



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS
DE MICROONDAS PARA RADIOENLACES FIJOS
TERRESTRES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA: ELECTRICA - ELECTRONICA)
P R E S E N T A:
VICENTE ULISES SANTIAGO GOMEZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. ADRIAN PAREDES ROMERO

MÉXICO

2005

m. 344360



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

La Dirección General de Asesoría Jurídica y
Asesoría y difusión de temas legales, a cargo
del Sr. Director, Sr. [Nombre], en el
[Lugar]

Atestada por Vicenta Olivas.....

Santiago Gómez.....

FECHA: 02/04/05.....

FIRMA: [Firma].....

El conocimiento no se adquiere de manera casual ni se obtiene de una manera sencilla, sino con el esfuerzo, dedicación y gusto de hacerlo; y que aún hasta el esfuerzo más pequeño tiene su recompensa....

AGRADECIMIENTOS

A mamá y papá por su cariño, confianza y paciencia durante todos estos años. Sin olvidar a todos mis hermanos.



A mi amigo Manuel Torres por sus enseñanzas y haberme alentado a seguir este arduo y agradable camino que es la universidad.



Para mi asesor Adrián, que con su ayuda dio forma y estructura a esta tesis.



Para todos mis profesores, en especial a Luis Ramírez Flores que me hizo ver más sencillas y agradables las matemáticas contribuyendo también en la explicación de algunos cálculos mostrados en esta tesis.



Sin olvidarme de todos y cada uno de mis compañeros y amigos de batalla, que gracias a sus críticas aprendí a ser mejor.



A mi universidad, por haberme formado profesionalmente.

Índice

Objetivo

Introducción

CAPÍTULO I. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	1
I.1 Introducción.	1
I.2 Ondas electromagnéticas.	2
I.2.1 Ondas terrestres.	
I.2.2 Ondas espaciales.	
I.2.2.1 Ondas troposféricas y ondas ionosféricas.	
I.2.3 Influencia de la ionosfera sobre las ondas electromagnéticas.	
I.2.3.1 Influencia de las diferentes capas.	
I.2.3.2 Influencia de la frecuencia sobre la propagación en la ionosfera.	
I.2.4 Problemas en la propagación de las ondas.	
I.3 Clasificación de las ondas.	13
a) Electromagnética.	
b) Radiocomunicación.	
I.4 Relación entre el comportamiento de la onda y la banda de operación.	15
 CAPÍTULO II. MICROONDAS	 17
II.1 Introducción.	17
II.2 Región y longitud de onda de las microondas.	18
II.3 Decibeles.	19
II.4 Generadores de señal.	23
II.4.1 El Klystron.	
II.4.1.1 Aplicaciones.	
II.4.2 El Magnetrón.	
II.4.2.1 Aplicación.	
 CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA	 29
III.1 Refracción.	29
III.1.1 Línea de vista al horizonte.	
A) Cálculo de la distancia en línea de vista real.	
B) Cálculo de la distancia al horizonte con el radio modificado.	
III.1.2 Comportamiento de k .	
III.1.3 Corrección de la curvatura terrestre.	
III.2 Reflexión de la onda electromagnética.	36
a) En una superficie plana.	
b) En una superficie esférica.	
c) Cuando existe una diferencia muy grande en las alturas entre los puntos de transmisión y recepción.	
III.3 Difracción.	41
III.4 Zonas de Fresnel.	42

CAPÍTULO IV. SISTEMA RADIADOR	50
IV.1 Introducción.	50
IV.2 Concepto de radiación.	51
IV.3 Tipología de antenas.	54
IV.4 Antena Isotrópica.	55
IV.5 Radiador tipo dipolo.	56
IV.6 Dipolo de media onda.	57
IV.6.1 Radiación de un dipolo.	
IV.7 Ganancia y direccionalidad.	57
IV.8 Área efectiva.	59
IV.9 Potencia aparente y efectiva radiada por una antena.	59
IV.10 La antena parabólica.	60
IV.11 Densidad de potencia e intensidad de campo en el espacio, radiada por un Radiador isotrópico.	65
IV.12 Campo radiado por una antena parabólica.	65
a) Campo cercano.	
b) Campo lejano.	
c) Región de transición.	
IV.13 Antenas reflectoras típicas utilizadas en los radio enlaces terrestres.	70
IV.13.1 Construcción.	
IV.13.2 Eficiencia.	
IV.13.3 Características.	
 CAPÍTULO V. LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	 75
V.1 Introducción.	75
V.2 Tipos de líneas y sus aplicaciones.	76
V.3 Conceptos generales de una línea de transmisión.	80
V.3.1 Impedancia característica de una línea.	
V.3.2 Líneas equilibradas.	
V.3.3 Relación de ondas estacionarias.	
a) Corto circuito.	
b) Circuito abierto.	
V.3.4 Efectos de la ROE.	
V.4 Coeficiente de reflexión.	86
V.5 Efecto pelicular.	88
V.6 Cable coaxial.	89
V.6.1 Descripción física y características principales.	
V.6.2 El cable coaxial RG y Heliax.	
V.7 Guías de onda.	92
V.7.1 Dispositivos utilizados en guías.	
a) Acopladores.	
b) Circuladores.	
c) Aisladores.	
d) Filtros.	

V.7.2 Diferencias entre la línea coaxial y la guía de onda.

CAPÍTULO VI. EQUIPO DE MICROONDAS UTILIZADO EN LOS RADIOENLACES FIJOS TERRESTRES	98
VI.1 Introducción.	98
VI.2 Etapas básicas.	99
VI.2.1 Banda base.	
VI.2.1.1 Protección del enlace mediante conmutación.	
VI.2.1.2 Temporización.	
VI.2.1.3 Canales de servicio y supervisión.	
VI.2.1.4 Operación de BI/BE.	
VI.2.2 Modem y transreceptor.	
a) Etapa modulador-demodulador.	
b) Etapa transmisor-receptor.	
VI.3 Sistemas de baja y media capacidad.	105
VI.3.1 Sistemas SDH.	
VI.4 Los modelos Alcatel 9400 UX.	108
VI.4.1 Descripción simplificada.	
VI.4.2 Configuraciones.	
VI.4.3 Características.	
VI.4.3.1 Software del equipo.	
VI.5 Funcionamiento de las configuraciones.	114
VI.5.1 Configuración 1 + 0.	
VI.5.2 Configuración básica 1 + 1.	
VI.5.2.1 Configuración HSB con un acceso de antena.	
VI.5.2.2 Configuración HSB con dos accesos de antena.	
VI.5.2.3 Configuración de diversidad de frecuencia.	
VI.6 Software de configuración.	118
Conclusiones.	128
Bibliografía.	129
Mesografía.	130
Anexos.	131

Objetivo

Explicar e inducir en función de conceptos básicos la información necesaria para entender los sistemas de transmisión y recepción, así como el tratamiento de la información de un equipo de microondas para radioenlaces terrestres.

A diferencia de un manual que instruye al operador a instalar, poner en servicio y explotación del mismo; este trabajo brinda una serie de definiciones y conceptos teóricos, tales como: la naturaleza de la onda electromagnética, su comportamiento cuando se propaga en la atmósfera, longitud de onda y muchas otras más; considerando necesarios para un mejor análisis del enlace, con estos equipos.

Introducción

El uso de señales electromagnéticas de alta frecuencia se ha extendido considerablemente desde mediados del siglo XX. Hertz contribuyó con una notable labor en el desarrollo de sistemas para la generación, propagación y detección de ondas electromagnéticas de alta frecuencia, ya que para entonces los fundamentos teóricos como las ecuaciones de Maxwell eran conocidas.

El concepto de “microondas” no está adscrito a un rango de frecuencias con unos límites universalmente aceptados y es aplicado para aquellas señales en cuya generación, propagación y procesamiento se utilizan un conjunto de técnicas muy específicas que no se emplean ni en la electrónica de baja frecuencia ni en la óptica.

Una de las primeras aplicaciones de las ondas electromagnéticas propagadas en la atmósfera (también llamadas señales de radiofrecuencia) fue el RADAR (Ratio Detection And Raining), utilizado en aquella época (1904) para evitar la colisión de barcos. A comienzos de la Segunda Guerra Mundial se experimentó un gran desarrollo de las mismas.

Las señales denominadas como microondas son utilizadas actualmente en la Radiometría, en la cual los radiómetros permiten obtener información sobre un cuerpo, como la temperatura y composición química mediante la detección y análisis del espectro de la radiación emitida por dicho cuerpo.

Además del estudio de la tierra desde el espacio, conexiones de ordenadores y periféricos (redes de área local inalámbricas), calentamiento de alimentos, calentamiento de productos industriales, en la agricultura, ecología, aplicaciones médicas y científicas.

Este trabajo se enfoca únicamente al estudio de los equipos que utilizan estas frecuencias (microondas) en las telecomunicaciones, las cuales pueden transportar grandes cantidades de información (voz, datos y vídeo), utilizando como medio la atmósfera.

En la actualidad los sistemas de radio enlaces estables son utilizados para la comunicación a distancias grandes y cortas, cuando el terreno (topografía) no permite otro tipo de medio de transmisión; esto es, que en una comunicación entre dos puntos no sólo se disponen de las opciones de líneas como par de cobre, coaxiales, microcinta o fibra óptica como medio de transmisión.

Ahora bien, existen diferentes tipos de radioenlaces: los móviles, vía satélite y estables. En estos últimos se tratará en este trabajo.

Las formas más comunes de la utilización de este tipo de radioenlaces en redes de procesamiento de datos son: en redes entre ciudades utilizando la red telefónica y redes metropolitanas privadas.

En este trabajo se explicará la naturaleza de las ondas electromagnéticas y su clasificación, resaltando aquellas cuya frecuencia son utilizadas en las comunicaciones en especial las denominadas "microondas", llegando tan lejos como sea posible sin recurrir al análisis electromagnético. Tomando en cuenta las características de la onda cuando se propaga en la atmósfera, como son: la reflexión, refracción y difracción.

Pasando finalmente a la descripción de los diferentes subsistemas que componen el equipo de microondas para este tipo de enlaces, como son: el equipo electrónico para el debido tratamiento de la señal, las líneas de transmisión que interconectan a este con la antena o sistema radiador, que es el elemento final para la propagación de las ondas electromagnéticas de alta frecuencia "microondas" en la atmósfera y en las cuales lleva la información.

CAPÍTULO I. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

1.1. Introducción.

Durante los procesos de transmisión y recepción de cualquier sistema de comunicación inalámbrico, la señal generada es transmitida hacia un punto lejano por medio de ondas electromagnéticas, de aquí la importancia de conocer el comportamiento de las ondas propagándose en el espacio libre.

En este capítulo se explica la naturaleza electromagnética de las ondas de radiocomunicación, mencionando sus modos de propagación y la influencia de la ionosfera sobre estas, así como la clasificación en bandas de la misma, según la frecuencia de operación.

1.2. Ondas electromagnéticas.

A la perturbación constituida por la propagación de un campo eléctrico y un campo magnético recibe el nombre de onda electromagnética. Dicha onda está constituida por los campos E y H que oscilan en forma periódica de forma similar a una cuerda en la cual se propaga una onda mecánica. Como se observa en la Figura 1.1, los vectores E y H son ortogonales entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de onda.

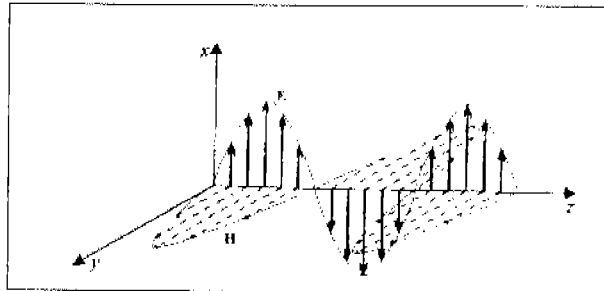


Figura 1.1. Desplazamiento de una onda electromagnética, mostrando sus componentes: campo eléctrico y magnético.

Una onda electromagnética no necesita de un medio material para propagarse. Como un campo eléctrico y magnético puede establecerse en un espacio inmaterial, este puede viajar en el vacío. El estudio de las ondas electromagnéticas (en el siglo XIX) por el físico escocés James Clark Maxwell el cuál obtuvo el valor de la velocidad de propagación de una onda electromagnética:

$$v = 3 \times 10^8 \quad [m/s]$$

Sus cálculos demostraron que en el vacío o en el aire la onda se propaga con ese valor.

Lo trascendente de este resultado es que es la misma velocidad de propagación de la luz en el vacío, haciendo pensar a Maxwell que la luz tiene un comportamiento de una onda electromagnética.

En la actualidad se sabe que esto es cierto, estableciendo la naturaleza electromagnética de la luz y la unificación de la óptica con el electromagnetismo. Ahora bien el comportamiento de propagación de las ondas electromagnéticas se puede establecer desde dos puntos de vista, el físico y el de aplicación.

Desde el punto de vista físico las ondas de propagación se clasifican en:

- a) Directa
- b) Reflejada
- c) Refractada
- d) Difractada
- e) Superficial
- f) Dispersas

La otra, desde el punto de vista de su aprovechamiento:

- a) Directa
- b) Reflejada
- c) Difractada
- d) Superficial
- e) En la troposfera
- f) Reflexión y Refracción en la ionosfera (Capa E)
- g) Reflexión y Refracción en la ionosfera (Capa F)

Las cuatro primeras formas de propagación se consideran de tierra y las restantes de espacio o celeste. En la Figura I.2 se muestran en forma general la propagación de las ondas de tierra y de espacio.

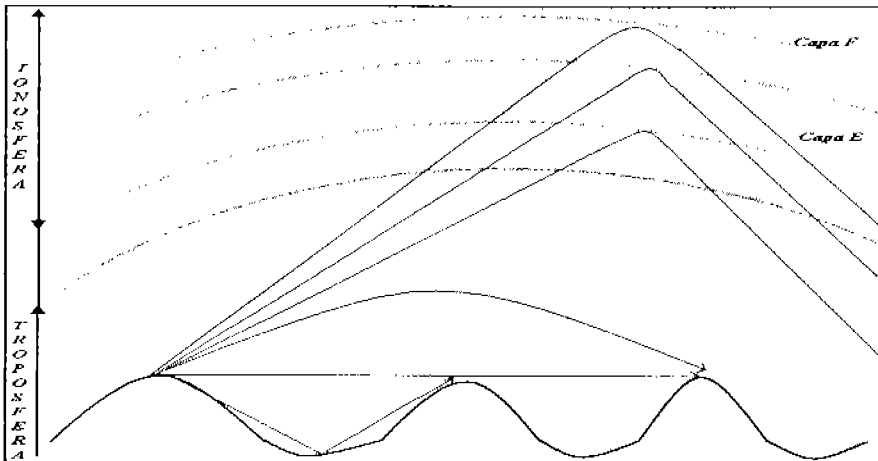


Figura I.2. Diferentes formas de propagación de una señal.

I.2.1. Ondas terrestres

Las ondas terrestres son aquellas que viajan muy cerca de la superficie terrestre, si observamos la Figura I.3 podremos darnos cuenta que hay lugar a una forma de propagación directa y la otra reflejada, ya sea sobre la superficie de la tierra o algún obstáculo que encuentra en su camino.

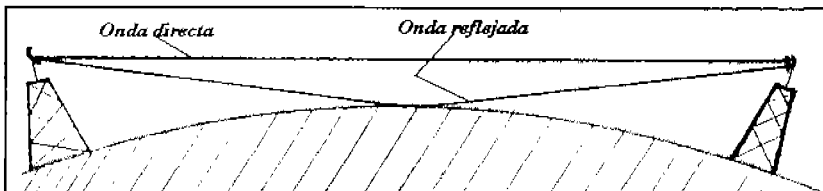


Figura I.3. Formas de propagación de una onda, desde un punto a otro.

La onda tiende a ser guiada a través de la superficie de la tierra, si el comportamiento de la tierra fuera como el de un conductor perfecto, se lograrían distancias considerables. Como esto no es posible debido a las pérdidas de energía de propagación de la onda al inducirse tensiones entre las ondas y el suelo, dando como resultado una disminución de la distancia útil a la que es capaz de llegar la señal radiada.

También la frecuencia de la señal juega un papel importante en la propagación de la onda ya que las señales de mayor frecuencia tienden a presentar una mayor atenuación que las señales de baja frecuencia.

Si se quiere una propagación directa es necesario que ambas antenas estén a la vista, lográndolo con la elevación correcta de las mismas, lo que condiciona la longitud de onda y el alcance directo de la emisión. En una transmisión en donde las antenas están a la vista, en la antena receptora se captan dos tipos de señal: la directa y la reflejada, estas se suman, de tal forma que la señal resultante quede reforzada o disminuida según que dichas señales lleguen en fase o en oposición de fase.

Cuando una onda se refleja sobre la superficie de la tierra esta cambia de fase con respecto a la señal directa, siendo de 180° .

Estarán en fase cuando la onda reflejada llegue a la antena receptora un múltiplo impar de una semionda y, estarán en oposición de fase cuando esta llegue a la antena receptora un múltiplo par de la semionda.

Además de los casos extremos en los cuales las ondas lleguen o no en fase, existen también casos intermedios, resultando por consiguiente de la interacción de estas señales, otras que irán desde valores máximos a valores mínimos. Es por esto que en la práctica se trata de evitar los obstáculos que puedan aparecer en la trayectoria de la señal, valiéndose de los estudios de línea de vista en la cual son determinados entre otros parámetros la longitud, la altura a la que deben de ir las antenas para lograr que la transmisión sea directa en el caso de la utilización de señales de microondas.

Cuando existe humedad sobre la superficie de la tierra, aumenta el grado de conductividad y eso favorece la propagación, recuérdese que en un pararrayos la resistencia de la zona de tierra donde se encuentra el conductor es menor, si existe mucha humedad, lo que favorece la descarga del rayo.

En una emisora que se encuentra cerca del mar puede aumentar el alcance cuando dirige su emisión hacia el horizonte, debido a que el agua favorece la conductividad y por no encontrar obstáculos en su trayecto, adaptándose así la señal a la curvatura de la tierra. Una utilidad práctica de ello puede ser la comunicación con barcos que se encuentran a grandes distancias. La frecuencia a la que trabajan puede ir de 15 a 300 KHz. lo que supone una longitud de onda a partir de 1,000 m. A lo cual no podrían lograrse esas distancias con ondas directas o reflejadas.

Como su mayor aprovechamiento es sobre la superficie del agua, son utilizadas muy poco para fines comerciales, la distancia que pueden alcanzar sobre el mar es de hasta 1,500 km. Estas señales son muy estables y no sufren variaciones diurnas ni estacionales.

Conforme aumenta la frecuencia, las distancias alcanzadas se van reduciendo, por ejemplo, cuando el rango de frecuencias va de 300 KHz hasta 3 MHz, la distancia alcanzada apenas es superior a los 300 km y condicionada por la propagación ideal sobre la superficie de la tierra.

Después de los 3 MHz, la onda sufre un alto grado de atenuación por lo que la distancia alcanzada es ya muy limitada a 30 km. o un poco más. Teniendo que emplearse otros métodos de propagación para frecuencias mayores a distancias importantes.

1.2.2. Ondas espaciales.

Este tipo de ondas son proyectadas por la antena transmisora hacia el firmamento y estas se encuentran lejos de la superficie de la tierra, a su vez las ondas espaciales están clasificadas en ondas troposféricas y ondas ionosféricas según la altura que llegan a alcanzar.

Las primeras llegan a alcanzar distancias de 10 km aproximadamente, y las segundas lo hacen por encima de esta altura hasta llegar a 500 km, llegando hasta la zona conocida como ionosfera. Es en esta última donde se aprovecha la desviación que sufre la señal haciéndola regresar a la superficie de la tierra en un punto mucho más alejado al del punto de partida.

1.2.2.1 Ondas troposféricas y ondas ionosféricas.

Se les llama así a las ondas que se propagan en una zona de la atmósfera conocida como troposfera, la cual se encuentra entre 300 y 10,000 metros sobre la superficie terrestre. Aquí es donde se encuentran las formaciones de nubes. En esta zona las ondas pueden sufrir algún tipo de cambio debido a la influencia de las capas del aire.

Resultando en una propagación poco estable, debido a que no se mantiene constante las condiciones de temperatura y humedad del aire contenido en la troposfera, como se podrá observar en la diferencia de temperaturas a alturas diferentes, cuanto más se asciende la temperatura tiende a bajar. Por otro lado los mapas satelitales muestran una diferente localización de las nubes, según la hora del día y la ubicación geográfica.

Las distintas elevaciones del terreno, por ejemplo, zonas montañosas, influyen en las masas de aire que las rodean, haciendo que no existan capas uniformes y dando como resultado una dispersión de la onda propagándose por dicho medio, como puede observarse en la Figura 1.4

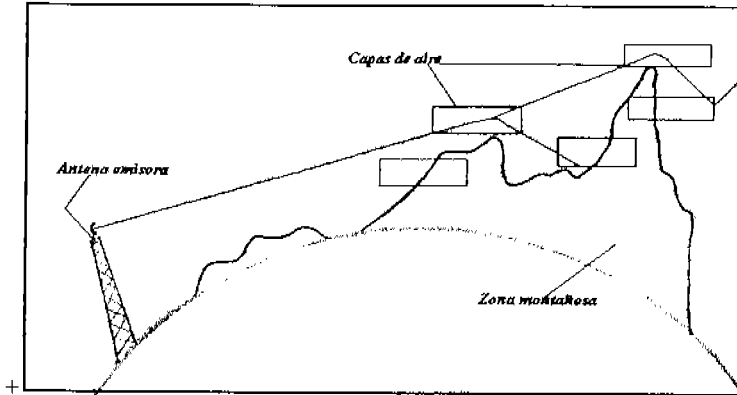


Figura I.4. Turbulencias en el aire por la poca uniformidad cerca de las zonas montañosas, provocando una dispersión de las ondas y con ello una comunicación deficiente.

A este tipo de propagación se le llama, propagación por dispersión. Este tipo de propagación puede utilizarse en la transmisión de TV. y de radio, utilizando grandes potencias y antenas direccionales. Con las señales de VHF (Very High Frequency), UHF (Ultra High Frequency) y SHF (Super High Frequency), se pueden alcanzar distancias mayores a la visual pero perdiendo calidad en la señal ya que se recoge perturbaciones de tipo atmosférico como pueden ser la lluvia, la nieve, el granizo, las descargas atmosféricas, etc., provocando también cambios en la propagación de este tipo.

En cuanto a las ondas ionosféricas, estas se propagan en la zona de la atmósfera terrestre conocida como ionosfera, de la cual hablaremos a continuación.

1.2.3 Influencia de la ionosfera sobre las ondas electromagnéticas.

Al hablar de la atmósfera y sus diferentes capas, se hace referencia a que los meteorólogos y científicos espaciales han elaborado una imagen bastante detallada de la atmósfera terrestre desde la superficie del suelo hasta cientos de kilómetros de altura y se ha descubierto que se compone de cinco capas básicamente, siendo menos densa la atmósfera con la altitud.

No existe una regla fija para determinar los límites entre las capas y la densidad de estas ya que las alturas reales difieren en la atmósfera con respecto a la geografía y la estación. Sin embargo en términos generales, las alturas o distancias alcanzadas por las capas a partir del suelo son las siguientes:

- 1) Troposfera 0-10 km
- 2) Estratosfera 10-40 km
- 3) Mesosfera 40-70 km
- 4) Termosfera 70-400 km
- 5) Exosfera de 400 km, en adelante.

La ionosfera es el conjunto de capas, en una zona que va desde los 60 hasta los 600 km de altura, en esta zona existen gran cantidad de iones y de electrones libres. La influencia de los rayos cósmicos y ultravioletas sobre los diferentes gases que conforman esta capa hacen que los átomos de los gases pierdan electrones, convirtiéndolos en iones positivos (recuerde que la ionización consiste en que un átomo pierda o gane algún electrón).

Una vez que se ha realizado la ionización, los iones y los electrones libres, tienden a recombinarse entre ellos, manteniéndose este proceso ininterrumpidamente debido a que las radiaciones continúan llegando a las zonas de la atmósfera (especialmente en la ionosfera).

La ionización no se mantiene constante en todos los puntos de la ionosfera, ya que tiene que ver la rotación de la tierra, las erupciones solares y sobre todo la cantidad de radiación que incide, según sea de día o de noche, resultando así en una variación de densidad de ionización, que es lo que resulta de gran importancia para la mayor o menor propagación de las ondas.

Las radiaciones no penetran con la misma intensidad las diferentes capas de la atmósfera, siendo las capas superiores quienes reciben mayor cantidad de radiación que las inferiores con respecto a la superficie terrestre (observe la Figura 1.5).

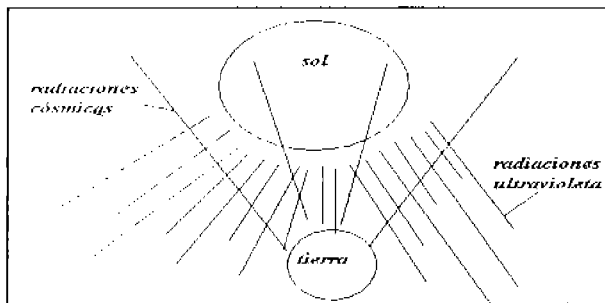


Figura 1.5. Las capas medias y superiores de la atmósfera absorben gran parte de las radiaciones.

Pero, a pesar de que existe una gran densidad de ionización en las capas superiores de la ionosfera, se da lugar también a una gran cantidad de recombinaciones, por lo que sufre variaciones importantes. Esto se debe a que el periodo de un ión es muy corto, ya que rápidamente se recombina con los muchos electrones libres que se encuentran en sus proximidades. En cuanto a la parte baja de la ionosfera, la ionización es muy pobre, debido a que las capas superiores han absorbido gran cantidad de energía.

La ionización de la parte central es la más importante, porque aunque no recibe la misma intensidad de radiación, los iones ahí formados, tienen un periodo de duración mucho más prolongado que en las capas superiores y ello resulta más importante a efectos de propagación de ondas electromagnéticas.

Para fines de estudio, se ha hecho una clasificación de las capas que conforman la ionosfera basada en la altura o distancia que las separa de la superficie de la tierra y el grado de ionización que se encuentra en ella, esto se ilustra en la Figura I.6.

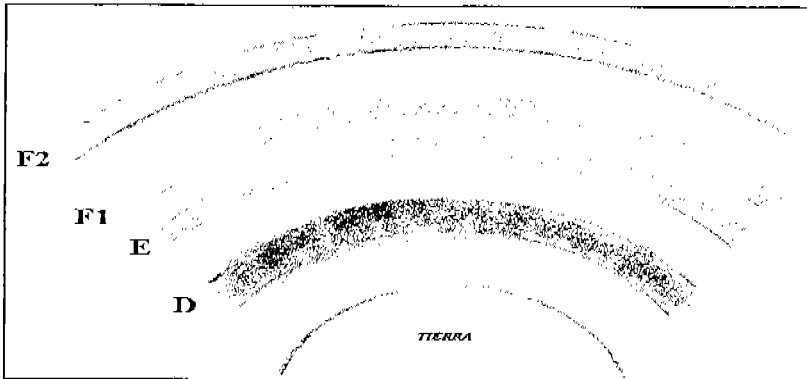


Figura I.6. Capas en que se subdivide la ionosfera, por las noches las capas F1 y F2 se recombinan para formar una sola capa.

Donde:

Capa "D"

Esta capa se sitúa aproximadamente entre 20 y 80 km. Aunque su valor medio es de 70 km. Aquí la ionización es menos intensa y es causada por radiaciones muy intensas, lo que quiere decir que esta zona solo existe durante el día que es cuando el sol irradia una mayor cantidad de energía. Es por esto que durante la noche apenas si da indicios de su existencia y no tiene utilidad práctica, porque ya que su distancia es muy cercana a la de la troposfera, da lo mismo utilizar a esta última, logrando grandes distancias en la propagación de ondas largas o de frecuencias medias o bajas.

Capa "E"

Esta capa se encuentra por encima de los 80 y hasta 140 km. Siendo su valor medio de 100 km. Su máxima densidad de ionización se alcanza durante el día, pero a diferencia de la capa D, esta se mantiene en un nivel más alto durante la noche, esta capa permite devolver ondas electromagnéticas hasta una distancia de 2,000 km desde el punto de emisión, reduciendo el efecto de propagación durante la noche. En función de fines prácticos de propagación esta capa es importante para ondas medias.

Capa "F"

La distancia en la que se localiza esta entre 200 y 400 km. Esta capa tiene la particularidad de que por ser la capa con más influencia de las diferentes radiaciones, presenta una mayor densidad de ionización, viéndose afectada o disminuida en su densidad, la espesura de la capa y la altura con respecto a la superficie de la tierra por el cambio del día a la noche o cambios estacionales. En las horas del día cuando la radiación solar es más intensa, la capa F se subdivide en dos subcapas denominadas F1 y F2, la primera se localiza a una distancia más o menos entre 140 y 250 km durante el día. Por la noche estas capas se recombinan de nuevo para formar otra vez la capa F. Como puede observarse en la Figura I.7. Esta zona es la que usa las ondas de alta frecuencia para lograr un desplazamiento de largo alcance.

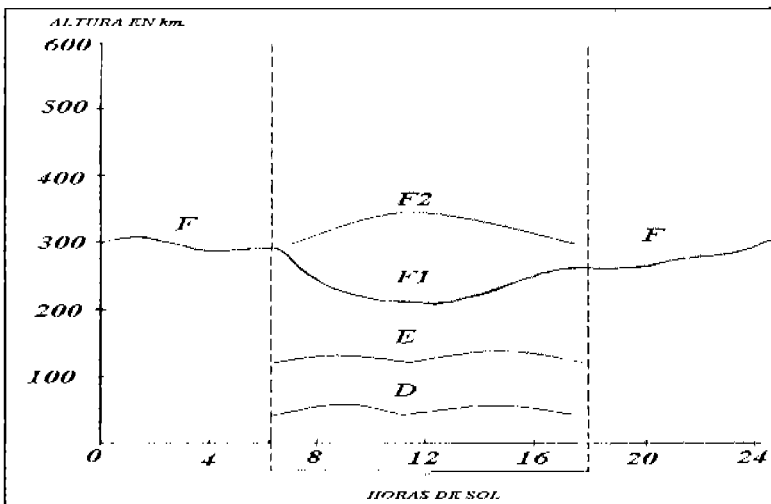


Figura I.7. Representación con un gráfico sobre el comportamiento de las capas ionosféricas durante diferentes horas del día.

Veamos que es lo que pasa cuando una radioemisora que está radiando en todas direcciones y las ondas de radiocomunicación entran en contacto con la capa ionizada, como puede observarse en la Figura I.8.

Teniendo en cuenta el ángulo de incidencia y el ángulo de propagación, cuando el ángulo de incidencia sobre la capa ionizada es muy grande, esta tiende a regresar de nuevo hacia la tierra, dándose entonces la reflexión de la onda, también nos podemos referir al ángulo de propagación β , que para este caso diríamos que el ángulo de incidencia (α) es muy grande y el de propagación muy pequeño; si nos damos cuenta en los trazos hechos en la Figura I.8, los ángulos de incidencia y de propagación son complementarios, es decir que la suma de ambos es de 90 grados, a lo cual; si alguno de ellos es grande el otro será pequeño.

El ángulo medio corresponde al tipo de trayectoria que sigue la onda electromagnética cuando incide sobre la ionosfera de tal manera que sufre una refracción (como se verá más a fondo en el capítulo III) siguiendo una trayectoria suficientemente curva como para regresar a la tierra, en la Figura 1.8 se representa este ángulo como α_1 , con su correspondiente ángulo de propagación β_1 .

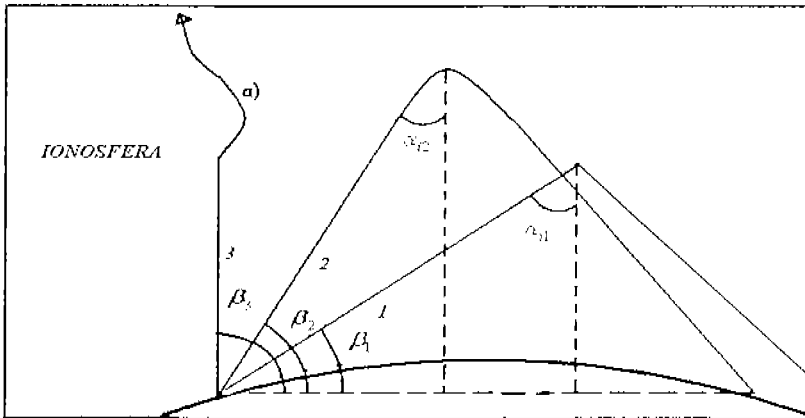


Figura 1.8. Diferentes trayectos para diferentes ondas, con sus respectivos ángulos con que inciden en la atmósfera. Cuando el ángulo de incidencia es muy pequeño, la onda se refracta, atraviesa la capa, alejándose hacia el espacio.

En el caso en que el ángulo de incidencia con la capa ionosférica sea muy pequeño (siendo el ángulo de propagación grande) las ondas se pierden en el espacio, ya que estas atraviesan a la ionosfera, perdiendo su utilidad.

Analizaremos este caso, cuando la onda va atravesando la ionosfera, va pasando de un medio menos denso ionizado a otro más denso, entonces la onda tiende a desviarse hacia la normal que se encuentra en el límite de los dos medios (esto sucede cuando se pasa de un medio menos denso a otro mayor), pero conforme va avanzando la densidad de la ionosfera tiende a disminuir, volviéndose a curvar la trayectoria pero ahora en sentido inverso, alejándose de la normal hasta que atraviesa completamente la capa y se pierde en el espacio libre. Esto se puede observar en la figura 1.8 con la "esc" (a) invertida que esquematiza el trayecto de la onda.

I.2.3.1. Influencia de las diferentes capas.

Como ya hemos visto, la ionosfera juega un papel importante en el trayecto de las ondas electromagnéticas, teniendo la capa D menos intervención con las ondas de alta frecuencia, no así, las capas E, F1 y F2. Como veremos en la Figura I.9 tenemos a una antena omnidireccional, teniendo una propagación en casi todas las direcciones, entonces en el lado receptor existen además de las trayectorias de las ondas terrestres (directa y reflejada) aquellas que son refractadas y reflejadas por la troposfera y la ionosfera. Recordando la importancia del ángulo de propagación y el ángulo de incidencia, que también definen si estas son reflejadas, refractadas o si cruzan las capas de la ionosfera y se pierden en el espacio.

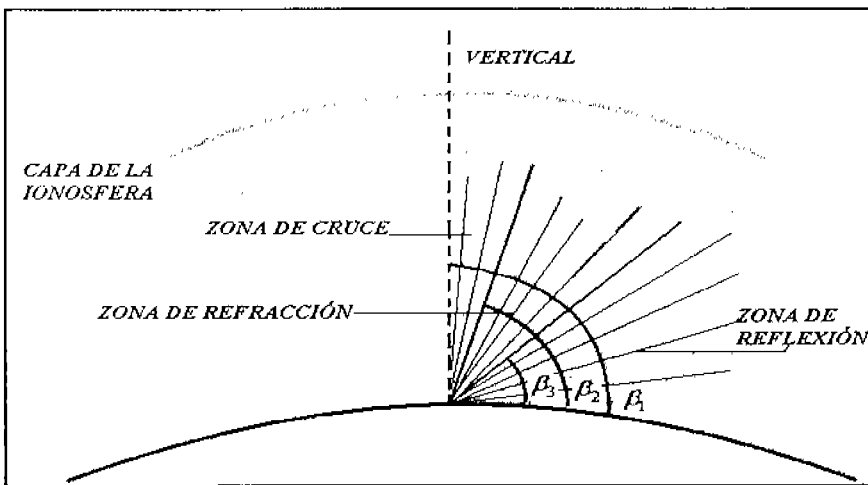


Figura I.9. Representación de un cuadrante del plano de la radiación de una antena omnidireccional.

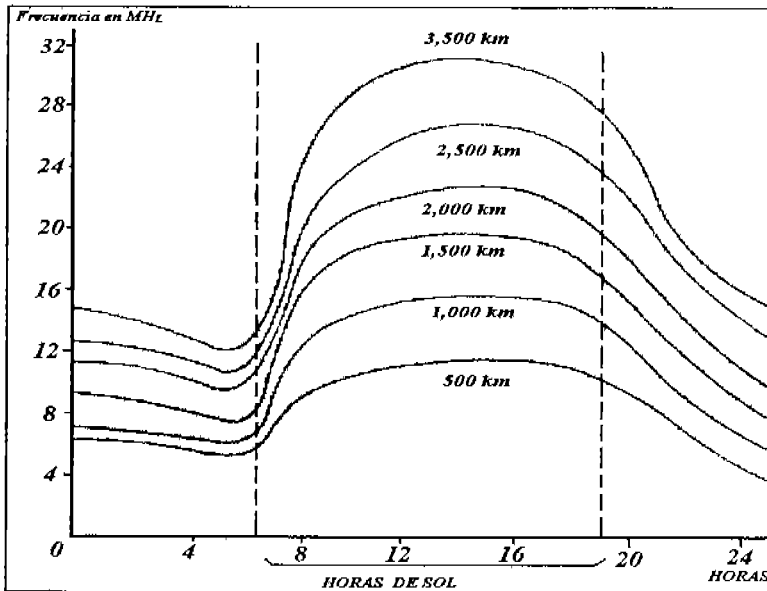
I.2.3.2. Influencia de la frecuencia sobre la propagación en la ionosfera.

Otro aspecto importante que se necesita considerar es la frecuencia de operación de la onda electromagnética, cuando una onda viaja a baja frecuencia será reflejada por la ionosfera siempre y cuando el ángulo de propagación sea el adecuado. Cuando la frecuencia de la onda tiene una frecuencia más alta, la onda llega a refractarse en la ionosfera, atravesando las diferentes capas hasta lograrlo.

Durante la noche, las capas suelen recombinarse, como ya se había dicho antes, alejándose de la superficie terrestre y para iguales frecuencias de propagación el alcance es mayor que durante el día, esto para ondas de baja frecuencia. En frecuencias muy altas las capas ionizadas tienen menos poder de absorción sobre de estas.

En la Gráfica I.1, se muestra la relación que existe entre las horas del día y la frecuencia de operación de la onda, así como la distancia de aprovechamiento para su propagación. La absorción de la energía por la ionosfera es mayor conforme a la distancia recorrida por la onda sobre la ionosfera y la frecuencia a la que debe de transmitir el emisor depende de la distancia a la que se encuentre la ionosfera; es por esto que existen varios gráficos, como la Gráfica I.1 en los cuales se puede auxiliar.

Existen varias tablas en las cuales los organismos oficiales de cada país se pueden auxiliar para fijar la frecuencia de emisión dentro de la transmisión de ondas electromagnéticas, teniendo en cuenta estas características, procurando también la no interferencia con otras señales de otros países.



Gráfica I.1. Durante las horas de sol se tiene una mayor ionización a lo cual se pueden alcanzar distancias mucho mayores.

En esta gráfica puede observarse como a determinadas horas del día las distancias logradas son mucho mayores, reduciéndose la distancia conforme se oculta el sol.

I.2.4 Problemas en la propagación de las ondas.

