas, que fue intensivamente desarrollado hasta antes de la segunda guerra mundial. Pero aunque la ingeniería de microondas tuvo sus inicios en el ultimo siglo, los desarrollos significativos en alta frecuencia, dispositivos de estado sólido, circuitos integrados de microondas y amplias aplicaciones de microsistemas modernos han mantenido el campo activo y vibrante.[18]

Los fundamentos de la teoría electromagnética moderna fueron formulados en 1873 por James Clerk Maxwell, quien supuso, únicamente de las consideraciones matemáticas, la propagación de ondas electromagnéticas y la noción de que la luz tenía una forma de energía electromagnética. La formulación de Maxwell tuvo un alcance en esta forma moderna por Oliver Heaviside, durante el periodo de 1885 a 1887. Heaviside fue un genio ya que gracias a sus esfuerzos eliminó muchas de las complejidades matemáticas de la teoría de Maxwell, introdujo notación vectorial y proporcionó los fundamentos para aplicaciones prácticas de guías de onda y de líneas de transmisión. Heinrich Hertz, un profesor alemán de física y científico experimentalista quien también entendió la teoría explicada por Maxwell, llevándola a sus experimentos durante 1887 - 1891 que validó por completo la teoría electromagnética de Maxwell.[1]

Todas las aplicaciones prácticas de la teoría electromagnética , incluyendo radio, televisión y radar, deben su existencia a los trabajos teóricos de Maxwell.[1]

El rápido crecimiento de la tecnología de radio comenzó a principios de 1900, ocurrió primeramente en el rango de la alta frecuencia (HF) y de la muy alta frecuencia(VHF). No fue hasta 1940 que con la llegada del desarrollo del radar en la segunda guerra mundial que la teoría de las microondas y la tecnología recibieron un interés substancial. En los Estados unidos, el laboratorio de Radiación fue establecido en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), para practicar y desarrollar la teoría del radar. Un grupo de los mejores científicos incluyendo a N. Marcuvitz, I. I. Rabi, J.S. Schwinger, H. A. Bethe, E. M. Purcell, C. G. Montgomery Burns y R. H. Dicke, entre otros, fueron turnados para que realizaran un muy intensivo periodo de desarrollo en el campo de las microondas. Su trabajo incluyó el tratamiento Teórico y Experimental de los componentes de la guía de onda, las antenas de microondas, la teoría de acoplamiento de poca apertura, y los comienzos de la teoría de las redes de microondas.[1]

Muchos de estos investigadores fueron físicos quienes regresaron a la investigación después de la guerra (Mucho después recibieron premios Nobel), pero sus trabajos sobre microondas están agregados en el volumen 28 de la serie clásica de libros del Laboratorio de Radiación que aún encuentran aplicación hoy en día. Los sistemas de comunicación, usando la tecnología de microondas comenzaron a ser desarrollados poco después del nacimiento del radar, ya que se beneficiaron mucho del trabajo que originalmente fue hecho por los sistemas de radar. Las ventajas ofrecidas por los sistemas de microondas, incluyendo la amplitud de los anchos de banda y la propagación de la línea de vista han sido necesarias para sistemas de comunicación terrestre y sistemas de comunicación satelital y así han provisto un gran estímulo a el continuo desarrollo de los componentes de microondas miniaturizados a bajo costo.[1]

Planteamiento del Problema

La comunicación que se debe tener en diversas empresas, instituciones u otras organizaciones, hoy en día, es de vital importancia, y en el caso de que tengan filiales, dependencias o sucursales las cuales requieran información de cualquier índole, es de gran trascendencia el estar en contacto con su respectiva matriz o sede para así hacer dicho intercambio de información; esto se aplica para la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo con sus diversas filiales o campus que tiene en todo el estado; la importancia que tiene el intercambio de información entre los distintos campus y la ciudad universitaria ubicada en la ciudad de Pachuca, es de gran magnitud, ya que se necesita estar en constante contacto con mucha información tanto administrativa como académica y en muchas ocasiones se requiere que sea con una gran anticipación, esto para un mejor desempeño organizacional y laboral en dicha universidad. Además de que día a día como resultado de una constante evolución, la universidad tiende a incrementar sus necesidades para comunicarse por lo que es necesario hechar mano a nuevos medios que permitan hacer de estas necesidades, una realidad, de ahí que al implementar nuevas tecnologías se requiera una base sólida que respalde la implementación de servicios que permitan realizar una comunicación confiable y segura como lo serían por ejemplo, servicios de voz, videoconferencias, incrementar la capacidad en la transferencia de datos, los que con el enlace que se tiene en la actualidad no sería suficiente para la implementación de estos servicios ya que el ancho de banda disponible no sería suficiente; dando como resultado una saturación y congestión de los enlaces con la consecuente degradación del servicio.

El proyecto a presentar implica una comunicación directa, solo entre el campus de Actopan y la ciudad universitaria sede en Pachuca, esto con la asistencia de un enlace terrestre via microondas.

Objetivos

Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es el de establecer una ruta de enlace terrestre vía microondas entre la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (Ciudad Universitaria que se encuentra ubicada en Pachuca) y el campus perteneciente a la misma, ubicado en Actopan, esto con la finalidad de obtener una ruta óptima que nos permita la comunicación bidireccional entre ambas ciudades.

Objetivo Particular

Obtener resultados teóricos sobre un enlace vía microondas. Diseñar una ruta eficiente y segura entre Pachuca y Actopan. Calcular los parámetros que influyen en el enlace (Ganancias, pérdidas, zona de Fresnell, etc.) Investigar las características de los componentes que permitan un enlace óptimo (antenas, guías de onda, transmisores, receptores, etc)

Justificación

Debido a la dependencia que tiene el campus de Actopan con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en el intercambio de información, es de vital importancia que se encuentren comunicadas, por lo que como una alternativa más a esta necesidad proponemos establecer un enlace de comunicación terrestre vía microondas entre estos sitios.

Otra de las razones por la que proponemos el establecimiento de un enlace de microondas se debe a que éstas son más económicas, seguras y poseen otras grandes ventajas sobre un enlace por cable. Algunas de estas ventajas se muestran a continuación:

*Cada estación para la transmisión / recepción vía microondas requiere la compra o alquiler de una pequeña extensión de terreno a diferencia de los enlaces por cable que requiere mayor extensión de terreno debido a la instalación de ductos para enlazar los puntos que se requiera comunicar.

*Las señales se propagan con más facilidad en torno a obstáculos físicos por lo que hace más fiable la comunicación.

*Para la amplificación se requieren menos repetidoras.

*Se introducen tiempos mínimos de retardo.

*Mayor fiabilidad y menor mantenimiento.

Para el desarrollo teórico de este trabajo se analizaron diferentes componentes que permitirán la mejor comunicación entre ambas ciudades. Los dispositivos usados en este enlace son: torres, antenas, transmisores, receptores, etc. Las especificaciones de estos dispositivos se verán mas adelante en este trabajo.

Capítulo 1

INTRODUCCION A LAS COMUNICACIONES RADIOELECTRICAS

1.1. Introducción

El propósito de este capítulo es introducir los conceptos fundamentales de los sistemas de comunicaciones electrónicas y explicar algo de la terminología básica necesaria para entender los temas más complejos que serán analizados más adelante.

En esencia, comunicaciones electrónicas es la transmisión, de recepción y procesamiento de información usando circuitos electrónicos. Información se define como el conocimiento, la sabiduría o la realidad y puede ser en forma analógica (proporcional o continua), tal como la voz humana, información sobre una imagen de video o música, o en forma digital (etapas discretas), tales como números codificados en binario, códigos alfanuméricos, símbolos gráficos, códigos operacionales de microprocesador o información de base de datos. Toda la información debe convertirse en energía electromagnética, antes de que pueda propagarse por un sistema de comunicaciones electrónicas.

En la figura 1.1 se muestra un diagrama a bloques simplificado de un sistema de comunicaciones electrónicas mostrando la relación entre la información de la fuente original, el transmisor, el medio de transmisión (conducto), el receptor y la información recibida en el destino. Como se muestra en la figura, un sistema de comunicaciones electrónicas consiste en tres secciones primarias: un transmisor, un medio de transmisión y un receptor. El transmisor convierte la información original de la fuente a una forma más adecuada

para la transmisión, el medio de transmisión proporciona un medio de conexión entre el transmisor y el receptor (tal como un conductor metálico, una fibra óptica o espacio libre), y el receptor convierte la información recibida a su forma original y la transfiere a su destino. La información original puede originarse de una variedad de fuentes diferentes y ser de forma analógica o digital. El sistema de comunicaciones mostrado en la figura 1 es capaz de transmitir información solamente en una dirección (de la estación A a la estación B), mientras que el sistema de comunicaciones mostrado en la figura 1.2 es capaz de transmitir información en ambas direcciones (de la estación A a la estación B y de la estación B a la estación A).

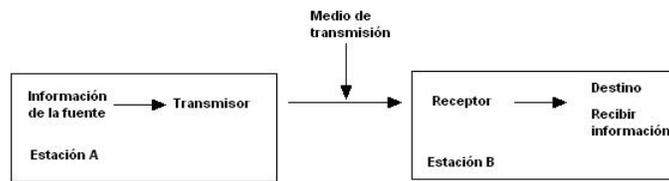


Figura 1.1: Figura A.Sistema Unidireccional

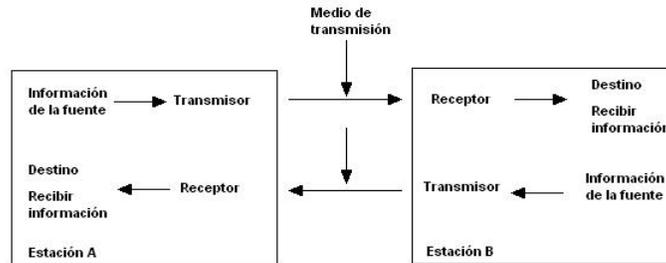


Figura 1.2: Figura B.Sistema Bidireccional

Cuando se transmite información a partir de muchas fuentes sobre un medio de transmisión común, la información deber combinarse en una señal de información compuesta sencilla. El proceso de combinar la información en una señal de información compuesta se le llama multicanalización, y al proceso de separar la información se le llama desmulticanalización.

Existe dos tipos básicos de sistemas de comunicaciones electrónicas: analógico y digital. Un sistema de comunicaciones analógico es un sistema en el cual la energía electromagnética se transmite y recibe en forma analógica (una señal variando continuamente tal como una onda senoidal). Los sistemas de

radio comerciales emiten señales analógicas. Un sistema de comunicaciones digital es un sistema en el cual la energía electromagnética se transmite y recibe en forma digital (niveles discretos tal como +5V y tierra). Los sistemas binarios utilizan señales digitales que sólo tienen dos niveles discretos (bi significa dos). Frecuentemente la información de la fuente original está en forma que no es adecuada para la transmisión y debe convertirse en forma más adecuada antes de la transmisión. Por ejemplo, con los sistemas de comunicaciones digitales, la información analógica se convierte a una forma digital antes de la transmisión, y con los sistemas de comunicaciones analógicas, la información digital se convierte a la forma analógica antes de la transmisión.

Los sistemas de comunicaciones analógicas fueron los primeros en desarrollarse; sin embargo, en los últimos años los sistemas de comunicaciones digitales se han hecho más comunes.

1.2. El Espectro Electromagnético

El propósito de un sistema de comunicaciones electrónicas es comunicar información entre dos o más ubicaciones (generalmente llamadas estaciones). Esto se logra convirtiendo la información de la fuente original a energía electromagnética y después transmitiendo la energía a uno o más destinos, en donde se convierte de nuevo a su forma original. La energía electromagnética puede propagarse en varios modos como un voltaje o una corriente a través de un cable metálico, como ondas de radio emitidas por el espacio libre o como ondas de luz por una fibra óptica.

La energía electromagnética está distribuida a través de un rango de frecuencias infinito. El espectro de frecuencias electromagnéticas total que muestra localizaciones aproximadas de varios servicios dentro de la banda se enseña en la figura 1.3. Puede verse que el espectro de frecuencias se extiende desde las frecuencias subsónicas (unos cuantos hertz) a los rayos cósmicos, (10^{22} Hz). Cada banda de frecuencias tiene una característica única que la hace diferente de las otras bandas.

Cuando se trata de ondas de radio, es común usar unidades de la longitud de onda en vez de la frecuencia. La longitud de onda es la longitud que

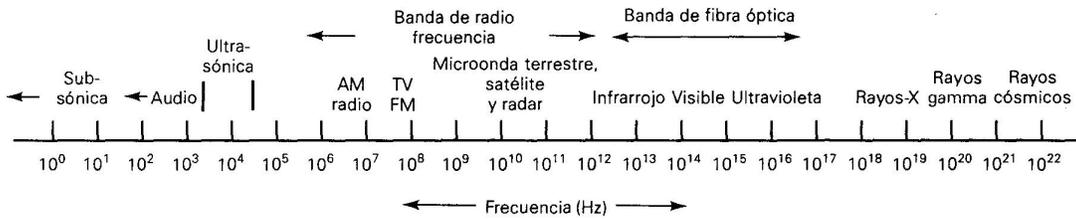


Figura 1.3: Espectro de frecuencias electromagnéticas

un ciclo de una onda electromagnética ocupa en el espacio libre (es decir, la distancia entre los puntos semejantes en una onda repetitiva). La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda y directamente proporcional a la velocidad de propagación (la velocidad de propagación de la energía electromagnética en el espacio libre se asume que sea la velocidad de la luz, $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$). La relación entre la frecuencia, velocidad y longitud de onda se expresa matemáticamente como:

$$\lambda = \text{velocidad} / \text{frecuencia} \tag{1.1}$$

En donde :

- λ = longitud de onda (metros por ciclo)
- c = velocidad de la luz ($300\,000\,000 \text{ m/s}$)
- f = frecuencia (hertz)

El espectro total de la longitud de onda electromagnética que enseña varios servicios dentro de la banda está mostrado en la figura 1.4.

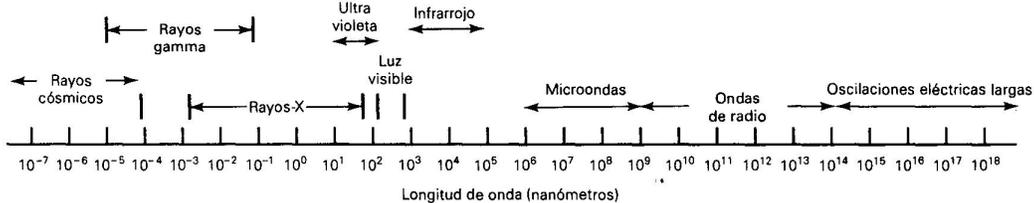


Figura 1.4: Espectro de la longitud de onda electromagnética

1.2.1. Frecuencias de Transmisión

El espectro total de la frecuencia electromagnética está dividido en subsectores o bandas. Cada banda tiene un nombre y límites. En la mayor parte de los países, las asignaciones de frecuencias para la propagación de radio en espacio libre, son asignadas por la UIT. Sin embargo, la división general del espectro de frecuencia totalmente utilizable se decide en las Convenciones Internacionales de Telecomunicaciones, las cuales son realizadas aproximadamente cada 10 años .

El espectro de frecuencia de radio (RF) totalmente utilizable se divide en bandas de frecuencia mas angostas, las cuales son asignadas con nombres descriptivos y números de banda. Las designaciones de banda del Comité Internacional de Radio (CCIR), se muestran en la tabla 1.1. Varias de estas bandas se dividen en diversos tipos de servicios, tales como una búsqueda a bordo de un barco, microondas, satélite, búsqueda móvil basada en tierra, navegación en barco, aproximación de aeronaves, detección de superficie de aeropuerto, clima desde aeronaves, teléfono móvil y muchos más.

NUMERO DE LA BANDA	RANGO DE LA FRECUENCIA	DESIGNACIONES
2	30 - 300 Hz	ELF (Frecuencias Extremadamente bajas)
3	0,3 - 3 KHz	VF(Frecuencias de Voz)
4	3 - 30 KHz	VLF(Frecuencias Muy Bajas)
5	30 - 300 KHz	LF(Frecuencias Bajas)
6	0,3 - 3 MHz	MF(Frecuencias Medias)
7	0,3 - 30 MHz	HF(Frecuencias Altas)
8	30 - 300 MHz	VHF(Frecuencias Muy Altas)
9	0,3 - 3 GHz	UHF(Frecuencias Ultra Altas)
10	0,3 - 30 GHz	SHF(Frecuencias Super Altas)
11	30 - 300 GHz	EHF(Frecuencias Extremadamente Altas)
12	0,3 - 3 THz	Luz Infrarroja
13	0,3 - 30 THz	Luz Infrarroja
14	30 - 300 THz	Luz Infrarroja
15	0,3 - 3 PHz	Luz visible
16	0,3 - 30 PHz	Luz Ultravioleta
17	30 - 300 PHz	Rayos X
18	3 - 3 Ehz	Rayos Gamma
19	0,3 - 30EHz	Rayos C3smicos

Cuadro 1.1: Espectro de frecuencia de radio (RF)

1.3. Ancho de Banda y Capacidad de Informaci3n

Las dos limitaciones m3s significativas en el funcionamiento del sistema de comunicaciones son: el ruido y el ancho de banda. La importancia del ruido se analizar3 m3s adelante en este cap3tulo. El ancho de banda de un sistema de comunicaciones es la banda de paso m3nima (rango de frecuencias) requerida para propagar la informaci3n de la fuente a trav3s del sistema. El ancho de banda de un sistema de comunicaciones debe ser lo suficientemente grande (ancho) para pasar todas las frecuencias significativas de la informaci3n

La capacidad de información de un sistema de comunicaciones es una medida de cuanta información de la fuente puede transportarse por el sistema, en un periodo dado de tiempo. La cantidad de información que puede propagarse a través de un sistema de transmisión es una función de ancho de banda del sistema y el tiempo de transmisión.

La relación entre el ancho de banda, tiempo de transmisión y capacidad de información fue desarrollada en 1920 por R. Hartley de los Laboratorios Telefónicos Bell. De manera sencilla, la ley de Hartley es:

$$I \propto Bxt \quad (1.2)$$

En donde:

$$\begin{aligned} I &= \text{Capacidad de información} \\ B &= \text{Ancho de banda} \\ t &= \text{tiempo de transmisión (segundos)} \end{aligned}$$

La ecuación 1.2 muestra que la capacidad de información es una función lineal y directamente proporcional al ancho de banda del sistema y al tiempo de transmisión. Si se modifica el ancho de banda o el tiempo de transmisión, ocurrirá un cambio directamente proporcional en la capacidad de información.

Se requiere aproximadamente 3 KHz de ancho de banda para transmitir señales telefónicas con calidad de voz. Se requieren mas de 200 KHz de ancho de banda para la transmisión de FM comercial de música de alta fidelidad y se necesitan casi 6 MHz de ancho de banda para las señales de televisión con una calidad de radio difusión (es decir, cuando mayor sea la cantidad de información por unidad de tiempo, mayor será la cantidad de ancho de banda requerida).

1.4. Modos de Transmisión

Los sistemas de comunicaciones electrónicas pueden diseñarse para manejar la transmisión solamente en una dirección, en ambas direcciones pero sólo uno a la vez, o en ambas direcciones al mismo tiempo. Esto se llama modos de transmisión. Cuatro modos son posibles: Simplex, Half-Duplex, Full-Duplex y Full/Full-Duplex.

■ **SIMPLEX (SX)**

Con la operación simplex, las transmisiones pueden ocurrir en una sola dirección. Los sistemas simplex son, algunas veces, llamados sistemas de un sentido, solo para recibir o solo para transmitir. Una ubicación puede ser un transmisor o un receptor, pero no ambos. Un ejemplo de la transmisión simplex es la radio difusión de la radio comercial o de televisión; la estación de radio siempre transmite y el usuario siempre recibe.

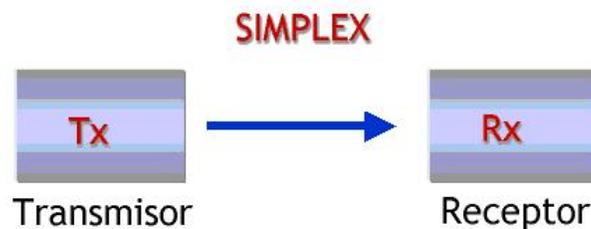


Figura 1.5: Transmisión Simplex

■ **HALF-DUPLEX (HDX)**

Con una operación half-duplex, las transmisiones pueden ocurrir en ambas direcciones, pero no al mismo tiempo. A los sistemas Half-duplex, algunas veces se les llama sistemas con alternativa de dos sentidos, cualquier sentido o cambio y fuera. Una ubicación puede ser un transmisor y un receptor pero no los dos al mismo tiempo. Los sistemas de radio de doble sentido que utilizan los botones oprima para hablar (PTT), para operar sus transmisores, como los radios de banda civil y de banda

policiaca son ejemplos de transmisión half-duplex.

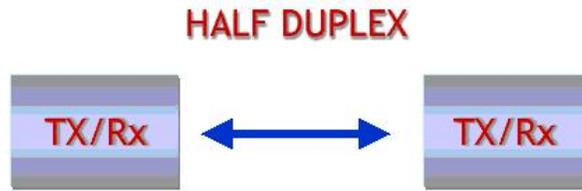


Figura 1.6: Transmisión Half Duplex

- **FULL-DUPLEX (FDX)**

Con una operación full-duplex, las transmisiones pueden ocurrir en ambas direcciones y al mismo tiempo. A los sistemas de full-duplex algunas veces se les llama línea simultánea de doble sentido, dúplex o de ambos sentidos. Una ubicación puede transmitir y recibir simultáneamente; sin embargo, la estación a la que está transmitiendo también debe ser la estación de la cual está recibiendo. Un sistema telefónico estándar es un ejemplo de una transmisión full-duplex.

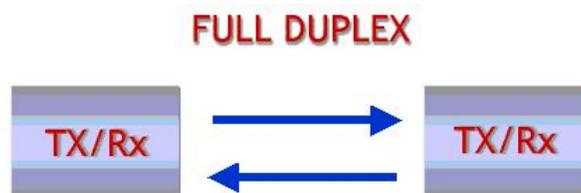


Figura 1.7: Transmisión Full Duplex

- **FULL / FULL-DUPLEX**

Con una operación full / full duplex es posible transmitir y recibir simultáneamente, pero no necesariamente entre las dos mismas ubicaciones (es decir, una estación puede transmitir a una segunda estación y recibir de una tercera estación al mismo tiempo). Las transmisiones full / full-duplex se utilizan casi exclusivamente con circuitos de comunicaciones de datos.

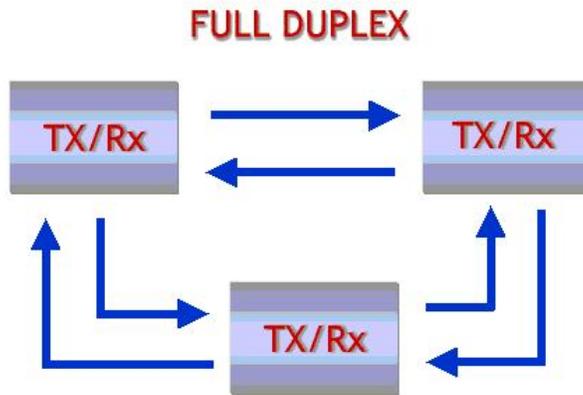


Figura 1.8: Transmisión Full / Full Duplex

1.5. Tipos de Ruido

1.5.1. Ruido de disparo

El ruido de disparo es causado por la llegada aleatoria de portadoras (huecos y electrones) en el elemento de salida de un dispositivo electrónico, tal como un diodo, transistor de efecto de campo (FET), transistor bipolar (BJT) o tubo de vacío. El ruido de disparo fue observado por primera vez en la corriente del ánodo de los amplificadores de tubo de vacío y fue descrito por W. Schottky en 1918. Las portadoras de corriente (para ca y cd) no se mueven en un flujo continuo y estable porque la distancia con que viajan varía debido a sus trayectorias de movimiento aleatorio. El ruido de disparo está variando aleatoriamente y está sobreimpuesto en cualquier señal presente. El ruido de disparo, cuando se amplifica, suena como una lluvia de bolitas de metal que caen sobre un techo de estaño. El ruido de disparo algunas veces se le llama ruido de transistor. El ruido de disparo es proporcional a la carga de un electrón (1.6×10^{19}), corriente directa y ancho de banda del sistema. Además, la potencia de ruido de disparo es aditivo con el ruido térmico y otro ruido de disparo.[4]

1.5.2. Ruido correlacionado

El ruido correlacionado es una energía eléctrica no deseada que está presente como un resultado directo de una señal, tales como las distorsiones armónica y de intermodulación. Las distorsiones armónica y de intermodulación son formas de distorsión no lineal; son producidas por la amplificación no lineal. El ruido correlacionado no puede estar presente en un circuito a menos que exista una señal de entrada. Simplemente dicho, no hay señal, por lo tanto, no hay ruido.

Distorsión armónica. La distorsión armónica, son los múltiplos no deseados de la onda seno de frecuencia simple que se crean cuando la onda seno se amplifica en un dispositivo no lineal, como un amplificador de señal grande. La distorsión de amplitud es otro nombre para la distorsión armónica. Generalmente, el término distorsión de amplitud se usa para analizar una forma de onda en el dominio del tiempo y el término distorsión armónica se usa para analizar una forma de onda en el dominio de la frecuencia. La frecuencia original de entrada es la primera armónica y se le llama frecuencia fundamental.

Existen varios grados u órdenes de distorsión armónica. La distorsión armónica de segundo orden es la relación de la amplitud rms de la frecuencia de la segunda armónica a la amplitud rms de la frecuencia fundamental. La distorsión armónica de tercer orden es la relación de la amplitud rms de la frecuencia de la tercera armónica a la amplitud misma de la frecuencia fundamental, y así sucesivamente. A la relación de las amplitudes rms combinadas de las armónicas superiores con la amplitud rms de la frecuencia fundamental se le llama la distorsión armónica total (THD). Matemáticamente, la distorsión armónica total es:

$$\%THD = \frac{V(alto)}{V(fund)} \times 100 \quad (1.3)$$

en donde:

V(alto) = suma cuadrática de los voltajes medios (rms) de las armónicas superiores

$$V(alto) = \sqrt{[V_2^2 + V_3^2 + V_n^2]}$$

V(fund)= voltaje rms de la frecuencia fundamental

1.5.3. Ruido de intermodulación

El ruido de intermodulación son las frecuencias no deseadas del producto cruzado (sumas y diferencias) creadas cuando dos o más señales son amplificadas en un dispositivo no lineal, tal como un amplificador de señal grande. Como con la distorsión armónica, hay varios grados de distorsión de intermodulación. Seria imposible medir todos los componentes de intermodulación producidos cuando dos o más frecuencias se mezclan en un dispositivo no lineal.

1.5.4. Varios tipos de ruido

Ruido excesivo. El ruido excesivo es una forma de ruido interno no correlacionado que no es totalmente entendible. Se encuentra en los transistores y es directamente proporcional a la corriente del emisor y la temperatura de junta (o unión) e inversamente proporcional a la frecuencia. El ruido excesivo también es llamado ruido de baja frecuencia, ruido parpadeante, ruido 1/f y ruido de modulación. Se cree que es causado por o al menos asociado con las trampas de portadoras en la capa de agotamiento del emisor de los transistores. Estas trampas detienen y sueltan los huecos y electrones en diferentes proporciones, pero con niveles de energía que varían inversamente con la frecuencia. El ruido excesivo es insignificante arriba de aproximadamente 1 kHz.

Ruido de resistencia. El ruido de resistencia es una forma de ruido térmico que está asociada con la resistencia interna de la base, el emisor y el colector de un transistor. El ruido de resistencia es bastante constante desde 500 Hz hacia arriba y puede, por lo tanto, ser más fuerte con el ruido térmico.

Ruido de precipitación. El ruido de precipitación es un tipo de ruido estático causado cuando un avión pasa a través de nieve o de la lluvia. El avión se carga de manera eléctrica a un potencial lo suficientemente alto con respecto al espacio que lo rodea que una descarga de corona (descarga luminosa) ocurre en un punto exacto en el avión. La interferencia de la precipitación estática es más molesta en las frecuencias de onda corta y menores.

La relación señal a ruido. La relación señal a ruido (S/N) es una relación matemática sencilla del nivel de la señal con respecto al nivel de ruido en un punto dado del circuito, el amplificador o el sistema. La relación de señal-a-ruido puede expresarse como una relación de potencia. Matemáticamente, S/N es:

$$S/N = \left[\frac{\text{Voltaje_de_la_señal}}{\text{Voltaje_del_ruido}} \right]^2 = \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^2 \quad (1.4)$$

$$S/N = \left[\frac{\text{Potencia_de_la_señal}}{\text{Potencia_del_ruido}} \right] = \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (1.5)$$

La relación de señal-a-ruido se expresa frecuentemente como una función logarítmica con la unidad de decibel.

Para las relaciones de voltaje,

$$S/N(dB) = 20 \log \frac{V_s}{V_n} \quad (1.6)$$

Para las relaciones de potencia,

$$S/N(dB) = 10 \log \frac{P_s}{P_n} \quad (1.7)$$

Si las resistencias de entrada y salida del amplificador, receptor o red siendo evaluadas son iguales, la relación de potencia de la señal potencia-de-ruido será igual a las relaciones cuadráticas del voltaje de la señal al voltaje-de-ruido.

La relación de señal-a-ruido probablemente sea el parámetro más importante y frecuentemente usado para evaluar el funcionamiento de un amplificador en un sistema completo de comunicaciones de radio o para comparar el funcionamiento de un amplificador o sistema con otro. Entre más alta sea la relación señal-a-ruido, mejor será el funcionamiento del sistema. De la relación señal-a-ruido, se puede determinar la calidad general de un sistema.

