

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER.

ANTECEDENTES:

Consciente de los actuales esquemas sociales, culturales y económicos, la Universidad Autónoma de Nuevo León toma acciones concretas que le permiten romper con ciertos paradigmas que por años han mantenido a las universidades mexicanas en ciertos esquemas y circunstancias, llegando en algunos casos a la obsolescencia. Para enfrentar esta gran responsabilidad, propone su Proyecto Visión UANL 2006.

Para cumplir con este propósito la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, comprende que educar ya no es suficiente, la acelerada tendencia a la globalización obliga a las universidades a brindar realmente una educación de calidad, para que sus egresados sean competitivos y puedan aprovechar las oportunidades que se les presenten así como ser generadores de nuevas oportunidades en el ámbito nacional e internacional.

En este contexto y como una de las muchas estrategias a seguir en la búsqueda del objetivo mencionado, la carrera de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones es una de las áreas a nivel profesional que está obligada a mantenerse a la vanguardia; al mismo tiempo, debe cumplir con las normas de los Comités Interinstitucionales en Educación Superior.

Por esto, el egresado de la carrera de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones debe ser un profesionista con una formación sólida en las áreas de la Electrónica, las Telecomunicaciones y el Electromagnetismo. También debe poseer la habilidad para aplicar la computación en el diseño, la simulación y el control de los sistemas modernos de comunicaciones electrónicas e inalámbricas.

En la coordinación de Electrónica y Control y en particular en el departamento de Comunicaciones a la cual pertenezco, el área de Sistemas Radiantes tiene un alcance en el programa a nivel licenciatura completamente definido. A través de continuas juntas de academia, se ha llegado a concretar que para la reforma curricular en el nuevo plan de estudios de la Carrera de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones, el área antes mencionada se extiende a materias como Sistemas de Antenas y Sistemas de Transmisión de Radio-Frecuencia.

PROBLEMÁTICA:

En la actualidad y por lo antes mencionado, la falta de un libro de texto que trate la propagación, antenas y diseño de enlaces de radio-frecuencia en el área de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones que cumpla con los propósitos de los programas a nivel licenciatura, nos coloca en desventaja con respecto a otras universidades de prestigio en el país.

Es de gran importancia resaltar la necesidad que tiene nuestro plantel de resolver la forma de impartición, utilizando herramientas que nos permitan vincular los conceptos mas esenciales y los avances tecnológicos de mayor importancia ya que es una de las áreas que se encuentran en constante desarrollo.

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS.

El principal objetivo que se desea cumplir con la elaboración del texto, es cubrir las exigencias en los programas que elabora la Universidad, los cuales son modificados bajo las más estrictas normas de calidad con el fin de que nuestros egresados compitan no solo a nivel local, si no también a nivel nacional y en algunos de los casos, que realicen un buen desempeño a ámbito internacional.

Es importante señalar que es un material indispensable que brinda el apoyo a los estudiantes de la carrera de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones en áreas como Espectro de Radio-Frecuencia, Propagación, Diseño de Antenas y Diseño de Enlaces en Línea de Vista y especialmente en las materias de nueva creación contempladas en la propuesta de la reforma curricular.

Este volumen irá acompañado de una serie de problemas resueltos al final de algunos capítulos que le proporcionaran al lector una perspectiva analítica de los casos que pueden enfrentar en la práctica. De igual manera, a través de un compendio de problemas propuestos, se les invitará a la solución de los mismos con el fin de evaluar la comprensión que se obtuvo del capítulo en estudio.

1.3 HIPOTESIS.

- No. 1.- Considero que una gran parte de la deficiencia que se tiene en el estudio de esta área, es debida a la escasa bibliografía que existe y además de que la información se encuentra muy dispersa; esto aunado al rápido cambio de tecnología convierte en una odisea la constante actualización
- No. 2.- La incursión en este texto de algunos problemas resueltos y otros propuestos permitirá el máximo aprovechamiento hora-estudio del alumno y aumentara el potencial de desarrollo en el diseño de los sistemas de antenas y de enlaces de comunicación.

