



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

“ENLACE DE MICROONDAS PDH/SDH PUNTO A PUNTO, PARA
RESPALDO, EN CASO DE RUPTURA DEL ENLACE PRINCIPAL
DE COMUNICACIONES DE FIBRA ÓPTICA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :

JUAN ANTONIO HERNÁNDEZ MOLINA

ASESOR: ING. BENITO BARRANCO CASTELLANOS



Estado de México

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Indice	I
Introducción	II -VI
Capítulo I Fundamentos de propagación	1
1.1 Ondas electromagnéticas	2
1.2 Propagación en el espacio libre	10
1.3 Desvanecimientos	15
Capítulo II Elementos de un enlace de microondas	18
2.1 Líneas de transmisión (Cable Coaxial, Coaxial Heliac, Guía de Onda)	18
2.2 Antenas	28
2.3 Etapas de un Radio Enlace	50
2.4 Sistemas de Protección	59
Capítulo III Cálculo de enlace	67
3.1 Diseño de Ingeniería	67
3.2 Estudio de Gabinete (Map Survey)	67
3.3 Estudio de Campo (Site Survey)	70
3.4 Perfil Topográfico	73
3.5 Cálculo de Enlace	74
3.6 Cálculo de Indisponibilidad	78
3.7 Cálculo de un enlace real	85
Conclusiones	94
Anexo	97
Bibliografía	110
Glosario	111



Objetivo

Con la elaboración de esta tesis se obtendrá como resultado el conocimiento general para realizar un proyecto de radio enlace de microondas para la Procuraduría General de la República (PGR) en caso de la ruptura del enlace principal (Fibra Óptica); tomando en cuenta un ejemplo práctico de una célula entre dos puntos dentro de la República Mexicana.

Introducción

Los enlaces de microondas en zonas habitadas han sido la solución más fácil y económica para darle servicio a una gran cantidad de usuarios sin necesidad de hacer grandes inversiones, ya que utilizan como medio de transmisión el espacio libre (aire) como se muestra en la fig. 1.

En las zonas rurales, cubriendo grandes distancias montañosas o desérticas. Así como zonas de extensiones grandes con agua (lagos, lagunas o mares), o de difícil acceso son la solución más empleada.

Actualmente, los sistemas de radio, enlaces de microondas o radioenlaces, son utilizados para las comunicaciones a gran distancia y de corto alcance, cuando el terreno (topografía) no permite otro tipo de medio de comunicación.

Los enlaces de microondas pueden ser analógicos o digitales, los enlaces analógicos están siendo sustituidos en la actualidad por enlaces digitales, esto se debe a que estos últimos son más confiables para la transmisión de información y tienen menos ruido.

Los sistemas microondas digitales desarrollados actualmente, llevan circuitos de banda de voz con multicanalización por división de tiempo modulados con códigos de pulsos y utilizan técnicas de modulación digital como la modulación por



desplazamiento de fase (PSK)¹, y la modulación por amplitud en cuadratura (QAM)² y pueden transmitir información de audio, vídeo, datos, etc.

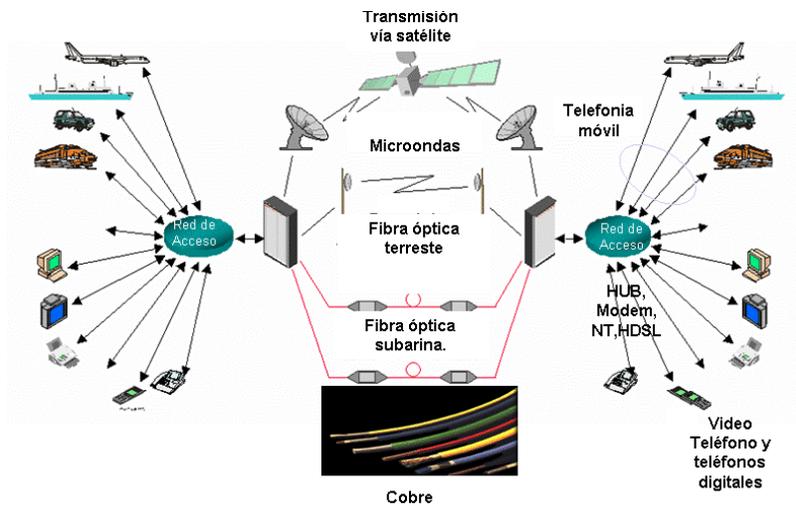


Fig. 1 Medios de transmisión.

Un enlace de microondas es el conjunto de dispositivos electrónicos diseñados para la transmisión de señales de información, por medio de ondas electromagnéticas, utilizando como medio de transmisión el espacio libre (aire)³.

◆ Señal Analógica

- El valor de su amplitud varía de manera continua en el tiempo.



Número indefinido de valores

◆ Señal Digital

- El valor de su amplitud varía entre valores fijos y bien definidos a través del tiempo



Número discreto de valores

Fig. 2 Tipos de señales.

1 Consultar anexo. P. 97

2 Ibídem. P. 99

3 Aldana Espejel Benito, Manual de Radio y Microondas, pp. 4-5



Se denomina radio enlace a cualquier interconexión entre los terminales de telecomunicaciones efectuados por ondas electromagnéticas. Si las terminales son fijas, el servicio se denomina como tal y si alguna terminal es móvil, se le denomina dentro de los servicios de esas características.

Se puede definir al radio enlace del servicio fijo, como un sistema de comunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de información, con características de calidad y disponibilidad determinadas. Propiamente estos enlaces se explotan entre .8 GHz y 42 GHz. El radio enlace establece un concepto de comunicación del tipo dúplex, de donde se deben transmitir dos portadoras moduladas: una para la Transmisión y otra para la recepción. Al par de frecuencias asignadas para la transmisión y recepción de las señales, se lo denomina radio canal.

Los enlaces se hacen básicamente entre puntos visibles, es decir, puntos altos de la topografía. Cualquiera que sea la magnitud del sistema de microondas, para un correcto funcionamiento es necesario que las vías de enlaces tengan una altura 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 libres debe conocerse la topografía del terreno, así como la elevación y lugar de los obstáculos que puedan existir en el trayecto.

Este tipo de sistemas en la actualidad pueden enviar varios STM-1, es decir al menos 63 E1's o 1890 comunicaciones de voz simultáneas. Esto es posible gracias al Multiplexaje, hay que recordar que los dos tipos de Multiplexaje que se emplean en los enlaces de microondas y son:

FDM (Multiplexaje por división en frecuencia).

Maneja portadoras de diferentes frecuencias llamadas piloto, para lograr el Multiplexaje y su capacidad de transmisión se divide en:



- Alta: 960, 1800 y 1700 comunicaciones simultaneas.
- Media: 120, 300 comunicaciones simultaneas
- Baja: 1, 4, 24 y 72 llamadas simultaneas.

TDM (Multiplexaje por División en el Tiempo)

La base del PCM (Multiplexación por Pulsos Codificados), en el cual tenemos la Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH), y su evolución la Jerarquía Digital Sincronía (SDH)⁴, la capacidad de transmisión se dividen en:

- Alta: 480, 1920 y 1890 comunicaciones simultaneas, es decir 3er, 4º Orden y STM-1.
- Media: 120 comunicaciones simultaneas (2ª Orden)
- Baja: 30 comunicaciones simultaneas (1er. Orden o PCM).

La principal diferencia entre un radio analógico contra un radio digital es la capacidad de convertir la señal digital en analógica, mientras que en un radio analógico la salida del modulador nos entrega una señal llamada frecuencia intermedia (FI), con una modulación en frecuencia (FM) y mezclada en amplitud (AM) con la señal que nos proporciona el oscilador local (OL), de tal forma que se escogerá la señal deseada de radio frecuencia de operación del enlace (RFope).

En un radio digital la señal que entra al modulador es una señal digital (unos y ceros), que será procesada para obtener la FI, la cual es una señal modulada en 4 PSK o 16 QAM, y seguirá el mismo proceso que en el radio analógico⁵.

Este trabajo de tesis está conformado de la siguiente manera.

Capítulo 1. Se hace una descripción sobre los conceptos teóricos de las ondas electromagnéticas y su propagación en el espacio libre.

4 Consultar anexo. pp. 102-109

5 Diseño y Hosting Innova Technologies, 04/04/2010, <http://www.radiocomunicaciones.net/radio-enlaces.html>



Capítulo 2. En este Capítulo se mencionan las partes físicas que conforman un enlace de microondas contemplando los medios de transmisión (Cables y Antenas) y los sistemas de protección usados para el buen funcionamiento del mismo.

Capítulo 3. En esta parte se hace todo el diseño y el cálculo de ingeniería, refiriéndose a un ejemplo real realizado en campo por el autor de esta tesis.

Capítulo 1

Fundamentos de propagación

El propósito de un sistema de microondas es convertir la información original en una onda electromagnética y después transmitirla a uno o más destinos en donde se convierte de nuevo a su forma original.

En este capítulo veremos la propagación de las ondas de radio frecuencia, las cuales están en el espectro de radio eléctrico entre el rango de 400 MHz a 23,000 MHz, la propagación en el espacio libre y los desvanecimientos que se presentan al mandar la señal por línea de vista de un punto A a un punto B.

Los enlaces de microondas¹ utilizan como medio de transmisión la atmósfera terrestre, utilizando elementos que permitan que la señal de radio frecuencia proveniente del equipo de radio sea transportada a la antena y radiada finalmente por ésta en forma de ondas electromagnéticas. Estas ondas electromagnéticas viajan a través de la atmósfera hacia otro sistema similar, el cual capta la radiación electromagnética y la dirige al radio lográndose así el radioenlace² (Fig. 1.1).

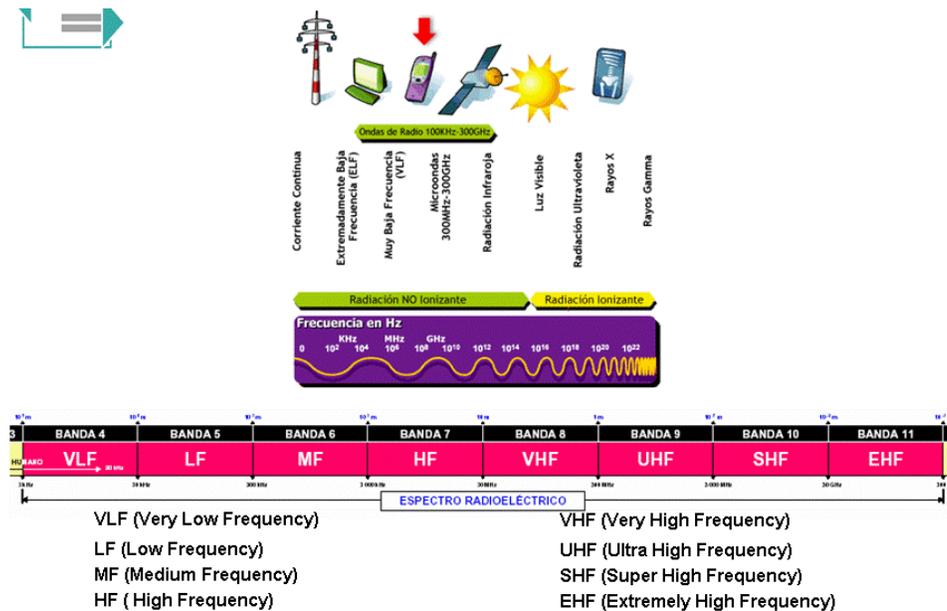


Fig. 1.1 El espectro electromagnético.

1 Hayt Williams H, Teoría Electromagnética, p.180
 2 Alcatel, Manual de radio enlace, p. 8

También se mencionara brevemente los conceptos de las ondas electromagnéticas y los elementos del sistema de antenas como lo son:

- La radiación electromagnética.
- Las líneas de transmisión (cables coaxiales, guías de onda).
- Las antenas.
- El Diseño de Ingeniería.

1.1 Ondas electromagnéticas

Una onda electromagnética se produce por incremento de una carga eléctrica.

En un conductor, el voltaje y la corriente que fluyen en él crean un campo eléctrico (E) paralelo al conductor y un campo magnético (H) alrededor del mismo. Es decir, (E) y (H) son perpendiculares³.

De la misma manera, la relación entre los campos eléctricos y magnéticos en una onda electromagnética transversal (TEM)⁴, siempre serán perpendiculares entre ellos y perpendiculares a la dirección de propagación (Fig1.2).

Las ondas electromagnéticas viajan en el espacio libre a la velocidad de la luz (C), donde $C = 299.793 \text{ E } 06 \text{ m/s}$.

Sin embargo, en el aire (atmósfera de la tierra), las ondas TEM viajan ligeramente más despacio, y aún más lentas a lo largo de una ruta de transmisión.

³ Ibidem, p.12

⁴ TEM (modo transversal electromagnético). Un modo TEM se caracteriza por el hecho de que tanto el campo eléctrico, como el campo magnético que forman la onda son perpendiculares a la dirección en que se propaga la energía: sin existir, por tanto componente de los campos en la dirección axial (dirección en que se propaga la energía).

Para que existan propagación energética en modo TEM, es necesario que existan al menos dos conductores eléctricos y un medio dieléctrico entre ambos (que puede incluso ser aire o vacío). Ejemplos de líneas de transmisión son la línea bifilar, el cable coaxial, y líneas planares tales como la stripline, la microstrip...

Cuando el modo de propagación es TEM, se pueden definir, sin ambigüedad, tensiones y corrientes, y el análisis electromagnético de la estructura (estudio de campos) no se hace imprescindible, siendo posible una representación circuital con parámetros distribuidos, tal y como aquí se trata con posterioridad.

Ernst Weber and Frederik Nebeker, *The Evolution of Electrical Engineering*, IEEE Press, 04/09/2010 http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_de_transmisi%C3%B3n

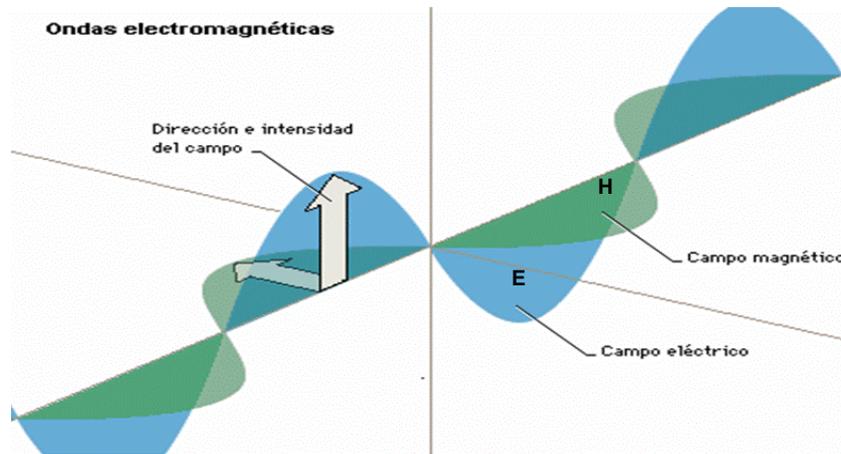


Fig. 1.2 Ondas Electromagnéticas. Una onda TEM (Fig. 1.3) tiene oscilaciones que son periódicas y repetitivas, por lo que tienen una frecuencia y una longitud de onda:

$$\lambda = V * T \quad \text{si } T = \frac{1}{f} \text{ sustituyendo T}$$

$$\therefore \lambda = \frac{V}{f}$$

Donde:

- λ = Longitud de onda de la TEM.
- V = Velocidad de propagación.
- F = Frecuencia de la onda.

Longitud de Onda

$$\lambda = c/f; \quad c = 3 * 10^8$$

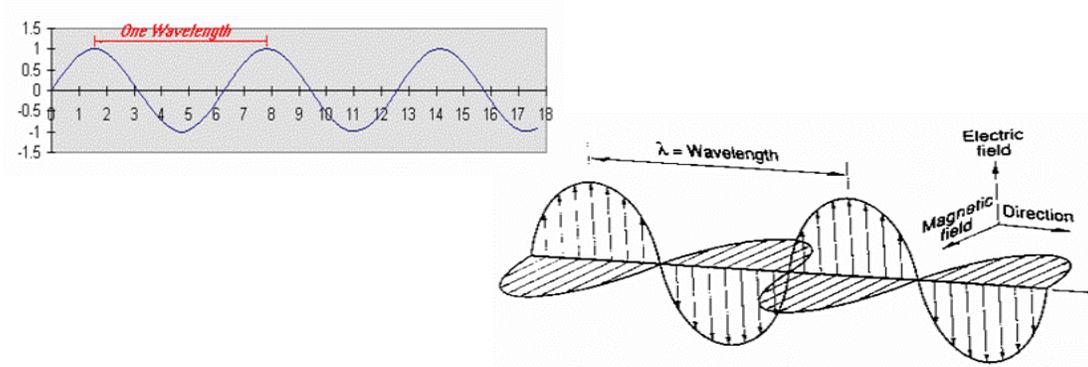


Fig. 1.3 Características y parámetros.

La propagación de las TEM en las rutas de transmisión, es más lenta debido a los conductores y los dieléctricos que se utilizan.

A la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio libre, se le llama *propagación de la radio frecuencia o propagación de radio*

Las intensidades de campo eléctrico y magnético de una onda TEM, se relacionan por la impedancia característica del espacio libre. La impedancia característica de un medio de transmisión sin pérdida es:

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = \sqrt{\frac{1.26 \times 10^{-6}}{8.885 \times 10^{-12}}} = \sqrt{1.42373 \times 10^5} = 377.3233 \Omega$$

Donde:

- Z_s = Impedancia característica del espacio libre (ohms).
- μ_o = Permeabilidad magnética del espacio libre.
- ϵ_o = Permeabilidad eléctrica del espacio libre.

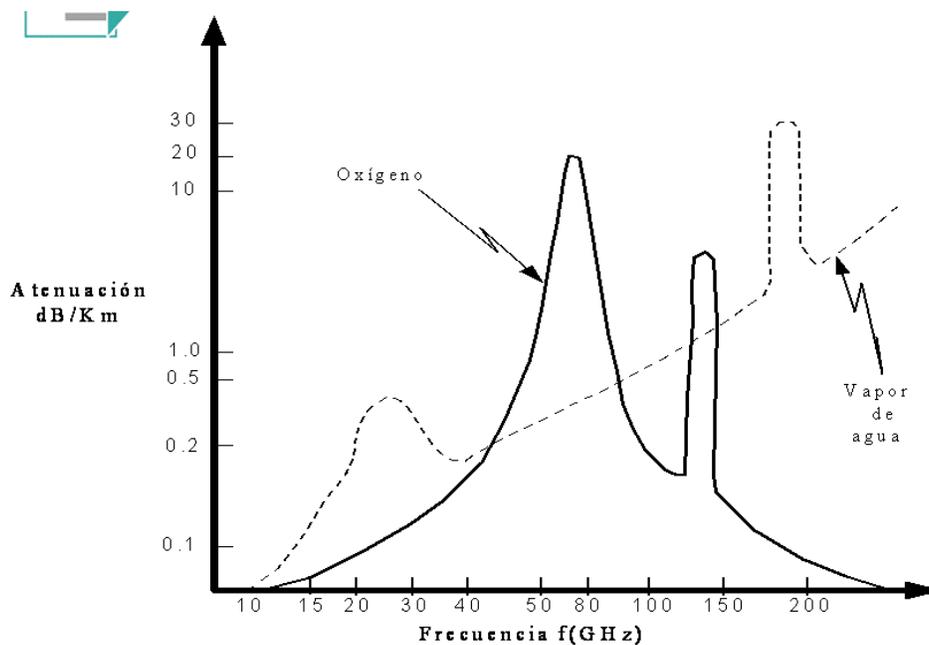


Fig. 1.4 Propagación.

Frente de onda

Un frente de onda (Fig. 1.5) TEM esférica producida por una fuente isotrópica⁵, es decir que radia la potencia en forma proporcional y uniformemente constante:

La densidad de potencia en cualquier punto de un frente de onda radiada por una fuente isotrópica es:

$$P_a = \frac{P_r}{4\pi R^2}$$

Donde:

- **P_a** = Densidad de potencia.
- **P_r** = Potencia total radiada.
- **$4\pi R^2$** = Área del frente de onda.

La reducción de la densidad de potencia con la distancia es equivalente a la pérdida de potencia o *atenuación de la onda*.

Conforme se aleja el frente de una onda de la fuente, el campo electromagnético radiado se dispersa.

La *absorción de onda* se da cuando la energía de una onda electromagnética es transferida a las moléculas de algunos materiales que conforman la atmósfera terrestre (gases, sólidos y líquidos). La absorción de las ondas electromagnéticas por la atmósfera provocan que en la forma analógica una pérdida de potencia, y una reducción correspondiente en la densidad de potencia⁶.

5 Una fuente isotrópica es aquella que emite uniformemente luz en todas direcciones. 04/04/2010, http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF1_archivos/UNIDAD1TEMA2.PDF

6 Ibidem, p. 14

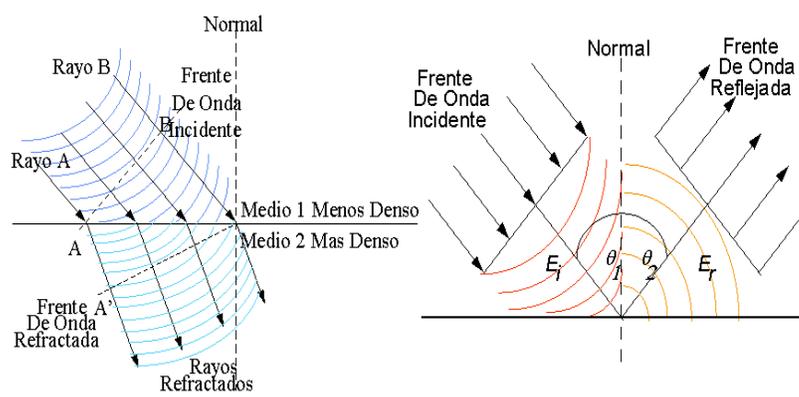


Fig. 1.5 Ondas Electromagnéticas.

La absorción de radio frecuencias en una atmósfera normal depende de la frecuencia y es relativamente insignificante, aproximadamente abajo de los 10 GHz. La atenuación de las ondas debido a la absorción no depende de la distancia de la fuente radiante, pero sí bastante de la distancia total de la onda propagada en la atmósfera.

Para un medio homogéneo (con propiedades uniformes en todos los puntos), la absorción por la propagación de la onda será igual en el primer kilómetro que para el último. Las condiciones atmosféricas como lluvias fuertes, neblina densa etc. absorben más energía.

En la atmósfera de la tierra un frente de onda puede alterarse por el comportamiento en el espacio libre por efectos ópticos como son:

- Refracción.
- Reflexión.
- Difracción.
- Interferencia.

Refracción

La refracción electromagnética es el cambio de dirección que sufre un frente de onda al pasar oblicuamente, de un medio a otro variando la velocidad de propagación.

La velocidad de propagación es inversamente proporcional a la densidad del medio en el cual se propaga.

La inclinación de un frente de onda dependerá del índice de refracción del medio, el cual es la relación de la velocidad de propagación de la onda TEM en el espacio libre y la velocidad de propagación en el material o medio dado:

$$n = \frac{c}{v}$$

Donde:

- n = Índice de refracción.
- c = Velocidad de la luz en el espacio libre (m/s).
- v = Velocidad de propagación en un material dado (m/s)⁷.

Reflexión

La ley de Snell establece que:

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$
$$\therefore \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Donde:

⁷ Ibidem, p. 16

- n_1 = Índice de refracción del material.
- n_2 = Índice de refracción del material.
- θ_1 = Ángulo de incidencia.
- θ_2 = Ángulo de refracción.

La reflexión ocurre cuando una *onda electromagnética* choca con una barrera entre dos medios y no penetra el segundo material, sino que se reflejan en el medio de incidencia o medio 1. Las velocidades de las ondas reflejadas e incidentes son iguales así como los ángulos de incidencia y reflexión son iguales⁸.

Difracción

Es la modulación o redistribución de energía dentro de un frente de onda. Es el fenómeno que permite que las ondas de luz o de radio se propaguen sobre los bordes de los obstáculos.

Donde:

- Se considera un frente plano y finito la cancelación en direcciones aleatorias es incompleta, el frente de onda se difracta (dispersa) hacia afuera.
- La difracción también se presenta cuando la OEM pasa sobre la orilla del obstáculo, que permite que ondas secundarias pasen desapercibidas por la esquina del obstáculo, también se le conoce como zona de sombras⁹.

8 Ibidem, p. 17

9 Ibidem, p. 18

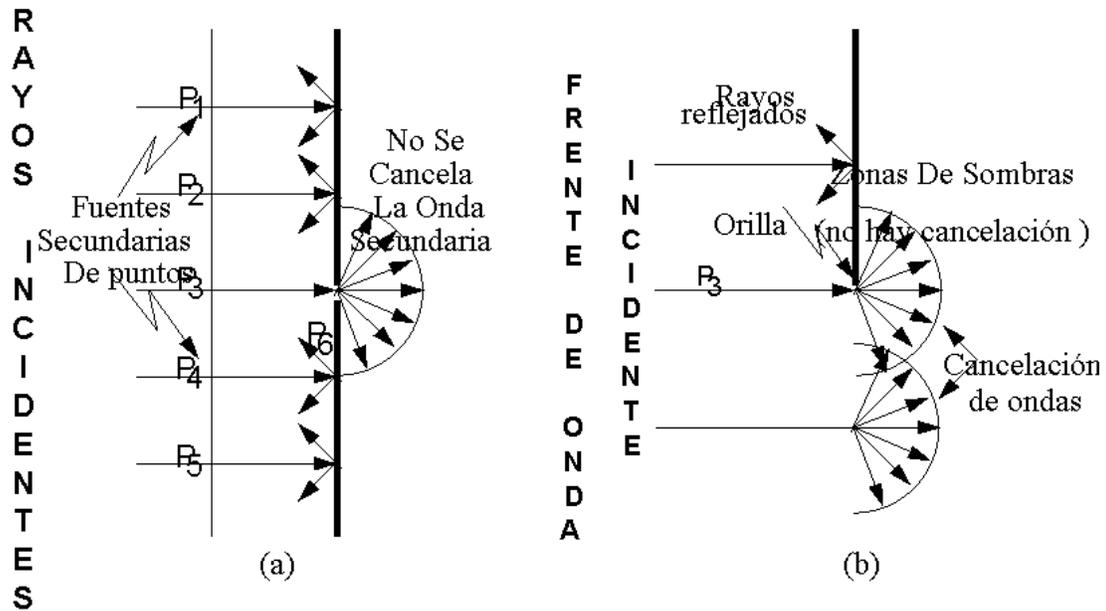


Fig. 1.6 Rayos y frentes de ondas incidentes.