Factor de ruido e índice de ruido. El factor de ruido (F) y el índice de ruido (NF) son índices que indican la degradación en la relación señal-a-ruido conforme la señal se propaga por un amplificador sencillo, una serie de amplificadores o un sistema de comunicaciones. El factor de ruido es la relación de la relación señal-a-ruido de entrada, entre la relación señal-a-ruido de salida. Así que, el factor de ruido es una relación de relaciones. Matemáticamente, este factor se escribe como:

$$F = \left[\frac{\text{Relación_señal_a_ruido_de_entrada}}{\text{Relación_señal_a_ruido_de_salida}} \right] \quad (1.8)$$

El índice de ruido es el factor de ruido expresado en forma logarítmica. Matemáticamente, este índice es:

relación señal-a-ruido de entrada

$$NF(dB) = 10 \log \left[\frac{\text{Relación_señal_a_ruido_de_entrada}}{\text{Relación_señal_a_ruido_de_salida}} \right] \quad (1.9)$$

relación señal-a-ruido de salida

$$NF(dB) = 10 \log F \quad (1.10)$$

Un amplificador amplificará igualmente todas las señales y ruido presentes en la entrada que caen dentro de su banda. Por lo tanto, si el amplificador es ideal y libre de ruido, la señal y el ruido se amplifican por el mismo factor y la relación señal-a-ruido en la salida del amplificador será igual a la relación señal-a-ruido en la entrada. Sin embargo, en la realidad, los amplificadores no son dispositivos ideales libres de ruido. Por lo tanto, aunque la señal de entrada y el ruido se amplifican igualmente, el dispositivo agregará a la forma de

onda un ruido generado internamente, reduciendo la relación general señal-a-ruido. La forma más predominante de ruido eléctrico es el ruido térmico, el cual se generan en todos los componentes eléctricos. Por lo tanto, todas las redes, amplificadores y sistemas agregan ruido a la señal y así reducen la relación total señal-a- ruido, conforme la señal pasa por ellas.

La figura 1.12 en su inciso a) muestra un amplificador ideal libre de ruido con una ganancia en potencia (A_p), un nivel de señal de entrada (S_i) y un nivel de entrada de ruido (N). Puede verse que la relación S/N a la salida es igual a la relación S/N a la entrada. En la figura 1.12 en su inciso b), se muestra el mismo amplificador excepto que, en vez de ser ideal y libre de ruido, agregará ruido generado internamente (N_d) a la forma de onda.

En la figura 1.12 inciso b), también puede verse que la relación S/N a la salida es menor que la relación S/N a la entrada por una cantidad proporcional a N_d . Además, puede observarse que el índice de ruido de un dispositivo perfectamente libre de ruido es 0 dB.

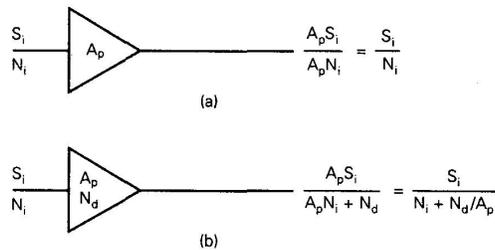


Figura 1.9: Índice de ruido;(a) amplificador ideal, libre de ruido; (b) amplificador con ruido generado internamente.

Capítulo 2

PROPAGACION DE ONDAS RADIOELECTRICAS

2.1. Introducción

Los fenómenos de naturaleza electromagnética tienen, entre otras las características de propagarse, es decir, de dar lugar a un transporte de energía entre dos puntos del espacio. Este hecho se expresa matemáticamente por medio de ecuaciones de tipo análogo a las que representan los movimientos ondulatorios de los cuerpos materiales, de los que el hombre tiene una percepción más directa. Hertz fue el primero que comprobó experimentalmente la propagación de las ondas electromagnéticas por el espacio; por este motivo se denomina ondas hertzianas a las ondas radioeléctricas o de radio. El ámbito de las ondas electromagnéticas comprende amplios grupos de fenómenos físicos que, en principio, se consideraron netamente distintos y se atribuyeron a entes diversos, como los rayos gama, los rayos X, las radiaciones luminosas, caloríficas y hertzianas. Sin embargo, únicamente se diferencian por la gama de frecuencias de vibración que se asigna a cada grupo y a la cual, sustancialmente, se asocia también a la estructura de los sistemas físicos sensibles a dichas radiaciones.

La transmisión sin hilos de señales codificadas voz y música en la radio; voz, música e imagen en la TV; datos en las computadoras- es uno de los más notables descubrimientos de la civilización. Las ondas electromagnéticas que llevan éstas señales por el aire y a través de distancias considerables por el espacio exterior interplanetario, a la velocidad de la luz de 300,000,000 metros

por segundo, son punto menos que milagros.

El propósito de este capítulo es el de dar a conocer las diferentes características que tienen las ondas electromagnéticas, así como la importancia que tienen hoy en día las ondas electromagnéticas en la mayoría de las transmisiones.

2.2. Haz radioeléctrico y frentes de ondas

Las ondas electromagnéticas son invisibles. Por lo tanto, deben analizarse por métodos indirectos, utilizando diagramas esquemáticos. Los conceptos de rayos y frentes de ondas ayudan para ilustrar los efectos de la propagación de la onda electromagnética por el espacio libre. Un rayo es una línea dibujada a lo largo de la dirección de propagación de la onda electromagnética. Los rayos se usan para mostrar la dirección relativa de la propagación de la onda electromagnética. Sin embargo, un rayo no necesariamente representa la propagación de una sola onda electromagnética. Varios rayos se muestran en la figura 2.1 (Ra, Rb, Rc, etc.). Un frente de onda muestra una superficie de fase constante de una onda. Un frente de onda se forma cuando los puntos de igual fase sobre rayos propagados de la misma fuente se unen. La figura 2.1 muestra un frente de onda con una superficie que es perpendicular a la dirección de propagación (rectángulo ABCD). Cuando la superficie es plana, su frente de onda es perpendicular a la dirección de propagación. Entre más cerca está a la fuente, más complicado se hace el frente de onda.[8]

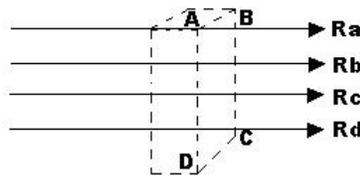


Figura 2.1: Onda plana

La mayoría de los frentes de onda son más complicados que una onda plana sencilla. La figura 2.2 muestra una fuente puntual, propagando varios rayos a partir de él, y el frente de onda correspondiente. Una fuente puntual es una ubicación sencilla en la cual los rayos se propagan igualmente, en todas las direcciones (una fuente isotrópica). El frente de onda generado de una fuente puntual simplemente es una esfera con radio R y su centro está ubicado en el punto de origen de las ondas. En el espacio libre y a una distancia suficiente de la fuente, los rayos dentro de un área pequeña de un frente de onda esférica, son casi paralelos. Por lo tanto, entre más lejos esté de la fuente, más parece la propagación de ondas como un frente de onda plana.

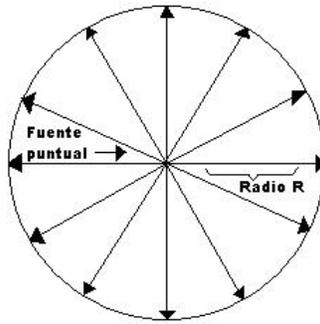


Figura 2.2: Frente de onda, desde una fuente puntual

2.3. Propiedades ópticas de las ondas de radio

En la atmósfera de la Tierra, la propagación del frente de onda-rayo puede alterarse por el comportamiento del espacio libre por efectos ópticos como la refracción, reflexión, difracción, e interferencia. Utilizando una terminología no científica, la refracción puede describirse como un doblamiento; la reflexión, como un alto, la difracción, como esparcimiento y la interferencia, como una colisión. La refracción, la reflexión, difracción e interferencia se llaman propiedades ópticas, la cual es comportamiento de la onda de luz. Debido a que las ondas de la luz son ondas electromagnéticas de alta frecuencia, tiene sentido decir que las propiedades ópticas también se aplican a la propagación de las ondas de radio. Aunque los principios ópticos pueden analizarse

completamente por la aplicación de las ecuaciones de Maxwell, esto es necesariamente complejo. Para la mayoría de las aplicaciones, el trazo de rayos geométricos se puede sustituir por el análisis de las ecuaciones de Maxwell.[8]

2.3.1. Refracción

La refracción electromagnética es el cambio de dirección de un rayo conforme pasa oblicuamente, de un medio a otro, con diferentes velocidades de propagación. La velocidad a la cual una onda electromagnética se propaga es inversamente proporcional a la densidad del medio en el cual se está propagando. Por lo tanto, la refracción ocurre siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro de diferente densidad. La figura 2.3 muestra la refracción de un frente de onda, en una frontera plana, entre dos medios con diferentes densidades. Para este ejemplo, el medio 1 es menos denso que el medio 2 ($v_1 > v_2$). Puede observarse que el rayo A, entra al medio más denso, antes del rayo B. Por lo tanto, el rayo B, se propaga más rápido que el rayo A y viaja la distancia B-B', durante el mismo tiempo que el rayo A viaja la distancia A-A'. Por lo tanto, el frente de onda (A'B') está inclinado o doblado en una dirección hacia abajo, debido a que un rayo se define como perpendicular al frente de onda, los rayos en la figura 2.3 han cambiado de dirección en la interface de los dos medios. Siempre que un rayo pasa de un medio menos denso a uno más denso, efectivamente se dobla hacia la normal. (La normal es simplemente una línea imaginaria dibujada, perpendicularmente a la interface, en el punto de incidencia.) Al contrario, siempre que un rayo pasa de un medio más denso a uno menos denso, efectivamente se dobla lejos de la normal. El ángulo de incidencia es el ángulo formado, entre la onda incidente y la normal, y el ángulo de refracción, es el ángulo formado entre la onda refractada y la normal.[1]

La cantidad de inclinación o refracción que ocurre en la interface de dos materiales de diferentes densidades es bastante predecible y depende del índice de refracción (también llamado el índice refractivo) de los dos materiales. El índice de refracción simplemente es la relación de la velocidad de propagación de un rayo de luz en el espacio libre a la velocidad de propagación de un rayo de luz en un material dado. Matemáticamente el índice de refracción es:

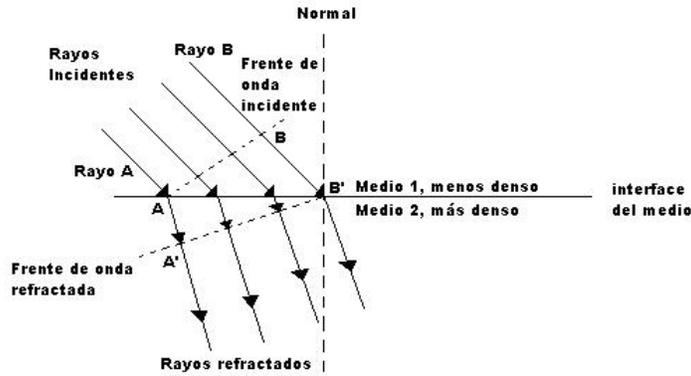


Figura 2.3: Refracción en una frontera plana entre dos medios

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

en donde:

- n = índice de refracción (sin unidades)
- c = velocidad de la luz en el espacio libre ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
- v = velocidad de la luz en un material dado (m/s)

El índice de refracción también es una función de la frecuencia. Sin embargo, la variación en la mayoría de las aplicaciones es insignificante y, por lo tanto, es omitida de esta discusión. Cómo reacciona un onda electromagnética, cuando conoce a la interface de dos materiales de transmisión que tienen índices de refracción diferentes, puede explicarse con la ley de Snell. La ley de Snell simplemente establece que:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (2.2)$$

$$\frac{\text{sen} \theta_1}{\text{sen} \theta_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.3)$$

en donde:

$$\begin{aligned}n_1 &= \text{índice de refracción material 1} \\n_2 &= \text{índice de refracción material 2} \\ \theta_1 &= \text{ángulo de incidencia (grados)} \\ \theta_2 &= \text{ángulo de refacción (grados)}\end{aligned}$$

y debido a que el índice de refracción de un material es igual a la raíz cuadrada de su constante dieléctrica,

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} \quad (2.4)$$

en donde:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{r1} &= \text{constante dieléctrica del medio 1} \\ \varepsilon_{r2} &= \text{constante dieléctrica del medio 2}\end{aligned}$$

La refracción también ocurre cuando un frente de onda se propaga en un medio que tiene un gradiente de densidad que es perpendicular a la dirección de propagación (es decir, paralela al frente de onda). La figura 2.4 muestra una refracción de frente de onda en un medio de transmisión que tiene una variación gradual en su índice de refracción. El medio es más denso abajo y menos denso arriba. Por lo tanto, los rayos que viajan de arriba viajan más rápido que los rayos cerca de abajo y, consecuentemente, el frente de onda se inclina hacia abajo. La inclinación ocurre de manera gradual conforme la onda progresa, como se muestra en la figura 2.4 .

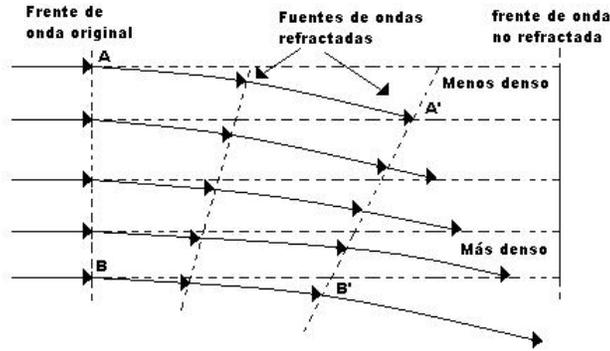


Figura 2.4: Refracción de frente de onda en un medio gradiente

2.3.2. Reflexión

Reflejar significa lanzar o volverse hacia atrás, y la reflexión es el acto de reflejar. La reflexión electromagnética ocurre cuando una onda incidente choca con una barrera de dos medios y algo o todo de la potencia incidente no entra al segundo material. Las ondas que no penetran al segundo medio se reflejan. La figura 2.5 muestra la reflexión de ondas electromagnéticas en una barrera plana entre los dos medios.[1]

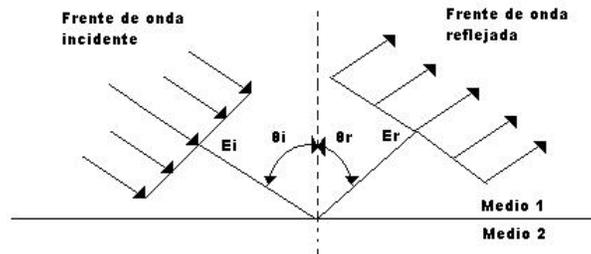


Figura 2.5: La reflexión electromagnética en una frontera plana de dos medios

Debido a que todas las ondas reflejadas permanecen en el medio 1, las velocidades, de las ondas reflejadas e incidentes son iguales. Consecuentemente, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia ($\theta_i = \theta_r$). Sin embargo, la intensidad de campo de voltaje reflejado es menor que la intensidad del campo de voltaje incidente. La relación de las intensidades de voltaje reflejado a incidente se llama coeficiente de reflexión, Γ (a veces llamado el coeficiente de reflexión). Para un conductor perfecto, $\Gamma = 1$. Γ se usa para

indicar la amplitud relativa de los campos incidentes y reflejados y, además, el desplazamiento de fase que ocurre en el punto de reflexión. Matemáticamente, el coeficiente de reflexión es:

$$\Gamma = \frac{E_r e^{j\theta_r}}{E_i e^{j\theta_i}} = \frac{E_r}{E_i} e^{j(\theta_r - \theta_i)} \quad (2.5)$$

en donde:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \text{coeficiente de radiación (sin unidades)} \\ E_i &= \text{intensidad del voltaje incidente (volts)} \\ E_r &= \text{intensidad del voltaje reflejado (volts)} \\ \theta_i &= \text{fase incidente (grados)} \\ \theta_r &= \text{fase reflejada (grados)} \end{aligned}$$

La relación de las densidades de potencia reflejada e incidente es Γ . La porción de la potencia incidente total que no está reflejada se llama el coeficiente de transmisión de potencia (T) (o simplemente el coeficiente de transmisión). Para un conductor perfecto, $T = 0$. La ley para la conservación de energía establece que para una superficie perfectamente reflejante la potencia total reflejada debe ser igual a la potencia incidente total. Por lo tanto,

$$T + |\Gamma|^2 = 1 \quad (2.6)$$

Para los conductores imperfectos, tanto $|\Gamma|^2$ y T son funciones del ángulo de incidencia, de la polarización de campo eléctrico, y de las constantes dieléctricas de los dos materiales. Si el medio 2 no es un conductor perfecto, algunas de las ondas incidentes lo penetran y se absorben. Las ondas absorbidas establecen corrientes en la resistencia del material y la energía se convierte en calor.

Cuando la superficie reflejante no es plana (o sea, que es curva), la curvatura de la onda reflejada es diferente a la de la onda incidente. Cuando

el frente de onda incidente está curva y la superficie reflejante es plana, la curvatura del frente de onda reflejada es igual a la del frente de onda incidente.

La reflexión también ocurre, cuando la superficie reflejante es irregular o áspera. Sin embargo, una superficie así puede destruir la forma del frente de onda. Cuando el frente de onda incidente golpea una superficie irregular, se dispersan aleatoriamente en muchas direcciones. Este tipo de condición se llama reflexión difusa, mientras que la reflexión de una superficie perfectamente lisa se llama reflexión especular (tipo espejo). Las superficies que están entre lisas e irregulares se llaman superficies semiásperas causan una combinación de reflexión difusa y especular. Una superficie semiáspera no destruirá por completo la forma del frente de onda reflejada. Sin embargo, hay una reducción en la potencia total. El criterio de Rayleigh indica que una superficie semiáspera reflejará como si fuera una superficie lisa cada vez que el coseno del ángulo de incidencia sea mayor que $\lambda = 8d$, en donde d es la profundidad de la irregularidad de la superficie y λ es la longitud de onda de la onda incidente. Matemáticamente, el criterio de Rayleigh es:

$$\text{Cos}\theta_i \succ \frac{\lambda}{8d} \quad (2.7)$$

2.3.3. Difracción

La difracción se define como la modulación o redistribución de energía, dentro de un frente de onda, cuando pasa cerca del extremo de un objeto opaco. La difracción es el fenómeno que permite que las ondas de luz o de radio se propaguen (se asomen) a la vuelta de las esquinas. Las explicaciones anteriores sobre la refracción y la reflexión suponían que las dimensiones de las superficies de refracción y la reflexión eran grandes, con respecto a una longitud de onda de la señal. Sin embargo, cuando un frente de onda pasa cerca de un obstáculo o con discontinuidad de dimensiones comparables en tamaño a una longitud de onda, no se puede utilizar el simple análisis geométrico para explicar los resultados y el principio de Huygens (que se deduce de las ecuaciones de Maxwell) es necesario.[1]

El principio de Huygens indica que cada punto de un frente de onda esférica determinado se puede considerar como una fuente secundaria de puntos de ondas electromagnéticas, desde donde se irradian hacia fuera otras ondas secundarias (ondas pequeñas).

2.3.4. Interferencia

Interferir significa entrar en oposición, la interferencia es el acto de interferir. La interferencia de ondas de radio ocurre, cuando dos o más ondas electromagnéticas se combinan de tal forma que el funcionamiento del sistema se degrada. La refracción, la reflexión y la difracción se catalogan como óptica geométrica, lo cual significa que su comportamiento se analiza, principalmente, en términos de rayos y frentes de ondas. Por otro lado, la interferencia se sujeta al principio de superposición lineal de ondas electromagnéticas y ocurre cada vez que dos o más ondas ocupan, simultáneamente, el mismo punto en el espacio. El principio de superposición lineal indica que la intensidad total de voltaje, en un punto determinado en el espacio, es la suma de los vectores de ondas individuales. Sin embargo, ciertos tipos de medios de propagación tiene propiedades no lineales; en un medio ordinario (como el aire o la atmósfera de la Tierra), la superposición lineal resulta cierta.[8]

La figura 2.6 muestra la suma lineal de dos vectores de voltaje instantáneos, cuyos ángulos de fase difieren por un ángulo θ . Puede verse que el voltaje total no es simplemente la suma de las magnitudes de los dos vectores, sino la suma de las fases de los dos. Con la propagación en espacio libre, puede existir una diferencia de fase, simplemente porque la polarización electromagnética de dos ondas difiere. Dependiendo de los ángulos de fase de los dos vectores, puede ocurrir o suma o resta. (Esto implica simplemente que el resultado puede ser más o menos que cualquiera de los vectores, porque las dos ondas electromagnética pueden reforzar o cancelar.)

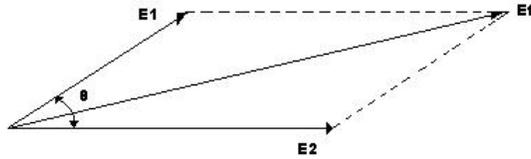


Figura 2.6: Suma lineal de dos vectores con diferentes ángulos de fase

La figura 2.7 muestra la interferencia entre dos ondas electromagnéticas que están en el espacio libre. Puede verse que en el punto X las dos ondas ocupan la misma área de espacio. Sin embargo, la onda B ha viajado una trayectoria diferente que la onda A y, por lo tanto sus ángulos de fase relativos pueden ser diferentes. Si la diferencia en la distancia viajada es un múltiplo de un número entero par de una mitad de longitud de onda, ocurre la cancelación total. Lo más probable es que la diferencia en la distancia caiga en algún punto entre las dos y ocurra una cancelación parcial. Para frecuencias por debajo de VHF, las longitudes de onda relativamente grandes evitan que la interferencia se convierta en un problema importante. Sin embargo, con UHF y superiores, puede ser severa la interferencia de ondas.

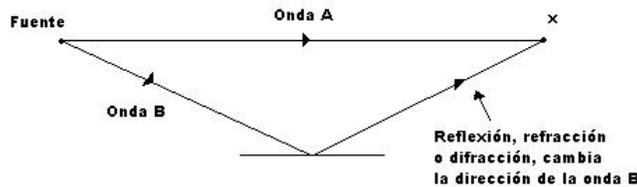


Figura 2.7: Interferencia de onda electromagnética

2.3.5. Propagación de ondas

En los sistemas de comunicación de radio, las ondas se pueden propagar de varias formas, dependiendo del tipo de sistema y el ambiente. Además, como se explicó anteriormente, las ondas electromagnéticas viajan en línea recta, excepto cuando la Tierra y su atmósfera alteran su trayectoria. Hay

tres formas de propagación de las ondas electromagnéticas: ondas de tierra, ondas espaciales (que incluyen tanto ondas directas como ondas reflejadas a la Tierra), y propagación de onda de cielo.

En frecuencias por debajo de 1.5 MHz, las ondas de tierra proporcionan la mejor cobertura. Esto se debe a que las pérdidas de tierra se incrementan rápidamente con la frecuencia. Las ondas del cielo se utilizan para aplicaciones de alta frecuencia, y las ondas espaciales se utilizan para frecuencia muy altas y superiores.[3]

2.3.6. Propagación de ondas de Tierra

Una onda de tierra es una onda electromagnética que viaja por la superficie de la tierra. Por lo tanto, las ondas de tierra a veces se llaman ondas superficiales. Las ondas de tierra deben estar polarizadas verticalmente. Esto es debido al campo eléctrico, en una onda polarizada horizontalmente estaría paralela a la superficie de la Tierra, y dichas ondas harían corto circuito por la conductividad de la tierra. Con las ondas de tierra, el campo eléctrico variante induce voltajes en la superficie de la Tierra, que causan que fluyan corrientes que son muy similares a las de una línea de transmisión. La superficie de la Tierra también tiene resistencia y pérdidas dieléctricas. Por lo tanto, las ondas de tierra se atenúan conforme se propagan. Las ondas de tierra se propagan mejor sobre una superficie que sea un buen conductor, como agua salada y áreas desérticas muy áridas. Las pérdidas de ondas de tierra se incrementan rápidamente con la frecuencia. Por lo tanto, la propagación de ondas de tierra se limita generalmente a frecuencias por debajo de los 2 MHz.[15]

La atmósfera de la Tierra tiene una gradiente de densidad (o sea, que se reduce gradualmente con la distancia de la superficie de la Tierra), que hace que el frente de onda se incline progresivamente hacia delante. Por lo tanto, la onda de tierra se propaga alrededor de la Tierra, permaneciendo cerca de su superficie, y si se transmite suficiente potencia, el frente de onda podría propagarse más allá del horizonte o hasta alrededor de la circunferencia completa de la Tierra. Sin embargo, se debe de tener cuidado al seleccionar la

frecuencia y el terreno sobre el cual se propagará la onda de tierra para asegurarse que el frente de onda no se incline excesivamente y, simplemente, se voltee, permanezca plana sobre la tierra, y cese de propagarse.

La propagación de ondas de tierra se utiliza comúnmente para comunicaciones de barco a barco y de barco a tierra, para la radio navegación, y para las comunicaciones marítimas móviles. Las ondas de tierra se utilizan a frecuencias tan bajas como de 15 kHz.

Las desventajas de la propagación de ondas de tierra son las siguientes:

1. Las ondas de tierra requieren de una potencia relativamente alta para transmisión.
2. Las ondas de tierra están limitadas a frecuencias, muy bajas, bajas y medias (VLF, LF Y MF) que requieren de antenas grandes.
3. Las pérdidas por tierra varían considerablemente con el material de la superficie.

Las ventajas de la propagación de ondas de tierra son las siguientes:

1. Dan suficiente potencia de transmisión, las ondas de tierra se pueden utilizar para comunicarse entre dos ubicaciones cualesquiera en el mundo.
2. Las ondas de tierra no se ven relativamente afectadas por los cambios en las condiciones atmosféricas.

2.3.7. Propagación de ondas espaciales

La propagación de ondas espaciales incluye energía radiada que viaja unas cuantas millas, en la parte inferior de la atmósfera de la Tierra. Las ondas espaciales incluyen ondas directas y reflejadas de tierra (figura 2.8). Las ondas directas viajan esencialmente en línea recta, entre las antenas transmisora y receptora. La propagación de ondas espaciales con ondas directas se llama comúnmente transmisión de línea de vista (LOS). Por lo tanto, la propagación de ondas espaciales se limita por la curvatura de la tierra. Las ondas reflejadas a tierra son ondas reflejadas por la superficie de la Tierra conforma se propagan, entre las antenas transmisora y receptora.[15]

La figura 2.8 muestra la propagación de ondas espaciales, entre dos antenas. Puede verse que la intensidad del campo en la antena receptora depende de la distancia que hay entre las dos antenas (atenuación y absorción) y si las ondas, directa y reflejada a tierra, están en fase (interferencia).

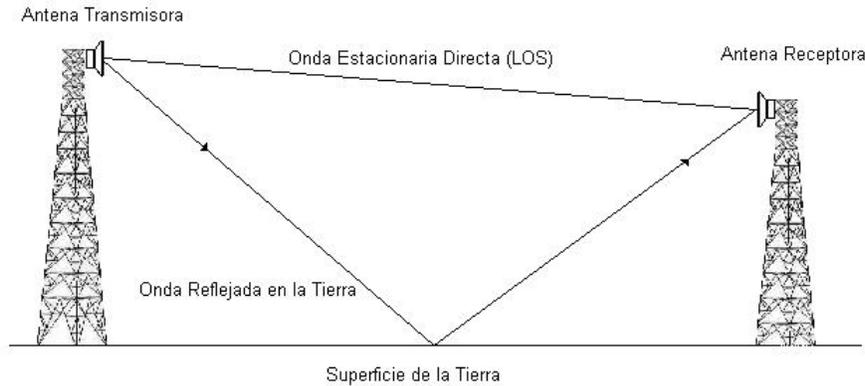


Figura 2.8: Propagación de ondas espaciales

La curvatura de la tierra presenta un horizonte para la propagación de ondas espaciales comúnmente llamado radio horizonte. Debido a la refracción atmosférica, el radio horizonte se extiende más allá del horizonte óptico para la atmósfera estándar común. El radio horizonte es aproximadamente cuatro tercios del horizonte óptico. La troposfera causa la refracción, debido a cambios en su densidad, temperatura, contenido de agua vapor, y relativa conductividad. El radio horizonte puede alargarse simplemente elevando las antenas, transmisora o receptora (o ambas), por arriba de la superficie de la Tierra, con torres o colocándolas arriba de las montañas o edificios altos.[15]

La figura 2.9 muestra el efecto que tiene la altura de la antena en el radio horizonte. El radio horizonte en línea de vista para una sola antena se da como:

$$d = \sqrt{2h} \quad (2.8)$$

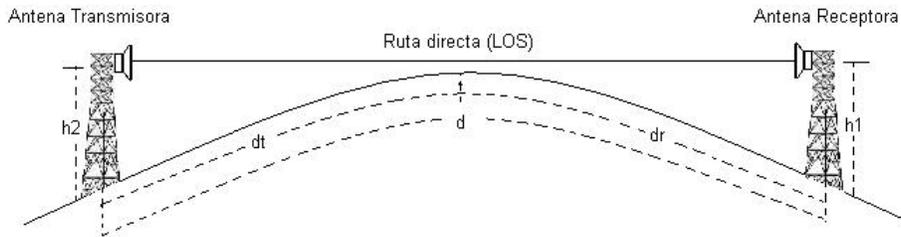


Figura 2.9: Ondas Espaciales y Radio Horizonte

En donde:

d = distancia a radio horizonte

h = a la altura de la antena sobre el nivel del mar

por lo tanto, para una antena transmisora y una receptora, la distancia entre las dos antenas es.

$$d = d_i + d_r \quad (2.9)$$

ó

$$d = \sqrt{2h_i} + \sqrt{2h_r} \quad (2.10)$$

en donde:

d = distancia total

d_i = radio horizonte para antenas transmisora

d_r = radio horizonte para antena receptora

h_i = altura de la antena transmisora

h_r = altura de la antena receptora

en donde d_i y d_r son distancias en kilómetros y h_i y h_r son alturas en metros.

De las ecuaciones 2.9 y 2.10, puede verse que la distancia de propagación de ondas espaciales puede extenderse simplemente incrementando la altura de la antena transmisora o receptora, o ambas.