1.4 LIMITES DEL ESTUDIO.

Esta es una investigación que se enfoca al diseño de los sistemas que se utilizan para la transmisión de información (voz o datos) de manera inalámbrica a través de Radio-Frecuencia, así como para el diseño de los elementos radiadores y colectores de energía Electro-Magnética (antenas). Enmarcando desde los conocimientos mas básicos de la propagación de la O.E.M., hasta llegar al desarrollo mas completo en sistemas de Radio-Frecuencia.

Este estudio visualiza los primeros sistemas de antenas y los que se utilizan en la actualidad y da una idea discreta a nuevas tecnologías aplicadas al mismo propósito; con el fin de no mantenernos al margen de lo que se utiliza en otros países.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.

La Transmisión de información inalámbrica en estos tiempos, es fundamental para el desarrollo de las actividades educativas, comerciales, productivas y económicas de cualquier país. Debido a ello se diseñan Arreglos de Antenas y Sistemas de Comunicación mas seguros que permitan la confiabilidad de los enlaces.

Considerando el avance desmesurado de la tecnología en el área de la Electrónica y las Telecomunicaciones a nivel mundial, y conciente de que la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica no puede permanecer al margen he querido participar activamente con esta aportación para apoyar a los programas de clase de la carrera del Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

1.6 METODOLOGIA.

- 1.- Definición global del contenido de la tesis.
- 2.- Justificación de contenidos y relaciones de secuencia.
- 3.- Revisión preliminar con asesor de tesis.
- 4.- Revisión preliminar del índice de la tesis con la Academia de Electromagnetismo, en la Coordinación de Electrónica y Control de FIME.
- 5.- Recopilación de información.
- 6.- Desarrollo de contenidos.
- 7.- Conforme se desarrollen los temas, se tendrán revisiones formales de los contenidos con el asesor de tesis.
- 8.- Los contenidos completos de la tesis se someterán a aprobación formal por parte de la Academia de Electromagnetismo.
- 9.- Al concluir la aprobación por parte de la Academia de Electromagnetismo, la tesis se someterá a una revisión final para obtener una propuesta definitiva aprobada por el asesor.

1.7 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los textos *Electromagnetic waves and radiating systems*, *Electronic Communication Systems* y *Engineering Electromagnetics* son libros que tienen todo el soporte en el área de las comunicaciones, pero los temas de electromagnetismo los abordan de una manera apropiada para la conceptualización a un nivel licenciatura. Estas obras fueron de gran utilidad para la elaboración y planteamiento en los conceptos básicos del Electromagnetismo, la explicación de la creación de la Onda Electromagnética (Radiación) y la forma de desplazamiento en el espacio (Propagación).

El libro de Radiación y antenas lineales nos brinda la oportunidad de tomarlo como referencia para abordar el tema del espectro de radiofrecuencia, su contenido es ligero pero a la vez interesante; también fue de gran utilidad para los temas de arreglos de antenas, aunque la fuerza esencial para este tema fue seleccionado de la obra *Antenna Engineering Handbook*.

Los textos de Antenas y Diagramas de Irradiación, *Manual de Antenas y Fundamentos de antenas* por su gran contenido y especialización se tomaron como plataforma para el desarrollo del capítulo de parámetros de antenas, la representación de su contenido fue ideal para tomarlos como plataforma; con esto y la incrustación de algunos problemas resueltos, la elaboración de este tema se torna interesante. En este mismo capítulo de igual forma el auxilio del

Los libros de *Antenna Engineering*, *Antenna Analysis* y *Transmission Lines and Antennas* son obras que tienen un enfoque sólido sobre el desarrollo matemático, con la característica de ser digerible por el lector; este mismo perfil se adoptó para la elaboración de los capítulos que tienen fundamento en el desarrollo matemático de las antenas.

El texto de Antenas de televisión y el *Manual de Antenas Receptoras para TV. y F.M.*, enriquece en gran medida los últimos capítulos de la tesis, ya que algunos de los conceptos son tocados con la profundidad adecuada los cuales se toman como referencia en algunos puntos para soportar algunas teorías; el inconveniente en algunos casos es que la ausencia del análisis matemático para profundizar en esta disciplina.