El fenómeno más conocido dentro de las perturbaciones que sufre la onda electromagnética durante la propagación es el DESVANECIMIENTO y no es más que una variación de la intensidad de la señal recibida. Existen varios tipos de desvanecimientos, y bien pueden ser provocados por:

1.- La recepción de señales con trayectorias diferentes; esto es cuando una antena omnidireccional o directiva emite las señales, no todas llegan en forma directa, si no que pueden llegar ondas reflejadas (ya sea en la superficie de la tierra, en la troposfera o en la ionosfera) y según el ángulo de propagación pueden confluir en el punto receptor al mismo tiempo. Cuando estas ondas vienen del mismo punto de transmisión y su velocidad de propagación es el mismo, se tendrá que cada una de ellas viajó distancias diferentes en tiempos distintos dando lugar en la recepción a amplitudes de la señal muy diversas, presentando algunas de ellas una amplitud mucho menor en función de la distancia recorrida y llevándose a cabo una suma o diferencia de las señales, según lleguen en fase o desfase, lo que condiciona la onda recibida. Deduciéndose, pues, que la señal se desvanezca o que refuerce su intensidad.

2.- Desvanecimientos por la ionosfera: como hemos comentado, las capas de la ionosfera no se mantienen estables durante el transcurso de las horas del día y en cada lugar geográfico. Lo que repercute en estos cambios es que a pesar de que se tengan bien trazadas las cartas de propagación pueden aparecer esporádicamente desvanecimientos, debido a que las señales pueden cambiar su trayectoria de propagación, por ejemplo, cuando una señal sufre una o más reflexiones o refracciones se encuentran ahora en oposición de fase y tienen la misma magnitud que la señal que llega al receptor con una sola reflexión, esta sufrirá un desvanecimiento total.

3.- Por atenuación: causadas en primer lugar por la distancia entre estaciones y en segundo por las condiciones atmosféricas (para este caso, se le conoce como desvanecimiento plano), como la lluvia, la nieve, concentración de hielo, etc. Siendo que en la primera depende de la frecuencia de operación y en la segunda no.

La calidad de un equipo de radio es el que maneja un mejor margen de desvanecimiento, el margen de desvanecimiento está definido como la cantidad de atenuación que puede manejar (medido en decibeles $[dB]$) el equipo en recepción a partir de un nivel normal de recepción para una tasa de errores de bits (BER- Bit Error Rate) dada, como por ejemplo 1×10^{-3} (un bit de error por cada 10,000 bits transmitidos)

Habíamos dicho que la señal sufre atenuación debido a la lluvia, esto es porque, se produce absorción de potencia que se produce en un medio dieléctrico con pérdidas como es el agua. Tomando en cuenta también los ruidos atmosféricos, industriales, etc.

1.3 Clasificación de las ondas

Las ondas electromagnética se clasifican según el valor de su frecuencia y observando que en base a este valor reciben una denominación especial (ondas de radiocomunicación, ondas caloríficas, etc.) como se aprecia en la Tabla I.1. Donde:

a) Electromagnéticas.

Es el conjunto de radiaciones, denominado espectro electromagnético, también llamado espectro general de frecuencias, ya que precisamente la clasificación es asignada en base a la frecuencia en la que oscilan.

Letra	Nombre	Rango (Hz)
A	Radiocomunicación	3×10^3 ---- 3×10^{11}
B	Ondas caloríficas	3×10^{11} ---- 3×10^{13}
C	Rayos infrarrojos	3×10^{13} ---- $3 \times 10^{14.2}$
D	Luz visible	$3 \times 10^{14.2}$ ---- $3 \times 10^{14.8}$
E	Rayos ultravioleta	$3 \times 10^{14.8}$ ---- 3×10^{17}
F	Rayos X	3×10^{16} ---- 3×10^{19}
G	Rayos Gamma	$3 \times 10^{19.7}$ ---- 3×10^{22}
H	Rayos Cósmicos	3×10^{22} ---- 3×10^{24}

Tabla 1.1. Espectro general de frecuencias.

La velocidad de todas estas ondas electromagnéticas en el vacío es la misma y es de:
 $v = 3.0 \times 10^8$ [m/s] aproximadamente.

b) Radiocomunicación

En el rango de las ondas llamadas de radiocomunicación, existe una división en bandas a las cuales se les asigna una nomenclatura, como puede observarse en la Tabla 1.2.

Nombre	Significado	Frecuencia
VLF	Very Low Frequency	3 --- 30 KHz
LF	Low Frequency	30 --- 300 KHz.
MF	Médium Frequency	300 --- 3000 KHz
HF	High Frequency	3 MHz --- 30 MHz
VHF	Very High Frequency	30 MHz --- 300 MHz
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz --- 3000 MHz
SHF	Super High Frequency	3 GHz ---- 30 GHz
EHF	Extremely High Frequency	30 GHz ---- 300 GHz

Tabla 1.2. Bandas en la que está subdividido el rango de radiocomunicación.

Las ondas electromagnéticas tienen diferentes características de propagación, cuando difieren en frecuencia, es por esto que los cálculos de enlace difieren de una frecuencia a otra.

I.4 Relación entre el comportamiento de la onda y la banda de operación.

Lo que determina el modo predominante de propagación es la frecuencia de la señal, esto es; en las bandas LF (Low Frequency) y MF (Médium Frequency) son menos afectadas por la absorción (refracción) y atenuación durante la propagación en las capas bajas de la atmósfera, logrando mayores distancias, presentando dominio de la onda de tierra y espacial respectivamente.

Para la banda HF (High Frequency) predomina la onda espacial y esta es usada para media y larga distancia, según la hora del día, ya que el comportamiento de la capa ionosférica provoca variaciones en los ángulos de reflexión.

En la banda VHF (Very High Frequency) se presentan características de onda reflejada, refractada y directa.

En las bandas UHF (Ultra High Frequency) y SHF (Super High Frequency) debido a su alta frecuencia, estas pueden atravesar la capa de la ionosfera, logrando las comunicaciones con los satélites, predominando la onda directa.

Se puede observar en la Figura I.10, algunas bandas de radiodifusión y canales de T.V. en la frecuencia a la que operan.

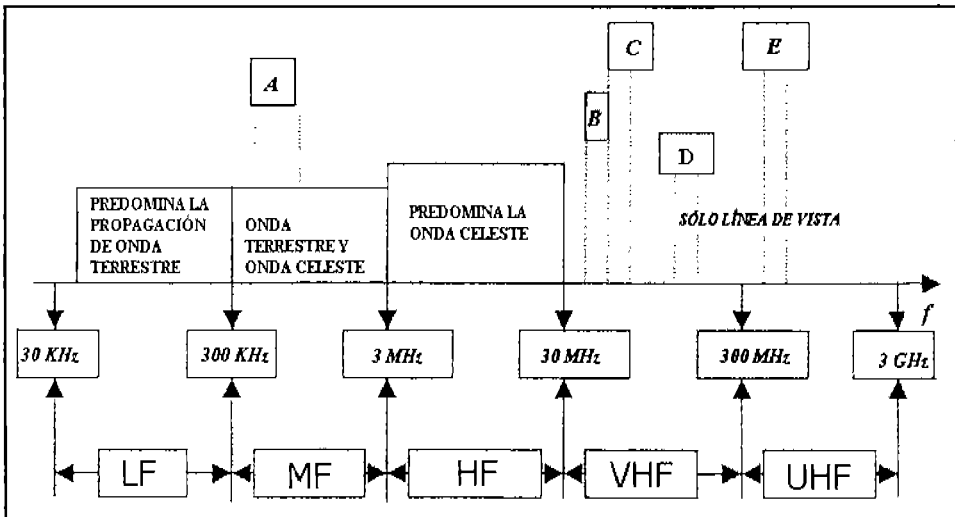


Figura I.10. Bandas en las que operan las señales de radiodifusión.

- A.- Banda normal de radiodifusión A.M. 535 KHz --- 1605 KHz.
 B.- Canales de t.v. del 2 al 6. 54 MHz --- 88 MHz.
 C.- Banda de radiodifusión de F.M. 88 MHz ---- 108 MHz.
 D.- Canales de T.V: del 7 al 13. 174 MHz ---- 216 MHz.
 E.- Canales de T.V del 14 al 83. 470 MHz ---- 890 MHz.

En la Tabla I.3 se puede apreciar las distancias aproximadas que alcanza la señal según el tipo de propagación que predomina en ella, tanto para el día como para la noche.

Distancia		100 Km. o menor	100-800 Km.		600-4000 Km.		4000 o más Km.	
Banda	Onda superficial	Directa	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
LF	X		X	X	X	X	X	X
MF	X			X				
HF					X	X	X	X
VHF		X						
UHF		X						
SHF		X						

Tabla I.3. Distancias aproximadas que logran las señales, según el modo predominante de propagación.

CAPÍTULO II. MICROONDAS

II.1 Introducción.

El término microondas se utiliza para describir un rango de frecuencias, las cuales van desde 255 MHz hasta 300 GHz, en algunos textos se puede encontrar una variación en este rango. Su utilidad va desde aplicaciones industriales, médicas, radiocomunicaciones y científicas.

En este tema se menciona su longitud de onda, así como algunos de los dispositivos para su generación, mencionando también la importancia en las radiocomunicaciones.

II.2 Región y longitud de onda de las microondas.

Una de las ventajas de utilizar este rango de frecuencias es su gran ancho de banda, pudiendo transportar miles de canales de voz a distancias considerables (pueden ir desde unos cuantos cientos de metros hasta 40 km, aprox.) en un radioenlace terrestre.

En el capítulo anterior se mostró un cuadro descriptivo, en donde se presenta el espectro general de frecuencias.

Ahora se presentará las subdivisiones para la región de las microondas y a las cuales se les ha asignado una letra para representarlas (Figura II.1).

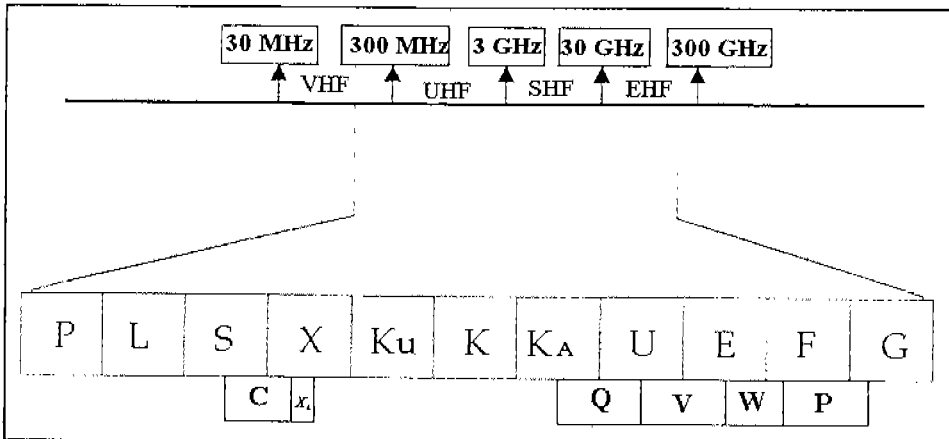


Figura II.1. División de las frecuencias de microondas en bandas con su respectiva letra asignada.

P: 225 MHz --- 390 MHz
 L: 390 MHz --- 1.55 GHz
 S: 1.55 --- 5.20 GHz
 X: 5.20 --- 12.4 GHz
 Ku: 12.4 --- 18.0 GHz
 K: 18.0 --- 26.5 GHz
 KA: 26.5 --- 40 GHz
 U: 40.0 --- 60.0 GHz
 E: 60.0 --- 90.0 GHz
 F: 90.0 --- 140.0 GHz
 G: 140.0 --- 220.0 GHz

C: 3.9 --- 6.20 GHz
 X: 6.20 --- 8.20 GHz
 Q: 33 --- 50 GHz
 V: 50 --- 75 GHz
 W: 75 --- 110 GHz
 P: 110 --- 170 GHz

Donde la sub-banda C abarca parte de la banda S y X, como puede verse en su frecuencia de operación.

La saturación de frecuencias menores a las de microondas utilizadas en las comunicaciones, han provocado que se utilicen el rango de las microondas para diversos servicios, por ejemplo: si se toma el 10 % del ancho de banda de una de estas frecuencias se obtendría un gran espectro de frecuencias portadoras disponibles para transmitir una cantidad considerable de información.

Otras características de estas frecuencias es su pequeña longitud de onda, a veces también llamadas ondas milimétricas y recordando la definición de la longitud de onda en su forma más simple y la cual establece que es la distancia recorrida por la onda durante un periodo T, en donde:

λ = Longitud de onda
 c = Velocidad de la Luz
 T = Periodo

$\lambda = cT$; y como $T = \frac{1}{f}$ entonces

$\lambda = \frac{c}{f}$; siendo $c =$ La velocidad de la luz en el espacio libre y su valor aproximado es de 299.8×10^8 [m/s]

Si sustituimos f con valores muy altos, el resultado sería longitudes de onda muy pequeños que irían desde unos centímetros a unos cuantos milímetros.

Una de las consecuencias de las pequeñas longitudes de onda, es que la fase varía rápidamente con la distancia y por lo tanto el análisis y diseño de circuitos de medición, amplificación y generación de potencia en estas frecuencias difieren con las de menor frecuencia. Por otra parte, el manejo de la corta longitud de onda simplifica el diseño de antenas de alta direccionalidad.

II.3 Decibeles.

Se está tan familiarizado con la utilización de valores absolutos, tales como el metro, el kilogramo, el segundo, etc. los cuales nos dan una información concreta de cuanto mide algo, cuanto pesa, por mencionar algunos ejemplos.

Pero en algunas ocasiones, no es posible obtener ciertos valores absolutos o al menos no son tan importantes, dándose este caso en la potencia de las señales que intervienen en un sistema de comunicación.

En las líneas de transmisión, llámense par trenzado, cable coaxial, etc. La señal sufre atenuación, la cual se manifiesta como una pérdida de amplitud de la señal y alteración de fase (salvo en líneas puramente resistivas) estando ambas en función de la frecuencia.

Es decir que la calidad de una señal útil no puede ser medida con potencias absolutas, ya que la potencia a transmitir se ve afectada por ruido o señales interferentes o no útiles, además de sufrir atenuación durante su trayecto, en mayor o menor magnitud según la distancia y el canal de comunicación que atraviesan.

Por lo tanto se utilizarán relaciones de potencias entre la señal que se emite y la recibida.

Si las comparaciones se hacen en forma lineal, es decir, mediante un cociente, el resultado será adimensional o sin unidades. Solo se dirá que P2 es K veces mayor o más pesado o más largo, todo depende de que cantidades físicas se estén comparando.

En el caso de un sistema de comunicaciones se tendrá:

$$\frac{P_2}{P_1} = K; \text{ siendo } P_2 = \text{señal de salida, } P_1 = \text{señal de entrada y } K = \text{constante, positiva y sin unidades.}$$

Recordando que las magnitudes que se estén comparando sean expresadas en las mismas unidades.

Ahora se introducirá a una unidad de medidas relativas de potencia en las cuales al hacerse la comparación se harán no en forma lineal sino logarítmica, siendo su unidad el belio o su décima parte; el decibelio. Aunque es una unidad, por estar en un dominio diferente al lineal y representar una comparación de dos magnitudes iguales, es una unidad relativa y adimensional.

El uso de los decibeles (dB) no sólo se aplica a las líneas de transmisión, si no a varias áreas de la ingeniería.

Para un sistema de comunicación, la expresión para determinar la ganancia o pérdida se utiliza la siguiente expresión:

$$10 \log \left[\frac{P_2}{P_1} \right] = X \text{ dB} \quad \dots\dots\dots \text{II.1}$$

Si X es positivo, entonces se dice que en un sistema se tiene una ganancia, pero si X es negativa, se dice que hay pérdidas en el sistema, esto es, cuando $P_1 > P_2$ o dicho como; la potencia de entrada es mayor a la potencia de salida, por lo que :

$$K = \frac{P_1}{P_2} < 1 \quad \Rightarrow \quad X = \log (K) < 0$$

Para resaltar la utilidad de los decibeles, tomemos un ejemplo: digamos que comparamos dos señales y su resultado dice que P2 es mil veces mayor que P1, esto es $\frac{P2}{P1} = 1,000$, aplicando la fórmula anterior tendríamos pues que $10 \log \frac{P2}{P1} = 30 \text{ dB}$; cantidad mucho más fácil de manejar.

En la Tabla II.1 puede observarse que cuando la razón de potencias se duplica (K), el valor en dB aumenta en 3, mientras que los valores en dB de los números recíprocos difieren sólo en el signo.

Nótese que si las potencias o magnitudes que se estén relacionando son iguales, entonces se tendrá 0 dB.

Dominio lineal P2/P1	Dominio Logarítmico $10 \log_{10} P2/P1$
0.01	-20 dB
0.1	-10 dB
0.5	-3 dB
1	0
2	3 dB
10	10 dB
100	20 dB
1000	30 dB

Tabla II.1. Tabla comparativa.

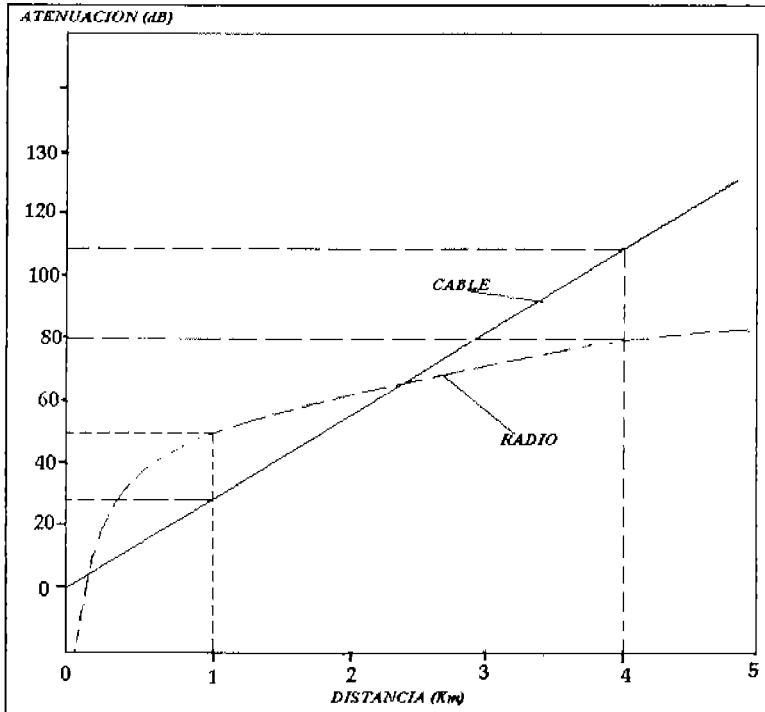
Al obtener 0 dB, debe interpretarse en determinado sistema como: la señal de entrada es igual a la señal de salida por lo tanto el sistema no obtuvo ganancia o pérdida de tal.

La potencia que puede entregar un determinado circuito dentro de un sistema de comunicación puede expresarse en función de la diferencia de potencial entre sus terminales y la resistencia equivalente y utilizando la fórmula II.1 se tiene pues que :

$$P = \frac{V^2}{R} ; 10 \log_{10} \frac{P2}{P1} \Rightarrow 10 \log_{10} \frac{\frac{V_2^2}{R_2}}{\frac{V_1^2}{R_1}} \text{----- II.2}$$

En donde R₁ y R₂ son las resistencias equivalentes asociadas a sus respectivos voltajes, V₁ y V₂.

En la Gráfica (II.1) se observa la atenuación de una señal sufrida durante una transmisión vía radio y por transmisión por cable.



Gráfica II.1. Atenuaciones sufridas por una señal cuando viajan por aire y por cable.

Cabe la posibilidad de que al comparar una cantidad en decibeles con respecto a un valor fijo o magnitud absoluta se establezca una nueva unidad absoluta derivada del dB.

Tomaremos el vatio como valor de referencia (W) y así lograr expresar la potencia en dBW, utilizando la siguiente expresión:

$$10 \log \frac{P[W]}{1[W]}$$

Es común en sistemas de comunicaciones la utilización de señales de bajo nivel, es por eso que toma un valor más pequeño como referencia y es el mW, siendo ahora la expresión:

$$10 \log \frac{P[mW]}{1mW}$$

Si se sustituye el valor de 1W en la primera expresión $P=1 \text{ W}$ (Watt); el cociente resultará igual a 1 y $10 \log 1 = 0$, así que la potencia de 1W es igual a 0 dBW. En la segunda expresión se utiliza la expresión dBm y si se sustituye el valor de 1 W en esta misma, el resultado será de 30 dBm, o dicho de otra manera; la potencia de salida que es 1 W y es mil veces mayor que la potencia de entrada o de referencia que es de 1 mW (miliWatt).

II.4 Generadores de señal.

Se pueden generar señales de alta frecuencia mediante dos clases de dispositivos, usando tubos de vacío o dispositivos semiconductores.

En este tema se describirán los principios de funcionamiento de sólo dos tipos de generadores, de la clase llamada tubos de vacío utilizados más habitualmente en los laboratorios de microondas y dispositivos de comunicaciones.

Debido a la dificultad de encontrar diagramas de los equipos utilizados en la industria de las telecomunicaciones, el material que aquí se presenta está más enfocado a explicar las ideas básicas que a la presentación de los complejos desarrollos matemáticos que son necesarios en la modelación de estos componentes.

II.4.1 El Klystron.

Fue inventado por los hermanos Varian en 1937, consiste en un tubo de vacío capaz de generar una onda de alta frecuencia utilizando el principio de modulación de la velocidad. Es muy común encontrarlo en los laboratorios para medidas, como fuente de baja potencia (10 – 50 mW) con un intervalo de frecuencias de 1 y 25 GHz. Sus características los hacen también idóneos para utilizarlos en receptores de microondas y como osciladores de alta potencia en radares Doppler comerciales y militares.

En la Figura II.2 se muestra el diagrama esquemático de un Klystron de reflexión. Los electrones son excitados en el cátodo por un filamento caliente y son enfocados por un campo dando lugar a un haz de electrones. Los electrones escapan a gran velocidad del cátodo, debido al gran voltaje negativo aplicado al mismo y estos pasan a través de los campos dentro de una cavidad resonante, las fluctuaciones con una frecuencia igual a la de resonancia de la cavidad experimentan una realimentación positiva, produciendo un empaquetamiento del haz, según la frecuencia de resonancia correspondiente. Las fluctuaciones de los electrones del haz son debidas fundamentalmente al ruido térmico.

El empaquetamiento de electrones da lugar a una redistribución periódica de cargas en las paredes de la cavidad.

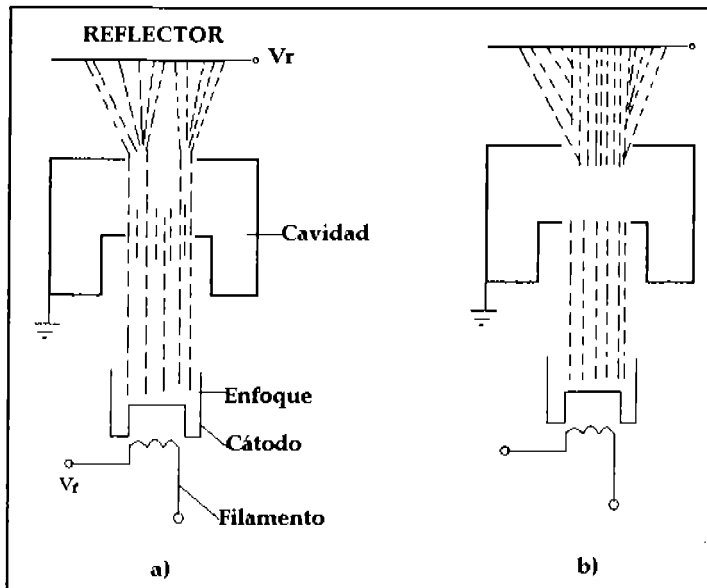


Figura II.2. Diagrama esquemático de un Klistrón de reflexión.

Cada medio ciclo, las paredes de la cavidad sufren un cambio de polaridad, debido a la redistribución de carga inducida por el empaquetamiento de electrones, después de varios ciclos se habrán agrupado en paquetes bien definidos, como se observa en la Figura II.2.b; se ha producido la modulación de la velocidad de los electrones.

Se dice que un Klystron tiene diferentes "modos" de oscilación, si observamos la Figura II.3 donde se relaciona la potencia de salida y el voltaje del reflector para un Klystron de laboratorio modelo 2K25, la oscilación se produce a distintos voltajes de reflector. La frecuencia la determina fundamentalmente la cavidad resonante, por lo que se puede sintonizar "manualmente" si modificamos el volumen de la misma, también es posible conseguir una pequeña modificación de la frecuencia variando el voltaje del reflector (V_r). A este tipo de sintonía se le denomina sintonía electrónica.

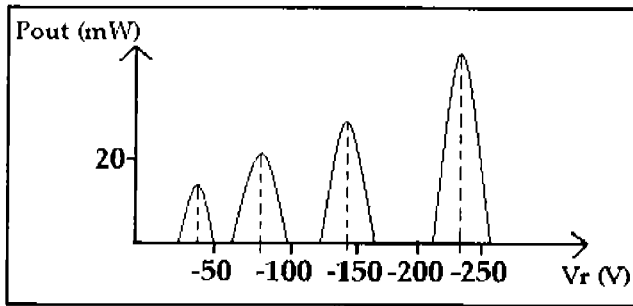


Figura II.3. Relación de la potencia de salida y voltaje del reflector para diferentes modos de oscilación.

II.4.1.1 Aplicaciones.

Por su bajo ruido, alta potencia y relativo bajo costo, el Klistrón es utilizado en aceleradores lineales, en las comunicaciones, en los procesos industriales de calentamiento y sistemas de radar. A continuación se mencionaran las características de algunos modelos de Klystron.

El modelo VK28 8252 de Varian utilizado en un acelerador lineal para medicina, donde la potencia media de salida es de 5.5 KW a una frecuencia de 2.856 GHz, siendo el ancho de banda muy estrecho, de solo 5 MHz.

El modelo VKX-7799 en comunicaciones, es utilizado el Klystron de onda continua (CW) de valores intermedios de potencia y sintonizable en una banda ancha (200 MHz) con una potencia de salida de 10 KW en CW en la banda de frecuencias de 7.9 – 8.5 GHz.

Modelo VKP- 8275 es el más utilizado en procesos industriales para el secado y el calentamiento. Debido a que en este tipo de procesos no es indispensable un gran ancho de banda, este modelo proporciona una potencia media de salida de 100 KW a la frecuencia sintonizable de 910- 920 MHz teniendo un ancho de banda de 4 MHz y una eficiencia cercana al 65%.

En particular el modelo VKX-7809 se ha constituido como un elemento clásico de un radar de rastreo, en el intervalo de 10-10.25 GHz, proporcionando una potencia de 2.5 KW, con un ancho de banda de 50 MHz. Para radares pulsados, el tipo VKS-8345 con seis cavidades alcanza potencias de pico de 4 MW y potencias medias de 6.7 KW a la frecuencia de 3 GHz, con un ancho de banda de 200 MHz.

II.4.2 EL Magnetrón.

El Magnetrón fue inventado en 1921 y estaba limitado a los laboratorios como una fuente más de señal, para 1940 había experimentado gran desarrollo, debido a la necesidad urgente de potencia de microondas para los sistemas de radar utilizados en la Segunda Guerra Mundial. En base a su estructura interna se puede tener en cuenta tres clases de Magnetrones:

- 1.- Ánodo segmentado: Este tipo de magnetrón proporciona una frecuencia de operación bastante inferior a la de microondas.
- 2.- De frecuencia ciclotrónica: Este magnetrón a pesar que funciona a frecuencias dentro del intervalo de microondas, la potencia de salida es muy pequeña, aproximadamente 1 W a 3 GHz y su eficiencia muy baja.
- 3.- Onda progresiva: Basa su funcionamiento a la interacción de los electrones dentro de un campo magnético propagándose con una velocidad lineal. Este tipo es al que se refiere en general cuando se emplea el término genérico de magnetrón.

En la Figura II.4 se muestra el esquema general de un magnetrón cilíndrico, donde se observan varias cavidades conectadas entre si por pequeñas aberturas (llamadas gaps), cuando los electrones escapan del cátodo hacia el ánodo estos siguen una trayectoria curva debido a la disposición de los campos magnéticos, si los campos son muy intensos los electrones no llegarán al ánodo, sino que regresarán al cátodo dando lugar a que en el ánodo la corriente sea nula.

Estableciéndose un voltaje (V_0) entre el cátodo y ánodo y el campo magnético (B_0) se aplica a lo largo del eje de simetría del cilindro. Para ciertos valores de voltaje DC y la densidad de flujo magnético (B_0), los electrones siguen trayectorias cicloides en el espacio comprendido entre el cátodo y el ánodo, tal y como se muestra en la Figura II.5.a.

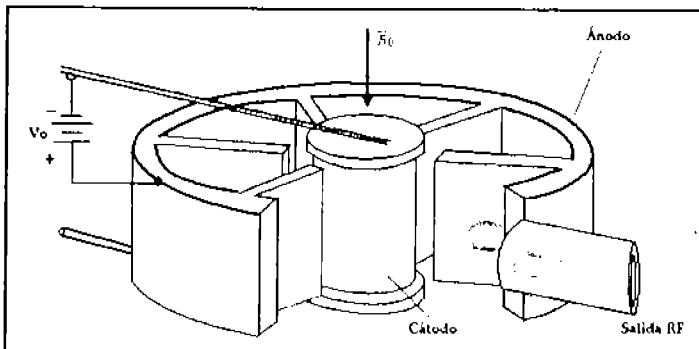


Figura II.4. Esquema general de un Magnetrón

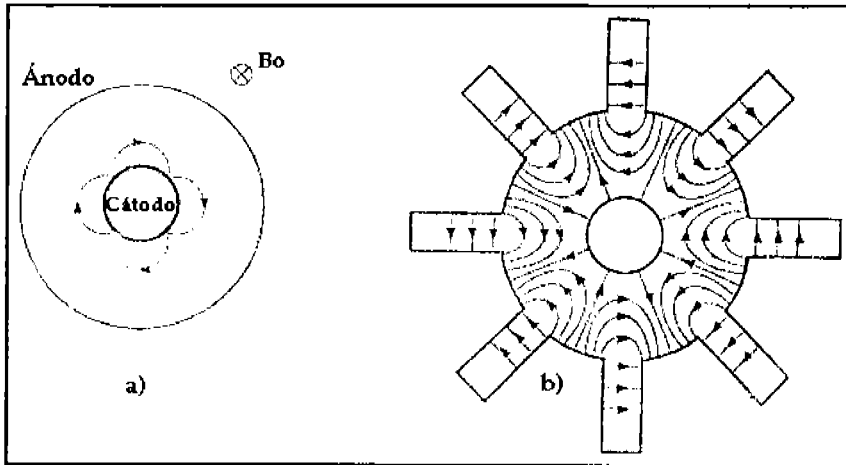


Figura II.5. a) Trayectorias curvas de los electrones y b) Líneas de fuerza

Para que un electrón se aproxime al ánodo y después regrese al cátodo, necesita de ciertos valores de B_0 y V_0 , a esta condición se le denomina "condición de corte" del magnetrón.

Si R es el radio de la trayectoria cicloidial y v la velocidad tangencial e igualando las fuerzas que actúan sobre el electrón, se puede obtener la frecuencia ciclotrónica del movimiento circular que viene dada por:

$$\omega_c = \frac{v}{R} = \frac{eB}{m}$$

y siendo el período para una revolución completa:

$$T = \pi \frac{2}{\omega} = \frac{2\pi m}{eB}$$

Al ser la estructura cerrada, solamente serán posibles las oscilaciones si el cambio total de fase alrededor de la estructura es un múltiplo entero de 2π radianes. Por consiguiente, si hay N cavidades en la estructura del ánodo, el cambio de fase entre dos cavidades adyacentes será:

$$\phi_n = \frac{2\pi n}{N}$$

Siendo n un número entero que determina el modo de oscilación. Para crear las oscilaciones en la estructura, los valores del voltaje DC del ánodo tiene que ser tal que la velocidad media de los electrones se corresponda con la velocidad de fase en la estructura. Los magnetrones funcionan normalmente en el modo π (modo fundamental), es decir $\phi_n = \pi$.

Las líneas para este modo se muestran en la figura II.5.b, en el modo π la excitación es mayor fundamentalmente en las cavidades y que las fases son opuestas en cavidades contiguas. El cambio sucesivo del campo en cavidades contiguas se puede considerar como una onda viajando a lo largo de la superficie de la estructura de cavidades. La transferencia de energía de los electrones al campo se realiza sólo si éstos son frenados por el campo cuando pasan de una cavidad a otra del ánodo. Logrando la extracción de dicha energía mediante una guía de onda.

II.4.2.1 Aplicaciones.

Los magnetrones de onda continua (CW) proporcionan potencias de hasta 10 KW. Su aplicación más extendida esta en los hornos de microondas domésticos. Tienen una frecuencia de operación fijas de 2.450 o 915 MHz, dependiendo de su aplicación estas frecuencias suelen variar.

Su aplicación se extiende también a la eliminación de la humedad, generación de plasma, destrucción de basuras, el procesado de minerales, entre otras.

En lo que concierne al calentamiento del medio o el material, las microondas se han impuesto sobre otros medios tradicionales debido principalmente al bajo costo y la limpieza del proceso.

En comunicaciones, el tipo de magnetrones pulsados son utilizados principalmente en el radar ya que proporcionan muy altas potencias de pico de salida (en un intervalo de kilovatios a megavatios) durante una duración muy corta. El intervalo de frecuencias en el que funciona este tipo de magnetrones es de 1 a 5 GHz.

CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Tres son las características de una onda electromagnética propagándose en el espacio libre o la atmósfera: Refracción, reflexión y difracción.

III.1 Refracción.

Para una onda electromagnética propagándose en la atmósfera, ésta atraviesa diferentes capas paralelas con diferentes índices de refracción, refractándose en el límite de cada capa, cambiando su dirección y velocidad, curvándose la propagación, como se puede observar en la Figura III.1.

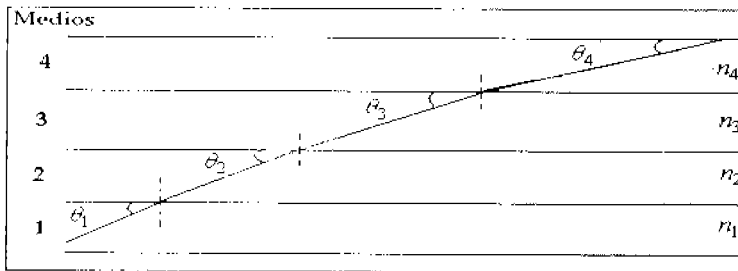


Figura III.1. Comportamiento de la onda electromagnética propagándose en diferentes medios con sus respectivos índices de refracción.

Donde n_1 , n_2 , n_3 y n_4 son los índices de refracción de cada medio. Reacuérdesse que el índice de refracción se define como: la razón de la velocidad de la onda en el espacio libre con respecto a la velocidad de la onda a través del material.

Siendo la expresión: $n = \frac{c}{v}$; resultando una cantidad adimensional y generalmente es mayor que la unidad. θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 son los ángulos de incidencia.

Lo anterior puede estudiarse a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \text{----- III.1 (Ley de Snell)}$$

La razón del seno del ángulo de incidencia con respecto al seno del ángulo de refracción es igual a la razón de la velocidad de la onda en el medio incidente con respecto a la velocidad de la onda en el medio de refracción. Regla descubierta por el astrónomo danés Willebrord Snell en el siglo XVII.

La onda al pasar de un medio ligero a uno más denso, esta tiende a la normal entre los dos medios y al pasar de un medio denso a uno más ligero, se aleja de la normal, tendiendo la trayectoria a curvarse, como puede verse en la Figura III.2.

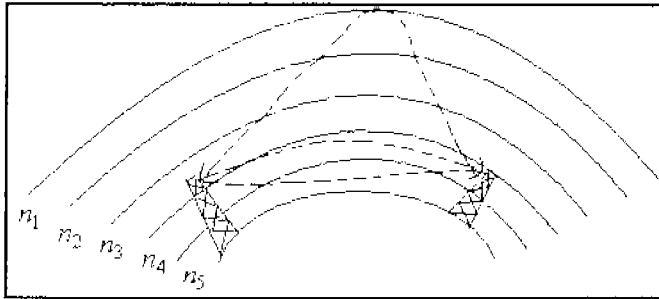


Figura III.2. Diferentes índices de refracción que se encuentran en las diferentes capas por las cuales atraviesa la onda electromagnética, siguiendo una trayectoria curva.

Como puede verse, las trayectorias de las ondas no siguen una línea recta, sino que en función de su frecuencia, el ángulo de incidencia y el índice de refracción su trayectoria se curva.

Las velocidades de las ondas que viajan en las capas inferiores con índices mayores son más lentas que a mayores altitudes.

Se puede mostrar una curvatura uniforme de la propagación de una onda por una propagación lineal, modificando el radio de la tierra de tal forma que la curvatura relativa entre la onda y la tierra permanezca inalterable.

Al nuevo radio se le conoce como radio efectivo y la relación con el radio real es el factor K.

$$K = \frac{A}{R} \text{----- III.2}$$

Donde A es el radio modificado de la tierra y R es el valor real.

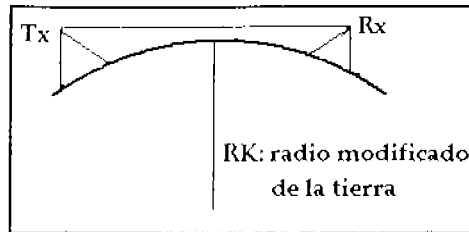


Figura III.3. Onda propagándose en línea recta.

III.1.1. Línea de vista al horizonte.

La línea de vista al horizonte para una antena es interpretada como la distancia máxima con la que puede "ver" al receptor; siendo distinto a la línea de vista óptica de una persona.

a) Cálculo de la distancia en línea de vista real

Se le llama así a la vista en el horizonte que llega a percibir el ojo humano y sólo podrá modificarse para las ondas electromagnéticas, considere la Figura III.4

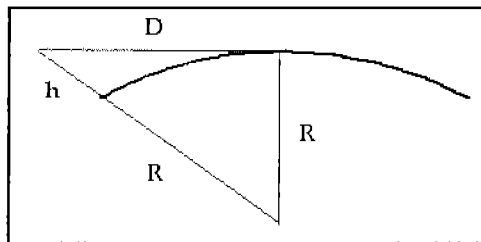


Figura III.4. Distancia en vista real.

Donde:

h = Altura del objeto

R = Radio real de la tierra = 6378 Km

D = Distancia al horizonte

Aplicando el teorema de Pitágoras:

$$D^2 + R^2 = (h+R)^2$$

$$D^2 + R^2 = h^2 + 2hR + R^2$$

Como $2hR \gg h^2$

$$D^2 + R^2 - 2hR + R^2$$

$$D^2 - 2hR$$

$$D = \sqrt{2hR}$$

Sustituyendo el valor de R y expresando h en kilómetros.

$$D = \sqrt{2(6378)h}$$

$$D = \sqrt{12756h} \dots\dots\dots\text{III.3}$$

Para el caso en que D se encuentre en el arco terrestre, es decir que la altura del objeto sea casi cero, el resultado de D será aproximado a D'. Como puede verse en la Figura III.5.

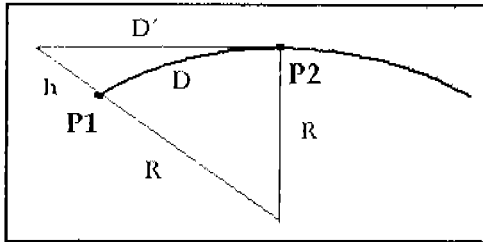


Figura III.5. Distancia entre P1 y P2 sobre el arco de la tierra.

a) Cálculo de la distancia al horizonte con el radio modificado.