Debido a que las condiciones de la atmósfera más baja de la Tierra están sujetas a cambios, el grado de refracción puede variar con el tiempo. Una condición especial llamada propagación de ducto ocurre cuando la densidad de la atmósfera más baja es tal que las ondas electromagnéticas están atrapadas, entre ésta y la superficie de la Tierra. Las capas de la atmósfera actúan como un ducto, y una onda electromagnética se puede propagar grandes distancias alrededor de la curvatura de la Tierra, dentro de este ducto. La propagación de ducto se muestra en la figura 2.10

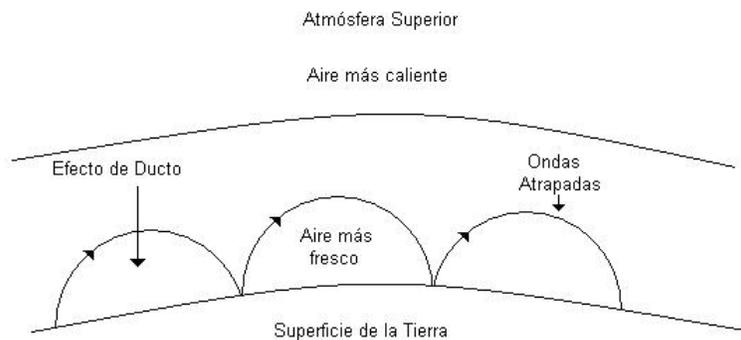


Figura 2.10: Propagación de Ducto

2.3.8. Propagación de ondas de cielo

Las ondas electromagnéticas que se dirigen por encima del nivel del horizonte se llaman ondas de cielo. Típicamente, las ondas del cielo se irradian en una dirección que produce un ángulo relativamente grande, con referencia a la Tierra. Las ondas del cielo se envían hacia el cielo, donde son reflejadas o refractadas nuevamente a la Tierra por la ionosfera. La ionosfera es la región de espacio localizada aproximadamente de 50 a 400 km (30 a 250 millas) arriba de la superficie de la Tierra. Por lo tanto, absorbe grandes cantidades de energía radiante del sol, que ioniza las moléculas de aire, creando electrones

libres. Cuando una onda de radio pasa a través de la ionosfera, el campo eléctrico de la onda ejerce una fuerza en los electrones libres, haciéndolos que vibren. Los electrones vibrantes reducen la corriente, que es equivalente a reducir la constante dieléctrica. Reducir la constante dieléctrica incrementa la velocidad de propagación y hace que las ondas electromagnéticas se doblen alejándose de las regiones de alta densidad de electrones, hacia regiones de baja densidad de electrones (o sea, incrementando la refracción). Conforme la onda se mueve más lejos de la Tierra, se incrementa la ionización. Sin embargo, hay menos moléculas de aire para ionizar. Por lo tanto, en la atmósfera, más alta, hay un porcentaje más elevado de moléculas ionizadas que en la atmósfera más baja. Entre más alta sea la densidad de iones, mayor la refracción. Además, debido a que la composición de la ionosfera no es uniforme y a las variaciones en su temperatura y densidad, está estratificada. Esencialmente, la ionosfera está compuesta por tres capas, (las capas D, E, y F). Las tres capas de la ionosfera varían en ubicación y en densidad de ionización, con la hora del día. También fluctúan en un patrón cíclico todo el año y de acuerdo con el ciclo de manchas solares de 11 años. La ionosfera es más densa en las horas de máxima luz solar (durante las horas luz y el verano).[15]

- *Capa D.* La capa D es la capa inferior de la ionosfera y se localiza entre 30 y 60 millas (50 a 100 kilómetros) arriba de la superficie de la Tierra. Debido a que es la capa más lejana del sol, hay muy poca ionización en esta capa. Por lo tanto, la capa D tiene muy poco efecto en la dirección de propagación de las ondas de radio. Sin embargo, los iones de la capa D pueden absorber cantidades apreciables de energía electromagnética. La capa D refleja ondas VLF y LF y absorbe ondas MF y HF.[15]
- *Capa E.* La capa E se localiza, entre 60 y 85 millas (de 100 a 140 kilómetros), arriba de la superficie de la Tierra. La capa E se llama a veces la capa Kennelly-Heaviside, en honor a los dos científicos que la descubrieron. La capa E tiene su mayor densidad a mediodía, aproximadamente a 70 millas, cuando el sol se encuentra en su punto máximo. Así como la capa D, la capa E casi desaparece totalmente de noche. La capa E auxilia la propagación de ondas de superficie MF y refleja ondas HF un poco durante el día. La parte superior de la capa E a veces se

considera por separado y se llama la capa E esporádica porque parece que va y viene en forma imprevisible. La capa E esporádica es una capa delgada con una densidad de ionización muy alta. Cuando aparece, por lo general, hay una mejora inesperada en las transmisiones de raído de larga distancia.[15]

- *Capa F.* La capa F está hecha realmente de dos capas, las capas F1 y F2. Durante el día, la capa F1 se localiza entre 85 y 155 milla (de 140 a 250 kilómetros), arriba de la superficie de la Tierra, y la capa F2 se localiza de 85 a 155 millas (de 140 a 300 kilómetros) arriba de la superficie de la Tierra, durante el invierno y de 155 a 220 millas (de 250 a 350 kilómetros), en el verano. Durante la noche, la capa F1 absorbe y atenúa algunas ondas HF, aunque la mayoría de las ondas pasan a través de la capa F2, cuando se refractan nuevamente a la Tierra.[15]

2.3.9. Frecuencia crítica y ángulo crítico

Las frecuencias que están por arriba del rango UHF no se ven afectadas virtualmente por la ionosfera debido a que las longitudes de sus ondas son extremadamente cortas. En estas frecuencias, las distancias entre los iones son apreciablemente grandes y, en consecuencia, las ondas electromagnéticas pasan a través de ellas con poco efecto perceptible. Por lo tanto, es lógico suponer que existe un límite superior de frecuencia para la propagación de ondas del cielo. La frecuencia crítica (f_c), se define como la frecuencia más alta que puede propagarse directamente hacia arriba y todavía ser regresadas a la Tierra por la ionosfera. La frecuencia crítica depende de la densidad de ionización y por lo tanto varía con la hora del día y la estación del año. Si el ángulo vertical de radiación se reduce, las frecuencias en o por arriba de la frecuencia crítica aún se pueden refractar nuevamente a la superficie de la Tierra, porque viajarán a una distancia mayor en la ionosfera y, por lo tanto, dispondrán de más tiempo para ser refractadas. Por lo tanto, la frecuencia crítica se utiliza solamente como punto de referencia para propósitos de comparación. Sin embargo, cada frecuencia tiene un ángulo vertical máximo en el cual se puede propagar y todavía ser refractada nuevamente por la ionosfera. Este ángulo se llama, ángulo crítico.[15]

Capítulo 3

TRANSMISION DIGITAL

3.1. Introducción

El término comunicaciones digitales abarca un área extensa de técnicas de comunicaciones, incluyendo transmisión digital y radio digital. La transmisión digital es la transmisión de pulsos digitales, entre dos o más puntos, de un sistema de comunicación. Los sistemas de transmisión digital requieren de un elemento físico, entre el transmisor y el receptor, como un par de cables metálicos, un cable coaxial, o un cable de fibra óptica. En los sistemas de radio digital, el medio de transmisión es el espacio libre o la atmósfera de la Tierra.

En un sistema de transmisión digital, la información de la fuente original puede ser en forma digital ó analógica. Si está en forma analógica, tiene que convertirse a pulsos digitales, antes de la transmisión y convertirse de nuevo a la forma analógica, en el extremo de recepción. En un sistema de radio digital, la señal de entrada modulada y la señal de salida demodulada, son pulsos digitales. Los pulsos digitales pueden originarse desde un sistema de transmisión digital, de una fuente digital como una computadora de mainframe, o de la decodificación binaria de una señal analógica.

3.2. Modulación y demodulación

Por razones que se mencionarán más adelante, no es práctico propagar energía electromagnética de baja frecuencia por la atmósfera de la tierra. Por lo tanto, con las comunicaciones de radio, es necesario superponer una señal de

inteligencia relativamente baja a una señal de frecuencia relativamente alta para la transmisión. En los sistemas de comunicaciones electrónicas analógicas, la información de la fuente (señal de inteligencia) actúa sobre o modula una señal senoidal de frecuencia sencilla. Modular simplemente significa variar, cambiar o regular. Por lo tanto, la información de la fuente de frecuencia relativamente baja se llama señal de modulación, la señal de frecuencia relativamente alta, sobre la cual se actúa (modulada) se llama portadora, y la señal resultante se llama la onda modulada o señal. En esencia la información de la fuente se transporta a través del sistema sobre la portadora.

Con los sistemas de comunicaciones analógicas, la modulación es el proceso de variar o cambiar alguna propiedad de una portadora analógica de acuerdo con la información original de la fuente. Recíprocamente, la demodulación es el proceso de convertir los cambios en la portadora analógica a la información original de la fuente. La modulación se realiza en el transmisor, en un circuito llamado modulador, y la demodulación se realiza en el receptor, en un circuito llamado demodulador. La señal de información que modula la portadora principal se llama señal de banda base o simplemente banda base. La banda base es una señal de información, como un canal telefónico sencillo, y la señal de banda base compuesta es la señal para la información total, como varios cientos de canales telefónicos. Las señales de banda base se convierten a partir de sus banda de frecuencia original a una banda más adecuada para transmisión a través del sistema de comunicaciones. Las señales de banda base se convierten en frecuencia alta en el transmisor se convierten en frecuencia baja en el receptor. La traslación de frecuencia es el proceso de convertir una frecuencia sencilla o una banda de frecuencias a otra ubicación en el espectro de la frecuencia total.[16]

El término canal es comúnmente utilizado, cuando se refiere a una banda específica de frecuencias distribuidas, para un servicio en particular o transmisión. Por ejemplo, un canal estándar de banda de frecuencia para voz ocupa un ancho de banda de 3 KHz se utiliza para la transmisión de señales de voz de calidad. Un canal de RF se refiere a una banda de frecuencias usadas para propagar señales de radiofrecuencia, tal como un canal sencillo y comercial de emisión FM que ocupa, aproximadamente, una banda de frecuencias de 200 KHz dentro de la banda total de 88 a 108 MHz asignada para transmisión comercial de FM.

La siguiente ecuación es la expresión general para una onda senoidal variante con el tiempo de voltaje, tal como una portadora analógica. Tres características de una onda senoidal pueden ser variadas: la amplitud (V), la frecuencia (f), la fase (Θ), o cualquier combinación de dos o más de estas propiedades. Si la amplitud de la portadora es variada proporcionalmente la información de la fuente, resulta la amplitud modulada (AM). Si la frecuencia de la portadora varía proporcionalmente a la información de la fuente, resulta la frecuencia modulada (FM). Si la fase de la portadora varía proporcionalmente a la información de la fuente, resulta la fase modulada (PM)[16].

$$v(t) = V \text{sen}(2\pi ft + \Theta) \quad (3.1)$$

en donde:

$v(t)$ = Onda de voltaje que varía senoidalmente en el tiempo

V = Máxima amplitud (volts)

f = Frecuencia (hertz)

Θ = Fase (radianes)

La figura 3.1 es un diagrama a bloques simplificado de un sistema de comunicaciones que muestra la relación entre la señal de modulación (información), la señal modulada (portadora), la onda modulada (resultante) y el ruido del sistema. Hay dos razones importantes de porque es necesaria la modulación

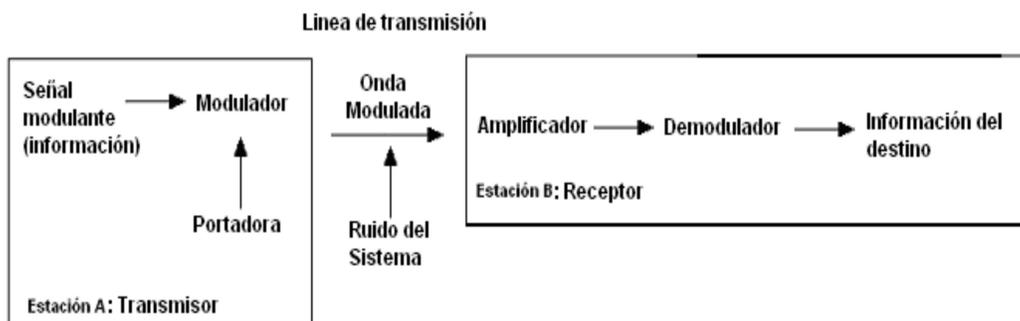


Figura 3.1: Diagrama a bloques del sistema de comunicaciones

en un sistema de comunicaciones electrónicas. La primera es el hecho de que

es extremadamente difícil radiar señales a frecuencias bajas por la atmósfera de la tierra en forma de energía electromagnética. Segundo, las señales de información frecuentemente ocupan la misma banda de frecuencia y, si son transmitidas en su forma original, interferirán. Un ejemplo de esto es la banda radiodifusora de FM comercial. Todas las estaciones FM emiten información de voz y música que ocupa la banda de frecuencias de audio de cero a 15 KHz. Cada estación traslada su información a una banda de frecuencia diferente (canal), para que sus transmisiones no interfieran con las transmisiones de las demás.

3.3. Limite de Shannon para la capacidad de información

La capacidad de información de un sistema de comunicación representa el número de símbolos independientes que pueden pasarse, a través del sistema, en una unidad de tiempo determinada. El símbolo fundamental es el dígito binario (bit). Por tanto, a menudo es conveniente expresar la capacidad de información, de un sistema, en bits por segundo (bps). En 1928, R. Hartley de los Laboratorios de Teléfonos Bell desarrolló una relación útil, entre el ancho de banda, la línea de transmisión, y la capacidad de información. Expresada en forma sencilla, la ley de Hartley es:

$$I \propto BxT \tag{3.2}$$

en donde:

I=capacidad de información (bps)

B=ancho de banda(hertz)

T = línea de transmisión (s)

A partir de la ecuación 3.2 se puede ver que la capacidad de información es una función lineal del ancho de banda y de la línea de transmisión y es directamente proporcional a ambos. Si se cambia el ancho de banda o la línea de transmisión, ocurrirá un cambio directamente proporcional en la capacidad de información. En 1948, C. E. Shannon (también de los Laboratorios de

Telefonos Bell), publicó un artículo en la revista Bell System Technical Journal relacionando la capacidad de información de un canal de comunicación al ancho de banda y a la relación señal-a-ruido. Matemáticamente, el límite de Shannon para la capacidad de información es

$$I = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4,3a)$$

$$I = 3,32 B \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4,3b)$$

3.4. Diversidad.

Los sistemas de microondas utilizan transmisión de línea de vista. Tiene que haber una ruta de señal directa, de línea de vista, entre las antenas de transmisión y recepción. En consecuencia, si esa ruta de señal experimenta una degradación severa, ocurrirá una interrupción del servicio. La diversidad sugiere que hay más de una ruta de transmisión o método de transmisión disponible, entre un transmisor y un receptor. En un sistema de microondas, el propósito de utilizar la diversidad es incrementar la confiabilidad del sistema incrementando su disponibilidad. Cuando hay disponible más de una ruta de transmisión o método de transmisión, el sistema puede seleccionar la ruta o método que produce la señal de más alta calidad recibida. Por lo general, se determina la calidad, mas alta evaluando la relación de portadora a ruido (C/N) en la entrada del receptor o simplemente midiendo la potencia recibida de la portadora. Aunque hay muchas formas de lograr la diversidad, los métodos mas comunes que se utilizan son la frecuencia, el espacio, y la polarización.[15]

Diversidad de frecuencias.

La diversidad de frecuencias es la modulación sencilla de dos frecuencias diferentes de portadora de RF con la misma inteligencia IF, y luego transmitir ambas señales de RF a un destino determinado. En el destino, ambas portadoras están demoduladas, y la que dé la señal de IF de mejor calidad es la que se selecciona.

La figura 3.2 muestra un sistema de microondas con diversidad de frecuencias de un solo canal. En la figura 3.2a, la señal de entrada de IF alimenta a

un divisor de potencia, el que la dirige a los transmisores de microondas A y B. Las salidas de RF de los dos transmisores se combinan en la red combinada de canal y alimentan a la antena de transmisión.[15] En el extremo receptor (figura 3.2b), el separador de canales dirige las portadoras de RF, A y B, a sus receptores de microondas respectivos, en donde se convierten a IF. El circuito para detectores de calidad determina qué canal, el A o el B, tiene mejor calidad y dirige ese canal a través del interruptor de IF para que se denodule aún más a banda base. Muchas de las condiciones atmosféricas adversas temporales que degradan una señal de RF son selectivas en lo que a frecuencias se refiere; pueden degradar una frecuencia, más que otra. Por lo tanto, en un periodo de tiempo determinado, el interruptor de IF puede cambiarse del receptor A al receptor B, y viceversa, muchas veces.

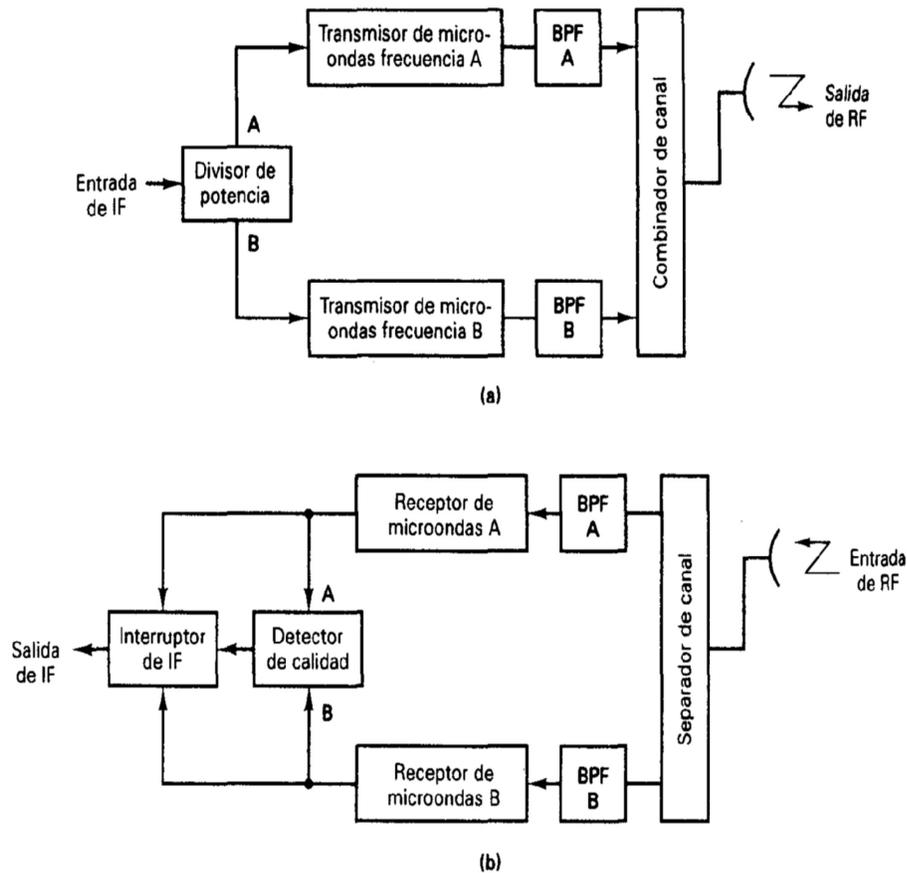


Figura 3.2: Sistema de microondas con diversidad de frecuencia; (a) transmisor, (b) receptor.

Diversidad de espacio.

Con la diversidad de espacio, la salida de un transmisor alimenta a dos o más antenas que están separadas físicamente por un número apreciable de longitudes de onda. En forma similar, en el extremo receptor, puede haber más de una antena proporcionando la señal de entrada al receptor. Si se utilizan múltiples antenas receptoras, también deben estar separadas por un número apreciable de longitudes de onda.

La figura 3.3 muestra un sistema de microondas con diversidad de espacio de un solo canal. Cuando se utiliza la diversidad de espacio, es importante que la distancia eléctrica de un transmisor a cada una de sus antenas y de un receptor desde cada una de sus antenas sea un múltiplo igual al largo de las longitudes de onda. Esto es para asegurar que cuando dos o más señales de la misma frecuencia llegan a la entrada de un receptor, estén en fase y se puedan agregar. Si se reciben fuera de fase, se cancelarán y, en consecuencia, resultará con menos potencia la señal recibida que si se utilizara simplemente un sistema de antenas. Las condiciones atmosféricas adversas frecuentemente se limitan a un área geográfica muy pequeña. Con la diversidad de espacio, hay más de una ruta de transmisión, entre un transmisor y un receptor. Cuando existen condiciones atmosféricas adversas, en una de las rutas, es poco probable que la ruta alterna esté experimentando la misma degradación. En consecuencia, la probabilidad de recibir una señal aceptable es mayor, cuando se utiliza la diversidad de espacio, que cuando no se utiliza ninguna diversidad. Un método alternativo de diversidad de espacio utiliza una sola antena de transmisión y dos antenas receptoras separadas verticalmente. Dependiendo de las condiciones atmosféricas en un momento determinado, una de las antenas receptoras deberá recibir una señal adecuada. Nuevamente, hay dos rutas de transmisión que no es improbable que se vean afectadas simultáneamente por el desvanecimiento.[15]

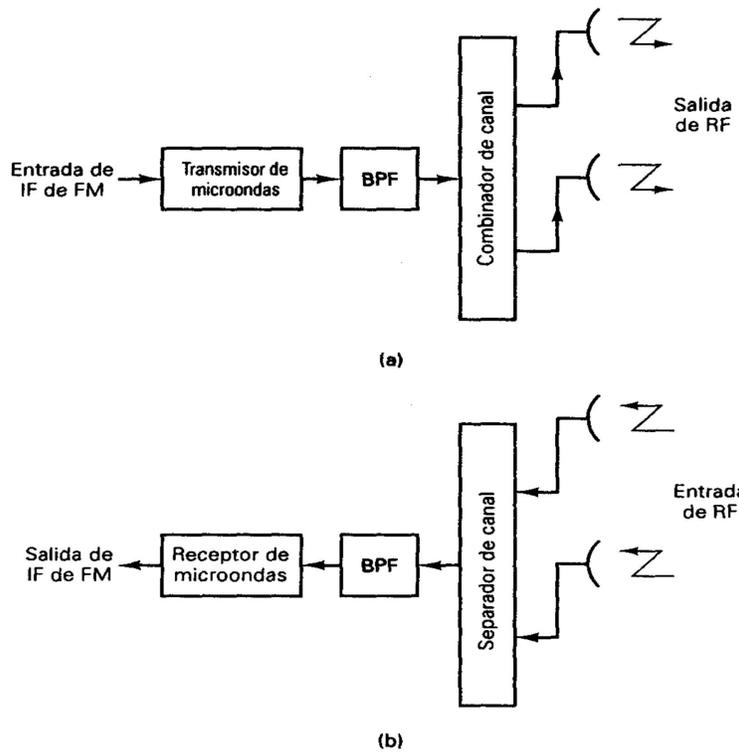


Figura 3.3: Sistema de microondas con diversidad de espacio: (a) transmisor; (b) receptor.

Diversidad de polarización.

Con la diversidad de polarización, una sola portadora de RF se propaga con dos diferentes polarizaciones electromagnéticas (vertical y horizontal). Las ondas electromagnéticas de diferentes polarizaciones no necesariamente experimentan el mismo deterioro en las transmisiones. La diversidad de polarización generalmente se utiliza en conjunción con la diversidad de espacio. En un par de antenas, de transmisión/recepción, una está polarizada verticalmente y la otra está polarizada horizontalmente. También es posible utilizar simultáneamente la diversidad de frecuencia, espacio y polarización.[15]

3.5. Modulación PSK

La manipulación por desplazamiento de fase (PSK por phase-shift keying) es una forma de modulación digital que se parece a la modulación convencional de fase solo que en la PSK la entrada es una señal binaria, y es posible tener una cantidad limitada de fases de salida.

3.6. Modulación BPSK

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

3.7. Modulación QPSK

La transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK) o, en cuadratura PSK, es otra forma de modulación digital de modulación angular de amplitud constante. La QPSK es una técnica de codificación M-ario, en

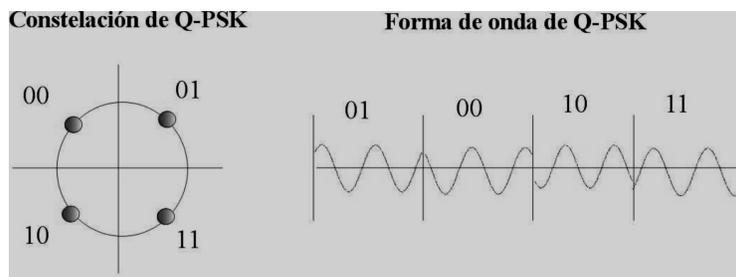
donde $M = 4$, de ahí el nombre de "cuaternaria", que significa "4".

Con QPSK son posibles cuatro fases de salida, para una sola frecuencia de la portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida diferente, debe haber cuatro condiciones de entrada diferente. Ya que la entrada digital a un modulador de QPSK es una señal binaria (base 2), para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita mas de un solo bit de entrada. Con 2 bits, hay cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10 y 11. en consecuencia, con QPSK, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits llamados dibits. Cada código dibit genera una de las cuatro fases de entrada posible. Por tanto, para cada dibit de 2 bits introducidos al modular, ocurre un solo cambio de salida. Así que, la razón de cambio en la salida es la mitad de la razón de bit de entrada.

La separación angular entre cualquiera de dos fasores adyacentes, en QPSK, es de 90° . Por tanto, una señal de QPSK puede experimentar un cambio en fase, de $+45^\circ$ o de -45° , durante la transmisión y, todavía, retener la información correcta codificada al demodular en el receptor es decir, esta modulación, generalmente utiliza la constelación que se observa en la figura siguiente, donde la información se codifica en distintas fases, 45° , 135° , 225° y 315° o 0 , 2π , π y $3/2\pi$ radianes. Dos bits son transformados en un símbolo de datos complejos. El cuadro 3.1 muestra un ejemplo de esta transformación:

00	$+1+j$
01	$-1+j$
10	$-1-j$
11	$+1-j$

Cuadro 3.1: Transformación de los bits de datos en la modulación QPSK



3.8. Modulación por amplitud en cuadratura (QAM)

Este tipo de modulación es de gran importancia, ya que en la transmisión via microondas, juega un gran papel. La característica mas importante de ésta modulación se encuentra en que con la combinación de la amplitud modulada AM y de la fase modulada PM se puede transmitir información en ambas fases de PM y magnitudes de señales de AM al mismo tiempo.

3.9. Multicanalización

3.9.1. Acceso Multiple por División de Frecuencia (FDMA)

Con FDMA que en ingles es Frequency Division Multiple Access, se asigna a los usuarios un canal de un conjunto limitado de canales ordenados en el dominio de la frecuencia. Cuando hay más usuarios que el suministro de canales de frecuencia puede soportar, se bloquea el acceso de los usuarios al sistema. Una característica importante de los sistemas FDMA es que una vez que se asigna una frecuencia a un usuario, ésta es usada exclusivamente por ese usuario hasta que éste no necesite el recurso.

3.9.2. Acceso Multiple por Division de Tiempo (TDMA)

Los usuarios acceden a un canal de acuerdo con un esquema temporal. Un sistema puro TDMA, que en ingles estas siglas son Time Division Multiple Access, tendría sólo una frecuencia de operación, y no sería un sistema útil. Los usuarios comparten un canal físico en un sistema TDMA, donde están asignado unos slots de tiempo. A todos los usuarios que comparten la misma frecuencia se les asigna un slot de tiempo, que se repite dentro de un grupo de slots que se llama trama.

3.9.3. Espectro disperso

Aqui practicamente, se maneja el Acceso Multiple por División de Código (CDMA), en el que todos los usuarios transmiten en el mismo ancho de banda simultáneamente, debido a esto se les denomina "sistemas de espectro disperso".

En esta técnica de transmisión, el espectro de frecuencias de una señal de datos es esparcido usando un código no relacionado con dicha señal. Como resultado el ancho de banda es mucho mayor. En vez de utilizar las ranuras de tiempo o frecuencias, como lo hacen las tecnologías tradicionales, usa códigos matemáticos para transmitir y distinguir entre conversaciones inalámbricas múltiples.

Los códigos usados para el esparcimiento son únicos para cada usuario. Esta es la razón por la que el receptor de un determinado transmisor, es capaz de seleccionar la señal deseada.

Diferentes técnicas de espectro disperso

- **Sistemas de Secuencia Directa.** Un portador de banda estrecha es modulado por una secuencia de código. La fase del portador de la señal transmitida es cambiado de forma brusca de acuerdo a esta secuencia de código, la cual es generada por un generador pseudoaleatorio que tiene una longitud fija. Después de un número determinado de bits, el código se repite a sí mismo de manera exacta
- **Sistemas de Salto de Frecuencia.** En estos sistemas, la frecuencia del portador del transmisor cambia abruptamente (o salta) de acuerdo a una secuencia de código pseudoaleatoria. El orden de frecuencias seleccionadas por el transmisor es dictado por la secuencia de código. El receptor sigue la pista a estos cambios y produce una señal IF constante
- **Sistemas de Salto con Tiempo.** Éste es un sistema en el cual el periodo y el ciclo de un portador de pulso RF son variados de una forma pseudoaleatoria bajo el control de una secuencia codificada. El tiempo de salto es usado a menudo con efectividad junto a la frecuencia de salto para formar un sistema spread spectrum de múltiple acceso (TDMA) y un tiempo por división híbrido.
- **Sistemas Híbridos.** Los sistemas híbridos usan una combinación de métodos spread spectrum con el fin de usar la propiedades beneficiosas de los sistemas utilizados. Dos combinaciones comunes con secuencia directa y salto de frecuencia. La ventaja de combinar los dos métodos es que se

saca partido de características que no están disponibles usando un único método

3.10. Control de errores

Después de resolver el problema de marcar el inicio y el final de cada trama, se abordará el siguiente problema, que consiste en: como tener la seguridad de que todas las tramas son eventualmente entregadas a la capa de red(Protocolo del modelo OSI) del extremo destinatario y, además, en el orden apropiado. Supóngase que en el extremo emisor sigue enviando tramas sin observar que estén llegando en el orden apropiado. Esto podría ser correcto para un servicio sin conexión y sin asentamiento, pero no sería lo mismo para un servicio orientado a conexión fiable.