Interferencia

La interferencia en ondas electromagnéticas (TEM) ocurre cuando dos o más TEM, se combinan de tal forma que el funcionamiento del sistema se degrada.

La interferencia se basa en el principio de superposición lineal de ondas electromagnéticas y ocurre cada vez que dos o más ondas TEM ocupan simultáneamente el mismo punto en el espacio, creándose ondas destructivas y ondas constructivas dependiendo del ángulo de fase de las ondas, este fenómeno se produce durante el trayecto o ruta de la señal, por las transmisiones de alta frecuencia (FM o AM). Existen varias formas de producir interferencia a las TEM, como los son:

- Interferencia a través de la Tierra física por el aire acondicionado, grupos electrógenos y el generador (Planta de emergencia).
- Por la potencia de circuitos pasivos del enlace de microondas (Filtros, circuladores, etc.).
- Coincidencia de líneas de alta tensión.
- Estática de las tormentas eléctricas.
- Interferencia Cósmica.

Para evitar las interferencias es necesario contar con:

- El uso de antenas de gran directividad y la polarización cruzada.
- Equilibrio de las distancias entre tramos de repetición.
- Sintonía adecuada en los filtros y los circuladores

Las interferencias son provocadas por:

- A través de la tierra física.
- Grupos electrógenos.
- Por la potencia de los circuitos pasivos (Filtros, circuladores Etc.).
- Coincidencia de líneas de alta tensión.
- Interferencia cósmica¹⁰.

1.2 Propagación en el espacio libre

En los sistemas de radio las ondas electromagnéticas se pueden propagar de varias formas, dependiendo del tipo de sistema y el ambiente (Fig. 1.7) Las ondas electromagnéticas viajan en línea recta, excepto cuando la tierra y la atmósfera alteran su trayectoria, existen tres tipos de propagación de las ondas electromagnéticas:

- De tierra.
- De tierra directas y reflejadas.
- De cielo (espaciales).

Cada una de estas formas de propagación existe en los sistemas de radio; sin embargo, para algunos sistemas son mínimos en ciertos rangos de frecuencias o sobre el tipo de terreno por el cual se propagan en particular.

En frecuencias por abajo de los 1.5 MHz, las ondas de tierra proporcionan la mejor cobertura. Las ondas de cielo se utilizan en aplicaciones de alta frecuencia¹¹.

¹⁰ Hayt Williams H, Op. cit. p. 190

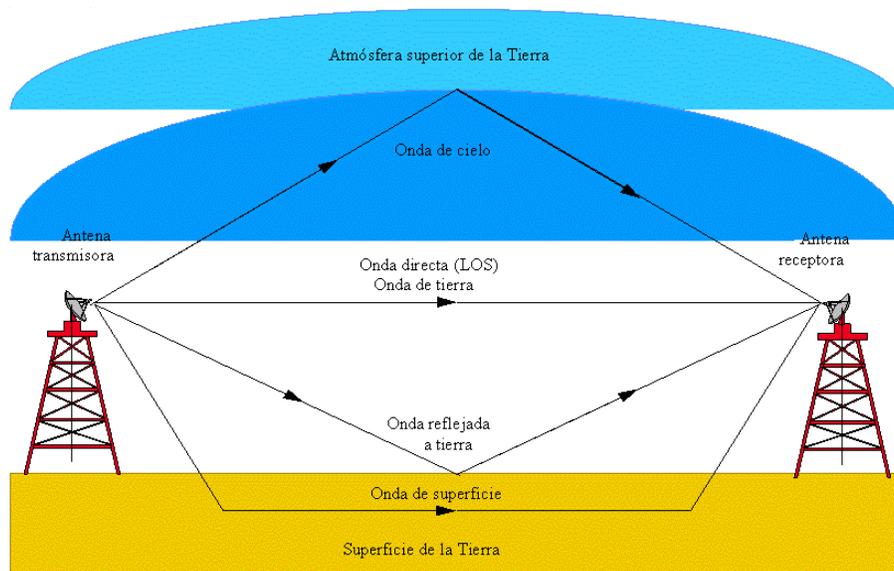


Fig. 1.7 Propagación de una onda.

Las ondas de tierra (superficiales)

Las ondas electromagnéticas (TEM) viajan por la superficie de la tierra, también llamadas *ondas superficiales*. Las ondas de tierra deben de estar polarizadas verticalmente. Estas ondas se propagan mejor sobre superficies que sean buenos conductores, como el agua salada y áreas desérticas muy áridas.

La atenuación o pérdidas de las ondas de tierra se incrementan rápidamente con la frecuencia, por lo que la propagación se limitan a frecuencias por abajo de los 2 MHz, hasta 15 KHz, y se utilizan generalmente para comunicaciones marítimas (de barco a barco, de barco a tierra), para la radio navegación y para comunicaciones marítimas móviles.

Sus principales ventajas son:

- Dan suficiente potencia de transmisión, y se pueden utilizar para comunicar dos puntos cualesquiera en el mundo.

- No se ven relativamente afectadas por los cambios en las condiciones atmosféricas.

Las desventajas de las ondas de tierra (superficiales) son:

- Requieren de un nivel alto de potencia para transmisión.
- Están limitadas a frecuencias, muy bajas, bajas y medias (VLF, LF y MF) que requieren grandes antenas¹².

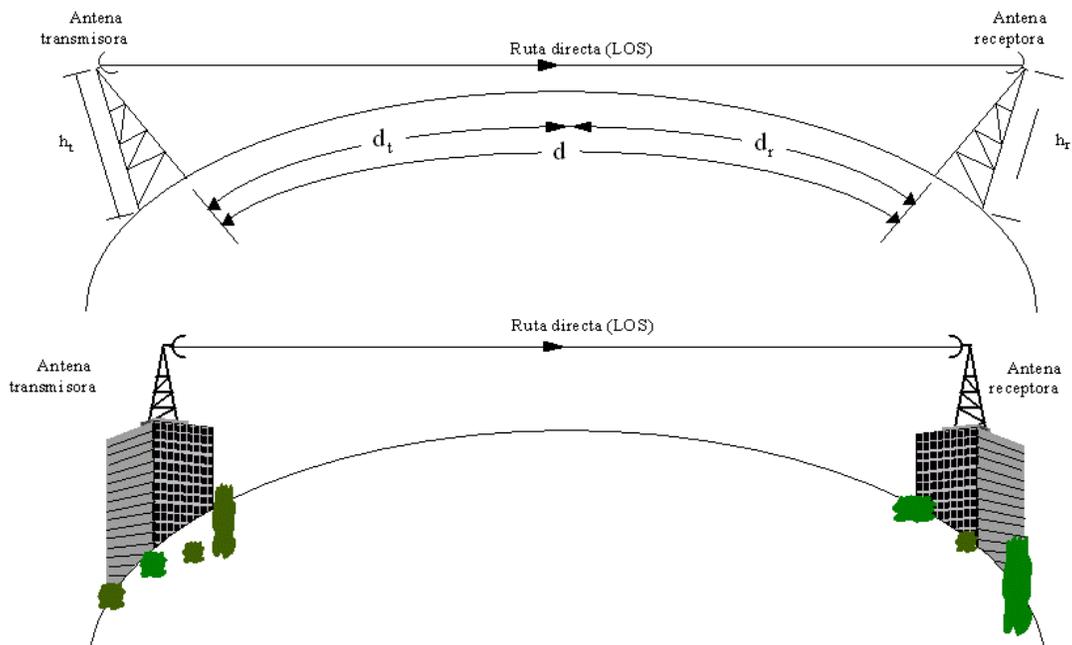


Fig. 1.8 Ondas Superficiales.

¹² Ibidem, p. 13

Las ondas de directas y reflejadas

Son ondas directas que viajan esencialmente en línea recta, entre la antena transmisora y la antena receptora. A la propagación de las ondas directas comúnmente se le llama *Transmisión de Línea de Vista (LOS)*.

Las ondas reflejadas a tierra son reflejadas por la superficie terrestre conforme se propagan, entre las antenas transmisora y receptora.

La curvatura de la tierra presenta un horizonte para la propagación de las ondas llamado *radio horizonte*, el cual influye en la propagación de las ondas directas cuando no existe línea de vista o la antena receptora se encuentra debajo del horizonte.

El radio horizonte puede alargarse incrementando la altura de la antena transmisora o receptora (o ambas), por arriba de la superficie de la tierra, instalando torres sobre las montañas o en edificios altos¹³.

Ondas de cielo o espaciales

Son las TEM, que se envían al cielo de donde son reflejadas y refractadas nuevamente hacia la tierra por la ionosfera, que es la región de espacio de atmósfera localizada entre los 50 y 400 Km.

La atmósfera terrestre para fines de propagación de las ondas espaciales la dividimos en tres grandes zonas y son:

Troposfera: Que es la capa más baja, en donde la onda de radio refracta (cambia de forma o dirección) a medida que aumenta la altitud.

Estratosfera: Es la capa intermedia, la onda de radio no sufre cambios, no hay gases suficientes para la refracción.

13 *Ibidem*. p. 15

Ionosfera: Es la capa más alejada de la atmósfera, la onda de radio puede sufrir diversos fenómenos dependiendo de las condiciones eléctricas¹⁴.

Efecto Ducto

El *efecto ducto* o propagación de *ducto* se presenta cuando la densidad de la atmósfera más baja es tal, que las ondas electromagnéticas se encuentran atrapadas entre esta capa 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 del *ducto*, como se muestra en la fig. 1.9.

Las frecuencias arriba del nivel UHF no se ven afectadas por la ionosfera, y pasan a través de ella, por lo tanto existe un límite superior de frecuencia para la propagación de las ondas de cielo o espaciales¹⁵.

La *frecuencia crítica* es aquella frecuencia más alta que puede propagarse directamente hacia arriba y todavía puede ser regresada a la tierra por la ionosfera. Esta frecuencia depende de la densidad de ionización y varía con la hora del día y la estación del año.

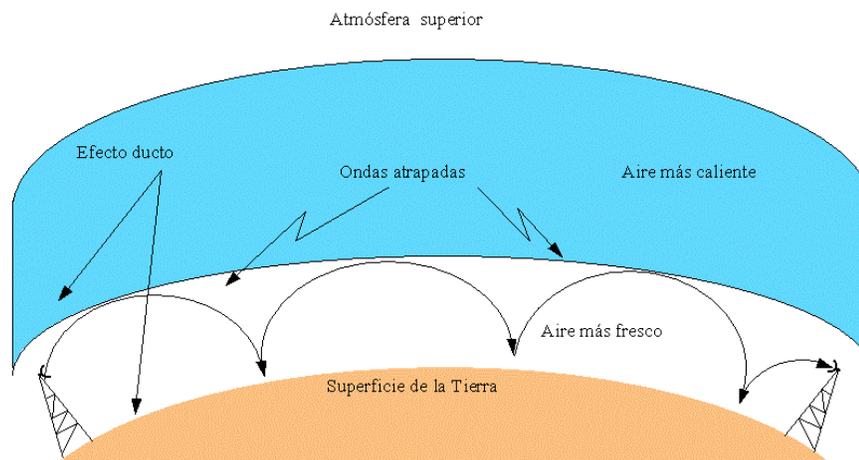


Fig. 1.9 Efecto Ducto.

14 Hayt Williams H, Op. cit. p. 190.

15 Ibidem p. 192

Si el ángulo vertical de radiación se reduce, las frecuencias en o por arriba de la frecuencia crítica aún se pueden refractar. Cada frecuencia tiene un ángulo vertical máximo llamado *ángulo crítico*¹⁶ (Fig. 1.10) en el cual puede propagarse y todavía ser refractado nuevamente por la atmósfera.

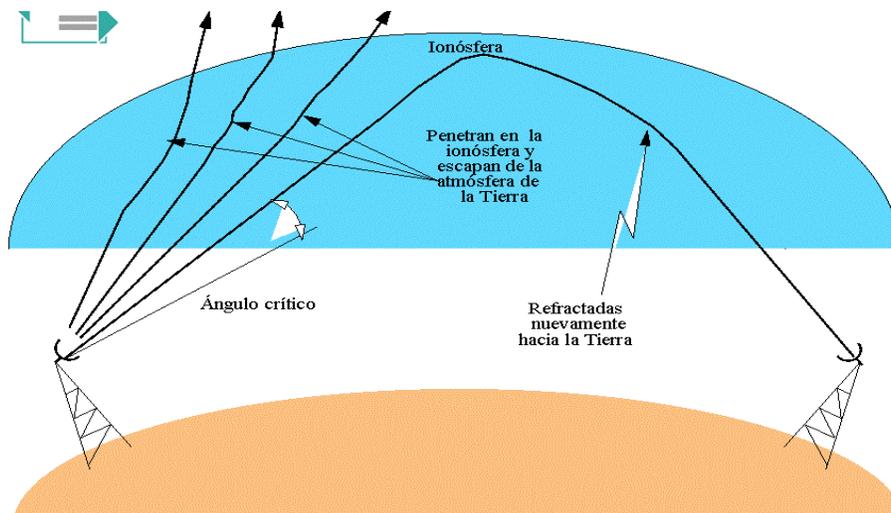


Fig.1.10 Angulo Crítico.

1.3 Desvanecimientos

Uno de los problemas básicos de la transmisión de las señales por microondas, es la ocurrencia de problemas de propagación. Estos problemas pueden afectar a la señal de forma rápida o lenta según sus causas.

El desvanecimiento (fading, en inglés) tiene su origen en cambios en el medio de transmisión (variación de las condiciones atmosféricas), los cuales producen la variación de la intensidad de las TEM que llegan a la antena receptora.

Existen varios tipos de desvanecimientos los cuales son:

¹⁶ Aldana Espejel Benito, Op. cit. p. 20

- **Provocados por la atenuación:** Este tipo de desvanecimientos es debido a las características del medio de transmisión.
- **Provocados por interferencia:** Este desvanecimiento se debe las interferencias causadas por Multitrayectorias de la señal.

A continuación describimos más detalladamente las causas de estos desvanecimientos.

El cálculo de la pérdida en el espacio libre está dada por:

$$P_{el} = 32.46 + 20 \text{ Log}(f) + 20 \text{ Log}(d)$$

Dónde:

- ✦ **f** Frecuencia (MHz).
- ✦ **d** Distancia (Km).
- ✦ **P_{el}** Pérdida en el Espacio Libre (dB).

Provocados por la atenuación

Por la atenuación de la trayectoria de propagación provocada por la frecuencia de operación y la distancia entre estaciones, la cual también se le conoce como la Pérdida en el espacio libre y se calcula por la siguiente fórmula:

$$P_{el} = 32.46 + 20 \log(D) + 20 \text{ Log}(F)$$

Donde:

- **D**= Distancia entre estaciones (Km).
- **F**= Frecuencia de operación del enlace de microondas (MHz).
- **P_{el}**= Pérdida en el espacio libre (dB).
- **32.46**= Constante para K=4/3 con un radio de la curvatura de la Tierra de 8500Km.

Provocados por interferencia

Este tipo de desvanecimiento es provocado por las condiciones atmosféricas del medio de propagación, y se divide en dos tipos:

Desvanecimiento plano: Es especialmente perceptible en las bandas altas de RF, en donde las precipitaciones atmosféricas, como la niebla, la lluvia, nieve, concentración de hielo, etc., provocan el desvanecimiento.

Desvanecimiento selectivo: Este tipo de desvanecimiento tiene su origen en la recepción de la señal transmitida en varios estados de fase.

Esta recepción se debe, de forma general a la propagación de múltiples trayectos (multi-path).

Si la señal se propaga por más de un trayecto, y cada trayecto tiene un tiempo de propagación distinto, en la antena se estarán recibiendo varias fases instantáneas de la portadora. Es decir, que en el receptor ingresa la suma fasorial instantánea de las señales, y si estas señales están en contra fase, las señales se restarán, ocurriendo así la disminución de la señal¹⁷.

17 Space Diversity Engineering, A. Vigants, pp. 28-29

Capítulo 2

Elementos de un enlace de microondas

Al paso de los años las líneas de transmisión han sufrido diferentes procesos para evitar las inducciones a las diferentes líneas adyacentes, así como de evitar la atenuación de la señal eléctrica o electromagnética a grandes distancias entre el transmisor y la antena, algunas de estas líneas se mencionan a continuación son:

- Conductores paralelos.
- Par protegido.
- Par brindado.
- Cable Coaxial
- Guía de Onda.

2.1 Líneas de transmisión (Cable Coaxial, Coaxial Heliac, Guía de Onda)

Las líneas de transmisión utilizadas en los enlaces de radio son los conductores que realizan la transferencia de energía entre el transmisor/receptor y la antena con una pérdida mínima de energía.

Las líneas de transmisión utilizadas en los enlaces de microondas, han sufrido cambios con respecto a los materiales de fabricación, estos materiales tienen las siguientes características:

Resistencia: Es la resistencia eléctrica del conductor.

Capacitancia: Es la corriente que circula por el aislante que existen entre los hilos conductores, ver fig.2.1.

Inducción: Es la transferencia magnética de la línea o de otras líneas, es decir, el campo magnético que se forma alrededor del conductor cuando pasa una corriente por el conductor, o si el conductor es muy largo y está en la intemperie, se comporta como una antena de AM o FM, Ver fig. 2.2.

Frecuencia: A mayor frecuencia mayor atenuación, provocada por la combinación de la capacidad y la inducción, junto con el efecto pelicular (Skin) ver fig.2.3, en donde la señal viaja en el extremo del conductor y no en el centro del conductor.

Reflexión: También llamada relación de onda estacionaria ROE o VSWR (por sus siglas en ingles), y se debe al desacoplamiento de impedancias entre la línea de transmisión y la carga del equipo.

- Fugas de corriente entre los conductores a través del dieléctrico.
- Si el dieléctrico contiene más aire, entonces estas pérdidas dieléctricas son menores.

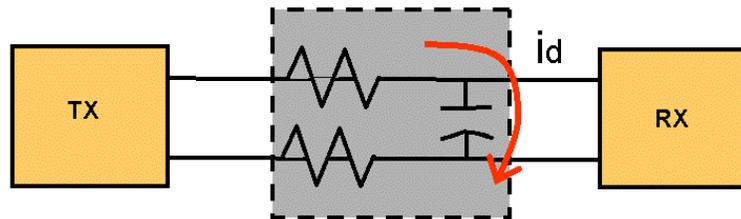


Fig. 2.1 Capacitancia.

- El campo magnético se forma al rededor de la línea al paso de la corriente.
- Todo conductor se comporta como una antena a frecuencias altas.

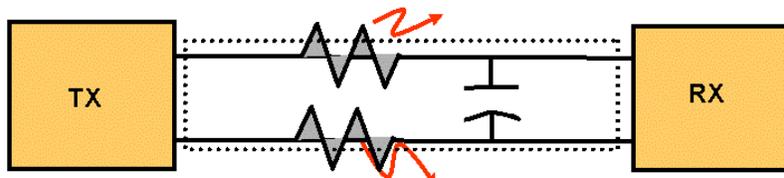


Fig. 2.2 Perdidas por Inducción.

Efecto Pelicular

El efecto pelicular es un efecto eléctrico. Se da únicamente en corriente alterna, y consiste en que la densidad de corriente se da principalmente por el exterior del conductor¹ como se muestra en la Fig. 2.3

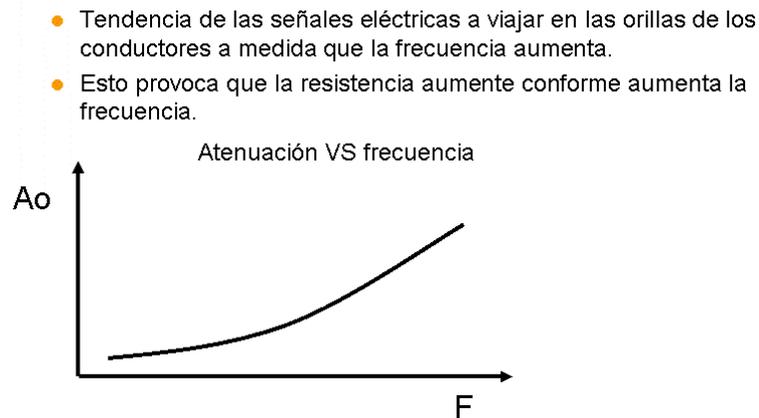


Fig. 2.3 Efecto Pelicular.

Cable Coaxial.

En los enlaces de microondas, básicamente se utilizan dos tipos de líneas de transmisión:

- Cable coaxial.
- Guía de onda.

Un cable coaxial consta de dos conductores en forma concéntrica. El cable externo está trenzado y es flexible.

El material del aislante es de poliestireno sólido no conductivo, que proporciona soporte y aislamiento eléctrico entre los dos cables.

Los cables coaxiales son utilizados para transmitir señales de alta frecuencia, y sus características más importantes son:

¹ <http://materias.fi.uba.ar/6209/download/6-Lineas1.pdf>. 2004, 04/09/2010

- Reducir la atenuación (pérdida).
- Aislar las trayectorias de transmisión.
- Transferir la mayor energía electromagnética dentro del rango de UHF y SFH, ya que las líneas bifilares no son ideales para ser utilizadas, debido a que tienen una alta atenuación.

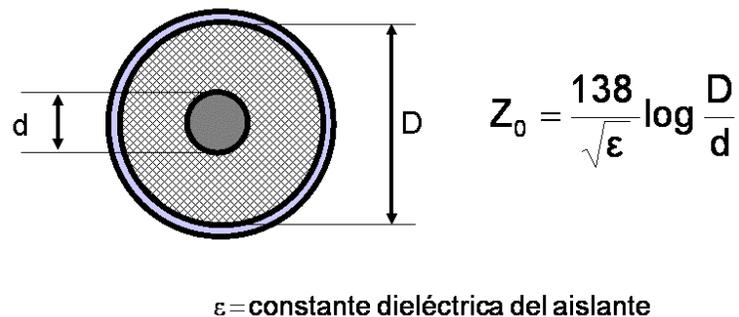


Fig. 2.4 Estructura del cable Coaxial.

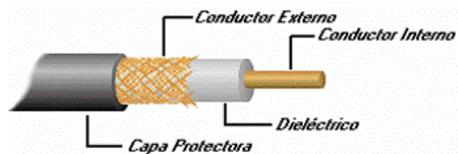
La propagación de energía está confinada dentro del tubo y aislada de interferencias externas. En este caso, el efecto pelicular consiste en que la densidad de la corriente se acentúa en la periferia de los conductores a medida que aumenta la frecuencia, como resultado hay una mayor conducción de energía. Los principales parámetros eléctricos del cable coaxial son: su atenuación y su impedancia característica.

La atenuación (pérdida) de la potencia en las líneas de transmisión se debe principalmente a:

- Características físicas del conductor.
- Radiación.
- El calentamiento del dieléctrico.
- Acoplamiento.

El cable coaxial es ampliamente utilizado como línea de transmisión en radio enlaces de baja y mediana capacidad cuya frecuencia de operación es de hasta 2.6 GHz.

Hoy en día este, el cable coaxial se emplea hasta frecuencias de 23 GHz.



Amplia aplicación en:

- ▼ Transmisión de datos.
- ▼ Telefonía.
- ▼ TV por cable.

Material	% Velocidad	Velocidad (Km/seg)
Poliétileno Sólido	65.9%	197,700
Poliétileno Espumoso	80.0%	240,000
Poliétileno	88.0%	264,000
Teflón Sólido	69.4%	208,200
Elastipar	66.0%	198,000
Teflón Expandido	85.0%	255,000

Fig. 2.5 Características del cable coaxial.

La impedancia característica de un cable coaxial concéntrico, se puede determinar por sus dimensiones físicas y por medio de la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{d}$$

Donde:

D = Diámetro interior del conductor externo.

d = Diámetro del conductor interno.

ε_r = Constante del dieléctrico (permitividad relativa) del material aislante.

Las líneas de transmisión de cables paralelos y cables coaxiales, no pueden propagar eficazmente la energía electromagnética arriba de 1 GHz, y en frecuencias mayores de 15 GHz, por la alta atenuación causada por el efecto pelicular y por pérdidas de radiación.

Podemos conocer la velocidad de propagación en las líneas de transmisión utilizando el Factor de velocidad o constante de velocidad, que es la relación entre la velocidad real de propagación a través de un medio determinado y la velocidad de propagación en el espacio libre:

$$V_f = \frac{V_p}{C} \quad \therefore \quad V_p = V_f * C$$

Donde:

- **V_f**= Factor de velocidad.
- **V_p**= Velocidad de propagación.
- **C**= Velocidad de propagación en el espacio libre.

Los factores de velocidad en algunos materiales usados en las líneas de transmisión se muestran en la tabla 2.1:

Material	Factor de velocidad
Vacío	1
Aire	0.95-.975
Hule	0.56-0.65
Polietileno	0.66
Teflón	0.70
Espuma de teflón	0.82
Pines de teflón	0.81
Espiral de teflón	0.81

Tabla 2.1 Factores de velocidad.

Las ondas TEM que inciden en una línea de transmisión pueden propagarse en ambas direcciones.

La energía que se propaga desde la fuente hacia la carga se le conoce como *energía incidente*.

La energía que se propaga de la carga hacia la fuente se le conoce como *energía reflejada*.

Si la carga absorbe toda la energía de una onda TEM se le conoce como *línea acoplada*, pero cuando parte de esta energía es absorbida por la carga y parte es reflejada a la fuente, se trata de una *línea desacoplada*.