Ahora el valor de R será modificado K veces, como puede observarse en la Figura III.6 y realizando el mismo procedimiento tenemos que:

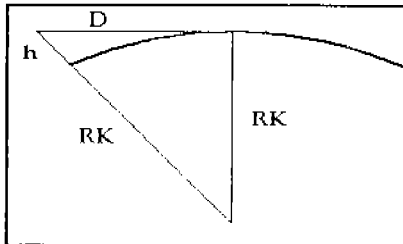


Figura III.6. Radio terrestre modificado en un valor K.

$$D^2 + (KR)^2 = (h + KR)^2$$

$$D^2 + (KR)^2 = h^2 + 2hKR + (KR)^2$$

Como $2hKR \gg h^2$

$$D^2 + (KR)^2 = 2hKR + (KR)^2$$

$$D^2 = 2hKR$$

$$D = \sqrt{2hKR}$$

Sustituyendo el valor de $R = 6378$ km,

$$D = \sqrt{2(6378)Kh}$$

$$D = \sqrt{12756Kh} \text{----- III.4.}$$

Donde, h es expresada en Kilómetros.

III.1.2 Comportamiento de K .

Los valores de K bajo condiciones normales y de acuerdo a la zona climática donde se propague la onda, tenemos que se dividen en general en tres zonas:

Zona polar: Su valor varía de $6/5$ a $4/3$

Zona templada es de $4/3$

Zona cálida de $4/3$ a $3/2$

Las diferentes trayectorias de la onda y los respectivos valores de K pueden observarse en la Figura III.7. El multiplicar este factor al radio real de la tierra, es con el fin de lograr una trayectoria recta.

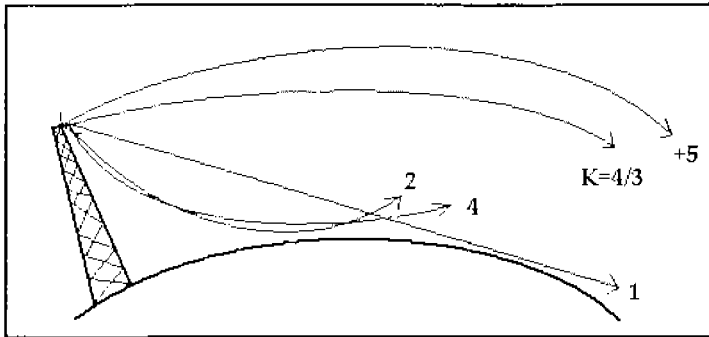


Figura III.7. Trayectorias para diferentes valores de K.

Pero cuando hay una elevación en el terreno y una modificación en el radio terrestre, se debe tomar en cuenta esta variación, por lo cual hay que calcular a h_i (modificación de la altura).

III.1.3 Corrección de la curvatura terrestre.

Al modificar el radio terrestre y considerando la superficie de la tierra no como una esfera perfecta, sino por el contrario, con una topología irregular, esto es, con un suelo accidentado por montañas, cañones, etc. En la Figura III.8 se observa el efecto del cambio del radio terrestre, siendo que cuando A es mayor a R, la curvatura terrestre sufre un levantamiento; Figura III.8 (b), pero si A es menor a R ver Figura III.8 (a), la curvatura tiende a disminuir, en los dos casos hay una variación en la altura que hay que determinar.

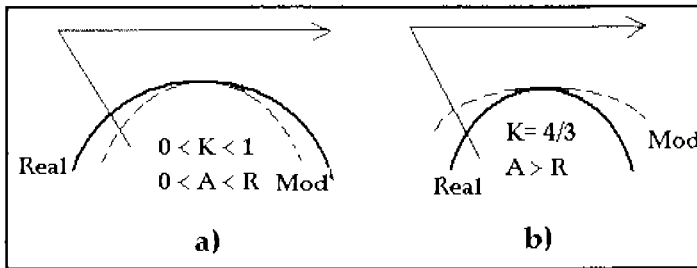


Figura III.8. Cambio en la curvatura en función del valor de K.

Cuando existe un perfil lineal y haciendo uso de la geometría plana, (*) calcularemos para un determinado punto la altura real cuando ha sido modificado el radio terrestre por un valor K, veamos pues la Figura III.9.

(*) Ver anexo A (matemático).

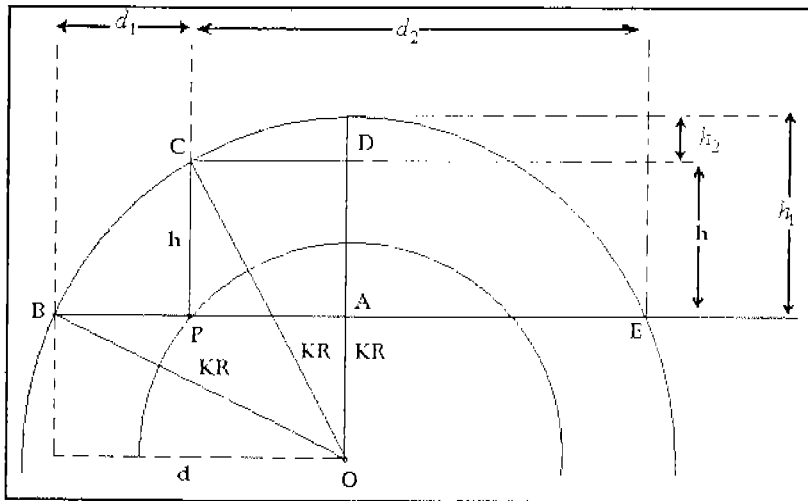


Figura III.9.Cálculo de la altura modificada.

$$h_1 = \frac{d^2}{2KR} \text{-----III.5}$$

Para encontrar a h_2 , tenemos que:

$$h_2 = \frac{(d - d_1)^2}{2KR} \text{-----III.6}$$

Pero como $h = h_1 - h_2$

$$h = \frac{d_1 d_2}{2KR} \text{-----III.7}$$

Resultando esta última expresión para calcular la altura, cuando se ha modificado el radio terrestre. Siendo $R = 6378$ km.

Para el caso en que las distancias d_1 y d_2 sean iguales la altura modificada será máxima, ya que se encontrará en el punto medio de la trayectoria del arco BE.

III.2 Reflexión de la onda electromagnética

La otra propiedad física de la onda electromagnética es la reflexión. Durante la trayectoria desde un punto T_x hacia R_x , existe una onda directa E_D y una reflejada E_R tal que:

$$E = E_D + E_R e^{j\phi} \text{-----III.8}$$

Siendo: E .- Amplitud de la onda recibida formada por la amplitud de la onda directa más la amplitud de la onda reflejada y tomando en consideración un desfaseamiento ϕ .

E_D .- Amplitud de la onda directa

E_R .- Amplitud de la onda reflejada

Ver Figura III.10.

Ya habíamos dicho que la trayectoria de propagación de una onda electromagnética entre dos puntos no es recta, debido a la refracción que sufre durante el trayecto. Si la onda choca con un objeto, esta se refleja y llega al punto receptor ocasionando una interferencia en la señal directa. Tomando esto en cuenta para los cálculos de propagación y basándose en un perfil topográfico se calculará el punto exacto donde ocurre la reflexión; para evitarla se necesitará modificar la posición o la altura por medio de torres. Hay ocasiones en que la onda reflejada es nula en el receptor, debido a una topología irregular, como puede observarse en la Figura III.11.

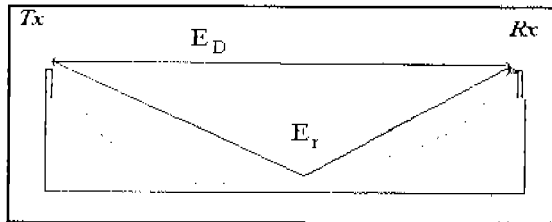


Figura III.10. Reflexión de la onda electromagnética.

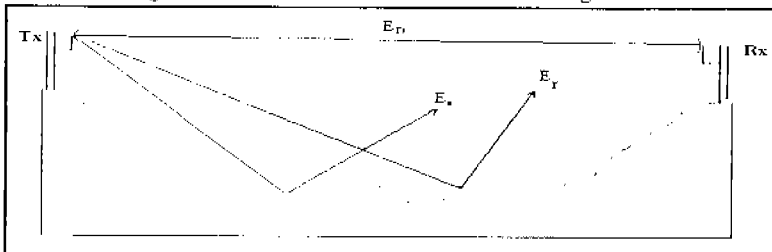


Figura III.11. Ondas reflejadas no incidentes en el receptor.

En la Figura III.12 puede observarse un frente de ondas reflejándose, donde θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 ángulo de reflexión. Estos ángulos se miden con respecto a la normal (N) a la superficie.

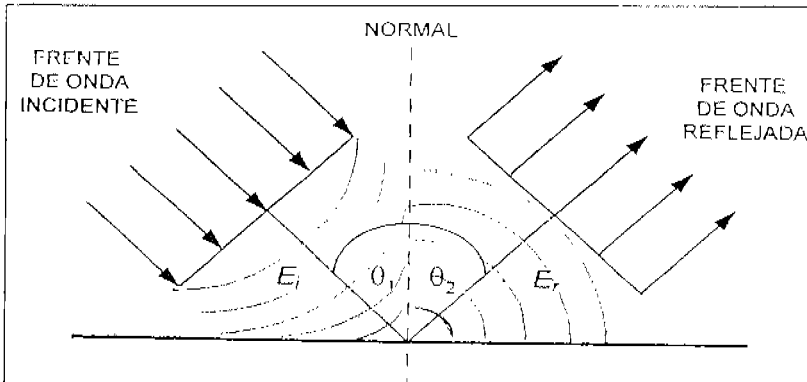


Figura III.12. Frente de ondas reflejada.

a) En una superficie plana

Para el cálculo del punto de reflexión en una superficie plana, se toma en cuenta que la distancia entre el punto de transmisión y el de recepción no debe de exceder los 15 km, ya que considerando que el arco terrestre comprendido entre estos puntos es cercano a una recta, se aplica el siguiente análisis. Ver Figura III.13.

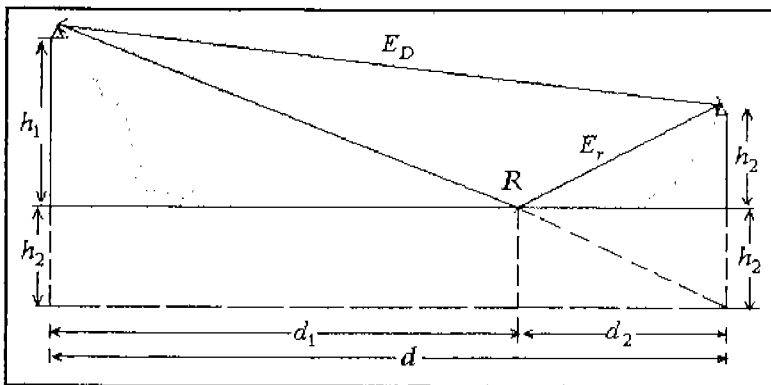


Figura III.13. Determinación del punto de reflexión en una superficie plana.

Recordando el caso de semejanza de triángulos rectángulos y que estos tienen un ángulo igual (el ángulo recto) y tomando el caso cuando los catetos son proporcionales tenemos que:

$$\frac{h_1}{h_1 + h_2} = \frac{d_1}{d_1 + d_2}$$

Como $d = d_1 + d_2$

Despejando a d_1

$$d_1 = \frac{h_1}{h_1 + h_2} d \text{-----III.9}$$

Similarmente para d_2

$$\frac{h_2}{h_1 + h_2} = \frac{d_2}{d_1 + d_2}$$

$$d_2 = \frac{h_2}{h_1 + h_2} d \text{-----III.10}$$

Las ecuaciones III.9 y III.10 definen el punto de reflexión R.

b) En una superficie esférica.

Cuando la distancia entre el punto de transmisión y el de recepción excede los 15 km, hay que tomar en cuenta la curvatura de la tierra.

El siguiente cálculo (*) se realizará para encontrar el punto de reflexión en una superficie esférica a nivel del mar, guiándonos en la Figura III.14.

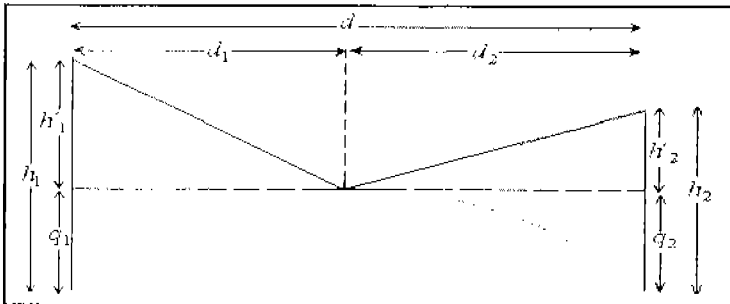


Figura III.14. Punto de reflexión de una onda electromagnética en una superficie esférica.

(*) Ver anexo A (matemático).

Utilizando las siguientes expresiones:

$$d_1 = \frac{d}{2} (1+b) \text{----- III.11}$$

$$d_2 = \frac{d}{2} (1-b) \text{----- III.12}$$

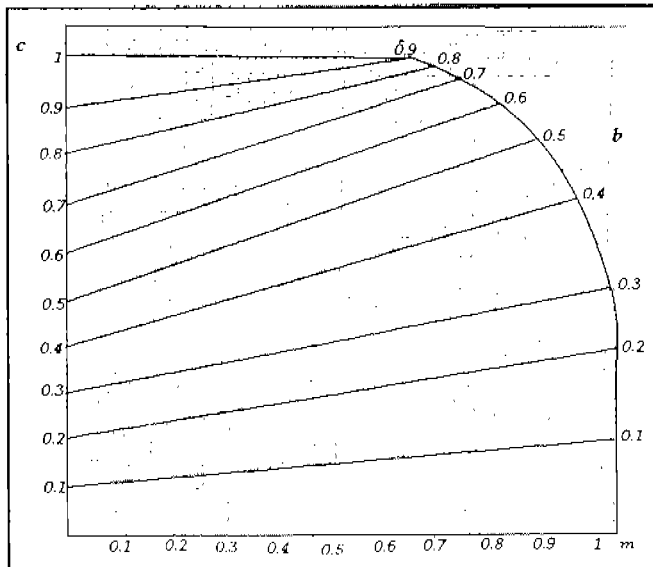
Y c se define como:

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \text{----- III.13}$$

Y si se supone que

$$m = \frac{d^2}{4KR(h_1 + h_2)} \text{----- III.14}$$

En la siguiente Gráfica, donde el eje horizontal contiene los valores de m y los de c el eje vertical, puede obtenerse el valor de b y haciendo uso de las ecuaciones podemos obtener las distancias donde se encuentra el punto de reflexión.



Gráfica III.1. Para determinar los valores de b .

Veremos a continuación un ejemplo.

Calcular el punto de reflexión con los siguientes datos:

$$d = 60 \text{ [km]}$$

$$h_1 = 400 \text{ [m]}$$

$$h_2 = 250 \text{ [m]}$$

$$K = 4/3$$

Primero utilizaremos la ecuación III.13

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} = \frac{400\text{m} - 250\text{m}}{400\text{m} + 250\text{m}} = \frac{150\text{m}}{650\text{m}} = 0.23$$

y calculando a m de III.14

$$m = \frac{d^2}{4KR(h_1 + h_2)} = \frac{60^2}{4\left(\frac{4}{3}\right)(6378)(0.4 + 0.25)}$$

$$m = 29.3979 \times 10^{-6} \frac{60^2}{0.65} = 29.3979 \times 10^{-6} \frac{3600}{0.65} = 29.3979 \times 10^{-6} (5538.46) = 0.162$$

Observando la Gráfica donde se encuentran los valores de c y m tenemos que:

$$b = 0.195$$

De la ecuación III.11 y III.12

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

$$d_1 = \frac{60}{2} (1+0.195)$$

$$d_1 = 30 (1+0.195) = 30 + 5.85 = \boxed{35.85 \text{ km}}$$

y para d,

$$d_2 = \frac{d}{2} (1-b) = \frac{60}{2} (1-0.195) = 30 (1-0.35)$$

$$d_2 = 30 - 5.85 = 24.15 \text{ km.}$$

- c) Cuando existe una diferencia muy grande en las alturas entre los puntos de transmisión y recepción.

Para este caso sólo se mencionará la expresión o la ecuación para calcular el punto de reflexión, consideremos pues que $h_1 \gg h_2$ (esto quiere decir; mucho mayor) entonces el punto de reflexión existirá, $d_1 \gg d_2$, obteniéndose el valor de d_2 de la siguiente expresión:

$$d_2 = d \frac{h_2}{(h_1 + h_2) - d} \frac{1}{2KR} \quad \text{III.15}$$

$$\text{Y para } d_1 = d - d_2 \quad \text{III.16}$$

III.3 Difracción.

La naturaleza electromagnética de la luz, el calor, la radiación ultravioleta o las ondas de radio no difieren, salvo en su frecuencia de operación y la cantidad de energía.

Cuando en el trayecto de un haz luminoso se encuentra un objeto, las ondas pueden flexionarse alrededor de los bordes. Dicha flexión de las ondas se le denomina difracción.

Para una onda de radio propagándose en el aire, al encontrarse con un obstáculo, estas se ven estorbadas en su propagación, sufren una redistribución de energía dentro del frente de onda y tras el obstáculo aparece una intensidad de campo.

La difracción también se presenta cuando ondas de radio chocan o rozan alguna superficie, como pueden ser edificios, antenas u otro objeto. Ver Figura III.15.

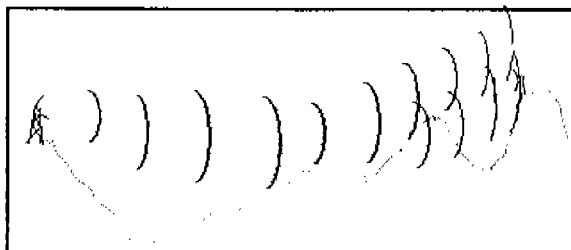


Figura III.15. Difracción de una onda de radio.

Cuando la ondulación sufre una difracción, existe una pérdida por difracción expresándose con la siguiente ecuación:

$$P_d = \frac{c}{\lambda} \text{----- III.17}$$

Siendo:

P_d .- Pérdida por difracción

c .- Equivale a la altura del obstáculo

λ .- Longitud de onda de la señal

La difracción de una onda puede constituir una ventaja, ya que con ella puede obtenerse comunicación en valles, cuencas y detrás de las montañas elevadas. Observe la siguiente figura.

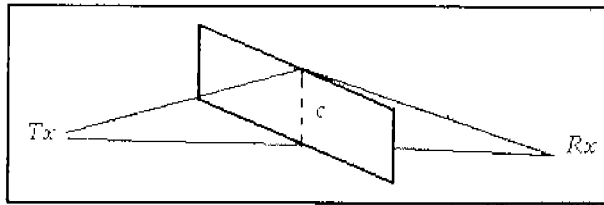


Figura III.16. Observación del efecto de difracción.

III.4 Zonas de fresnel.

Para un punto transmisor (T) que envía ondas de radio hacia un punto receptor (R) en una trayectoria directa TR, conforme la trayectoria se aleje de TR, la distancia que recorre la onda de T a R será más larga, viéndose la fase retrazada con respecto a la fase de la trayectoria directa.

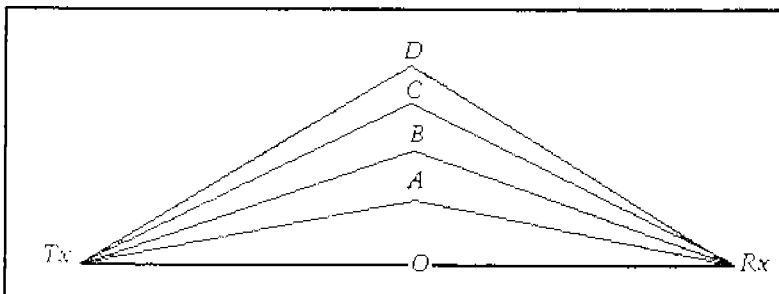


Figura III.17. Zonas de difracción y trayectorias tomadas por las ondas.

Conforme a la teoría de Huygens, se puede pensar que la intensidad de campo del punto receptor es igual a la suma de los vectores de las pequeñas ondas que pasan por cada uno de los puntos O, A, B, C y D.

Haciendo un recordatorio a cerca de la teoría de Huygens, la cual establece que cada frente de onda que avanza puede considerarse una fuente de ondas secundarias llamadas pequeñas ondas. La nueva posición del frente de onda envuelve a las pequeñas ondas emitidas, como se muestra en la Figura III.18.

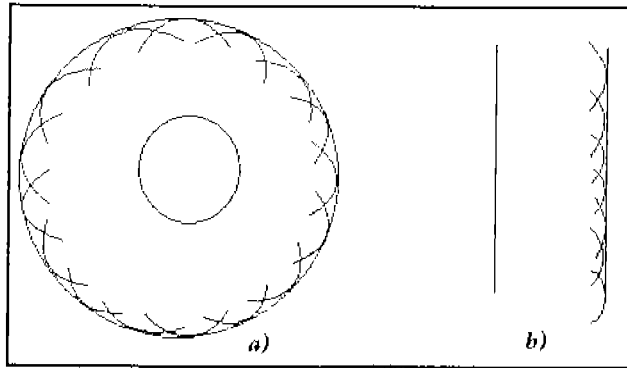


Figura III.18. Principio de Huygens a) Para una onda esférica y b) Para una onda plana.

Si a la Figura III.17 se le dibujan círculos concéntricos de radio A, B, C y D, en el punto O se obtienen las zonas de Fresnel, como puede apreciarse en la Figura III.19.

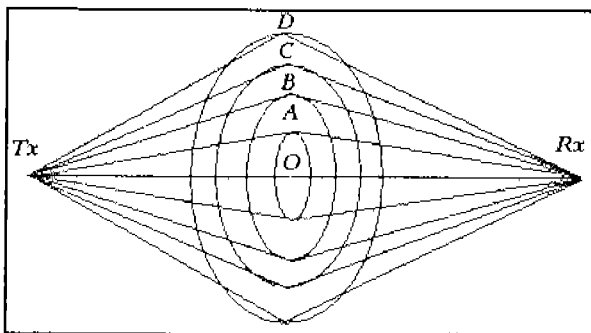


Figura III.19. Zonas de Fresnel.

El radio del primer círculo es tan grande que la diferencia de la trayectoria \vec{OR} y \vec{AR} es $\lambda/2$, medido en fase en el punto R, es decir, la onda en la trayectoria AR llegará retrazada media longitud de onda con respecto a la onda de trayectoria OR . El radio de los sucesivos círculos son múltiplos de $\lambda/2$, por lo tanto:

$TR = d$ ----- Trayectoria directa
 $TAR = TR + \lambda/2$ ----- Primera zona de Fresnel
 $TBR = TR + \lambda$ ----- Segunda zona de Fresnel
 $TCR = TR + (3/2)\lambda$ ----- Tercera zona de Fresnel

Estableciendo la siguiente ecuación para n-zona

$$T_n R = TR + n\lambda/2 \text{ ----- III.18}$$

Las propagaciones dentro de la primera zona de Fresnel, hasta $\lambda/2$ se consideran concurrentes en fase a la propagación TR y se consideran positivas. Entre mayor sea la zona estudiada, menos efecto causa en R su intensidad de campo.

En el punto R se suman las zonas de Fresnel, dando lugar a una constante que se llama pérdida de propagación en el espacio libre.

Ahora bien, todas las ondas dentro de las zonas impares, como 1, 3, 5, 7, etc., se consideran positivas y las pares 2, 4, 6, 8, etc., negativas.

Podrá entenderse mejor si hacemos referencia a la Figura III.20 donde se observa la correspondencia de determinada zona de Fresnel y la variación de la intensidad de campo.

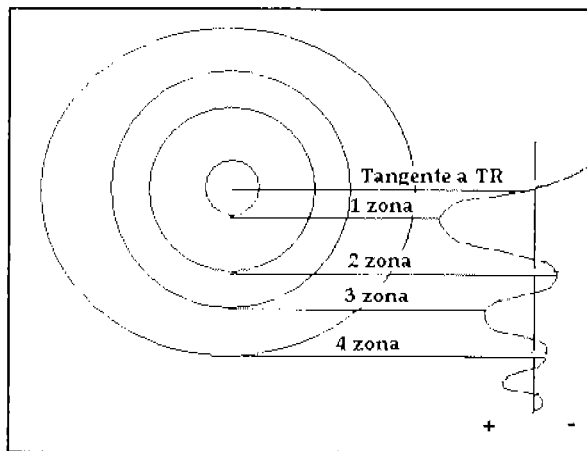


Figura III.20. Zonas de Fresnel con su respectiva intensidad de campo.

Ahora bien, si se recibieran en R sólo las ondas que abarcan la primera zona de Fresnel la intensidad de estas sería teóricamente el doble que las recibidas en una trayectoria directa.

Sería realmente deseable entonces que el radio de la primera zona de Fresnel sea tangente al obstáculo en cuestión, mediante la utilización de torres para la ubicación de las antenas, aunque no siempre es fácil. Viendo la Figura III.21 el obstáculo es tangente a la primera circunferencia de la zona de Fresnel, favoreciendo así las condiciones de propagación ideal.

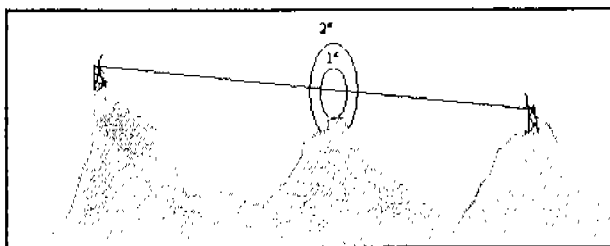


Figura III.21. El obstáculo es tangente al círculo que conforma a la primera zona de Fresnel, favoreciendo las condiciones de propagación.

Cuando el objeto, (filo de navaja) es tangente a cualquier zona impar la pérdida por difracción se convierte en ganancia, mientras que para una zona par se convierte en pérdida. Sin embargo la ganancia o pérdida que se presente en cualquier otra zona fuera de la primera es siempre muy pequeña, pero cuando es tangente a la trayectoria directa TR, la disminución de intensidad de campo en R es notable.

Se determina el radio de las zonas de Fresnel con el siguiente procedimiento. (*)

Si se circunscribe una elipse en cualquier zona de Fresnel cumpliendo con las siguientes igualdades:

En la primera zona de Fresnel y teniendo como referencia la Figura III.22.

$$TA'R = TB'R = TC'R = TR + \lambda/2$$

Similarmenete

$$TA'R = TB'R = TC'R = TR + \lambda/2$$

Recordando que estas trayectorias están dentro de la primera zona de Fresnel y por lo tanto estarán defasadas media longitud de onda con respecto a la trayectoria directa.

Para un análisis de la segunda zona, la igualdad sería con $TR + \lambda$ y así sucesivamente.

(*) Ver anexo A.

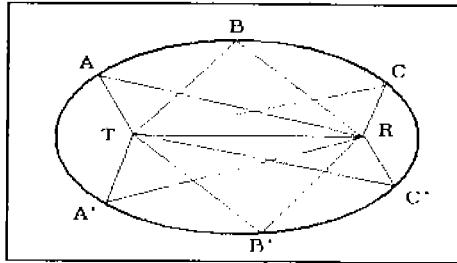


Figura III.22. Diferentes trayectorias de las ondas en la primera zona de Fresnel.

En la Figura III.23 se representa con una elipse toda la radiación en una determinada zona de Fresnel (n). Siendo el radio H de la zona a una distancia d_1 del transmisor y d_2 del receptor, donde $d_1 + d_2 = TR$.

$$t_1 + t_2 = d + \lambda/2; \quad t_1 + t_2 = d_1 + d_2 + \lambda/2 \text{ ----- III.19}$$

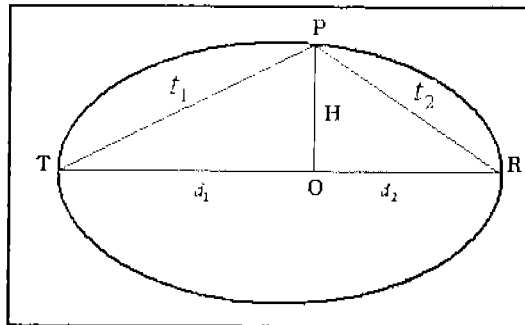


Figura III.23. Elipsoide que representa la energía contenida en una determinada zona de Fresnel.

$$t_1 = d_1 \left(1 + \frac{H}{d_1} \right)^{1/2} \text{ ----- III.20}$$

$$t_2 = d_2 \left(1 + \frac{H}{d_2} \right)^{1/2} \text{ ----- III.21}$$

$$d_1 \left(1 + \frac{H^2}{d_1^2} \right)^{1/2} = \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H^2}{d_1^2} \right) \right] d_1 = t_1 \text{ ----- III.22}$$

$$d_2 \left(1 + \frac{H^2}{d_2^2} \right)^{1/2} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H^2}{d_2^2} \right) \right] d_2 = t_2 \text{ ----- III.23}$$

$$H = \frac{\sqrt{2} n V_c d_1 d_2}{fd} \text{ ----- III.24}$$

Y teniendo las siguientes consideraciones:

$$V_c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Para d_1 y d_2 , debe hacerse la conversión de kilómetros a metros: f en MHz y n es la zona estudiada.

Veamos el siguiente ejemplo:

Determinar con el siguiente perfil la altura necesaria para librar la primera zona de Fresnel (con el obstáculo) siendo la frecuencia de operación de 800 MHz y los datos topográficos son los expresados en la Figura III.24.

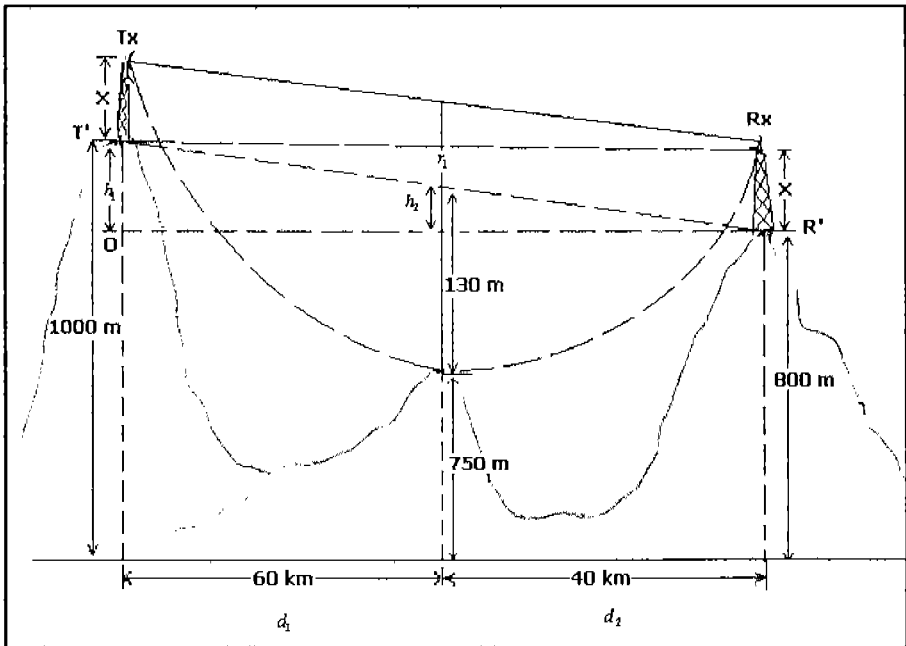


Figura III.24. Datos topográficos para determinar el radio de la primera zona de Fresnel.

$$r_1 - H = (547.72225) \sqrt{\frac{40 \times 60}{800 \times 100}} = (547.72225) \sqrt{\frac{2400}{80000}} = (547.72225) (0.1732)$$

$$r_1 = 94.86 \text{ m}$$

Encontraremos ahora la distancia entre la trayectoria T'R' y el obstáculo, de la siguiente manera:

Del triángulo T'OR' se obtiene la siguiente igualdad

$$\frac{d_1}{h_1} = \frac{d_2}{h_2}$$

$$h_2 = d_2 \left(\frac{h_1}{d_1} \right) \text{----- III.25}$$

$$\text{Siendo } h_1 = 1000 - 800 = 200 \text{ m}$$

Y sustituyendo valores en III.25.

$$h_2 = (40\,000) \left(\frac{200}{100\,000} \right) = 80 \text{ m}$$

Como la distancia del obstáculo a la trayectoria T'R' es de:

$$(800 + 80) - 750 = 130 \text{ m}$$

$$\text{Y } 1000 - h_1 = 800$$

Obteniendo

$$130 \text{ m} - 94.86 \text{ m} = 35.14 \text{ m de libramiento adicional}$$

Si se considera que el perfil es lineal y el incremento por curvatura de la tierra equivale a $K = 4/3$ y según la ecuación III.7 se obtiene:

$$h_K = \frac{d_1 d_2}{2KR}$$

$$h_K = \frac{(60000)(40000)}{(12.756 \times 10^6) \left(\frac{4}{3}\right)} = \frac{2.4 \times 10^9}{17.008 \times 10^6} = 141.11 \text{ m.}$$

Por lo tanto $750 + 141.11 = 891.11$ m de obstrucción real. Sumándole el radio obtenido, dará:

$$891.11 \text{ m} + 94.86 \text{ m} = 985.97 \text{ m.}$$

Que es la altura que se requiere para que el primer círculo de la zona de Fresnel sea tangente al obstáculo; la diferencia:

$$985.97 \text{ m} - 1000 \text{ m} = -14.03 \text{ m} = X$$

Proporciona la altura que necesitan las torres para lograr el objetivo propuesto en el enunciado. Quiere decir entonces que le sobran 14.03 m al sitio donde estará la torre. Puede emplearse un pequeño mástil de unos 2 m de altura para realizar el enlace. Recuerde que estos cálculos son aproximados.

CAPITULO IV. SISTEMA RADIADOR

IV.1 Introducción.

El instituto de ingenieros electrónicos y eléctricos (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE std.145-1983).

Básicamente una antena de radio realiza dos funciones, las cuales son:

- a) Convertir la energía electromagnética proveniente de un generador y que fluye por una línea de transmisión en energía electromagnética que se propaga libremente en el espacio.
- b) Adaptar impedancias entre el generador y el espacio.

Aunque existe una gran variedad en formas, todas tienen en común el ser una región de transición entre una onda guiada y una onda electromagnética radiada al espacio libre, agregando también una característica direccional. Es decir, que la antena radiará la potencia que se le suministra con las características de dirección en función de la aplicación (en forma omnidireccional o directa).

Según la aplicación, se condicionara además de la direccionalidad los niveles de potencia que debe soportar, frecuencia de trabajo, entre otros parámetros que se definirán mas adelante.

Algunas antenas se componen de un segmento de conductor metálico de tipo ferromagnético el cual proporciona mayor conductividad; también son utilizados materiales diamagnéticos tales como el cobre y el aluminio que por ser de bajo costo y características aceptables esta siendo utilizado más comúnmente.

En este tema se tomará como punto de partida la descripción de algunas antenas que se consideran como básicas así como los parámetros que permitirán evaluar el efecto en dicha antena, concentrándonos después únicamente en las antenas denominadas parabólicas utilizadas en los radioenlaces terrestres, haciendo una descripción y mencionando sus principales características.

IV.2 Concepto de radiación.

Consideremos un conductor rectilíneo por el que pasa una corriente continua a través del conductor, creando así un campo eléctrico a lo largo de este y otro magnético alrededor del mismo, estos campos son estacionarios y el sentido y la magnitud de las líneas de fuerza dependen de la dirección y magnitud de la corriente. Figura IV.1.

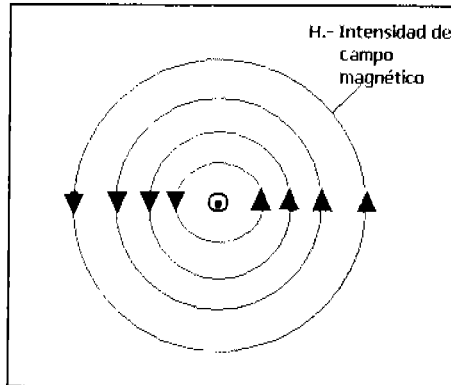


Figura IV.1. Líneas de inducción del campo magnético establecido por una corriente que fluye en un conductor rectilíneo perpendicular al plano de la figura y saliente de dicho plano.

Si se varía la intensidad de la corriente y haciendo circular ahora una corriente alterna, aumentará la intensidad del campo así como la dirección de las líneas del mismo al ritmo de la frecuencia de la corriente.

Si la corriente pasa por un condensador, el campo eléctrico creado entre sus placas predomina sobre el campo magnético, que en este caso es despreciado.

En estas condiciones el campo está confinado entre las placas del condensador de manera que no producen acción alguna fuera de estas, a este tipo de elemento se le llama "circuito cerrado". Considerándose también como circuito cerrado al campo existente en una bobina.

Si a un condensador alejamos las placas o armaduras tal como se muestra en la Figura IV.2. Haciendo disminuir su capacidad, no sólo logrando esto sino que también el campo eléctrico se esparce por el espacio, siendo la dispersión más intensa cuanto más separación exista entre las placas. (Figura IV.2).

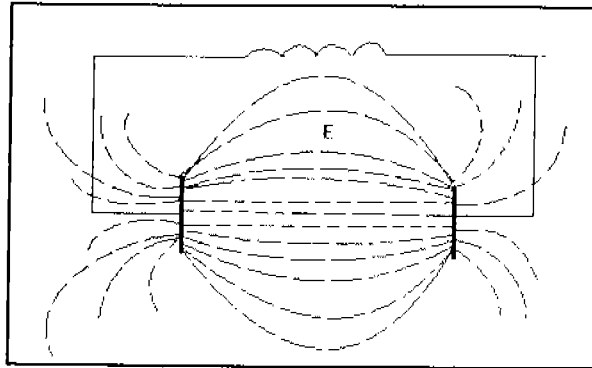


Figura IV.2. Esparcimiento del campo eléctrico cuando las placas se separan.

Esta dispersión es máxima cuando las placas del condensador se colocan de tal forma, como se aprecia en la Figura IV.3. Cuando la frecuencia es muy elevada, y existe resonancia, pueden producirse tensiones y corrientes muy elevadas en este tipo de circuitos denominados como abiertos.

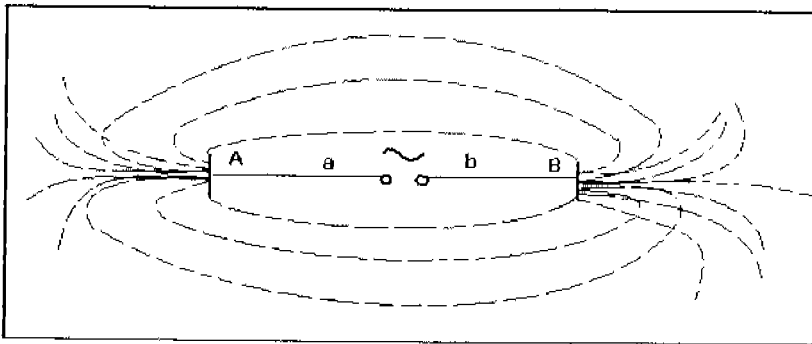


Figura IV.3. Circuito oscilante abierto, también conocido como dipolo.

El circuito oscilante más conocido es el llamado dipolo, como se explicará también más adelante, representado en la figura IV.3.