La forma común para asegurar una entrega fiable consiste en proporcionarle al extremo emisor algún tipo de retroalimentación con respecto a lo que está sucediendo en el otro extremo de la línea. Por lo general, el mismo protocolo le solicita al receptor que le envíe de vuelta unas tramas especiales de control, que denotan implícitamente asentimientos positivos o negativos acerca de las tramas que llegan. Si el emisor recibe un asentimiento positivo sobre una trama, sabrá que la trama llegó bien. Por otra parte, un asentimiento negativo, significará que algo malo ha ocurrido y que la trama se debe de transmitir de nuevo.

Otro aspecto que podría complicar esto aún más es la posibilidad de que los problemas de hardware ocasionen que la trama se pierda por completo (por ejemplo en una ráfaga de ruido). En este caso, el receptor no reaccionará en absoluto, dado que no tendrá motivo para hacerlo. Deberá quedar claro que un protocolo, en el cual el extremo emisor envía una trama y, posteriormente, espera el asentimiento sea éste positivo o negativo, se quedará colgado para siempre, si una trama se llega a perder por completo, debido a un mal funcionamiento en el hardware del sistema.[12]

Esta posibilidad se elimina mediante la introducción de temporizadores en la capa de enlace(protocolo del modelo OSI). Cuando el emisor envía una tra-

ma, generalmente también inicia un temporizador. El temporizador se ajusta para que venza después de que transcurra un intervalo de tiempo suficientemente largo para que la trama pueda llegar hasta su destino, se procese ahí y que el asentimiento se propague de regreso al emisor. La trama, por lo regular, se recibirá en forma correcta y el asentimiento regresará antes de que el tiempo establecido en el temporizador expire, en cuyo caso, este se cancelará.

Sin embargo, si por alguna razón se llegara a perder la trama o el asentimiento, el temporizador vencerá, avisándole al emisor de la existencia potencial de un problema. La solución obvia consiste solo en transmitir la trama nuevamente. Sin embargo, cuando las tramas deban transmitirse en múltiples ocasiones, existe el peligro de que el receptor quiera aceptar la misma trama dos o más veces, y pasarla a la capa de red mas de una vez. Para prevenir que esto suceda, se necesita, en general, asignar números de secuencia a las tramas de salida, de tal manera de que el receptor pueda distinguir la información retransmitida con respecto a la original.

Una de las tareas mas importantes delegadas a la capa de enlace es precisamente el manejo de temporizadores y la asignación de números de secuencia a las tramas, con objeto de asegurar de que cada una de las tramas sea finalmente pasada a la capa de red, en el extremo destinatario, solo una vez, ni mas ni menos.[12]

3.11. Conmutación de protección

Las pérdidas de rutas de radio varían con las condiciones atmosféricas. En un periodo, las condiciones atmosféricas, entre la antena transmisora y la receptora, pueden variar considerablemente, causando una reducción correspondiente en la fuerza de la señal recibida de 20, 30, 40 o más dB. A esta reducción de la fuerza de la señal se le conoce como desvanecimiento de radio. Los circuitos de control de ganancia automática, integrados en los receptores de radio, pueden compensar los desvanecimientos, desde 25 a 40 dB, dependiendo del diseño del sistema. Sin embargo, los desvanecimientos que son en exceso de 40 dB causan una perdida total de la señal recibida.

Cuando esto sucede, se pierde la continuidad del servicio. Para evitar una interrupción del servicio durante los periodos de desvanecimientos severos o fallas en el equipo, temporalmente está a su disposición un equipo alterno, al que se le llama arreglo para la conmutación de protección. Esencialmente, hay dos tipos de arreglos para la conmutación de protección: respaldo en línea y diversidad. Con la protección de respaldo en línea, cada canal de radio que está trabajando tiene un canal de respaldo dedicado o un canal extra. Con la protección de diversidad, un solo canal de respaldo está disponible hasta para 11 canales que están trabajando. Los sistemas de protección de respaldo en línea ofrecen el cien por ciento de protección para cada canal de radio que está trabajando. Un sistema de diversidad ofrece el cien por ciento de protección solamente al primer canal que está trabajando y que falla. Si dos canales de radio fallan al mismo tiempo, ocurrirá una interrupción del servicio.[15]

Respaldo en línea La figura 3.4 muestra un arreglo para el intercambio de protección de respaldo en línea de un solo canal. En el extremo transmisor, la IF se va a un puente de extremo frontal, que divide la potencia para las señales y la dirige simultáneamente a los canales de microondas que están trabajando y a los extras (en espera). En consecuencia, tanto los canales que están trabajando como los que están esperando llevan la misma información de banda base. En el extremo receptor, el interruptor de IF pasa la señal de IF del canal que está trabajando al equipo terminal de FM. El interruptor de IF continuamente monitorea la potencia de la señal recibida en el canal que está trabajando y si falla, cambia al canal que está esperando. Cuando la señal de IF del canal que está trabajando se restablece, el interruptor de IF vuelve a tomar su posición normal.[15]

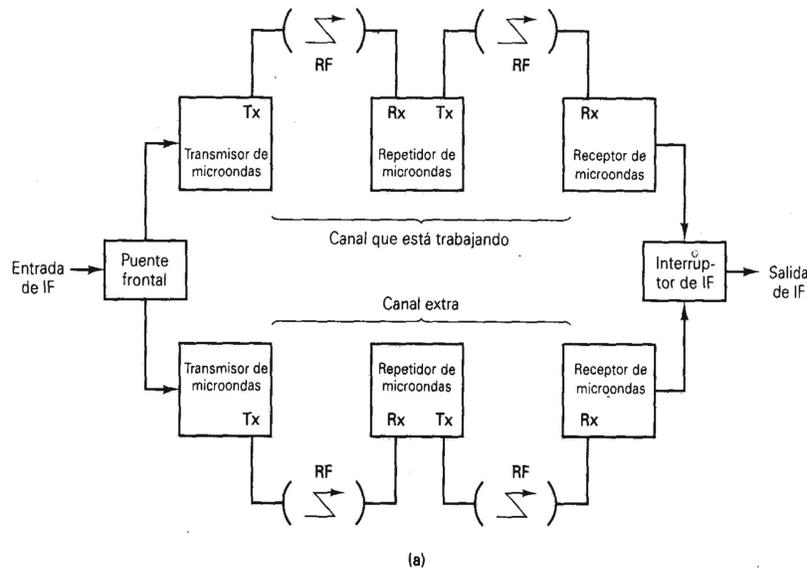


Figura 3.4: Arreglos de conmutación (interruptor) de protección de microondas: respaldo en línea

Intercambio de protección La figura 3.5 muestra un arreglo para el intercambio de protección de diversidad. Este sistema tiene dos canales que están trabajando (canal 1 y canal 2), un canal extra, y un canal auxiliar. El interruptor de EF, en el extremo receptor, continuamente monitorea la intensidad de la señal receptora de ambos canales que están trabajando. Si cualquiera de los dos fallara, el interruptor de IF detecta la pérdida de la portadora y envía, al interruptor de IF de la estación transmisora, una señal de VF (frecuencia de voz) de tono codificado que lo dirige para conmutar la señal de IF, del canal que tiene la falla, al canal extra de microondas. Cuando se restablece el canal que falló, los interruptores de IF vuelven a tomar sus posiciones normales. El canal auxiliar simplemente proporciona una ruta de transmisión, entre los dos interruptores de EF. Típicamente, el canal auxiliar es un radio de microondas de baja potencia y baja capacidad que está diseñado para ser utilizado sólo como canal de mantenimiento.[15]

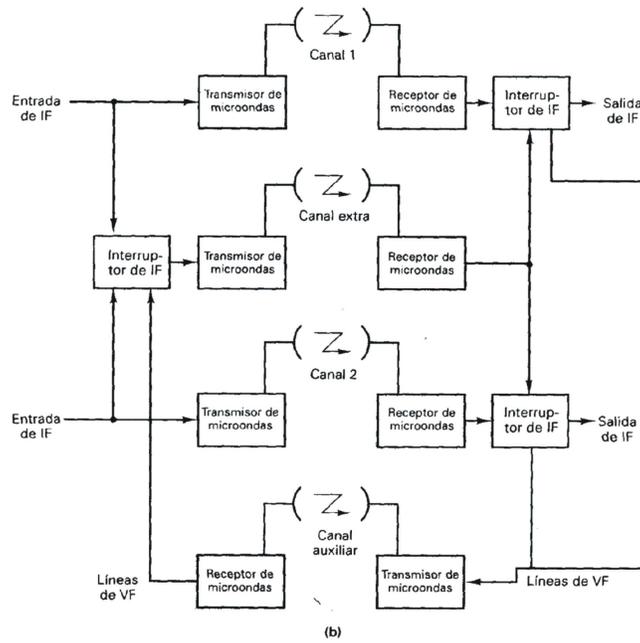


Figura 3.5: Arreglos de conmutación (interruptor) de protección de microondas: diversidad

Confiabilidad

El número de estaciones repetidoras, entre los interruptores de protección, depende de los objetivos de confiabilidad del sistema. Típicamente, hay entre dos y seis repetidoras entre las estaciones de conmutación. Como puede ver, los sistemas de diversidad y los arreglos para el interruptor de protección son bastante similares. La diferencia principal, entre los dos, es que los sistemas de diversidad son arreglos permanentes y están destinados solamente para compensar las condiciones atmosféricas anormales, entre sólo dos estaciones seleccionadas del sistema. Por otro lado, los arreglos para el conmutador de protección, compensan tanto los desvanecimientos de radio como las fallas del equipo y pueden incluir desde seis a ocho estaciones repetidoras en medio de los conmutadores. Los canales de protección también se pueden utilizar como equipo temporal para las comunicaciones, mientras se realiza el mantenimiento de rutina en un canal normal que se está trabajando. Con un arreglo para el conmutador de protección, están protegidas todas las rutas de señales y el equipo de radio. La diversidad se utiliza en forma selectiva, o sea, solamente entre estaciones que históricamente experimentan desvanecimiento severo un alto porcentaje del tiempo. Un estudio estadístico del tiempo fuera de servicio

(por ejemplo, las interrupciones al servicio) causado por desvanecimientos del radio, fallas en el equipo y mantenimiento, es importante para el diseño de un sistema de radio de microondas. Como resultado de tal estudio, se pueden tomar decisiones de ingeniería sobre qué tipo de sistema de diversidad o arreglo para el intercambio de protección es más apto para una aplicación en particular.[15]

Capítulo 4

GENERALIDADES DEL EQUIPO DEL SISTEMA DE MICROONDAS

4.1. Introducción

Sin duda alguna una de las partes fundamentales en la realización eficaz de este enlace de microondas depende en gran medida al equipo que se utilice, de ahí que en este capítulo se da una explicación breve del funcionamiento de este equipo así como algunas de sus características más generales.

En esencia el equipo a usar en el sistema de comunicaciones de radiomicroondas está compuesto en su forma más general por antenas, guías de onda, equipo transmisor / receptor, amplificadores, repetidores, torres, entre otros.

4.2. Antena

Una antena es un dispositivo recíproco pasivo; pasivo en cuanto a que en realidad no puede amplificar una señal (sin embargo una antena puede tener una ganancia), y recíproco en cuanto a que las características de transmisión y recepción de una antena son idénticas, excepto donde las corrientes de alimentación al elemento de la antena se limitan a la modificación del patrón de transmisión.

4.3. Antena de UHF y Microondas

Las antenas utilizadas para UHF (0.3 a 3 GHz) y microondas (1 a 100 GHz) tienen que ser altamente directivas. Una antena tiene una ganancia aparente porque concentra la potencia irradiada en un haz angosto en lugar de enviarlo en forma uniforme en todas las direcciones, y el ancho de haz se reduce con los incrementos en la ganancia de la antena.

Las antenas de microondas casi siempre tienen anchos de haz de media potencia en el orden de 1° o menos. Un ancho de haz angosto minimiza los efectos de la interferencia en fuentes externas y antenas adyacentes. Sin embargo, para transmisión de líneas de vista (como en nuestro caso), un ancho de haz angosto impone varias limitaciones, como la estabilidad mecánica y el desvanecimiento, que pueden producir problemas en la alineación de la antena.[15]

Toda la energía electromagnética emitida por una antena de microonda no se difunde en la dirección del lóbulo principal (haz); parte se concentra en los lóbulos menores llamados lóbulos laterales, que pueden ser fuentes de interferencia en o desde otras trayectorias de señales de microondas. La figura 4.1 muestra la relación entre el haz principal y los lóbulos laterales para una antena de microondas típica, como un reflector parabólico.

Tres características importantes de las antenas de microondas son la relación frontal a trasero, acoplamiento de lado a lado, y acoplamiento trasero a trasero. La relación de frontal a trasero de una antena se define como la relación de su ganancia máxima en la dirección frontal con su ganancia máxima en la dirección trasera. La relación frontal a trasero de una antena en una instalación real puede ser de 20 dB o más por debajo de su valor de espacio libre o aislado debido a las reflexiones en primer plano de los objetos en o cerca del lóbulo de transmisión principal. La relación frontal a trasero de una antena de microondas es crítico en el diseño de sistemas de radio porque las antenas transmisoras y receptoras en estaciones repetidoras a menudo se localizan frente a frente en la misma estructura. Los acoplamientos de trasero a trasero y lado a lado se expresan en decibeles de acoplamiento entre las antenas que llevan señales de salida de transmisoras y antenas cercanas que

llevan señales de entrada de receptoras. Típicamente, las potencias de salida de transmisoras son 60 dB más altas en el nivel de señal que los niveles de entrada de receptoras; de acuerdo con esto, las pérdidas por acoplamiento tienen que ser altas para evitar que una señal de transmisión de una antena interfiera con la señal de recepción de otra antena.[15]

Las antenas altamente direccionales (alta ganancia) se utilizan en sistemas de microondas de punto a punto. Al concentrar la energía de radio de un haz angosto que se puede dirigir hacia la antena receptora, la antena transmisora puede incrementar la potencia radiada efectiva por varias órdenes de magnitud sobre la de una antena no direccional. La antena receptora, en forma análoga a un telescopio, también puede incrementar la potencia recibida efectiva por una cantidad similar. El tipo más común de la antena utilizada para transmisión y recepción de microondas es el *reflector parabólico*.

4.3.1. Antena reflectora parabólica

Las antenas reflectoras parabólicas proporcionan una ganancia y una directividad extremadamente altas y son muy populares para los radio-enlaces de microondas y el enlace de comunicaciones por satélite. Una antena parabólica se compone de dos partes principales: un *reflector parabólico* y el elemento activo llamado *mecanismo de alimentación*.

En esencia, el mecanismo de alimentación aloja la antena principal, que irradia ondas electromagnéticas hacia el reflector . El reflector es un dispositivo pasivo que sólo refleja la energía irradiada por el mecanismo de alimentación en una emisión concentrada altamente direccional donde las ondas individuales están todas en fase entre sí (un frente de ondas en fase).

4.3.1.1. Reflectores parabólicos.

El reflector parabólico es probablemente el componente más básico para una antena parabólica. Los reflectores parabólicos se asemejan a la forma de un plato; por tanto, a veces se les llama antenas parabólicas de plato o solo antenas de plato. Para comprender como funciona un reflector parabólico, es

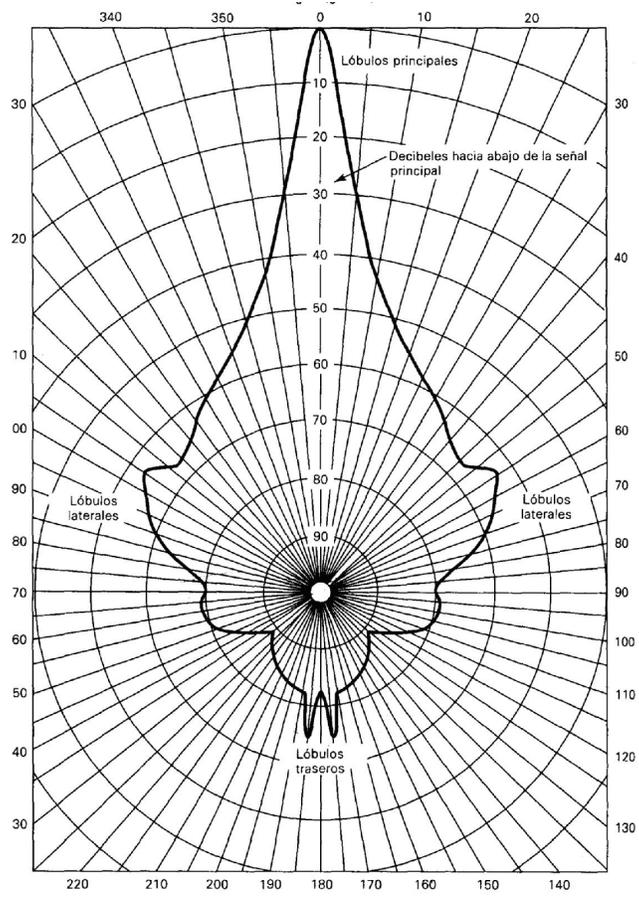


Figura 4.1: Haz principal y lóbulos laterales para una antena de microondas típica.

necesario primero comprender la geometría de una parábola. Una parábola es una curva plana que se expresa matemáticamente como $y = ax^2$ y se define como el lugar geométrico de un punto que se mueve de tal forma que su distancia de otro punto (llamado foco) agregado a su distancia de una línea recta (llamada directriz) es de longitud constante. La figura 4.2 muestra la geometría de una parábola cuyo foco está en el punto F y cuyo eje está en la línea XY.

Para la parábola mostrada en la figura 4.2, existe la siguiente relación:

$$FA + AA' = FB + BB' = FC + CC' = k(\text{Una Longitud constante}) \quad (4.1)$$

FX = longitud de foco de la parábola (metros)

k = una constante para una parábola determinada (metros)

WZ = longitud de la directriz (metros)

La relación de la longitud focal al diámetro de la boca de la parábola (FX/WZ) se llama la relación de apertura o solo apertura de la parábola; el mismo término se utiliza para describir los lentes de las cámaras. Un reflector parabólico se obtiene cuando la parábola se gira alrededor del eje XY. El plato de superficie curva que resulta se llama una parabólica. El reflector que se encuentra detrás del foco de una lámpara de mano o de las luces de un automóvil tiene forma parabólica para concentrar la luz en una dirección en particular.[3]

Una antena parabólica consiste de un reflector parabólico iluminado con energía de microondas irradiada por un sistema de alimentación localizado en el punto focal. Si se irradia energía electromagnética hacia el reflector parabólico desde el foco, todas las ondas irradiadas viajarán la misma distancia para cuando lleguen a la directriz, sin importar desde que punto de la parábola se hayan reflejado. Por tanto, todas las ondas irradiadas hacia la parábola desde el foco estarán en fase cuando lleguen la directriz (línea WZ). En consecuencia, la radiación se concentra a lo largo del eje XY y ocurre la cancelación en todas las direcciones. Un reflector parabólico utilizado para recibir energía electromagnética exhibe exactamente el mismo comportamiento. Por tanto, una antena parabólica exhibe el principio de reciprocidad y funciona igual de bien que una antena receptora para las ondas

que llegan de la dirección XY (normal a la directriz). Los haces recibidos de todas las otras direcciones se cancelan en este punto.

No es necesario que el plato tenga una superficie metálica sólida para reflejar eficazmente o recibir las señales. La superficie puede ser una malla y todavía reflejar o recibir casi tanta energía como una superficie sólida, siempre y cuando el ancho de las aberturas sea menor a 0.1 de longitud de onda. Utilizar una malla en lugar de un conductor sólido reduce considerablemente el peso del reflector. Los reflectores de malla también son más fáciles de ajustar, los afecta menos el aire, y en general proporcionan una estructura mucho más estable.

Ancho del haz de la antena parabólica. . La radiación tridimensional de un reflector parabólico tiene un lóbulo principal que se asemeja a la forma de un cigarro grueso en dirección XY El ancho de haz aproximado de -3 dB para una antena parabólica en grados se da como

$$\theta = \frac{70\lambda}{D} \quad (4.2)$$

ó

$$\theta = \frac{70\lambda}{fD} \quad (4.3)$$

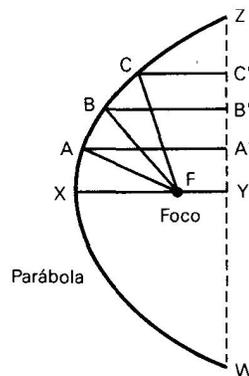


Figura 4.2: Geometría de una parábola

donde:

θ = ancho de haz entre puntos de media potencia (grados)

λ = longitud de onda (metros)

$c = 3 \times 10^8$ metros/segundo

D = diámetro de la boca de la antena (metros)

f = frecuencia (hertz)

y

$$\phi_0 = 2\theta \quad (4.4)$$

donde:

ϕ_0 = ancho del haz entre nulos en el patrón de radiación (grados)

Las ecuaciones 4.2 y b y 4.3 son exactas cuando se utilizan para antenas con aperturas grandes (o sea, ancho de haz angosto).

Eficiencia de la antena parabólica (η). En un reflector parabólico, el reflejo de la superficie del plato no es perfecto. Por tanto, una pequeña porción de la señal irradiada desde el mecanismo de alimentación se absorbe en la superficie del plato. Además, la energía cerca de la orilla del plato no se refleja si no más bien se deflectará del otro lado de la orilla del plato. Esto se llama derrame o fuga. Debido a imperfecciones dimensionales, sólo de 50 % a 75 % aproximadamente de la energía emitida desde el mecanismo de alimentación refleja realmente la parabólica. Además, en una antena real el mecanismo de alimentación no es una fuente puntual; ocupa un área finita en frente del reflector y en realidad tapa una pequeña área en el centro del plato y causa un área sombreada en frente de la antena que es incapaz de recoger o enfocar la energía. Estas imperfecciones contribuyen a una eficiencia típica para una antena parabólica de sólo aproximadamente 55 % (= 0.55). O sea, sólo 55 % de la energía irradiada por el mecanismo de alimentación en realidad se propaga hacia adelante en un haz concentrado.[3]

Ganancia de potencia de la antena parabólica. Para una antena parabólica transmisora, la ganancia de potencia es aproximadamente de:

$$A_p = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (4.5)$$

donde:

A_p = ganancia de potencia con relación a una antena isotrópica

D = diámetro de boca del reflector parabólico (metros)

η = eficiencia de la antena*

λ = longitud de onda (metros/ciclo)

*potencia recibida por la antena relativa a la potencia irradiada por el mecanismo de alimentación.

y, para una eficiencia típica de la antena de 55% ($\eta = 0.55$), la ecuación 4.5 se reduce a:

$$A_p = \eta \left(\frac{5,4 D^2 f^2}{c^2} \right) \quad (4.6)$$

donde:

c = velocidad de propagación (3×10^8 metros/segundo).

En forma de decibeles

$$A_{p(dB)} = 20 \log f(MHz) + 20 \log D(metros) - 42,2 \quad (4.7)$$

donde:

$A_{p(dB)}$ = ganancia de potencia con relación a una antena isotrópica

D = diámetro de la boca de un reflector parabólico (metros)

f = frecuencia (MHz)

42.2 = constante (dB)

(Para una eficiencia de la antena de 100 %, agregue 2.66 dB al valor calculado con la ecuación 4.7)

De las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7, puede verse que la ganancia de potencia de una antena parabólica es proporcionalmente inversa a la longitud de onda al cuadrado. En consecuencia, el área (tamaño) del plato es un factor importante al diseñar las antenas parabólicas. Con frecuencia, el área del reflector en sí se da en longitudes de onda al cuadrado (a veces llamada el área eléctrica o efectiva del reflector). Entre más grande sea el área, más grande es la relación del área a una longitud de onda, y más alta es la ganancia de potencia.[3]

Para una antena parabólica receptora, la superficie del reflector nuevamente no está completamente iluminada, reduciendo efectivamente el área de la antena. En una antena parabólica receptora, el área efectiva se llama el área de captura y siempre es menor que la verdadera área de la boca. El área de captura se puede calcular comparando la potencia recibida con la densidad de potencia de la señal que se está recibiendo. El área de captura se expresa matemáticamente como

$$A_c = kA \quad (4.8)$$

donde:

A_c = área de captura (metros cuadrados)

A = área real (metros cuadrados)

k = una constante que depende del tipo de la antena utilizada y de la configuración (aproximadamente 0.65 para una parabólica alimentada por un dipolo de media onda).

Por tanto, la ganancia de potencia para una antena parabólica receptora es

$$A_p = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \frac{4\pi kA}{\lambda^2} \quad (4.9)$$

Sustituyendo el área de la boca de una parabólica en la ecuación 4.9, se puede acercar aproximadamente a la ganancia de potencia de una antena

parabólica receptora como:

$$A_p = 6,4 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2 \quad (4.10)$$

donde:

D = diámetro del plato (metros)
 λ = longitud de onda (metros/ciclo)

En forma de decibeles,

$$A_{p(dB)} = 10 \log \left[6,4 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

La ganancia de la potencia transmisora calculada utilizando la ecuación 4.7 y la ganancia de potencia de la antena receptora calculada utilizando la ecuación 4.11 dará aproximadamente los mismos resultados para una antena determinada, probando así la reciprocidad de las antenas parabólicas.

El patrón de radiación mostrado en la figura 4.1 es típico tanto para la antena parabólica transmisora como para la receptora. La ganancia de potencia dentro del lóbulo principal es aproximadamente de 75 dB más que en la dirección hacia atrás y casi 65 dB más que la ganancia máxima del lóbulo lateral.

4.3.2. Mecanismos de alimentación.

El mecanismo de alimentación de una antena parabólica realmente irradia la energía electromagnética y, por tanto se le suele llamar la antena principal. El mecanismo de alimentación es de mayor importancia porque su función es irradiar la energía hacia el reflector. Un mecanismo de alimentación ideal debe dirigir toda la energía hacia el reflector parabólico y no tener efecto de sombra. En la práctica, ésto es imposible de realizar, aunque si se tiene cuidado al diseñar el mecanismo de alimentación, la mayor parte de la energía se puede

radiar en la dirección correcta, y se puede minimizar el efecto de sombra. Hay tres tipos principales de mecanismos de alimentación para antenas parabólicas: *alimentación central*, *alimentación de corneta* y *alimentación Cassegrain*.

Alimentación central. La figura 4.3 muestra un diagrama para un reflector parabólico alimentado centralmente con un reflector esférico adicional. La antena principal se coloca en el foco. La energía radiada hacia el reflector se refleja hacia afuera en un haz concentrado. Sin embargo, la energía no reflejada por la parabólica se extiende en todas direcciones y tiene la tendencia de romper el patrón de radiación general. El reflector esférico vuelve a dirigir tales emisiones nuevamente hacia el reflector parabólico, donde se vuelven a reflejar en la dirección correcta. Aunque el reflector esférico adicional ayuda a concentrar más la energía en la dirección deseada, también tiene la tendencia de bloquear algunas de las reflexiones iniciales. En consecuencia, el bien que realiza se compensa con su propio efecto de sombra, y su funcionamiento en general es solamente de manera marginal mejor que sin el reflector esférico adicional.

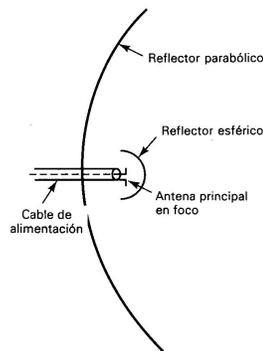


Figura 4.3: Antena parabólica con alimentación central.

Alimentación de corneta. La figura 4.4a muestra un diagrama para un reflector parabólico utilizando alimentación de corneta. Con un mecanismo de alimentación de corneta, la antena principal es una pequeña antena de corneta en lugar de un simple dipolo o tabla de dipolo. La corneta es sólo una porción de material de guía de onda que se coloca en el foco y radia un

patrón algo direccional hacia el reflector parabólico. Cuando un campo electromagnético que se está propagando alcanza la boca de la corneta, continúa propagándose en la misma dirección general, excepto que, de acuerdo con el principio de Huygens, se extiende lateralmente, y el frente de onda eventualmente se vuelve esférico. La estructura de la corneta puede tener varias formas distintas, como se muestra en la figura 4.4b (dirigido solamente en una dirección), piramidal o cónico. Así como con la alimentación central, una alimentación de corneta presenta algo de obstrucción a las ondas reflejadas del plato parabólico.

Alimentación Cassegrain. La alimentación Cassegrain lleva el nombre de un astrónomo del siglo XVIII y evolucionó directamente de los telescopios ópticos astronómicos. La figura 4.5 muestra la geometría básica de un mecanismo de alimentación Cassegrain. La principal fuente de radiación se localiza en o justo detrás de una pequeña abertura en el vértice de la parábola, en lugar del foco. La antena principal se apunta a un pequeño reflector secundario (subreflector Cassegrain) localizado entre el vértice y el foco.

Los haces emitidos de la antena principal son reflejados desde el subreflector Cassegrain y luego iluminan el reflector parabólico principal exactamente como si se hubieran originado en el foco. Los haces son manejados por el reflector parabólico de la misma forma que los mecanismos de alimentación central y alimentación de corneta. El subreflector debe tener una curvatura hiperboloide para reflejar los haces desde la antena principal de tal forma, como para funcionar como una fuente virtual en el foco parabólico. La alimentación Cassegrain se utiliza por lo regular para recibir señales extremadamente débiles o cuando se requieren líneas de transmisión extremadamente largas o corridas de guías de ondas y es necesario colocar preamplificadores de bajo ruido tan cerca de la antena como sea posible. Con la alimentación Cassegrain, los preamplificadores se pueden colocar justo antes del mecanismo de alimentación y no ser una obstrucción para las ondas reflejadas.