Cuando la línea es desacoplada existen dos ondas TEM que viajan en direcciones opuestas y están presentes en todo el tiempo a lo largo de la línea de transmisión, estas ondas son conocidas como ondas viajeras, las cuales establecen un patrón de interferencia conocido como onda estacionaria.

Conforme las ondas incidentes y reflejadas se cruzan entre sí, se producen en la línea de transmisión patrones estacionarios de voltaje y corriente constantes en la línea.

ROE (La relación de onda estacionaria)

La relación de onda estacionaria ROE o VSWR, es la relación del voltaje máximo con el voltaje mínimo, o de la corriente máxima con la corriente mínima, de una onda estacionaria en una línea de transmisión:

$$VSWR = \frac{V_{\text{máximo}}}{V_{\text{mínimo}}}$$

Donde:

- **VSWR**: Relación de Onda estacionaria (ROE).
- **Vmáximo**: Voltaje máximo que incide en un extremo de la línea.
- **Vmínimo**: Voltaje mínimo que se refleja en el extremo de un extremo de la línea.

Cuando se tiene la necesidad de conectar dos puntos a través de grandes distancias o espacios (mares, zonas desérticas o montañosas), es impráctica la utilización de líneas de transmisión (cable coaxial, línea abierta, etc).

Para estos casos se utiliza el espacio libre de la atmósfera de la tierra como medio de transmisión.

Coaxial Heliax

El cable Heli

ax, es una variante del cable coaxial, tiene básicamente la misma construcción es decir, consta de dos conductores en forma concéntrica. El cable externo en vez de estar trenzado, es casi de una sola pieza proporcionando un blindaje especial evitando enormemente las inducciones tanto internas como externas, y por tal motivo no es tan flexible como un cable coaxial.

El material del aislante es de poliestireno sólido no conductivo, que proporciona soporte y aislamiento eléctrico entre los dos conductores.

En la actualidad se instalan dos versiones de este tipo de coaxial²:

- **Cable coaxial Heli**ax de 1/2": Este cable se instala a una frecuencia máxima de operación es de 2.5 GHz, la distancia entre el radio y la antena no debe superar más de 30 m (Fig. 2.6).

2 Condumex 2005 Derechos Reservado, 04/09/2010, http://www.condumex.com.mx/Portal_Cdx/Sectores/Cables/

- **Cable coaxial Heliax de 7/8”:** Este cable se instala en radios de con una frecuencia máxima de 2.5 GHz, y la distancia entre el radio y al antena es de más de 30 m (Fig. 2.7).

Cable coaxial Heliax de 1/2” se ocupa en los sistemas RAM Analógicos y Digitales cuando la distancia de la línea es entre 20 y 30 m entre el radio y la antena.



Fig.2.6 Cable coaxial Heliax 1/2”.



Cable coaxial Heliax de 7/8” se ocupa en los sistemas RAM Digitales cuando la distancia de la línea es de más de 30 m entre el radio y la antena.

Fig. 2.7 Cable coaxial Heliax de 7/8”:

Guía de Onda

Una guía de onda es un tubo conductor hueco, por lo general rectangular en sección transversal, circular o elíptica (Fig.2.8). Una guía de onda confina la energía electromagnética, donde sus paredes son conductoras y por lo tanto reflejan la energía electromagnética de la superficie.

En una guía de onda, la conducción de energía no ocurre por corrientes superficiales en las paredes como sucede en las líneas de transmisión, sino a través del dieléctrico. En esencia, la energía electromagnética se propaga a lo largo de la guía de onda, sobre las dos láminas conductoras reflejándose hacia un lado y otro en un patrón de zig-zag y está diseñada para operar en un solo modo de propagación, con el ancho de banda respectivo, atenuando los demás modos de propagación.

Las guías de onda rectangulares son las formas más comunes, donde la energía electromagnética se propaga a través del espacio libre como ondas electromagnéticas transversales (TEM), con un campo eléctrico, un campo magnético y una dirección de propagación mutuamente perpendiculares entre sí.



Fig.2.8 Guía de onda.

Para que una onda electromagnética exista dentro de una guía de onda, no deberá existir componente tangencial del campo eléctrico en las paredes de la guía de onda.

Para propagar una onda electromagnética dentro de una guía de onda deberá propagarse en forma de zig-zag con el campo eléctrico máximo en el centro de la guía y cero en la superficie de las paredes.

La guía de onda circular se utiliza en aplicaciones de radar y microondas, cuando es necesario propagar ondas polarizadas tanto verticales como horizontales en una misma guía de onda. Las ventajas y desventajas (tabla 2.2) sobre la guía de onda circular son:

Ventajas	Desventajas
<p>Son más fáciles de construir que las guías rectangulares y más fáciles de unir.</p>	<p>Tiene un área más grande que una guía rectangular utilizada para llevar la misma señal.</p> <p>El plano de polarización puede rotar mientras la onda se propaga dentro de la guía (una onda polarizada horizontalmente se puede volver polarizada verticalmente y viceversa), por lo tanto debido a esto, los modos de propagación comúnmente usados en guías de onda rectangular no son adecuados para la guía de onda circular.</p>

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de la guía de onda circular.

Las guías de onda, utilizan dos modos de propagación TE y TM, en donde el modo TE las TEM el campo eléctrico viaja perpendicular a la dirección de propagación, y el modo TM las TEM el campo magnético es el que viaja perpendicular a la dirección de propagación³, observe la fig. 2.9.

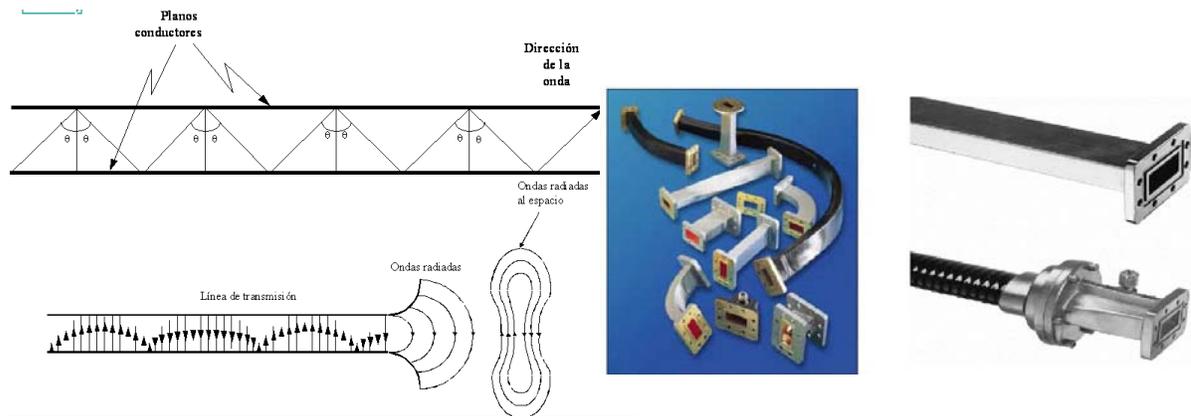


Fig. 2.9 Modos de propagación y adaptadores de onda.

2.2 Antenas

Fundamentos de Radiación.

Una antena es un dispositivo conductor metálico capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas, es decir, una interfaz entre el transmisor y el espacio libre, y el espacio libre y el receptor (la antena acopla energía de la salida del transmisor a la atmósfera de la tierra)⁴.

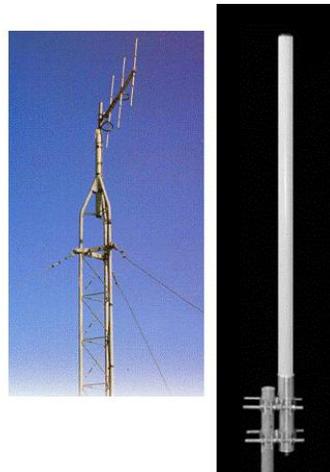


Fig. 2.10 Tipos de antenas.

3UNITEC*-Ing. Jorge Álvarez. 04/09/2010 http://www.oocities.com/uniteciec/guia_onda.htm

4 Diseño y Hosting Innova Technologies 04/09/2010, <http://www.radiocomunicaciones.net/radio-enlaces.html>

Las antenas se clasifican en:

- Tipo de patrón de radiación.
- Tecnología de fabricación.
- Por el ancho de banda de operación.
- Tipo de servicio.
- Tipo de polarización.

La operación básica de la antena tiene como principio las ondas estacionarias de voltaje de una línea de transmisión, donde:

- Una línea de transmisión terminada en circuito abierto, representa una discontinuidad abrupta en la onda de voltaje incidente en la forma de una inversión de fase.
- La inversión de fase resulta cuando parte del voltaje incidente se irradia, en lugar de ser reflejado hacia la fuente, la energía radiada se propaga lejos de la antena en forma de ondas electromagnéticas transversales, como se muestra en la figura siguiente.

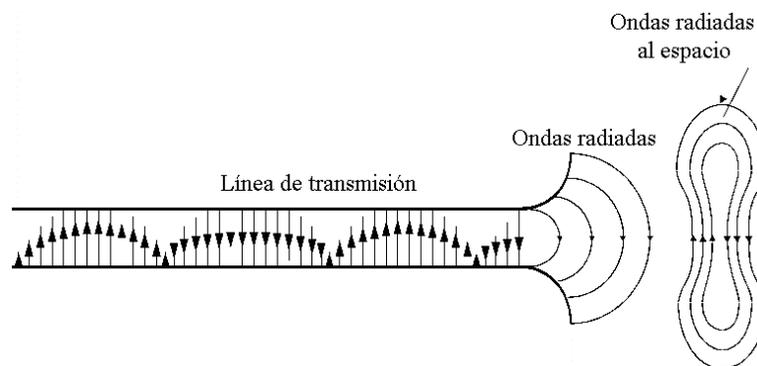


Fig. 2.11 Ondas radiadas por una línea de conductores separados.

Características de las Antenas

La eficiencia de radiación de una línea de transmisión abierta es en extremo baja. Esta eficiencia se da entre la energía radiada y la energía reflejada, para radiar

más energía, sólo hay que separar los conductores. Este tipo de antena se llama dipolo (Fig. 2.12).

Los campos eléctrico y magnético a grandes distancias de la antena transmisora son muy diferentes de los que existen cerca de la misma. Lejos de la antena, los campos eléctricos y magnéticos oscilan en fase con un movimiento armónico simple, perpendicular uno del otro a la dirección de propagación de la onda, por tanto la onda es transversal.

El campo inicial es repelido por el campo que empieza a generarse cuando se invierte la polaridad en los extremos de la antena. Esto ocasiona que los campos se muevan alejándose de los extremos de la antena.

Un patrón de radiación es un diagrama polar o gráfica que representa las intensidades de los campos o densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena en función a la distancia y de la directividad de la antena.

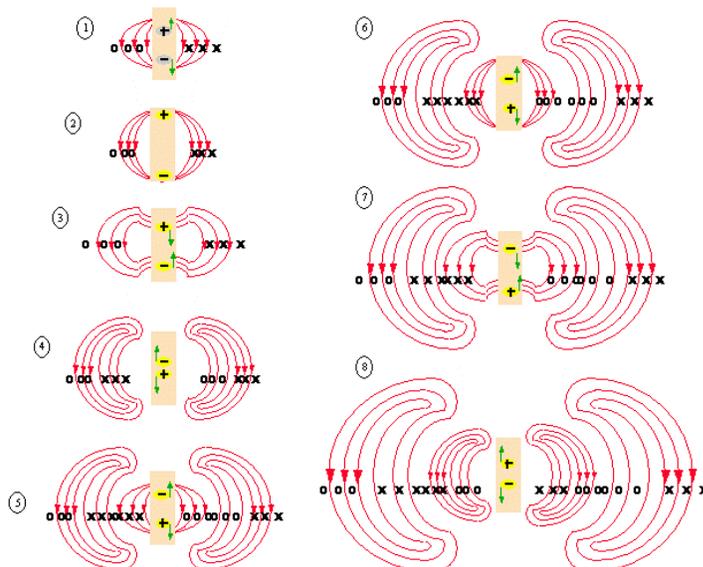


Fig. 2.12 Radiación de campos electromagnéticos en una antena dipolo

Existen tres tipos diferentes de patrón de radiación (Fig.2.13):

- **Omnidireccional:** En este patrón el campo se propaga uniformemente al rededor de la antena, es decir la antena esta en medio de un circulo imaginario.
- **Bidireccional:** El patrón de radiación se propaga en dos grandes porciones.
- **Direccional:** El patrón de radiación se propaga en una sola dirección.

Si el patrón de radiación se traza en función de la intensidad del campo eléctrico (E) o de la densidad de potencia (P), se llama patrón de radiación absoluto.

Si se traza la intensidad de campo o la densidad de potencia en relación al valor en un punto de referencia, se llama patrón de radiación relativo.

En un patrón de radiación:

- Al haz de radiación con mayor densidad de potencia se le llama *lóbulo principal*.
- Debido a que el lóbulo principal propaga y recibe la mayoría o gran parte de la energía, se le llama *lóbulo frontal* (la parte frontal de la antena).
- Los lóbulos adyacentes al lóbulo frontal se les llama *lóbulos laterales*.
- Los lóbulos que están en dirección opuesta al lóbulo principal se llaman *lóbulos traseros*.
- Los lóbulos menores (adyacentes y traseros) representan radiación o recepción indeseada.

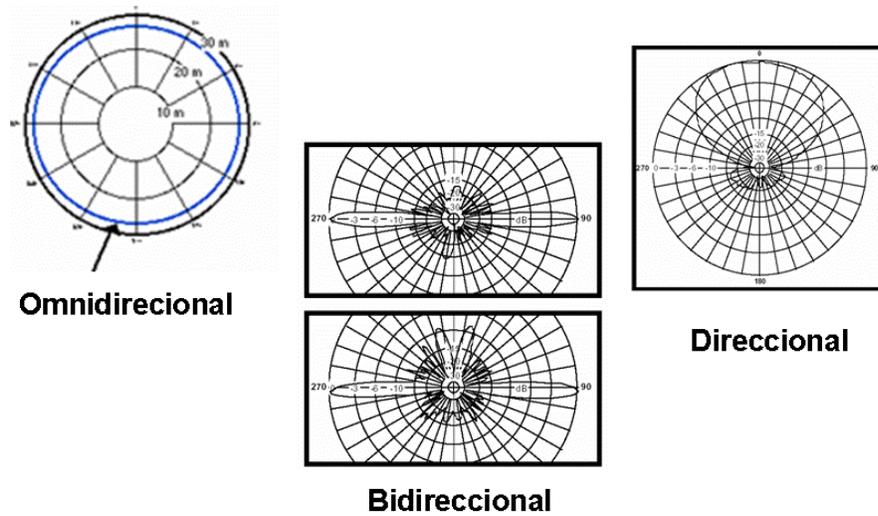
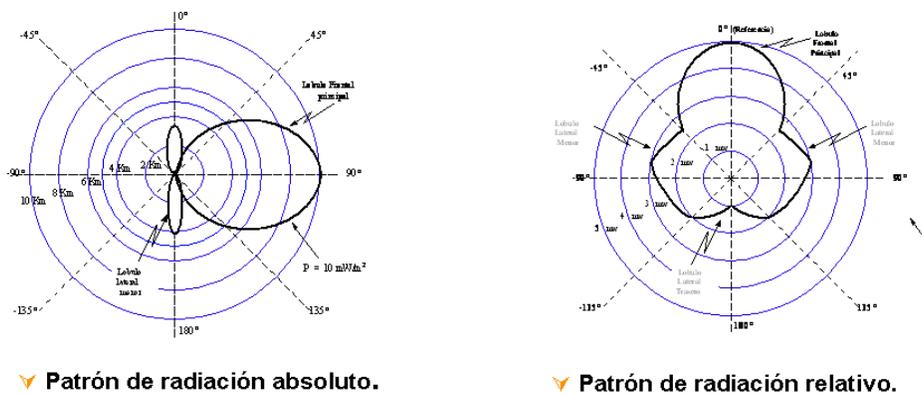


Fig. 2.13 Patrones de radiación.

Existen dos formas de representar el patrón de radiación (Fig. 2.14):

- **Absoluto:** El patrón se traza sobre coordenadas polares, donde los gradientes circulares indican la distancia. La línea gruesa que representa el lóbulo principal tiene una densidad de potencia de 10 mW/m².
- **Relativo:** La siguiente figura muestra un diagrama polar con un patrón de radiación relativo para una antena no específica, los gradientes circulares indican la densidad de potencia en mW.



▼ Patrón de radiación absoluto.

▼ Patrón de radiación relativo.

Fig. 2.14 Representación de los patrones de radiación.

Eficiencia

La eficiencia de la antena es la relación de la potencia radiada por una antena a la suma de la potencia radiada y la potencia disipada.

$$\eta = \frac{P_r}{P_r + P_d} \times 100$$

- η = Eficiencia de la antena (%).
- **P_r** = Potencia radiada por la antena (W).
- **P_d** = Potencia disipada por la antena (W).

Ganancia directiva

Es la relación de la densidad de potencia radiada en una dirección en particular con la densidad de potencia radiada en el mismo punto por una antena de referencia (radiador isotrópico). La máxima ganancia directiva se llama directividad y matemáticamente es:

$$D = \frac{P}{P_{ref}}$$

Donde:

- **D** = Ganancia directiva.
- **P** = Densidad de potencia en algún punto de una antena determinada (W/m²).
- **P_{ref}** = Densidad de potencia en el mismo punto de una antena de referencia (W/m²).

La ganancia de potencia

Es igual a la ganancia directiva o directividad excepto que se utiliza el total de la potencia que alimenta a la antena (se toma en cuenta la eficiencia de la antena). La antena indicada y la antena de referencia se supone que tienen la misma

potencia de entrada, y que la antena de referencia no tiene pérdidas ($h = 100 \%$), la ganancia de potencia es:

$$A_p = D h$$

Si una antena no tiene pérdidas, irradia 100% de la potencia de entrada y la ganancia de potencia es igual a la ganancia directiva. La ganancia de potencia también se da en decibeles en relación con la antena de referencia y es:

$$A_p = 10 \log \frac{P \eta}{P_{ref}}$$

La potencia radiada isotrópica efectiva (EIRP). Se define como una potencia de transmisión equivalente y se expresa matemáticamente como:

$$EIRP = P_r A_t \text{ watts } \therefore \text{ en dBm}$$

$$EIRP = 10 \text{ Log } \frac{P_r}{0.001} + 10 \text{ Log } A_t$$

Donde:

- **Pr**= Potencia total radiada (W).
- **At**= Ganancia directiva de la antena transmisora.

Puede calcularse también por la potencia de entrada y la ganancia de potencia de la antena:

$$EIRP = P_{entrada} A_p \text{ watts}$$

Densidad de potencia en un punto determinado. La potencia radiada isotrópica efectiva (potencia radiada efectiva) es la potencia equivalente que tendría que

radiar una antena isotrópica para alcanzar la misma densidad de potencia en la dirección de un punto determinado por otra antena.

Para determinar la densidad de potencia en un punto determinado, incluyendo la ganancia de la antena transmisora es:

$$P = \frac{P_r A_t}{4\pi R^2}$$

Donde:

- **C**= Densidad de potencia.
- **A_t**= Ganancia de la antena transmisora
- **A_r**= Ganancia de antena receptora.
- **R**= Distancia de separación entre antenas.

Densidad de potencia

Las antenas son dispositivos recíprocos; entonces, una antena tiene la misma ganancia de potencia y directividad, cuando se utiliza para recibir ondas electromagnéticas. Por tanto la densidad de potencia que es recibida o capturada por una antena es el producto de la densidad de potencia en el espacio que rodea a la antena y la ganancia directiva de la antena:

$$C = P A_r = \frac{P_r A_t A_r}{4\pi R^2}$$

Donde:

- **C**= Densidad de potencia.
- **A**= Ganancia de la antena transmisora.
- **A_r**= Ganancia de antena receptora.
- **R**= Distancia de separación de las antenas.

La polarización de una antena se refiere solo a la orientación del campo eléctrico radiado desde está. Una antena puede polarizarse en forma lineal, elíptica o circular. Existen dos formas de polarización lineal, la polarización vertical y la polarización horizontal.

El ancho de banda de la antena se define como el rango de frecuencias sobre las cuales la operación de la antena es satisfactoria. Se puede tomar entre dos puntos de media potencia, o a las variaciones de la impedancia de entrada.

El ancho del haz de la antena es sólo una separación angular entre dos puntos de media potencia (-3dB) en el lóbulo principal del patrón de radiación de la antena, por tanto el ancho del haz es el ángulo formado entre los puntos de media potencia.

La corriente que fluye a la antena a través de la línea de transmisión (conectada a los dos conductores que forman la antena), el punto de unión entre la antena y la línea de transmisión se llama *punto de alimentación*.

Este punto presenta una carga 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 toda la energía o potencia máxima a la antena.

La impedancia de entrada de la antena es la relación del voltaje de entrada con la corriente de entrada:

$$Z_{entrada} = \frac{E_{entrada}}{I_{entrada}}$$

La distribución de la corriente y voltaje de entrada a lo largo de la antena así como la curva de impedancia.

La antena debe de comportarse como un circuito resonante en relación con la longitud física de la antena y la longitud de onda de la frecuencia de operación.

La longitud física de la antena está dada en función de un submúltiplo de la longitud de onda de la radio frecuencia de operación, generalmente es de $l/2$.

La siguiente tabla nos indica las condiciones que se presentan para las longitudes de las antenas (físicas y eléctricas).

Condición	Si la antena está...	Entonces...
Ideal	Perfectamente aislada en el espacio libre	La longitud física y eléctrica son iguales
Real	Rodeada de cuerpos o materiales metálicos	La longitud física será mayor que la longitud eléctrica

Tabla 2.3. Condiciones ideales y reales para la antena.

La longitud física de la antena deberá ser 5% menor que la longitud eléctrica, para compensar los efectos eléctricos producidos por los elementos cercanos a la antena.

Para frecuencias bajas la longitud física (Tabla 2.4) de las antenas es muy grande por ejemplo la longitud física de un cuarto de longitud de onda para las siguientes frecuencias son:

Frecuencia	Longitud física
1 GHz	0,075 m
1 MHz	75 m
100 KHz	750 m

Tabla 2.4. Frecuencias bajas y longitudes físicas para la antena.

Las dimensiones físicas para antenas de baja frecuencia no son prácticas. Sin embargo, es posible incrementar la longitud eléctrica de una antena con una técnica llamada *carga de la antena*, ya que cuando se utiliza esta técnica la antena no sufre cambios en su longitud física, pero se incrementa la longitud eléctrica efectiva.

La conexión de una bobina en serie incrementará la longitud eléctrica de la antena. Esta bobina se le conoce como *bobina de carga*.

La antena Hertz

Es un dipolo de media longitud de onda la cual es utilizada en frecuencias arriba de 2 MHz ya que a frecuencias por abajo de 2 MHz la longitud física de la antena es prohibitiva (demasiado grande). Esta antena tiene las siguientes características:

- El voltaje es máximo en los extremos y mínimo en el centro de la antena.
- La corriente es máxima en el centro y mínima en los extremos de la antena.
- Se instala a cierta altura de la superficie en posición horizontal o vertical.
- Debido a su gran longitud física sólo se utilizan para transmitir frecuencias arriba de 2 MHz.

La antena Marconi

También conocida como antena monopolo o de un cuarto de longitud de onda. Si la antena está montada directamente en la superficie de la tierra, esta tiene un reflejo. En la tierra la antena real y su imagen se combinan, realizando exactamente los mismos patrones que la antena Hertz. Esta antena tiene las siguientes características:

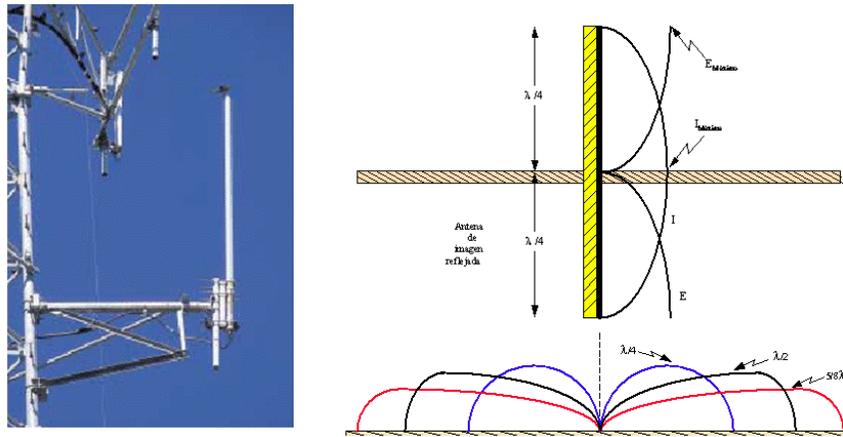


Fig. 2.15 Antena monopolo.

- El voltaje es máximo en el extremo de la antena y mínimo en el extremo aterrizado.
- La corriente es máxima en el extremo aterrizado y mínima en el extremo de la antena.
- Se instala en forma vertical y conectada a tierra (aterrizada).
- Se comporta como una antena Hertz debido a que se reflejan a la tierra creando una antena imagen.

Antena Yagui

Es un arreglo lineal que consiste en un dipolo y dos o más elementos parásitos, un reflector y uno o más directores. Esta antena se usa comúnmente para radio enlaces de baja capacidad y tiene las siguientes características:

La longitud del reflector es 5 % más grande que el dipolo, y el director es 5% menor que el elemento de excitación (dipolo), la distancia de separación entre cada elemento es entre 0.1 - 0.2 de longitud de onda.

La ganancia de las antenas Yagui es entre 7 y 14 dBi.

Las redes directivas de antenas como la Yagui con elementos parásitos múltiples generalmente tienen un reflector y dos o más directores. Cada director actúa como un elemento excitado con respecto al otro.

Cuando se utiliza un mayor número elementos parásitos reflectores y directores, el patrón de radiación es más estrecho y alargado.



Fig. 2.16 Antenas Yagui.