Tenemos una fuente de corriente alterna, esta corriente fluye a través del conductor a y b, por lo que las placas A y B se cargan alternativamente con cargas positivas y negativas. Logrando así la dispersión del campo magnético producido por la corriente en el conductor a, b y la del campo eléctrico existente entre las placas A y B, produciendo un campo electromagnético propagándose en el espacio.

La representación más sencilla de un campo magnético, es mediante líneas de fuerza o inducción magnética en forma de círculos concéntricos a un conductor, recorrido por una corriente eléctrica, como ya se había dicho anteriormente. Para un punto A que se encuentra situado a una distancia r , como puede advertirse en la Figura IV.4. Existe un campo magnético B, los valores alcanzados de dicho campo en A en cierto instante y los valores del campo correspondientes al mismo instante en las cercanías del conductor, existe una diferencia de fase temporal, representado por:

$$\psi = \frac{r}{v} ; \text{ siendo } v \text{ la velocidad de propagación} \text{----- IV.1}$$

Teniendo como resultado el tiempo que tarda el campo en recorrer la distancia "r" a la velocidad v .

En un determinado instante el valor de la corriente será máximo, al igual que el campo magnético en las inmediaciones del conductor, en el punto A tardará en obtener dicho valor máximo, calculable por la fórmula IV.1.

Si la distancia r es tal, que este defasamiento sea igual a un cuarto de periodo, es decir:

$$\psi = \frac{T}{4}$$

El campo alcanzará su valor máximo en el punto A en el mismo instante en que la intensidad de la corriente en el conductor alcance su valor cero (Figura IV.5).

Estableciendo la siguiente relación:

$$\psi = \frac{T}{4} = \frac{r}{v} ; \text{ donde } r = v \frac{T}{4}$$

A una distancia doble $r = \frac{T}{2} v$ el defasamiento será de 180° , para $r = Tv$ el defasamiento será de 360° , a esta distancia el campo y la corriente vuelven a encontrarse en fase, resultando que a partir de ese punto la distribución del campo es de manera idéntica.

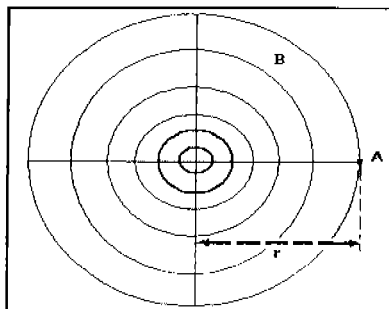


Figura IV.4. Representación de las líneas de fuerza de un campo magnético alrededor de un conductor.

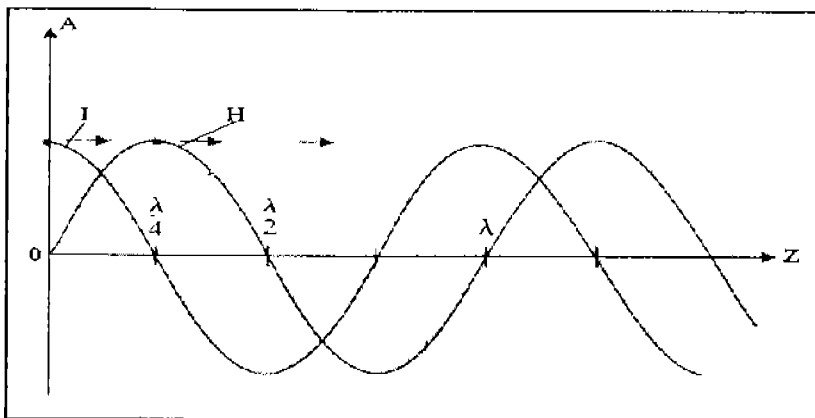


Figura IV.5. Defasamiento existente entre la corriente del conductor y el campo magnético alrededor del mismo. Propagándose cada señal en medios y direcciones diferentes, para:

$$r = v \frac{T}{4}$$

IV.3 Tipología de antenas.

Una de las diferencias que existen entre las antenas es; al grupo de direccionalidad al que pertenecen. Existen 3 grupos básicos:

- Omnidireccionales
- Semidireccionales
- Direccionales

En el primer inciso el patrón de radiación se propaga en 360° alrededor de ella y el lóbulo de radiación es parecido al de un toroide.

Para el caso del inciso b, el lóbulo abarca una apertura de 180° con mayor intensidad de radiación en 90° y decrece hacia sus extremos.

En el último caso, la radiación está comprendida en un ángulo de apertura inferior a los 90° . Que es el caso de las antenas parabólicas.

Otra forma de clasificar las antenas es según la aplicación y la frecuencia a la que operará, las antenas presentan características peculiares que dan origen a distintos tipos y tamaños. En una forma general, los tipos más comunes se pueden agrupar en los bloques siguientes:

Antenas alámbricas.- Están construidas con hilos conductores capaces de radiar energía electromagnética a partir del flujo de corriente que transita por ellas. Pueden estar formadas por hilos rectos (dipolo y róbica), espiras (circular, cuadrada, o de cualquier forma arbitraria) y hélices.

Antenas de apertura y reflectores.- En las antenas de apertura la generación de las ondas a radiar se consigue de una distribución de campos, soportada por la antena y son excitadas con guías de onda. El reflector más común es el parabólico y son utilizados más comúnmente para comunicaciones a grandes distancias, y las hay en gran variedad como podrá verse más adelante.

Agrupaciones de antenas.- Para ciertas aplicaciones, es necesario obtener ciertas características de radiación, que no pueden obtenerse con un solo elemento, es necesario la agrupación de varios elementos para lograr así el patrón requerido. Esta agrupación puede realizarse con cualquier tipo de antena.

Algunos ejemplos de este tipo de antenas son: Yagui-Uda y antena de apertura.

IV.4 Antena isotrópica.

La antena de referencia ideal por definición es la antena isotrópica, (isos, igual y tropos, dirección). La emisión hipotética de tal radiador es homogénea e isotrópica (omnidireccional) en todas las direcciones del espacio.

La radiación generada y emitida al espacio por una antena o radiador práctico o comercial, nunca tiene la misma intensidad de campo en todas las direcciones o sea que carece de omnidireccionalidad, de hecho puede llegar a cero en algunas de las direcciones de radiación y en otras puede llegar a más de lo que se podría esperar.

El radiador isotrópico genera un patrón de radiación perfectamente esférico (Ver Figura IV.6).

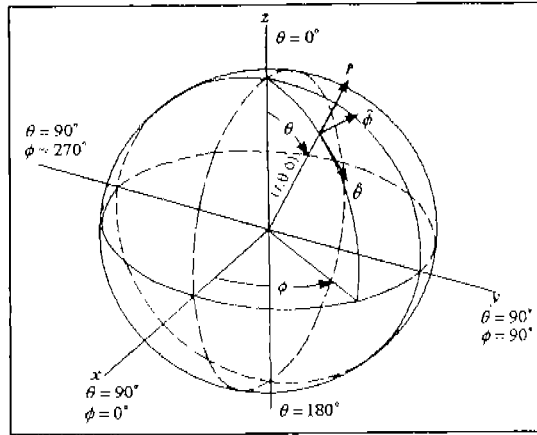


Figura IV.6. Patrón de radiación omnidireccional en un sistema de coordenadas esféricas.

IV.5 Radiador tipo dipolo.

El radiador tipo dipolo se puede asemejar a un elemento abierto de corriente alterna donde las cargas oscilan desde un extremo al otro. En el espacio cercano a la antena (campo cercano) predomina el campo de inducción de carácter estacionario, caracterizado por la transferencia de energía desde la fuente al espacio circundante, y viceversa. El dipolo consta de dos vástagos de conductores aislados entre sí, de forma que la distribución de corriente en el dipolo son del orden de la longitud de onda (ver Figura IV.7 a).

La intensidad de radiación, como se puede observar en la Figura IV.7.c para un dipolo elemental, donde el patrón de radiación es representado por dos círculos tangentes, donde en el punto de unión entre ellos se encuentra el dipolo, perpendicular al eje horizontal, cuya máxima intensidad se encuentra en ángulo recto a la línea del conductor.

Para el patrón sólido (Figura IV.7 b) consiste en un toroide que gira alrededor del conductor como eje vertical.

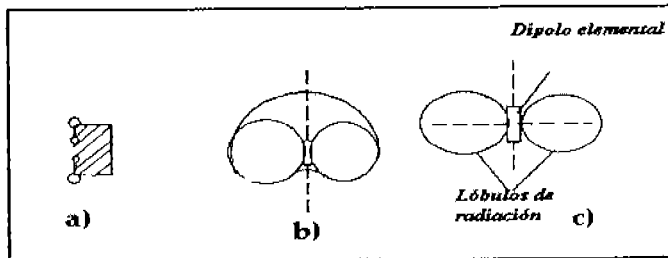


Figura IV.7. a) Distribución de corriente de una antena Hertz, b) Corte transversal del patrón sólido de un dipolo elemental y c) Dipolo elemental.

IV.6 Dipolo de media onda.

Hay un segundo radiador que es tomado como referencia, el dipolo de media onda, en él cada segmento tiene una longitud de un cuarto de onda ($\frac{\lambda}{4}$). Como se aprecia en la Figura IV.8.

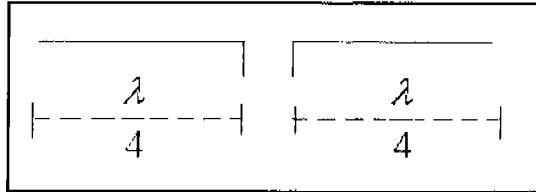


Figura IV.8. Representación de un dipolo de media onda.

IV.6.1 Radiación de un dipolo.

La radiación de un dipolo en el espacio libre es tal, como se representa en la Figura IV.9, en un plano perpendicular a la dirección del conductor, radia exactamente igual en todas las direcciones. Mientras que en el plano del conductor radia con un máximo en la dirección perpendicular al hilo y un mínimo en la dirección del hilo.

A efectos prácticos se considera la radiación del dipolo como omnidireccional, excepto para los extremos del conductor.

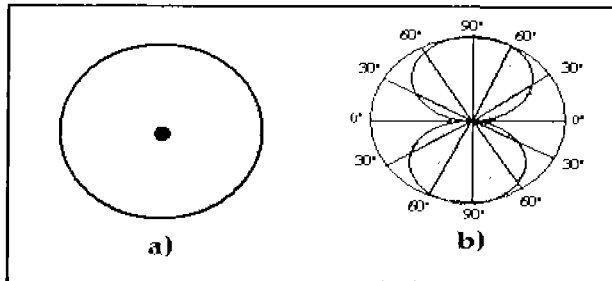


Figura IV.9. Diagramas de radiación horizontal (a) y vertical del dipolo (b).

IV.7 Ganancia y direccionalidad.

La ganancia de una antena es la medida de la eficiencia de la misma para una determinada potencia radiada en una determinada dirección, agregando que hay una relación entre la potencia radiada en cierta antena y la potencia radiada en la misma dirección de una antena de referencia, tal como la antena isotrópica o el dipolo de media onda, tomando en cuenta que ambas están alimentadas con la misma potencia constante.

Si es conocido el patrón de radiación y no hay pérdidas resistivas del sistema, la ganancia G se define como:

$$G = \frac{\text{máxima intensidad de potencia}}{\text{intensidad promedio de potencia}} = \frac{4\pi |E_0|^2}{\iint |E|^2 d\Omega} \quad \text{----- (IV.2)}$$

Siendo $|E_0|$ la magnitud potencial del campo en el punto máximo del patrón de radiación. $|E|$ magnitud potencial del campo en cualquier dirección y "*" se refiere a todos los ángulos, (ϕ, θ) .

El patrón de radiación de un dipolo de media onda tiene una concentración de energía sobre los ejes en forma toroidal 1.64 veces mayor que el patrón emitido por una antena isotrópica, ambas alimentadas con el mismo potencial.

Si se quiere obtener la ganancia de una antena dipolo con respecto a una antena isotrópica y utilizando logaritmos se tiene que:

$$\text{dBi} = 10 \log 1.64$$

$$\text{dBi} = 2.15$$

Se puede decir entonces que: el dipolo de media onda sin pérdidas tiene una ganancia de 2.15 dBi sobre el radiador isotrópico.

$$0 \text{ dBd} = 2.15 \text{ dBi}$$

La ganancia puede expresarse en función de la direccionalidad

$$G = KD \text{----- (IV.3)}$$

En donde K es la eficiencia del radiador, esto es, potencia radiada sobre potencia de entrada. La direccionalidad se define como:

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

Donde P es la densidad de potencia en el máximo punto en la superficie del lóbulo principal de radiación y P_{AV} es la densidad de potencia promedio.

IV.8 Área efectiva.

Existe una cierta área de radiación o área efectiva que se define como:

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \text{----- (IV.4)}$$

Siendo G la ganancia en potencia y λ es la longitud de onda de la señal.

En la siguiente tabla se puede observar la ganancia de algunas antenas en relación con el radiador isotrópico y su área efectiva correspondiente.

Radiador	Ganancia sobre radiador isotrópico	dBi (10 log G)	Área efectiva
Radiador isotrópico	1	0 dBi	$\lambda^2/4\pi$
Dipolo elemental	1.5	1.761 dBi	$1.5 \lambda^2/4\pi$
Dipolo de media onda	1.64	2.15 dBi	$1.64 \lambda^2/4\pi$
Arreglo omnidireccional L=longitud, intervalos $\leq \lambda$	$= \frac{2L}{\lambda}$	-----	$\approx \frac{L\lambda}{2\pi}$
Parábola A = área de disco parabólico	$(6.3 - 7.5) \frac{A}{\lambda^2}$	-----	$(0.5 - 0.6)A$

Tabla IV.1. Ganancia y área efectiva de algunas antenas, tomando como referencia al radiador isotrópico.

IV.9 Potencia aparente y efectiva radiada por una antena.

La potencia suministrada por un amplificador a una antena, sufre pérdidas, cuando esta es inyectada a una línea de transmisión hacia la antena. Tomando en cuenta también la calidad del cable o línea. El factor PAR (potencia aparente radiada) se calcula en Watts o dBW.

A la combinación de la potencia aparente inyectada a la antena y la ganancia de la misma, se le denomina potencia efectiva radiada (PER). El factor PER es calculado en Watts o dBW.

Veremos a manera de ejemplo para mostrar como se calculan estos factores, tomando como punto de referencia tres datos, proporcionados generalmente por el fabricante y son: la potencia del transmisor, pérdidas en la línea de transmisión y ganancia de la antena en dBi o dBd.

Ejemplo 4.1. Calcule los valores de PAR y PER con los siguientes datos:

$$T_x = 100 \text{ W}$$

Pérdidas en la línea hacia la antena = - 1 dB

Ganancia de la antena = +6 dBd

1. Cálculo de la potencia aparente radiada (PAR), en la entrada de la antena. La potencia de transmisión es de 100 W y la pérdida en la línea hacia la entrada de la antena es igual a -1 dB, convertiremos los 100 W a dB.

$$\text{dBW} = 10 \log 100 = 20$$

Y realizando una diferencia

20 dBW - 1 dBW = 19 dBW; aplicando antilogaritmos para encontrar el valor en Watts.

$$19 = 10 \log W$$

19 dBW equivale a 79.43 Watts, entonces

$$\text{PAR} = 79.43 \text{ Watts}$$

CÁLCULO DE PER

$$10 \log 100 = 20$$

20 dBW + 6 dBd = 26 dBW (Referidos a un dipolo de media onda)

$$26 \text{ dBW} = 316.227 \text{ Watts}$$

$$\text{PER} = 316.227 \text{ W.}$$

IV.10 La antena parabólica.

Las antenas cuya radiación es del tipo direccional, son utilizadas en la comunicación de punto a punto para aprovechar la mayor energía posible entre ambos. Los dos tipos básicos son: Yagi-uda y Parabólicas.

En los enlaces radioclésicos terrestres se utilizan una variedad de antenas como las llamadas antenas reflectoras o parabólicas, es por esto que en este tema se mencionan las principales características de radiación, los tipos que existen, así como sus parámetros y la construcción de las mismas.

La antena parabólica funciona apoyándose en un reflector para lograr una gran ganancia direccional, gran ancho de banda y un buen rendimiento. Básicamente cuenta con un "espejo" y un excitador. Las antenas que utilizan este principio son varias, como se ilustra en la Figura IV.10.

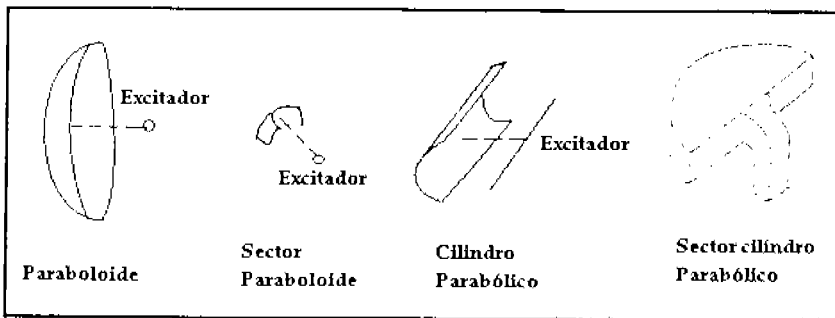


Figura IV.10. Tipos de reflectores.

Puede ser un parabolóide de revolución, un sector del mismo, un cilindro parabólico o un segmento de éste, limitado por dos planos conductores paralelos.

Por ser más común en los radioenlaces terrestres se va a estudiar el parabolóide de revolución. Para el parabolóide de revolución, hay que tomar en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

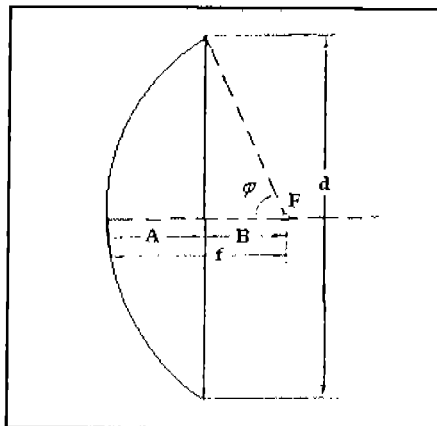


Figura IV.11 Parámetros en una antena parabólica.

Abertura (d).- Es el diámetro de la circunferencia, formada por los bordes de la parábola.

Ángulo de apertura (φ).- Es el ángulo formado en el punto donde converge la línea focal y la línea que va de ese punto hacia un extremo o borde de la parábola.

Distancia focal (f).-Es la distancia que existe entre el vértice de la parábola al punto focal.

Factor de efectividad (γ).- Es un valor constante y esta en función de la perfección constructiva de la parábola (suele valer de 0.5 a 0.8).

Las fórmulas para obtener éstos y otros parámetros, es la siguiente:

$$\text{Abertura; } d = \lambda \sqrt{\frac{G}{0.5\pi}} \quad [m] \quad \text{----- IV.5}$$

Ángulo de apertura.- Para conseguir un campo eléctrico uniforme, es recomendable fijar un ángulo de 62° .

Distancia focal:

$$f = \frac{d}{4 \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad \text{----- IV.6}$$

Se puede desglosar f para encontrar A y B

$$B = \frac{d}{2} \operatorname{tg}(90 - \varphi) \quad \text{y} \quad A = f - B \quad \text{----- IV.7}$$

Ganancia en valores absolutos es aproximadamente:

$$G = (6 \text{ a } 8) \frac{S}{\lambda^2} \quad \text{----- IV.8}$$

$$S = \pi \frac{d^2}{4} \quad \text{----- IV.9}$$

Siendo S la superficie del círculo formado por el borde de la parábola de diámetro d.

El factor 6 a 8 depende del factor de efectividad. En la realización práctica de una antena implica en mayor o menor grado una distorsión de los cálculos teóricos, por lo cual se introducen estos valores de error.

Anchura del diagrama de directividad

La anchura en el plano vertical es:

$$2\theta_v = \left(75 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ \text{----- IV.10}$$

La anchura en el plano horizontal es:

$$2\theta_H = \left(70 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ \text{----- IV.11}$$

El contorno del paraboloide se puede determinar por las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{y^2}{K} \text{----- IV.12}$$

Siendo K una constante determinada por $K = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2}{A}$ y "x" e "y" los ejes de un sistema de coordenadas, o bien:

$$X = \sqrt{4f - y^2} \text{----- IV.13}$$

Dando valores a "y" determinamos los valores correspondientes de "x".

El excitador es un elemento que repercute en las características generales del sistema, tratando siempre de cumplir los siguientes requisitos:

- Poseer un diagrama de radiación de tal manera que la energía incida en el espejo y no se pierda en los bordes de esta.
- Las dimensiones transversales deben ser mínimas, para perturbar lo menos posible al campo reflejado por el espejo.
- El ancho de banda debe de ser el suficiente para cubrir la banda de trabajo.
- Debe afectar lo menos posible los agentes meteorológicos.

Ya que el propósito de este tema no es el de examinar de forma exhaustiva el diseño de antenas parabólicas, se dará un ejemplo de cómo aplicar los parámetros anteriores, con el objeto de tener una idea más clara.

Ejemplo 2.

Se requiere de la construcción de una antena con ganancia de 30 dB y una frecuencia de operación de 2.4 GHz.

Primero calculamos la longitud de onda

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{2.4 \times 10^9 \text{ Hz}} = 0.125 \text{ m}$$

La ganancia en valores absolutos

$$30 = 10 \log G; \quad 3 = \log G; \quad G = 10^3$$

Para el diámetro de abertura.

$$d = \lambda \sqrt{\frac{G}{1.5\pi}} = 0.125 \sqrt{\frac{10^3}{4.712}} = 0.125(46.06) = 5.72 \text{ m}$$

Y utilizando un ángulo de abertura de 62° para la distancia focal

$$f = \frac{d}{4 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \frac{5.72}{2.403} = 2.38 \text{ m}$$

Para la construcción de la parábola, se determinarán a A y B así como los puntos del semiperfil en un sistema de coordenadas x-y.

$$B = \frac{d}{2} \operatorname{tg}(90 - \varphi) = 2.86 \times 0.531 = 1.5186 \text{ m}$$

$$A = f - B = 2.38 - 1.5186 = 0.861 \text{ m}$$

IV.11 Densidad de potencia e intensidad de campo en el espacio, radiada por un radiador isotrópico.

Para un punto en el espacio, la densidad de potencia en este punto debido a la potencia radiada por un radiador isotrópico es:

$$P = \frac{P_t}{4\pi r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \text{----- IV.14}$$

Siendo P_t la potencia radiada en Watts (PAR=PER, si consideramos cero pérdidas en la línea).

La relación de la densidad de potencia y la intensidad de campo, medida en E (V/m) en cualquier punto es:

$$P = \frac{E^2}{120\pi} \text{----- IV.15}$$

120π es la resistencia en el espacio libre.

Igualando las expresiones IV.14 y IV.15, tenemos que, para encontrar la intensidad de campo en función de la potencia radiada P_t :

$$\frac{P_t}{4\pi r^2} = \frac{E^2}{120\pi}$$

Despejando a E ;

$$E = \sqrt{\frac{30P_t}{r^2}} \text{----- IV.16}$$

IV.12 Campo radiado por una antena Parabólica.

La densidad de potencia alcanza su valor máximo en el eje de la antena parabólica, siendo la dirección del lóbulo principal.

El campo radiado por la antena tiene tres áreas a definir, que son: Fresnel o campo cercano, Fraunhofer o campo alejado y región de transición.

a) Campo cercano.

El conocimiento de estos campos es importante desde el punto de vista de seguridad, para el personal que interactúa con dicho equipo.

Esta zona está confinada en un patrón cilíndrico que parte de la antena a una distancia determinada.

A esta distancia se le atribuye un área y para el cálculo de la extensión se tiene:

$$\frac{\pi D^2}{8\lambda} \text{----- IV.17}$$

Siendo D = Diámetro de la parábola

λ = Longitud de onda

A = πR^2 (Área del círculo de la parábola)

$$\text{Pero; } \frac{\pi D^2}{8\lambda} = \frac{4\pi R^2}{8\lambda} = \frac{\pi R^2}{2\lambda} = \frac{A}{2\lambda} \text{----- IV.18}$$

La densidad de potencia a lo largo de esta zona, no es uniforme.

Para calcular la *máxima densidad de potencia en esta región*:

$$W = \frac{16P}{\pi D^2} = \frac{16P}{4\pi R^2} = \frac{4P}{\pi R^2} = \frac{4P}{A} \text{ [mW/cm}^2\text{]----- IV.19}$$

Siendo; P = Potencia efectiva promedio del transmisor [mW]

A = Área de apertura [cm²]

R = Radio de la parábola [cm]

Para encontrar la distancia en la cual se encuentra la máxima densidad de potencia sobre el eje de la antena, se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{0.2D^2}{\lambda} \text{ cm----- IV.20}$$

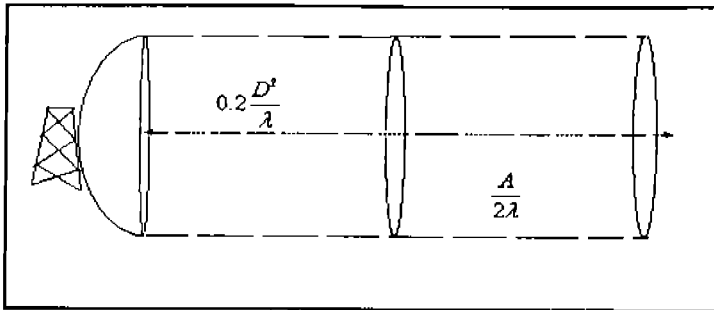


Figura IV.12. Zonas de campo de una antena parabólica.

La mayor parte de la energía se concentra dentro de la sección cilíndrica, de diámetro igual al de la antena, como puede apreciarse en la Figura IV.12. Después de la región de mayor densidad de potencia existe una atenuación de 2 dB, pero para efectos prácticos se considera la máxima potencia constante a lo largo de la región.

Para una antena parabólica donde el patrón de radiación es isométrico (hipotéticamente) en los bordes del cilindro, existe una atenuación de la densidad de potencia de 6 dB y a una distancia de 0.6 D, alejada del eje de la antena la densidad se ve atenuada en 10 dB aproximadamente.

b) Campo lejano.

Se determinará el punto donde inicia esta zona, mediante la expresión:

$$d = \frac{2D^2}{\lambda} \text{----- IV.21}$$

Lo que corresponde a 10 veces la distancia en donde tiene lugar el punto de mayor densidad de potencia para la región de Fresnel.

Para el cálculo de la densidad de potencia en esta zona, sobre el eje de la antena se utiliza:

$$W = \frac{AP}{\lambda^2 d^2} \text{----- IV.22}$$

Y sustituyendo el valor de "d" en IV.22 se obtiene el valor de la densidad de potencia al inicio de la región de Fraunhofer.

$$W = \frac{AP}{\lambda^2 \left(\frac{2D^2}{\lambda} \right)^2} = \frac{\pi R^2 P}{4D^4} = \frac{\pi R^2 P}{4(2R)^4} = \frac{\pi P}{64R^2} \text{-----IV.23}$$

Siendo d = distancia a la antena.

c) Región de transición.

Para la región de transición sobre el eje de la antena, la densidad de potencia decrece con el cuadrado de la distancia a partir de la región de Fresnel, la cual se define como $4P/A$ (ecuación IV.19).

Esto es en cuanto al cálculo de la densidad de potencia, en lo que se refiere al cálculo de la longitud de la zona de transición, ésta se encuentra entre la zona de Fresnel y Fraunhofer, como se había mencionado antes y se calcula con:

$$\frac{2D^2}{\lambda} - \frac{A}{2\lambda} = 2.046 \frac{A}{\lambda} \text{-----4.24}$$

Ejemplo 3. Se desea conocer a que distancia están las regiones de Fresnel, transición y Fraunhofer, así como sus respectivas densidades de potencia para una antena parabólica con los siguientes datos.

Diámetro = 60 cm	R = 30 cm
Frecuencia = 23 GHz	$\lambda = 1.3$ cm
Potencia efectiva = 1 W	P = 1000 mW

a) Longitudes

Región del campo cercano

$$A = \pi R^2 = 3.1416 (30 \text{ cm})^2 = 2827.4 \text{ cm}^2$$

$$\frac{A}{2\lambda} = \frac{2827.4 \text{ cm}^2}{2 \times 1.3 \text{ cm}} = 1087.4 \text{ cm}$$

Región de Fraunhofer

$$\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2(60)^2}{1.3} = 5538.4 \text{ cm}$$

Zona de transición

$$5\,538.4 \div 1087.4 = 4\,451.06 \text{ cm.}$$

b) Densidad de potencia

Para la máxima densidad en la región de Fresnel o campo cercano:

$$\frac{4P}{A} = \frac{4(1000mW)}{2827.4cm^2} = 1.41 \text{ mW/cm}^2$$

$$\text{Para el punto de máxima intensidad en } \frac{0.2}{2} D^2 = 360 \text{ cm}$$

Región de Fraunhofer

$$W = \frac{\pi^2}{64R^2} = \frac{(3.1416)(1000mW)}{64(30^2)} = 0.0545 \text{ mW/cm}^2$$

Para cualquier distancia, la densidad de potencia se podrá obtener a partir de la expresión:

$$\frac{AP}{\lambda^2 d^2}$$

Para determinada distancia (a partir de la región de Fraunhofer) se tiene:

$$d = 5,538 \text{ cm} \text{ ----- } 55.38 \text{ m} \text{ ----- } 0.0545 \text{ mW/cm}^2$$

$$d = 10,000 \text{ cm} \text{ ----- } 100.0 \text{ m} \text{ ----- } 0.0167 \text{ mW/cm}^2$$

$$d \approx 15,000 \text{ cm} \text{ ----- } 150.0 \text{ m} \text{ ----- } 0.00743 \text{ mW/cm}^2$$

$$d \approx 25,000 \text{ cm} \text{ ----- } 250.0 \text{ m} \text{ ----- } 0.00267 \text{ mW/cm}^2$$

$$d = 60,000 \text{ cm} \text{ ----- } 600.0 \text{ m} \text{ ----- } 0.00046 \text{ mW/cm}^2$$

Si se determina que existe un valor de radiación desde 1 mW/cm^2 o más, se debe determinar en que punto del eje de la antena se encuentra dicha radiación y evitar la exposición permanente de la radiación.

IV.13 Antenas reflectoras típicas, utilizadas en los radioenlaces terrestres.

En los enlaces radioeléctricos terrestres, por problemas de interferencia se requieren reflectores de alto rendimiento y gran ancho de banda. Se han integrado viseras recubiertas de material absorbente que disminuyen los campos difusos, como veremos más adelante.

En general, en una antena parabólica típica se crea una onda esférica procedente del alimentador, el cual actúa de fuente primaria y es transformada en una onda plana tras el paso por el reflector. El problema reside en iluminar el reflector desde el foco del mismo.

En la Figura IV.12 se muestran algunos tipos de reflectores para antenas directivas utilizadas en los radioenlaces, así como las partes que la componen.

En teoría el alimentador es una fuente puntual que alimenta al reflector que está situado en el foco de la parábola, el reflector de la antena debe cumplir la condición de entregar una onda plana a la salida del mismo. En la práctica el alimentador ocupa un lugar en el espacio y no satisface el diagrama direccional, además la energía radiada desborda al reflector y produce una emisión espuria que crea lóbulos laterales.

Una solución sería colocar una superficie absorbente y otra la de reducir la irradiación del iluminador sobre el borde de la parábola, logrando así la supresión del lóbulo lateral y aumentando la ganancia total del reflector.

Para radioenlaces terrestres con frecuencias de operación por debajo de los 2 GHz se usan antenas de las llamadas Grid. Las Cassegrain están basadas en un doble reflector diseñado por Cassegrain en el siglo XVII para telescopios ópticos.

Esta formada por un reflector principal y otro auxiliar que corresponde a una porción de paraboloides. Esta antena se le usa para generar grandes atenuaciones al lóbulo secundario y obtener pequeños ángulos de irradiación.

El inconveniente de este tipo de antena es que el subreflector bloquea gran parte de la apertura y el desbordamiento aumenta los lóbulos laterales. Esta antena es la usada en la mayoría de los enlaces satelitales.

El reflector off-set está para evitar el bloqueo a la apertura del reflector por parte del iluminador (enfoque descentrado del reflector). De tal tipo de antenas surge el reflector Horn, ampliamente utilizado en enlaces para obtener una elevada ganancia, buena discriminación a la polarización cruzada y gran ancho de banda. El costo es sin embargo bastante superior a las antenas parabólicas convencionales.

La aplicación de cierta antena depende de la congestión del enlace y la capacidad.

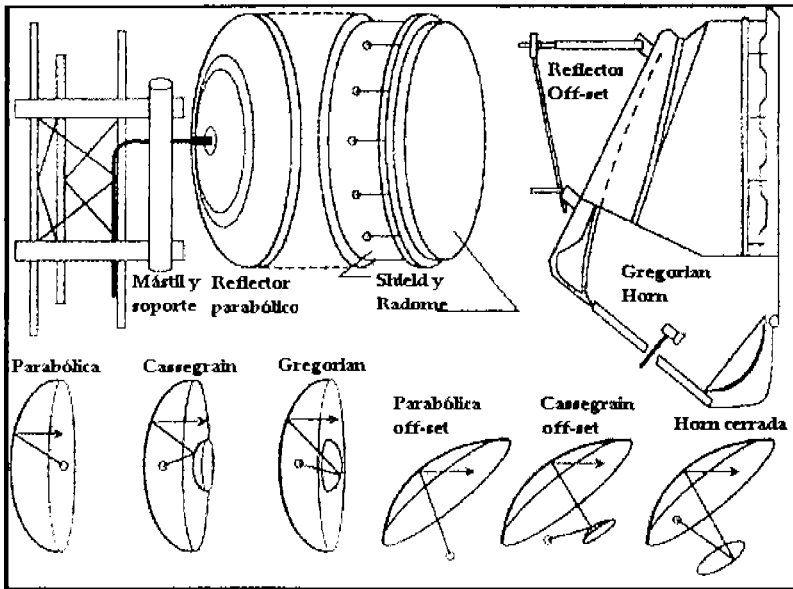


Figura IV.13. Diferentes tipos de Reflectores.

IV.13.1 Construcción.

Reflector parabólico: Se construye de fibra de vidrio o aluminio. En el caso de las antenas de fibra de vidrio se construye con un laminado reforzado con resina poliéster, la superficie se metaliza con zinc. La superficie interna de la parábola está metalizada y se coloca una visera (de fibra de vidrio o aluminio con cobertura absorbente para reducir los lóbulos laterales de irradiación, con el objeto de mejorar las prestaciones frente a las interferencias. Esta cobertura se conoce como Shield.

Radome exterior: Es de fibra de vidrio o tela de Hypalon y tiene la función de evitar cargas excesivas de viento sobre la antena o la acumulación de nieve. Se fabrica en forma plana cuando se acopla al Shield (como se muestra en la figura IV.13) o en forma parabólica cuando no existe Shield.

El Radome introduce una atenuación en la señal de 0.2 a 0.4 dB para diámetros de 1 a 4 metros en las bandas de hasta 4.2 GHz, aumentando de 0.4 a 1 dB en las bandas de 6.4 GHz; 1.2 dB en las bandas de 8.5 GHz y de 1 a 2.5 dB en las bandas de 13.2 GHz.

El Shield contiene un sistema compensador de presión, consistente en un tubo de descarga que permite la variación interna de presión, dando lugar a un equilibrio con la presión externa cuando el viento acciona sobre el Radome.

IV.13.2 Eficiencia.

En la práctica la eficiencia (η) se encuentra entre el 50 y 75% (cociente entre el área eficaz y el área real de la antena).

En una antena se ve reducida la ganancia por las siguientes causas:

- Spill over: La potencia incidente en el reflector es irradiada en todas las direcciones por los bordes.
- El iluminador tiene un diagrama de radiación que abarca más que la superficie de la antena.
- Obstrucción de la energía reflejada por el iluminador
- Debido a la rugosidad del reflector, éste propicia una diferencia de fase en las ondas reflejadas.
- Generación de una diferencia de fase cuando el iluminador no está exactamente en el foco de la parábola.
- Absorción de energía en el reflector al no ser un conductor perfecto.

En el apartado IEC 68-2, se encuentran las características ambientales y climatológicas para alta y baja temperatura, radiación solar, vibración, niebla salina, lluvia, etc. En general, las condiciones más comunes de funcionamiento de una antena parabólica de este tipo son:

$T = -40^{\circ}$ a $+60^{\circ}$ C; humedad entre 0 a 100%, flexión por el viento a un ángulo de 0.1° a 110 km/h.

IV. 13 .3. Características.

Se enumera a continuación algunas características de una antena parabólica.

G_a dB.- Ganancia de potencia con respecto a la antena isotrópica. El valor se define para el campo lejano y tomando en consideración la propagación libre de obstáculos. Las antenas directivas tienen valores máximos de potencia en cierta dirección y pérdidas en otra. A la dirección donde se tiene el máximo de ganancia se le define mediante el concepto de directividad.

ϕ .- La mayor directividad se obtiene con antenas de reflector, en la figura 14.13 se describe el diagrama de irradiación y la dirección de máxima directividad, caracterizada por el ángulo de azimut de 0° y con un nivel de referencia de 0 dB.

HPBW (Half Power Width).- Es el ángulo respecto a 0° , donde sufre una caída de 3 dB del nivel de potencia máximo. Una antena de buena directividad tiene un valor de HPBW pequeño.

F/B [dB] (Front to Back ratio). - Corresponde a la relación en dB de la potencia radiada en un ángulo de 180° respecto a la potencia en 0° .

RL [dB] (Return Loss).- Se define la pérdida de retorno o coeficiente de reflexión en base a la impedancia característica de la línea de 50 Ohms, conectada a la antena y Z_a , la impedancia de la antena. Donde:

$$\rho = \frac{(Z_a - Z_0)}{(Z_a + Z_0)}$$

BW [MHz] (Band Width).- La antena es de mayor utilidad en el rango de frecuencias (ancho de banda) donde tiene una buena adaptación de impedancias, es decir, con ρ menor a un valor entre 0.01 y 0.03.

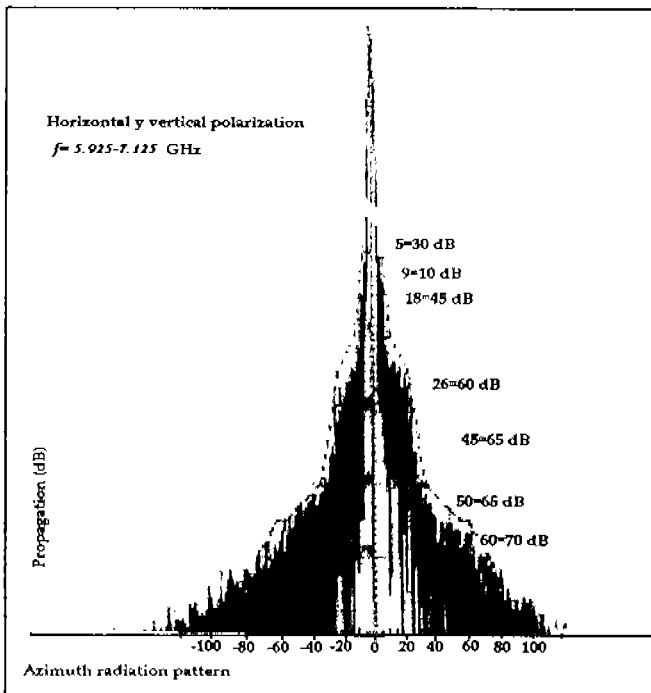


Figura IV.14. Diagrama de irradiación de una antena parabólica.