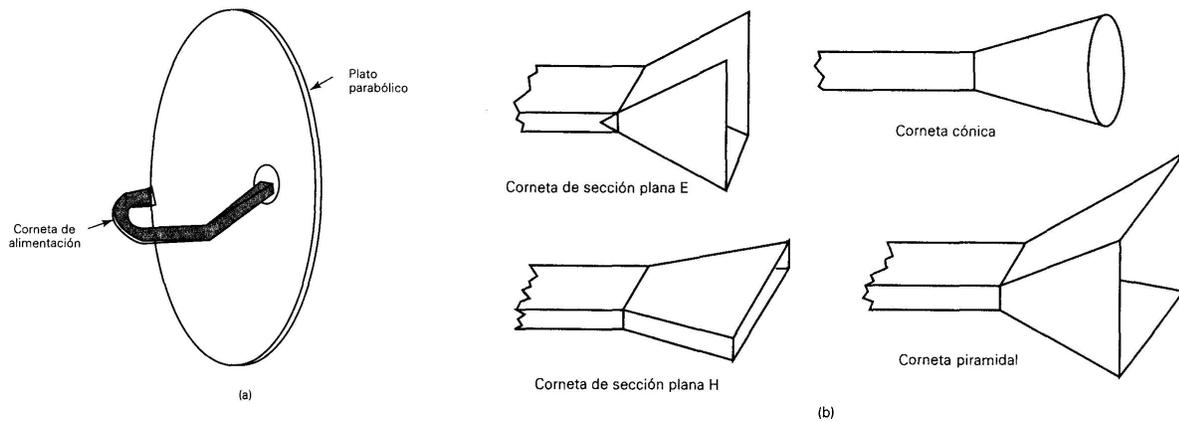


Figura 4.4: Antena parabólica con alimentación de corneta: (a) alimentación de corneta; (b) tipos de guía de onda de cornetas.

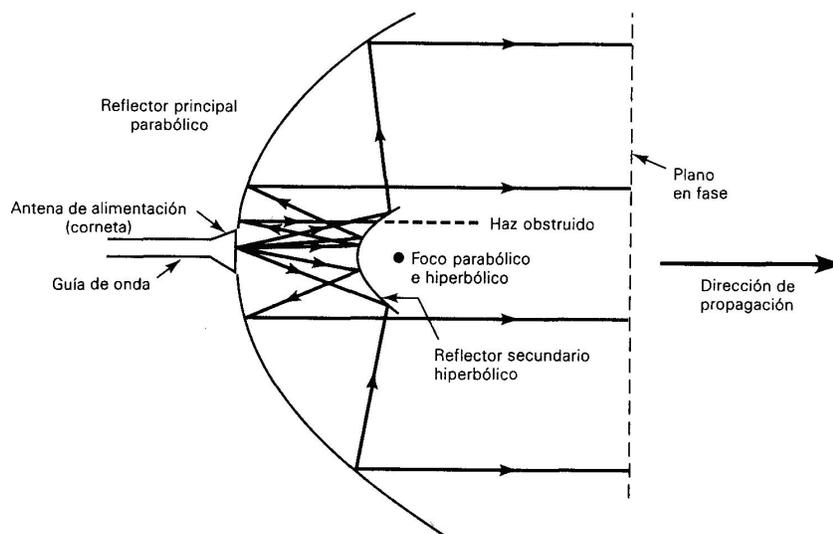


Figura 4.5: Antena parabólica con una alimentación Cassegrain.

4.3.2.1. Sistemas de antenas

Las antenas altamente direccionales son usadas con sistemas de microondas punto a punto. Para enfocar la radio energía dentro de un haz angosto que puede ser dirigido hacia la antena receptora, la antena transmisora puede incrementar el poder efectivo radiado para la mayoría de los ordenes de magnitud sobre una antena no direccional . La antena receptora también, de manera análoga a la de un telescopio, puede incrementar la potencia recibida por una cantidad similar.

Si bien la ganancia es la característica primaria, hay otras características de la antena las cuales son de importancia en los sistemas de comunicaciones. El ancho de haz de la antena, la magnitud de los lóbulos laterales, los patrones de sensibilidad y la radiación del off-axis, y la discriminación de la polarización son significativas para los objetivos de coordinación de frecuencias. El par de impedancias (usualmente expresado como VSWR) cruzan las bandas y suelen ser de gran importancia en situaciones donde la distorsión de eco es significativa. Consecuentemente, no es suficiente simplemente el seleccionar un sistema de antena para una ganancia óptima.[3]

La ganancia de la antena requerida está determinada por un cálculo, el cual envuelve el conocimiento de la potencia de salida del transmisor, las pérdidas fijadas de las guías de onda, los circuladores, los híbridos, radomes, y algunos otros puntos entre los transmisores y la antena, la atenuación por desvanecimiento en la ruta, y la fuerza requerida por el receptor para obtener el ruido requerido y el margen de desvanecimiento.[3]

La ganancia de la antena está expresada en dB, relativo a la ganancia de una antena isotrópica, la cual es teóricamente una antena omnidireccional, con una ganancia la cual por definición sería de 1 o 0 dB. Para la frecuencia de operación dada, la ganancia de una antena (para transmisión ó recepción) es una función de el área efectiva y está dada por:

$$G = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi Ae}{\lambda^2} \right) \quad (4.12)$$

donde:

G = Ganancia de la antena isotr3pica, en dB

A = Area de apertura de la antena

e = Eficiencia de la antena

λ = Longitud de onda para la frecuencia de operaci3n

4.4. Polarizaci3n de antena

La polarizaci3n de una antena se refiere s3lo a la orientaci3n del campo el3ctrico radiado desde 3sta. Una antena puede polarizarse en forma lineal (por lo regular, polarizada horizontal o verticalmente, suponiendo que los elementos de la antena se encuentran dentro de un plano horizontal o vertical), en forma el3ptica o circular. Si una antena irradia una onda electromagn3tica polarizada verticalmente, la antena se define como polarizada verticalmente; si la antena irradia una onda electromagn3tica polarizada horizontalmente, se dice que la antena est3 polarizada horizontalmente; si el campo el3ctrico radiado gira en un patr3n circular, est3 polarizada circularmente.

4.5. Ancho de haz de la antena

El ancho del haz de la antena es s3lo la separaci3n angular entre los dos puntos de media potencia (-3dB) en el l3bulo principal del patr3n de radiaci3n del plano de la antena, por lo general tomado en uno de los planos "principales". El ancho del haz para la antena, cuyo patr3n de radiaci3n se muestra en la figura siguiente, es un 3ngulo formado entre los puntos A, X y B (3ngulo θ). Los puntos A y B son los puntos de media potencia (la densidad de potencia en estos puntos es la mitad de lo que es, una distancia igual de la antena en la direcci3n de la m3xima radiaci3n). El ancho del haz de la antena se llama ancho de haz de -3dB o ancho de haz de media potencia.

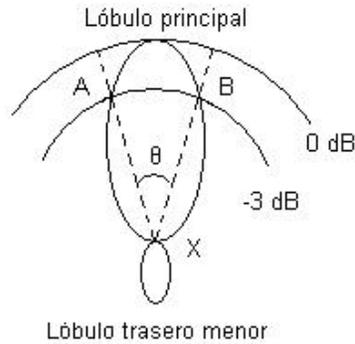


Figura 4.6: Ancho del haz de la antena

4.5.1. Ancho de banda de la antena

El ancho de banda de la antena se define como el rango de frecuencias sobre los cuales la operación de la antena es satisfactoria. Esto, por lo general, se toma entre los puntos de media potencia, pero a veces se refiere a las variaciones en la impedancia de entrada de la antena.

La impedancia de entrada de la antena es sólo la relación del voltaje de entrada de la antena con la corriente de entrada. Matemáticamente, la impedancia de entrada es:

$$Z_{entrada} = \frac{E_i}{I_i} \quad (4.13)$$

donde:

$Z_{entrada}$ = impedancia de entrada de la antena (ohms)

E_i = Voltaje de entrada de la antena (volts)

I_i = Corriente de entrada de la antena (amperes)

La impedancia de entrada de la antena generalmente es compleja.[3] Sin embargo, si el punto de alimentación se encuentra en un máximo de corriente y no hay componente reactiva, la impedancia de entrada es igual a la suma de la impedancia de radiación y la impedancia efectiva.

4.5.2. Impedancia de entrada de la antena

La radiación proveniente de una antena es el resultado directo del flujo de corriente de RF. La corriente fluye a la antena a través de la línea de transmisión., que está conectada a un espacio pequeño entre los conductores que componen la antena. El punto en la antena donde se conecta la línea de transmisión se llama Terminal de entrada de la antena o solamente punto de alimentación. El punto de alimentación presenta una carga en ca a la línea de transmisión llamada impedancia de entrada de la antena. Si la impedancia de salida del transmisor y la impedancia de entrada de la antena son iguales a la impedancia característica de la línea de transmisión, no habrá ondas estacionarias en la línea, y se transfiere la potencia máxima a la antena y se irradia.

4.5.3. Guías de onda

Las líneas de transmisión de cables paralelos, incluyendo los cables coaxiales, no pueden propagar eficazmente la energía electromagnética arriba de 1 GHz aproximadamente, y en frecuencias arriba de 15 GHz aproximadamente, son inservibles para distancias mayores de unas cuantas pulgadas. Esto se debe a la atenuación causada por el efecto piel y por las pérdidas de radiación. Además, las líneas de transmisión de cables paralelos no se pueden utilizar para propagar señales con altas potencias porque el alto voltaje asociado con ellas causa que el dieléctrico que separa los dos conductores se rompa. En consecuencia, las líneas de transmisión de cables paralelos son imprácticas para muchas aplicaciones de UHF y de microondas. Existen varias alternativas, incluyendo cables de fibra óptica y guías de onda.

En su forma más sencilla, una guía de onda es un tubo conductor hueco, por lo general rectangular en sección transversal, pero a veces circular o elíptico. Las dimensiones de la sección transversal se seleccionan de tal forma que las ondas electromagnéticas se propagan dentro del interior de la guía (de ahí el nombre de guía de onda). Una guía de onda no conduce corriente en el sentido real, sino que sirve como un límite que confina la energía electromagnética. Las paredes de la guía de onda son conductores y por tanto

reflejan energía electromagnética de la superficie. Si la pared de la guía de onda es un buen conductor y muy delgado, fluye poca corriente en las paredes interiores y, en consecuencia, se disipa muy poca potencia. En una guía de onda, la conducción de energía no ocurre en las paredes de la guía de onda, sino a través del dieléctrico dentro de la guía de onda, que por lo general, es de aire deshidratado o gas inerte. En esencia, una guía de onda es análoga a un conductor de cable metálico con el interior removido. La energía electromagnética se propaga a lo largo de la guía de onda reflejándose hacia un lado y otro en un patrón de zig zag.

Al discutir el comportamiento de las guías de ondas, es necesario hablar en términos de conceptos de campos electromagnéticos (o sea, campos eléctricos y magnéticos), en lugar de corrientes y voltajes como para líneas de transmisión. El área de la sección transversal de una guía de onda tiene que estar en el mismo orden que la longitud de onda de la señal que se está propagando. Por tanto, la guía de onda se restringe por lo regular a frecuencias por arriba de 1 Ghz.

4.5.4. Cable Coaxial

Es llamado así porque su construcción es de forma coaxial, tenemos el conductor central, un recubrimiento bio-eléctrico, una malla de alambre y un recubrimiento externo (que funge como recubrimiento y como aislante). La construcción del cable debe de ser firme y uniforme, ya que si no es así no se tiene un funcionamiento adecuado por factores que se mencionarán a continuación. Cuando hay refracción alrededor del coaxial, esta es atrapada, y esto evita posibles interferencias. Una de las cosas mas importantes del coaxial es su ancho de banda y su resistencia (o impedancia); estas funciones dependen del grosor del conductor central (malla), si varia la malla, varía la impedancia también.

El nombre de Coaxial viene de la contracción de Common Access o acceso común al medio; ya que es un cable muy usado para la topología de ducto, donde los nodos se conectan a un medio de acceso común. El cable coaxial cobro una gran popularidad en sus inicios por su propiedad idonea de transmisión de voz, audio y video, ademas de textos e imágenes. El cable coaxial esta estructurado (de adentro hacia afuera) de los siguientes componentes:

Un núcleo de cobre sólido, o de acero con capa de cobre, o bien de una serie de fibras de alambre de cobre entrelazadas (dependiendo del fabricante).

Una capa de aislante que recubre el núcleo o conductor, generalmente de material de polivinilo, dicho aislante tiene la función de guardar una distancia uniforme del conductor con el exterior.

Una capa de blindaje metálico, generalmente cobre o aleación de aluminio entretejido (a veces solo consta de un papel metálico) cuya función es la de mantenerse lo más apretado posible para eliminar las interferencias, además de que evita de que el eje común se rompa o se sesge demasiado - ya que si no se mantiene el eje común, trae como consecuencia que la señal se va perdiendo - lo cual afectaría la calidad de la señal.

Una capa final de recubrimiento, generalmente de color negro (coaxial delgado) o amarillo (coaxial grueso), y por lo general de vinilo, xelón, polietileno uniforme para mantener la calidad de las señales.

Los conectores de cable coaxial son los llamados conectores BNC; estos solo se usan para el coaxial delgado; para el cable coaxial grueso se usan conectores tipo N, que son similares. Sin embargo, para conectar un nodo al ducto principal del coaxial grueso no se usan conectores BNC ni tipo N, sino los conectores de tipo "Vampiro", los cuales están formados de una especie de "mandíbulas" que atrapan el cable y lo perforan hasta llegar al núcleo conductor, mientras que unas especies de "garras" traspasan la cubierta del conductor, llegando hasta la capa de malla y cerrando el circuito. De estos conectores vampiros sale una conexión de tipo AUI (Attached Unit Interface), que finalmente se conecta por medio de un cable a la tarjeta de red del nodo.

4.6. Mezcladores

Una variedad de métodos son usados para combinar un transmisor y un receptor ó en la mayoría de los transmisores y receptores, en la operación de un sistema de antena sencillo. Estos métodos nos obligan a usar guías de onda, switches, híbridos, filtros, fasores, aislantes, circuladores, y otros dispositivos que provocan cierta atenuación. Esta atenuación debe ser incluida cuando sea medida la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor, ó debe ser tomada en cuenta cuando se calculen los patrones de pérdida de la red. El porque de tener una amplia variedad de dispositivos con los que se puede

tener un sin número de arreglos se debe principalmente a las especificaciones del proveedor para obtener los datos de atenuación. Estos datos deben ser claramente especificados, en el punto de que la potencia del transmisor y sensibilidad del receptor son medidas, y la pérdida de algún dispositivo es localizada entre este punto y la antena.

4.7. Amplificadores

Por lo general, cada canal de onda portadora contiene, además de su generador individual de portadora: modulador, demodulador y filtros; amplificadores de canal, uno en la rama de transmisión y otro en la rama de recepción. El amplificador de transmisión se utiliza para elevar el nivel de la señal de la onda portadora que transmite el canal, generalmente se pone a la salida del modulador. El amplificador de recepción de un canal normalmente está a la salida del demodulador y se utiliza para elevar el nivel de las señales de voz, datos, etc.

Por otro lado, en una terminal de onda portadora se emplean además lo que se conoce como amplificadores de transmisión y de recepción comunes. Es decir, los diferentes canales alimentan sus salidas a la entrada de un amplificador común. Este se encarga de que todas las señales de los canales se transmitan sobre la línea de transmisión con igual intensidad. En el extremo distante de la línea de transmisión, se encontrará el amplificador de recepción común, que se ocupa de llevar el nivel de las señales de onda portadora al valor adecuado que permita su transmisión a través de los diferentes filtros y sufrir el proceso de demodulación.

4.8. Repetidores

Los Repetidores o Repeaters son equipos que actúan a nivel físico. Prolongan la longitud de la red uniendo dos segmentos, replicando y amplificando la señal, pero junto con ella amplifican también el ruido.

La red sigue siendo una sola, con lo cual, son válidas las limitaciones en cuanto al número de estaciones que pueden compartir el medio.

Los repetidores análogos frecuentemente amplifican la señal junto con el ruido causado por la pérdida en la transmisión, mientras que los digitales pueden reconstruir una señal casi a su calidad original.

En una red de datos, un repetidor puede reenviar mensajes entre subredes que utilizan diferentes protocolos o tipos de cable. Los concentradores puede funcionar como repetidores reenviando mensajes a todos los dispositivos de red conectados. Un repetidor no puede realizar el enrutamiento inteligente de los puentes o enrutadores.

La distancia permisible entre un transmisor de microondas y su receptor asociado, depende de algunas variables del sistema, como la potencia de salida del transmisor, el umbral de ruido del receptor, terreno, condiciones atmosféricas, capacidad del sistema, objetivos de confiabilidad y las expectativas de funcionamiento. Típicamente, esta distancia está entre 15 y 40 millas. Los sistemas de microondas de largo alcance abarcan distancias considerablemente más largas que éstas. En consecuencia, un sistema de microondas de un solo brinco, no es adecuado para la mayoría de las aplicaciones prácticas del sistema. Con los sistemas que son de más de 40 millas o cuando las obstrucciones geográficas, como una montaña, bloquean la ruta de transmisión, se necesitan los repetidores. Un repetidor de microondas es un receptor y un transmisor colocados espalda con espalda o en tándem con el sistema. La estación del repetidor recibe una señal, la amplifica, le da nueva forma, y luego retransmite la señal al siguiente repetidor o estación terminal que sigue hacia abajo en la línea.

4.9. Torres

Estas estructuras pueden variar según las necesidades y las condiciones del sitio en donde se vaya a colocar. Así, existen desde Torres Arriostradas (torres con tirantes), Torres Auto soportadas, monopolos, mástiles, entre otras, las cuales suelen estar compuestos por perfiles y ángulos de acero unidos por tornillos, pernos o remaches o por medio de soldadura. Estas estructuras podrán ser de diversas alturas, dependiendo de la altura requerida para poder suministrar un correcto funcionamiento.

También la geometría de una estructura, como una torre autosoportada por ejemplo, puede variar según el fabricante de la torre. Existen actualmente muchas compañías que se dedican a fabricar estas estructuras y muchas de ellas tienen sus modelos optimizados para que se tenga un correcto funcionamiento de la estructura, en donde los perfiles y ángulos varían de tamaño y espesor dependiendo de la altura de la estructura, y del lugar en donde se va a construir, afectando principalmente la velocidad del viento que exista en el lugar en cuestión.

Torres Arriostradas o Atirantadas

Muchas veces se requieren instalar antenas celulares en puntos específicos o regiones, por lo que se recurre a construir torres arriostradas sobre edificaciones existentes. Estas torres cuentan generalmente de tirantes o arriostres a diferentes distancias. El peso que genera la torre sobre la estructura existente no es muy grande, por lo que no le adiciona mucho peso a la edificación, sin embargo, se deben de colocar el apoyo de la torre y sus arriostres sobre columnas y elementos resistentes, porque la descarga de la torre no podría colocarse sobre una losa o algún otro elemento inadecuado, porque este podría fallar. La base de la torre transmitirá un esfuerzo de compresión en donde este apoyada, y los arriostres generalmente transmitirán esfuerzos de tensión.

Los cables o arriostres generalmente se tensan al 10% de su resistencia, la cual es proporcionada por el fabricante. Así, por ejemplo, si el cable tiene una resistencia a la ruptura de 4.95 Ton en tensión, entonces se acostumbra tensar los cables a 0.495 Ton. También se pueden tensar los cables con diferentes fuerzas, calculando una tensión tal que el sistema este en equilibrio.

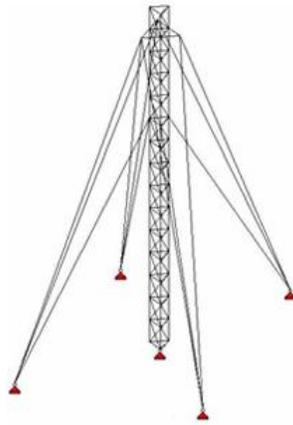


Figura 4.7: Torre Arriostrada

Cuando al centro de la edificación no se encuentre una columna para poder apoyar la base de la torre, se puede recurrir a la colocación de alguna viga de acero o alguna estructura para que la torre se apoye. Esta estructura podrá ya apoyarse sobre otras columnas de la edificación.

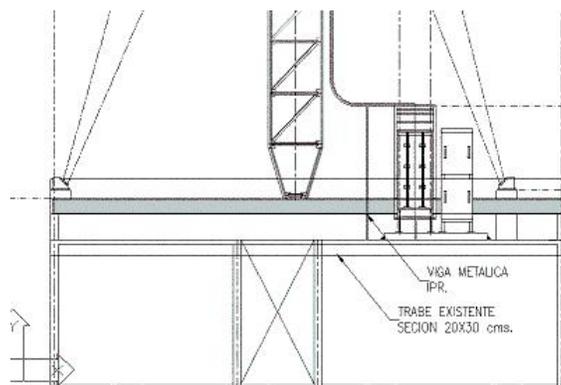


Figura 4.8: Torre sobre viga metálica

Torres autoportadas

Estas torres se construyen sobre terrenos, en áreas urbanas o cerros, y deberán de contar con una cimentación adecuada para poder resistir las fuerzas a las que están sometidas. La geometría de estas torres depende de la altura, la ubicación y del fabricante de la torre.

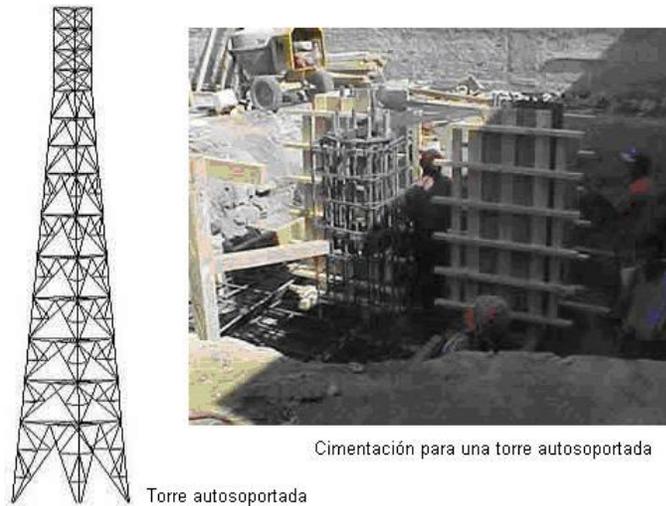


Figura 4.9: Torre autoportada y su Cimentación

Torre tipo monopolo

Estas estructuras son instaladas en lugares en donde se requiere conservar la estética, pues son las que ocupan menos espacio, y se pintan de algún color o se adornan para que se permita que la estructura se camufleje y se simule la vegetación. Como estas estructuras están sobre terrenos, se deberá de construir una cimentación adecuada para resistir los efectos de la misma.



Figura 4.10: Torre monopolo y su Cimentación

4.10. Ganancia del sistema

En su forma más sencilla, la ganancia del sistema es la diferencia entre la potencia nominal de salida de un transmisor y la potencia mínima de entrada requerida por un receptor. La ganancia del sistema debe ser mayor que o igual a la suma de todas Las ganancias y pérdidas incurridas por una señal, conforme se propaga de un transmisor a un receptor. En esencia, representa la pérdida neta de un sistema de radio. La ganancia del sistema se utiliza para predecir la confiabilidad de un sistema para determinados parámetros del sistema. Matemáticamente, la ganancia del sistema es:

$$G_s = P_t - C_{mnima} \quad (4.14)$$

en donde:

G_s = ganancia del sistema (dB)

P_t = potencia de salida del transmisor (dBm)

C_{mnima} = potencia mínima de entrada del receptor para un objetivo de calidad determinado (dBm)

Y en donde:

$$P_t - C_{mnima} \geq \text{perdidas} - \text{ganancias} \quad (4.15)$$

Ganancias:

A_t ganancia de la antena transmisora (dB) relativa a un radiador isotrópico

A_r ganancia de la antena receptora (dB) relativa a un radiador isotrópico

L_p pérdida de la trayectoria de espacio libre entre antenas (dB)

L_f pérdida del alimentador de guías de ondas (dB) entre la red de distribución (red combinada de canales o red de separación de canales) y su antena respectiva

L_b pérdida total de acoplamiento o ramificación (dB) en los circuladores, filtros, y red de distribución entre la salida de un transmisor o la entrada de un receptor y su alimentador de guías de ondas respectivo

f_m margen de desvanecimiento para un determinado objetivo de confiabilidad

Matemáticamente, la ganancia del sistema es:

$$G_s = P_t - C_{mnima} \geq f_m + L_p + L_f + L_b - A_t - A_r \quad (4.16)$$

en donde todos los valores están expresados en dB o dBm. Debido a que la ganancia del sistema indica una pérdida neta, las pérdidas están representadas con valores dB positivos y las ganancias están representadas con valores dB negativos. Las figuras 4.11 y 4.12 muestran un diagrama general del sistema de microondas e indica en dónde han incurrido las pérdidas y las ganancias respectivas.

Frecuencia (GHz)	Pérdida del alimentador, L_f	Pérdida por ramificación (dB)			Ganancia de la antena, A_t o A_r		
		Tipo	Pérdida (dB/100 m)	Diversidad:		Tamaño (m)	Ganancia (dB)
				Frecuencia	Espacio		
1.8	Cable coaxial lleno de aire	5.4	5	2	1.2	25.2	
					2.4	31.2	
					3.0	33.2	
					3.7	34.7	
7.4	Guía de ondas elípticas EWP 64	4.7	3	2	1.5	38.8	
					2.4	43.1	
					3.0	44.8	
					3.7	46.5	
8.0	Guía de ondas elípticas EWP 69	6.5	3	2	2.4	43.8	
					3.0	45.6	
					3.7	47.3	
					4.8	49.8	

Figura 4.11: Parámetros para la ganancia del sistema

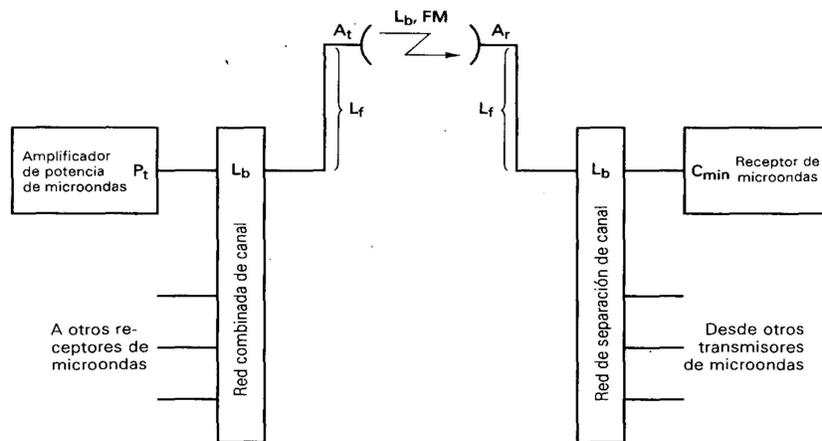


Figura 4.12: Ganancias y pérdidas del sistema.

Pérdida de trayectoria de espacio libre.

La pérdida de trayectoria de espacio libre se define como la pérdida incurrida por una onda electromagnética conforme se propaga en una línea recta a través de un vacío sin ninguna absorción o reflexión de energía de los objetos cercanos. La expresión para la pérdida de trayectoria de espacio libre se da como:

$$L_p = (4\pi D/\lambda)^2 = (4\pi f D/C)^2 \quad (4.17)$$

donde:

L_p Pérdida de trayectoria de espacio libre

D Distancia

f Frecuencia

λ Longitud de onda

C Velocidad de la luz en el espacio libre (3×10^8 m/s)

Convirtiendo a dB obtenemos:

$$L_p = 20 \log(4\pi f D/C)^2 = 20 \log 4\pi/C + 20 \log f + 20 \log D \quad (4.18)$$

Cuando la frecuencia se da en MHz y la distancia en km,

$$L_p(dB) = 20 \log[4\pi(10)^6(10)^3/3 \times 10^8] + 20 \log f(Mhz) + 20 \log D(Km) = 32,4 + 20 \log f + 20 \log D \quad (4.19)$$

Cuando la frecuencia se da en GHz y la distancia en km,

$$L_p = 92,4 + 20 \log f + 20 \log D \quad (4.20)$$

Se pueden hacer conversiones similares utilizando distancias en millas, frecuencias en kHz, etcétera.

4.10.1. Atenuación en el espacio libre.

Las pérdidas en el espacio libre están definidas como las pérdidas que se obtendrían entre dos antenas isotrópicas en el espacio libre, donde no hay influencias terrestres u obstáculos, en otras palabras, donde el bloqueo, la refracción, la difracción y la absorción no existe. Una antena isotrópica está definida como la que radia o recibe energía en todas direcciones. Si bien, esta antena es físicamente irrealizable si provee de un conveniente punto de referencia para los cálculos. Las cartas de patrones de pérdidas para transmisiones de microondas son comúnmente preparados sobre la base de las pérdidas en el espacio libre entre las antenas isotrópicas, y las ganancias de antena son especificadas con respecto a la ganancia de una antena isotrópica. Estas ganancias pueden ser fácilmente aplicadas para obtener la pérdida total de la guía de onda del exterior del transmisor a la guía de onda y a la entrada de el receptor. La fórmula para calcular las perdidas en el espacio libre es:

$$A = 96,6 + 20\log_{10}f + 20\log_{10}D \quad (4.21)$$

Donde:

A Atenuación en el espacio libre entre dos antenas, en dB

f Frecuencia en GHz

D Distancia en millas

4.11. Distorsión por retardo.

La distorsión por retardo puede ser causada por la ruta del enlace, el sistema de guía de onda o por el mismo equipo. El producto final es ruido que distorsiona el mensaje, los datos ó los canales de televisión asignados a la banda base. Puede ser particularmente destructivo para los servicios de datos asignados a la parte de banda base, cuando los mensajes o los servicios de datos están asignados a otra parte de la banda base.

En el camino de propagación, la distorsión por retardo es causada por la energía reflejada la cual incide en la antena receptora, pero que es retardada un número de longitudes de onda en comparación con la señal directa. En

este caso no es la fase instantánea sino el tiempo de retardo el que causa la distorsión.

El eco en la guía de onda es otra fuente de distorsión por retardo. Esto resulta de emparejar las impedancias ó irregularidades. La principal precaución es evitar longitudes excesivas de la guía de onda y minimizar la cantidad de secciones de guías de onda flexibles.

4.12. Suministro de energía

El consumo de energía de los centros Emisores y Remisores o Repetidores es tan variable como lo pueda ser el tipo y número de equipos que están instalados en ellos; y puede oscilar en márgenes tan amplios como los que van desde apenas 250 volts a los 300 Kvatios (en centros de gran potencia).