El reflector parabólico

No necesariamente debe ser una superficie metálica sólida para reflejar o recibir eficazmente las señales, la superficie puede ser una malla y todavía reflejar o recibir energía como una superficie sólida, siempre que el ancho de las aberturas de la rejilla sea menor que 0.1 de longitud de onda.

Existe una variedad de reflectores utilizados en los radio enlaces, los más comúnmente usados son:

- De hoja plana o rejilla.
- Parabólica (Cilíndrico).
- Parábola.

La antena parabólica (Fig. 2.17) se utiliza para UHF (0.3 a 3 GHz), y para microondas (1 a 100 GHz) tienen que ser altamente directivas. Este tipo de antenas tiene una ganancia aparente, ya que concentra la potencia irradiada en un haz angosto en lugar de enviarlo en forma uniforme en todas direcciones.

Para una operación confiable de un Radio Enlace de mediana y alta capacidad, se utiliza una antena de alta directividad tanto para polarización vertical como horizontal, así como la de transmitir una cantidad máxima de energía.

En enlaces por Radio Frecuencia una de las antenas más utilizadas es la antena con reflector parabólico (antena parabólica).



Fig. 2.17 Antena Parabólica.

El reflector parabólico

No necesariamente debe ser una superficie metálica sólida para reflejar o recibir eficazmente las señales, la superficie puede ser una malla y todavía reflejar o recibir energía como una superficie sólida, siempre que el ancho de las aberturas de la rejilla sea menor que 0.1 de longitud de onda.

Existe una variedad de reflectores utilizados en el radio enlaces, los más comúnmente usados son:

- De hoja plana o rejilla.
- Parabólica (Cilíndrico).
- Parábola.

Ancho del haz de la antena parabólica

La radiación de un reflector parabólico tiene un lóbulo principal que es semejante a un cigarro grueso en dirección XY. El ancho del haz aproximado de -3 dB para una antena parabólica en grados es:

$$\theta = \frac{70\lambda}{D} = \frac{70C}{fD}$$

Donde:

- θ = Ancho del haz entre puntos de media potencia (°).
- λ = Longitud de onda (m).
- C = Velocidad de la Luz.
- D = Diámetro de la antena (m).

Eficiencia de la antena (h)

En los reflectores parabólicos, el reflejo de las ondas electromagnéticas en la superficie no es perfecto, ya que el reflector absorbe una cantidad de ella, además que la energía cerca de la orilla del reflector se desviará al otro lado del reflector, a esto se le llama fuga o derrame. Sólo de 50% a 75% aproximadamente de la energía que emite el radiador (sistema de alimentación) refleja la antena parabólica. Estas imperfecciones contribuyen a una eficiencia típica para una antena parabólica de aproximadamente 55% ($h = 0.55$), es decir, sólo se propaga el 55% de la energía irradiada en un haz concentrado.

Ganancia de potencia de la antena parabólica transmisora

Para una antena parabólica transmisora la ganancia de potencia es:

$$A_p = \eta \left[\frac{\pi D}{\lambda} \right]^2 \quad \therefore \quad A_p = \frac{5.4 D^2 f^2}{C^2}$$

Donde:

- **Ap**= Ganancia de potencia en relación con una antena isotrópica.
- **D**= Diámetro del reflector parabólico.
- **F**= Frecuencia.
- **C**= Velocidad de la Luz.

En decibeles tenemos:

$$Ap(dB) = 20 \text{ Log } f \text{ (MHz)} + 20 \text{ Log } D - 42.2$$

Donde:

- **42.2** = constante dB.
- **D**= Diámetro del reflector parabólico

Ganancia de potencia de la antena parabólica receptora

La superficie del reflector no está completamente iluminada, reduciendo el área efectiva de la antena. Esta área efectiva se le llama área de captura y siempre es menor que el área real de la antena. El área de captura se puede calcular comparando la potencia recibida con la densidad de potencia de la señal que se está recibiendo:

$$A_c = k A$$

Donde:

- **A_c**= Área de captura (m²).
- **A**= Área real (m²).
- **k** = Constante de acuerdo al diseño del foco (para antena parabólica alimentada con un dipolo de media onda k= 0.65).

La ganancia de una antena parabólica receptora es:

$$A_p = \frac{4\pi A_c}{\lambda^2} = \frac{4\pi kA}{\lambda^2} \quad \therefore \quad A_p = 6.4 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2$$

En decibeles tenemos:

$$A_{p(\text{dB})} = 10 \text{Log} \left[6.4 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2 \right]$$

El mecanismo de alimentación de una antena parabólica es el que realmente irradia la energía electromagnética y se le llama antena principal. Un mecanismo ideal debe dirigir toda la energía hacia el reflector parabólico y no tener efecto de sombra, en la práctica esto no es posible, pero se pueden reducir las pérdidas de energía en el diseño de los mecanismos de alimentación, para que la mayor parte de la energía se pueda radiar en la dirección correcta.

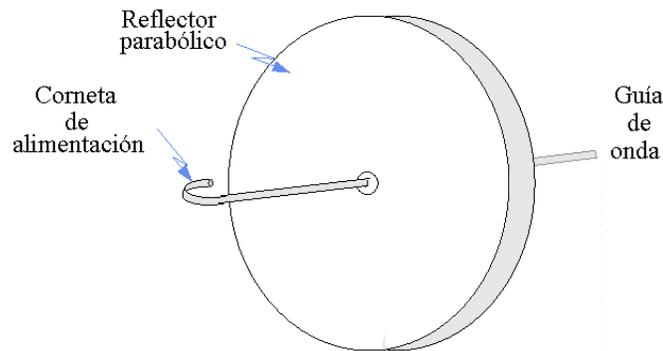


Fig. 2.18 Funcionamiento de la antena parabólica.

Hay tres tipos principales de mecanismos de alimentación para antenas parabólicas, las cuales son:

- **Alimentación central.**
- **Alimentación de corneta.**
- **Alimentación Cassegrain.**

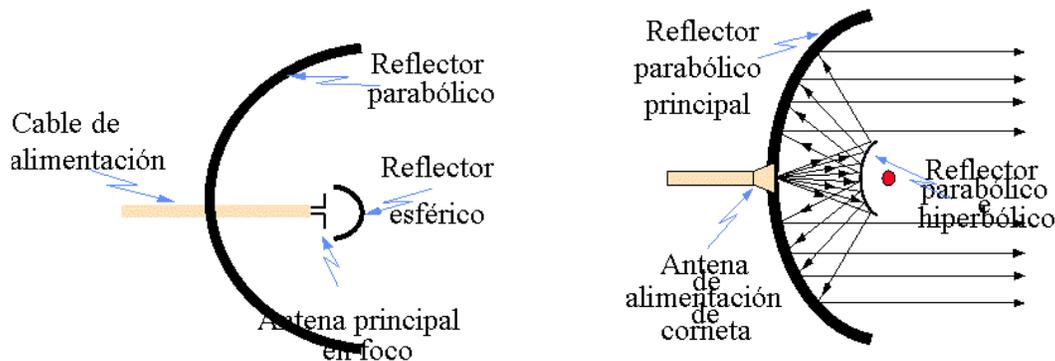


Fig. 2.19 Mecanismos de alimentación de las antenas parabólicas.

- **Alimentación Central:** La antena principal se coloca en el foco, la energía irradiada se refleja en el reflector parabólico en un haz concentrado, sin embargo parte de la energía irradiada de la antena principal no es dirigida hacia el reflector parabólico, dirigiéndose en todas direcciones y rompiendo el patrón de radiación general. Con la inclusión de un reflector esférico adicional, la energía es concentrada y dirigida hacia el reflector parabólico propagándose en la dirección correcta.
- **Alimentación de Corneta:** La antena principal es una pequeña corneta en lugar de un simple dipolo o tabla de dipolo. La corneta es una porción de una guía de onda que se coloca en el foco y radia un patrón casi direccional hacia el reflector parabólico, la estructura de la corneta puede tener varias formas distintas.
- **Alimentación Cassegrain:** La antena principal está situada detrás en una abertura en el vértice del reflector parabólico, en la posición del foco se encuentra un pequeño reflector secundario localizado entre el vértice y el foco. La energía electromagnética es dirigida por la antena principal hacia el reflector secundario y este a su vez ilumina el reflector parabólico principal para su propagación.

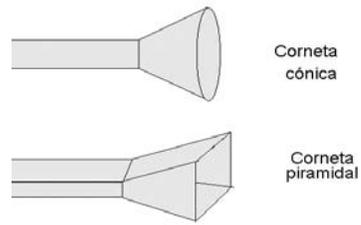


Fig. 2.20 Antena Corneta.



Fig. 2.21 Antena tipo panel.



Fig. 2.22 Antena tipo panel

Polarización

Existen dos tipos de polarización (Fig. 2.23) de las antenas, los cuales se definen en función de cómo el campo eléctrico se desplaza en la dirección de propagación.

- **Polarización Vertical:** El campo eléctrico viaja perpendicularmente a la dirección de propagación.
- **Polarización Horizontal:** El campo eléctrico viaja paralelamente a la dirección de propagación, en donde el campo magnético es el que viaja perpendicularmente a la dirección de propagación.

Esta característica de la propagación de las TEM, nos ayuda a la reutilización de las frecuencias del espectro electromagnético, así como de evitar las interferencias de señales cercanas a la frecuencia de propagación⁵.

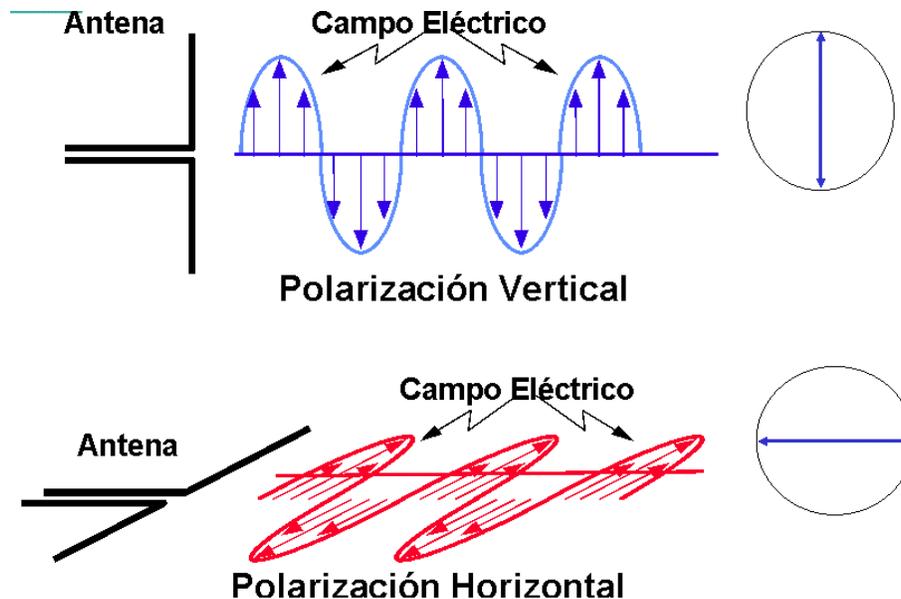


Fig. 2.23 Tipos de Polarización.

⁵ Alcatel, Introducción a las microondas, pp. 178-195

Torres

Los proveedores del sistema de antenas ofrecen todos los elementos necesarios para la construcción, incluyendo las torres, las antenas, las líneas de transmisión, equipo de presurización y todos los servicios para poner y mantener en funcionamiento un sistema de microondas.

Las Torres de microondas son diseñadas para resistir gran peso inerte y las asperezas del clima, a continuación describimos los principales tipos de torres⁶:

Torre	Características
Autosoportada. (Fig. 2.24)	Es la torre por excelencia y se utiliza para soportar varias antenas con diámetros de más de 4 m, su altura puede ser hasta 120 m.
Retenidas (Arreostrada). (Fig. 2.25)	Se utilizan para soportar antenas de hasta de 4 m. Existen varios modelos de este tipo de torre T-45, T-60, T-90 y T-120. La altura de estas torres varía de acuerdo al peso de las antenas que se van instalar.
Pole (Mástil). (Fig. 2.26)	Se utilizan para instalación de radio bases de sistemas celulares. Su altura poder desde 10 m hasta 40 m.

Tabla 2.6 Tipos de torres.



Fig. 2.24 Torre Autosoportada.

⁶ Alcatel, Op. cit. pp. 118-119

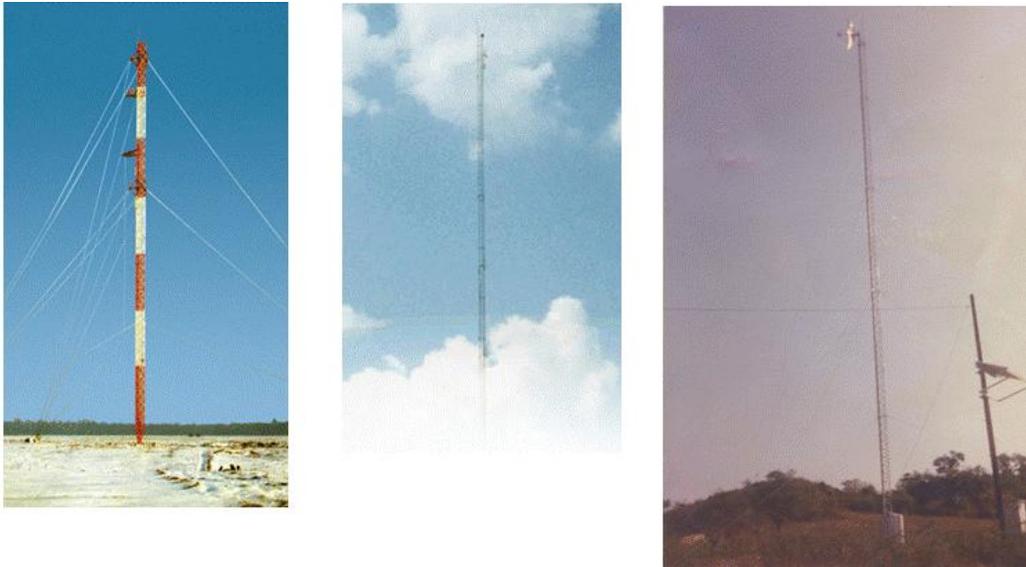


Fig. 2.25 Retenidas (Arreostrada).



Fig. 2.26 Pole.

2.3 Etapas de un Radio Enlace

En la figura 2.27 se describen los elementos de un sistema típico de antena para microondas:

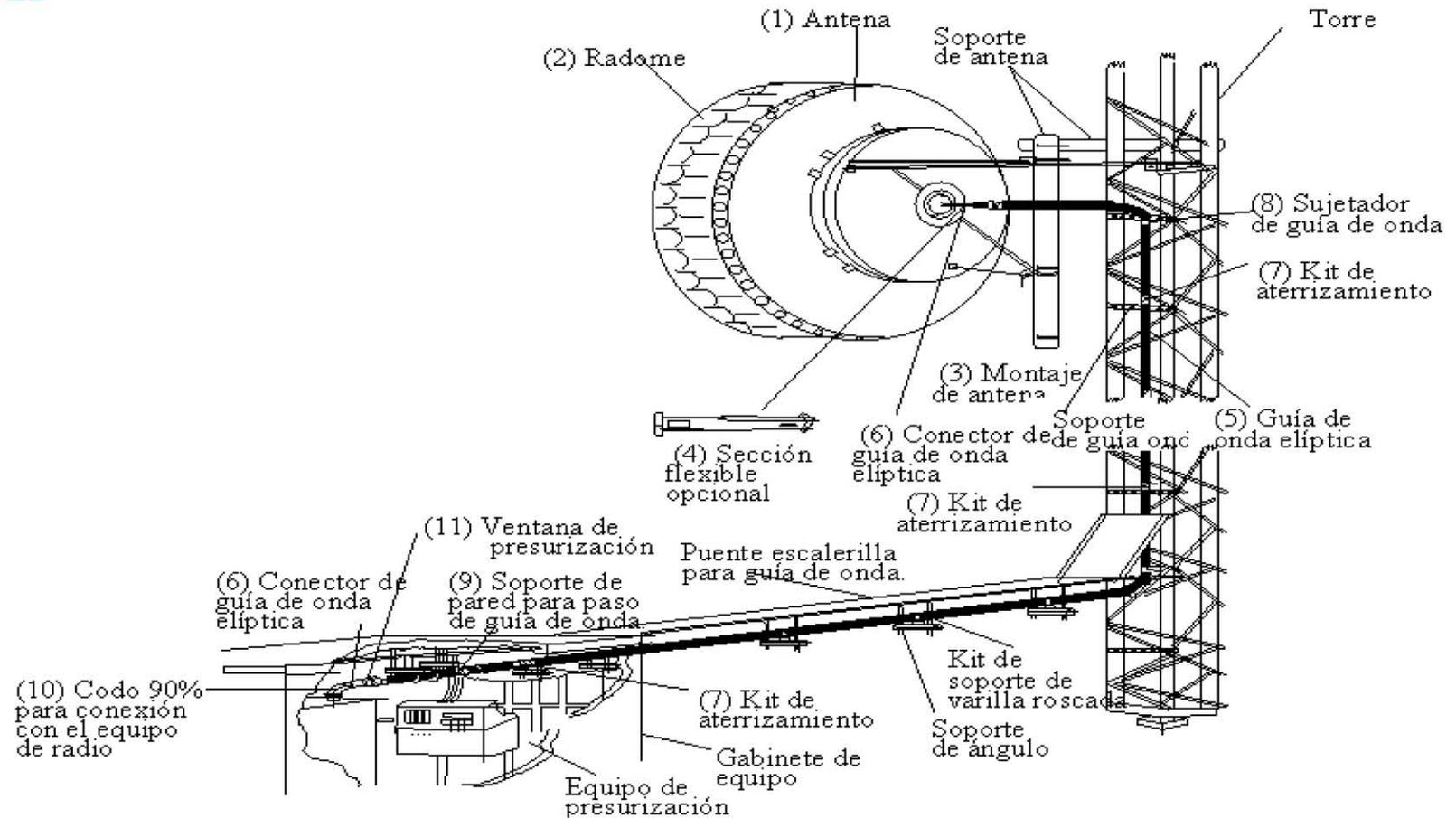


Fig. 2.27 Radio Enlace.

Elemento	Descripción
(1) Antena	Las antenas se fabrican en diferentes tipos, dependiendo de la frecuencia de operación las hay desde 355 MHz a 23.6 GHz. También se clasifican por la calidad de los materiales de fabricación y su costo, pasando por las antenas de súper alto desempeño, alto desempeño, las estándar y las de rejillas. Algunas se construyen especialmente para condiciones climáticas extremas.
(4) Sección flexible	Es una sección de guía de onda flexible y que puede torcerse para alinear los cables alimentadores y el equipo de radio o la antena.
(5) Guía de onda	La utilización de guías de onda elípticas reduce significativamente la atenuación que presenta una guía rectangular para la misma banda de frecuencias. Este tipo de guía de onda minimiza los costos de instalación. Se construye de paredes de cobre sólido corrugado, dando excelente resistencia a la compresión, peso ligero y buena flexibilidad. Esta provista de una cubierta de polietileno negro como protección durante el manejo e instalación.
(7) Kit de aterrizamiento	Los Kits de aterrizamiento son usados para aterrizar la guía de onda elíptica a la torre. El aterrizamiento de la guía es recomendable instalarlo al final y en la parte más baja de la torre, a intervalos de 60 metros (cuando sea aplicable) y a la entrada del gabinete de equipo.
(6) Conectores de guía de onda	Se instalan dos conectores en las puntas de la guía de onda, uno en la conexión de la guía de onda rectangular (cerca del radio) y el otro en el alimentador de la antena.
(12) Equipo de presurización	El equipo de presurización reduce el riesgo de daños y costos por interrupción de servicio. Este equipo incluye deshidratadores y monitores de línea ⁷ .

Tabla 2.7 Elementos de un Radio Enlace.

⁷ Ibidem, pp. 125-127

Radio Digital (3er y 4º orden PDH)

Generalmente en un sistema digital, la señal transmitida se puede regenerar sin error en el lado de recepción siempre que el nivel de ruido no exceda el nivel de umbral de la señal, por esta razón se puede eliminar el ruido completamente, regenerando íntegramente las señales que llegan al lado del receptor.

En el caso de radios digitales, la información digital bipolar HDB-3 o CMI, de acuerdo al orden de la tributaria o nivel jerárquico, se procesa para tener una señal analógica de 4 PSK o 16 QAM. Con una potencia de transmisión que va desde +30 a +33 dBm, en el rango de frecuencias de 6.4 GHz a 7.8 GHz. Con amplificador de estado sólido y hasta 14.5 GHz, con Amplificador de Onda Progresiva (TOP ó TWT) del ingles Travel Tube Wave.

Etapas de transmisión

Las etapas de un radio digital en el proceso de transmisión (Fig. 2.28) son las siguientes:

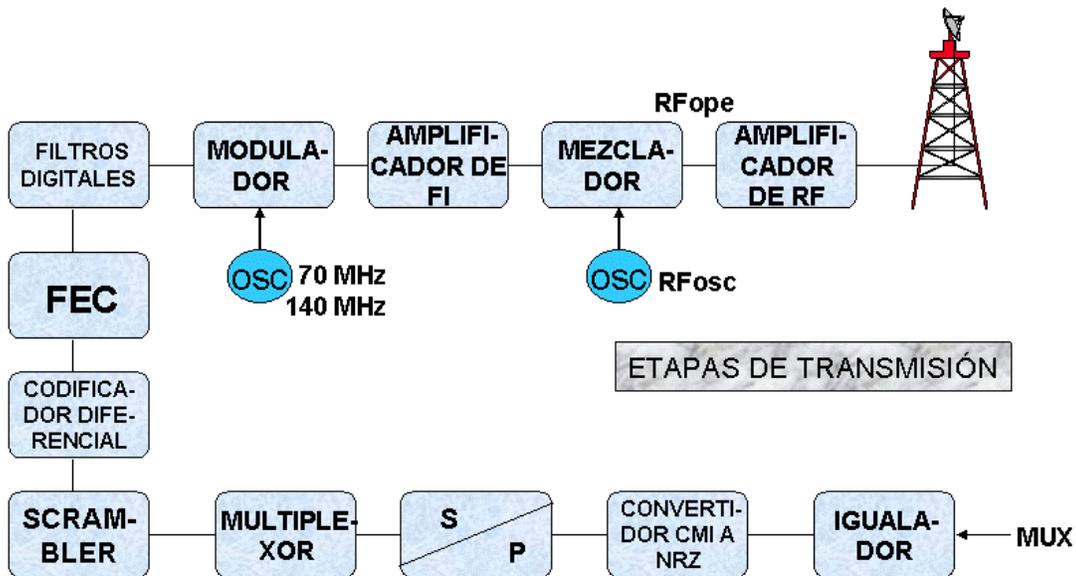


Fig. 2.28 Etapa de Transmisión de un Radio Digital.

- **Igualador:** Su función es la de compensar la atenuación que presenta la señal digital de un trayecto hasta los dispositivos de entrada del sistema de

radio, cumpliendo con las recomendaciones G.703, G.821, G.823, de la UIT-T.

- **Convertidor de Código:** Convierte la señal HDB-3 o CMI a NRZ, para poder ser procesada en las diferentes etapas del radio digital.
- **Convertidor Serie-Paralelo:** Esta etapa convierte el flujo de 34.368 Mbps en 2 flujos de 17.184 Mbps, en caso de ser una tributaria de entrada de 3er. orden, en el caso de ser una tributaria de 4º orden, convierte el flujo de 139.264 Mbps en cuatro flujos de 34.816 Mbps.
- **Multiplexor:** Se encarga multiplexar los flujos del convertidor serie-paralelo, los bits de sincronía de trama (FS), los bits de paridad, el canal de servicio (DSC), y los bits de control de conmutación (SW). Esto es posible por medio de una memoria elástica que aumenta la velocidad de los flujos de 17.184 a 19.332 Mbps, en el caso del 3er. Orden. Para el 4º orden de 34.816 a 35.939097 Mbps.
- **Scrambler (aleatorizador):** Cada uno de los flujos es aleatorizado (scrambler), para mantener constante el espectro de la señal de FI y de RF, es decir, sin importar la señal de entrada después de aleatorizarla o promediarla, se obtenga en la salida la misma cantidad de “0’s” y de “1’s.”
- **Codificador Diferencial:** También conocido como modulación por cambio de fase diferencial (DPSK, Diferencial Phase Shift Key), su función es comparar la fase del ciclo en un periodo (bit de referencia) con la fase del ciclo siguiente (del bit entrante de información).
- **Código de Errores hacia Adelante (FEC):** Detecta y determina la cantidad de errores, en una secuencia de bits, se pone un bit 1 si la secuencia de conteo de los bits “1” es par, y se pone un bit 0 si la secuencia de bits “1” es impar.
- **Filtros Digitales:** Filtra la señal del pulso en el dominio de la frecuencia.
- **Modulador:** Realiza la conversión D/A por medio de un modulador anillo o balanceado, convirtiendo los dos flujos de 19.332 Mbps para 3er orden en 4 PSK, y los cuatro flujos de 35.939097 Mbps del 4º orden a 16 QAM.

- **Amplificador de FI:** Mantiene constante el nivel de la señal de FI, así como la frecuencia, a través de un CAG y CAF.
- **Mezclador:** Realiza la mezcla de la señal de FI con la R_{Fosc} , la cual da como resultado la R_{fop}
- **Amplificador de RF:** Filtra y amplifica la señal de RF, a un nivel de +30 dBm, antes de enviarla en forma de OEM por medio de la línea de transmisión y la antena.

Etapa de Recepción

En al fig. 2.28 se describen las etapas relacionadas con la recepción de las OEM, en donde el objetivo de estas etapas es convertir las OEM en una señal digital de tipo HDB-3 o CMI.