En la Figura IV.14 se muestra un diagrama típico de irradiación de una antena parabólica disponible por un fabricante de antenas.

En la Tabla IV.2 se resumen algunas de las características de las antenas parabólicas para radioenlaces terrestres, para distintas bandas de frecuencia y con distintos diámetros. En la tabla se indica la dirección de máxima directividad, la relación frente espalda F/B en dB y la pérdida de retorno (desadaptación de impedancias) en dB.

Referencias de antenas Andrew.

Características	ϕ máx.	G_0 dB	F/B dB	RL dB
Frecuencia 2.3-2.7 GHz Antena estándar, simple polarización.	1.8	31.1	36	20.8
	2.4	32.7	39	23.1
	3.0	34.6	44	23.1
Frecuencia 3.7-4.2 GHz Antena focal plana, simple polarización.	3.0	39.1	50	30.7
	3.7	40.9	64	30.7
Frecuencia 4.4-5.0 GHz Alta performance, polarización simple, con Radome plano.	2.4	39.3	65	32.3
	3.0	41.0	67	32.3
	3.7	42.7	67	32.3
Frecuencia 5.9-6.4 GHz Alta performance, polarización simple, con radome plano.	2.4	41.2	73	30.7
	3.0	42.9	74	30.7
	3.7	44.6	75	30.7
Frecuencia 5.9-6.4 GHz Antena focal plana, polarización simple.	2.4	40.6	64	30.7
	3.0	42.8	66	34.2
	3.7	44.6	68	34.2
Frecuencia 6.4-7.1 GHz Alta performance, Polarización simple, con Radome plano.	2.4	42.3	60	34.2
	3.0	43.9	70	34.2
	3.7	45.6	71	34.2
Frecuencia 6.4-7.1 GHz Antena estándar, polarización simple.	1.8	39.3	47	26.4
	2.4	42.3	49	26.4
	3.0	46.1	52	26.4
Frecuencia 7.1-8.4 GHz Alta performance, polarización simple, con Radome plano.	1.8	40.3	66	30.7
	2.4	42.9	68	30.7
	3.0	44.8	70	30.7

Tabla IV.2. Características de las antenas parabólicas.

CAPÍTULO V. LINEAS DE TRANSMISIÓN

V.1 Introducción.

Básicamente se puede concebir una comunicación entre dos puntos o varios de ellos, adecuando la señal de información a las propiedades de transferencia de un canal. Entendiendo como “canal” el medio por el que viaja la información.

Existen dos tipos de canales o medios de transmisión a considerar en general: El alámbrico y el inalámbrico.

En lo que se refiere al medio alámbrico, podemos encontrar líneas bifilares, coaxiales, guías de onda y fibras ópticas, entre otras, sin embargo debido a las características de los cables, estos sólo permiten enlazar un punto transmisor a otro punto destino o de un nodo de distribución hacia varios puntos de destino, con igual número de cables o líneas que se quieran conectar. Tomando en cuenta los efectos en la señal, causados por la longitud de la línea, la frecuencia de operación, pérdidas por el calor entre los conductores, estos y otros parámetros de la línea.

De aquí la importancia de conocer las características y conceptos que rigen a las líneas de transmisión o medios físicos que interconectan dos o más puntos.

Llegando de una forma más particular al cable coaxial y a la guía de onda, los cuales son utilizados para los radioenlaces terrestres.

Los sistemas alámbricos son utilizados para la interconexión de un punto a otro para la distribución de información, pero además los sistemas inalámbricos se sirven de éstos, como es el caso de un sistema de microondas terrestre, ya que la antena necesita de un medio o línea de transmisión que sirva de enlace con el equipo de radio.

V.2 Tipos de líneas y sus aplicaciones.

Se le llama así a cualquier sistema de conductores, semiconductores o a la combinación de ambos, por el cual pasa información en forma de energía eléctrica o electromagnética de un punto a otro. En la Figura V.1 se muestran algunos tipos de líneas de transmisión.

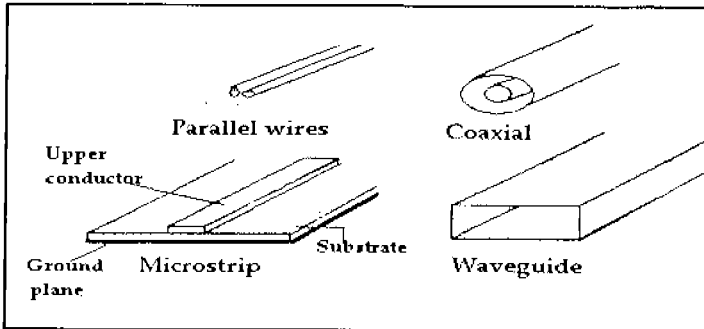


Figura V.1. Tipos de líneas de transmisión.

El par de hilos de cobre es el más modesto en cuanto al ancho de banda y por lo tanto menor capacidad de transmisión, pero no por esto le quita importancia y utilización en la actualidad.

Comúnmente se les llama "líneas" a la estructura con dos elementos conductores y guía de onda a la estructura con un conductor. Esencialmente en todas es guiada una señal a lo largo de la estructura, así que es válido llamar a ambas guía de onda o líneas de transmisión, sumándose a este conjunto la fibra óptica.

La línea bifilar presenta mayores pérdidas por radiación, a pesar de que la línea guía la señal longitudinalmente hacia su destino, siendo los campos electromagnéticos quienes se alejan de la línea. Las características de trabajo pueden ser variadas al aumentar o disminuir la separación entre los dos conductores.

En una línea bifilar, los dos conductores están separados a una distancia constante a lo largo de la línea, además de estar suspendidos a la misma altura sobre el piso.

Ambos conductores sin conexión a tierra y con un potencial igual pero de signo contrario uno del otro, con relación a tierra, llamándole a esta configuración "línea balanceada", como puede verificarse en la Figura V.2. Cuando los conductores están dispuestos como en la Figura V.2.b), el conductor que se encuentra más cerca del suelo tiene una mayor capacitancia que el conductor superior con relación al piso y entonces es llamada "línea desequilibrada", porque las corrientes resultantes en los conductores son diferentes.

La línea bifilar con aislamiento dieléctrico (principalmente polietileno) se utiliza en telefonía, transmisión digital de baja capacidad, así como recepción de T.V. en la banda VHF.

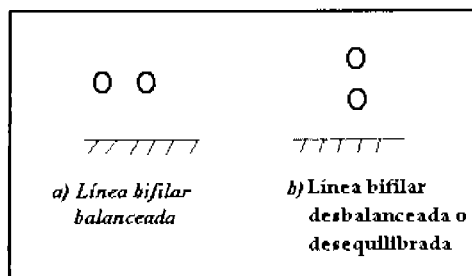


Figura V.2. Línea bifilar balanceada y desbalanceada.

En el cable UTP (pares trenzados no blindados) para evitar la diafonía (ruido causado por la señal de un par trenzado que afecta a la señal transmitida por otro par en el mismo cable) es el trenzado de los pares, si tiene un trenzado firme con más rotaciones por metro, esto genera un aumento de la separación física entre los pares adyacentes.

A manera de mostrar los rangos de las frecuencias de operación de cada línea vea la Figura V.3, mostrando que la línea bifilar es la que posee menos ancho de banda y capacidad para transmitir información. Por otra parte, el cable coaxial transmite a mayor frecuencia, dando como resultado una mayor capacidad para transmitir más información, es utilizado para la telefonía multicanal, distribución de señales de televisión, conexión en redes locales, alimentación de antenas en la banda de VHF, entre otras aplicaciones.

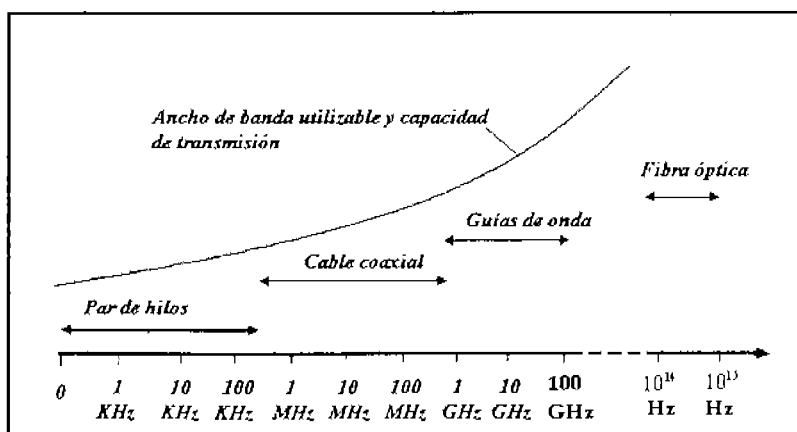


Figura V.3. Utilización actual de las líneas de transmisión y la frecuencia en la que operan.

Las guías de onda o “conductores huecos” no tienen pérdidas de potencia por radiación ya que las ondas electromagnéticas van rebotando a lo largo de las estructuras. En lo que refiere a fabricación, éstas son más fáciles de fabricar que el cable coaxial, siendo que en este último hay que mantener perfectamente alineado al conductor interno. Además de que la guía de onda presenta menos atenuación que los cables coaxiales, debido a que en su interior existe aire (no hay pérdidas por dieléctrico) y la superficie de la estructura es más extensa comparada con el cable coaxial, logrando menos pérdidas por calor.

Los sistemas de microondas terrestres usan guías de onda como parte del equipo que la integran. Las líneas de microcinta y sus variantes, son muy pequeñas, utilizando un proceso similar al de los circuitos integrados, y son utilizadas entre otras cosas para alimentar antenas planas ranuradas.

La fibra óptica y sus inicios en los años 60's del siglo XX, cuando se crearon los primeros láseres prácticos. Un láser es un emisor de luz coherente, es decir, que la energía radiada es monocromática (con una sola longitud de onda o color), inyectando esta energía a una fibra óptica o por medio de un diodo emisor de luz o LED (esta fuente es incoherente), logrando una capacidad de 100.000 veces sobre un sistema convencional de microondas; ejemplificando esto, podríamos decir que teóricamente un sistema con láser puede transportar unos 10 millones de canales de televisión al mismo tiempo.

Con técnicas de multiplexaje como WDM (multiplexaje por división de onda denso), se puede tener 40 canales telefónicos multiplexados dentro de una fibra y cada canal logra un flujo o capacidad de 10 Gbps, aproximadamente 120.000 llamadas por segundo.

En las fibras ópticas a diferencia de las demás líneas de transmisión, no se acostumbra a mencionar la frecuencia de operación, si no la longitud de onda. A las regiones en donde la fibra logra un mínimo de atenuación, se les llama ventanas.

Se puede apreciar en la Figura V.4 la relación de la longitud de onda de operación y la atenuación por distancia en la fibra.

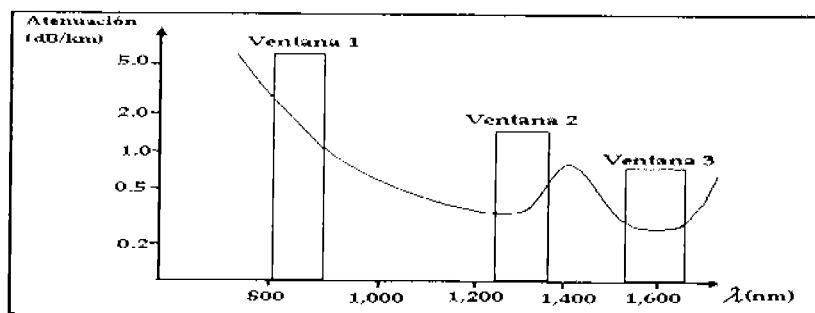


Figura V.4. Curva aproximada de atenuación y ventanas de operación para algunos tipos de fibra óptica.

En resumen, la fibra óptica tiene mayor ancho de banda y capacidad en la transmisión de información, estas y otras ventajas frente al cable de cobre son: poca pérdida, tamaño reducido, inmune a interferencias radioeléctricas, peso reducido, la materia prima esencial para su construcción es abundante, además esta clase de líneas puede ir instalada en forma aérea, subterránea y submarina.

Para el aumento de tráfico y de distribución pueden ir varios pares de fibra, formando así un cable multipar.

A manera de comparación entre los parámetros de algunas líneas de transmisión, se muestra la Tabla V.1, habiendo mucho más tipos de líneas y diferentes dimensiones.

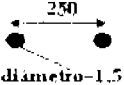
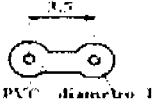

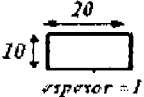
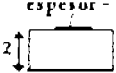

TIPO DE LÍNEA	DIMENSIONES TÍPICAS (mm)	PÉRDIDAS	ANCHO DE BANDA	MINITURIZACIÓN
Bifilar abierta sobre postes		Bajas	Pequeño	Pobre
Bifilar terrestre con aislante, de uso exterior		Bajas	Pequeño	Pobre
Coaxial		Regular	Regular	Pobre
Guía de onda		Bajas	Grande	Pobre
Microcinta		Altas	Grande	Excelente
Fibra óptica		Muy bajas	Muy grande	Excelente

Tabla V.1. Características prácticas de algunas líneas de transmisión.

V.3 Conceptos generales de una línea de transmisión.

Las características de una línea pueden determinarse en base a las constantes eléctricas primarias: Resistencia en CD en serie (R), inductancia en serie (L), capacitancia de derivación (C) y conductancia de derivación (G).

La resistencia y la inductancia ocurren a lo largo de la línea, mientras que entre los conductores ocurren la capacitancia y la conductancia.

Las constantes primarias se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la línea, por lo cual son llamadas parámetros distribuidos.

A una distancia unitaria dada, estos parámetros son agrupados para formar un modelo eléctrico artificial de la línea. Las características de una línea de transmisión se llaman constantes secundarias y se determinan con las cuatro constantes primarias. Siendo las constantes secundarias, la impedancia característica y la constante de propagación.

Imaginando dos hilos conductores que se extienden hasta el infinito y, conectando a uno de sus extremos una fuente de corriente continua, notando que en el momento de conectar la fuente, existe una corriente que fluye a través de los cables. Ahora bien, la propagación de la corriente en el conductor es aproximadamente igual a la velocidad de la luz, entonces tendríamos que a 300,000 km a partir del generador, tardaría 1 segundo en llegar la corriente y a 300 m tardaría un microsegundo, en este mismo tiempo es el que tardaría en completar un ciclo una señal de radiofrecuencia de 1 MHz (un millón de ciclos por segundo).

¿Por qué circula corriente, si los dos conductores no se encuentran nunca? Debido a la tensión aplicada, y la proximidad entre los cables, se genera un campo eléctrico entre estos, recordando que dos conductores próximos forman un condensador y como los conductores son infinitos, la capacidad del condensador también lo es y por tanto nunca cesará la corriente que tiende a cargarlo, en tanto el generador se encuentre conectado.

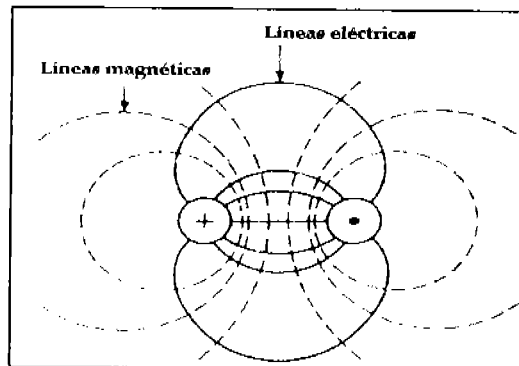


Figura V.5. Campos eléctrico y magnético en una línea de transmisión de dos conductores.

Pero como en todo conductor por el que circula una corriente tiene una cierta inductancia por unidad de longitud, puede entenderse que equivale a una bobina.

Por tanto, la línea de hilos paralelos puede representarse como una sucesión de bobinas y condensadores, tal como se indica en la Figura V.6.

Para describir la característica de una línea de transmisión en lo que se refiere a reflexiones, se usan generalmente las magnitudes del coeficiente de reflexión y la relación de onda estacionaria como se verá posteriormente.

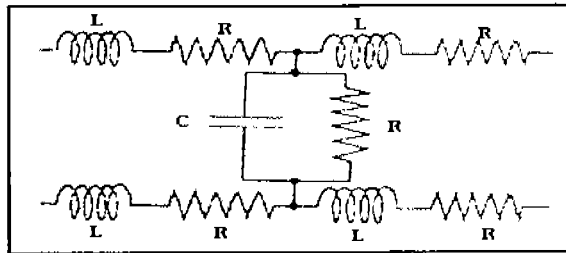


Figura V.6. Circuito equivalente de una línea de transmisión.

- R.- Resistencia por unidad de longitud
- L.- Inductancia por unidad de longitud
- C.- Capacidad por unidad de longitud
- G.- Conductancia por unidad de longitud

V.3.1 Impedancia característica de una línea.

La existencia de una sucesión de inductancias y capacitancias en una línea de transmisión hace que ésta tenga una impedancia característica y se denota como Z_0 .

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \Omega \text{ ----- V.1}$$

j.- Es un número imaginario
 ω .- $2\pi f$

El parámetro Z_0 , es comúnmente proporcionado por los fabricantes de cables, como por ejemplo los cables coaxiales con impedancia característica nominal de 50Ω , 75Ω para televisión por cable, cables bifilares de 300Ω para antenas receptoras de TV. o radio FM y cables bifilares multipar para telefonía y datos de 75Ω , 100Ω , 150Ω , 600Ω , etc.

Para una línea de transmisión sin pérdidas y de longitud infinita la expresión V.1 se reduce a:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega) \quad \text{----- V.2}$$

Esta impedancia equivale a una resistencia pura, la cual absorberá la potencia suministrada por el generador.

Ahora bien, si la línea se considera sin pérdidas (ideal), ni por la resistencia de los conductores ni por fuga entre ellos ¿Cómo es que se consume la potencia? Si nos trasladamos al otro extremo de la línea y como esta en el infinito no llega nunca a encontrarse. Es por esto que el generador “ve” a la línea como si fuera una resistencia.

La impedancia característica de una línea depende de la inductancia de los conductores y de la capacidad entre ellos. Cuanto mayor sea el diámetro de un conductor menor inductancia por unidad de longitud presenta y cuanto mayor es la separación entre los conductores, menor será la capacitancia. Por tanto dos conductores de diámetro grande y una pequeña separación, tienen una impedancia característica baja, ya que L es pequeña y C es grande, por tanto L/C será pequeña, obteniendo el resultado opuesto si los conductores son de pequeño diámetro y gran separación entre estos.

V.3.2 Líneas equilibradas.

En la práctica, las líneas de transmisión son finitas, como el caso entre un equipo de transmisión y la antena, los cuales están interconectados con una línea finita, y por tanto se debe colocar una carga que disipe la potencia que viene de la línea.

Cuando la carga que se conecta al extremo de una línea finita es puramente resistiva y tiene el mismo valor que la impedancia característica de la línea, se dice entonces que es una línea equilibrada. En este caso la línea se comporta como si fuera infinita, ya que la carga absorbe toda la potencia de la línea y el generador “ve” lo mismo que para una línea infinita.

V.3.3 Relación de ondas estacionarias.

Cuando existe reflexión de una onda que sale desde la fuente hacia la carga en todos los puntos de la línea, las ondas se suman vectorialmente, resultando una onda estable (estacionaria).

Pero, ¿qué ocurre cuando la carga es distinta de la impedancia característica de la línea? Se puede partir de dos casos extremos para analizarlo: Primero tomando el corto circuito (con resistencia de carga igual a cero), y en circuito abierto (con resistencia de carga igual a infinito).

a) Corto circuito.

Basándonos en la Figura V.7, tenemos que si se introduce una corriente alterna en la línea (V.6.a), para el corto circuito existirá siempre un punto de mínima tensión y de máxima intensidad (V.6. b y c).

El efecto que se produce es análogo a una onda que rebota contra una pared, invirtiendo su sentido hacia el generador, sufriendo un defasamiento de 180° , como resultado se tendrán las corrientes y tensiones tal como se muestra en las figuras (V.6 d y e).

La combinación de la corriente y la tensión que llega y las que retornan, al ser medidas con un multímetro o amperímetro de radiofrecuencia se observa que son máximos en unos puntos y mínimos en otros, siendo estos valores constantes en toda la línea. Resultando una onda de tipo estacionaria. Produciéndose la misma situación para valores de impedancia de carga distintas a la impedancia característica de la línea.

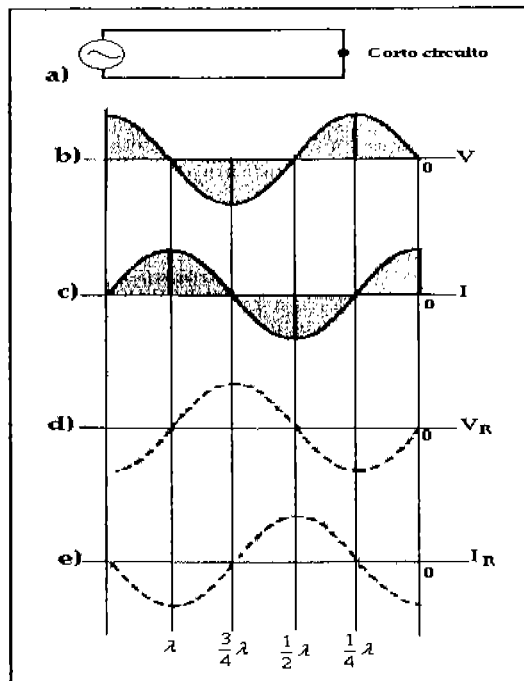


Figura V.7. Ondas de tensión e intensidad en una línea en corto circuito.

b) Circuito abierto.

En este caso se puede ver que la forma de onda de la tensión y de la intensidad (corriente) se ha invertido en relación con el caso anterior (ver Figura V.8). En el extremo abierto la tensión es máxima y la intensidad mínima.

Produciéndose la misma situación para valores de impedancia de carga distinta a la impedancia característica de la línea.

Si la impedancia de carga es menor a la impedancia característica de la línea, esta tiende a comportarse como al caso de corto circuito y si es mayor al caso de circuito abierto, teniendo como diferencia que los valores mínimos no llegan a cero y se produce una variación alrededor de la corriente media en la línea (Figura V.8).

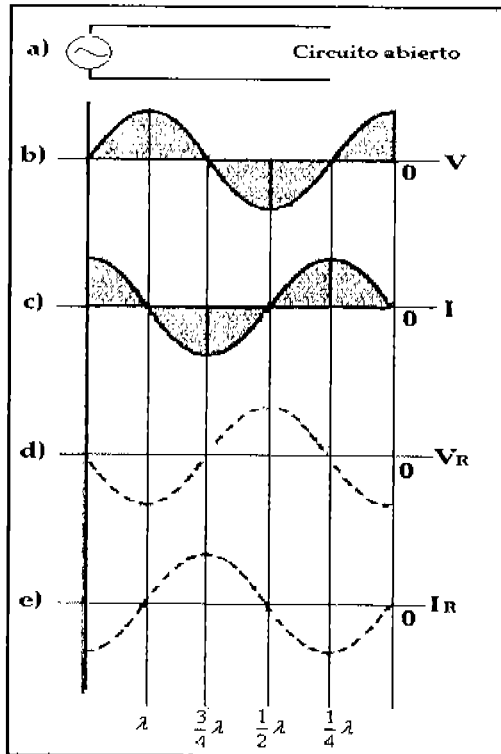


Figura V.8. Ondas de tensión y corriente en una línea en circuito abierto.

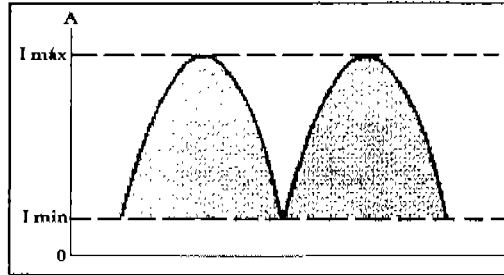


Figura V.9. Forma de onda de la corriente media en una línea.

V.3.4 Efectos de la ROE.

Se denomina relación de ondas estacionarias ROE al cociente del valor de las amplitudes máxima y mínima de las componentes de voltaje o corriente.

$$ROE = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad \text{o} \quad VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad \text{----- V.3}$$

Para los casos de circuito abierto y corto circuito, la ROE tiende a infinito pues la intensidad mínima vale cero.

A la ROE también se le conoce como VSWR (Voltaje Standing wave ratio) Pero el valor de la ROE no nos dice si el valor de la carga es mayor o menor que la impedancia de la línea, a lo cual para saberlo se debe medir la intensidad o la tensión a lo largo de la línea.

Si el valor de la intensidad mínima se presenta a una distancia de la carga de un cuarto de longitud de onda o cualquier múltiplo impar de la misma, la resistencia de la carga es menor que la Z_0 (impedancia característica). Si la intensidad mínima se presenta a una distancia de la carga de media longitud de onda o cualquier múltiplo de ella, la resistencia de carga es mayor que Z_0 .

Para obtener la misma medida pero utilizando un voltímetro, se toma el inverso del caso anterior. La ROE expresa también la relación de la impedancia de carga a la impedancia característica (Z_0) de la línea e indica las condiciones de una línea para transferir energía.

La ROE también se puede representar como:

$$ROE = \frac{Z_0}{R} \quad \text{si} \quad Z_0 > R \quad \text{----- V.4}$$

$$ROE = \frac{R}{Z_0} \quad \text{si} \quad R > Z_0 \quad \text{----- V.5}$$

No debe decirse que la ROE tiene un valor igual a cero porque siempre se coloca el número mayor en el numerador y, por tanto el valor mínimo de la ROE es 1:1 y la máxima infinito. El valor de ROE idealmente obtenible sería de 1, el cuál indicará la máxima potencia transferida de la línea a la carga, pudiendo también decirse que en una línea no hay ROE, o sea, que esta equilibrada.

El primer efecto de la ROE es que la carga no reciba toda la potencia de la línea (proporcionada por el generador). Para el caso en que la carga sea una antena, parte de la potencia a transmitir se pierde, es decir, no es radiada y por lo tanto no se aprovecha.

Presentándose también puntos de alto voltaje que pueden perforar el aislamiento de los conductores, puntos de corriente muy intensa, presentando pérdidas, aumentando las ya existentes sobre la línea, además de que el transmisor resiente estos valores altos, en el circuito interno, siendo mayor en el caso de emisores a transistores que en los de válvulas, ya que éstas tienen un margen de tolerancia más alto, puntos donde habrá intensos campos magnéticos, dando lugar a pérdidas por radiación.

De todas formas, un cierto valor de la ROE estará presente en las líneas de transmisión, resultando casi imposible realizar un acoplamiento perfecto entre línea y carga.

Una ROE de 2:1 puede empezar a presentar problemas para equipos transistorizados y un valor de la ROE de 3:1 no es aconsejable para cualquier equipo.

La forma de modificar la ROE en una línea es adaptar la carga. Siendo que cualquier modificación hecha en el lado del generador no suprimirá la ROE en la línea.

La utilización de "acopladores de antena" entre la línea y la carga sólo evita la destrucción del equipo, más no modifica el valor de la ROE y por tanto las pérdidas de energía radiada siguen existiendo. Si no se cuenta con un acoplador de buena calidad, aumentará las pérdidas ya existentes en la línea.

V.4 Coeficiente de reflexión.

El VSWR (Voltaje Standing Wave Ratio) o la ROE (relación de ondas estacionarias) esta relacionada con la cantidad de la señal incidente y la señal reflejada. A la razón entre la tensión de la señal reflejada y la señal incidente se llama coeficiente de reflexión y esta expresada por:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \text{----- V.6}$$

Siendo V_r .- Voltaje reflejado

V_i .- Voltaje incidente

Cuando no existen pérdidas en la línea, el valor se aproxima a la unidad y la relación con la ROE se expresa como:

$$\text{VSWR} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad \text{V.7}$$

El que exista o no reflexión depende del acoplamiento o adaptación de la impedancia resistiva de la línea y de la carga.

Casi siempre se habla del coeficiente de reflexión en función del voltaje Γ_v , la relación de las corrientes de ida y de regreso es el negativo de la relación de las ondas de voltaje de ida y de regreso.

$$\Gamma_i = -\Gamma_v$$

Otra expresión para determinar el coeficiente de reflexión de voltaje, en función de la resistencia de carga y la impedancia característica de la línea es:

$$\Gamma_v = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \quad \text{V.8}$$

Utilizaremos las expresiones anteriores en un ejemplo.

Ejemplo V.1. Determinése el coeficiente de reflexión del voltaje Γ_v para una línea terminada con $Z_0 = 75 \Omega$

- Con una carga de resistor de 100Ω
- Con una carga de resistor de 50Ω
- Con una carga de $Z_L = 50 + j50$
- Determinése el VSWR para el inciso c)

$$\text{a) } \Gamma_v = \frac{100 - 75}{100 + 75} = \frac{25}{175} = 0.14$$

$$\text{b) } \Gamma_v = \frac{50 - 75}{50 + 75} = \frac{-25}{125} = -0.2$$

La escala de valores del coeficiente de reflexión va desde -1, en $R=0$ (corto circuito, el valor de la carga es menor a la impedancia característica de la línea) hasta +1 en $R=\infty$ (circuito abierto, el valor de la impedancia de la carga es mayor a la Z_0 de la línea) como se deduce de lo que se había dicho anteriormente.

$$\begin{aligned}
 \text{c) } \Gamma_1 &= \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} = \frac{(50 + j50) - 75}{(50 + j50) + 75} = \frac{-25 + j50}{125 + j50} = \frac{55.9^{116.5^\circ}}{134.6^{21.8^\circ}} \\
 &= 0.41^{94.7^\circ} = \Gamma_1 \\
 &= -0.03 + j 0.4 = \Gamma_1
 \end{aligned}$$

Por último el inciso d) $|T_1| = 0.41$ por lo que:

$$\text{VSWR} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = \frac{1 + 0.41}{1 - 0.41} = 2.38$$

Nótese que el VSWR sólo relaciona las magnitudes y por consiguiente nunca podrá ser un número complejo parecido al coeficiente de reflexión.

V.5 Efecto pelicular.

Las pérdidas de potencia en la señal en una línea de transmisión de microondas es un punto importante. Para un cable coaxial, sus pérdidas vienen expresadas en decibelios por cada 100 ft (pies) de longitud, a lo cual estas pérdidas están en función del tipo de materiales usados en la fabricación del cable y también en la frecuencia de operación. Ya que la pérdida depende de la frecuencia, la cual no está fundamentada en la teoría convencional, la explicación de este fenómeno se llama efecto pelicular.

Cuando fluye en la línea señales de alta frecuencia, las corrientes no viajan por completo en el interior del alambre metálico, sino que lo hacen a través de la superficie de estos. Aumentando la resistencia a medida que la frecuencia se eleva y que el área conductora de la corriente disminuye. En las guías de onda, la superficie interna de cobre se abrillanta con plata, ya que la mayor parte de la energía difícilmente penetra la superficie.

La profundidad de la superficie se define como el espesor en el que se reduce en un factor de $\frac{1}{e}$ la corriente. La profundidad de la superficie δ , se relaciona con la frecuencia f , con la conductividad σ en corriente continua y con la permeabilidad magnética μ . Para materiales no ferrosos, el valor de μ es igual al valor de μ_0 para el espacio libre, siendo la expresión:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \text{V.9}$$

(*) (Ver anexo c).

Siendo:

δ .- Profundidad de la superficie (m)

π .- 3.1416

f.- (Hz)

μ .- Permeabilidad magnética. $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) en el espacio libre.

σ .- Conductividad para el cobre 5.8×10^7 (S/m) Siemens por metro.

V.6 Cable coaxial.

Los cables coaxiales poseen muy buenas características de transmisión dentro de la variedad de cables de cobre que existen en la actualidad para comunicaciones; por lo que se le considera una solución para el transporte de señales de radiofrecuencia, en las que puede operar de 5 – 1,000 MHz.

El uso de cables coaxiales es paralelo al desarrollo tecnológico de equipos de comunicación y aparatos de laboratorio que operan en el rango de MHz. Su crecimiento inicial acompañó al del radar y el radio para comunicaciones militares, por ello, una de las normas más antiguas, que es de la década de los cuarenta y que aún es utilizada por algunos países como referencia, es la norma militar estadounidense MIL-C-17. Todos los cables basados en esta norma conservan las siglas RG, seguidas de un número que hace referencia a la construcción de un cable en particular. En la actualidad, el uso de equipo electrónico de entretenimiento como la TV, la radio FM, videograbadoras, y juegos electrónicos en general ha propiciado el contacto con los cables coaxiales, los cuales conservan las propiedades de transmisión de los RG, pero que son diseñados para un uso menos rudo. El principal ejemplo de estos cables son los CAT TV, para la acometida a usuarios de TV por cable.

Hasta la aparición de la fibra óptica, a principios de los años ochenta del siglo pasado, en donde las fibras comenzaron a emplearse en las redes de gran capacidad, hasta entonces el coaxial era la única alternativa alámbrica de banda ancha. En el campo de la telefonía, se utilizan estos cables para transmitir señales digitales en codificación PCM (modulación por pulsos codificados).

Para el uso del cable en la distribución urbana de televisión de paga, aun sigue dominando casi en su totalidad en la mayor parte del mundo. El modo de transmisión que utiliza la mayoría de empresas es el FDM (Frequency Division Multiplexing o Multiplexaje por división de frecuencia).

El cable coaxial es un producto maduro, confiable, relativamente barato y fácil de instalar.

V.6.1 Descripción física y características principales.

En frecuencias de UHF y SHF, las líneas bifilares o par de cobre no son tan eficientes para transferir la energía de la fuente a la carga. Las señales eléctricas de alta frecuencia circulan por la superficie exterior de los conductores, esto se traduce en que la atenuación se incrementa con la raíz cuadrada de la frecuencia.

Su construcción consiste en dos conductores cilíndricos concéntricos, siendo separados uno del otro por medio de espaciadores (aislantes y al aire o bien por medio de un dieléctrico sólido y continuo), el material aislante por lo regular es polietileno y PVC.

Los cables coaxiales se utilizan para transmisión de datos a alta velocidad a distancias de varios kilómetros, es decir, se cubren grandes distancias con mayores velocidades de transmisión y ancho de banda, así como la conexión de un mayor número de terminales. Sus características generales son:

- 1.- La respuesta en frecuencia es superior a la del par trenzado, hasta 1,000 MHz.
- 2.- Necesita amplificadores más frecuentemente que el par trenzado. Según el tipo de cable y su uso, la distancia promedio entre repetidores consecutivos puede ser de entre 1 y 3 km.
- 3.- Puede ser rígido o flexible.
- 4.-Tiene como limitantes al ruido térmico e intermodulación.
- 5.-Las interferencias eléctricas no tienen importancia en estos cables, siempre y cuando la pantalla exterior sea continua.
- 6.-La utilización de portadoras de alta frecuencia hace inmune al sistema frente a las interferencias de baja frecuencia originadas por dispositivos eléctricos y tubos fluorescentes.

Existen dos formas de aprovechar el ancho de banda en un cable coaxial:

- a) El modo de banda base: En donde para alimentar un solo canal de transmisión a una determinada tasa de bits (10 Mbps o más), se utiliza todo el ancho de banda disponible, utilizando la técnica TDM (Time Division Multiplexing).
- b) El modo de banda ancha: En el cual para alimentar varios subcanales de menor ancho de banda por un solo cable, es dividido el ancho de banda disponible, utilizando para este caso la FDM (Frequency Division Multiplexing).

La impedancia característica Z_0 para un coaxial se obtiene con la siguiente expresión:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{b}{a} \text{----- V.10}$$

b = radio del conductor externo

a = radio del conductor interno

ϵ_r = Permitividad relativa *- Ver anexo, para ver la tabla de permitividades relativas.

Como se había mencionado anteriormente, la impedancia característica del cable coaxial ya viene proporcionada por los fabricantes, encontrando cables coaxiales con impedancias características muy diversas, las cuales se encuentran aproximadamente en el rango de $20 \Omega \leq Z_0 \leq 200 \Omega$. Por ejemplo, para aplicaciones de video y distribución de televisión por cable se usa una $Z_0 = 75 \Omega$, en aplicaciones de sistemas de computo, radio transmisión y equipos de comunicación por satélite hay cables con $Z_0 = 50 \Omega$.

En lo que se refiere a la velocidad de propagación, también difiere en cada uno de ellos, siendo generalmente del 60% al 80% del valor de la velocidad de la luz en el espacio libre, dependiendo de la permitividad relativa del aislante entre los conductores.

V.6.2 El cable coaxial RG y Heliax.

En este tema se describirán tres tipos de cable coaxial, con valores de 50Ω , que son; el RG8, Heliax 1/2" y Heliax 7/8".

Las diferencias radican en la malla o conductor externo, composición del dieléctrico y potencia máxima de transferencia, siendo también el diámetro y los decibeles de pérdida por unidad de longitud.

RG8, es recomendable para interiores, ya que su flexibilidad permite una canalización sin tanta dificultad, cuando se instala en exteriores sus características sufren un deterioro, debido a los rayos ultravioleta, es por esto que se utiliza tubo conduit para protegerlo, además de presentar un margen de pérdida elevada (9 dB por cada 100m a 150 MHz), siendo de cobre el conductor externo (malla) y el dieléctrico de polietileno.

Heliax 1/2", es el tipo de línea utilizada comúnmente en los sistemas VHF, teniendo como diámetro media pulgada con un conductor exterior sólido de cobre, proporcionando una rigidez ventajosa en instalaciones exteriores, presentando 3 dB de pérdida por cada 100 m a 150 MHz y su dieléctrico es de polietileno.

Heliax 7/8", con un diámetro de 7/8 de pulgada es más rígido que el anterior, es utilizado para multicanalizar en la banda de UHF y su pérdida es de 1 dB por cada 100 m a 150 MHz.



Figura V.10. Guía de onda flexible o Heliax.

V.7 Guías de onda.

La guía de onda es un conductor hueco y puede estar constituida por cobre, latón o aluminio, puede tener las paredes internas pulidas y algunas veces plateadas. Las formas de estas pueden ser rectangulares, circulares y elípticas.

En una guía de onda, la energía electromagnética es confinada en el interior de esta, propagándose a manera de reflexiones en las paredes internas y esta diseñada para operar en un solo modo de propagación, con el ancho de banda respectivo, atenuando los demás modos de propagación.

No es práctico que este tipo de estructuras huecas sean utilizadas a frecuencias muy bajas, ya que son muy grandes y no son flexibles.

La transmisión comienza a partir de la frecuencia de corte, la cual depende de la forma y dimensión de la guía. A esta frecuencia mínima en la cual es posible que la información viaje o se propague, se le denomina frecuencia de corte.

En teoría, hay un gran número de distribuciones de línea y modos de propagación y cada modo tiene su frecuencia de corte, esto es, cuando la frecuencia va aumentando, primero aparece el primer modo, llamado modo dominante, después aparece el segundo modo, el cual se propaga junto al primero, apareciendo más tarde un tercer modo propagándose con los dos modos anteriores, ya que estos no desaparecen, y así sucesivamente.

En una guía de onda rectangular la cavidad generalmente es de bronce o aluminio. En lo que corresponde a dimensiones, la longitud "a" debe de ser el doble de "b", y "a" debe ser igual a la mitad de la longitud de onda de la señal a transmitir por el espacio libre, ver Figura V.11

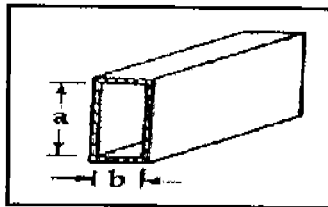


Figura V.11. Figura esquemática de una guía de onda rectangular.