Esta energía se suministra perfectamente mediante las líneas de la red de distribución eléctrica convencional, porque representan gran comodidad de mantenimiento frente a otras energías alternativas tales como los grupos electrógenos, que necesitan de suministro periódico de combustible. Se emplean líneas de alta tensión cuando el consumo es superior a 5Kvatios; y líneas de baja tensión para consumos inferiores.

Los repetidores, que suelen ser instalaciones muy aisladas, pueden alimentarse con baterías, paneles solares, generadores eólicos o generadores de butano.

Por otra parte y teniendo en cuenta la importancia de la estación transmisora para mantener sin ruptura el enlace, normalmente disponen de energía de reserva para asegurar el funcionamiento en caso de fallo en el suministro de energía de la red de distribución. Estas instalaciones pueden ser:

- Grupos electrógenos auxiliares de reserva.
- Segunda línea de energía; que tenga el enganche en un punto distinto a la primera.

Capítulo 5

CALCULOS DE DISEÑO PARA EL ENLACE DE COMUNICACION POR MICROONDAS

5.1. Introducción

Actualmente, los sistemas de difusión de radiomicroondas terrestre proporcionan menos de la mitad del recorrido total, en millas, de los circuitos de mensajes en casi todo el mundo. Sin embargo, en determinado momento los sistemas de microondas llevaban la mayoría de las comunicaciones de larga distancia para la red de teléfonos públicos, agencias militares y gubernamentales, y redes especializadas para comunicaciones privadas. Existen muchos tipos diferentes de sistemas de microondas que operan sobre distancias que varían, desde 15 a 4000 millas en longitud. Los sistemas de servicio interestatal o servicio de alimentador, por lo general se consideran dentro de la categoría de corto alcance porque se utilizan para distancias relativamente cortas. Los sistemas de radio de largo alcance son aquellos que se utilizan para distancias relativamente largas, como para las aplicaciones interestatales[3]. Las capacidades de los sistemas de microondas varían, desde menos de 12 canales de banda de voz a más de 22,000. Los primeros sistemas de radio por microondas transportaban circuitos de banda de voz multicanalizadas por división de frecuencias y utilizaban técnicas convencionales de modulación de frecuencias no coherente. Los sistemas de microondas desarrollados más recientemente llevan circuitos de banda de voz con multicanalización por división de tiempo modulados con códigos de pulsos y utilizan técnicas de modulación digital más modernas.

5.2. Definición de ruta y carta topográfica.

Los sistemas de microondas utilizan transmisión de línea de vista. Tiene que haber una ruta de señal directa, de línea de vista, entre las antenas de transmisión y recepción. En consecuencia, si esa ruta de señal experimenta una degradación severa, ocurrirá una interrupción del servicio. La diversidad sugiere que hay más de una ruta de transmisión o método de transmisión disponible, entre un transmisor y un receptor. En un sistema de microondas, el propósito de utilizar la diversidad es incrementar la confiabilidad del sistema incrementando su disponibilidad. Cuando hay disponible más de una ruta de transmisión o método de transmisión, el sistema puede seleccionar la ruta o método que produce la señal de más alta calidad recibida. Por lo general, se determina la calidad, mas alta evaluando la relación de portadora a ruido (C/N) en la entrada del receptor o simplemente midiendo la potencia recibida de la portadora. Aunque hay muchas formas de lograr la diversidad, los métodos mas comunes que se utilizan son la frecuencia, el espacio, y la polarización.

La ruta que se presenta en este trabajo para el enlace entre las ciudades de Pachuca y Actopan ha sido diseñado con respaldo de cálculos matemáticos y de un amplio estudio de campo. Por esto mismo se tiene la certeza de que si se llegase a realizar la implementación de este diseño se tendrán resultados satisfactorios.

La ruta elegida para el enlace Pachuca Actopan esta definida por la siguiente tabla.



Figura 5.1: Carta Topográfica

Cuadro 5.1: Elementos del perfil topográfico

ENLACE UAEH-ACTOPAN			
	Lugar	Distancia (km)	Altura (m)
P1	UAEH	0	2460
P2	Barranca Saucillo	6	2500
P3	Cerro de Cumbres	7.5	2980
P4	Cerro Mogote	9.1	2600
P5	Cerro el Cielito	12.65	2600
P6	Barranca los Espinosa	15.1	2500
P7	Puerto la Palma	17.55	2600
P8	Barranca Poder de Dios	18.6	2200
P9	El Arenal	25.25	2100
P10	El Jiadi	28.5	2000
P11	Actopan	31.4	2000

5.2.1. Perfil Topográfico

Cualquiera que sea la magnitud del sistema de microondas, para un buen desempeño es necesario que los recorridos entre enlaces tengan una altura con línea de vista libre, adecuada para la propagación en toda época del año, tomando en cuenta las variaciones de las condiciones atmosféricas de la región.

Para poder calcular las alturas con línea de vista libres se debe conocerse la topografía del terreno, así como la altura y ubicación de los obstáculos que puedan existir en el trayecto.

Antes de hacer mediciones en el terreno fue necesario estudiar los planos topográficos y ambientales de la zona. Por lo general el estudio minucioso de los mapas y de los planos facilita las labores, sobre todo en sistema extensos con gran número de repetidoras y donde existe una gran variedad de rutas posibles como en el caso de este enlace.

Por proceso de eliminación y de selección se ha llegado a la a ruta más favorable. Esta opción se tomo trabajando en un mapa de la región en escalas del orden de 1:50000m.

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), que es tomada

para uso de el perfil topográfico como punto de partida se encuentra situada en la parte noreste de la capital del estado Pachuca de Soto, mientras que, la cabecera municipal de Actopan se encuentra ubicada al noroeste de Pachuca a 31.4Km de la UAEH.

La gráfica de $\frac{4}{3}$ obtenida por medio de un programa en MATLAB para el enlace Pachuca-Actopan es.

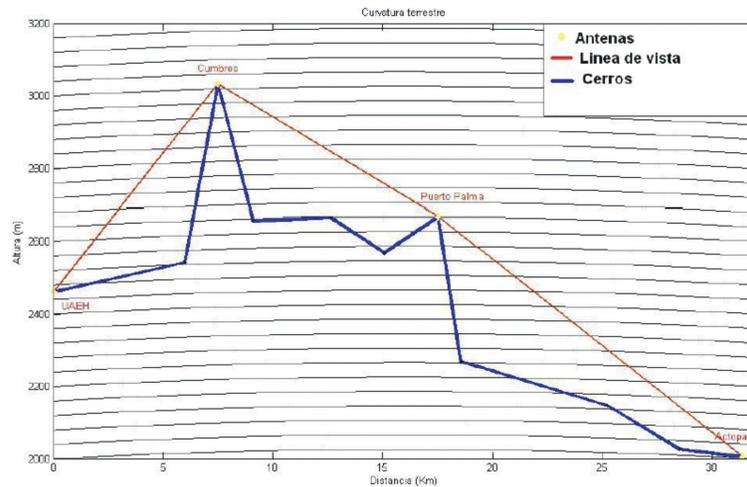


Figura 5.2: Grafica de tres cuartos en MATLAB

En el perfil topográfico de la figura 5.2 realizado entre estos dos puntos de partida se muestra la ruta más viable para el enlace de microondas, tomando en cuenta los datos obtenidos del estudio topográfico del cuadro 5.1 y considerando, la ubicación y altura de las torres de las antenas (transmisora, repetidoras y receptora).

El código fuente del programa es el siguiente:

```
D=32;
```

```
K=4/3; Mi=D/1.61
```

PROGRAMA

```
pas=.011 d1=0:pas:Mi; d2=Mi-d1; Mul=d1'*d2; diagonal=diag(Mul);
```

```
m=diagonal' h=m*(1/1.5*K);
```

```
R=h*.3048+2000
```

GRÁFICA

```
np=Mi/pas
```

```
dis=0:D/np:D plot(dis,R,'-k') title('Curvatura terrestre')
```

```
xlabel('Distancia (Km)') ylabel('Altura (m)') axis([0 D 2000 3200])
```

```
grid
```

```
hold on for i=40:40:1200 plot(dis,R+i,'-k') end
```

PUNTOS DEL ENLACE

```
p1=0 p2=6
```

```
p3=7.5 p4=9.1 p5=12.65 p6=15.1
```

```
p7=17.55 p8=18.6 p9=25.25 p10=28.5
```

```
p11=31.4
```

```
a1=2460 a2=2500
```

```
a3=2980 a4=2600 a5=2600 a6=2500
```

```
a7=2600 a8=2200 a9=2100 a10=2000
```

```
a11=2000
```

```
h1=[((D-p1)*p1)/1.5*K]*.3048+ a1
```

```
h2=[((D-p2)*p2)/1.5*K]*.3048+ a2
```

```
h3=[((D-p3)*p3)/1.5*K]*.3048+ a3
```

```
h4=[((D-p4)*p4)/1.5*K]*.3048+ a4
```

```
h5=[((D-p5)*p5)/1.5*K]*.3048+ a5
```

```
h6=[((D-p6)*p6)/1.5*K]*.3048+ a6
```

```
h7=[((D-p7)*p7)/1.5*K]*.3048+ a7
```

```
h8=[((D-p8)*p8)/1.5*K]*.3048+ a8
```

```
h9=[((D-p9)*p9)/1.5*K]*.3048+ a9
```

```
h10=[((D-p10)*p10)/1.5*K]*.3048+a10
```

```
h11=[((D-p11)*p11)/1.5*K]*.3048+ a11
```

```
p=[p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 p11];
```

```
a=[h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11];
```

```
plot(p,a,'- b *')
```

```
hold on
h1=[((D-p1)*p1)/1.5*K]^*.3048+ a1
h3=[((D-p2)*p3)/1.5*K]^*.3048+ a3
h7=[((D-p7)*p7)/1.5*K]^*.3048+ a7
h11=[((D-p11)*p11)/1.5*K]^*.3048+ a11
pa=[p1 p3 p7 p11];
aa=[h1 h3 h7 h11];
plot(pa,aa,'-rv')
hold off
```

5.2.2. Diagramas de la ruta

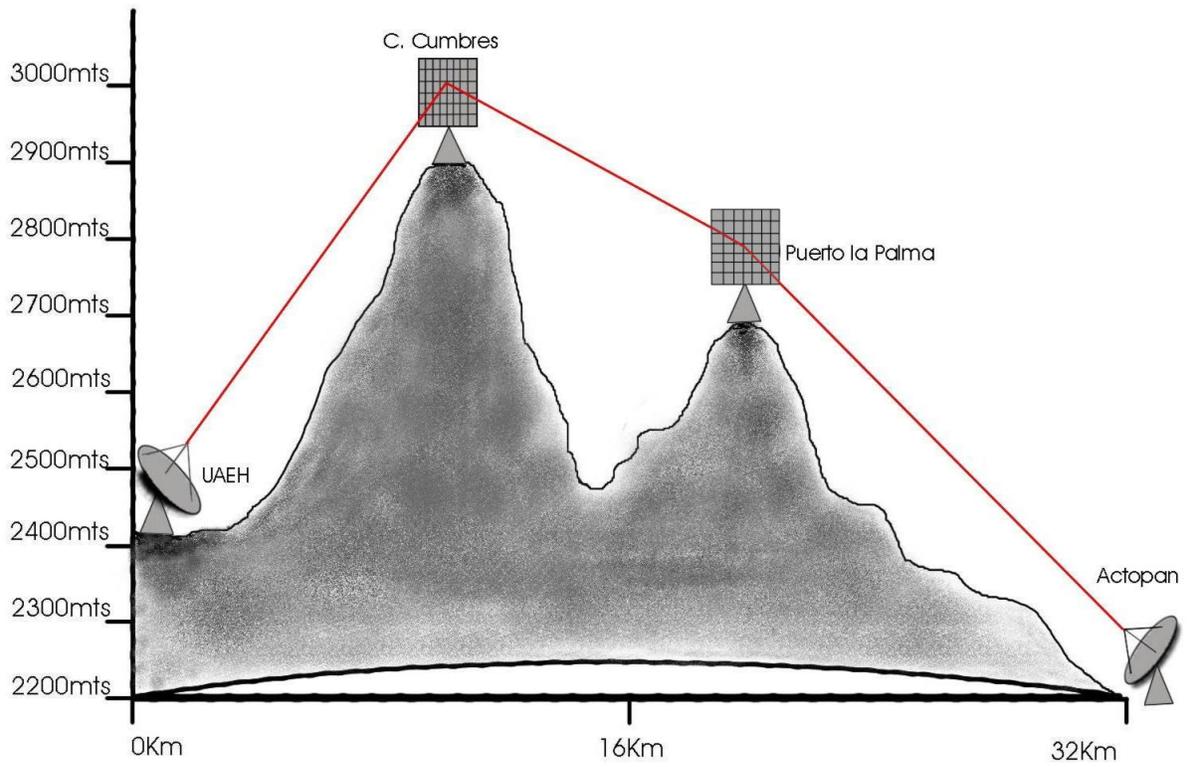


Figura 5.3: Enlace UAEH-Actopan

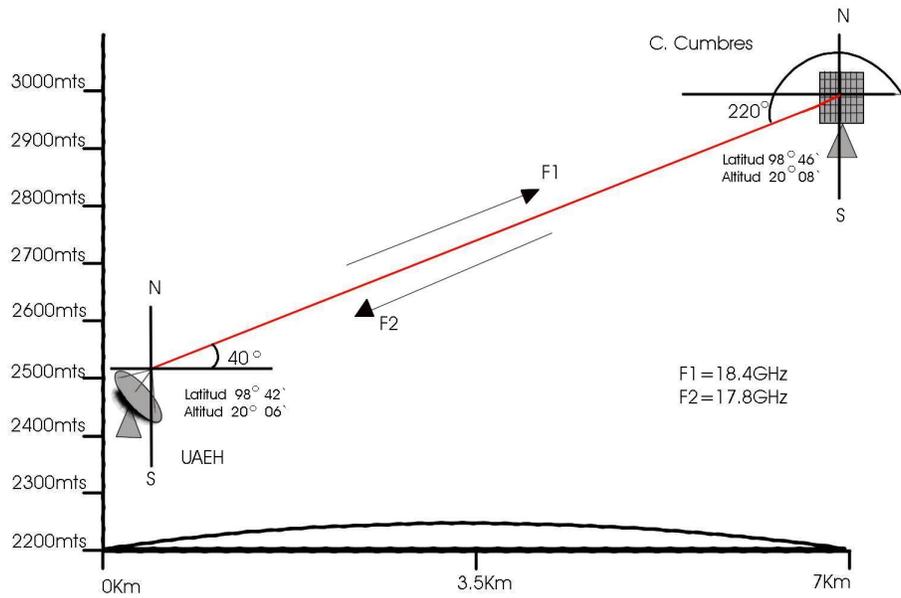


Figura 5.4: Poligonal UAEH-C.Cumbres

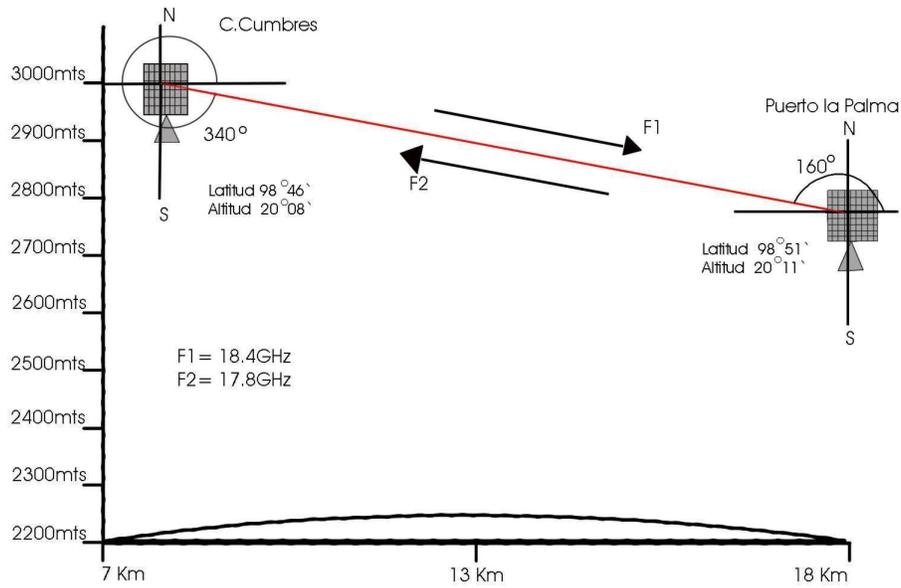


Figura 5.5: Poligonal C.Cumbres-Puerto la Palma

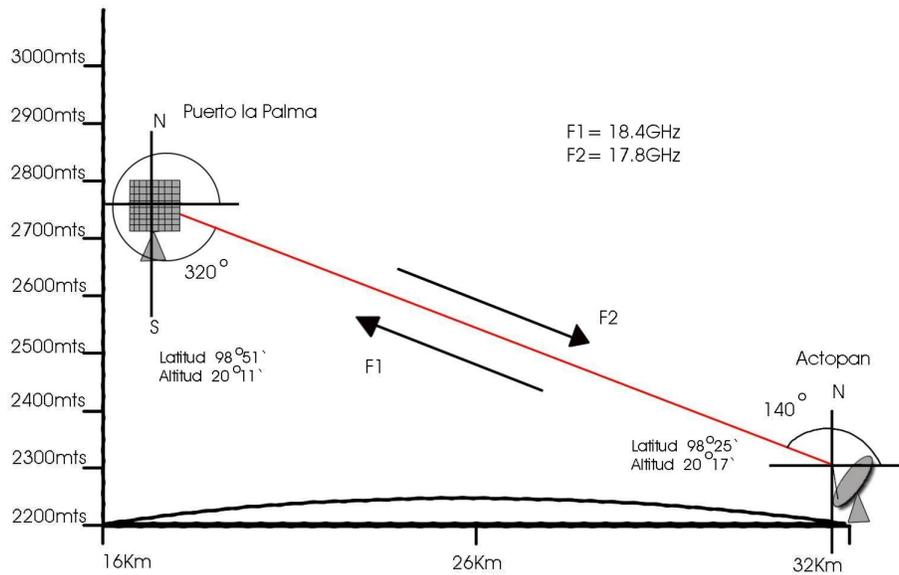


Figura 5.6: Poligonal Puerto la Palma-Actopan

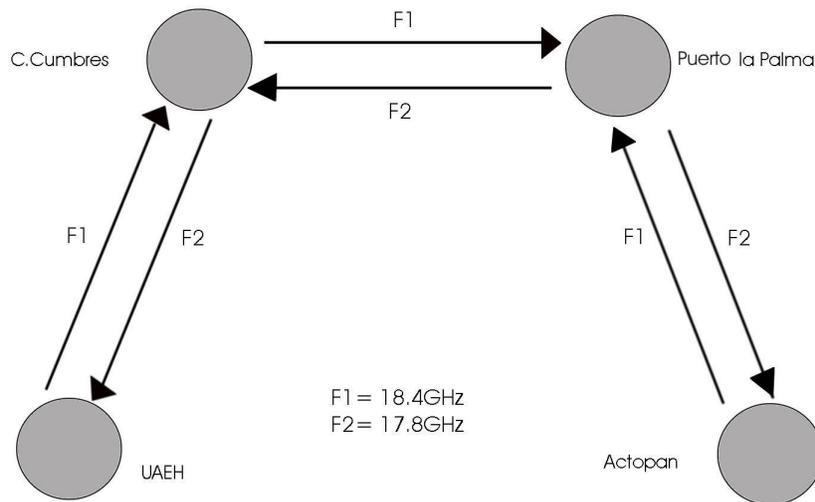


Figura 5.7: Diagrama de uso de frecuencias

5.2.3. Estudio de campo

Al analizar con detenimiento los sitios en donde se ubicaran los principales puntos de conexión para el enlace, se concluye que la ruta elegida es de fácil implementación y segura. Con lo que respecta a las influencias que tienen las condiciones atmosféricas sobre el enlace concluimos que los efectos sobre el enlace son mínimos, pero aún así son tomados en cuenta.



a) Cerro Cumbres visto desde la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo



b) Cerro Puerto Palma visto desde Cumbres



c) Vista al municipio de Actopan desde Puerto Palma



d) Lugar donde se colocara la torres en Puerto Palma

5.2.3.1. Influencia del clima

Aunque un haz de microondas se muestra convencionalmente como una línea, el método real de propagación es como un frente de onda, y la porción importante del frente de onda involucra una área transversa regular.

Para asegurar la propagación de espacio libre es esencial que todas los obstáculos potenciales a lo largo de la ruta están alejadas del centro del haz por lo menos $0.6 F_1$ donde F_1 está el radio de la primera zona de Fresnel en el punto de las obstrucciones.

Por esta razón, es necesario proporcionar el margen de la ruta sobre los objetos intermedios que son algo mayores que la línea de vista. Porque el torcimiento refractivo varía diariamente en ciclos y cambia erráticamente varias veces, los márgenes sobre los terrenos intermedios deben ser ajustados para minimizar las pérdidas en condiciones del torcimiento extremas. Normalmente, algunas veces las condiciones atmosféricas son tales que el haz es torcido hacia arriba, efectivamente reduciendo los márgenes sobre el terreno en la ruta.

La absorción atmosférica

La absorción atmosférica debido a oxígeno y el vapor de agua también existe. La magnitud del efecto es bastante pequeña en las más bajas frecuencias (2-8 GHz), y es usualmente despreciado. Aunque en las bandas más altas el efecto es relativamente pequeño no es completamente despreciable. Desde la cantidad de atenuación de este fenómeno es directamente proporcional a la longitud de la ruta, sólo es normalmente significativa en las rutas más largas.

5.2.3.2. Influencia de la lluvia y niebla en altas frecuencias

A las frecuencias de microonda que están sobre las bandas de 6 y 8 GHz, la atenuación por la lluvia como tal, debe considerarse para el diseño de la ruta. Bajo las condiciones de lluvia de saturación, una ruta de 30 millas podría sufrir sólo unos pocos dB de atenuación para 6 GHz. Las condiciones de niebla uniformes pueden ser consideradas en mucho como la misma luz. Sin embargo las condiciones de niebla son el resultado de las condiciones atmosféricas como la inversión de temperatura, o el aire muy inmóvil, acompañado por la estratificación; las últimas causas causan severa refracción o condiciones

reflectivas, con resultados impredecibles. En las áreas donde estas condiciones prevalecen, una ruta más corta y unos límites adecuados son recomendados.

A las frecuencias de microondas de 11 y 12 GHz o por encima de ellas, la atenuación por lluvia puede ser muy seria. La cantidad de atenuación depende en la proporción de lluvia, el tamaño de las gotas y la longitud de exposición. De acuerdo con las áreas de lluvia intensa donde se requiere una fiabilidad sumamente alta, se recomiendan rutas más cortas. Debe notarse que la proporción de lluvia en un cierto momento, no es considerado como la lluvia total anual, pero si, la intensidad instantánea en el momento de ocurrencia.

5.2.3.3. Atenuación por gases atmosféricos

La absorción gaseosa principalmente es por oxígeno y vapor de agua. La atenuación debida al oxígeno es relativamente constante en el rango de frecuencias de los 2 GHz a 14 GHz , y está ligeramente por debajo de 0.01 dB/milla a 2 GHz y ligeramente por encima para 14 GHz. La absorción del vapor de agua, por otro lado, es muy dependiente de la frecuencia (así como la densidad de vapor de agua). Es extremadamente bajo en 2 GHz, en el orden de 0.0002 dB/milla, y todavía despreciable, en el orden de 0.002 dB/milla, en el rango de 8 GHz. Pero para 14 GHz es aproximadamente igual a la absorción del oxígeno, a aproximadamente 0.01 dB/milla, y a las frecuencias en la vecindad de 20 GHz está cercana a casi 0.2 dB/milla.

Se ha visto que la asignación de "espacio libre"propagación a través de la atmósfera se justifica razonablemente bien para las rutas por encima de 50 millas de 2 a 8 GHz, o para las rutas por encima de 20 millas de 10 a 14 GHz, pero para las rutas más largas, la pérdida de absorción gaseosa debe tenerse en cuenta. Al contrario de la pérdida espacial libre, esta pérdida es directamente proporcional a la longitud de la ruta. La absorción de vapor de agua cambiará con la densidad de vapor de agua en la atmósfera, por consiguiente las bandas de 10 GHz y por encima de ella, tendrán cantidades significantes de atenuación por esta fuente, la cual variará con la densidad de vapor.

5.2.4. Influencia del terreno y obstaculos

El haz de microondas esta influenciado por el terreno que se encuentra entre las estaciones y los obstáculos. Tiende a seguir una línea recta en el azimut a menos que sea interceptado por estructuras en o cerca del camino.

Cuando viaja a través de la atmósfera usualmente sigue un camino ligeramente encorvado con respecto al plano vertical, por ejemplo, este es refractado verticalmente debido a la variación con respecto a la altura en la constante dieléctrica de la atmósfera; generalmente ligeramente descendente, para que el horizonte de la radio esté eficazmente extendido. La cantidad de esta refracción varía con tiempo debido a los cambios en la temperatura, presión y humedad relativa, el cual controla la constante dieléctrica.[11]

Cuando el haz roza por encima de un obstáculo éste es difractado. Hay área de sombra muy pequeña donde un poco de energía es redirigida en una estrecha y disminuida cuña hacia la sombra total. El ángulo encerrado por la cuña en la disminución de la energía detrás del objeto difractado, de la señal total a la sombra total, es extremadamente pequeña. El punto principal a ser enfatizado aquí, es que cuando la línea central del haz apenas roza un obstáculo, hay una pérdida de energía que afecta a la antena lejana. La pérdida puede ser de seis a veinte decibeles, dependiendo del tipo de superficie en que la difracción ocurre. Se ha demostrado experimentalmente que una difracción con un obstáculo filo de cuchillo producirá una pérdida de seis decibeles al rozarlo.[11]

Una superficie lisa, como el terreno plano o agua, la cual que de hecho sigue la curvatura de la Tierra, producirá la pérdida máxima al rozar. La mayoría de los obstáculos normalmente encontrado en el camino producirá una pérdida en alguna parte entre los límites anteriores. Los árboles tienden a producir una pérdida cercana a seis decibeles. Para minimizar las pérdidas a causa de la difracción, la línea de vista de un enlace de microondas está planeado para funcionar aún bajo las más adversas condiciones atmosféricas.[11]

La mayoría de los objetos físicos en la línea de vista tenderá a bloquear el

haz, causando pérdida de la señal en el receptor. Los árboles pueden causar pérdidas relativamente menores en invierno, pueda totalmente bloquear el camino en verano cuando los árboles tienen hojas. En todos los casos, los árboles deben ser considerados como obstáculos cuando están en la línea del camino, a menos que el haz tenga un adecuado libramiento sobre los árboles. El haz puede ser reflejado de un terreno relativamente liso y superficies acuáticas, así como un delgado haz se refleja por un espejo. Desde que la longitud de onda es más larga que las ondas delgadas, el criterio de suavidad también es bastante diferente para los ángulos muy pequeños de incidencia que para los ángulos grandes. Esto puede ilustrarse en el caso de la luz visual en una carretera del asfalto. Cuando es vista directamente, la superficie parece ligeramente áspera y no refleja bien la luz; sin embargo, cuando es vista a una distancia con un ángulo muy pequeño, se parece a un espejo o la superficie se ve húmeda.[11]

Un concepto importante que hay que tener en cuenta en el análisis de microondas, son los efectos de propagación, particularmente aquéllos de difracción, refracción, reflexión y los efectos de terreno y obstáculos, a éste análisis se le conoce como la zona de Fresnel. El primer radio de la zona de Fresnel es un tipo de unidad que se usa para medir ciertas distancias en términos de sus efectos para la frecuencia en cuestión. La segunda y el orden más alto de las zonas de Fresnel también son muy importantes bajo ciertas condiciones, como los caminos muy reflexivos.[11]

Las zonas de Fresnel son una serie de elipsoides concéntricos que rodean el camino. La primera zona de Fresnel es la superficie que contiene cada punto para el cual la suma de las distancias de ese punto a los dos extremos del camino es exactamente una y media longitud de onda más largo que el extremo directo fin a fin del camino. La n -ésima zona de Fresnel está definida de la misma manera, sólo que la diferencia es n -medias longitudes de onda.[11]

5.2.4.1. Zona de Fresnell

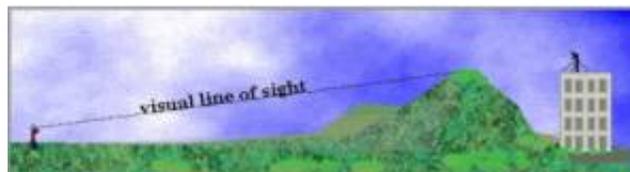
Debido a que las ondas de radio de alta frecuencia son atenuadas por obstáculos, se requiere una clara línea de vista entre las antenas para un óptimo

desempeño y un alcance máximo. Línea de vista es el espacio libre que existe entre dos puntos. En términos visuales, el horizonte es el punto en la distancia donde un objeto desaparece de la vista debido a que se junta con la curvatura de la tierra. Si el objeto es elevado se extiende el horizonte visual para que pueda ser visto a una mayor distancia antes de que la vista no lo alcance. El mismo concepto se aplica a las señales de radio: El horizonte de radio o línea de vista es el punto en la distancia donde el camino entre las dos antenas es bloqueado por la curvatura de la tierra. Como el horizonte de visual, el horizonte de radio puede ser extendido por medio de elevación de la antena transmisora, la receptora o ambas para extender el alcance de comunicación.

Obstrucciones que pueden interferir en un enlace:

- Características geográficas (montañas)
- Curvatura de la tierra
- Edificios
- Árboles

Si cualquiera de estas obstrucciones es lo suficientemente alta para bloquear la vista de un punto a otro, no existe línea de vista visual.