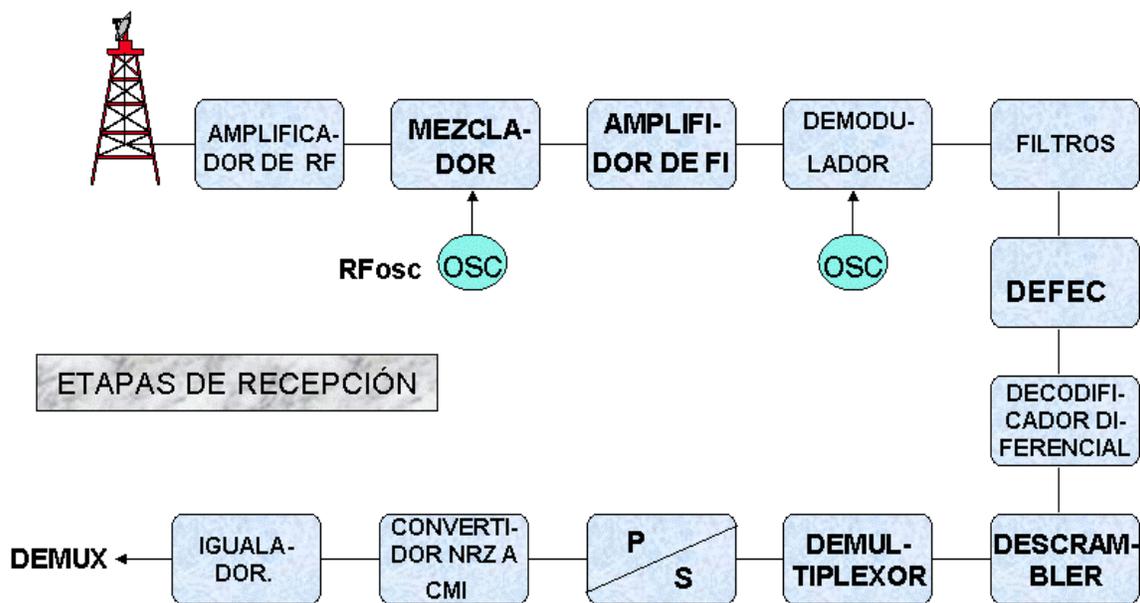


Fig. 2.29 Etapa de Recepción de un Radio Digital.

- **Amplificador de RF:** Amplifica y filtra la señal de RF, con la finalidad de no tener señales cercanas a la R_{fope} , y así evitar su demodulación.

- **Mezclador:** Realiza la mezcla de la señal de $R_{f_{ope}}$ con la señal de $R_{f_{osc}}$, para obtener la señal de FI, que es una señal analógica de 4PSK si es un tercer orden o 16 QAM si es un cuarto orden.
- **Amplificador de FI:** Mantiene constante la señal de FI en amplitud y frecuencia, contiene las secciones de retardo de grupo y los igualadores adaptativos transversales.
- **Demodulador:** Convierte la señal analógica en señal digital (NRZ), para el tercer orden convierte a 2 flujos de 19.332 Mbps, y para el cuarto orden en cuatro flujos de 35.939097 Mbps.
- **Filtros:** Este filtro, filtra la señal en el dominio de la frecuencia el pulso NRZ.
- **DEFEC:** Hace el conteo de 1's en un bloque de tamaño determinado y compara si es par o impar contra el bit de paridad, en caso de no corresponder, el bloque completo iniciara un proceso de corrección de errores cíclico (CRC).
- **Decodificador Diferencial:** Su función es comparar la fase del ciclo en un periodo (bit de referencia) con la fase del ciclo siguiente (del bit entrante de información), para obtener la secuencia de información original.
- **Descrambler (desaleatorizador):** Cada uno de los flujos es desaleatorizado (descrambler), es decir, el flujo de datos vuelve a la cantidad de 1's y 0's inicial.
- **Demultiplexor:** Esta etapa se encarga de separar los bits de sincronía de trama (FS), los bits de paridad, el canal de servicio (DSC) y los bits de control de conmutación (SW). Esto es posible por medio de una memoria elástica que regresa el tren de pulsos a su velocidad inicial 17.184 Mbps, en el caso del 3er. Orden. Para el 4º orden de 34.816.
- **Convertidor de paralelo a serie:** Convierte los dos flujos de 17.184 Mbps en uno solo de 34.816 Mbps y de los cuatro flujos de 34.816 Mbps en 139.264 Mbps.
- **Convertidor de código:** Convierte la señal NRZ en HDB-3 o CMI de acuerdo a la jerarquía de datos inicial.

- **Igualador:** Verifica que la señal cumple con las recomendaciones de la UIT, G.703, G.821 y G.823⁸.

Radio SDH (STM-1)⁹

Los radios SDH, son el resultado de la evolución tecnológica de nuestros días, tienen la capacidad de enviar hasta 7 señales de RF, cada una con un STM-1, en diferentes frecuencias en el rango de 6.4 a 7.1 GHz, 12.7 a 13.3 GHz y de 24.25 GHz a 26.5 GHz, con una potencia de transmisión que oscila entre 21.0 y 29.5 dBm.

Etapas de transmisión.

La finalidad de este tipo de radio, es convertir la señal digital CMI, en una señal analógica de 32, 64 o 128 QAM y con la combinación del código viterbi para tener una modulación de tipo TCM (Trellis Codec Modulation) según sea el fabricante del equipo. Las etapas de transmisión son (Fig. 2.30):

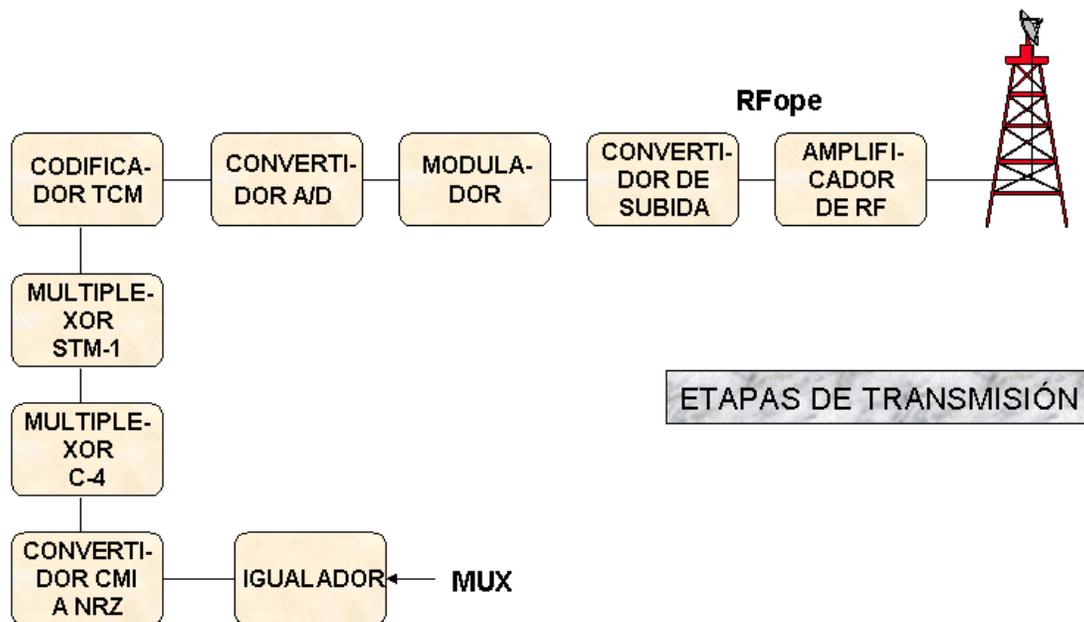


Fig. 2.30 Etapa de Transmisión de un Radio SDH.

⁸ Ibidem, pp. 128-132

- **Igualador:** Está etapa compensa la atenuación que presenta la señal digital de un trayecto hasta los dispositivos de entrada del sistema de radio, cumpliendo con las recomendaciones G.703, G.821, G.823, de la UIT-T.
- **Convertidor de Código:** Está etapa convierte la señal CMI en un NRZ, para poder ser procesada en las diferentes etapas del radio digital.
- **Multiplexor C-4:** Está etapa realiza el mapeo de la señal CMI en el contenedor C-4, de acuerdo a las recomendaciones de la UIT-T G.707-709 y G.782-784 y se inserta el POH.
- **Multiplexor STM-1:** Realiza la inserción del SOH, de acuerdo a las recomendaciones de la UIT-T G.707-709 y G.782-784, es decir checa la paridad (BIP-x), y la construcción del puntero AU-4.
- **Codificador TCM:** Es la técnica de modulación, en la cual se emplean algoritmos matemáticos sofisticados para predecir la mejor comparación entre la señal entrante y el grupo de posibles combinaciones de amplitud y fase. Realiza el proceso de convertir un flujo de 155.520 Mbps, en dos flujos.
- **Convertidor A/D:** Convierte la señal digital (NRZ) en una señal analógica (QAM).
- **Modulador:** Combina los flujos del Convertidor A/D, en uno solo, el cual filtra y mantiene el nivel de la señal y la frecuencia constante (-6 dBm y 70 MHz), estos valores dependerán de cada fabricante, (a esta señal también se le llama FI).
- **Convertidor de subida:** Mezcla la señal de FI con la señal de RFosc para obtener la RFop.
- **Amplificador de RF:** Filtra y amplifica la señal de RFop a un nivel que oscila desde $+21.0$ hasta $+29.5$ dBm.

Después la señal es enviada a la antena a través de la guía de onda, para ser radiada al espacio libre.

Etapas en la Recepción

La función principal de las etapas de recepción es convertir la OEM en una señal CMI, extrayendo los encabezados del POH, del sistema SDH.

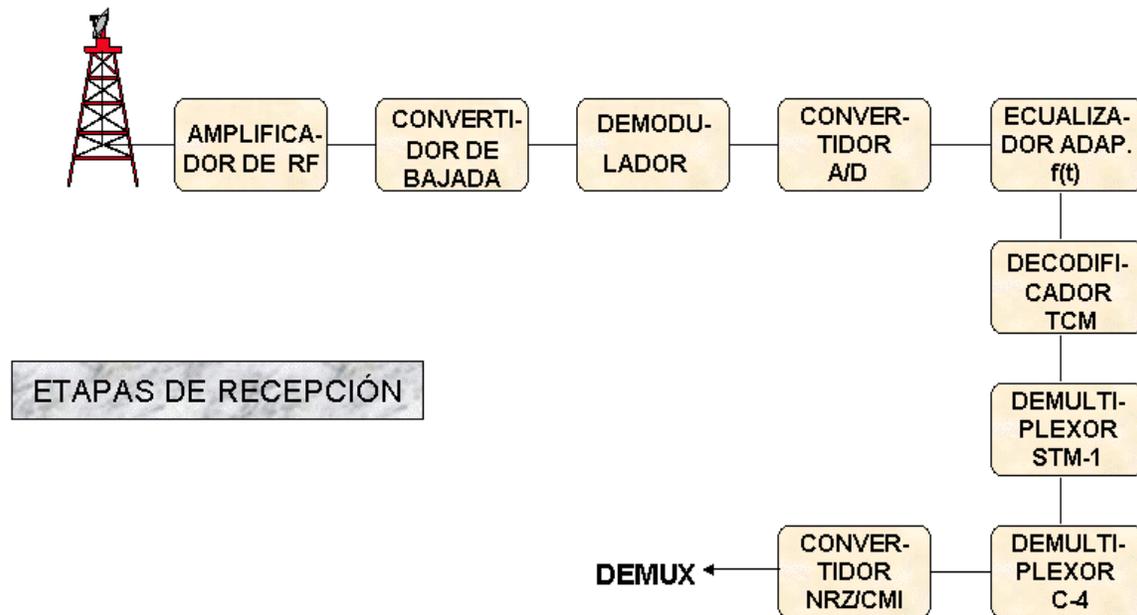


Fig. 2.31 Etapa de Recepción de un Radio SDH.

- **Amplificador de RF:** Amplifica y filtra la señal de RF, con la finalidad de no tener señales cercanas a la R_{fope} , y así evitar su demodulación.
- **Convertidor de bajada:** Realiza la mezcla de la señal de R_{fope} con la señal de R_{fosc} , para obtener la señal de FI.
- **Demodulador:** Divide la señal de FI en dos flujos para después convertirla de analógica a digital.
- **Convertidor de A/D:** Convierte la señal de QAM en dos flujos NRZ.
- **Ecualizador Adaptativo en el Tiempo:** Controla los problemas causados por la propagación por multitrayectorias, y ayuda a minimizar la interferencia intersimbólica.
- **Decodificador TCM:** Realiza el proceso de convertir los dos flujos en un solo flujo de 155.520 Mbps.

- **Demultiplexor STM-1:** Se extrae el SOH, de la trama¹⁰.
- **Demultiplexor C-4:** Se extrae el POH de la trama.
- **Convertidor de Código:** Convierte la señal NRZ en CMI.

2.4 Sistemas de Protección

Los sistemas de protección (Fig. 2.32) tienen la función de minimizar las interrupciones de los servicios de comunicación, ya que las pérdidas de potencia de señal en los enlaces de radio varían con las condiciones atmosféricas. En un periodo, las condiciones atmosféricas, entre una antena transmisora y una receptora, pueden variar considerablemente, causando una disminución en la potencia de la señal recibida. A esta reducción de potencia se le conoce como *desvanecimiento de radio*.

Cuando esto sucede, se pierde continuidad en el servicio. Para evitar esto se realiza la conmutación de protección, que consiste en un equipo alterno que trabaje temporalmente en los periodos de desvanecimientos.

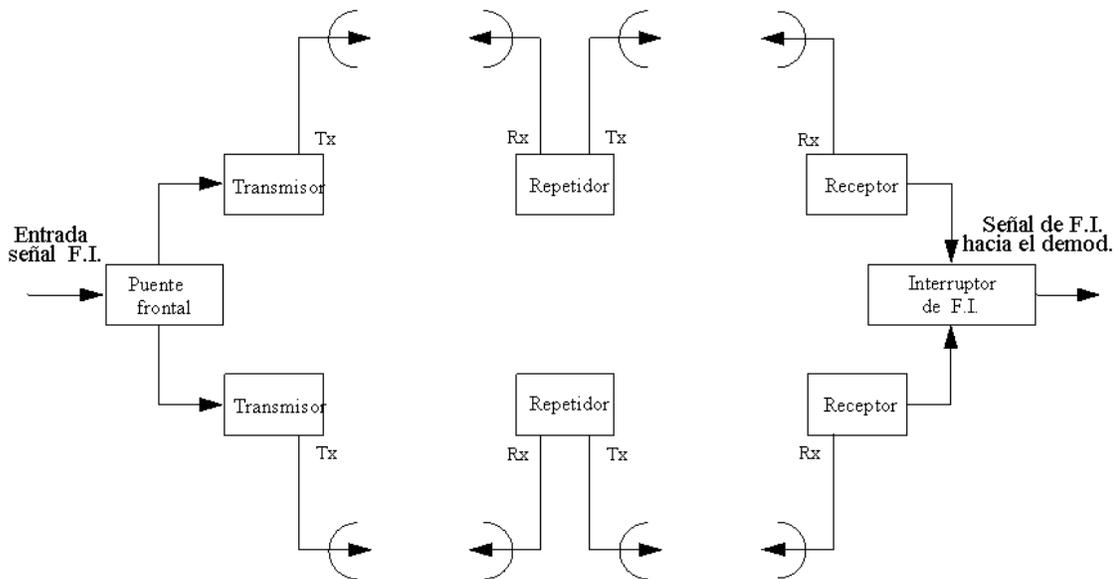


Fig. 2.32 Sistemas de protección.

¹⁰ Ibidem, pp. 133-137.

Existen dos tipos de arreglos para la conmutación de protección:

- Respaldo en línea (hot standby).
- Diversidad.

El respaldo en línea o reserva en caliente (hot standby) tiene dos equipos trabajando simultáneamente, existiendo un equipo de trabajo y uno auxiliar.

En el lado transmisor la señal de FI se divide en dos por medio de un puente frontal I, las dos señales de FI se envían a cada uno de los canales de microondas (el de trabajo y el de espera). En consecuencia los dos canales están trabajando y contienen la misma información.

En el extremo receptor, el interruptor de FI pasa la señal de FI del canal que está trabajando a la sección de demodulación. El interruptor de FI continuamente monitorea la potencia de la señal recibida en el canal que está trabajando y si falla cambia al canal que está en espera (standby).

Este arreglo es aplicado en sistemas de capacidad de hasta 480 canales de voz donde el crecimiento en tráfico es lento.

Se muestra una redundancia en el transmisor y al receptor con una configuración de reserva en caliente, con las siguientes características:

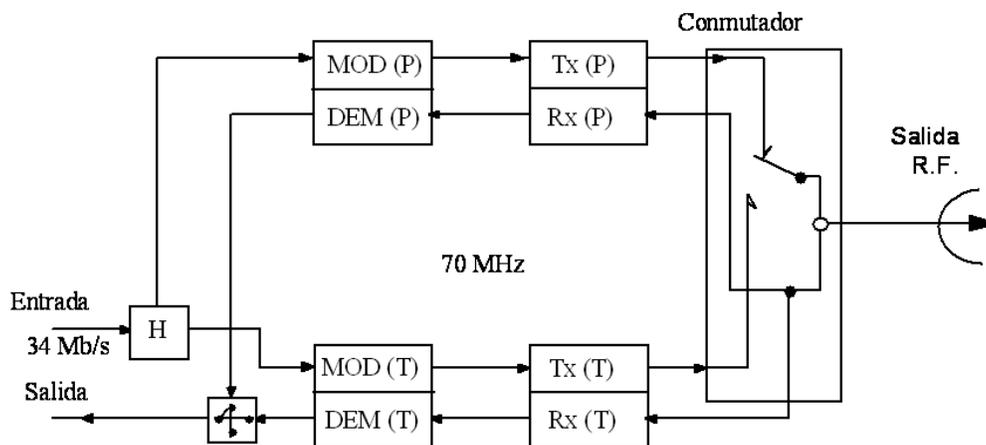


Fig. 2.33 Sistema de protección con velocidad de entrada de 34Mb/s.

Etapa	Descripción
1	La señal de entrada de 34 Mb/s pasa a través de una híbrida alimentando al modulador y transmisor de trabajo y al de protección.
2	El conmutador en el circuito de derivación, habilita a cualquiera de los dos canales (la orden la envía el receptor de la terminal distante), o al existir una falla en la ruta de transmisión el conmutador habilitara al canal de protección asegurando así la continuidad. Se puede accionar este conmutador en una forma manual para efectos de mantenimiento.
3	En el receptor la señal de RF procedente de la antena pasa a través de los filtros y se divide en dos partes para entrar a los receptores y demodulador de trabajo y de protección.
4	La señal de BB llega a un conmutador el cual toma la mejor señal si esta llegase a fallar o degradarse tomará la otra señal en algunos casos esta se suma.

Tabla 2.8 Etapas de Transmisión.

Los sistemas de radio utilizan una señal directa llamada *línea de vista*, entre las antenas de transmisión y recepción. Si esa ruta de la 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 radio, 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 más alta evaluando la relación de señal a ruido en la entrada del receptor o simplemente midiendo la potencia recibida de la señal.

Los métodos de diversidad más comunes son:

- Diversidad de Frecuencia.
- Diversidad de Espacio.
- Diversidad de Polarización.

Diversidad en frecuencia

Este método de protección es usado para sistemas de alta capacidad con muchos repetidores, y sistemas N+1. Este equipamiento provee protección contra fallas de equipo y desvanecimiento selectivos, que son problemas que causan una alta tasa de error.

La diversidad de frecuencia son dos frecuencias portadoras de RF diferentes, con la misma señal de información (modulante) ya sea en FI o la banda base (BB), para transmitir ambas señales de RF a un destino determinado o punto distante (recepción). En el punto distante, ambas señales de RF son demoduladas, y la señal de mejor calidad es la que se selecciona.

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 tiempo determinado el receptor puede seleccionar la de mejor calidad.

Este método o sistema de protección está implementado para conmutar una sección que comprende un número mayor de saltos, diseñados con un canal de protección que puede soportar un máximo de 10 canales regulares.

La sección de conmutación debe tener repetidores regenerativos, para algunos sistemas sin embargo se podría tener uno o dos repetidores en FI pero estos saltos deberán de ser muy cortos y no tener efectos sobre la disponibilidad del sistema. Los repetidores en FI contribuyen en la economía total del sistema.

Las ventajas de este método son:

- Facilidad para efectuar pruebas de mantenimiento cuando el sistema está en servicio.
- El costo total del sistema decrece con el incremento del número de canales regulares comparado con otros sistemas

Diversidad de Espacio

En este tipo de diversidad, la salida del transmisor alimenta a dos o más antenas que están separadas físicamente por un número de longitudes de onda.

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 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 sumar o agregar. Si se reciben fuera de fase, se cancelarán y en consecuencia la señal resultará con menos potencia.

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.

Un método alternativo de diversidad de espacio utiliza una sola antena de transmisión y dos antenas de recepción 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.

La diversidad de espacio emplea dos antenas separadas verticalmente en la sección de recepción para recibir las señales transmitidas hacia un mínimo de dos

receptores, deberá recibir una señal de la antena regular y cuando el umbral de desvanecimiento esté presente se deberá conmutar automáticamente a la antena de diversidad junto con el receptor.

En estudios experimentales de los efectos de desvanecimiento por trayectoria múltiple sobre el ancho de banda, en los sistemas de transmisión por radio con modulación digital, se ha observado que la diversidad de espacio cuando está equipada con *Igualadores Adaptativos* es mucho más efectiva contra los desvanecimientos.

Diversidad de Polarización

En 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.

Igualadores

Los igualadores o *ecualizadores adaptativos* están ubicados en la sección del receptor y proporcionan *postecualización* a la señal recibida ver fig., 2.34. Los igualadores adaptativos automáticamente ajustan sus características de ganancia y retardo para compensar las desventajas de los canales de R.F (Tabla 2.9).



Fig. 2.34 Igaladores.

Igalador adaptativo	Descripción
Igalador adaptativo tipo transversal.	En la banda de FI el espectro puede llegar con declive ya sea positivo o negativo y este igualador debe de ser capaz de corregir esta anomalía sin adicionar distorsión de retardo.
Igalador adaptativo en el dominio del tiempo.	Este igualador se localiza en la sección de BB e iguala la forma de onda en el dominio del tiempo, esta igualación es ajustada automáticamente por el monitoreo de la apertura del diagrama de ojo.
Igalador adaptativo en el dominio de la frecuencia.	<p>El igualador adaptativo requiere de varios circuitos para proveer el aplanamiento del espectro de la señal de entrada al demodulador, por esto debe de corregir automáticamente la forma de la señal digital de cada canal; combinado con la diversidad de espacio puede allanar interferencias destructivas causadas por desvanecimientos debidos a las multitrayectorias.</p> <p>El desvanecimiento debido a multitrayectorias causa deformaciones sobre el espectro de RF recibido, esta deformación puede ser lineal o distorsión en amplitud y cuadratura. El monitoreo de esta deformación puede ser por tres detectores, uno para las frecuencias bajas, otro para las frecuencias medias y uno más para las frecuencias altas.</p>

Tabla 2.9 Ecuiladores adaptativos.

Un igualador adaptativo puede determinar la calidad de la señal recibida dentro de sus propios circuitos o puede adquirir esta información de los circuitos del demodulador. El igualador adaptativo puede variar continuamente su configuración para lograr las mejores características generales de ancho de banda para el sistema de transmisión¹¹.

La siguiente tabla muestra, los diferentes tipos de protección usados en los sistemas de radio digitales.

Tipo	Características
Respaldo en línea (reserva en caliente o Hot Standby)	Una sola RF
Diversidad de frecuencia	Protección contra fallas de equipo y desvanecimientos selectivos.
Diversidad de espacio	Protección contra propagación anormal.
Combinación de respaldo en línea (reserva en caliente) y diversidad de espacio.	HITLESS Una frecuencia de RF Protección contra fallas de equipo y propagación anormal.
Combinación de diversidad de frecuencia y diversidad de espacio.	Protección contra fallas de equipo y propagación anormal.
Igualador adaptativo	Protección contra distorsiones de retardo y amplitud debido a una propagación anormal.
Combinación de diversidad de espacio e igualador adaptativo	Protección contra propagación anormal más efectiva.

Tabla 2.10 Sistemas de protección en radios digitales...

11 Ibidem, pp. 138-154

Capítulo 3

Cálculo de enlace

3.1 Diseño de Ingeniería

El Diseño de Ingeniería es el proceso que se sigue para obtener los datos necesarios, para determinar la posibilidad de asegurar y obtener un radio enlace casi al 100% de disponibilidad durante todo el año.

Este diseño se divide en dos etapas:

- **Estudio de Gabinete:** Se encarga de la planeación, distribución y proposición de los elementos del enlace de microondas más probables en los sitios de instalación.
- **Estudio de Campo:** Se encarga de corroborar todos los datos del estudio de gabinete, para ver si es factible la instalación de los elementos del enlace de microondas en los sitios respectivos¹.

A continuación se describen cada uno.

3.2 Estudio de Gabinete (Map Survey)

Esta parte del diseño de ingeniería, es el primer paso para obtener el Cálculo del Enlace, y se encarga de obtener los siguientes datos:

- Las coordenadas de los sitios.
- La Altura sobre el nivel del mar (ASNM).
- El Perfil topográfico.
- Las Alturas probables de las torres.
- La Altura de las antenas en la Torre.
- La Distancia entre sitios.
- La Pérdida en el Espacio Libre.
- El Azimut²

¹ Aldana Espejel Benito, Localización de sitios para enlace de microondas, p. 155

Los siguientes datos son propuestos para fines del Cálculo de Enlace:

- La longitud y tipo de líneas de transmisión.
- El factor de claridad (1ra. Zona de Fresnel).
- El tipo de antena a utilizar en el enlace de microondas.
- El nivel de potencia de recepción (PRx).

Los materiales que se necesitan para este tipo de estudio se enlistan a continuación:

- Mapas de la región (cartas topográficas) 1:50,000 y 1:250,000.
- Regla "T" (la más grande).
- Escuadras.
- Escalímetro.
- Transportado de 360°.
- Lápiz.
- Programa para perfil topográfico (TAP, Pathloss, entre otros).
- Lupa.
- Mesa (grande).
- Lámpara.
- Los manuales del fabricante del radio, de la antena y de la línea de transmisión (pueden ser en todo caso la ficha técnica del fabricante).