La guía de onda circular es utilizada cuando se requiere propagar ondas polarizadas tanto verticales como horizontales en una misma guía, la ventaja con respecto a la guía de onda rectangular es la facilidad para construirlas y más fácil de unir.

Siendo el área de la guía circular más grande que el de una rectangular, convirtiéndose así en una desventaja ya que ambas pueden llevar la misma señal.

El comportamiento de una guía es similar a una línea bifilar. La onda que se propaga por la guía tiene velocidad, desplazamiento de fase, atenuación y reflexiones por desacoplamiento de impedancia.

Al referirnos al modo TE (Transversal Eléctrico), las TEM (modo de propagación transversal electromagnético) del campo eléctrico viaja en forma vertical y perpendicularmente a la dirección de propagación, y para el modo TM (transversal magnético) las TEM del campo magnético ahora son las que viajan en forma vertical y perpendicular a la dirección de propagación.

V.7.1 Dispositivos utilizados en guías.

El equipo a utilizar en un radioenlace debe estar muy bien acoplado de la línea de transmisión a la antena para poder guiar la señal sin problemas. En algunos casos, varios equipos transmisores y receptores pueden estar conectados a una misma antena, mediante diferentes dispositivos de guía de onda. Entre los dispositivos especiales de acoplamiento se encuentran los siguientes:

a) Acopladores.

El acoplamiento de una línea con otra sirve para formar una sola línea de tal manera que siga una determinada trayectoria. Los acopladores tienen la propiedad de conducir la energía electromagnética en ambos sentidos. En los acopladores para guía de onda, estos cambian la dirección de propagación de la señal.

Los acopladores direccionales son básicamente del tipo "T", estos son utilizados para mediciones de las señales de RF (radiofrecuencia). Este dispositivo es conectado en serie con la línea, de tal manera que siga la propagación de la señal y al mismo tiempo es acoplada hacia un dispositivo detector o de medición, sin alterar la impedancia característica de la línea.

En este tipo de acoplador, la señal reflejada por la carga es rechazada, y esto es aprovechado, para utilizar el dispositivo para: Monitoreo o medición de potencia, monitoreo o medición de frecuencia, mediciones de reflexiones, mezclador de señales y aislamiento del generador de señal.

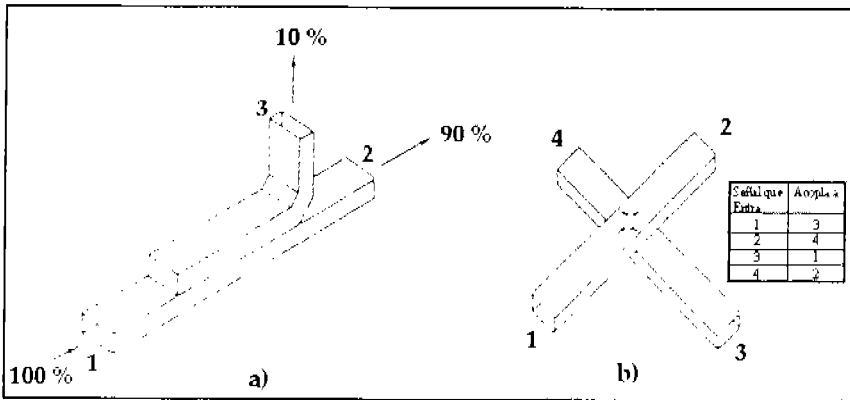


Figura V.12. Acoplador de pared amplia y acoplador de guía cruzada.

Un acoplador de 3 dB divide la potencia a la mitad y la distribuye hacia dos antenas, utilizando una sola línea y el acoplador direccional.

Frecuentemente se encuentran acopladores direccionales comerciales del tipo para coaxial y guía de onda con valores de acoplamiento estándar de 6, 10, 20 y 40 dB.

b) Circuladores.

Dispositivos de ferrita de uso general entre las secciones de radiofrecuencia y la línea de transmisión, teniendo como función la circulación de la señal en un solo sentido. Esto es; baja atenuación de la potencia de la señal que se propaga en una dirección. Alta atenuación en la dirección contraria.

El circulador de 3 puertos de la figura V.13.a, es el más importante de estos dispositivos, existiendo una variedad de estos. Una señal que entra por el puerto 1, sale en el puerto 2; una señal que entra en el puerto 2, sale en el puerto 3 y una señal que entra por el puerto 3 sale en el puerto 1. Un ejemplo de la utilización de un circulador, podría ser una línea de guía de onda proveniente de la antena, la cual es conectada a uno de los puertos y los dos puertos restantes irían conectados a dos equipos de radio.

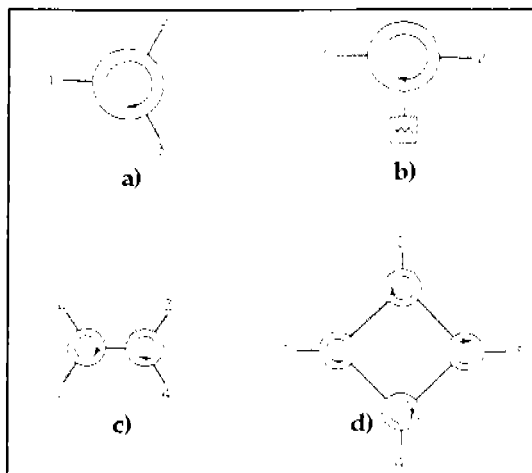


Figura V.13. Figura esquemática de varios tipos de circulares. a) circular básico de tres puertos, b) circular utilizado como aislador, c) circular de cuatro puertos, d) circular de cuatro puertos con cuatro uniones.

c) Aisladores.

Componente de dos puertos que permite el paso de la señal en una sola dirección. Teniendo una pérdida muy pequeña en la dirección de ida (de la fuente hacia la carga), y una pérdida muy grande en el sentido opuesto, protegiendo a la fuente de altos valores de potencia reflejada. El comportamiento es parecido al de un diodo al paso de corriente en un solo sentido. En la actualidad las pérdidas por inserción son del orden de 0.7 dB en la banda X y de 20 dB por inserción en reversa.

Existen para toda la banda de microondas, tanto para coaxiales y guías de onda.

d) Filtros.

Dispositivos utilizados para seleccionar un determinado rango de frecuencias, dejando pasar a algunas, mientras que otras se atenúan.

V.7.2 Diferencias entre la línea coaxial y la guía de onda.

Una diferencia muy marcada entre estas líneas de transmisión es la frecuencia de operación, transmitiendo en su modo dominante de propagación respectivo. El rango determina el ancho de banda disponible y por tanto la capacidad de transmisión.

Además de la potencia máxima de transmisión, atenuación de la señal y la facilidad de construcción.

Las diferencias se harán entre el cable coaxial y la guía de onda rectangular, ya que esta última es la más utilizada comúnmente.

En lo que se refiere al modo de propagación, el cable coaxial puede transmitir una onda TEM desde una frecuencia cero hasta la frecuencia de corte que es muy alta, en donde comienzan a aparecer los modos superiores. Normalmente esto no sucede en la práctica, ya que se le utiliza en frecuencias menores a la de corte, siendo esto suficiente para poder transmitir varios canales de televisión o datos a varios mega bits por segundo.

Para la guía rectangular, la frecuencia de operación alcanza el valor de la frecuencia de corte y un poco menor a la de la frecuencia de corte del modo siguiente. Teniendo un gran ancho de banda y por consiguiente una mayor capacidad en la transmisión de información que un cable coaxial.

La utilización de la guía de onda para distancias cortas es muy importante, tanto para alimentar sistemas de microondas terrestres, estaciones terrenas, satélites de comunicación y radares entre otros.

El coeficiente de reflexión para un cable coaxial aumenta continuamente con la frecuencia, en cambio para la guía, es mínimo para un cierto rango de frecuencias.

Una parte de la atenuación en un par de cobre o coaxial es debido a pérdidas por el dieléctrico, el cual, es el que le da soporte al conductor, en una guía este problema se evita ya que el dieléctrico es aire, aunque la atenuación logra valores altos cuando el valor de la frecuencia se acerca a la frecuencia de corte.

Para que una línea coaxial o guía de onda pueda transmitir a mayor potencia y no romper la rigidez dieléctrica del aislamiento provocado por la aplicación de los campos eléctricos asociados con la potencia, es presurizar la línea con Nitrógeno seco (a una presión de 3 atmósferas) o algún otro gas.

En resumen, una guía de onda puede transmitir más potencia que un cable coaxial.

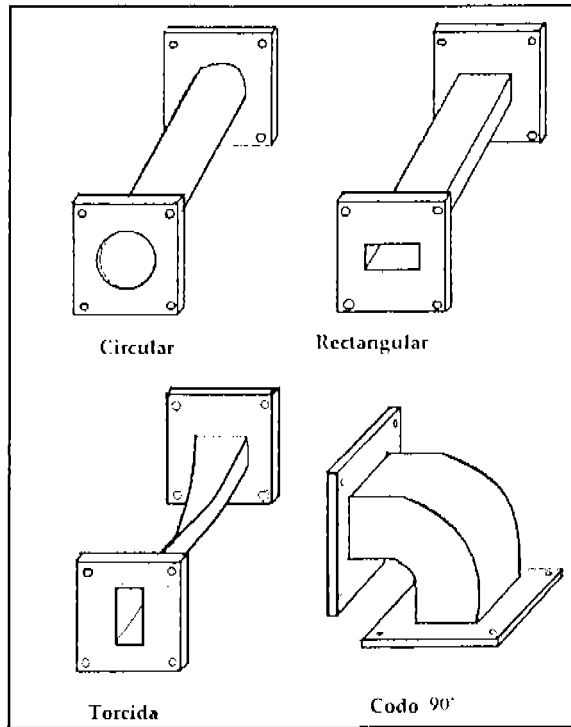


Figura V.14. Tipos de guía de onda.

CAPÍTULO VI. EQUIPO DE MICROONDAS UTILIZADO EN LOS RADIOENLACES FIJOS TERRESTRES

VI.1 Introducción.

En este capítulo se dará una explicación de las partes que conforman el equipo de microondas, su funcionamiento en forma general, así como las diferentes configuraciones que soporta.

Básicamente en este tipo de radioenlaces terrestres se pueden diferenciar varias etapas, las cuales son: etapa de planeación, en esta etapa se realizan los estudios previos al establecimiento del enlace. La segunda etapa se le denomina de diseño, la cual determina los parámetros de funcionamiento del enlace, cubriendo los requerimientos de confiabilidad y disponibilidad. La tercera etapa consiste en la regulación del mismo, obteniendo la constancia de no interferencia. Finalmente la etapa de implementación del enlace, de esta etapa se mostrará un ejemplo al final del capítulo.

Siendo este tipo de radioenlaces muy utilizados en lugares urbanos por su flexibilidad y relativo bajo costo.

VI.2 Etapas básicas

Tres son las etapas reconocidas como básicas: Banda base, frecuencia intermedia y de radiofrecuencia, desde un punto de vista genérico para los equipos de microondas.

VI.2.1 Banda base.

En la etapa banda base se tiene como funciones la de:

- 1.- Formación de la trama de datos: Permite el alineamiento de la trama, además de ofrecer suficiente capacidad de tráfico para canales de servicio para hablar (EOW, orderwire). Transporte de canales de datos para supervisión y gestión. Adiciona bits de paridad para el control de errores y emisión de alarmas.
- 2.- Se puede lograr la protección del enlace mediante el tipo N+1, la cual se puede realizar mediante la conmutación hit-less entre dos señales de recepción. Los comandos de conmutación se realizan en base a la tasa de error, también conocido como BER.
- 3.- Temporización del equipo: El equipo de radio puede temporizarse independientemente de la red (para equipos PDH), para equipos SDH, la temporización se realiza desde la red.

VI.2.1.1 Protección del enlace mediante conmutación.

Cuando se tiene problemas tanto de equipos como de propagación, se hace necesario contrarrestarlos mediante la conmutación de canales con la misma banda base digital. Existen dos mecanismos de conmutación.

Uno de ellos es el llamado hot standby. En este tipo de conexión es utilizada una antena y dos equipos transmisores, transmitiendo con una sola frecuencia y habiendo una conmutación de transmisores a nivel de radiofrecuencia; para la recepción se da lugar a una conmutación en banda base, por medio de un circuito separador. La conmutación es efectuada tomando en cuenta una lógica de alarmas del equipo de recepción, teniendo en cuenta la tasa de error de bit (BER= Bit Error Rate).

El otro tipo de conexión se le denomina diversidad de frecuencias o de espacio, en la cual es utilizadas dos antenas y dos transmisores, la conmutación se realiza en la banda base de recepción, existe un defasamiento en las frecuencias de recepción y la relación de fase entre los bits es variable antes de la conmutación, es por esto que se requiere de un circuito defasador variable para que ponga en fase los dos trenes de datos antes de la conmutación.

A la operación de alinear las tramas de datos antes de la conmutación se le llama hitless (sin deslizamientos).

VI.2.1.2. Temporización.

El modo de sincronizar los equipos se realiza de dos formas; configuración mediante la entrada de tributarias, sincronismo externo de 2,048 KHz o sincronismo desde demodulador.

Cuando existen o se presentan fallas en las distintas fuentes de entrada, se pasa al modo Hold-Over (memorización del último estado del control de frecuencia del VCO (Voltaje Controlled Oscillator = Oscilador controlado por tensión, con estabilidad de ± 15 ppm). Estos dos casos corresponden a variantes de sincronismo interno. En general estos equipos para radioenlace son dependientes del reloj multiplexor.

VI.2.1.3 Canales de servicio y supervisión.

Sobre el enlace de radio se proporcionan canales de servicio que se disponen en estaciones repetidoras y terminales.

- 1.- Canales de servicio para hablar (orderwire).
- 2.- Canal de datos para tele supervisión.

El primero es utilizado por personal de operación y mantenimiento de las estaciones para comunicarse entre si. Por este canal transitan señales con información telefónica digitalizada (32 Kbps con codificación delta, o de 64 Kbps con codificación PCM = Modulación por Pulsos Codificados). Son canales tipo ómnibus y expreso. El canal ómnibus se encuentra en estaciones radioeléctricas y el expreso sólo en las terminales. Por lo regular la llamada es colectiva (llamado simultánea en todas las estaciones conectadas) o selectiva (un número distinto para cada estación).

Por el segundo en el canal de datos circula un protocolo de comunicación que es particular de cada sistema de tele supervisión. En él transitan los estados de las alarmas de las estaciones, la acción de controles a distancia y la medida de valores analógicos o tasa de error.

Este canal sirve como un enlace físico entre estaciones. Antes de los 90's del siglo pasado, los protocolos eran propietarios, hasta después que los sistemas de telesupervisión se normalizaron mediante dos vías: los protocolos TCP/IP (Transmisión Control Protocol e Internet Protocol) y los ISO (International Stándar Organization). En el segundo caso, se forma la denominada red de gestión TMN (Telecommunications Management Network).

En los sistemas PDH (Pleisochronous Digital Hierarchy) coexiste una normalización en cuanto a la formación de la trama en banda base del radioenlace. Para los sistemas SDH (Synchronous Digital Hierarchy) se ha normalizado la trama STM-1, teniendo en cuenta esta necesidad.

Se han ensayado dos formas de ingresar estos servicios al sistema:

- 1.- Canales integrados a la trama de datos digitales
- 2.- Canales separados de la trama principal de datos

El primero es el que ha perdurado con el tiempo para los enlaces de todas las capacidades (la capacidad de un enlace se refiere a la cantidad de canales tributarios de 2 Mbps que acceden a la banda base) y el cual no necesita de un canal auxiliar o paralelo. Mientras que el segundo tiene la ventaja de no sufrir los mismos problemas (por ejemplo de propagación) que el canal principal.

Los canales de servicio integrados a la banda base hacen uso de la operación BI (bit-insertion) y BE (bit-extraction). Permite además la operación Add-drop en una estación intermedia.

Se puede utilizar una sola frecuencia o dos frecuencias portadoras para transmitir el canal principal y el auxiliar.

En el caso de utilizar una sola frecuencia o portadora, se modula en frecuencia o fase, para el auxiliar se trata de una señal denominada Sub-Banda Base (SBB). Esta sub banda base puede ocupar un pequeño ancho de banda de algunos KHz en relación con el ancho de banda del canal principal. Este sistema sólo se usa para enlaces de baja o media capacidad (hasta 16 X 2 Mbps).

Para el otro caso, se recurre a un sistema denominado wayside (también conocido como piggy-back), donde el canal auxiliar es modulado en forma paralela (por ejemplo una señal de 2 Mbps con modulación 4 PSK = Phase Shift Keyed) y emitirlo por encima del espectro del canal principal.

Para describir mejor esto, daremos un ejemplo, se coloca el canal de 2 Mbps- 4PSK con una portadora en $70 + 29$ MHz, en un sistema principal de 140 Mbps- 16 QAM cuya banda ocupa 70 ± 26.5 MHz. Un canal wyside de 2 Mbps es factible de ser colocado en la banda base digital de los equipos PDH o en la tara de sección de los equipos SDH.

VI.2.1.4. Operación de BI/BE.

A la operación que permite a los canales auxiliares ingresar a la trama de datos a transmitir, se llama BI/BE (Bit insertion y Bit Extraction) además permite la operación Add-Drop y Drop-Insert en las estaciones intermedias. El análisis es válido para sistemas PDH de baja y media capacidad (hasta 16X2 Mbps). Existen algunas diferencias en el caso de los equipos SDH del tipo STM-1 o subSTM-1.

La trama principal y los canales auxiliares ingresan a un multiplexor en donde se intercalan datos para obtener la trama de banda base. El canal principal (tributario) lo hace en código HDB3 (High Density Bipolar) o CMI (Codec Mark Inversion) y por lo tanto accede a través de un **circuito de entrada**.

Las funciones del circuito de entrada son:

- 1.- Ecualizador de línea coaxial que permite corregir la atenuación producida por el cable de interfaz entre equipos.
- 2.- Extracción de reloj CK
- 3.- Regenerador de la señal de entrada y conversión de código. El conversor de código HDB3/CMI a NRZ permite obtener el código binario para trabajar en los circuitos lógicos que se encuentran después.
- 4.- Alarma de la señal de entrada, esta indica la ausencia de datos a la entrada (niveles de tensión por debajo del umbral aceptable) o la recepción de señal de indicación de alarma AIS (Alarm Indication Signal) la cual consiste en una secuencia 111...111. Esta secuencia rellena la señal no existente, indicando a los equipos siguientes la presencia de una anomalía pero no se puede conocer el origen.

Ahora bien, la trama digital de datos de la BI contiene dos tipos de información: el **encabezamiento y la carga útil**. La trama puede representarse como una matriz de datos, dividida en sub-tramas, con espacio entre los dos tipos de información y sus funciones son:

El encabezamiento: Comprende la palabra de sincronismo de trama o multitrama, los bits de paridad para control de tasa de error y eventualmente para la corrección de errores, canales de frecuencia vocal para el servicio en conexión ómnibus o expreso, canales de datos para el sistema de supervisión.

La carga útil: Comprende los canales tributarios de entrada multiplexados.

La etapa de banda base es independiente del medio de transmisión, de hecho hay cierta compatibilidad entre sistemas de fibra óptica y los de radioenlace. Únicamente se tiene compatibilidad con los sistemas SDH para radio enlaces, debido a que las operaciones de control de errores, aleatorización y trama digital, están normalizadas, no así para los sistemas PDH.

La etapa BE (bit-extraction) es la operación complementaria a la BI. La señal de datos NRZ (Non Return to Zero) y reloj CK (Clock) llega desde el demodulador y se procesa en el demultiplexor. Un circuito lógico se sincroniza con la palabra de alineamiento de la trama FR (frame). Este circuito emite la alarma de falta de alineamiento de trama LOF (loss of frame) cuando se detecta con diferencias un cierto número de FR, y se desactiva cuando se lee en forma correcta varias veces (generalmente se trata de 4 y 3 veces). Con los bits de la trama se obtienen alarmas con umbrales de 10^{-3} y 10^{-6} (esto quiere decir que puede haber un bit de error por cada mil y un millón de bits respectivamente, recibidos).

A la salida de una memoria elástica se tiene el codificador, desde NRZ a HDB3/CMI y la interfaz a la línea.

Existe otra operación llamada ADD/DROP, la cual consiste en una versión reducida de la conexión BE/BI. Se le utiliza en estaciones intermedias en donde se necesita obtener sólo los canales de servicio y supervisión, sin tener que demultiplexar el canal principal, o sea que sigue en tránsito. La operación A/D permite obtener canales de servicio como por ejemplo una señal de 2048 Kb/s y/o canales aislados de 64 Kbps, sin necesidad de recuperar el canal principal, el cual hace tránsito directo en esta estación.

En caso de alarma general de datos recibidos, se efectúa un Restart, consistente en generar la señal de la trama localmente y el reloj para mantener una trama de comunicación hacia delante con una señal principal en la condición de AIS. Para el caso en que exista una alarma de banda-base local, se efectúa un By-Pass consistente en enviar la señal de ingreso directamente a la salida. De esta forma se mantiene en comunicación las estaciones adyacentes, aunque la presente se encuentre en alarma local.

En los sistemas SDH, esta operación queda garantizada y simplificada ya que en la trama se hace uso del concepto de punteros para señalar la ubicación de los canales tributarios dentro de la trama de multiplexación STM-1.

VI.2.2 Modem y transreceptor.

a) Etapa modulador – demodulador.

La etapa siguiente a la de banda base es la etapa modulador-demodulador y tiene como objetivo la codificación y la modulación de la señal digital. Las funciones genéricas son:

Etapas hacia el modulador.

- ° Codificación de la señal digital.
- ° Filtrado del canal antes del modulador.
- ° Generación del oscilador local para el modulador.
- ° Modulación de la señal digital filtrada para obtener la frecuencia intermedia.
- ° Filtrado de la frecuencia intermedia.

Hay varios tipos de codificación, previos a la modulación; que como no se encuentran normalizados pueden o no existir dependiendo del diseño.

- ° Codificación FEC (Forward Error Correction) para corrección de errores.
 - ° Codificación Interleaver.
 - ° Codificación diferencial.
-

Después de la multiplexación de datos en la trama digital, se encuentra un circuito aleatorizador SCR de salida que permite eliminar las secuencias periódicas, de tal forma que distribuye la potencia en todo el espectro, evitando armónicas con alta concentración de potencia que ofician de interferencia a otros sistemas.

La codificación diferencial permite reducir las exigencias sobre la fase del oscilador local en recepción.

El codificador Interleaver permite la distribución de datos en el tiempo.

La señal filtrada antes de la etapa de modulación permite llevarla a una banda de frecuencias reducidas.

La señal de IF (Intermediate Frequency) es enviada a la etapa de radiofrecuencia. Se disponen de puntos de monitoreo (para la realizar mediciones del espectro), puntos de prueba de tensión (para medir el nivel de salida) y una alarma indicativa del nivel de IF (frecuencia intermedia).

Etapas hacia el demodulador.

- Filtrado de la frecuencia intermedia.
- Demodulación de la señal digital filtrada para obtener la frecuencia intermedia.
- Ecuación en recepción de la señal demodulada.
- Decodificación de la señal digital.

En el lado del demodulador existe un circuito típico en recepción, llamado ecualizador autoadaptativo. Existen ecualizadores en frecuencia intermedia (dominio de la frecuencia) y en banda base (dominio del tiempo). Estos permiten mejorar el espectro y la forma de onda respectivamente, de la señal recibida antes de la regeneración. En los equipos diseñados en los 90's del siglo XX ha desaparecido el ecualizador de IF y se han realizado grandes progresos en los de banda base.

b) Etapa transmisor-receptor.

A grandes rasgos se pueden identificar las siguientes funciones en la etapa de transmisión:

- Entrada de la frecuencia intermedia.
 - Generador del oscilador local de RF.
 - Conversión Up desde IF hacia RF en transmisión.
 - Amplificación de potencia en transmisión.
 - Control de potencia ATCP y linealizador de RF.
 - Ecuación del retardo de grupo y la linealidad de amplitud.
-

La señal IF (frecuencia intermedia) proveniente del modulador ingresa a un circuito mezclador de imagen suprimida IRM (Imagen Rejection Mezclador). Normalmente es oscilador de RF (radio frecuencia) es programable (oscilador sintetizado) para equipos de baja capacidad (hasta 16X2 Mbps) y fijo para alta capacidad (STM-1 = Módulo de Transporte Síncrono de nivel 1). Cuenta con un punto para realizar mediciones de frecuencia, un punto para medir niveles de tensión proporcional al nivel de salida y una alarma, la cual se enciende para un nivel por debajo de umbral establecido. En el amplificador de salida se tiene un punto de monitoreo de la RF en paralelo para medir el espectro transmitido, además de un punto de prueba para realizar mediciones de tensión proporcional al nivel de potencia de salida y una alarma indicadora de bajo nivel de emisión.

El amplificador de salida cuenta con un Back-off. Y no es más que el margen entre la potencia generada u obtenida por el transmisor y la potencia de saturación del mismo, este valor en dB aumenta en función al número de fases del método de modulación. Esto es; que si modula una señal de 4 PSK se tendrá 2dB, teniendo un incremento a 8 dB para una señal modulada en 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Tratando el amplificador de trabajar en la zona lineal de transferencia limitando la distorsión de intermodulación introducida.

En el lado de recepción se tiene:

- ° Conversión Down desde RF hacia IF en recepción.
- ° Control automático de ganancia a nivel de IF en recepción.
- ° Bajo ruido en recepción.

El receptor también tiene un preamplificador de entrada con un down-converter IRM (mezclador de imagen suprimida) y un oscilador local. Disponiendo de un filtro de IF (frecuencia intermedia) con un ecualizador de linealidad y retardo de grupo, luego un control automático de ganancia AGC (Automatic Gain Control) permite mantener estable el nivel de la IF de salida. El AGC entrega un valor de tensión proporcional a la potencia recibida que actúa sobre la atenuación de una etapa intermedia entre amplificadores. Es por ello que el valor de tensión se relaciona con la potencia de recepción R_x . Si el nivel de AGC cae por debajo de un umbral se presenta la alarma de bajo nivel de potencia recibida. Finalmente la señal de IF se envía al demodulador, contando también con un punto de monitoreo para medir el espectro de IF en recepción.

VI.3 Sistemas de baja y media capacidad.

Se pueden considerar los equipos de baja capacidad a los que funcionan con un ingreso de señal digital de hasta 8×2048 Kbps (esto quiere decir, 8 E1's). Los canales de servicio de la banda base son reducidos desde 32 a 2×64 Kbps. Las bandas típicas a las cuáles trabajan son de 0.8, 1.5 y 2 GHz, utilizados en enlaces rurales de mediana longitud. Para enlaces en ciudades que se consideran cortas, son utilizadas las frecuencias de 15, 18 y 23 GHz. Debe tenerse en cuenta que

la utilización de bajas frecuencias de los sistemas de telefonía celular, obliga a trabajar en bandas superiores.

Se puede considerar un equipo de media capacidad a aquellos que trabajan con banda base de 34 Mbps o sub-STM1.

Son considerados sistemas de alta capacidad los sistemas funcionando a la velocidad de STM-1 155 Mbps, velocidades utilizadas en el sistema SDH.

VI.3.1 Sistema SDH.

SDH es una alternativa de evolución de las redes de transporte. En 1986 la Bell Core, y la AT&T, proponen al CCITT (CCI for Telegraphy and Telephony) posibles velocidades de transmisión, para ser estandarizadas. Ya para el año de 1988 del siglo pasado se produce la primera regulación de la jerarquía digital sincrónica (Synchronous Digital Hierarchy) o SDH.

Las recomendaciones G707, G708 y G709 que constituyen la primera regulación de esta forma de transmisión.

Sus principales características son:

1. Velocidad básica de 155 Mbps (STM-1).
2. Técnicas de multiplexado a través de punteros.
3. Estructura modular: Multiplexando byte por byte de varias señales STM1, se pueden lograr mayores velocidades. Estas señales multiplexadas, a diferencia de PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), son múltiplos enteros de la velocidad básica (155 Mbps).
4. A través del puntero se puede acceder a canales de 2 Mbps.
5. Contiene gran cantidad de canales de overhead que son utilizados para la gestión, supervisión, y control de la red.
6. Fácil crecimiento ha velocidades mayores, conforme lo requiera la red.
7. Implementación de sistemas con estructura flexible que pueden ser utilizados para construir nuevas redes (LAN.-Local Area Network, MAN.-Metropolitan Area Network, e ISDN.- Integrated Service Digital Network).

La SDH trabaja con una estructura llamada trama básica, la cual esta conformada por una matriz de 9 filas y 270 columnas, cuyos elementos son octetos de 8 bits; teniendo una duración de 125 microsegundos, o sea que se repite 8000 veces por segundo, resultando que su velocidad binaria será de:

$$9 \times 270 = 2430 \text{ bytes}$$

$$2430 \times 8 = 19440 \text{ bits}$$

$$19\ 440 \times 8000 = 155\ 520 \text{ Kbits/seg}$$

Esta trama básica recibe el nombre de STM-1 "Modulo de transporte síncrono de nivel 1".

En la trama se distinguen tres áreas: Tarea de sección, Punteros de AU (Unidad Administrativa) y carga útil. Para que un tributario entre a formar parte de la carga útil de una señal STM-1, este debe de ser empacado adecuadamente, siendo procesado, con el fin de convertirlo en un contenedor virtual (VC) este contenedor es una señal sincronía en frecuencia con el STM1, ocupando un determinado lugar en la sección de carga útil de la trama.

Los punteros sirven para ubicar los octetos dentro de la trama, ya que estos últimos cuentan con un número que los identifican. De esta forma la carga útil puede estar "flotando" dentro de la trama STM, pues siempre su posición estará indicada por el puntero.

Una red basada en SDH proporciona los medios para transportar los VC's entre diversos puntos, cargando y descargando contenedores de los STM-1 y para transferir contenedores de un medio de transporte a otro (STM-N). En el recorrido por la red, los VC's transitaran por diferentes rutas y con diferentes velocidades.

La capacidad máxima lograda por un radio enlace es de una señal STM-1, teniendo antenas de hasta 3 m de diámetro, un ejemplo lo podemos ver en el radio enlace desde la torre de PEMEX a Tlamacas, con una distancia promedio de 30 Km.

Se mostrara de una manera muy general como se van multiplexando varias señales, hasta formar una señal STM-1 y poder ser radiada. Ver Figura VI.1.

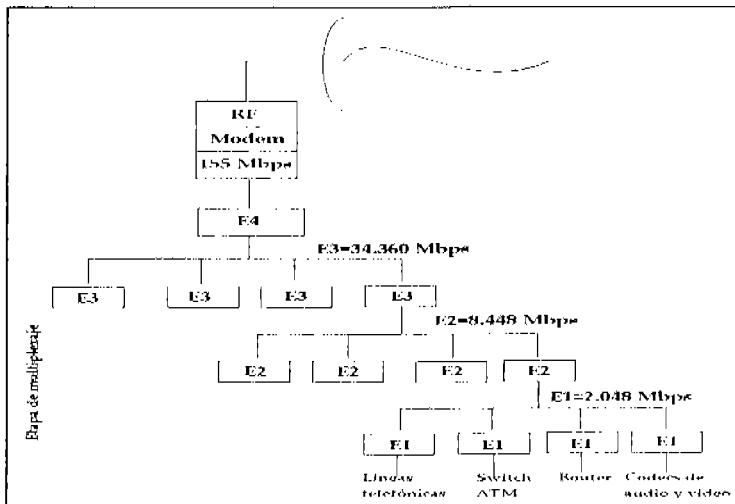


Figura VI.1. Formación de la señal STM-1.

VI.4 Los modelos Alcatel 9400 UX.

VI.4.1 Descripción simplificada.

Este tipo de equipos cumple con las exigencias internacionales en las bandas de 13, 15, 18, 23, y 38 GHz, con las separaciones principales en T_X/R_X , disponibles, acordes con las reglamentaciones nacionales. En la Tabla VI.1 se pueden apreciar estos datos.

Designación	Banda (GHz)	Frecuencia (GHz)	T_X/R_X Separación (MHz)
9413 UX	13	12.75- 13.25	266
9415 UX	15	14.4- 15.35	728, 315, 420, 490
9418 UX	18	17.7 - 19.7	1010, 1008, 340, 1560,
9423 UX	23	24.5 - 26.52	1008, 1197, 1200, 1232
9425 UX	25	1.2 - 23.6	1008
9438 UX	38	37 - 39.5	1260

Tabla VI.1. Separaciones principales en la transmisión y recepción para diferentes frecuencias de operación.

Los sistemas Alcatel 9400 UX tienen una gran eficiencia en el espectro, utilizando de una manera minimizada del ancho de banda de RF (Radio Frecuencia) para una capacidad determinada. Utilizando una modulación 4QAM (Ver tabla VI.2).

Capacidad	Mbps	2X2	4X2	8X2	16X2
Canalización RF (modulación 4QAM)	(MHz)	3.5	7	14	28

Tabla VI.2. Ancho de banda utilizado para una capacidad dada.

VI.4.2 Configuraciones.

° Configuración no protegida, también conocida como terminal de radio (1+0) (en este tipo de configuración, si llega a fallar el equipo, no hay manera de levantar el enlace, por así decirlo, hasta que se restaure este mismo, ya que no se cuenta con otro equipo que sirva como respaldo del enlace). Esta compuesto por los siguientes elementos:

- Una unidad externa o ODU (Outdoor Unit), la cual incorpora el transreceptor RF completo (unidades de módem RF, filtro de conexión) y una antena integrada o separada
- Una unidad interna IDU (Indoor Unit) que incorpora el tratamiento de la banda base y que ofrece interfaces de los afluentes, además de los canales de servicio y supervisión. Esta unidad es independiente de la frecuencia ya que puede trabajar a frecuencias desde 7 hasta 38 GHZ.
- Está disponible una versión ligera con una configuración de 1+0 y de hasta 4X2 Mbps (4 E1's).
- Una versión clásica que permite todas las configuraciones posibles, (1+0 y 1+1, con una capacidad de hasta 16X2 Mbps.
- Estas dos versiones de IDU son compatibles con la misma unidad ODU.
- Un cable coaxial une a estos dos equipos (por lo general se utiliza el llamada RG8).

° Configuración Protegida Ya habíamos mencionado que pueden existir dos tipos de problemas en un radioenlace, los cuales son, un fallo en el equipo y problemas de propagación. La configuración protegida tiene como fin agregar funciones redundantes a los equipos en las unidades ODU e IDU para:

- Para proteger el enlace en el caso de un mal funcionamiento temporal (alarma intermitente) o de un fallo definitivo (fallo del equipo).
- Para aumentar los rendimientos del equipo en relación con el problema de propagación.
- Las configuraciones (1+1) incluyen un conmutador automático R_N libre de errores.
- Protección del enlace y el tráfico lateral, además de que los canales auxiliares están protegidos automáticamente.

CONFIGURACIÓN ODU		APLICACIONES	
	9400 UX		
1+0	1x ODU 1x antena polarización simple	No protegida	
1+1 HSB	2x ODU en la frecuencia 1x acoplador 1x antena polarización simple.	Protección contra los fallos	
1+1 HSB SD	2x ODU en la misma frecuencia, 2x antenas polarización simple	Protección contra los fallos	Mejora de los rendimientos en relación con la propagación de trayecto múltiple
1+1 FD	2x ODU en diferentes frecuencias 2x antenas polarización simple (o 1 antena con doble polarización)	Protección contra los fallos	Mejora de los rendimientos en relación con la propagación de trayecto múltiple

Tabla VI.3. Tipo de configuración, equipo utilizado y su respectiva aplicación.
SD.- Diversidad de espacio FD.- Diversidad de frecuencia y HSB.- Hot Stand By.

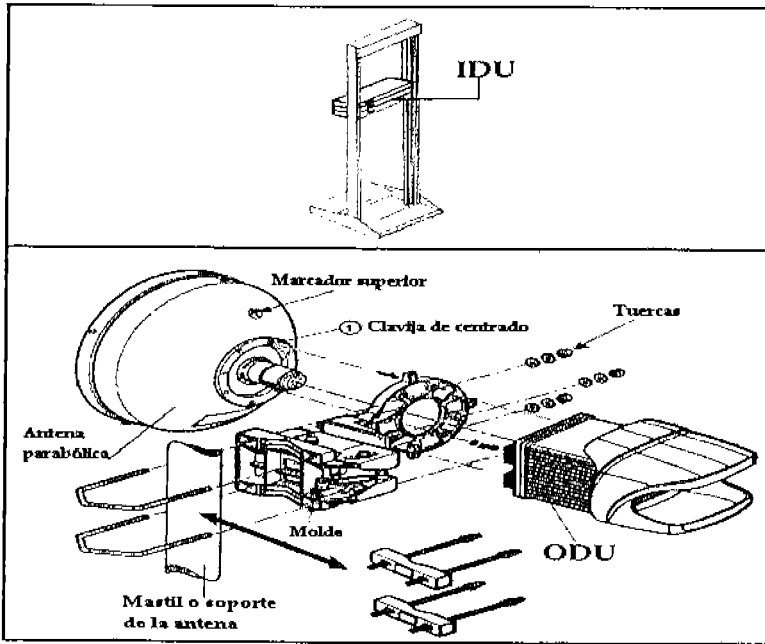


Figura VI.2. Unidades IDU y ODU para una configuración 1+0.

Para cada configuración (1+0, 1+1, etc.) de la ODU mostrada en la Tabla VI.3 le corresponde una configuración de IDU mostrada en la Tabla VI.4.

CONFIGURACIÓN IDU		APLICACIONES	
1+0	IDU clásica IDU light	No protegida	
1+1 protección básica	IDU principal (clásica) IDU de extensión sin opción MUX-DEMUX	Conmutación automática: Selección del mejor trayecto de recepción	
1+1 con protección MUX-DEMUX	IDU principal IDU de extensión con opción MUX-DEMUX IDU de acceso	Conmutación automática: selección del mejor trayecto de recepción	Protección de los accesos de los afluentes incluyendo mux-demux redundantes

Tabla VI.4 Para cada configuración de la unidad ODU, le corresponde una configuración IDU.

VI.4.3 Características.

1.- Frecuencia controlada por software: El oscilador local de RF es controlado vía software y permite establecer fácilmente las frecuencias de operación.

2.- Capacidad controlada por software: La capacidad del sistema puede ser controlado vía software, para una velocidad binaria máxima, entre 2X2 Mbps hasta 16X2 Mbps (para los equipos Alcatel 9400 UX) utilizando una llave software apropiada.

3.- Control en la potencia de transmisión: Potencia controlada por medio del software de aplicación (sólo para frecuencias que van de 23 a 38 GHz). Para frecuencias de 13, 15 y 18 GHz, se utilizan atenuadores fijos (3, 6 o 10 dB) en el lado T_x en la unidad ODU.