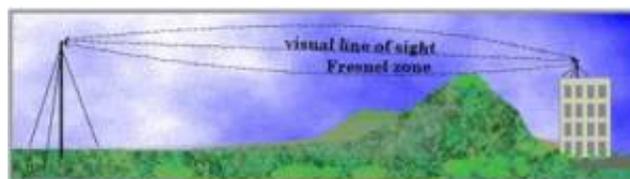
Las obstrucciones pueden interferir con la línea de vista visual y con línea de vista del radio. Pero se debe considerar la "Zona Fresnel". Si un objeto, como montañas o edificios están muy cerca al camino de la señal, puede dañar la señal de radio o reducir su fuerza. Esto sucede aun cuando los obstáculos no obstruyen directamente la línea de vista visual. La zona Fresnel de un rayo de radio es en un área elíptica inmediatamente alrededor del camino visual. Varía en la anchura de dicho rayo, dependiendo de la longitud del camino y la frecuencia de la señal. La visibilidad necesaria para la zona Fresnel puede ser calculada, y se debe tomar en cuenta cuando se está diseñando un enlace inalámbrico.



Como se muestra en la figura anterior, cuando un objeto sobresale dentro del camino de señal en la zona Fresnel. Si árboles u otros objetos sobresalen en la zona Fresnel, pueden atenuar (reducir la fuerza) mientras pasa la señal. El hecho es que si se ven dos puntos, no significa que se pueda establecer un enlace de radio de alta calidad en un punto. En enlaces cortos de 4km o menos, se puede determinar el horizonte de radio colocando la antena en un punto y ver desde el otro punto con la ayuda de binoculares. Si cualquier obstáculo (edificios, árboles, etc.) en la zona Fresnel entre los dos puntos pudiera interferir con la señal, el cálculo de la altura de la antena debe tomar en cuenta los obstáculos posible.

Hay muchas opciones para poder establecer o implementar línea de vista:

- Aumentar la altura de la antena en un punto o ambos.
- Construir una torre lo suficientemente alta para colocar la antena.
- Aumentar la altura de torres existentes.
- Colocar la antena en un nuevo punto, edificio o torre.



5.2.4.2. Primera zona de Fresnell

Las zonas de Fresnel son elipsoides que rodean la trayectoria directa entre el transmisor y receptor. La primera zona de Fresnel, (la región que encierra a la primera elipsoide), contiene la mayor cantidad de potencia destinada al

receptor. De existir un obstáculo en los límites de la primera zona de Fresnel, la onda reflejada tiende a cancelar la onda directa, dependiendo de las amplitudes relativas de cada onda, es por eso importancia de obtener de igual manera el libramiento.

Para efectos prácticos se considera una propagación pura por línea de vista (sin atenuación por difracción) si no existen obstáculos dentro de la primera zona de Fresnel. La formula de Fresnel se muestra a continuación:

$$h_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d}} \quad (5.1)$$

donde

h_0 - La primera zona de Fresnel.

λ - Es la longitud de onda.

d_1 - Distancia del transmisor al obstáculo.

d_2 - Distancia del obstáculo al receptor.

d - Distancia del transmisor al receptor.

La formula para obtener el libramiento es:

$$h_c = h_1 - \frac{d_1}{d} (h_1 - h_2) - \frac{d_1 d_2}{2ka} - h_3 \quad (5.2)$$

donde

h_c - Libramiento.

d_1 - Distancia del transmisor al obstáculo.

d_2 - Distancia del obstáculo al receptor.

d - Distancia del transmisor al receptor.

h_1 - Altura del sistema transmisor.

h_2 - Altura del sistema receptor.

h_3 - Altura del obstáculo.

a - Diametro del Planeta Tierra.

$k = 4/3$.

5.3. Cálculos y características de la trayectoria.

Las trayectorias de propagación normales entre dos antenas de radio, en un sistema de radiomicroondas. La trayectoria de espacio libre es la trayectoria de línea de vista directamente entre las antenas transmisora y receptora (a esto también se le llama la onda directa). La onda reflejada a tierra es la porción de la señal transmisora que se refleja de la superficie de la Tierra y es capturada por la antena receptora. La onda de superficie consiste de campos eléctricos y magnéticos asociados con las corrientes inducidas por la superficie de la Tierra. La magnitud de la onda de superficie depende de las características de la superficie de la Tierra y de la polarización electromagnética de la onda. La suma de estas tres trayectorias (tomando en cuenta su amplitud y fase), se llama la onda de tierra. La onda de cielo es la porción de la señal transmisora que se regresa (reflejada) a la superficie de la Tierra por las capas ionizadas de la atmósfera de la Tierra. Existen todas las trayectorias mostradas en la figura 5.8, en cualquier sistema de radiomicroondas, pero algunas son imperceptibles en ciertos rangos de frecuencias. En las frecuencias por abajo de 1.5 MHz, la onda de superficie proporciona la cobertura primaria, y la onda de cielo ayuda a extender esta cobertura en la noche cuando la absorción de la ionosfera está en su mínimo. Para las frecuencias que están arriba de 30 a 50 MHz, las trayectorias de espacio libre y la reflejada a tierra generalmente son las únicas trayectorias de importancia. La onda de superficie también se puede dejar de considerar a estas frecuencias, siempre y cuando la altura de las antenas no sea muy baja. La onda de cielo solamente es una fuente de interferencia ocasional de larga distancia y no es una señal confiable para el propósito de comunicación de microondas. En este trabajo las propagaciones de ondas

de cielo y de superficie no se consideran, y la atención se centra en aquellos fenómenos que afectan las ondas directas y reflejadas.

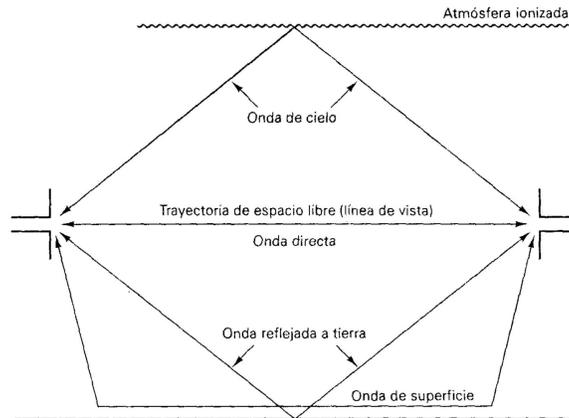


Figura 5.8: Trayectorias de propagación

5.3.1. Características técnicas del enlace.

Una vez determinado el perfil del terreno sobre el que se propaga el haz, se estudiará el margen de este con relación al obstáculo mas prominente. Dicho margen hay que compararlo con el radio de la primera zona de Fresnel, en el cual se encuentra la mayor potencia de la señal transmitida y el libramiento con respecto al obstáculo entre las antenas. Tomando en cuenta que la transmisión se realiza con una frecuencia de 18Ghz la longitud de onda para este sistema es:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{c}{f} \\
 &= \frac{2.99917 \times 10^8 m/s}{18 \times 10^9 Hz} \\
 &= 0.01666m
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

5.3.1.1. Anchura de banda.

La anchura de banda (A.B) esta dada por la siguiente formula

$$A.B = R \cdot BTx \cdot \frac{1}{FEC} \cdot \frac{1}{N} \quad (5.4)$$

donde

A.B - Ancho de Banda.

R - Data Rate (velocidad de información).

BTx - Roll off(Valor que depende de las características del filtraje del modulador)

FEC - Fordward error correction (Factor de Corrección de Errores)

N - Constante que depende del tipo de modulación(QPSK=2, BPSK=1, MPSK=1.5, etc).

Si se utiliza una modulación QPSK tenemos:

$$\begin{aligned} R &= 16E_1 \\ &= 16 (2.048Mbps) \\ &= 32.76Mbps \end{aligned}$$

El valor de FEC utilizado es de 3/4, mientras que para BTx es de 1.14, desarrollando la ecuación resulta:

$$\begin{aligned} A.B &= 32.76 \cdot 1.14 \cdot \frac{1}{3/4} \cdot \frac{1}{2} \\ &= 21.9Mhz \end{aligned}$$

Como nuestro sistema de transmisión requiere de dos repetidores independientemente de la antena de transmisión y la de recepción, el análisis de la zona de Fresnel y el libramiento se realizará de la siguiente manera.

Transmisión UAEH - Cerro Cumbres.

$$\begin{aligned}d &= 7.3\text{km} & \lambda &= 0.0166\text{m} & h_3 &= 2500\text{m} \\d_1 &= 5.4\text{km} & h_1 &= 2460\text{m} & a &= 6,37 \times 10^6\text{m} \\d_2 &= 1.9\text{km} & h_2 &= 2980\text{m} & k &= 3/4\end{aligned}$$

- Primera zona de Fresnel.

$$\begin{aligned}h_0 &= \sqrt{\frac{0.0166\text{m} (5400\text{m}) (1900\text{m})}{7300\text{m}}} \\&= 4.83\text{m}\end{aligned}$$

- Libramiento

$$\begin{aligned}h_c &= 2510\text{m} - \frac{5400\text{m}}{7300\text{m}} (2510\text{m} - 2990\text{m}) - \frac{5400\text{m} (1900\text{m})}{2 (4/3) (6.37 \times 10^6\text{m})} - 2500\text{m} \\&= 364.46\text{m}\end{aligned}$$

Cerro Cumbres - Puerto la Palma.

$$\begin{aligned}d &= 10.35\text{km} & \lambda &= 0.0166\text{m} & h_3 &= 2600\text{m} \\d_1 &= 5.55\text{km} & h_1 &= 2980\text{m} & a &= 6,37 \times 10^6\text{m} \\d_2 &= 4.8\text{km} & h_2 &= 2600\text{m} & k &= 3/4\end{aligned}$$

- Primera zona de Fresnel.

$$\begin{aligned}h_0 &= \sqrt{\frac{0.0166\text{m} (5550\text{m}) (4800\text{m})}{10350\text{m}}} \\&= 6.53\text{m}\end{aligned}$$

- Libramiento.

$$\begin{aligned}h_c &= 29800\text{m} - \frac{5500\text{m}}{10350\text{m}} (2980\text{m} - 2600\text{m}) - \frac{5500\text{m} (4800\text{m})}{2 (4/3) (6.37 \times 10^6\text{m})} - 2600\text{m} \\&= 176.23\text{m}\end{aligned}$$

Transmisión Puerto la Palma - Actopan

$$\begin{aligned}d &= 14.25km & \lambda &= 0.0166m & h_3 &= 2100m \\d_1 &= 7.75km & h_1 &= 2600m & a &= 6,37 \times 10^6m \\d_2 &= 6.5km & h_2 &= 2000m & k &= 3/4\end{aligned}$$

- Primera zona de Fresnel

$$\begin{aligned}h_0 &= \sqrt{\frac{0.0166m (7750m) (6500m)}{14250m}} \\&= 7.66m\end{aligned}$$

- Libramiento

$$\begin{aligned}h_c &= 2600m - \frac{7750m}{14250m} (2600m - 2000m) - \frac{7750m (6500m)}{2 (4/3) (6.37 \times 10^6m)} - 2100m \\&= 170.73m\end{aligned}$$

Como se puede ver comparando cada etapa de transmisión entre la primera zona de Fresnel y le libramiento, la señal pasa completamente sin obstáculo por lo que el haz no sufre ningún percance, corroborando que se tendrá una buena comunicación.

5.3.1.2. Especificaciones del Enlace.

- **Frecuencia de Trabajo:** El enlace Pachuca-Actopan trabajara con una frecuencia de trabajo de $f=18.4$ Ghz.
- **Tipo de comunicación** Voz y datos. Utilizando un E1.
- **Ancho de Banda:** El ancho de Banda de trabajo es de 21.9MHz.
- **Tipo de Modulación:** La modulación que se usara es del tipo digital y se ocupara QPSK.
- **Configuración de enlace:** Se usara un tipo de comunicación Full-Duplex.
- **Numeros de Frecuencias por enlace:** El numero de frecuencias por enlace es de 2, con $F1 = 18,4GHz$ y $F2 = 17,8GHz$.
- **Potencia de Transmisión:**La potencia que se utilizará será de 5watts.

CALCULOS DE LAS FRECUENCIAS

FRECUENCIA DE 18.4GHz

-Longitud de Onda:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{2,99917 \times 10^8 \text{ m/s}}{18,4 \text{ GHz}}$$

$$\lambda = 0,0166 \text{ m}$$

-Pérdidas en el espacio libre:

$$L_{sp} = \left(\frac{4\pi(d)}{\lambda} \right)^2$$

$$L_{sp} = \left(\frac{4\pi(31900 \text{ m})}{(0,0166 \text{ m})^2} \right)$$

$$L_{sp} = 10 \log 5,83156 \times 10^{14}$$

$$L_{sp} = 147,65 \text{ dB}$$

-Ganancia de la Antena(Tx y Rx)

Donde:

η = Eficiencia de la antena

A = Area de la antena

$$A = \pi(r^2)$$

$$A = \pi((0,15 \text{ m})^2)$$

$$A = 0,070 \text{ m}^2$$

$$G_a = \left(\frac{4\pi(A)}{\lambda^2\eta} \right)$$

$$G_a = \left(\frac{4\pi(0,070m^2)}{(0,0166m)^2(1)} \right)$$

$$G_a = 10\log(3,19221 \times 10^3)$$

$$G_a = 35,04dB$$

-Potencia de transmisión:

$$P_T = 10\log(\text{watts})$$

$$P_T = 10\log(5W)$$

$$P_T = 6,989dB$$

-Potencia en el Receptor:

$$P_R = P_T + G_{aTx} - L_f - L_{sp} + G_{aRx} - L_{f'}$$

$$P_R = 6,989dB + 35,04dB - 6dB - 147,81dB + 35,04dB - 6dB$$

$$P_R = -82,741dBw + 30P_R = -52,741dBm$$

$$P_R = 5,31\mu W$$

Donde:

P_T : Potencia en el Transmisor

G_{aTx} : Ganancia en la antena transmisora

L_f : Prdidas causadas por el equipo en Est. Transmisora

L_{sp} : Prdidas en el espacio libre

G_{aRx} : Ganancia en la antena receptora

$L_{f'}$: Prdidas causadas por el equipo en Est. Receptora

FRECUENCIA DE 17.4GHz

-Longitud de Onda:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{2,99917 \times 10^8 \text{ m/s}}{17,4 \text{ GHz}}$$

$$\lambda = 0,0172 \text{ m}$$

-Pérdidas en el espacio libre:

$$L_{sp} = \left(\frac{4\pi(d)}{\lambda} \right)^2$$

$$L_{sp} = \left(\frac{4\pi(31900 \text{ m})}{(0,0172 \text{ m})^2} \right)$$

$$L_{sp} = 10 \log 5,43180 \times 10^{14}$$

$$L_{sp} = 147,34 \text{ dB}$$

-Ganancia de la Antena(Tx y Rx)

$$G_a = \left(\frac{4\pi(A)}{\lambda^2 \eta} \right)$$

$$G_a = \left(\frac{4\pi(0,070 \text{ m}^2)}{(0,0172 \text{ m})^2 (1)} \right)$$

$$G_a = 10 \log(2,97338 \times 10^3)$$

$$G_a = 34,73 \text{ dB}$$

-Potencia de transmisión:

$$P_T = 10 \log(\text{watts})$$

$$P_T = 10 \log(5 \text{ W})$$

$$P_T = 6,989 \text{ dB}$$

-Potencia en el Receptor:

$$P_R = P_T + G_{aTx} - L_f - L_{sp} + G_{aRx} - L_{f'}$$

$$P_R = 6,989dB + 34,73dB - 6dB - 147,81dB + 34,73dB - 6dB$$

$$P_R = -82,741dBw + 30P_R = -52,741dBm$$

$$P_R = 5,31\mu W$$

Punto de Reflexión entre la Ciudad Universitaria-Cumbres

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}$$

$$c = \frac{2990m - 2510m}{2990m + 2510m}$$

$$c = 0,087$$

$$m = \frac{d^2}{4ka(h_1 + h_2)}$$

$$m = \frac{(7300m)^2}{4\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)(2990m + 2510m)}$$

$$m = 0,000285$$

Por los valores anteriormente calculados $b = 0,025$ aprox.

$$d_1 = \frac{d}{2}(1 + b)$$

$$d_1 = \frac{7300m}{2}(1 + 0,025)$$

$$d_1 = 3741,25m$$

$$d_2 = \frac{d}{2}(1 - b)$$

$$d_2 = \frac{7300m}{2}(1 - 0,025)$$

$$d_2 = 3558,75m$$

Punto de Reflexión Cumbres-Puerto La Palma

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}$$

$$c = \frac{2990m - 2600m}{2990m + 2600m}$$

$$c = 0,068$$

$$m = \frac{d^2}{4ka(h_1 + h_2)}$$

$$m = \frac{(10350m)^2}{4\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)(2990m + 2600m)}$$

$$m = 0,000565$$

Por los valores anteriormente calculados $b=0.02$ aprox.

$$d_1 = \frac{d}{2}(1 + b)$$

$$d_1 = \frac{10350m}{2}(1 + 0,02)$$

$$d_1 = 5278,50m$$

$$d_2 = \frac{d}{2}(1 - b)d_2 = \frac{10350m}{2}(1 - 0,02)$$

$$d_2 = 5071,50m$$

Punto de reflexión Puerto La Palma - Campus Actopan UAEH

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}$$

$$c = \frac{2600m - 2000m}{2600m + 2000m}$$

$$c = 0,130$$

$$m = \frac{d^2}{4ka(h_1 + h_2)}$$

$$m = \frac{(14250m)^2}{4\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)(2600m + 2000m)}$$

$$m = 0,001$$

Por los valores anteriormente calculados $b=0.05$ aprox.

$$d_1 = \frac{d}{2}(1 + b)$$

$$d_1 = \frac{14250m}{2}(1 + 0,05)$$

$$d_1 = 7481,25m$$

$$d_2 = \frac{d}{2}(1 - b)$$

$$d_2 = \frac{14250m}{2}(1 - 0,05)$$

$$d_2 = 6728,75m$$

ANGULOS DE LAS ONDAS INCIDENTES Y REFLEJADAS

CEVIDE - CUMBRES

Datos:

$$h_1 = 2990m$$

$$h_2 = 2510m$$

$$d_1 = 3741,25m$$

$$d_2 = 3558,75m$$

$$d = 7300m$$

ANGULOS VERTICALES DE LA ONDA DIRECTA

$$\alpha_1 = -\left(\left(\frac{h_1-h_2}{d}\right) + \left(\frac{d}{2ka}\right)\right)$$

$$\alpha_1 = -\left(\left(\frac{2990m-2510m}{7300m}\right) + \left(\frac{7300m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)\right)$$

$$\alpha_1 = -0,066rad \quad \alpha_1 = -3,78^\circ$$

$$\alpha_2 = -\left(\left(\frac{h_2-h_1}{d}\right) + \left(\frac{d}{2ka}\right)\right)$$

$$\alpha_2 = -\left(\left(\frac{2510m-2990m}{7300m}\right) + \left(\frac{7300m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)\right)$$

$$\alpha_2 = 0,0653rad \quad \alpha_2 = 3,74^\circ$$

****ANGULOS VERTICALES DE LA ONDA REFLEJADA****

$$\theta_1 = -\left(\left(\frac{h_2}{d}\right) + \left(\frac{d_2}{2ka}\right)\right)$$

$$\theta_1 = -\left(\left(\frac{2510m}{7300m}\right) + \left(\frac{3558,75m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)\right)$$

$$\theta_1 = -0,3440rad \theta_1 = -19,70^\circ$$

$$\theta_2 = -\left(\left(\frac{h_2}{d}\right) + \left(\frac{d_1}{2ka}\right)\right)$$

$$\theta_2 = -\left(\left(\frac{2510m}{7300m}\right) + \left(\frac{3741,25m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)\right)$$

$$\theta_2 = -0,3442rad \theta_2 = -19,72^\circ$$

****ANGULOS INCLUIDOS ENTRE LA ONDA DIRECTA Y LA ONDA REFLEJADA****

$$\beta_1 = \left(\frac{h_1}{d_1}\right) - \left(\frac{h_1-h_2}{d}\right) - \left(\frac{d_2}{2ka}\right)$$

$$\beta_1 = \left(\frac{2990m}{3741,25m}\right) - \left(\frac{2990m-2510m}{7300m}\right) - \left(\frac{3558,75m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)$$

$$\beta_1 = 0,7331rad \beta_1 = 42^\circ$$

$$\beta_2 = \left(\frac{h_2}{d_2}\right) - \left(\frac{h_2-h_1}{d}\right) - \left(\frac{d_1}{2ka}\right)$$

$$\beta_2 = \left(\frac{2510m}{3558,75m}\right) - \left(\frac{2510m-2990m}{7300m}\right) - \left(\frac{3741,25m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)$$

$$\beta_2 = 0,7707rad \beta_2 = 44,16^\circ$$

CUMBRES - P. LA PALMA

Datos:

$$h_1 = 2990m$$

$$h_2 = 2600m$$

$$d_1 = 5278,50m$$

$$d_2 = 5071,50m$$

$$d = 10350m$$

****ANGULOS VERTICALES DE LA ONDA DIRECTA****

$$\alpha_1 = -\left(\left(\frac{h_1-h_2}{d}\right) + \left(\frac{d}{2ka}\right)\right)$$

$$\alpha_1 = -\left(\left(\frac{2990m-2600m}{10350m}\right) + \left(\frac{10350m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)\right)$$

$$\alpha_1 = -0,0373rad \alpha_1 = -2,138^\circ$$

$$\alpha_2 = -\left(\left(\frac{h_2-h_1}{d}\right) + \left(\frac{d}{2ka}\right)\right)$$

$$\alpha_2 = -\left(\left(\frac{2600m-2990m}{10350m}\right) + \left(\frac{10350m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)\right)$$

$$\alpha_2 = 0,0361rad \alpha_2 = 2,068^\circ$$

****ANGULOS VERTICALES DE LA ONDA REFLEJADA****

$$\theta_1 = -\left(\left(\frac{h_2}{d}\right) + \left(\frac{d_2}{2ka}\right)\right)$$

$$\theta_1 = -\left(\left(\frac{2600m}{10350m}\right) + \left(\frac{5071,50m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)\right)$$

$$\theta_1 = -0,2515rad \theta_1 = -14,41^\circ$$

$$\theta_2 = -\left(\left(\frac{h_2}{d}\right) + \left(\frac{d_1}{2ka}\right)\right)$$

$$\theta_2 = -\left(\left(\frac{2600m}{10350m}\right) + \left(\frac{5278,50m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)\right)$$

$$\theta_2 = -0,2515rad \theta_2 = 14,41^\circ$$

****ANGULOS INCLUIDOS ENTRE LA ONDA DIRECTA Y LA ONDA REFLEJADA****

$$\beta_1 = \left(\frac{h_1}{d_1}\right) - \left(\frac{h_1-h_2}{d}\right) - \left(\frac{d_2}{2ka}\right)$$

$$\beta_1 = \left(\frac{2990m}{5278,50m}\right) - \left(\frac{2990m-2600m}{10350m}\right) - \left(\frac{5071,50m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)$$

$$\beta_1 = 0,4906rad \beta_1 = 28,1^\circ$$

$$\beta_2 = \left(\frac{h_2}{d_2}\right) - \left(\frac{h_2-h_1}{d}\right) - \left(\frac{d_1}{2ka}\right)$$

$$\beta_2 = \left(\frac{2600m}{5071,50m}\right) - \left(\frac{2600m-2990m}{10350m}\right) - \left(\frac{5278,50m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)$$

$$\beta_2 = 0,4756rad \beta_2 = 27,24^\circ$$

PUERTO LA PALMA - CAMPUS UAEH ACTOPAN

Datos:

$$h_1 = 2600m$$

$$h_2 = 2000m$$

$$d_1 = 7481,25m$$

$$d_2 = 6728,75m$$

$$d = 14250m$$

****ANGULOS VERTICALES DE LA ONDA DIRECTA****

$$\alpha_1 = -\left(\left(\frac{h_1-h_2}{d}\right) + \left(\frac{d}{2ka}\right)\right)$$

$$\alpha_1 = -\left(\left(\frac{2600m-2000m}{14250m}\right) + \left(\frac{14250m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37 \times 10^6 m)}\right)\right)$$

$$\alpha_1 = -0,0429rad \alpha_1 = -2,46^\circ$$

$$\alpha_2 = -\left(\left(\frac{h_2-h_1}{d}\right) + \left(\frac{d}{2ka}\right)\right)$$

$$\alpha_2 = -\left(\left(\frac{200m-2600m}{14250m}\right) + \left(\frac{14250m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)\right)$$

$$\alpha_2 = 0,0412rad \alpha_2 = 2,36^\circ$$

****ANGULOS VERTICALES DE LA ONDA REFLEJADA****

$$\theta_1 = -\left(\left(\frac{h_2}{d}\right) + \left(\frac{d_2}{2ka}\right)\right)$$

$$\theta_1 = -\left(\left(\frac{2000m}{14250m}\right) + \left(\frac{6728,75m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)\right)$$

$$\theta_1 = -0,1407rad \theta_1 = -8,06^\circ$$

$$\theta_2 = -\left(\left(\frac{h_2}{d}\right) + \left(\frac{d_1}{2ka}\right)\right)$$

$$\theta_2 = -\left(\left(\frac{2000m}{14250m}\right) + \left(\frac{7481,25m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)\right)$$

$$\theta_2 = 0,1407rad \theta_2 = 8,06^\circ$$

****ANGULOS INCLUIDOS ENTRE LA ONDA DIRECTA Y LA ONDA REFLEJADA****

$$\beta_1 = \left(\frac{h_1}{d_1}\right) - \left(\frac{h_1-h_2}{d}\right) - \left(\frac{d_2}{2ka}\right)$$

$$\beta_1 = \left(\frac{2600m}{7428,25m}\right) - \left(\frac{2600m-2000m}{14250m}\right) - \left(\frac{6728,75m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)$$

$$\beta_1 = 0,3075rad \beta_1 = 17,61^\circ$$

$$\beta_2 = \left(\frac{h_2}{d_2}\right) - \left(\frac{h_2-h_1}{d}\right) - \left(\frac{d_1}{2ka}\right)$$

$$\beta_2 = \left(\frac{2000m}{6728,75m}\right) - \left(\frac{2000m-2600m}{14250m}\right) - \left(\frac{7428,85m}{2\left(\frac{4}{3}\right)(6,37x10^6m)}\right)$$

$$\beta_2 = 0,3388rad \beta_2 = 19,41^\circ$$

5.4. Características del equipo del sistema

Considerando que cada estación terrena cuenta con un deshidratador, una línea de voz y datos, etc., los equipos que tomamos en cuenta en esta transmisión, se debió a la eficacia, economía y disponibilidad que se tenían de estos equipos dentro del país y comparados con otros, se optó por los siguientes:

DISPOSITIVO	MODELO	CANTIDAD
Antena	Andrew VHPL1-180	4
Transmisores-Receptores	MTS DML Microondas	2
Repetidor pasivo	Microfect	2
Cable coaxial para radiofrecuencia	mil-C-28830	200m
Torre arriostrada	12m	4

Cuadro 5.2: Equipo contemplado

A continuación mostraremos algunas de las especificaciones principales de estos equipos.

5.4.1. Antena

Como se vió anteriormente es casi ilimitado el número de tipos de antenas usados actualmente. Su diseño varía desde un simple conductor recto a estructuras complejas y compuestas de muchos elementos. En cuanto a una aplicación particular, el tipo de antena que se escoja depende de los requisitos del sistema o sea, la frecuencia, directividad, polarización y el rango, en nuestro caso utilizaremos una antena de la marca Andrew modelo ValuLine VHP1-180, la cual cuenta con las siguientes características:

Antena	VHP1-180
Diámetro	0.3m (1ft)
Peso Kg (lbs)	14 (30)
Frecuencia	17.7 - 19.7 GHz
Ganancia (dB) mínima	32.6
Ganancia (dB) media	33.1
Ganancia (dB)máxima	33.5
3 dB Amplitud del haz(grados)	3.6
Discriminación de polarización cruzada (dB)	30

Cuadro 5.3: Características de la antena

En la figura 5.9 se muestran las dimensiones de las antenas VHP1 y las características técnicas que estas presentan frente al viento.