2 es una medición de un ángulo en un sistema de coordenadas esféricas . El vector de un observador (origen) a un punto de interés es proyectada perpendicularmente en una referencia plano , el ángulo entre el vector proyectado y el vector de referencia en el plano de referencia se llama acimut.

Un ejemplo de un acimut es la medición de la posición de una estrella en el cielo. La estrella es el punto de interés, el plano de referencia es el horizonte o la superficie del mar , y los puntos de vector de referencia a la norte . El acimut es el ángulo entre la punta norte y la proyección perpendicular de la estrella hacia abajo sobre el horizonte.

El concepto se utiliza en muchas aplicaciones prácticas, incluyendo la navegación , la astronomía , la cartografía , la minería y la artillería .

<http://en.wikipedia.org/wiki/Azimuth>, 04/09/2010.

De los mapas debemos verificar:

- Su año de elaboración.
- Clave y nombre de la carta.
- La escala.
- La equidistancia entre curvas de nivel.

De los mapas obtenemos los siguientes datos:

- Las coordenadas de los sitios.
- La ASNM de los sitios.
- La distancia ente sitios.
- El Azimut.
- El Perfil topográfico.

Con el programa de cómputo (En este caso se usa el propio del fabricante o el software propio de PGR) SE obtienen los siguientes datos:

- La altura de las Torres.
- La altura de las Antenas.

Esto se logra por medio del perfil topográfico que se obtiene de los mapas, cuyos datos se almacenan en una base de datos, en donde el programa extrae los datos y los gráfica, y de acuerdo al factor de claridad que esté sujeta la primera Zona de Fresnel se obtienen las alturas de la torre y las alturas de las antenas.

De los manuales del fabricante se obtienen los siguientes datos:

El tipo de antena: peso, ganancia, ancho del haz, patrón de radiación, clave del fabricante para la antena y el ancho de banda de operación.

El tipo de línea de transmisión: La atenuación por cada 100m o por cada 100 ft a la frecuencia de operación del enlace de microondas, clave del fabricante, entre otros³.

3.3 Estudio de Campo (Site Survey)

Esta parte del diseño de ingeniería se encarga de revisar todos los datos anteriores, así como revisar la existencia de los espacios para la instalación del radio, la antena y el recorrido probable de la línea de transmisión. Para tal fin, el personal encargado del proyecto se traslada al posible sitio de instalación.

De no ser así, se pueden tener pérdidas económicas muy fuertes ya que habrá retrasos en las instalaciones, lo cual puede ser provocado por la falta del campo de recepción por la baja ganancia de la antenas o por no la existir línea de vista entre estaciones, o debido a infraestructuras que nos son las adecuadas para el enlace de microondas.

En consecuencia se requiere de un nuevo diseño de ingeniería del sitio y la construcción de una nueva infraestructura, con el consiguiente incremento del costo del proyecto.

En el estudio de campo se realiza el siguiente proceso:

1. Por medio del GPS, se ubican las coordenadas de los sitios, y el azimut correspondiente.
2. Con el altímetro se confirma la ASNM.
3. Se confirma el recorrido y longitud de las líneas de transmisión.
4. Se realizan dos croquis, el primero para la posible instalación del equipo de radio, con el recorrido de la línea de transmisión y el segundo con la

³ Ibidem. pp. 157-160

instalación probable de la antena en la torre y todos los elementos que se encuentren en ella.

Los materiales para el estudio de campo son todos los anteriores, junto con la lista siguiente:

- Camioneta Pick-up.
- GPS.
- Altimetro.
- Binoculares.
- Cinta métrica de 50 m.
- Radio (walk take).
- Bandola.
- Brújula.

En esta etapa del proceso del diseño de ingeniería, es necesario contar con el programa de cómputo en el sitio, ya que se pueden presentar los siguientes problemas:

En el caso de proponer una torre cuyas dimensiones no se ajustan al sitio escogido y se debe de cambiar de ubicación.

- El sitio que se escogió para la instalación, no se permite la instalación del equipo.
- El sitio que se escogió no tiene línea de vista por alguna construcción muy grande cercana o por la vegetación que es demasiado alta.

Es por tal motivo que cuando se realice la visita a los sitios propuestos se debe tener cuidado de hacer las siguientes consideraciones (Tabla 3.1):

Paso	Acción
1	Verificar que los sitios de instalación sean de fácil acceso.
2	Verificar construcciones de edificios o anuncios publicitarios panorámicos que puedan obstruir las rutas (solo en poblaciones).
3	Verificar cercanía con aeropuertos comerciales, privados o militares que puedan obstruir la ruta con su tráfico.
4	Verificar cercanía de ríos o canales de agua donde circulen barcos y puedan obstruir la ruta.
5	Verificar el suficiente soporte, espacio y estabilidad de la estructura de la torre para el montaje firme de la antena.
6	Verificar trayectorias y distancias de los cables de alimentación, cables de la banda base y guía de onda.
7	Verificar disponibilidad de alimentación de energía eléctrica comercial o fuentes alternas de energía.
8	Antes de tomar la decisión final para la instalación de antenas y torres en los sitios seleccionados, se debe consultar con las autoridades para aclarar si hay proyectos de construcción de nuevos edificios a lo largo de la ruta y restricciones vigentes sobre la altura de las torres.

Tabla 3.1 Consideraciones a seguir al visitar el sitio

Documentación

1. Una vez que se realizaron estos estudios, se hace la documentación de soporte del estudio, con los datos reales, que a continuación se describen:
Para la antena: Tipo de antena, ganancia, ancho del haz, diámetro, azimut del enlace y altura en la torre.
2. Para las líneas de transmisión: longitud y recorrido real entre la antena y la ubicación física del radio, atenuación por cada 100 m.
3. Para torre: Tipo, altura, inventario de otras antenas instaladas en ella con su azimut respectivo, verificación del sistema de tierras y luces de obstrucción.

4. Para el local: Las coordenadas de cada uno de los sitios de instalación, el lugar de instalación del radio, la capacidad de los equipos electrógenos y se cuenta con toda la infraestructura para la instalación de todo los elementos del enlace de microondas⁴.

La documentación que se genera es la siguiente:

- El Perfil Topográfico.
- El Cálculo de Enlace.
- El Cálculo de Indisponibilidad

A continuación describimos cada uno de ellos.

3.4 Perfil Topográfico

El perfil topográfico es el documento que nos muestra la trayectoria la primera zona de Fresnel sobre la topografía de la trayectoria, esta gráfica también muestra los siguientes datos:

- Nombre de los sitios del enlace.
- ASNM de cada uno de los sitios.
- Altura de las torres.
- Altura de instalación de las antenas en las torres.
- Distancia entre sitios.
- Las coordenadas de los sitios.
- Azimut.
- El Factor K^5 .

4 *Ibidem*, pp. 161-164

5 La topografía del terreno atravesado tiene una influencia en la alineación de calles y carreteras... Topografía afecta a la alineación horizontal, pero tiene un efecto aún más pronunciado en la alineación vertical. Las variaciones en la topografía generalmente se separan en tres clasificaciones dependiendo del terreno:

Nivel --- distancias de visibilidad a la autopista, que se rige por las restricciones horizontales y verticales, suelen ser largos o se puede hacer sin dificultad para la construcción de gasto importante.

Naturales--- pendientes se elevan constantemente por encima y por debajo de la carretera o el grado de la calle, y ocasionalmente fuertes pendientes ofrecer alguna restricción respecto a la horizontal y vertical de una alineación normal.

- El valor de la primera zona de Fresnel.

Este documento se puede variar en contenido o estructura, y se divide en dos.

1. La ASNM para cada obstáculo (montañas) en la trayectoria del enlace.
2. La Gráfica de la topografía del enlace⁶.

3.5 Cálculo de Enlace

Actualmente para la implementación de enlaces de microondas digitales, se instalan radios con una capacidad igual o mayor a 120 canales telefónicos, para capacidades mayores se instalan los de 480 y 1,920, es decir un E2, E3, E4.

Debemos de recordar para los clientes con mayor densidad de tráfico podemos instalar radios SDH con más de uno STM-1.

Una vez elegidos los sitios de instalación, una de las tareas más importantes a realizar inmediatamente es determinar si existe línea de vista entre las estaciones (Fig. 3.1).



En los enlaces de microondas es necesario conocer los siguientes datos:

- La distancia entre los sitios.
- Los modelos de antenas a emplear.
- El tipo de línea de transmisión.
- La potencia de transmisión.
- La potencia de recepción.
- La pérdida en el espacio libre.

Fig. 3.1 Cálculo del Enlace.

Montañosa longitudinal y transversal cambios en la elevación del terreno con respecto a la carretera o la calle son abruptas, con paredes verticales y la excavación secundarios a menudo necesario para obtener la alineación horizontal y vertical aceptable.

Estas clasificaciones se refieren al carácter general de un corredor vial específico. Vialidades en los valles, pases, y las zonas montañosas que tienen todas las características de las carreteras o calles que atraviesan nivel o ondulado terreno deberían ser clasificadas como nivel o rodante..

http://epg.modot.org/index.php?title=230.2_Vertical_Alignment, 04/09/2010.

6Ibidem, pp. 166

Lo primero que hay que realizar para establecer un enlace de microondas punto a punto es visitar los sitios o los locales existentes donde se instalarán los equipos, las antenas y determinar si la ruta de transmisión tiene línea de vista. También se debe verificar que los sitios propuestos sean seguros y adecuados con respecto a la integridad de la estructura de la antena, resguardo del equipo de radio y disponibilidad de fuerza y clima.

Las antenas de los equipos de radio digital de alta capacidad son instalados normalmente sobre estructuras metálicas (torres), colocados en los puntos altos de edificios, montañas y en algunos casos sobre terrenos llanos. Por lo tanto es necesario elegir un sitio que cumpla determinadas condiciones de seguridad y además.

Una vez elegidos los sitios de instalación, una de las tareas más importantes a realizar inmediatamente es determinar si existe línea de vista entre las estaciones.

Procedimiento.

Para distancias cortas se puede observar a simple vista, colocándose en uno de los sitios propuestos y verificar que la ruta hacia la otra estación se encuentre libre de obstáculos. Sin embargo, en distancias largas puede requerirse el uso de binoculares. Sí la estación opuesta es difícil de ubicar, se hace uso de espejos, luz estroboscópica, banderas, globo aerostático o brújula si se cuenta con las coordenadas del sitio.

Para muchas aplicaciones no es necesario un riguroso análisis de la ruta, sin embargo, en situaciones donde el espacio libre o zona de Fresnel es una incógnita, es aconsejable dibujar un perfil de la ruta.

Un perfil de la ruta se construye fácilmente consultando el mapa topográfico del área considerada. Estos mapas son publicados por el INEGI, en dichos mapas se

muestran las curvas de nivel y las distancias entre las poblaciones. La escala recomendada es de 1:50,000.

Se puede determinar el perfil de la elevación de la tierra y dibujar una línea recta entre las coordenadas de los dos sitios como se observa en la fig. 3.2. Se debe hacer la gráfica de perfil a escala. Una vez que el perfil topográfico es obtenido, se deben incluir obstáculos tales como edificios, árboles, etc. y dibujar la envolvente de la zona Fresnel. Después de esto el perfil topográfico resultante puede mostrar problemas de visibilidad que no fueron observados durante la inspección de línea de vista.

Se cuenta con los perfiles topográficos de las rutas de microondas, por lo que sólo es necesario actualizarlos, incluyendo obstáculos nuevos (edificios, anuncios panorámicos, crecimiento de árboles, etc.)⁷.

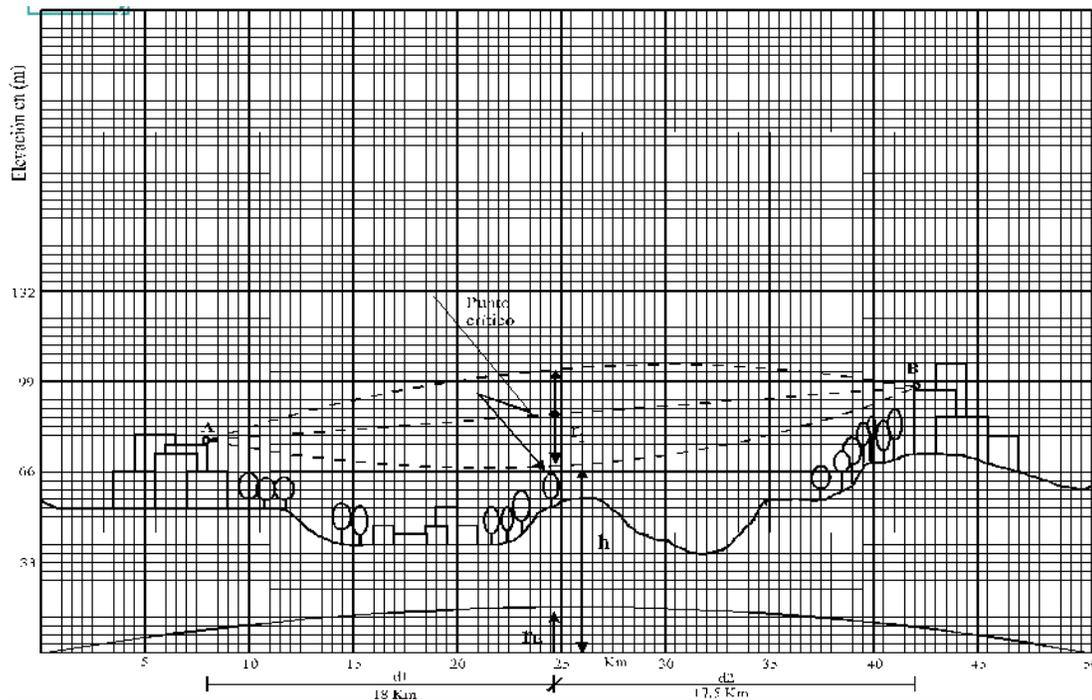


Fig. 3.2 Perfil Topográfico (Elevación vs Distancia).

7 Ibidem, pp. 167-172

Primera zona de Fresnel

Los cálculos de enlace permiten determinar el desempeño del sistema como una función de la longitud de la ruta deseada, equipo requerido y características específicas del área considerada (tipos de terreno, clima especialmente la lluvia). El análisis de la ruta toma en cuenta estos parámetros para obtener el desempeño real del enlace.

Una vez que ya se cuenta con el perfil topográfico y se han incluido todos los obstáculos físicos, es necesario dibujar sobre el perfil topográfico una zona libre llamada zona de Fresnel.

La zona de Fresnel consiste de una serie de superficies elípticas concéntricas, al rededor de la línea de vista de la ruta entre las dos antenas. La primera de esas superficies es conocida como primera zona de Fresnel y es el volumen de espacio donde la energía del enlace está concentrada.

Una regla para los radios de microondas es que la primera zona de Fresnel debe de estar libre de obstáculos o superficies reflejantes que puedan causar interferencia en la señal ocasionada una gran pérdida de señal en el receptor.

Las zonas de Fresnel son calculadas como una función de las frecuencias de transmisión, longitud de la ruta y la ubicación del punto a lo largo de la ruta. El radio de la primera zona de Fresnel (r_F) se calcula utilizando la ecuación:

$$r_F = 17.3 \sqrt{\frac{d_1 \times d_2}{FD}}$$

Donde:

- r_F = Radio de la primera zona de Fresnel (m).
- d_1 = Distancia desde el transmisor al punto de reflexión (Km).
- d_2 = Distancia desde el punto de reflexión al receptor (Km).

- **D**= Longitud de la ruta de señal directa (Km).
- **F** = Frecuencia de transmisión (GHz).

El fenómeno de refracción en la atmósfera curva el rayo radioeléctrico, debido a la discontinuidad de la presión barométrica en función a la altitud. Para tomar en cuenta este fenómeno y para simplificar la representación gráfica, el rayo verdadero se representa recto y el radio de la tierra se afecta por un factor $K = 4/3 = 1.33$ se puede calcular con la expresión:

$$r_E = \frac{d_1 d_2}{17}$$

Donde:

- **r_E** = Radio de la tierra (m).
- **d₁, d₂** = Distancia entre estaciones al punto de reflexión (Km)⁸.

3.6 Cálculo de Indisponibilidad

Este Cálculo se emplea para saber la disponibilidad del enlace en el peor mes (según la latitud y altitud donde se hará el enlace, en nuestro país es el mes de agosto) del año⁹.

Existen cuatro métodos para obtener el Cálculo de Indisponibilidad del sistema de microondas.

Estos métodos son:

8 La zona de Fresnel es una zona de despeje adicional que hay que tener en consideración en un enlace microonda punto a punto, además de la visibilidad directa entre las dos antenas. Este factor deriva de la teoría de ondas electromagnéticas, respecto de la expansión de las mismas al viajar en el espacio libre. Esta expansión resulta en reflexiones y cambios de fase al pasar sobre un obstáculo. El resultado es un aumento o disminución en el nivel de intensidad de la señal recibida.
<http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/6/65/AnexoJKL-Marcomun.pdf>, 04/09/2010.

9 Ibidem, p. 5

- Factor KQ.
- Factor KQ con rugosidad del terreno.
- Vigants – Bennett
- Recomendación UIT-R P.530-6

En el caso de este documento emplearemos la recomendación de la UIT-R P 530-6, que es la más empleada por las compañías nacionales que cuentan con enlaces de microondas.

Este método se divide en dos:

- Cálculo de la probabilidad de desvanecimiento P.
- El desempeño del sistema anual o mensual, durante el peor mes de año.

Para realizar el Cálculo de indisponibilidad es necesario contar con el Cálculo del Enlace, debido a que muchos de los datos que se necesitan se obtienen de este cálculo.

La Probabilidad de Desvanecimiento, está dada por la siguiente fórmula:

$$P = K d^{3.3} f^{0.93} \left(1 + |\varepsilon_\rho|\right)^{-1.1} \theta^{-1.2} 10^{\frac{A}{10}}$$

Donde:

- K = Factor Geoclimático en el peor mes de año.
- d = Distancia del enlace en (Km).
- f = Frecuencia del enlace (GHz).
- ε_ρ = Inclinación de la Trayectoria (mRad).

- θ = Ángulo de rasante medio de la trayectoria (Rad).
- A = Margen efectivo de Desvanecimiento (dB).
- P = Probabilidad de Desvanecimiento (%).

Este cálculo involucra las características físicas del terreno y climatológicas propias de cada región, donde se esté proponiendo el enlace de microondas.

Desempeño del Sistema

Una vez, que se tiene el Cálculo de Indisponibilidad (P), debemos calcular ahora el desempeño del sistema, es decir, la probabilidad de que el sistema este fuera de servicio durante el peor mes de año o anual, que se puede representar por dos formas, la primera, por el ciento de disponibilidad del enlace de microondas, y la segunda por el tiempo fuera en segundos del sistema.

El Cálculo de Desempeño se calcula por las siguientes formulas:

Para el caso del peor mes del año:

$$\text{Indisponibilidad (\%)} = 100 * P$$

$$\text{Disponibilidad (\%)} = 100 (1 - P)$$

$$\text{Tiempo Fuera (s)} = P * S_{men}$$

En donde:

- P = Probabilidad de Desvanecimiento (%)
- S_{men} = Cantidad de segundos en un mes.

$$S_{men} = (60 \text{ s} * 60 \text{ min} * 24 \text{ hrs} * 30 \text{ días}).$$

Para el caso anual, en donde se considera que el desvanecimiento se presenta en tres meses durante el año.

$$\text{Indisponibilidad (\%)} = 100 * P * 0.25$$

$$\text{Disponibilidad (\%)} = 100 (1 - 0.25 * P)$$

$$\text{Tiempo Fuera (s)} = 0.25 * P * \mathbf{S \text{ anuales}}$$

En donde:

- P = Probabilidad de Desvanecimiento (%)
- $\mathbf{S \text{ anuales}}$ = Cantidad de segundos en un año.

$\mathbf{S \text{ anuales}} = (60 \text{ s} * 60 \text{ min} * 24 \text{ hrs} * 365 \text{ días})$.

Los Cálculos del Enlace y de Indisponibilidad junto con el del Perfil Topográfico, ver tabla 3.2, son esenciales para realizar un buen Diseño de Ingeniería.

Hay que recordar también que es necesario contar con un buen sistema de tierras y el kit de tierra, para evitar daños a los equipos por descargas atmosféricas (rayos).

Además de contar con las señalizaciones adecuadas para las Torres, como lo son las luces de obstrucción y el pintado de las mismas para evitar la corrosión¹⁰.

10 RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-12 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa, p. 3, 04/09/2010, (1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2005-2007). <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.530-12-200702-I!!!PDF-S.pdf>

<i>Ref.</i>	<i>Description</i>	<i>Data</i>	<i>Data</i>
1	Site Name	ZAMORANO	COLO
2	Antenna Type	HP15-71D	HP15-71D
3	Antenna Gain (dBi)	47,8	47,8
4	Transmission Line Type	EWP-77	EWP-77
5	Transmission Line Loss (dB/100m)	6,000	6,000
6	Transmission Line Length (m)	30	20
7	Transmission Line Loss (dB)	1,80	1,20
8	Connector Loss (dB)	1	1
9	Divider / Combiner Loss (dB)	0	0
10	Equipment Tolerances (dB)	0,5	0,5
11	Path Length (km)	40,00	
12	Frequency (GHz)	7,525	
13	Free Space Attenuation (dB)	142,02	
14	Diffraction Loss (dB)	0	
15	Radio Type	TERMINAL	TERMINAL
16	Transmitter Power (dBm)	30	30
17	Free Space Receive Signal Level (dBm)	-22,42	-22,42
18	Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) (dBm)	74,50	75,10
19	Receiver Threshold Criteria (BER)	BER 10 EXP-6	BER 10 EXP-6
20	Receiver Threshold Level (dBm)	-80	-80
21	Thermal Fade Margin (dB)	57,58	57,58
22	Refractivity Gradient Below -100N/km PL (%)	10	
23	Site A Altitude (ASL) (m)	2175	50
24	Site B Altitude (ASL) (m)	50	2175
25	Site Latitude (*N or *S)	15	
26	Longitudinal Coefficient Clon (dB)	0	
27	Site A Antenna Height (AGL) (m)	25	15
28	Site B Antenna Height (AGL) (m)	15	25
29	Worst Month Availability (%)	99,999999	99,999999
30	Worst Month Outage Time (sec.)	0,02	0,02
31	One Way Annual Availability (%)	100,000000	100,000000
32	One Way Annual Outage Time (sec.)	0,04	0,04

Tabla 3.2 Cálculo de Enlace / Disponibilidad del Enlace.

Documentación Técnica

A continuación mostramos unos ejemplos de la documentación técnica que se debe tener para cada enlace de microondas, los datos y la forma de entregar varían de acuerdo con las necesidades de cada empresa.

De la presentación describimos cada uno de los puntos de una hoja de un Cálculo del Enlace, en donde está incluido el Cálculo de indisponibilidad.

Doc.	Descripción
1	Nombre del Sitio
2	Tipo de Antena
3	Ganancia de Antena (dBi)
4	Tipo de Línea de Transmisión
5	Pérdida de la Línea de Transmisión (dB/100m)
6	Longitud de la Línea de Transmisión (m)
7	Pérdida de la Línea de Transmisión (dB)
8	Pérdida de Conectores (dB)
9	Pérdida de los Combinadores / Branching
10	Tolerancia del Equipo (dB)
11	Distancia del Enlace (Km)
12	Frecuencia de Operación (GHz)
13	Atenuación en el Espacio Libre (dB)
14	Pérdida por Difracción (dB)
15	Tipo de Radio
16	Potencia de Transmisión (dBm)
17	Nivel de Recepción (dBm)
18	Potencia Isotrópica Aparentemente Radiada (EIRP) (dBm)
19	Umbral de Tasa de Error (BER)
20	Umbral de Potencia de Recepción (dBm)
21	Margen por Desvanecimiento Termal (dB)
22	Gradiente de Refracción -100N/km (Mapas para el peor mes del año) PL (%)
23	ASNM del Sitio A (m)
24	ASNM del Sitio B (m)
25	Latitud (°N or °S)
26	Coeficiente Longitudinal Clon (-3 Para Norte América y Sur América, 3 Europa y África, 0 otras longitudes) (dB)
27	Altura de la Antena en el Sitio A (AGL) (m)
28	Altura de la Antena en el Sitio B (AGL) (m)
29	Disponibilidad en el Peor Mes del Año (%)
30	Tiempo Fuera en el Peor Mes del Año (sec.)
31	Disponibilidad Anual (%)
32	Tiempo Fuera Anual (sec.)

Tabla 3.3 Documentación técnica.

Con respecto al documento del Perfil Topográfico (Fig. 3.1, debe de incluir los siguientes datos:

- Altura probable de las antenas probabilidad.
- La topografía del enlace.
- El cálculo de la primera zona de fresnel.
- La distancia del enlace.
- La frecuencia de operación del enlace.

Como ya se mencionó este documento puede contener más información, de acuerdo con la empresa (Para este caso en particular, PGR) que lo realiza.

Una vez que se autoriza el proyecto, se realiza la instalación y puesta en marcha del enlace de microondas, para lo que es necesario contar con el documento del protocolo de recepción del enlace de microondas, el cual es una referencia para el proceso de las rutinas de mantenimiento del enlace, este documento debe tener los siguientes datos¹¹:

- Nombre del enlace.
- Nivel de Potencia de Recepción.
- Nivel de Potencia de Transmisión.
- Nivel de FI.
- Voltajes de Alimentación.
- Nivel del AGC de FI y RF.
- Inventario del equipamiento de los bastidores.
- Frecuencias de operación.
- Estabilidad del Oscilador Local.
- Tipo de Antena y su Azimut.
- Tipo de Líneas de Transmisión.

11 Aldana Espejel Benito, Op. cit. pp. 180-185

- Tasa de Error (BER).
- Ancho de Banda de RF y de FI.
- Altura de la Antena.

3.7 Cálculo de un enlace real

Teniendo los parámetros anteriores procederemos a hacer un cálculo, para cuando el enlace principal (Fibra Óptica) salga de operación.