Parámetros de la llave software: Los parámetros de la IDU clásica para su configuración puede llevarse a cabo por medio de esta llave, lo mismo que sus opciones:

- Definición de la configuración máxima: 1+0 o 1+1.
 - Definición de la capacidad básica: De 2x 2Mbps hasta 16x2 Mbps.
 - Fijación de la frecuencia de operación.
 - Opción de autorización para el control de la potencia de transmisión.
 - Opción de Autorización para mediación incorporada (Terminal maestro o terminal esclavo).
 - Autorización como opción para la función terminal de explotación a distancia.
- ° Codificación de la identidad del enlace: El entramado digital incorpora las capacidades de codificación de la identidad del enlace para impedir que se capture una señal no deseada. Para los enlaces urbanos se puede tener el problema de interferencias durante el proceso de instalación y activación.
- ° Cable coaxial simple: Un cable coaxial de hasta 300 m (Por lo general el llamado RG8) une las unidades IDU y ODU, dando flexibilidad a la ubicación de la radio y la antena.
- ° Puesta en servicio simple: Una vez que ha finalizado la etapa de la instalación de las unidades IDU y ODU, se da comienzo a las pruebas de aceptación del enlace, configurando todos los parámetros antes mencionados, todo desde una PC, haciendo uso extensivo de las características de supervisión integradas:
- Control continuo de los rendimientos y supervisión del estado de las alarmas
 - Generador PRBS (Pseudo Random Binary Sequence – Secuencia Binaria Seudoaleatoria) y contadores de errores integrados.

VI.4.3.1 Software del equipo.

El terminal Alcatel 9400 UX suministra una interfaz F (DB9 macho) a un terminal de explotación (PC) que permite el control de alarmas, medición de la calidad y la configuración del equipo (como habíamos mencionado anteriormente).

Funciones administrativas

- Se pueden crear diferentes perfiles de usuario, con una contraseña asociada para acceder o no a las aplicaciones. En modo lectura o lectura y escritura.

Parámetros de instalación y de operación

- Fijación de los parámetros de los equipos ODU e IDU: Configuración 1+0 o 1+1 (protegida o no), banda de frecuencia, número de afluentes, presencia de las opciones.
- Configuración de identidad del enlace, las frecuencias T_X y R_X , potencia de salida desde 23 a 38 GHz, afluentes interconectados de 2 Mbps.

Estados de las alarmas y Controles (AS&C).

- Posibilidad de activar o inhibir las indicaciones de alarma.
- Configuración de las alarmas como urgentes o no urgentes.
- Presentación de una síntesis de las alarmas supervisadas como urgentes, no urgentes y en espera.
- Posibilidad de establecer el nivel del umbral a partir de las cuales las alarmas son activadas.
- Establecimiento de telemandos tales como: Bucles, conmutación manual, bloqueo de la potencia de transmisión, etc.

Supervisión del rendimiento G.821.

- Supervisión de la calidad del enlace: segundos crónicos, segundos con muchos errores
- Parámetros de radio transmisión RTP.
- Potencia T_X y R_X , BER (tasa de error de bit).

Inventario remoto.

- Es utilizado para leer la información que permite la identificación completa del elemento de la red seleccionado (unidades IDU y ODU) como son: número de serie, fecha de fabricación.

Memoria del mantenimiento

- La aplicación memoria del mantenimiento permite visualizar todos los eventos fechados que han sido almacenados en el equipo cuando el equipo de explotación no está conectado.

Medidas analógicas

- Esta aplicación es utilizada para realizar mediciones en varios puntos de medición y visualizarlos en la pantalla, como: Potencia R_x mínima, potencia R_x corriente, BER máxima, estados de las tensiones de suministro de potencias secundarias.

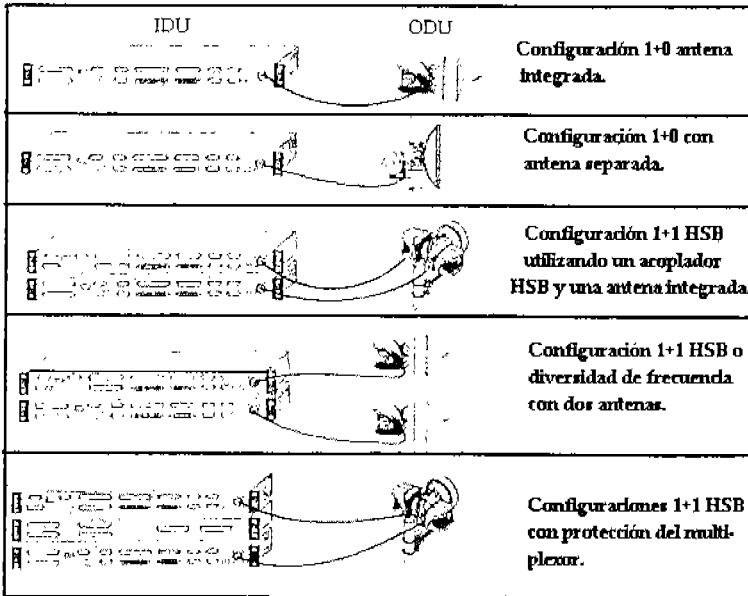


Figura VI.3. Ejemplos de las configuraciones físicas de las unidades IDU y ODU.

VI.5 Funcionamiento de las configuraciones.

VI.5.1 Configuración 1+0.

° Funcionamiento de la unidad IDU (clásica): La o las tarjetas LAU (line Access unit) aseguran el conjunto de las funciones pasivas necesarias para la interfaz de tipo G.703, transmisión y recepción de los afluentes y del tren auxiliar de 2 Mbps (cuando existe). Se trata esencialmente de la adaptación de impedancia. Pudiendo utilizarse dos tipos de tarjetas:

- LAU 3CC06059AAXX: Ocho accesos para una velocidad de 2 Mbps (dos tarjetas de este tipo se utilizan para la velocidad de 16 x 2Mbps).
- LAU 3CC06061AAXX: Un acceso para una velocidad de 34 Mbps + un acceso de un tren auxiliar de 2 Mbps.

La o las tarjetas LIU (line Interface Unit) efectúan el conjunto de las funciones activas necesarias para la interfaz del tipo G.703, transmisión y recepción de los afluentes y del tren auxiliar de 2 Mbps (esencialmente de una transcodificación de HDB3 ↔ HCMOS). Se trata de tarjetas hijas que se insertan en la tarjeta MCU. Y se pueden utilizar tres tipos de tarjetas:

- LIU 3CC06026AAxx: Ocho accesos para una velocidad de 2 Mbps
- LIU 3CC06119AAxx: Tarjeta de extensión de 8 accesos, utilizada en conjunto con la tarjeta anterior de 8 accesos, para una velocidad de 16 x 2 Mbps.
- LAU 3CC06118AAxx: Un acceso para una velocidad de 34 Mbps + un acceso de un tren auxiliar de 2 Mbps

° La tarjeta MCU (Multiplexing and Control Unit) asegura:

- Las funciones de multiplexado/demultiplexado, con la finalidad de constituir el agregado por emitir y reconstituir los afluentes a partir del agregado recibido
- La mezcla de los afluentes de 2 Mbps
- La inserción/extracción de los canales de servicio (5 como máximo) y del tren auxiliar de 2 Mbps (cuando existe).
- La conexión del sistema de supervisión local, para conectar una PC.
- El control local de la unidad outdoor
- La interfaz con la unidad Outdoor, para: La alimentación de la unidad ODU, la transmisión y recepción del agregado, la transmisión y la recepción de la supervisión de la ODU, de transmisión y recepción.
- Memorización de los eventos, por medio de una memoria de mantenimiento, salvaguardada por medio de una pila.

° Alimentación de ± 24 V y ± 48 V.

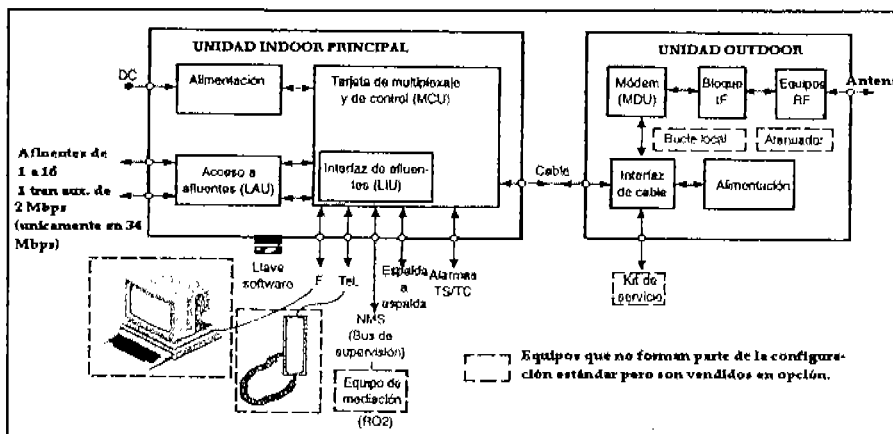


Figura VI.4. Configuración 1+0, versión IDU clásica.

VI.5.2 Configuración básica 1+1.

Esta configuración solo es utilizada con la unidad IDU clásica. Para esta configuración se utilizan, una unidad IDU principal (idéntica a la de la configuración 1+0), de una unidad IDU de extensión y de dos unidades ODU.

La unidad de extensión cuenta con una tarjeta SCU (Service Channel Unit) que asegura las siguientes funciones:

- Suministro de las interfaces de usuarios de los canales de servicio.
- Control de la segunda unidad ODU.
- Interfaz del cable de enlace con la segunda unidad ODU.

La tarjeta MCU de la unidad principal envía a la tarjeta SCU el agregado por transmitir y recibe el agregado de recepción. Es la unidad MCU quien asegura la función de conmutación, en la recepción, entre los dos canales, normal y de reserva.

Existen tres configuraciones:

- Hot Standby (HSB), un puerto de antena.
- Hot Standby, dos puertos de antena.
- Diversidad de frecuencia.

VI.5.2.1 Configuración HSB con un acceso de antena.

Las unidades ODU están conectadas por medio de un acoplador HSB que asegura una atenuación de 10 dB sobre el canal de reserva.

La conmutación en la emisión se realiza en el momento de la detección de una interrupción que puede provenir de un fallo:

- de la interfaz del cable.
- de la alimentación del ODU.
- del sintetizador IF de emisión.
- del sintetizador RF.
- del amplificador.

El retorno al canal normal es automático, en cuanto éste vuelve a funcionar (debido a la no simetría del sistema), para la transmisión como para la recepción.

Esta conmutación puede efectuarse igualmente por medio de un control remoto de conmutación manual sobre el canal de reserva.

VI.5.2.2 Configuración HSB con dos accesos de antena.

Esta configuración utiliza tanto una antena de doble polarización o dos antenas (recuérdese que existe tanto polarización vertical, como horizontal, en relación a la propagación de la componente del campo eléctrico de una onda electromagnética), en este caso, también agrega una diversidad de espacio. Un sistema envía (el emisor en espera está cortado). La operación es la misma que la de la configuración previa, con la excepción de la conmutación, en la cual no es exigida la reversibilidad, debido a que los balances de enlaces son idénticos para ambos canales.

VI.5.2.3 Configuración de diversidad de frecuencia.

Las dos ODU emiten el agregado simultáneamente, sobre dos frecuencias diferentes. El MCU escoge, en el momento de la recepción, la mejor de las dos señales. Esta configuración utiliza también dos accesos de antena.

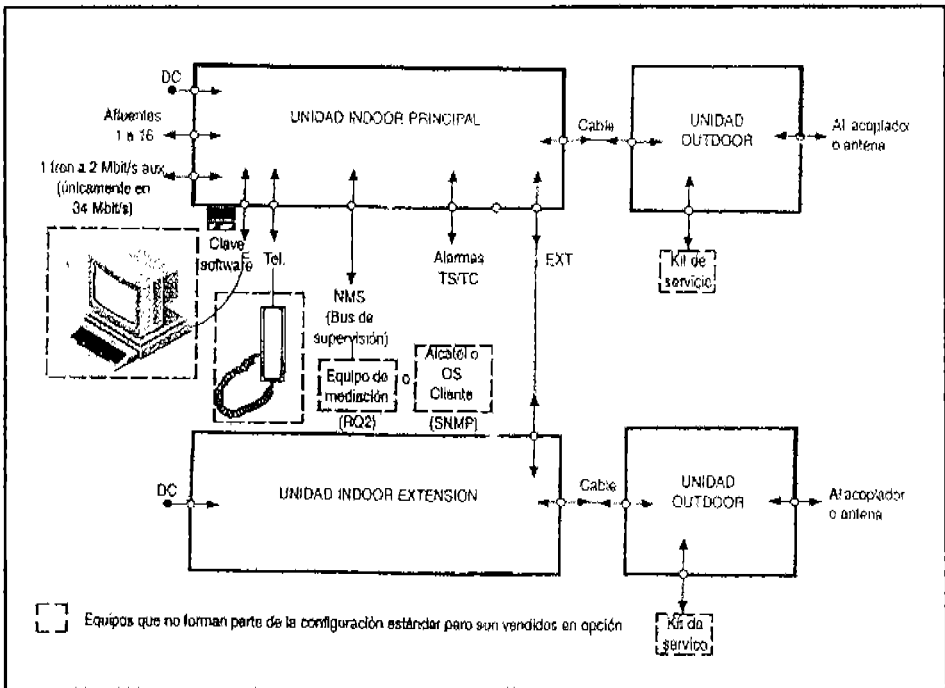


Figura VI.5. Diagrama sinóptico de una estación, configuración 1+1.

VI.6 Software de configuración.

Daremos una breve explicación de una configuración de los parámetros para una configuración 1+0, vía software.

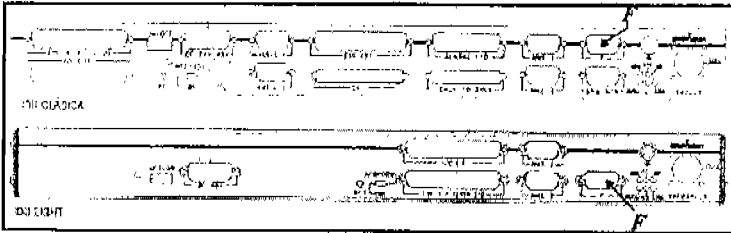
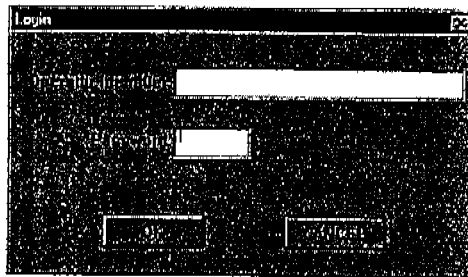
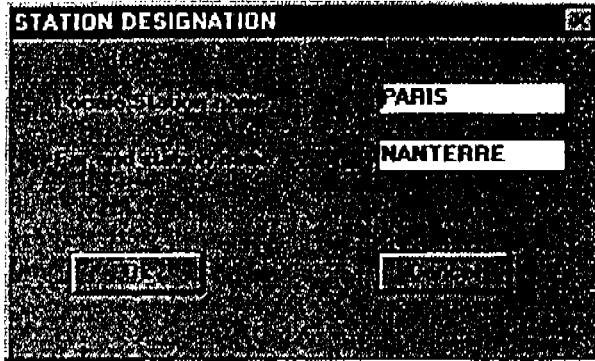


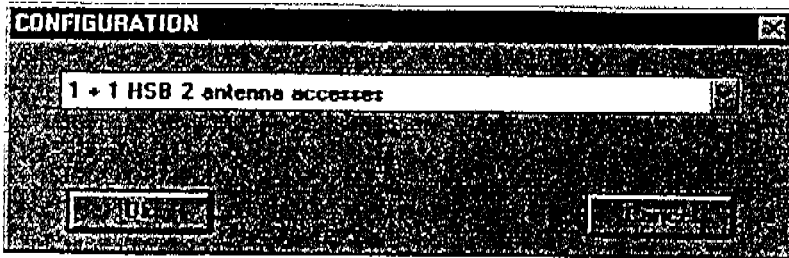
Figura VI.6. En las unidades IDU, existe una interfaz de nueve puntos (DB9) donde es conectada una Laptop, para su debida configuración.

Al dar inicio en una sesión de Nectas (software de aplicación), hacer clic sobre el menú “Application choice..” aparece la siguiente pantalla de pedido de la contraseña.

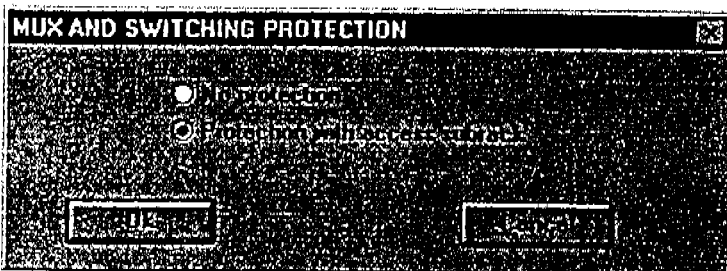




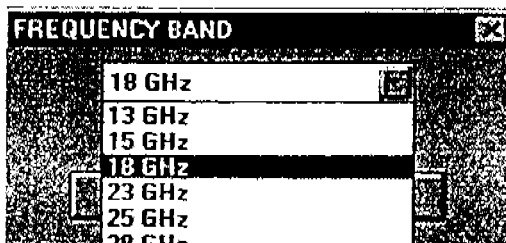
Indicar los nombres de las estaciones, tanto de la estación local como remota. Utilizando como máximo 8 caracteres. Y continuar con los demás submenús.



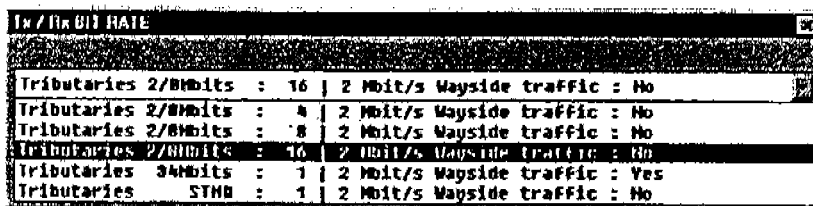
Configuración. Seleccionar en la lista desplegable la opción correspondiente a la configuración del equipo. Pasando a la siguiente opción del menú Tablas.



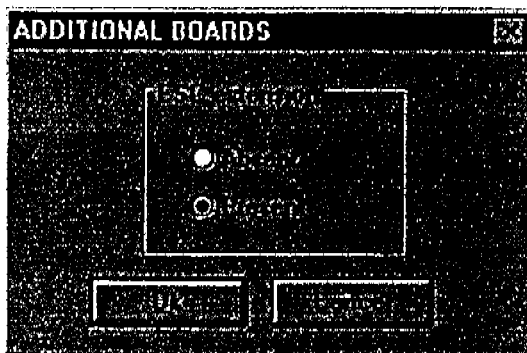
Protección MUX. Elija uno de los dos botones según este presente o ausente una IDU de acceso.



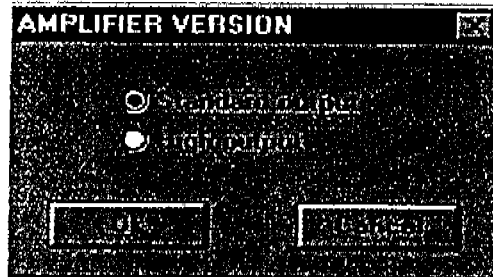
Banda de frecuencia. Seleccionar la banda de frecuencia del equipo en la lista desplegable.



Tributary units (Tarjetas de afluentes). Seleccionar el número máximo de afluentes autorizado por las tarjetas LAU/LIU presentes en el equipo.



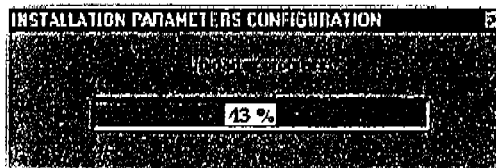
Opción de la configuración 1+0. Additional boards (tarjetas adicionales). Hacer clic sobre el botón correspondiente a la configuración (Ausencia o presencia de una unidad IDU de extensión).



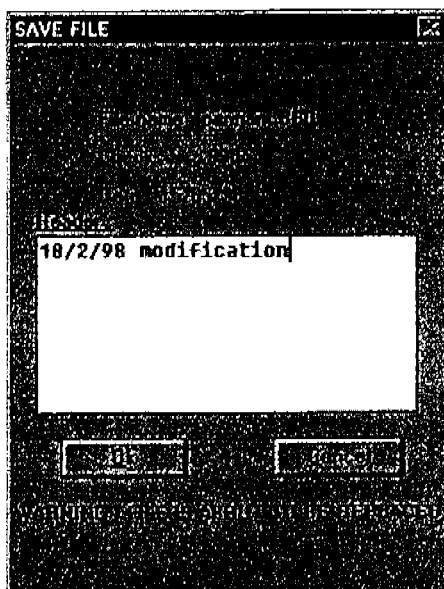
Tipo de amplificador para las versiones 15 GHz y 18 GHz. Amplifier versión (amplificador). Seleccionar el botón correspondiente a la configuración del ODU (potencia estándar o gran potencia).

Para salvar los parámetros de configuración se utiliza la opción File, y siguiendo el siguiente procedimiento:

Haciendo clic en el ícono de File.



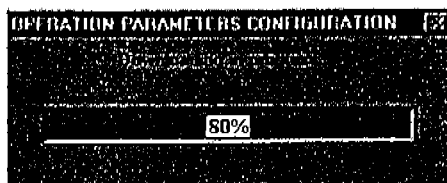
Receive (recibir). Recepción de la configuración actual del NE para actualizar la configuración.



Save (guardar). Salvaguarda del archivo activo.

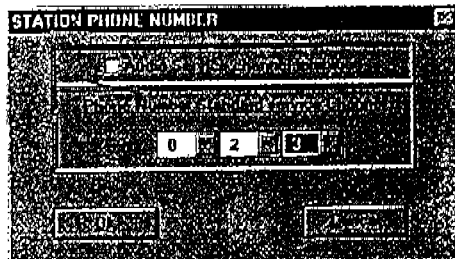
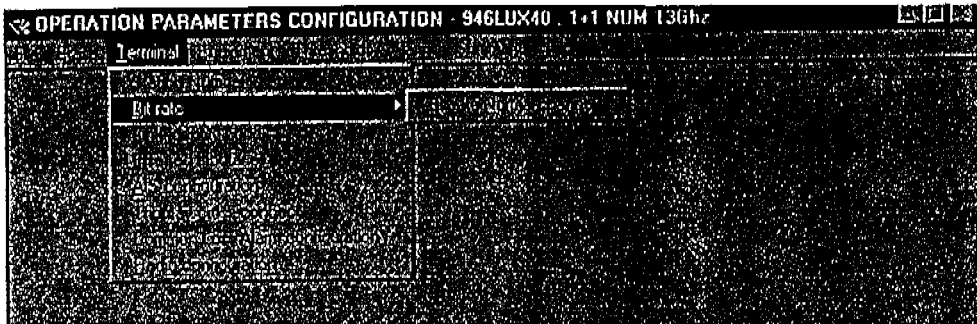
Al realizarse la salvaguarda bajo el mismo nombre, aparece un mensaje de advertencia para evitar el borrado del anterior archivo.

Se puede incluir un comentario en la zona "Header" (encabezado).



Es visible la barra del indicador de progreso mientras se está cargando la configuración.

Finalmente se accesa al menú "parámetros operacionales", introduciendo los datos correspondientes que generalmente son proporcionados en base a un estudio de ingeniería hecho previamente.

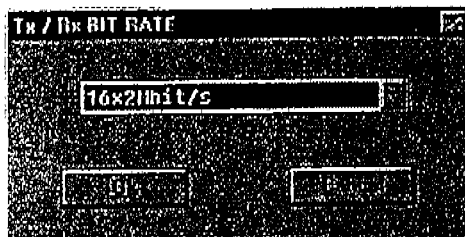


Station Number (Número de estación).

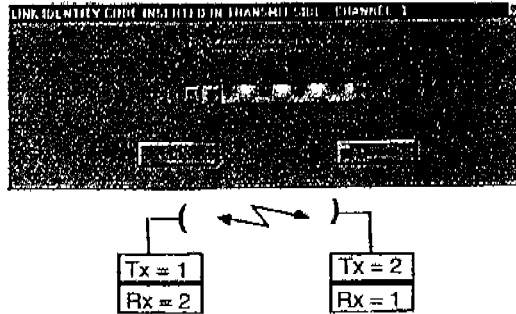
Selección del número de teléfono de la estación.

Valores posibles: 011 a 999, pero el número debe contar únicamente con un cero.

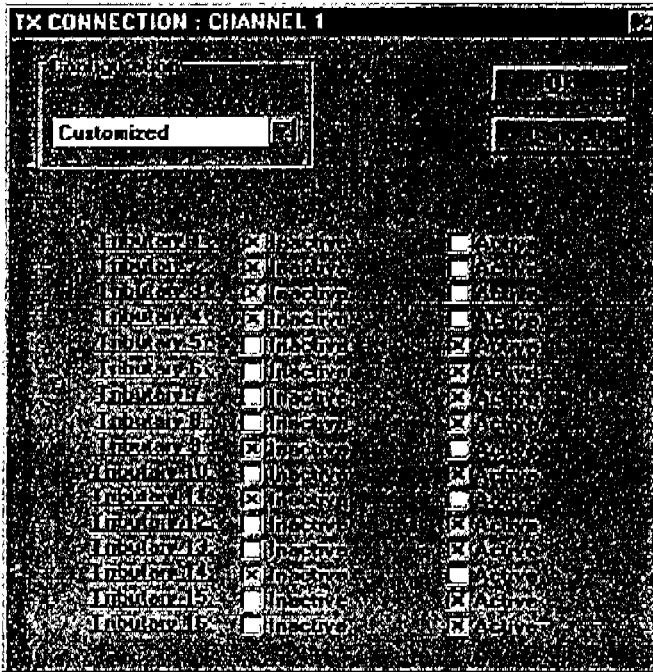
Casillero FSC inhibido seleccionado: El terminal no tiene un teléfono.



Bit rate (velocidades). Selección de la velocidad operacional. La velocidad está limitada por la velocidad máxima autorizada por la clave software o la velocidad máxima autorizada por la configuración material.



Link identity code (identificación del enlace). 2 ventanas de diálogo (transmisión y recepción). Protección de la transmisión por medio de la introducción de un código en el momento de la transmisión (valores posibles: 0 a 31). Este mismo código debe introducirse, en la recepción, en el equipo remoto, para permitir la comparación código recibido-código esperado. De igual manera en recepción, el código el código programado debe ser idéntico al programado en transmisión en la estación remota. Se aconseja utilizar códigos diferentes en los dos sentidos.



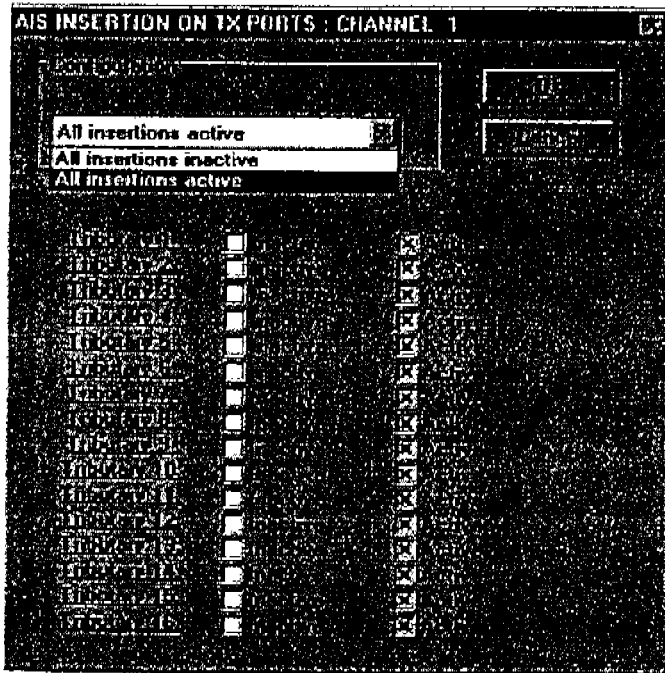
Inserter tributaries (conexión de afluentes). Ventana de dialogo propuesta para la emisión y la recepción.

Validación o inhibición de todos y cada uno de los afluentes. Un afluente no cargado y activo provoca una alarma.

La lista desplegable "Configuration" (configuración) permite activar o desactivar simultáneamente todos los afluentes.

La opción de configuración "Customized" (personalizada) permite activar o desactivar los afluentes uno por uno, seleccionando las casillas correspondientes.

El número de afluentes visualizado depende de la opción seleccionada en la pantalla "Bit rate" (velocidades).



AIS configuration. Ventana de dialogo propuesta para la emisión y la recepción.

Permite indicar, para los afluentes, si la inserción de AIS está activa o no.

La lista desplegable "Configuration" (configuración) permite activar o desactivar simultáneamente todas las inserciones.

Finalmente se cierra la aplicación, y se le inserta una señal de prueba (conocida como prueba de BER) para asegurar que el enlace este transmitiendo y recibiendo correctamente.

Conclusiones

Los radioenlaces fijos terrestres son y seguirán siendo una buena opción para el transporte de información (voz, datos y video), debido a su gran flexibilidad y coste, que comparado con el complejo y alto costo que conlleva la instalación de un medio físico como el par de cobre o fibra óptica ya sea para la comunicación entre ciudades como para las urbanas. Esperando que este trabajo sirva como referencia para aquellas personas, técnicos o ingenieros que se interesen en este tipo de equipos que son utilizados en los radioenlaces y que no basta con el conocimiento del equipo y de su debida instalación, ya que las condiciones atmosféricas, los probables obstáculos o la no adaptación de impedancias entre el equipo, la línea y la antena puede tener una fuerte repercusión en la señal de transmisión o recepción.

Esperando que los equipos sigan evolucionando con la aparición de nuevas tecnologías, nuevas técnicas de codificación y de multiplexaje, todo esto con el fin de aumentar la capacidad del sistema como medio de transmisión aunque en la actualidad la fibra óptica es la mejor que existe en cuanto a capacidad se refiere.

Los cálculos a pesar que sólo son aproximaciones, ayudan a tener una idea más clara de los problemas en cuestión.

Bibliografía

- Gupta KC
Microondas
Limusa 1980.

 - Miranda José Miguel
Sebastián José Luis
Sierra Manuel
Ingeniería de Microondas
Técnicas experimentales
Prentice Hall 2002.

 - Net Font Francisco Javier
Teoría básica de radiación y propagación electromagnética
Ed. Noriega 1989.

 - Kaofman Milton
Scidman Arthur H.
Electrónica moderna para ingenieros y técnicos
Mc Graw-Hill 1985.

 - Neri Vela Rodolfo
Líneas de Transmisión
Mc Graw-Hill 1999.

 - Ortega Beatriz
Flores Santiago J.
Almenar Vicenç
Fundamentos de Telecomunicaciones
Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

 - García Domínguez A.
Cálculo de antenas
Marcombo 1995.
-

Mesografía

<http://www.eveliux.com/fundatel/mguiaonda.html>

<http://www.andrew.com/products/antennas/tmw>

http://members.fortunecity.es/unitec/lineas_definiciones.html

<http://www.rares.com.ar/PDF/1511.pdf>

<http://www.rares.com.ar/PDF/1508.pdf>

<http://www.eveliux.com/fundatel/defs.html>

ANEXO A. MATEMÁTICO

CALCULO DE LA ALTURA REAL, CUANDO SE HA MODIFICADO EL RADIO DE LA TIERRA, PARA UN PUNTO DADO.

Cuando existe un perfil lineal y haciendo uso de la geometría plana, calcularemos para un determinado punto la altura real cuando ha sido modificado el radio terrestre por un valor K, veamos pues la Figura 1.

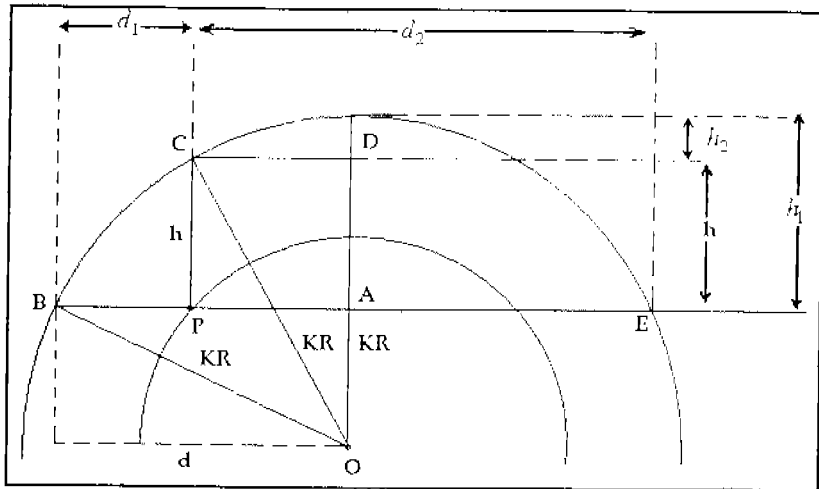


Figura 1. Cálculo de la altura modificada.

Siendo el arco BCE modificado por el valor K y el punto P con su respectivo cambio de altura debido al cambio de valor del radio (KR).

Si analizamos el triángulo ABO y aplicando el teorema de Pitágoras:

$$d^2 + (KR - h_1)^2 = (KR)^2$$

Y desarrollando el binomio al cuadrado

$$d^2 + (KR)^2 - 2KR h_1 + h_1^2 = (KR)^2$$

$$d^2 - 2KR h_1 + h_1^2 = 0$$

Como $2KR h_1 \gg h_1^2$

$$d^2 - 2KR h_1 = 0$$

Despejando a h_1

$$d^2 = 2KR h_1$$

$$h_1 = \frac{d^2}{2KR} \text{-----} [1]$$

Para encontrar a h_2 , seguiremos un procedimiento similar, pero ahora utilizaremos el triángulo CDO.

$$(d - d_1)^2 + (KR - h_2)^2 = (KR)^2$$

$$(d - d_1)^2 + (KR)^2 - 2KR h_2 + h_2^2 = (KR)^2$$

$$(d - d_1)^2 - 2KR h_2 = 0$$

$$(d - d_1)^2 = 2KR h_2$$

$$h_2 = \frac{(d - d_1)^2}{2KR} \text{-----} [2]$$

Pero como $h = h_1 + h_2$,

Y sustituyendo [1] y [2] en la expresión anterior.

$$h = \frac{d^2}{2KR} + \frac{(d - d_1)^2}{2KR}$$

$$h = \frac{d^2 - (d - d_1)^2}{2KR}$$

$$h = \frac{d^2 - (d^2 - 2dd_1 + d_1^2)}{2KR}$$

$$h = \frac{2dd_1 - d_1^2}{2KR}$$

Definiendo a d como $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$, y al sustituirla en la expresión anterior

$$h = \frac{2 \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right) d_1 - d_1^2}{2KR}$$

$$h = \frac{d_1^2 + d_2 d_1 - d_1^2}{2KR}$$

$$h = \frac{d_2 d_1}{2KR} \quad [3]$$

Siendo $R = 6378$ Km.

CÁLCULO DEL PUNTO DE REFLEXIÓN DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA EN UNA SUPERFICIE ESFÉRICA.

El siguiente cálculo se realizará para encontrar el punto de reflexión en una superficie esférica a nivel del mar, guiándonos en la Figura 2.

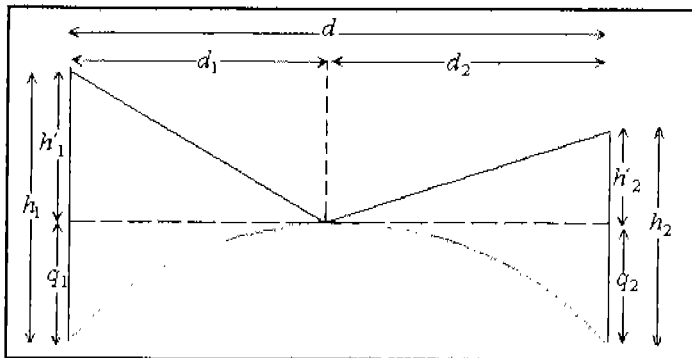


Figura 2. Punto de reflexión de una onda electromagnética en una superficie esférica.

$$h'_1 = h_1 - q_1 \text{-----} [4]$$

$$h'_2 = h_2 - q_2 \text{-----} [5]$$

Y si aproximamos a q_1 y q_2 como las alturas que corresponden a una visibilidad d_1 y d_2 respectivamente en línea de vista al horizonte (como se había visto anteriormente), por lo tanto:

$$d_1 = \sqrt{2KRq_1} \text{-----} [6]$$

$$\text{y } d_2 = \sqrt{2KRq_2} \text{-----} [7]$$

y despejando a q_1 y q_2 tenemos pues:

$$q_1 = \frac{d_1^2}{2KR} \text{-----} [8]$$

$$q_2 = \frac{d_2^2}{2KR} \text{-----} [9]$$

Al sustituir en 4 y 5.

$$h'_1 = h_1 - \frac{d_1^2}{2KR} \text{-----} [10]$$

$$h'_2 = h_2 - \frac{d_2^2}{2KR} \text{-----} [11]$$

Utilizando un proceso en el cual por medio de tablas se puede determinar a d_1 y d_2 .

En la figura 3 se considera a M como el punto medio en la trayectoria $A'B'$ y la pequeña curva MP es igual a d' , por consiguiente:

$$d_1 = \frac{d}{2} + d' \text{-----} [12]$$

$$d_2 = \frac{d}{2} - d' \text{-----} [13]$$

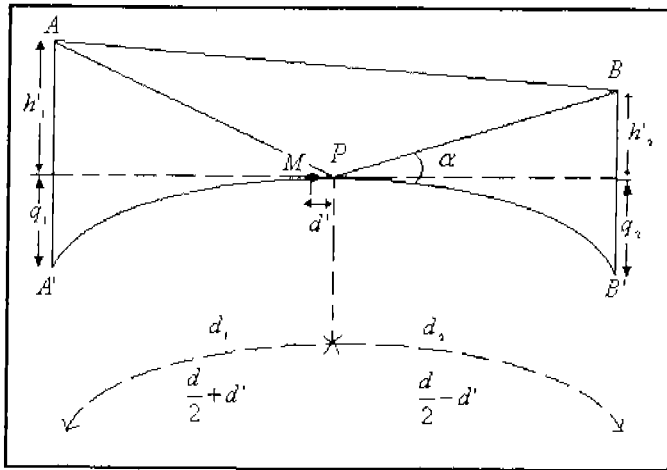


Figura 3. Reflexión de una onda electromagnética en una superficie esférica.

Si consideramos que

$$b = 2 \frac{d'}{d} \text{-----} [14]$$

Y expresando las ecuaciones [12] y [13].

$$d_1 = \frac{d}{2} (1+b) \text{-----} [15]$$

$$d_2 = \frac{d}{2} (1-b) \text{-----} [16]$$

Por definición $h_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} (1+c) \text{-----} [17]$

$$h_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} (1-c) \text{-----} [18]$$

Y c se define como:

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \text{-----} [19]$$

Si suponemos que $h_1 > h_2$ y $d_1 > d_2$; entonces $c > 0$, pero

$$\alpha = \frac{h_1'}{d_1} = \frac{h_2'}{d_2} \text{ ----- [20]}$$

Si sustituimos h_1' y h_2' por los valores determinados en [10] y [11] se obtiene:

$$\frac{h_1}{d_1} - \frac{d_1}{2KR} = \frac{h_2}{d_2} - \frac{d_2}{2KR} \text{ ----- [21]}$$

Al sustituir d_1 y d_2 por las ecuaciones [15] y [16] y h_1 y h_2 por las expresiones [17] y [18] y despejando a c :

$$c = b + b \frac{d^2}{4KR(h_1 + h_2)} (1 - b^2) \text{ ----- [22]}$$

Y si se supone que

$$m = \frac{d^2}{4KR(h_1 + h_2)} \text{ ----- [23]}$$

y sustituyendo m en [22] se obtiene finalmente

$$c = b + mb(1 - b^2) \text{ ----- [24]}$$

En la siguiente gráfica, donde el eje horizontal contiene los valores de m y los de c el eje vertical, puede obtenerse el valor de b y haciendo uso de las ecuaciones obtener las distancias donde se encuentra el punto de reflexión.