**Dimensions and Windloading Figures
for VHP1 Antennas**

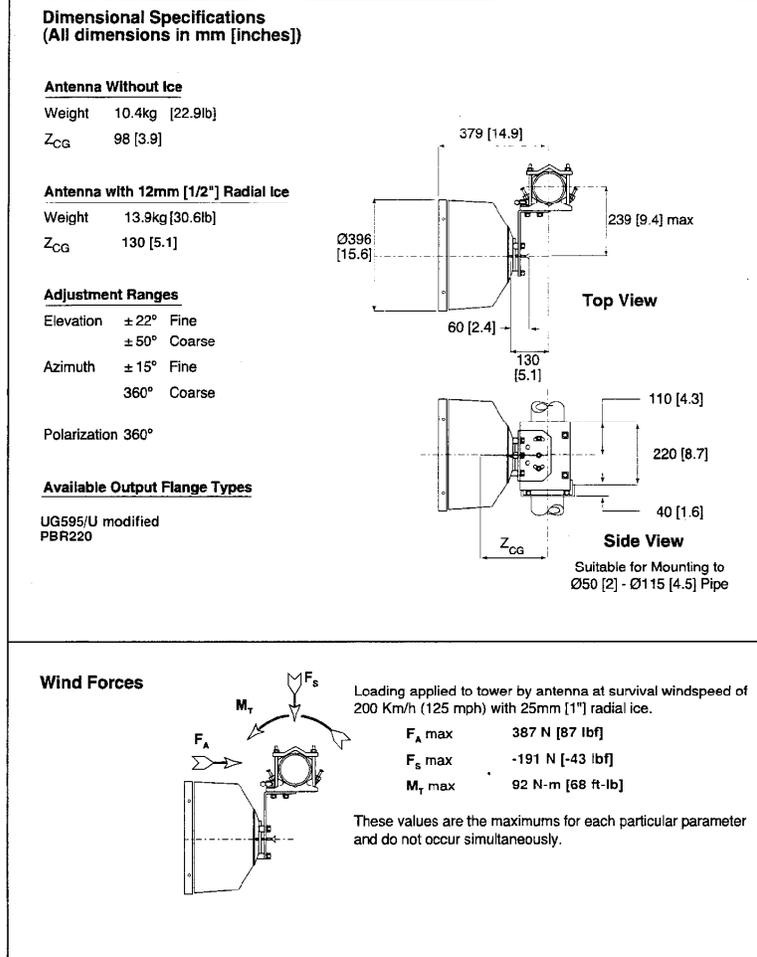


Figura 5.9: Dimensiones

5.4.2. Transmisor - Receptor



Figura 5.10: Transmisor-Receptor

Características Generales

La serie de enlaces de microondas digitales DML permite la transmisión de señales digitales desde 2 a 34 Mbps en modulación QPSK. La unidad módem ha sido desarrollada para su uso en sistemas transceptores heterodinos con F1 a 70 MHz, de tal forma que permite su utilización con un sólo tipo de modulador para cualquier banda de RF. La configuración estandar del enlace DML esta formada por: la unidad IDU modulador/demodulador (rack de 193U) totalmente modular y el RF ODU a prueba de las peores condiciones climáticas alojado en una caja. La conexión entre las dos unidades se lleva a cabo a través de cable coaxial RG214 (desde 22 a 188 mt.) MTS DML

Especificaciones del Tx-Rx

- Microondas digital 2-8-34 Mb 1.
- 5-24 GHz.
- Operación; G703, 2, 8 ó 34 Mbps.
- Código línea HDB3.
- Modulación QPSK.
- Modelos para regulación ITU-R, en 1.7 y 24 GHz.
- Potencia de salida: de 20mW a 0,8 W.
- Control de microprocesador.
- Configuración interna o externa.
- Diseño modular

RF Frequency Band	1.5 to 24GHz
RF Power Output	from 20dBm to 28.5dBm
BAse Band interface	Comply with CCITT G.703
Bit rate	2-8-34-45 Mb/s
Line Code	HDB3
Base Band Input/Output	1 In/2Output 75 Ohm unbalananced - 120 Ohm balanced
Maximum cable loss at input signals	12 dB
Scrambler	223 * 1 step
Modulation Type	DQPSK
IF Tx Level	-5 to +5 dBm
IF Rx Level	+5dBm
IF Frequency	70 MHz
Operating Temperature Range	-5 to +50°
Relative Humidity	0 to 95 % non-condensig
Modulator/Demodulator	3 units-rack 19"
Weight	12 Kg
RF Shelf;Tx/Rx	330x230x180
Weight	10.5 Kg
INTERCONNECTION RF	
Connections 1.71 to 4.9 GHz	Type 'N' Female Connector
5.925 to 7.125 GHz	Type 'N' Female Connector
7.10 to 13.25 GHz	Type WR 112
10.70 to 13.25 GHz	Type WR 75
14.4 to 15.35	Type WR 62
20 to 24 GHz	Type WR 42
IF/BaseBand connectors	BNC
Power, Audio and alarm connections	Barrier strip, screw terminals
Network management Control	9-Pin D Connector

Cuadro 5.4: Características técnicas de la transmisión

5.4.3. Repetidor pasivo

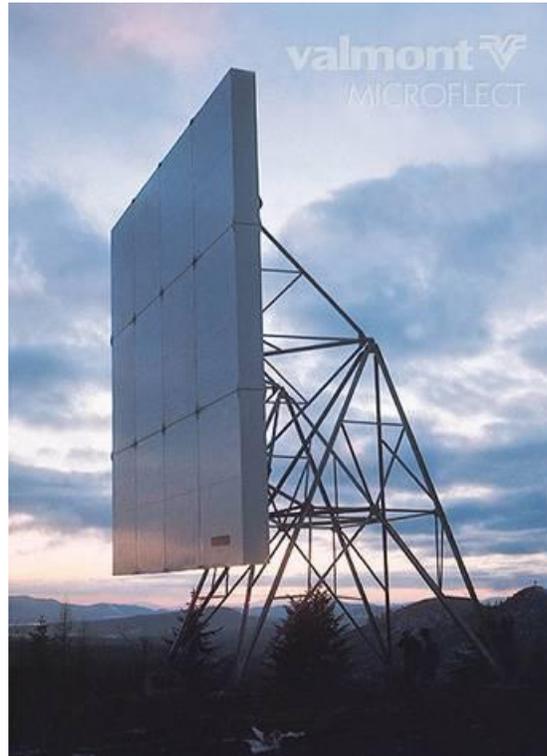


Figura 5.11: Repetidor pasivo

Características Generales

Este modelo está hecho de acero galvanizado en el soporte de la base de la estructura y de una aleación de aluminio en los paneles que permiten la reflexión; además de que cuenta con las siguientes características:

- Permite una línea de vista en terrenos montañosos.
- Se pueden usar en múltiples frecuencias entre 1.7 y 40 Ghz.
- Se acomoda a cualquier modulación.
- Elimina la necesidad de líneas de energía, generadores, baterías o paneles solares.
- Reduce costos al minimizar el uso de repetidores activos.

5.4.4. Torre arriostrada

Características Generales

La Torre arriostrada modelo UAX se puede aplicar para comunicación celular y PCS, punto a punto de UHF y microondas de baja capacidad. Existen dos versiones en este modelo de torre, la CSA-S37 en la que están los refuerzos a 90° y la EIA-222 la cual se encuentra reforzada con tubular. Todas las conexiones son atornilladas y todo el metal es galvanizado después de la fabricación. En cuanto a la altura su mínimo es de 12m /40' y el máximo de 45M/150'

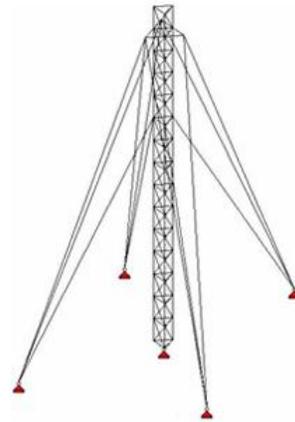


Figura 5.12: Torre Arriostrada

5.4.5. Cable coaxial para radiofrecuencia

CABLE COAXIAL PARA RADIOFRECUENCIA 12.7 mm (1/2") **RADIO FREQUENCY COAXIAL CABLE 12.7 mm (1/2")**



DESCRIPCIÓN:

- Conductor central de aluminio recubierto de cobre.
- Aislamiento de polietileno celular con capa interna y externa de polietileno sólido.
- Conductor externo de cobre corrugado.
- Cubierta de polietileno negro.

APLICACIONES:

- Conexión en terminales de antena o equipo en sistemas de microondas o telefonía celular.

PROPIEDADES:

- Aislamiento de bajo nivel de pérdidas.
- Alta conductividad.
- Conductor externo corrugado aumenta flexibilidad.
- Disponible en longitudes especiales, con o sin conectores.

CERTIFICACIÓN:

- Sistema de Calidad, ISO-9001.

ESPECIFICACIONES DE REFERENCIA:

- MIL-C-28830

DESCRIPTION:

- Core conductor of copper coated aluminum.
- Foamed polyethylene insulation with solid polyethylene internal and external layer.
- Corrugated copper external conductor.
- Jacket of black polyethylene.

APPLICATIONS:

- Jumpers in microwave or cellular telephony systems.

PROPERTIES:

- Low loss insulation.
- High conductivity.
- External corrugated conductor increases flexibility.
- Available in specific lengths upon request, with or without connectors.

CERTIFICATION:

- Quality System, ISO-9001.

REFERENCE SPECIFICATIONS:

- MIL-C-28830

CABLE COAXIAL PARA RADIOFRECUENCIA 12.7 mm (1/2")
RADIO FREQUENCY COAXIAL CABLE 12.7 mm (1/2")

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS
MECHANICAL CHARACTERISTICS

Diámetro del conductor central: Core conductor diameter:	4.8 mm
Diámetro de aislamiento: Insulation diameter:	12.7 mm
Diámetro sobre conductor externo: Diameter over external conductor:	14 mm
Diámetro sobre cubierta: Outside diameter:	16 mm
Radio de curvatura mínimo: Minimum bend radius:	125 mm
Longitud de empaque: Packaging standard length:	500 m
Peso neto (kg/km): Net weight kg/km:	253

- Valores nominales, sujetos a tolerancia de manufactura.
 - Nominal values, subject to manufacturing tolerances.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS
ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Resistencia conductor central a c.d. (Ω/km): c.d. resistance of core conductor (Ω/km)	1.48
Resistencia conductor externo a c.d. (Ω/km): c.d. resistance of external conductor (Ω/km)	1.65
Impedancia característica (Ω): Characteristic impedance (Ω):	50-1
Relación de onda estacionaria VSWR (mínimo): Stationary wave ratio VSWR (minimum):	1.2
Velocidad de propagación (%): Propagation speed (%):	88
Capacitancia (pF/m): Capacitance pF/m	76
Rigidez dieléctrica (Volts): Dielectric strength (Volts):	4000

ATENÚACIÓN Y POTENCIA PROMEDIO
ATTENUATION AND AVERAGE POWER

Frecuencia MHz Frequency MHz	Atenuación dB/100 m Attenuation dB/100 m	Potencia Promedio kW Average Power kW
2	0.31	24.8
10	0.69	11.0
20	0.98	7.8
50	1.58	4.8
88	2.11	3.6
108	2.34	3.3
150	2.78	2.8
200	3.23	2.4
300	4.08	1.9
400	4.65	1.6
500	5.25	1.4
600	5.79	1.3
700	6.30	1.2
800	6.79	1.15
824	6.89	1.1
894	7.20	1.05
960	7.50	1.0
1250	8.68	0.9
1500	9.60	0.8
1700	10.3	0.75
2000	11.2	0.7
2300	12.2	0.6
3000	14.3	0.55
4000	16.9	0.45
5000	19.5	0.4
6000	21.8	0.35
8000	26.0	0.3

Capítulo 6

NORMATIVIDAD Y SEGURIDAD EN EL SISTEMA DE ENLACE.

6.1. Introducción

Desde los comienzos de las comunicaciones vía microondas, la extensa y densa utilización del espectro de frecuencias para todos los servicios de comunicaciones y radiodifusión, obligó a los gobiernos de todos los países a reglamentar las emisiones de microondas para conseguir la óptima utilización del espectro, mínima interferencia, normalización internacional de sistemas y la posibilidad de intercambio internacional de información.[13]

Dentro de este ultimo capitulo se abordara lo referente a la normalización que se debe seguir para un enlace de microondas según los distintos organismos internacionales de telecomunicaciones, así como todo lo perteneciente a la seguridad y protección de las instalaciones del sistema de enlace.[13]

6.2. Organismos internacionales

Debido a la gran utilización del espectro de frecuencias para todos los servicios de comunicaciones que se ha tenido, los gobiernos de todos los países se han visto obligados a reglamentar la utilización de dicho espectro.

La U.I.T.(Unión Internacional de Telecomunicaciones), con sede en Ginebra, vinculada a las Naciones Unidas, es la mas antigua organización intergubernamental que funciona como institución especializada en materia de

telecomunicaciones.

Los objetivos de la U.I.T. son:

- Mantener y ampliar la cooperación internacional para el mejor y el mas racional empleo de telecomunicaciones.
- Favorecer el desarrollo de los medios técnicos y su mas eficaz explotación.

De la U.I.T. dependen dos organismos asesores para temas políticos y consultivos en materia de comunicación. Uno para asuntos de telegrafía y telefonía el C.C.I.T.T.(Consejo Consultivo Internacional para la Telegrafía y la Telefonía); y otro para radiocomunicaciones, el C.C.I.R.(Consejo Consultivo Internacional para las Radiocomunicaciones).[9]

Toda la normativa técnica que emana del C.C.I.R. en materia de enlaces vía microondas, es asistida por las Comisiones Técnicas de Estudio, que está constituidas por delegados de las distintas naciones internacionales.[9]

A su vez, existe una Oficina Internacional para el Registro de Frecuencias (I.F.R.B.), que asesora también en la materia de planificación de redes.

6.3. Canales de emisión

Recibe el nombre de canal de emisión la banda de frecuencias situada alrededor de la frecuencia portadora, en la que se transmiten las diferentes informaciones de vídeo, audio y datos. El espectro de frecuencias que una estación transmisora emite fuera de la banda o canal que tiene asignado, se vuelve una transmisión indeseada, ya que perturba a los demás canales de transmisión que se encuentren en cercanía.

El reglamento de Radiocomunicaciones de la U.I.T., limita la potencia máxima que puede radiar una estación transmisora fuera de la banda de frecuencias que tiene asignada.

Por condicionantes históricos y técnicos, no todos los países emplean los mismos sistemas de transmisión; es decir, que el ancho de banda, las frecuen-

cias portadoras, la posición y potencia relativa de las mismas, etc., varían.[9]

La U.I.T. ha establecido el margen de frecuencias permitido para radiocomunicaciones en cada una de las tres zonas en que está dividida la Tierra. Y dentro de cada zona, el margen de frecuencias se ha dividido en canales sucesivos, cada uno de los cuales, puede servir para una diferente transmisión.

Para proteger una transmisión dada, de las interferencias procedentes de otros canales, los respectivos organismos han establecido la distribución de canales por zonas o emplazamientos, mediante una planificación reticular y una coordinación entre los distintos países.

6.4. Estabilidad de frecuencias

La frecuencia portadora de una emisora se genera a partir de un oscilador a cristal, y su valor depende de algunos parámetros que varían con las condiciones de trabajo, tales como la tensión de funcionamiento, la temperatura, la propia estabilidad del propio circuito oscilador, etc.

Al cambiar alguno de estos parámetros, varía también la frecuencia de la portadora; y para medir estas desviaciones se define la estabilidad de frecuencia, que es el grado de precisión y permanencia en el tiempo con que el generador produce su frecuencia. La estabilidad de frecuencias se expresa en partes por millón (o millonésimas) de la frecuencia de emisión o en su valor absoluto en Hz.[9]

El margen de variación de frecuencia permitido para cada canal se denomina tolerancia. El valor máximo de tolerancia viene fijado por el Reglamento de Radiocomunicaciones de la U.I.T.

6.5. Cobertura y áreas del enlace

A causa de la influencia que tiene la orografía del terreno en la propagación de ondas electromagnéticas, tanto en VHF como en UHF, es difícil la determinación precisa del alcance de los transmisores.

El cálculo o predicción de la cobertura de una estación transmisora, se puede obtener mediante el empleo de curvas publicadas por el C.C.I.R. y establecidas en las Conferencias Internacionales de Estocolmo(1961) y de Ginebra. Las curvas que fueron asignadas a México reciben el nombre de Gráficas de Tres Cuartos.[9]

Para la aplicación de estas curvas experimentales es necesario trazar el perfil del terreno a través de la ruta del enlace de transmisión, y con ella determinar la altura efectiva de la antena transmisora.

6.6. Normatividad

Para el enlace que se tiene propuesto, será necesario y tener presente el decreto que se establece en México para las telecomunicaciones, de acuerdo a la Secretaria de Comunicaciones y Transportes y el Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, este decreto respecta a la Ley Federal de Telecomunicaciones y en relación a utilización del "espectro radioelectrico", se debe considerar el siguiente artículo:

Artículo 10

[21]El uso de las bandas de frecuencias del espectro radioelectrico se clasificará de acuerdo con lo siguiente:

1. **Espectro de uso libre:** Son aquellas bandas de frecuencias que pueden ser utilizadas por el público en general sin necesidad de concesión, permiso o registro;
2. **Espectro para usos determinados:** Son aquellas bandas de frecuencias otorgadas mediante concesión y que pueden ser utilizadas para los servicios que autorice la Secretaria en el título correspondiente;
3. **Espectro para uso oficial:** Son aquellas bandas de frecuencias designadas para el uso exclusivo de la administración pública federal, gobiernos estatales y municipales, otorgadas mediante asignación directa;
4. **Espectro para usos experimentales:** Son aquellas bandas de frecuencias que podrá otorgar la Secretaria, mediante concesión directa e

intransferible para comprobar la viabilidad técnica económica de tecnologías en desarrollo tanto en el país como en el extranjero, para fines científicos o para pruebas temporales de equipo;

5. **Espectro reservado:** Son aquellas bandas de frecuencias no asignadas ni concesionadas por la secretaria.

6.7. Seguridad y protección de las instalaciones

Las instalaciones de centros emisores o receptores, al estar en puntos elevados, y normalmente en cerros altos, han de ser protegidos contra las condiciones meteorológicas más adversas; principalmente contra la caída de rayos y la corrosión causada por el frío y los rayos solares.[12]

La situación de las instalaciones en cerros altos les hace ser un blanco perfecto para las descargas eléctricas, debidas a:

- La altitud de sus instalaciones.
- Su posición sobre la cima de los cerros.
- La presencia de grandes masas metálicas.

Para evitar que la descarga caiga sobre el edificio de las instalaciones, la mejor protección para éste, sus instalaciones y las personas que se encuentren dentro, consiste en realizar alrededor del edificio una caja de Faraday: que es una jaula de malla de cobre puesta a tierra pies de electrodos profundos.

La torre, e instalaciones de antenas y cables, deben protegerse mediante pararrayos, cable colector de malla de cobre de 80 a 100 milímetros de sección, y una buena toma de tierra constituidas por picas metálicas, equivalentes a los electrodos profundos que alcancen las capas conductoras de la tierra (nivel friático) que suelen estar entre 18 y 60 metros de profundidad para las zonas montañosas.[12]

Existen normas, tanto a nivel nacional como internacional, que establecen con toda precisión la realización de estas tomas de tierra, así como las recomendaciones mas acertadas de protección de instalaciones.

Conclusiones

Hemos podido constatar que el enlace entre la UAEH y el campus de Actopan resultaría de gran utilidad debido a que la comunicación entre ambas partes resulta de vital importancia; así como también el tener un sistema propio de comunicación vía microondas resulta mucho más eficaz que el estar dependiendo de una compañía ajena a la universidad que ofrezca tales servicios, si a esto le agregamos que al implementar este sistema de comunicación por microondas se tienen muchas más ventajas que con la infraestructura disponible actualmente como lo es la capacidad de transmisión y recepción de información, se pueden introducir modalidades de comunicación que hasta ahora se ven limitadas como pueden ser las videoconferencias que pueden contribuir sin lugar a dudas a mejorar el nivel docente y además a aumentar la capacidad de servicios de voz y datos.

Cabe hacer mención que el tiempo de implementación del proyecto hasta su puesta en operación, es relativamente corto en comparación con otras tecnologías y adicionalmente ofrece más ventajas al permitir una mayor flexibilidad en la solución de las necesidades de comunicación.

Además de que el pago de renta a empresas externas a la UAEH de dichos servicios a largo plazo resulta muy costoso, en cambio, el tener un equipo propio, tal vez al principio resulte algo costoso, pero en años venideros se podrá constatar la economía y eficacia del sistema; a esto debemos agregar que los costos de operación y mantenimiento para estos equipos es bajo en comparación con los distintos sistemas de comunicación con capacidad de proveer el mismo servicio.

Glosario

- **ACOPLAMIENTO.** Enlace de los circuitos o dispositivos por líneas electrostáticas de fuerza, o líneas electromagnéticas de fuerza o por conexión directa, con la finalidad de transferir energía de uno a otro
- **ALTA FRECUENCIA.** Designación para la banda de frecuencias comprendida entre 3 y 30 MHz.
- **AMPLIFICADOR.** Unidad que aumenta el nivel de una señal.
- **AMPLIFICADOR DE BANDA ANCHA.** Amplificador que presenta una respuesta razonablemente plana a una amplia banda de frecuencias.
- **AMPLIFICADOR DE FRECUENCIA INTERMEDIA.** Sección de un receptor superheterodino que amplifica las señales una vez convertidas al valor fijo de F_1 por el convertidor de frecuencia.
- **ANCHO DE BANDA.** Frecuencia a la cual la ganancia de un amplificador o cualquier otro circuito se reduce en 3 dB de su valor de corriente continua. | Extensión del espectro o gama de frecuencias comprendidas en cierta banda. | Banda de frecuencias que puede ser reproducida por un amplificador.
- **ÁNGULO DE RADIACIÓN.** Ángulo horizontal o vertical al cual son radiadas las ondas electromagnéticas desde una antena.
- **ANTENA.** Dispositivo (hilo, varilla o parábola) destinado a interceptar las ondas de radio y transformar los campos electromagnéticos en señales eléctricas.
- **ASÍNCRONO.** Evento o dispositivo que no es sincrónico con la temporización de la unidad central de proceso (o de otros procesos).

- **ATENUACIÓN.** Disminución de nivel expresado en dB. | Pérdida de amplitud de una señal.
- **BEL.** Unidad de una escala logarítmica de potencias.
- **CABLE COAXIAL.** Línea de transmisión en la cual un conductor está centrado y aislado de un tubo metálico que sirve como segundo conductor.
- **CAMPO.** Región que contiene líneas eléctricas o magnéticas de fuerza o ambas.
- **CAMPO DE RADIACIÓN.** Porción del campo magnético que es propagada por un radiador, opuesto al campo de inducción.
- **CAMPO ELÉCTRICO.** Componente eléctrico de un campo electromagnético asociado a ondas de radio y a electrones en movimiento.
- **CAMPO MAGNÉTICO.** Espacio en torno a un polo magnético o cuerpo imantado en el que actúa la energía magnética.
- **CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA.** Campo magnético natural cuyas líneas de fuerza se extienden de norte a sur, si bien no coinciden con los polos geográficos.
- **COMUNICACIÓN PUNTO A PUNTO.** Comunicación entre dos estaciones cuyo emplazamiento puede ser determinado.
- **DEMODULACIÓN.** Proceso mediante el cual se recupera información de una onda portadora modulada. Es un proceso inverso al de modulación. Sinónimo de detección.
- **DIAFONÍA.** Interferencia entre dos circuitos. En equipos de audio, fenómeno que ocurre cuando en la reproducción del canal izquierdo se tiene información del canal derecho y viceversa.
- **DIFRACCIÓN.** Encurvamiento de la dirección de propagación de una onda.
- **ESPECTRO.** Conjunto de frecuencias agrupadas que constituyen el campo de realización en el cual se produce un fenómeno vibratorio con propiedades físicas comunes.

- FARADIO. Unidad básica de capacidad; un condensador tiene una capacidad de un faradio cuando una variación de un voltio por segundo a través de dicho condensador produce una corriente de un amperio.
- FRECUENCIA. Número de ciclos completos por unidad de tiempo para una magnitud periódica tal como corriente alterna, ondas acústicas u ondas de radio.
- GANANCIA. Grado de amplificación de una señal proporcionado por un determinado circuito. Suele expresarse en dB.
- GANANCIA DE ANTENA. Cociente entre la intensidad de campo producida por la antena y la intensidad de campo que produciría en el mismo punto un radiador isotrópico que absorbiera del emisor la misma potencia de RF
- GENERADOR DE BANDA ANCHA. Generador de señal que cubre por lo general la gama de frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 1.000 MHz.
- GUIA DE ONDAS. Conducto metálico diseñado para guiar o conducir ondas electromagnéticas de alta frecuencia en su espacio interior.
- HAZ. Onda dirigida señal de RF transmitida de una antena direccional a otra, con la mayor parte de la energía concentrada en un ángulo pequeño.
- IMPEDANCIA. Oposición total ofrecida por un componente o circuito al paso de corriente alterna. La impedancia se expresa en ohmios.
- INDUCTANCIA. Propiedad de un circuito o elemento que se opone a la variación de la corriente. La inductancia se mide en henrios.
- INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO. Amplitud de la componente eléctrica del campo de una onda electromagnética expresada en voltio/metro.
- INTERFERENCIA. Término aplicado a cualquier tipo de energía indeseada que tienda a interferir la recepción de las señales deseadas.
- INTERMODULACIÓN. Modulación de las componentes de una onda compleja por otra que produce nuevas ondas cuyas frecuencias son

iguales a las sumas y diferencias de múltiples enteros de las frecuencias componentes de la onda compleja original.

- **LONGITUD DE ONDA.** Wave length. Longitud de una onda completa de una alternancia o fenómeno vibratorio, que generalmente se mide cresta a cresta o valle a valle de ondas sucesivas.
- **MEZCLADOR.** Etapa en un receptor superheterodino en la que se combina la señal modulada de RF de entrada con la señal de un oscilador de RF para producir una señal modulada de FI.
- **MICROONDA.** Relativa a longitudes de onda del espectro que abarca desde aproximadamente 30 a 0,3 cm. y corresponde a frecuencias comprendidas entre 1 y 100 GHz.
- **MODULAR.** Acción de variar la amplitud, frecuencia a fase de una onda en un tubo electrónico o circuito concebido para realizar esta función.
- **MODULACIÓN EN CUADRATURA.** Modulación en fase de dos componentes portadoras que tienen una diferencia de fase de 90 grados.
- **ONDA.** Wave. Perturbación propagada para la que la intensidad en cualquier punto de un medio es función del tiempo y la intensidad en un instante dado es función de la posición del punto. Las ondas pueden ser eléctricas, electromagnéticas, acústicas o mecánicas.
- **ONDA DE TIERRA.** Onda de radio que se propaga sobre la tierra y que es ordinariamente afectada por la propia presencia de la tierra y la troposfera.
- **ONDA DIRECTA.** Onda de radio que se propaga directamente en el espacio desde el transmisor al receptor sin que sea refractada por la ionosfera.
- **ONDA ELECTROMAGNÉTICA.** Onda de radiación electromagnética caracterizada por presentar variaciones de campo eléctrico y magnético.
- **ONDA MODULADA.** Onda portadora cuya amplitud, frecuencia o fase varían según el valor de la señal de información que se está transmitiendo.

- **PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN.** Generalmente se expresa en dB. Potencia efectiva pérdida en la transmisión de una señal desde un punto a otro a través de un medio o a lo largo de una línea.
- **POTENCIA.** Energía eléctrica por segundo que se suministra a un dispositivo o que éste suministra. La unidad es el vatio.
- **PROPAGACIÓN.** Camino de las ondas electromagnéticas o sonoras a través de un medio. También se denomina propagación de las ondas.
- **RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.** Radiación asociada a un campo eléctrico variable periódicamente y a un campo magnético que se desplaza a la velocidad de la luz.
- **RADIOFRECUENCIA.** Frecuencia a la cual es posible la radiación de energía electromagnética con el propósito de comunicación.
- **RAYO DIRECTO.** Rayo u onda que alcanza un receptor directamente sin causar reflexión, refracción o cualquier otro tipo de obstáculo.
- **RECEPTOR.** Equipo o sistema integrado de sintonizador y amplificador.
- **REFLEXIÓN.** Retorno o cambio en la dirección de las ondas de radio que inciden en una superficie o que pasan de un medio a otro.
- **RELACIÓN PORTADORA-RUIDO.** Relación de la amplitud de portadora con la amplitud de la tensión de ruido.
- **RELACIÓN SEÑAL/ RUIDO.** Mide la relación entre la mayor señal y el ruido residual en un sistema de transmisión.
- **RESISTENCIA.** Oposición de un dispositivo o material al paso de corriente continua; se expresa en ohmios.
- **RESONANCIA.** Estado en el que la frecuencia de respuesta natural de un circuito coincide con la frecuencia de la señal aplicada y viceversa.
- **RUIDO.** Señales extrañas, generalmente no deseadas, que surgen circunstancialmente en cualquier parte de un sistema de transmisión.
- **RUIDO BLANCO.** Ruido aleatorio de origen eléctrico o acústico presente en una banda de frecuencia dada.

- RUIDO ELÉCTRICO. Corrientes o tensiones indeseadas que interfieren con las cantidades eléctricas deseadas de un circuito o sistema.
- RMS: valor eficaz que un instrumento debería medir para una onda seno. Es calculado a partir de una onda rectificada. Si se miden señales que no son senoidales, el valor es erróneo.
- SEÑAL. Cantidad eléctrica, como corriente o tensión, que puede utilizarse para transportar información, relativa a comunicaciones, control o cálculos.
- TREN DE ONDAS. Serie de ondas electromagnéticas similares propagadas a intervalos regulares.

Bibliografía

- [1] Física Moderna, H.E.White, UTEHA, 1985
- [2] Estado Solido en Ingenieria de Radiocomunicación, Herbert C. Krauss, Charles W. Bestian y Frederick H. Raab, Limusa, 1987
- [3] Sistemas de Comunicación, B. P. Lathi, Interamericana, 1990
- [4] Dispositivos Electrónicos y Amplificación de Señales, A. Sedra, K.C. Smith, Interamericana, 1990
- [5] Redes de Ordenadores, Andrew S. Tanenbaum, Segunda Edición, Prentice Hall, 1993
- [6] Física General, Carel W. Van Der Merwe, Mc Granw Hill, Mayo de 1995, Traducción: Luis Gutiérrez Díez y Angel Gutiérrez Vázquez
- [7] Curso Práctico de Electrónica Volumen 1, 2, 3 y 4, Harry Mileaf, Grupo Noriega Editores, 1997, Traducción: Ing. Lionel Dignowity
- [8] Fundamentos de Física, Frank J. Blatt, Prentice Hall, 1991, Traducción: Ing. Virgilio Gonzáles Pozo
- [9] Electrónica Industrial Moderna, Timothy J. Maloney, Prentice Hall, Tercera Edición, 1997
- [10] Microwave Engieneering, David M. Pozar, Prentice Hall, Second Edition, 1997
- [11] RF DESIGN GUIDE: Systems, Circuits and Equations, Peter Vizmuller, Prentice Hall, Segunda Edición, 1999
- [12] Introducción a las Telecomunicaciones Modernas, Enrique Herrera Pérez, Limusa, Primera Edición, 1999

- [13] Fundamentos Básicos de Telecomunicaciones, Elaborado por Servicios de Formación Telefónica de España, Enero 2000
- [14] Microwave and Radio Frequency Engineering, Tom Penick, 2003
- [15] Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, Prentice Hall, 2003
- [16] Electrónica Digital y Circuitos Integrados, CEKIT
- [17] Diccionario Enciclopedico, Reymo
- [18] Enciclopedia Encarta 2003
- [19] Electrónica Básica para Ingenieros, Gustavo A. Ruiz Robredo
<http://grupos.unican.es/dyvci/ruizrg/pstscript/LibroEcaBasica>
- [20] <http://www.monografias.com/trabajos>
- [21] <http://www.sct.gob.mx>
- [22] <http://www.cofetel.gob.mx>
- [23] <http://www.necmex.com>
- [24] <http://www.omb.com>
- [25] <http://www.andrew.com>
- [26] <http://www.uclm.org/redes>
- [27] <http://www.teicontrol.com/notes>
- [28] <http://www.ams.org/tex>
- [29] <http://www.ctan.org/tex>
- [30] <http://www.condumex.com.mx>