CAPITULO 2

CONSIDERACIONES GENERALES Y PROPAGACION DE LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

2.1 INTRODUCCION

Las antenas son los componentes básicos de cualquier sistema electrónico que depende del espacio libre como medio de propagación; son el eslabón de conexión entre el espacio libre y el transmisor o receptor.

Una antena puede ser descrita como un objeto metálico, normalmente un tubo o alambre o un conjunto de ellos usado para convertir corriente de alta frecuencia a ondas electromagnéticas, o viceversa.

Las antenas transmisoras y receptoras, junto con el medio de propagación entre ellas, cumplen la misma función que las líneas de transmisión en los sistemas de comunicaciones alámbricas. A distancias muy grandes, el voltaje que puede inducirse en una antena es mayor que el que puede transmitirse con alambres de tamaños prácticos. La atenuación de las ondas guiadas por alambres aumenta exponencialmente con la longitud de alambre; por lo tanto, para distancias grandes la atenuación en un alambre es mayor que la atenuación que sufren las ondas electromagnéticas al propagarse en el espacio libre.

2.2 EL TEOREMA DE RECIPROCIDAD

La antena transmisora está destinada a la transformación de la energía eléctrica producida por la señal de radiofrecuencia, en energía electromagnética de radiación, añadiendo además que esta radiación debe emitirse en unas direcciones determinadas.

La antena receptora está destinada a la transformación de la energía electromagnética de radiofrecuencia proveniente de unas direcciones dadas en energía eléctrica.

Ya que el proceso de recepción es exactamente el inverso del de transmisión es posible establecer el teorema de reciprocidad el cual establece que "Las características de una antena, tal

como su impedancia, patrón de radiación, ganancia, etc., son las mismas sin importar que la antena sea utilizada para recepción o para transmisión”.

Sin embargo, debido a las diferencias en su aplicación, existen ciertas diferencias prácticas entre las antenas transmisoras y receptoras. Por ejemplo, una antena transmisora debe ser diseñada para manejar altas potencias mientras que la receptora lo que requiere es quizá, trabajar sobre un mayor rango de frecuencias que la antena transmisora; esto es realmente en el caso de las antenas de radiodifusión comercial. Además se requiere de una mayor eficiencia para una antena transmisora que para una receptora, por razones obvias.

En resumen, aunque las reglas clásicas de la reciprocidad deben aplicarse con cuidado a los problemas prácticos con antenas, puede suponerse que las características direccionales de un sistema de antenas para transmisión y recepción, además, para todos los fines prácticos, una antena que transmite bien en una dirección determinada, también proveerá una recepción para la misma dirección.

2.3 MECANISMO DE RADIACION

Maxwell planteó dos sistemas de ecuaciones matemáticas estableciendo en la primera de ellas, que si en un medio se produce, de algún modo, un campo eléctrico variable, aparecen dos clases de corrientes eléctricas: Una de conducción y la otra de desplazamiento; corrientes que a su vez, crean un campo magnético variable.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En el segundo sistema de ecuaciones, Maxwell estableció que el campo magnético variable creado por las corrientes eléctricas, según la ley del primer sistema, debe inducir en el espacio un campo eléctrico, de acuerdo con las leyes fundamentales de la inducción electromagnética el que también será variable.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Considerando los dos sistemas de ecuaciones en conjunto, estas expresan la fenomenología de una sucesión de campos eléctricos y magnéticos, que se generan mutuamente, propagándose al espacio con cierta velocidad.