DETERMINACIÓN DEL RADIO DE UNA DETERMINADA ZONA DE FRESNEL.

Se determinará el radio de las zonas de Fresnel con el siguiente procedimiento.

Si se circunscribe una elipse en cualquier zona de Fresnel cumpliendo con las siguientes igualdades:

En la primera zona de Fresnel y teniendo como referencia la Figura 4.

$$TAR = TBR = TCR = TR + \lambda/2$$

Similarmemente

$$TA'R = TB'R = TC'R = TR + \lambda/2$$

Recordando que estas trayectorias están dentro de la primera zona de Fresnel y por lo tanto estarán defasadas media longitud de onda con respecto a la trayectoria directa.

Para un análisis de la segunda zona, la igualdad sería con $TR + \lambda$ y así sucesivamente.

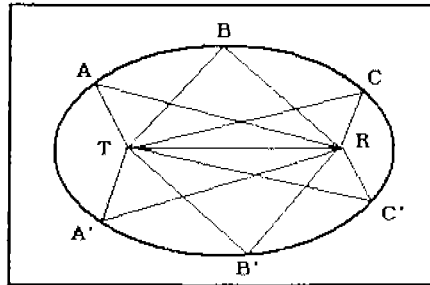


Figura 4. Diferentes trayectorias de las ondas en la primera zona de Fresnel.

En la Figura 5 se representa con una elipse toda la radiación en una determinada zona de Fresnel (n). Siendo el radio H de la zona a una distancia d_1 del transmisor y d_2 del receptor, donde $d_1 + d_2 = TR$.

$$t_1 + t_2 = d + \lambda/2 ; \quad t_1 + t_2 = d_1 + d_2 + \lambda/2 \text{ ----- [25]}$$

Al aplicar al triángulo POT el teorema de Pitágoras se tiene

$$t_1^2 = d_1^2 + H^2$$

$$t_1 = \sqrt{d_1^2 + H^2} \text{ ----- [26]}$$

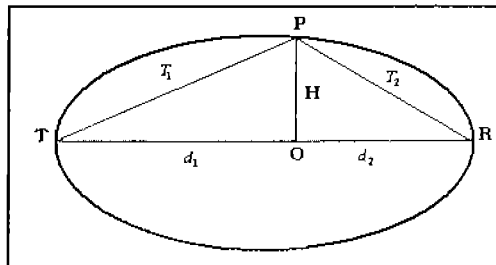


Figura 5. Elipse que representa la energía contenida en una determinada zona de Fresnel.

$$t_2^2 = d_2^2 + H^2$$

$$t_2 = \sqrt{d_2^2 + H^2} \quad [27]$$

Realizando una descomposición factorial a [26] y [27].

$$t_1 = d_1 \left(1 + \frac{H}{d_1}\right)^{1/2} \quad [28]$$

$$t_2 = d_2 \left(1 + \frac{H}{d_2}\right)^{1/2} \quad [29]$$

Y por el binomio de Newton

$$(a + b)^n = a^n + \frac{na^{n-1}b}{1!} + \frac{n(n-1)a^{n-2}b^2}{2!} + \dots + b^n$$

Considerando que los exponentes negativos son de poca importancia, las ecuaciones [28] y [29] se pueden expresar de la siguiente manera:

$$d_1 \left(1 + \frac{H^2}{d_1^2}\right)^{1/2} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H^2}{d_1^2}\right)\right] d_1 = t_1 \quad [30]$$

$$d_2 \left(1 + \frac{H^2}{d_2^2}\right)^{1/2} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H^2}{d_2^2}\right)\right] d_2 = t_2 \quad [31]$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en [25].

$$\left(1 + \frac{1}{2} \frac{H^2}{d_1^2}\right) d_1 + \left(1 + \frac{1}{2} \frac{H^2}{d_2^2}\right) d_2 - d_1 - d_2 = n \frac{\lambda}{2} \quad [32]$$

Simplificando.

$$\frac{H^2}{2d_1} + \frac{H^2}{2d_2} = n \frac{\lambda}{2}$$

$$H^2 \left(\frac{1}{2d_1} + \frac{1}{2d_2} \right) = n \frac{\lambda}{2}$$

$$H^2 \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) = n \lambda$$

$$H = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad [33]$$

Siendo $\lambda = \frac{V_c}{f}$

$$H = \sqrt{\frac{n \left(\frac{V_c}{f} \right) d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{\frac{n V_c d_1 d_2}{f (d_1 + d_2)}}$$

Y como $d = d_1 + d_2$

$$H_f = \sqrt{\frac{n V_c d_1 d_2}{f d}} \quad [34]$$

Y teniendo las siguientes consideraciones:

$$V_c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Para d_1 y d_2 debe hacerse la conversión de kilómetros a metros; f en MHz y n es la zona estudiada.

ANEXO B. ACRONIMOS

A

ACK Acknowledgement -Mensaje de reconocimiento para señalar que la información ha sido recibida correctamente.

Add-Drop -Operación que consiste en extraer e insertar canales tributarios sobre una señal que transita en la línea.

ADM Add-Drop Multiplexer -Multiplexor que mira en al menos dos direcciones y que permite extraer e insertar algunos canales desde cada información principal.

ADPCM Adaptive Differential PCM -Codificador de señales digitales que utiliza una predicción adaptativa de la muestra y codifica la diferencia entre la muestra y la predicción.

AGC Automatic Gain Control -Control automático de la ganancia de un amplificador para mantener la señal de recepción constante.

AIS Alarm Indication Signal -Señal consistente en una secuencia 11...11 que reemplaza a la señal principal cuando está afectada de una alarma grave.

AMI Alternate Mark Inversion -Código utilizado para señales digitales en enlaces por cables de cobre. Es la base del código HDB3.

ANSI American National Standard Institute -Instituto de normalización de USA de similares características que el DIN de Alemania.

APC Automatic Phase Control -Circuito que permite el control de frecuencia en un oscilador controlado por tensión VCO.

ARQ Automatic Repeat Request -Sistema de solicitud de retransmisión automático de información aplicado en redes de paquetes cuando los mismos se reciben con errores.

AsGa -Arseniuro de Galio. Material semiconductor utilizado para circuitos de microrondas de alta frecuencia y para sistemas digitales de muy alta velocidad.

ATPC Automatic Transmit Power Control -Control automático de la potencia de transmisión usados en los equipos de radioenlace para aumentar la potencia con mala propagación.

AWG American Wire Gauge -Grupo de normalizaciones de USA para conductores de cobre. Por ejemplo, 22/24AWG se utiliza para la interfaz RS-232.

B

Back-off -Diferencia entre la potencia generada por un amplificador y la potencia de saturación. Un backoff elevado permite disminuir la intermodulación.

Backplane -Consiste en el bus de conexión posterior de un equipo: bus standard (se accede mediante interrupciones); bus múltiple (un bus para cada tipo de señal); bus segmentado (Se trata de segmentos unidos mediante conectores); bus multiplexado (varios bus lógicos sobre un solo bus físico).

Balun Balanced/Unbalanced -Circuito que permite la conversión desde línea de cobre balanceada a desbalanceada (coaxial).

BCH Bose-Chaudhuri-Hocquenghen -Código corrector de errores del tipo FEC a bloques que se aplica en los servicios satelitales de Intelsat.

BER Bit Error Rate -Relación entre el número de errores y el número de bits transmitidos en un cierto tiempo. Ejemplo: 10^{-6} significa un error en un millón de bits.

BIP Block Interleaver Parity -Método de cálculo de bits de paridad utilizados en SDH para verificación de la performance del enlace mediante la norma ITU-T G.826.

Bit Binary Digit- Dígito binario significa un elemento que posee dos estados (0 y 1) posibles y con igual probabilidad de ocurrencia.

BITS Building Integrated Time Suplí -Es la fuente de reloj en un edificio de telecomunicaciones para las normas Bell. Similar a SSU para el ITU-T.

BNC Bayonet Navy Connector -Es el más popular tipo de conector para cables coaxiales. Usualmente aplicado para señales digitales y analógicas.

Bolómetro -Elemento que convierte la potencia (de radiofrecuencia u óptica) en un valor de tensión medible mediante un voltímetro con escala en dBm.

bps; b/s Bit per second -Unidad de medida de la velocidad de datos digitales. Usualmente se utilizan múltiplos como kb/s, Mb/s y Gb/s.

BPSK Binary PSK -Método de modulación digital utilizado en módem de datos de baja velocidad y en enlaces de microondas.

Branching -Componentes del circuito de microondas en un radioenlace. Incluye los filtros, circuladores, conectores y probablemente la guía de onda y antena (feeder).

Bridge -Componente de una red LAN que permite unir dos redes o segmentar una LAN demasiado grande. Actúa como filtro de direcciones IP.

Broadcast -Servicio de redes LAN e IP que permite enviar señales a todos los usuarios conectados sin necesidad de una conexión individual para cada uno.

Buffer -Memoria intermedia que permite escribir y leer los datos con un reloj distinto y en forma independiente.

BW Bandwidth -Característica de un sistema de comunicaciones que indica la cantidad de información que transporta.

C

C/N.- Carrier-to-Noise -Relación entre el nivel de potencia de la señal portadora y el ruido. Se mide en dB y entrega una idea de la calidad de la señal.

Cancelador eco -Circuito electrónico que permite mejorar la forma de onda de la señal recibida cuando existe eco (reflexión) en el enlace de transmisión.

CAS Channel Asociated Signaling -Método de señalización utilizado en los circuitos digitales donde la señalización se transmite junto a la señal vocal. Es reemplazado por SS7.

CCITT CCI for Telegraphy and Telephony -Antiguo Comité del ITU que realizaba las normas sobre telefonía y telegrafía. Actualmente es el ITU-T.

CCS Common Channel Signaling.- Sistema de señalización que utiliza un canal de datos común a todas las conexiones telefónicas. También conocido como SS7.

CDMA Code Division Multiple Access -Forma de acceso a un medio común de enlace donde cada usuario utiliza un código ortogonal con los restantes.

CEPT Conference European Post Telecom -Organismo europeo de normalizaciones predecesor del organismo que actualmente se conoce como ETSI.

CMI Codec Mark Inversion -Método de codificación de datos utilizado sobre las señales SDH a 155 Mb/s sobre enlaces coaxiales.

CMIP Common Management Information Protocol -Protocolo de comunicación usado en capa 7 para brindar conexión entre elementos de red NE en la red de management TMN.

CMOS Complementary Metal-Oxid Semiconductor -Tecnología de producción de circuitos integrados utilizada para reducir el consumo de energía.

CNR Carrier-to-Noise Ratio -Relación entre el nivel de potencia de la señal portadora y el ruido. Se mide en dB y entrega una idea de la calidad de la señal. Idem a C/N.

Codec Encoder/Decoder -Denominación genérica utilizada para cualquier circuito que realiza una codificación y decodificación de datos.

Control de error -Proceso por el cual es posible detectar que la información ha sido recibida con errores. Los errores pueden dar lugar a la retransmisión o al descarte de datos.

Control de flujo -Proceso por el cual el receptor puede controlar la emisión del transmisor de datos.

CoS Class of Service -Denominación genérica que permite clasificar los tipos de servicios que se entregan en una red de datos.

CRC Cyclic Redundancy Check -Método de cálculo de bits de paridad que se utiliza para la detección de errores en las redes de datos por paquetes.

D

DACS Digital Access Cross- Connect System -Identifica a los equipos que permiten realizar interconexión de tributarios PDH (típico E1) y SDH (típico STM-N).

DAMA Demand Assigned Multiple Access -Formato de acceso al utilizado en sistemas de gestión satelital donde se solicita permiso para transmitir y se asigna un espacio de tiempo.

dB/dBm DeciBell -Unidades de medida de potencia. El dB se refiere a una relación entre dos señales y el dBm es el valor absoluto referido a la potencia de 1 mw.

DCC Data Communications channel. -Canal de comunicación de datos insertado dentro de la trama STM-1 en la red SDH para transporta información de gestión de TMN.

DCE Data Communication Equipment -Equipo de comunicación de datos. Identifica por ejemplo al módem de datos frente a la PC.

DCME Digital Channel Multipler Equipment -Equipo que permite comprimir la información contenida en 4 tributarios de 2 Mb/s sobre uno solo. Utiliza ADPCM e interpolación vocal.

DDF Digital Distribution Frame -Estructura mecánica sobre la cual se realizan las conexiones de circuitos digitales; típicamente señales de 2 Mb/s sobre cables coaxiales 75 ohm.

DES Data Encryption Standard -Es un standard de criptografía de datos que se fundamenta en componer los datos con una secuencia lo suficientemente larga como para no ser descifrada.

Diafonía -Efecto por el cual una línea induce señal sobre una vecina y produce interferencia. Ver también FEXT y NEXT.

Disponibilidad -Periodo de tiempo donde el canal se encuentra en condiciones de transporta señal con la calidad deseada. Se mide en porcentaje (por ejemplo 99,99%).

DMTF Desktop Management Task Force -Grupo de fabricantes que trabajan sobre una estrategia de cooperación para la gestión de sistemas de escritorio trabajando en red.

DRO Dielectric Resonator Oscillator -Tipo de oscilador donde se utiliza una cavidad resonante rellena con material dieléctrico (para incrementar la estabilidad con el paso de los años).

DSE Data Switch Equipment -Este componente complementa los elementos de un canal de datos simplificado: el terminal DTE y el equipo de comunicaciones DCE.

Dúplex -Forma de comunicación que involucra señales en ambas direcciones. Similar al concepto de bidireccional.

DXI Data Exchange Interface -Interfaz para la interconexión de datos hacia una red ATM; el protocolo es similar a Frame Relay.

E

E1 European 1 -Denominación comercial de un circuito de 2048 kb/s y por multiplexación da lugar a la velocidad E3 de 34.386 kb/s (34 Mb/s).

ECC Embedded Comm Channel -Identificación genérica utilizada para un canal de datos que es transmitido dentro (embebido) de una trama de mayor velocidad.

ECL Emitter Acopled Logic -Tecnología de fabricación de circuitos integrados IC para velocidades superiores a 100 MHz, pero de alto consumo.

EFS Error Free Second -Parámetro de calidad que permite identificar los segundos que no han tenido errores. Es el complemento de los segundos errados ES.

EIA Electronic Industries Association -Organismo que reúne a empresas industriales de USA y que determinan normas de facto. Para las telecomunicaciones es EIA-TIA.

EIRP Equivalent Isotropically Radiated Power -Identifica a la potencia (equivalente a una antena isotrópica) que irradia una antena en la dirección de máxima directividad.

EMC Electromagnetic Compatibility -Referido al cumplimiento de normas que permite aislar a un equipo de interferencias EMI desde y hacia el exterior.

EMI Electromagnetic Interference -Referido a las interferencias electromagnéticas que afectan a los equipos electrónicos y a los seres humanos.

ETS European Telecommunication Standard -Son las normas emitidas por el instituto europeo ETSI.

ETSI European Telecom Standard Institute -Instituto para el ámbito de Europa que normaliza las telecomunicaciones. Similar al ITU-T y descendiente del CEPT.

F

F/B Front to back ratio -Relación entre la potencia emitida entre el frente (dirección de mayor directividad) y la espalda (más allá de 60°) en una antena.

Fading -Se trata del desvanecimiento de la señal radioeléctrica producida por lluvia o reflexiones en el terreno o en una capa atmosférica.

FAS Frame Alignment Signal -Secuencia conocida de bit que se insertan al inicio de una trama para mantener el alineamiento entre transmisor y receptor de datos. Usado en STM-1.

FDD Frequency Division Duplexion -Forma de transmisión dúplex (en ambos sentidos) que utiliza distintas frecuencias. La separación entre frecuencias se denomina Shift.

FDN Frequency Division Multiplexer -Tipo de multiplexores utilizados en la era de las comunicaciones analógicas donde cada usuario tenía asignada una frecuencia distinta.

FDMA Frequency Division Multiple Access -Tipo de acceso a un medio común (por ejemplo un satélite) donde cada transmisor utiliza una frecuencia distinta.

FEBE Far End Block Error -Alarma remota utilizada en los sistemas SDH para informar al terminal remota la detección de un error de datos en recepción.

FEC Forward Error Correction -Denominación genérica para distintos tipos de formas de corrección de errores donde se envían bits adicionales para reconocer el error.

FEC-RS FEC-Reed Solomon -Formato de FEC a bloques de amplia aplicación. Por ejemplo en CD reutilizan RS(28,24) donde un bloque de 24 caracteres es codificado en 28.

FERF Far End Received Failure -Alarma remota hacia atrás que notifica de una alarma grave en recepción del sistema de transporte SDH. Idem a RDI.

FEXT Far-End CrossTalk -Diafonía producida sobre el terminal remoto distante entre pares que transmiten en la misma dirección.

FFT Fast Fourier Transform -La transformada rápida de Fourier es un algoritmo de cálculo que permite trabajar en el dominio de la frecuencia para reducir redundancias audio.

Flag -Bandera o alineamiento de paquete. Secuencia fija (01111110) que inicia los paquetes en la mayoría de las redes de datos.

FM Frequency Modulation -Técnica de modulación donde la frecuencia de la portadora cambia de acuerdo con la variación de la señal modulante.

Free Running -Forma de oscilación libre del generador de temporización cuando no está subordinado a un reloj patrón de orden superior.

FSK Frequency Shift Keying -Técnica de modulación de frecuencia FM donde la señal modulante es una señal digital y por ello la salida son saltos de frecuencia.

FSS Fixed Satellite Service -Se refiere a aquellos servicios entregados por los sistemas satelitales donde los usuarios se encuentran en puntos fijos (no móviles).

FTAM File Transfer Access and Management -Protocolo definido en el ámbito del ITU-T para la transferencia segura de archivos. Similar a FTP de Internet.

FTP File Transfer Protocol -Protocolo definido en el ámbito de Internet para permitir la transferencia de archivos entre terminales.

FWHM Full Width Half Maximum -Característica de una antena que identifica la apertura de ángulo del lóbulo de radiación principal con 3 dB de potencia inferior al máximo.

G

Gatekeeper -Identifica al centro de control de H.323 (VoIP, FoIP, etc). Se ocupa del procesamiento, autenticación, tarifa, ancho de banda, etc.

GFSK Gaussian Frequency Shift Keying -Modulación de frecuencia donde la señal digital es filtrada previamente mediante un filtro gaussiano.

GMT Greenwich Mean Time -La hora del meridiano de Greenwich identifica meridiano de referencia para la hora de cualquier punto mundial.

GPS Global Position Systems -Sistema de 24 satélites artificiales que se encuentran en órbita de 20.000 km y que distribuyen temporización y posición a todo el planeta.

H

HDB3 High Density Bipolar -Formato de codificación de señales digitales (usado en E1 a 2 Mb/s mediante conductores metálicos).

HDLC High Level Data Link Control -Protocolo de referencia para la capa 2 del modelo OSI que da lugar a los protocolos LAP y LLC.

HDSL High-bit-rate Digital Subscriber Loop -Un tipo de acceso al usuario a alta velocidad utilizando la planta externa de cobre convencional de las operadoras telefónicas.

HFC Hybrid Fiber Copper -Red híbrida compuesta de troncales de fibra óptica y distribución mediante conductores de cobre. Normalmente usada en CATV.

Hitless -Proceso por el cual en un sistema de radioenlace es posible conmutar entre dos señales de recepción sobre el mismo bit (sin producir slip).

HMIC Hybrid Microwave Integrated Circuit -Tecnología de producción de circuitos para sistemas de microondas donde los componentes activos son añadidos al circuito de componentes pasivos.

Hold Over -Forma de oscilación controlada por una tensión memorizada en un generador de temporización cuando se pierden las fuentes programadas.

HPA High Power Amplifier -Denominación genérica que identifica a los amplificadores de alta potencia usados en los sistemas satelitales. Normalmente utilizan tubos TWT o klistron.

HPBW Half Power Beam Width -Forma de definir el ancho de banda de un canal tomando el cuenta la caída de potencia a la mitad, equivalente a -3 dB.

IIRP Hypothetical Reference Path -Circuito o trayecto hipotético de referencia usualmente definidos por el ITU-T para determinar características de calidad de servicio.

Huffman -Codificador que permite reducir la cantidad bits por cada símbolo asignando menor cantidad de bits a los símbolos de mayor probabilidad de ocurrencia.

I

ICMP Internet Control Message Protocol -Protocolo asociado al IP en el ámbito de Internet y que sirve para efectuar reportes de error o detección de actividad (ping).

IDR Intermediate Data Rate -Servicio de Intelsat para enlaces de telefonía internacional. Normalmente se trata de circuitos a velocidad de 2 Mb/s que llevan 4 tributarios E1 comprimidos.

IEC International Electrotechnical Commission -Comisión internacional que se ocupa de normas de calidad. Entre otras se tienen las normas de control de calidad de fibras ópticas.

IEEE Institute Electrical and Electronic Engineers -Instituto internacional que estudia aspectos de las comunicaciones. Dispone de las normas IEEE 802.x referidas a redes de datos.

IF Intermediate Frequency -En sistema de radioenlace se suele utilizar una frecuencia intermedia entre la señal digital (banda base) y las microondas (radiofrecuencia).

Interleaver -Circuito que permite distribuir los datos en el tiempo (creando una diversidad temporal) y reducir el efecto de las ráfagas (burst) de errores.

Intermodulation -Distorsión introducida en los amplificadores debido a las alinealidades cuando trabajan cerca de la saturación.

Internetworking -Denominación del proceso que permite interconectar redes de distinto tipo mediante equipos que trabajan con diversidad de protocolos (router).

IP Internet Protocol -Protocolo de capa 3 definido en el ámbito de la Internet y que se ocupa de las direcciones (4 bytes) de usuario.

IPX/SPX Internet Packet Exchange/Sequenced PX -Protocolos correspondientes a las capas 3 y 4 en las redes Novell. Son similares a los IP y TCP de Internet.

IRM Image Rejection Mixer -Tipo de mezclador (conversor) usado en la etapa de radiofrecuencia en los equipos de radioenlaces.

ISDN Integrated Service Digital Network -Servicio de acceso al usuario a velocidad de 144 kb/s (2B+D) que aprovecha la planta externa convencional y la señalización SS7.

ISI Intersymbol Interference -Interferencia que produce un pulso (bit) sobre otro debido a las distorsiones de forma de onda.

ISO International Standard Organization -Organización internacional que trabaja en conjunto con ITU-T para la definición de normas en el ámbito de las comunicaciones y otras disciplinas.

ITU-T International Telecommunication Union -Organismo dependiente de la UN y que se ocupa de las normalizaciones en el ámbito de las telecomunicaciones. Sede en Ginebra, Suiza.

J

Jitter -Fluctuación de fase de una señal digital. El jitter corresponde a una fluctuación de alta velocidad (superior a 10 Hz). Ver también Wander.

JPEG Joint Photographic Expert Group -Grupo de normalización dentro de la ISO que generó la forma de codificación de imágenes con extensión (.jpg).

K

KVA Kilo Volt Amper -Unidad de medida para sistemas de alimentación de energía.

L

LMDS Local Multipoint Distribution Service -Sistemas de alta frecuencia (más de 28 GHz) para accesos a usuarios del tipo punto-amultipunto. Su característica es el elevado ancho de banda.

LNA Low Noise Amplifier -Tipo de amplificador utilizado en receptores satelitales que tienen una muy baja figura de ruido NF y mantienen por ello la relación C/N.

LO Local Oscillator -Oscilador local en un equipo de radioenlace. Denominación útil tanto para la etapa de frecuencia intermedia como de radiofrecuencia.

LOF Loss Of Frame -Alarma local emitida el equipo de recepción detecta en forma crrona un número determinado de palabras de alineamiento de trama FAS.

Log Login/Logon -Procedimiento por el cual se inicia una sesión para el acceso a un sistema. El procedimiento de cierre se denomina Logout.

LOP Loss Of Pointer -Alarma local emitida en un equipo SDH cuando el puntero se lee con error un determinado número de veces consecutivas.

LOS Loss Of Signal -Alarma local emitida cuando se detecta la falta de señal de entrada a nivel eléctrico u óptico.

M

MIB Management Information Base -Base de información de datos definido en los protocolos de gestión de redes (por ejemplo en SNMP y CMIP).

MIPS Million Instructions Per Second -Unidad de medida que permite indicar la cantidad de instrucciones que puede manejar un procesador por segundo.

MLA Microwave Link Analyzer -Instrumento de medida que permite visualizar la distorsión de amplitud y fase en un enlace de microondas.

MMIC Monolithic Microwave Integrated Circuit -Tipo de circuito de microondas donde el sustrato es semiconductor y permite integrar tanto los componentes activos como pasivos.

Modem Modulator-Demodulator -Identifica al conjunto del modulador y demodulador. Usado tanto para redes de datos como para enlaces de microondas.

MTBF Mean Time Between Failure -Unidad de medida de falla de equipos. Identifica en período medio entre fallas expresado en horas.

MTP Message Transfer Part -Se trata de las capas 1-2-3 del modelo OSI para la familia de protocolos de señalización SS7.

MTTR Mean Time To Repair -El tiempo medio de reparación expresado en horas está determinado por la organización del mantenimiento.

Multicast -Servicio en redes LAN e IP que permite enviar una señal a un grupo cerrado de usuarios sin necesidad de conectar uno a uno.

MUX Multiplex -Denominación de un equipo o circuito que realiza la multiplexación de variasentradas en una sola salida.

N

NEXT Near-End CrossTalk -Diafonía producida entre conductores que transmiten señales en distinto sentido y que afecta al receptor localizado en el terminal cercano.

NF Noise Figure -Característica de los receptores que describe en dB la reducción de la relación C/N debido al ruido introducido por el amplificador de entrada.

NRZ Non-Return to Zero -Código de señales digitales que corresponde a la señal binaria tradicional. Se refiere a que no retorna a cero la señal como en RZ.

O

Offset -Denominación genérica utilizada cuando se quiere señalar un corrimiento entre un parámetro y otro. Ejemplo: offset de fragmentación en IP.

Overflow -Estado de una memoria elástica (buffer) cuando se llena o se vacía (underflow) debido a la distinta velocidad de entrada y salida de datos.

P

Pattern -Secuencia patrón generada por instrumentos de medida para la evaluación de la calidad. Es sinónimo de PRBS.

PCM Pulse Code Modulation -Proceso de codificación digital de las señales analógicas que consiste en el muestreo y la codificación de muestras.

PCMCIA Personal Computer Memory Card International Association -Equivalente a NIC. Corresponde a una tarjeta que se coloca generalmente en los notebook para interconectarlo a la red.

PDH Plesiochronous Digital Hierarchy -Jerarquía digital que iniciando en EI (2 Mb/s) multiplexa a velocidades de 8 Mb/s, 34 Mb/s y 140 Mb/s. Es reemplazada por SDH.

PDU Protocol Data Unit -PDU equivale a la denominación paquete de datos (o mensaje, celda, trama, datagrama, etc, dependiendo de la red).

PJE Pointer Justification Event -Evento que ocurre por cambio del puntero en una red sincrónica SDH. Identifica un problema de sincronismo o wander en la red.

PLL Phase Locked Loop -Loop que permite sintonizar la fase de un oscilador. Se obtienen osciladores de frecuencia variable.

PM Phase Modulation -Modulación donde la portadora modifica la fase en función de la señal modulante. Si la modulante es una señal digital se tiene PSK.

POH Path OverHead -Grupo de 9 Bytes colocados al inicio del contenedor virtual VC-4 en la trama STM-1 de SDH. Se usa para informaciones de servicio.

Pointer -Puntero que señala la posición del contenedor VC-4 dentro de la trama STM-1. Si la red SDH está sincronizada el puntero está fijo.

Polarización -Referido a las condiciones en que se encuentra el campo eléctrico de una señal radioeléctrico o de la luz en la fibra óptica.

POP Point of Presence -Se refiere al punto donde un operador de Internet ISP tiene disponible el acceso de los usuarios.

ppm Part per Millon -Unidad de medida que sirve identificar el corrimiento de frecuencia de un reloj respecto del valor especificado.

PRBS Pseudo-Random Binary Sequency -Secuencia binaria generada por un circuito lógico (por ello conocida) pero que simula una señal desconocida.

PRC Primary Reference Clock -Reloj de referencia principal de una red de telecomunicaciones para sincronismo de centrales y redes síncronas SDH.

PSK Phase Shift Keyed -Método de modulación de fase donde la señal modulante es una señal digital. Normalmente se presenta como 2PSK o 4PSK (2 o 4 niveles de fase).

PSTN Public Switched Telephone Network -Denominación genérica para las redes de telefonía pública convencionales.

PSU Power Supply Unit -Se refiere a las unidades en los equipos que entregan la alimentación al resto de las unidades. Pueden ser convertidores DC/DC o AC/DC.

Q

QAM Quadrature Amplitude Modulation -Método de modulación digital que combina la modulación de fase PSK con la de amplitud. Entrega una constelación de fase distribuida como un matriz.

QoS Quality of Service -Concepto que permite asegurar determinadas prestaciones al usuario, como ser una tasa de datos mínima de transporte en la red.

QPSK Quaternary Phase Shift Keyed -Método de modulación digital de fase donde se tienen 4 niveles de fase ubicados a 90° (en cuadratura).

R

Radome -Cobertura de plástico de una antena que permite protegerla contra viento y formación de hielo.

RDI Remote Defect Indicacionn FERF -Alarma remota que identifica una falla grave en SDH. Similar a FERF.

REI Remote Error Indicator FEBE -Alarma remota que identifica un error remoto en SDH. Similar a FEBE.

RF Radio Frequency -Denominación normalmente genérica que identifica a las señales de radio tanto de baja como de alta frecuencia (microondas).

RFC Request For Comments -Publicaciones en el ámbito de Internet que contienen informaciones que son sometidas a evaluación. No constituyen standard.

RFI Remote Failure Indicator -Alarma remota usada en SDH que señala una falla grave en el receptor. Es conocida también como FERF.

RIP Routing Information Protocol -Este protocolo asociado al IP en Internet es el primero que permitió la comunicación entre router para actualizar las tablas de ruta en forma periódica.

RL Return Loss -Característica medida sobre generalmente sobre las guías de onda en los radioenlaces para detectar fallas de instalación.

Router -Componente de una red IP que permite la interconexión de redes mediante un direccionamiento dinámico. Utiliza los protocolos de routing.

RTP Real-Time Transport Protocol -Protocolo utilizado en las redes IP para transportar servicios de tiempo real como ser la telefonía o vidcoteléfono.

RTS Request To Send -Señal de comando en la interfaz RS-232 que permite solicitar al equipo de comunicaciones de datos DCE la autorización para emitir datos. Respuesta CTS.

RZ Return to Zero -Código de datos transmite el estado activo solo el 50% del tiempo con el propósito de reducir la interferencia intersímbolo.

S

S/N Signal to Noise Ratio -La relación señal a ruido determina la diferencia entre el nivel de potencia de ambas. Se mide en dB.

Scrambler -Circuito que combina la secuencia de datos a transmitir con una secuencia conocida del tipo PRBS para evitar secuencias periódicas.

SDH Synchronous Digital Hierarchy -Jerarquía de multiplexación que parte desde STM-1 a la velocidad de 155.520 kb/s y se despliega en STM-4 (622 Mb/s) y STM-16 (2488 Mb/s).

SETS Synchronous Equipment Timinig Source -Se trata del reloj incorporado en un equipo que pertenece a la red SDH y que debe sincronizarse con un reloj maestro.

Shift -Separación entre la frecuencia de transmisión y recepción en los radioenlaces que utilizan FDD.

SMTP Simple Mail Transfer Protocol -Protocolo de transferencia de correo electrónico dentro del ámbito de Internet. Permite el servicio e-mail.

SNA Scalar Network Analysis -Se trata de instrumentos como el analizador de espectros que entregan información de una frecuencia independientemente de la fase.

SNMP Simple Network Management Protocol -Protocolo desarrollado en el ámbito de Internet para la gestión de componentes de red (routers, switch, etc).

SOH Section OverHead -Encabezado de la trama STM-1 en la red sincrónica SDH y que sirve para transportar informaciones de servicio (alarmas, paridad, gestión, etc.).

SONET Synchronous Optical Network -Denominación usada en USA para la red sincrónica SDH. El nivel de Sonet OC-3 es equivalente a STM-1 del ITU-T.

SSU Synchronization Supply Utility -Unidad que genera sincronismo dentro de un edificio de telecomunicaciones. Está sincronizado con el reloj maestro RPC.

STM Synchronous Transport Modul -Módulo de transporte sincrónico de 155 Mb/s que determina el primer nivel de la jerarquía digital sincrónica SDH.

Stuffing -Proceso por el cual una señal tributaria puede ser ingresado en un multiplexor que tiene distinto reloj (señal plesiócrona).

SVC Switched Virtual Circuit -Servicio ofrecido por una red de datos que permite conectar y desconectar la sesión a solicitud del cliente. Se contrapone al PVC.

Switch -Matriz de conmutación genérica que permite la conexión entre una puerta de entrada y otra de salida.

T

TCM Trellis Code Modulation -Tipo de modulación de datos que aplica una combinación de modulación QAM y corrección de errores del tipo FEC convolucional (Viterbi).

TCP/IP Transmission Control Protocol/Internet Protocol -Protocolos del ámbito de Internet que forman el núcleo del funcionamiento. Corresponden a las capas 4 y 3 respectivamente del modelo OSI.

TDD Time Division Duplexion -Procedimiento de transmisión dúplex que utiliza el mismo canal pero distinto tiempo para la transmisión y recepción de la señal.

TDM Time Division Multiplexer -Procedimiento de multiplexación de varios usuarios que utiliza la división del tiempo en intervalos reservados a cada usuario.

TDMA Time Division Multiple Access -Procedimiento de acceso sobre un mismo medio (por ejemplo satelital) mediante el uso de TDM.

Telnet -Servicio que brinda Internet y que permite un acceso remoto a un terminal. Se trata de un terminal virtual definido en RFC-854.

TIE Time Interval Error -Es el corrimiento de tiempo de un reloj respecto a una fuente de estabilidad superior en un intervalo de tiempo de medida.

TMN Telecommunications Management Network -Denominación de la arquitectura y protocolos de la red de gestión definida en el ámbito de ITU-T para los sistemas de telecomunicaciones. De poco éxito actual.

TNC Transit Node Clock -Reloj utilizado por las grandes redes de transporte nacional para distribución regional de temporización.

Transponder -El ancho de banda de un sistema satelital está dividido en transponder. El transponder se divide en forma FDMA para el acceso de varios usuarios.

Tributario -Denominación genérica que describe a la señal de usuario que se ingresa a un equipo de transmisión.

Trunking -Sistema de telefonía móvil que permite la comunicación entre un grupo cerrado de usuarios.

TST Time-Space-Time -Estructura de la red de switch de las centrales de conmutación telefónicas con 3 etapas basadas en conmutación temporal y espacial.

U

UI Unitary Interval -Unidad de medida para el jitter. Un intervalo unitario UI equivale a un corrimiento de fase igual al ancho de un bit.

Upgrade -Proceso de actualización del software o hardware de un equipamiento.

UPS Uninterruptable Power Suplí -Fuente de alimentación de energía que permite mantener una reserva de energía para casos de corte de la red pública.

V

VAN Value Added Network -El concepto de red de valor agregado se refiere a aquellas redes que ofrecen servicios además de transporte de datos.

VCO Voltage Control Oscilator -Tipo de oscilador a cristal de cuarzo que puede modificar la frecuencia de resonancia mediante una tensión que actúa sobre un diodo varactor.

VDC Volt Direct Current -Identificación para una corriente continua.

VF Voice Frequency -Referido a la banda de frecuencias ocupada por la señal vocal; normalmente se refiere al canal telefónico desde 300 a 3400 Hz.

VLC Variable Long Code -El código de longitud variable (Huffman) permite una compresión de datos al asignar al carácter más probable una menor cantidad de bit de código.

VoIP Voice over Internet Protocol -Servicio de transmisión de señal vocal mediante el uso de paquetes en una red IP. Utiliza los protocolos RTP y RSVP.

VSAT Very Small Apertura Terminals -Servicio de transmisión de datos de baja velocidad mediante enlaces satelitales. Se caracteriza por antenas de usuario pequeñas de 1,2 mts.

VSB Vestigial Side Band -Tipo de modulación donde la banda lateral inferior se encuentra recortada para reducir el ancho de banda. Se utiliza también en TV digital ATSC.

VSWR Voltage Standing Wave Ratio -Característica utilizada para definir la pérdida de retorno (ver RL) en una antena o circuito de microondas.

W

WDM Wavelength Division Multiplexing -Multiplexación utilizada en los sistemas con fibras ópticas que permite colocar varias portadoras luminosas en la misma fibra. Ver también DWDM.

Wireless -Denominación genérica para sistemas de comunicaciones que no utilizan hilos y que por ello trabajan con ondas electromagnéticas o con luz.

WLL Wireless Local Loop -Sistema de radioenlace que opera en la banda de 1900 MHz y que permite acceder desde un punto a varios usuarios en un área reducida a algunos km.

WWW Word Wire Web -Servicio del tipo hipertexto para transmisión de texto, sonido e imágenes mediante el protocolo HTTP.

X

X.25 -Red de datos por paquetes normalizada por el ITU-T entre 1976-1988 para accesos a baja velocidad (hasta 64 kb/s).

XPD Cross Polarization Discrimination -Característica de una antena que permite determinar cuanto se discrimina (medido en dB) la polarización ortogonal.

XPCD XPD Compensation -Circuito electrónico que permite compensar la interferencia de una polarización cruzada ortogonal en un enlace de radiofrecuencia.

ANEXO C. TABLAS

PERMITIVIDADES RELATIVAS (CONSTANTES DIELECTRICAS)

Material	Permitividad relativa, ϵ_r
Aire	1.0
Baquelita	5.0
Vidrio	4-10
Mica	6.0
Accite	2.3
Papel	2-4
Cera parafina	2.2
Plexiglás	3.4
Poliétileno	2.3
Poliestireno	2.6
Porcelana	5.7
Caucho	2.3-4.0
Tierra (seca)	3-4
Teflon	2.1
Agua (destilada)	80
Agua de mar	72

CONDUCTIVIDADES

Material	Conductividad, σ (S/m)	Material	Conductividad, σ (S/m)
Plata	6.17×10^7	Agua dulce	10^{-3}
Cobre	5.80×10^7	Agua destilada	2×10^{-4}
Oro	4.10×10^7	Tierra seca	10^{-5}
Aluminio	3.54×10^7	Accite de transformador	10^{-11}
Latón	1.57×10^7	Vidrio	10^{-12}
Bronce	10^7	Porcelana	2×10^{-13}
Hierro	10^7	Caucho	10^{-15}
Agua de mar	4	Cuarzo fundido	10^{-17}

PERMEABILIDADES RELATIVAS

Material	Permeabilidad relativa, μ_r
<i>Ferromagnéticos (no lineales)</i>	
Níquel	250
Cobalto	600
Hierro (puro)	4,000
Manganeso	100,000
<i>Paramagnéticos</i>	
Aluminio	1.000021
Magnesio	1.000012
Paladio	1.00082
Titanio	1.00018
<i>Diamagnéticos</i>	
Bismuto	0.99983
Oro	0.99996
Plata	0.99998
Cobre	0.99999

* Tenga en cuenta que los parámetros constitutivos de algunos de los materiales dependen de la frecuencia y de la temperatura. Las constantes listadas son valores para baja frecuencia a temperatura ambiente.