Nuestro Ejemplo será entre el Aeropuerto¹² de Kaua y Cd. Piste en Yucatán Mexico.

DATOS	PISTE	KAUA
Latitud	20ø41'50"	20ø38'19"
Longitud	88ø35'9"	88ø27'25"
ASNM (m)	27	29
Distancia entre sitios (KM)	14.90	14.90
Torre auto soportada (m)	35	25
Frecuencia (MHz)		

Tabla 3.4 Datos del sitio.

Para que la comunicación vía microondas sea viable es necesario realizar el cálculo de enlace y de indisponibilidad, por lo que debemos contar con los siguientes datos:

- 1- Coordenadas de ambos sitios (longitud y latitud)
- 2- Altura sobre el nivel del mar (ASNM)
- 3- Tipo y altura de la torre a emplear (ver perfil topográfico)
- 4- Distancia entre sitios
- 5- Frecuencia de operación

¹² Hangar de la Procuraduría General de la Republica, Policía Federal Ministerial, en Yucatán México.

También debemos de contar con la siguiente documentación técnica:

- 1- Ficha técnica del radio a instalar
- 2- Ficha técnica de antena y polarización a instalar
- 3- Ficha técnica de la guía de onda que se va emplear
- 4- A continuación describiremos los datos que necesitamos para el cálculo de enlace y de indisponibilidad del enlace de microondas:

Datos de los sitios:

Enlace: Aeropuerto Internacional de Kaua y Cd. Piste Yucatán.

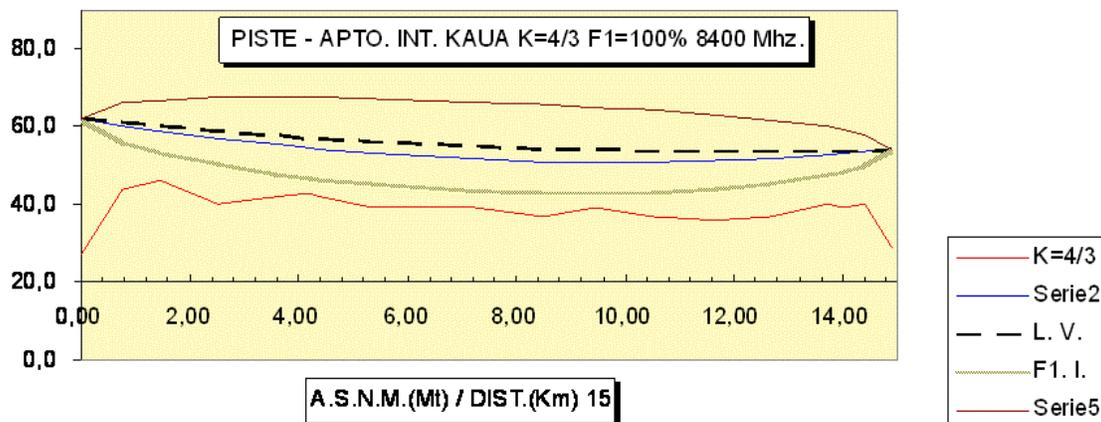


Fig. 3.3 Perfil Topográfico.

De la ficha técnica del radio NERA NL 295 a instalar se obtienen los siguientes datos:

Frecuencia de operación, la Potencia de Transmisión y la Potencia del Umbral de Recepción del equipo transmisor y receptor.



Fig. 3.4 Radio NERA NL290 en la banda de 6 GHz.

Frecuencia de operación.

Data interface	155.520 Mb/s synchronous SDH or 139.264 Mb/s plesiochronous PDH
Transmission capacity	155.520 Mb/s synchronous SDH
Frequency bands	NL 294 3.6 - 4.2 GHz NL 293 4.4 - 5.0 GHz NL 290 5.9 - 6.4 GHz NL 295 6.4 - 7.1 GHz NL 299 7.4 - 7.7 GHz NL 292 7.7 - 8.3 GHz NL 291 10.7 - 11.7 GHz NL 296 12.7 - 13.3 GHz

Tabla 3.5 Frecuencia de Operación.

Potencias de transmisión y umbral de potencia de recepción.

TRANSMITTER	
RF output level (ref. point B')	+ 29.0 dBm : NL 290, NL 293, NL 294, NL 295 + 28.0 dBm : NL 292, NL 299 + 26.0 dBm : NL 291 + 25.0 dBm : NL 296
Dynamic output power range	15 dB
Frequency stability	< ± 10 ppm
RECEIVER	
RF input level range (ref. point B)	-17 dBm to -73 dBm
Threshold for BER 1x10 ⁻³	-73 dBm
Frequency stability	< ± 10 ppm

Tabla 3.6 Potencias de Transmisión y Umbral de Potencia de Recepción

Los datos de la ficha técnica de antena que obtenemos es la ganancia, diámetro, ancho del haz (3dB-BW) y polarización a instalar.

Antenna Input ¹												5.925 - 6.875 GHz				
154 IEC-PDR 70, CPR137G																
Model Number	Diameter ft (m)	3 dB-BW (deg)	Gain (dBi)			F/B Ratio XPD (dB)		IPI (dB)	VSWR/ R L (dB)		Fine Adjustment Az (deg) Elev (deg)		Windspeed km/h (mph)	Weight kg (lb)	FCC Standard	ETSI Standard
Improved Performance, Single Polarized																
PAD6-W59A	6 (1.8)	1.70	38.4	39.1	39.7	55	30		1.08 / 28.3	± 5	± 5	200 (125)	84 (185)	A		
PAD8-W59A	8 (2.4)	1.30	40.9	41.6	42.2	57	30		1.08 / 28.3	± 5	± 5	200 (125)	130 (285)	A		
PAD10-W59A	10 (3.0)	1.1	42.7	43.4	44.0	61	30		1.08 / 28.3	± 5	± 5	200 (125)	264 (580)	A		
Improved Performance, Dual Polarized																
PADX10-W59A	10 (3.0)	1.10	42.7	43.4	44.0	59	30		1.10 / 26.4	± 5	± 5	200 (125)	264 (580)	A		

Tabla 3.7 Ficha Técnica.

Antena tipo PAD8-W59A marca RFS, que trabaja en la banda de 5.925 a 6.875 GHz, con un diámetro de 2.4 m, una ganancia de 40.9 dBi y un ancho del haz de 1.30°, en polarización vertical.

Con los datos de la Ficha técnica de la guía de onda y del perfil topográfico se va considerar la longitud de acuerdo a la altura de las torres y la atenuación de la guía de onda a la frecuencia de operación, para este enlace se empleará la EWP52S, HELIAX® Super Premium Elliptical Waveguide, 5.925–6.425 GHz.

Tabla 3.8 Ficha Técnica

General Specifications	
Brand	HELIAX® 5.925–6.425 GHz
Mechanical Specifications	
Maximum Twist	3.00 °/m 1.00 °/ft
Minimum Bend Radius, Multiple Bends (E Plane)	305.00 mm 12.00 in
Minimum Bend Radius, Multiple Bends (H Plane)	810.00 mm 32.00 in
Minimum Bend Radius, Single Bend (E Plane)	200.00 mm 8.00 in
Minimum Bend Radius, Single Bend (H Plane)	560.00 mm 22.00 in

Return Loss

Frequency Band	VSWR	Return Loss (dB)
5.925–6.425 GHz	1.05	32.30

Attenuation

Frequency (GHz)	Attenuation (dB/100 ft)	Attenuation (dB/100 m)	Average Power (kW)	Group Velocity %
5.9	1.209	3.965	5.917	78.8
6.2	1.179	3.87	6.064	80.7

Regulatory Compliance/Certifications

Agency	Classification
RoHS 2002/95/EC	Compliant
China RoHS SJ/T 11364-2006	Below Maximum Concentration Value (MCV)

Atenuación por cada 100m a la frecuencia de 6.2 GHz es de 3.87 dB, y de acuerdo al perfil topográfico para el Aeropuerto internacional de Kaua se va emplear 40m mas 30m de recorrido del centro de la torre a la sala del equipo de radio y Cd. Piste de 30m más 30m de recorrido del centro de la torre a la sala del equipo de radio.

Una vez que se tienen los datos necesarios de todos los elementos de la red, estos serán empleados para llenar los datos en el software, que nos ayudaran a realizar los cálculos de enlace y de indisponibilidad del enlace, así como el del perfil topográfico.

CALCULO DE ENLACE									
SISTEMA : PISTE - APTO. INT. KAUA					ELABORO:				
TRAMO:					FECHA: MAYO,2010				
DATOS DEL TRAMO									
ESTACION: PISTE					ESTACION: APTO. KAUA				
LATITUD :		20°41'50"			LATITUD :		20°38'19"		
LONGITUD :		88°35'9"			LONGITUD :		88°27'25"		
AZIMUTH :		115°45'46"			AZIMUTH :		295°48'30"		
0	-4	-52	ANG.ELEV.		0	-1	-10	ANG.ELEV.	
A.S.N.M. :		27 Mts			A.S.N.M. :		29 Mts		
ALT.ANTE.:		40 Mts			ALT.ANTE.:		30 Mts		
LAT	20	41	50	GG/MM/SS	LAT	20	38	19	GG/MM/SS
LON	88	35	9	GG/MM/SS	LON	88	27	25	GG/MM/SS
FRECUENCIA :		6,200 (MHZ)			K min :		0.666667		
DIST. ENTRE EST.:		14.90 (KMS)			K prom :		1.333333		
DIST.CALCULADA		14.92 (KMS)					%F1= 80		
							%F1= 100		

Tabla 3.9 Cálculo del Enlace.

Con esos datos se tiene el siguiente perfil topográfico:

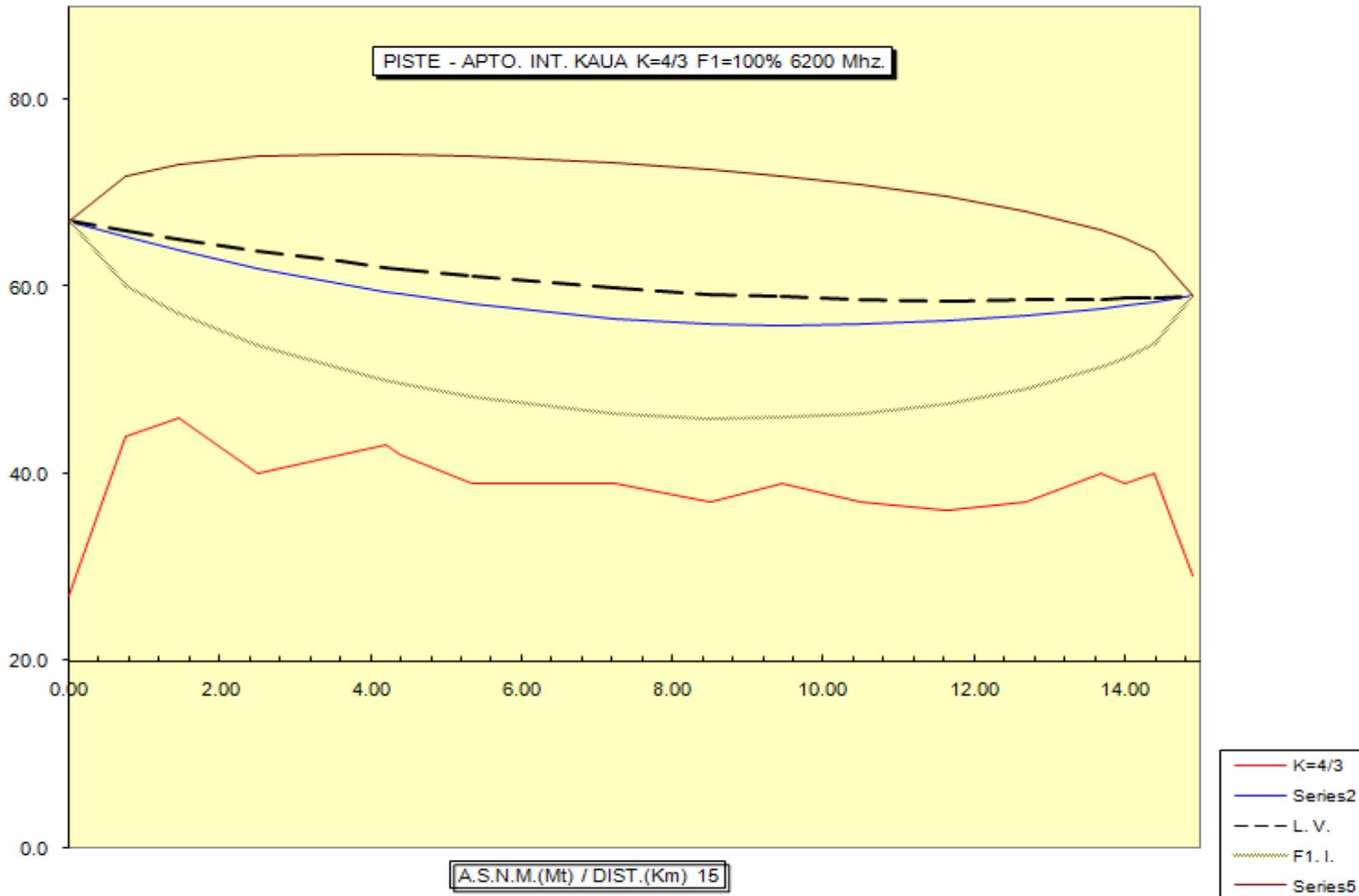


Fig.3.5 Vista del Perfil Topográfico.

PUNTO	OBSTACULOS		MARGEN FRESNEL			MARGEN FRESNEL		
	DIST. KM	ALTURA MTS	FI(%)	100 MTS	K 43 C/FI	FI(%)	80 MTS	K 23 C/FI
	0.00	27.0		40.00			40.0	
1	0.75	44.0		16.10	3.7		16.7	3.6
2	1.45	46.0		11.12	2.4		11.6	2.3
3	2.50	40.0		13.80	2.4		14.0	2.2
4	3.60	42.0		9.18	1.8		9.1	1.6
5	4.20	43.0		7.02	1.6		6.8	1.4
6	4.40	42.0		7.67	1.6		7.4	1.4
7	5.35	39.0		9.24	1.7		8.8	1.5
8	7.25	39.0		7.42	1.6		6.8	1.3
9	8.50	37.0		8.94	1.7		8.4	1.4
10	9.45	39.0	✓	6.96	1.5	✓	6.5	1.3
11	10.50	37.0	✓	9.39	1.8	✓	9.1	1.5
12	11.65	36.0	✓	11.43	2.0	✓	11.4	1.8
13	12.70	37.0	✓	12.01	2.3	✓	12.3	2.1
14	13.70	40.0	✓	11.37	2.6	✓	11.9	2.4
15	14.00	39.0	✓	13.34	3.1	✓	13.9	3.0
16	14.40	40.0	✓	14.01	3.9	✓	14.6	3.8
	14.90	29.0		30.00			30.0	
PENDIENTE M=	23.34			ALTURA PROMEDIO =	10.56			
RUGOSIDAD (S)=	2.69							
PROM. DE ALTURAS=	40.00			VEGETACION = 12m	EN PISTE 10 EN TRAYECTO			
INCLINACION=	-0.54							

Tabla 3.10 Datos del Perfil Topográfico.

En el cual se observa que la primera zona de fresnel pasa sin problema alguno con las alturas de antenas en las torres de 40 y 30 m respectivamente y que el cálculo del enlace es factible, así como el cálculo de indisponibilidad cumple con el requisito del 99.99% en el peor mes del año, como se observa a continuación.



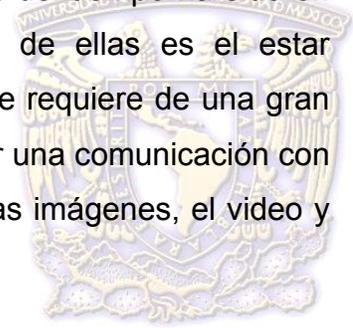
Application Note No. 7
Radio Link Calculations
(Link_Calc.xls)

Ref.	Description	Data	Data
1	Site Name	PISTE	APTO KAUA
2	Antenna Type	PAD8-W59A	PAD8-W59A
3	Antenna Gain (dBi)	40.9	40.9
4	Transmission Line Type	EWP52S	EWP52S
5	Transmission Line Loss (dB/100m)	3.87	3.87
6	Transmission Line Length (m)	60	70
7	Transmission Line Loss (dB)	2.32	2.71
8	Connector Loss (dB)	1	1
9	Divider / Combiner Loss (dB)	0	0
10	Equipment Tolerances (dB)	0.5	0.5
11	Path Length (Km)	14.90	
12	Frequency (GHz)	6.2	
13	Free Space Attenuation (dB)	131.76	
14	Diffraction Loss (dB)	0	
15	Radio Type	TERMINAL	TERMINAL
16	Transmitter Power (dBm)	29	29
17	Free Space Receive Signal Level (dBm)	-28.99	-28.99
18	Active Isotropic Radiated Power (EIRP) (dB)	65.08	65.69
19	Receiver Threshold Criteria (BER)	BER 10 EXP-6	BER 10 EXP-6
20	Receiver Threshold Level (dBm)	-73	-73
21	Thermal Fade Margin (dB)	44.01	44.01
22	Refractivity Gradient Below -100M/km PL (%)	10	
23	Site A Altitude (ASL) (m)	40	30
24	Site B Altitude (ASL) (m)	30	40
25	Site Latitude (°N or °S)	20	
26	Longitudinal Coefficient C _{long} (dB)	0	
27	Site A Antenna Height (AGL) (m)	25	15
28	Site B Antenna Height (AGL) (m)	15	25
29	Worst Month Availability (%)	99.999972	99.999972
30	Worst Month Outage Time (sec.)	0.74	0.74
31	One Way Annual Availability (%)	99.999994	99.999994
32	One Way Annual Outage Time (sec.)	2.00	2.00

Tabla 3.11 Cálculo para El Radio Link.

Conclusiones

El avance tecnológico que el hombre ha realizado a través del tiempo ha sido en gran parte para satisfacer diversas necesidades y una de ellas es el estar comunicado, sea cual sea la manera de hacerlo, el hombre requiere de una gran cantidad de elementos y técnicas que le permitan mantener una comunicación con sus semejantes, siendo los medios para hacerlos la voz, las imágenes, el video y los datos.



El aumento dramático de la demanda de servicios y el correspondiente aumento que implica sobre la red, se ha visto acompañado de exigencias crecientes para proporcionar un servicio de gran calidad. Los usuarios ahora esperan no solo rapidez de los servicios sino también un alto grado de disponibilidad de lo contratado.

Al realizar un proyecto de microondas es porque en la zona donde se van a crear nuevos servicios no es costeable, ya que al hacer el tendido de líneas físicas provocaría alza en todo el proyecto y por ende la posible suspensión del mismo.

Por otra parte, para un enlace o toda una red de microondas sea construida, dependerá de la aprobación y justificación a cuanto a inversión se refiere, ya que cada compañía que solicita la ampliación (en este caso Policía Federal Ministerial) de su red determinará cual será la mejor opción para crecer tomando en cuenta los medios que se encuentran a su disposición. Por lo tanto la decisión que se tome se definirá por la ingeniería de cada compañía.

Con los datos obtenidos de los cálculos de enlace y de indisponibilidad así como el del perfil topográfico, es posible la instalación del mismo, cumpliendo con los estándares nacionales e internacionales, para este tipo de proyectos de microondas.

Si quisiéramos un enlace que cumpla el 100% del cálculo de indisponibilidad en el peor día de año, se tiene que modificar cualquiera de los siguientes tres parámetros del enlace:

- a) Aumentar la potencia de de transmisión.
- b) Comprar antenas de mayor ganancia es decir de más diámetro pero eso implica mayor costo en el proyecto.
- c) Usar los nuevos equipos de radio que tienen dos cajas de equipamiento IDO (In Door Unit) y ODU (Out Door Unit) la primera tiene todos los elementos del demodulador y de FI, la segunda, la parte de RF lo cual elimina la parte potencial de los tramos largos de guía de onda, ya que prácticamente se encuentran juntos la sección de RF con la antena.



ODU TIPO I

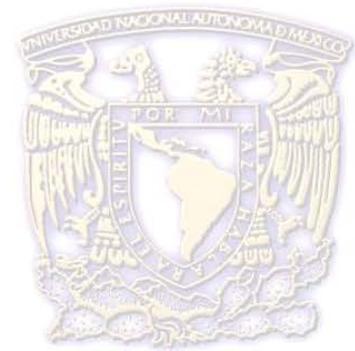


ODU TIPO II

El propósito de este trabajo de tesis es el realizar un enlace de microondas en el caso de la ruptura del medio de comunicaciones de fibra óptica, que es utilizado por la Procuraduría General de la Republica (PGR), en sus diferentes bases de Policía Federal Ministerial (Antes Agencia Federal de Investigaciones), ya que al

no contar con un respaldo propio se corre el riesgo de no atender el trabajo que se nos ha encomendado.

Juan Antonio Hernández Molina.



ANEXO

Radio digital

Los elementos que distinguen un sistema de radio digital de un sistema de radio AM (Amplitud Modulada), FM (Frecuencia Modulada), o PM (Modulación en Fase), es que en un sistema de radio digital, las señales de modulación y demodulación son pulsos digitales, en lugar de formas de ondas analógicas. El radio digital utiliza portadoras analógicas, al igual que los sistemas convencionales. En esencia, hay tres técnicas de modulación digital que se suelen utilizar en sistemas de radio digital: transmisión (modulación) por desplazamiento de frecuencia (FSK), transmisión por desplazamiento de fase (PSK), y modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

PSK - Desplazamiento de fase.

PSK (Phase-shift keying), es una modulación de fase donde la señal moduladora (datos) es digital.

Existen dos alternativas de modulación PSK: PSK convencional, donde se tienen en cuenta los desplazamientos de fase y PSK diferencial, en la cual se consideran las transiciones, ver figura A1.

Las consideraciones que siguen a continuación son válidas para ambos casos.

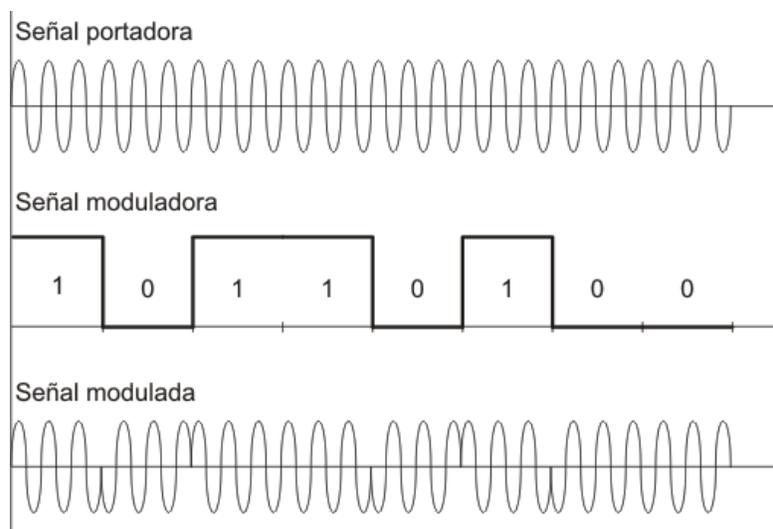


Fig. A1 Alternativas de modulación.

En PSK el valor de la señal moduladora está dado por

$$v_m(t) = v_m(t) = \begin{cases} 1 & \text{para un "1" binario} \\ -1 & \text{para un "0" binario} \end{cases}$$

Mientras que la señal portadora vale:

$$v_p(t) = V_p \cos(2\pi f_p t)$$

En donde V_p es el valor pico de la señal portadora y f_p es la frecuencia de la señal portadora.

La modulación PSK está caracterizada por

$$v(t) = v_p(t) \cdot v_m(t)$$

O sea

$$v(t) = V_p \cdot V_m \cos(2\pi f_p t)$$

Luego para $V_m = 1$

$$v(t) = V_p \cos(2\pi f_p t)$$

Y para $V_m = -1$

$$v(t) = -V_p \cos(2\pi f_p t) = V_p \cos(2\pi f_p t + \pi)$$

Entre las dos últimas expresiones de $v(t)$, existe una diferencia de fase de 180° , y la señal varía entre dos fases, es por ello que se denomina 2PSK.

Al sistema modulador de 2PSK se lo suele comparar con una llave electrónica controlada por la señal moduladora, la cual conmuta entre la señal portadora y su versión desfasada 180° .

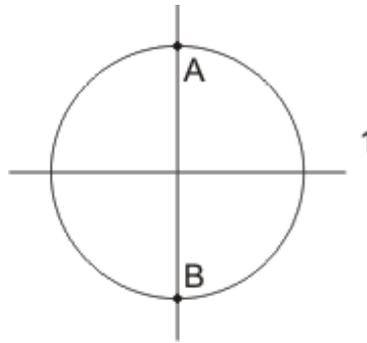


Fig. A2 Esquema para 2 PSK. El radio de la circunferencia es igual a 1 y representa la amplitud normalizada de la portadora.

En el sistema PSK convencional es necesario tener una portadora en el receptor para sincronización, o usar un código autosincronizante, por esta razón surge la necesidad de un sistema PSK diferencial. Es diferencial puesto que la información no está contenida en la fase absoluta, sino en las transiciones. La referencia de fase se toma del intervalo inmediato anterior, con lo que el detector decodifica la información digital basándose en diferencias relativas de fase¹.

Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM), es una forma de modulación digital en donde la información digital está contenida, tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida.

QAM de ocho (8-QAM)

El QAM de ocho (8-QAM), es una técnica de codificación M-ario, en donde $M = 8$. A diferencia del 8-PSK, la señal de salida de un modulador de 8-QAM no es una señal de amplitud constante.

Transmisor de QAM de ocho

La figura A3 muestra el diagrama a bloques de un transmisor de 8-QAM. Como pueda verse, la única diferencia, entre el transmisor de 8-QAM y el transmisor de 8-PSK es la omisión del inversor entre el canal C y el modulador da producto Q.

¹ <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/psk> , 04/09/2010

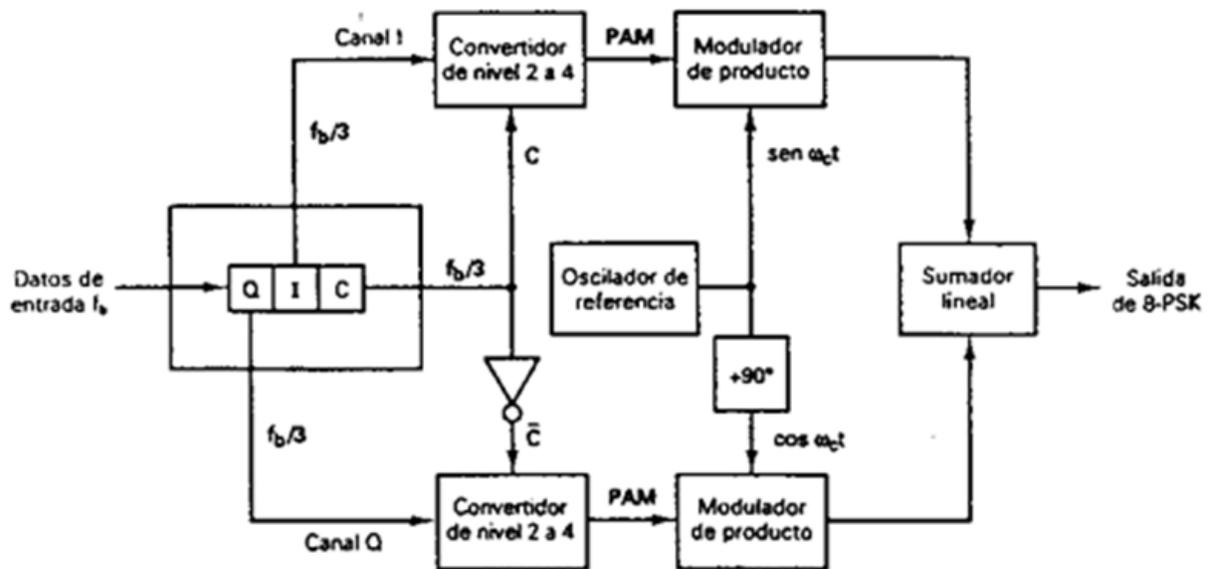


Fig. A3 Transmisor 8QAM

Consideraciones del ancho de banda para el QAM de ocho.

En el 8-QAM, la tasa de bits, en los canales I y Q, es un tercio de la tasa binaria de entrada, al igual que con el 8-PSK. Como resultado, la frecuencia de modulación fundamental más alta y la razón de cambio de salida más rápida en 8-QAM, son iguales que para el 8-PSK. Por tanto, el mínimo ancho de banda requerido para 8-QAM es $f_b/3$, al igual que en el 8-PSK.

Receptor de QAM de ocho

Un receptor de 8-QAM es casi idéntico al receptor de 8-PSK. Las diferencias son los niveles PAM, en la salida de los detectores de producto, y las señales binarias a la salida de los convertidores analógico a digital. Debido a que hay dos amplitudes de transmisión posibles, con 8-QAM, que son diferentes de aquellas factibles con el 8-PSK, los cuatro niveles PAM demodulados son diferentes de aquellos en 8-PSK. En consecuencia, el factor de conversión para los convertidores analógico a digital, también tienen que ser diferentes. Además, con el 8-QAM las señales de salida binarias del convertidor analógico a digital, del canal I, son los bits I y C, y las señales de salida binarias del convertidor analógico a digital, del canal Q, son los bits Q y C.

QAM DE DIECISÉIS (16-QAM)

Así como en 16-PSK, el 16-QAM es un sistema M-ario, en donde $M=16$. Actúa sobre los datos de entrada en grupos de cuatro ($2^4 = 16$). Como con el 8-QAM, tanto la fase y la amplitud de la portadora transmisora son variados.

Transmisor QAM de dieciséis

El diagrama a bloques para un transmisor de 16-QAM se muestra en la figura A4. Los datos de entrada binaria se dividen en cuatro canales: El I, I', Q y Q'. La tasa de bits de cada canal es igual a un cuarto de la tasa de bits de entrada ($f_b/4$).

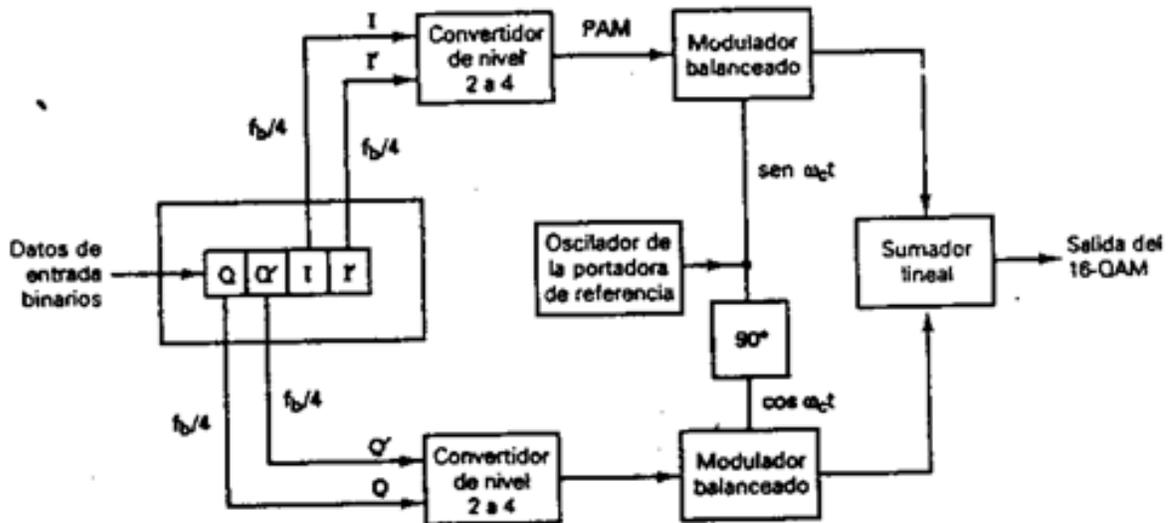


Fig. A4 Transmisor QAM de dieciséis

Consideraciones del ancho de banda para el QAM de dieciséis

Con el 16-QAM, ya que los datos de entrada se dividen en cuatro canales, la tasa de bits en el canal I, I', Q o Q' es igual a un cuarto de la tasa de datos de entrada binarios ($f_b/4$). (El derivador de bits estira los bits I, I', Q y Q', a cuatro veces su longitud de bits de entrada). Además, debido a que estos bits tienen salidas de manera simultánea y en paralelo, los convertidores de nivel 2 a 4 ven un cambio

en sus entradas y salidas a una fase igual a un cuarto de la tasa de datos de entrada².

Las distintas formas de FSK, PSK y QAM se resumen en la tabla 1.

Modulación	Codificación	BW (Hz)	Baudio	BW (bps/Hz)
FSK	Bit	f_b	f_b	1
BPSK	Bit	f_b	f_b	1
QPSK	Dibit	$f_b / 2$	$f_b / 2$	2
8-QPSK	Tribit	$f_b / 3$	$f_b / 3$	3
8-QAM	Tribit	$f_b / 3$	$f_b / 3$	3
16-QPSK	Quadbit	$f_b / 4$	$f_b / 4$	4
16-QAM	Quadbit	$f_b / 4$	$f_b / 4$	4

TABLA 1: RESUMEN DE LA MODULACIÓN DIGITAL

Tecnologías de Transporte

Las redes troncales de telecomunicaciones transportan tráfico de diferentes fuentes mediante la compartición de los sistemas de transmisión y de conmutación entre los distintos usuarios. La capacidad de los enlaces entre centrales de conmutación varía, desde las tasas mínimas, correspondientes a centrales locales, periferia de la red troncal, etc.; hasta las tasas más altas, requeridas, por ejemplo, por los enlaces entre grandes centrales de conmutación y de tránsito. En nuestros días se utilizan diferentes tecnologías de transmisión.

En los primeros años de la telefonía analógica se utilizaba multiplexación por división en frecuencia o FDM (*Frequency Division Multiplexing*) para transportar un largo número de canales telefónicos sobre un único cable coaxial. La idea era modular cada canal telefónico en una frecuencia portadora distinta para desplazar las señales a rangos de frecuencia distintos. Los sistemas de transporte analógicos han sido ahora abandonados y reemplazados por sistemas de

² <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>, 04/09/2010.

transporte digitales, donde la señal telefónica es digitalizada, es decir, es convertida en una ristra de bits para su transmisión por la línea. Para ello la señal telefónica analógica es muestreada a una frecuencia de 3,1 KHz, cuantificada y codificada y después transmitida a una tasa binaria de 64 Kbps. Mediante la modulación de impulsos codificados o PCM (*Pulse Code Modulation*), que aparecían en la primera década de los 60. PCM permite la utilización múltiple de una única línea por medio de la multiplexación por división en el tiempo o TDM (*Time Division Multiplexing*), consistente en segregar muestras de cada señal en ranuras temporales que el receptor puede seleccionar mediante un reloj correctamente sincronizado con el transmisor.

El primer estándar de transmisión digital fue PDH, pero sus limitaciones resultaron en el desarrollo de SONET y SDH. Las dos tecnologías se basan en multiplexores digitales que, mediante técnicas de multiplexación por división en el tiempo o TDM permiten combinar varias señales digitales (denominadas señales de jerarquía inferior o señales tributarias) en una señal digital de velocidad superior. La última tecnología de transmisión en aparecer, ha sido *DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)*, caracterizada por sus altísimas capacidades de transmisión, su transparencia sobre los datos de jerarquías inferiores, y por una transmisión totalmente óptica. En este artículo nos centramos en la tecnología SDH, en pleno proceso de implantación y líder del mercado actual de sistemas de transmisión.

Concepto de PDH

El primer estándar de transmisión digital fue PDH (*Plesicronous Digital Hierarchy*) o JDP (Jerarquía Digital Plesiócrona), aparecido durante la década de los sesenta y primeros de los setenta. Los equipos PDH han copado el volumen del mercado, aún a principio de los noventa, estando actualmente en pleno declive frente a SDH y DWDM.

La tasa de bit de transmisión mínima o primaria utilizada era de 2 Mbps en Europa y 1,5 Mbps en USA y Japón, lo cual corresponde a 30 y 24 circuitos telefónicos,

respectivamente. También eran posibles tasas de bit superiores multiplexando esas señales, como se muestra, por ejemplo, en la Tabla 1 para el caso de la norma europea. Las tasas de bit en cada una de las normas no coinciden, y las superiores a 139.264 Mbps, por ejemplo los 564.992 Mbps, son en todas ellas propietarias, es decir, no han sido estandarizadas. En la Tabla 2 se presenta el caso de la norma norteamericana.

Tasa de bit (en Kbps)	Señales multiplexadas del nivel inferior
64	
2.048	30
8.448	4
34.368	4
139.264	4

Tabla 1: Estructura de PDH en Europa.

Tasa de bit (en Kbps)	Señales multiplexadas del nivel inferior
64	
1.544	24
6.312	4
44.736	7
139.264	3

Tabla 2: Estructura de PDH en Norte América.

Generalmente, las señales que son multiplexadas proceden de fuentes distintas, pudiendo haber ligeras diferencias entre la velocidad real de los distintos flujos de información debidas a variaciones en los tiempos de propagación, falta de sincronización entre las fuentes, etc. Este tipo de señales no sincronizadas reciben el nombre de plesiócronas. La naturaleza plesiócrons de las señales requería de técnicas de relleno, consistentes en la reserva de una capacidad de transmisión superior a la requerida, para eliminar la falta de sincronismo.

Durante los años 80 en que tuvo lugar la digitalización de las grandes redes públicas, los equipos PDH se instalaron masivamente por todo el mundo. No obstante, pronto se encontraron serias limitaciones:

- La rigidez de las estructuras plesiócronicas de multiplexación hacían necesaria la demultiplexación sucesiva de todas las señales de jerarquía inferior para poder extraer un canal de 64 Kbps. La baja eficiencia de este proceso, suponía baja flexibilidad en la asignación del ancho de banda y una mayor lentitud en el procesamiento de las señales por parte de los equipos.
- La información de gestión que puede transportarse en las tramas PDH es muy reducida, lo cual dificulta la supervisión, control y explotación del sistema.
- La falta de compatibilidad entre los distintos sistemas PDH y la adopción de estándares propietarios por parte de los fabricantes, dificultaba la interconexión entre redes de incluso un mismo operador.
- Los grandes avances del hardware y software, así como la entrada de la fibra óptica como medio de transmisión, no eran aprovechados por los sistemas PDH.

Concepto de SDH

Todas las carencias presentadas por PDH propiciaron la definición en 1988 por parte de la ITU (*International Telecommunications Union*) de un nuevo estándar mundial para la transmisión digital, denominada SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) o JDS (Jerarquía Digital Síncrona) en Europa, y SONET (*Synchronous Optical Network*) en Norte América.

El principal objetivo era la adopción de una verdadera norma mundial. Este estándar especifica velocidades de transmisión, formato de las señales (tramas de 125 microsegundos), estructura de multiplexación, codificación de línea,

parámetros ópticos, etc.; así como normas de funcionamiento de los equipos y de gestión de red.

El estándar SDH parte de una señal de 155,520 Mbps denominada módulo de transporte síncrono de primer nivel o STM-1. La compatibilidad con PDH es garantizada mediante distintos contenedores: C-11 para señales de 1,5 Mbps, C-12 para 2 Mbps, C-2 para 6,3 y 8 Mbps, etc; como se muestra en la Figura A5. Los restantes STM-N se obtienen mediante el entrelazado de bytes de varias señales STM-1. En la actualidad se encuentran normalizados los valores de: STM-4 (622,08 Mbps), STM-16 (2.488,32 Mbps) y STM-64 (9.953,28 Mbps). En SONET, que puede considerarse un subconjunto de SDH, se parte de una velocidad de transmisión de 51,840 Mbps.

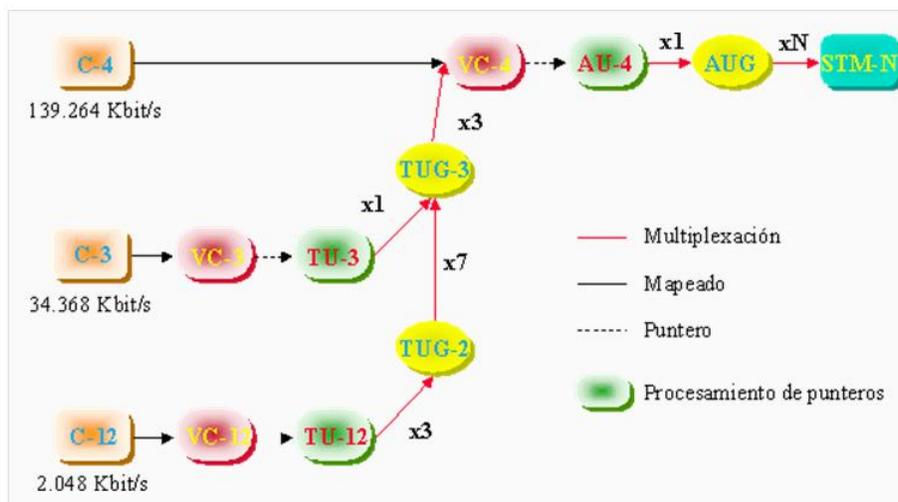


Fig. A5 Estructura de multiplexación SDH.

Frente a las estructuras malladas de las redes PDH, SDH apuesta por arquitecturas en anillo, constituidas por multiplexores de extracción e inserción de señales o ADMs (*Add and Drop Multiplexer*), unidos por 2 o 4 fibras ópticas. Los anillos permiten conseguir redes muy flexibles, pudiendo extraer señales tributarias del tráfico agregado en cualquiera de los nodos que conforman el anillo.

Dadas las altas velocidades transmitidas, la seguridad es un requisito a tener muy en cuenta en las redes de transporte. Se ha comprobado que se produce un corte anualmente por cada 300 Km de fibra instalados.

La solución de protección 1+1 da lugar a los denominados anillos híbridos autorregenerable, en los cuales el tráfico se encamina simultáneamente por dos caminos, siendo recogido en el nodo destinatario. En caso de la caída de algún equipo intermedio o el corte de una fibra, el nodo destinatario conmutará al otro camino, lo cual es conseguido en menos de 50 ms.

Puesto que las tramas SDH incorporan información de gestión de los equipos, es posible tanto la gestión local como la centralizada de sus redes. Esta gestión se realiza a través de las interfaces Q definidas por el ITU. La gestión local atiende a un control descentrado de los distintos nodos, mediante sistemas de operación local.

La centralizada, adecuada para entornos SDH puros sin PDH, se basa en el control de todos los nodos mediante un único sistema de operaciones central.

La flexibilidad en el transporte de señales digitales de todo tipo permite la provisión de todo tipo de servicios sobre una única red SDH: servicio de telefonía, provisión de redes alquiladas a usuarios privados, creación de redes MAN y WAN, servicio de videoconferencia, distribución de televisión por cable, etc.

En estos momentos los operadores de telecomunicaciones, tras varias pruebas piloto durante los primeros años de los noventa, están introduciendo masivamente sistemas SDH en sus redes.

Ventajas e inconvenientes de SDH

Aunque los usuarios finales se beneficiarán de SDH de forma indirecta, puesto que ésta potenciará el desarrollo e implantación de sistemas de banda ancha de

alta calidad y fiabilidad, sus beneficios directos recaerán sobre los explotadores de redes:

- Reducción de coste de los equipos de transmisión. Las razones principales son la posibilidad de integrar las funciones de transmisión, multiplexación e interconexión en un solo equipo; y la alta competencia entre proveedores de equipos debida a la alta estandarización de SDH.
- El acceso directo a las señales de cualquier nivel sin necesidad de demultiplexar en todos los niveles.
- La sencilla explotación debida a la incorporación de información de gestión adicional en las tramas de información de datos lo cual permite el mantenimiento centralizado, rápida y exacta localización de averías, el reencaminamiento automático, la monitorización permanente de la calidad del circuito, etc.
- La amplia gama de anchos de banda de transmisión y la posibilidad de acceder directamente a las señales de cualquier nivel sin necesidad de demultiplexar en todos los niveles inferiores, permiten la creación de una infraestructura de red muy flexible y uniforme.
- La compatibilidad multifabricante a nivel de interfaces de transporte y de explotación, lo cual garantizará la integración de las redes de los distintos operadores.
- La convergencia con ATM e IP, y la capacidad de interfuncionamiento simultáneo con PDH.

Actualmente se tienen en servicio sistemas SDH de diferentes velocidades binarias y capacidad de tributarias de 2 a 140 Mb/s (Fig. A6)

Sistema SDH	Trib 2 Mbs (E1)	Velocidad (Mbs)	Ctos. 64 Kbs (E0)
STM 1	63	155.520	1890
STM 4	252	622.080	7560
STM 16	1008	2 488.320 (2.5 Gbs)	30240
STM 64	4032	9 953.280 (10 Gbs)	120960
STM 256	16128	39 813.120 (40 Gbs)	483840

Fig. A6 Velocidades binarias SDH.

Como única desventaja de SDH tenemos los menores anchos de banda soportados frente a la DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) o multiplexación por división en longitud de onda. La DWDM es una novedosa tecnología de transmisión, aún inmadura y poco estandarizada, consistente en la multiplexación de varias señales ópticas, cada una a una longitud de onda o frecuencia óptica diferente, sobre la misma fibra, permitiendo aprovechar el caro y escaso tendido de fibra óptica monomodo convencional existente. Los anchos de banda comercialmente disponibles actualmente mediante DWDM, llegan hasta los 400 Gbps, resultado de multiplexar 40 canales SDH STM-64³.

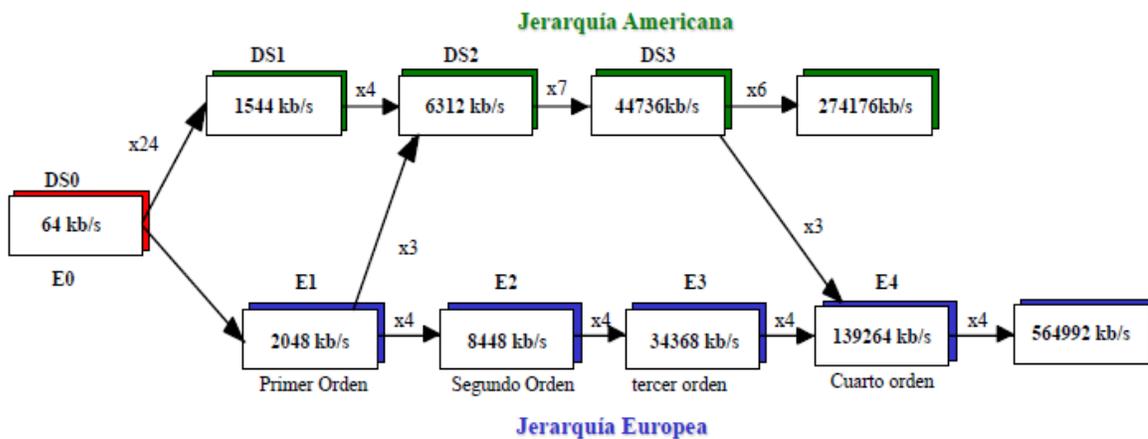


Fig. A6 Comparación de jerarquías americana-europea

³ Millán Ramón Jesús Tejedor, Publicado en Windows NT/2000 Actual nº 16, Prensa Técnica S.A., 1999, 04/09/2010 <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/sdh.php>

Bibliografía

- ❖ Alcatel, Manual de radio enlace, Estado de México, Alcatel 2008
- ❖ Alcatel, Introducción a las microondas, Estado de México, Alcatel 2005
- ❖ Aldana Espejel Benito, Localización de sitios para enlace de microondas, Inttelmex, Ciudad de México, 2006.
- ❖ Aldana Espejel Benito, Manual de radio y microondas, Inttelmex, Ciudad de México 2002.
- ❖ Digital Radio Theory and Measurements, HP, Septiembre, 1990.
- ❖ Hayt Williams H, Teoría Electromagnética, Mc Graw Hill, Ciudad de México, 2006.
- ❖ Recomendación UIT-R P.530-12 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa, (Cuestión UIT-R 204/3), (2001--2005-2007).
- ❖ Recomendación UIT-R P.530-12, Criterios de planificación para el despejamiento del trayecto, (2002-2007).
- ❖ Training Radio DRS 140/16/6700 (DM41U6), Estad de Mexico, Alcatel.2008.

Referencias Electrónicas

Diseño y Hosting Innova Technologies, 04/04/2010, <http://www.radiocomunicaciones.net/radio-enlaces.html>

Ernst Weber and Frederik Nebeker, The Evolution of Electrical Engineering, IEEE Press, 04/09/2010
http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_de_transmisi%C3%B3n

<http://materias.fi.uba.ar/6209/download/6-Lineas1.pdf.%202004>

Condumex 2005 Derechos Reservado, 04/09/2010,
http://www.condumex.com.mx/Portal_Cdx/Sectores/Cables/

UNITEC*-Ing. Jorge Alvarez. 04/09/2010 http://www.ooocities.com/uniteciec/guia_onda.html

Diseño y Hosting Innova Technologies 04/09/2010, <http://www.radiocomunicaciones.net/radio-enlaces.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Azimuth>

http://epg.modot.org/index.php?title=230.2_Vertical_Alignment, 04/09/2010.

<http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/6/65/AnexoJKL-Marcomun.pdf>, 04/09/2010.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-12 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa, p. 3, 04/09/2010, (1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2001-2005- 2007).

<http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.530-12-200702-!!!PDF-S.pdf>

<http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/psk> 04/09/2010

<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php> 04/09/2010

Millán Ramón Jesús Tejedor, Publicado en Windows NT/2000 Actual nº 16, Prensa Técnica S.A., 1999, 04/09/2010
<http://www.ramonmillan.com/tutoriales/sdh.php>

Glosario

AM	Modulación en amplitud.
ASNM	Altura Sobre el Nivel del Mar.
BB	Banda Base.
BER	Relación de la tasa de error.
C	Velocidad de la luz (299.793 E 06 m/s).
CCITT	Ver UIT.
D, d1, d2	Distancia entre sitios, o parcial.
dBi	Decibeles Isotrópicos.
dB	Decibeles.
dBm	Decibeles referenciados a 1mW.
E	Campo eléctrico.
FDM	Multiplexaje por división en frecuencia.
FEC	Código de errores hacia delante.
FI	Frecuencia Intermedia.
FM	Modulación en frecuencia.
Ga1	Ganancia de antena 1.
Ga2	Ganancia de antena 2.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global.
H	Campo magnético.
HL	Altas frecuencias.
JITTER	Fluctuación de fase.
LF	Frecuencias bajas.
λ	Longitud de Onda.
LOS	Transmisión de línea de vista.
MF	Frecuencias medias.
MF	Frecuencias medias.
MOD	Modulador.
MUX	Multiplexor.
OL	Oscilador local.

OEM	Onda electromagnética.
PCM	Modulación por impulsos codificados.
PDH	Jerarquía digital plesiócrona.
Ple	Pérdida en el espacio libre.
PSK	Modulación por desplazamiento de fase.
QAM	Modulación por amplitud en cuadratura.
RF	Radio Frecuencia.
RF	Radio de la primera zona de Fresnel.
ROE	Relación de onda estacionaria (VSWR).
Scrambler	Aleatorizador.
SDH	Jerarquía digital síncrona.
SE	Segundos errados.
SHF	Super altas frecuencias.
SME	Segundos severamente errados.
STM-n	Módulo de transferencia síncrona de nivel "n".
TCM	Modulación codificada de viterbi (Trellis Coded Modulation).
TDM	Multiplexaje por división en el Tiempo.
TEM	Onda electromagnética transversal.
UHF	Ultra altas frecuencias.
UI	Intervalos unitarios.
UIT	Unión internacional de telecomunicaciones antes UIT-T.
VC-n	Contenedor virtual de nivel "n".
VLF	Muy bajas frecuencias.