Acercas de esta velocidad, puesto que de las ecuaciones de Maxwell se deduce que si la variación del campo magnético da lugar a un campo eléctrico, y que la variación de este produce a su vez, un campo magnético y así indefinidamente, la velocidad con que se propagará la onda electromagnética habrá de no depender de la velocidad con que cada campo genera al otro. Esto es similar a decir que la velocidad de propagación de la onda electromagnética dependerá de la relación que exista entre la constante dieléctrica y la permeabilidad magnética del medio. (Ec. 2.3)

$$\text{Velocidad} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

En el espacio libre:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{Farad}}{\text{mto.}}$$

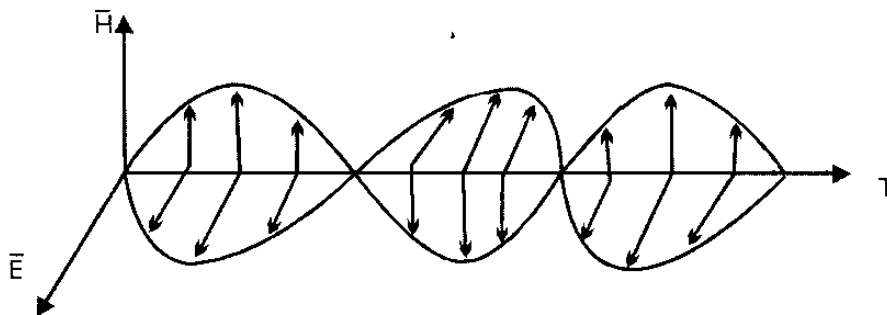
$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi} \times 10^{-9} \frac{\text{Henrios}}{\text{mto.}}$$

Y por lo tanto:

$$\text{Velocidad} = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.998 \times 10^8 \frac{\text{mts}}{\text{seg}}$$

La onda electromagnética radiada se propaga con una velocidad aproximada de 3×10^8 m /seg. En un punto fijo del espacio, la onda que pasa aparece como un campo eléctrico y un campo magnético que varían senoidalmente. (Figura 2.1)

La onda radiada desde una antena es en realidad una onda esférica. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia desde la antena, la superficie esférica que presenta el frente de onda, se hace más grande.



REPRESENTACION DE LA ONDA ELECTROMAGNETICA EN EL ESPACIO LIBRE

Fig.# 2.1

Para un área muy pequeña de esta superficie, tal como la que ocupa una antena receptora, puede considerarse que la onda es plana. Los vectores eléctrico y magnético pueden representarse por rectas dentro de un mismo plano (Fig. 2.2)

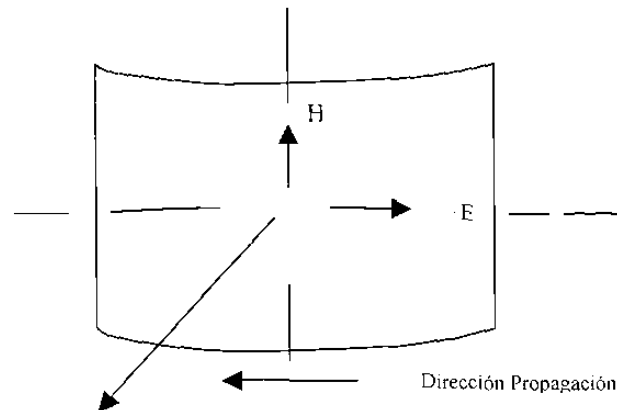
En las figuras 1 y 2 se observan claramente, que los campos \vec{E} y \vec{H} están siempre en fase en lo que concierne al tiempo, pero están siempre en cuadratura en lo que concierne al espacio. Esto quiere decir que están en fase, pero perpendiculares entre sí.

Hemos afirmado que la onda electromagnética es producida por la generación mutua y sucesiva de campos eléctricos y magnéticos; es decir cuando se aplica la salida a continuación aclararemos mas esto.

Cuando se aplica la salida de un transmisor a una antena, se origina una corriente que fluye en ella, en un sentido y en el otro, a todo lo largo de la antena. Sin embargo, como la antena no es un circuito cerrado, este flujo de corriente hace que los electrones se distribuyan en forma desigual.

La figura 2.3 muestra como esto ocurre en una antena simple, alimentada en el centro por el transmisor.

Fig. # 2.2



En un instante dado, la terminal izquierda del transmisor puede ser negativa y la de la derecha positiva. Entonces los electrones que hay en la antena son rechazados por la terminal negativa y atraídos por la positiva, de modo que la carga negativa tiende a crecer en el extremo izquierdo de la antena, mientras que la carga positiva lo hace en el derecho (figura #2.4).

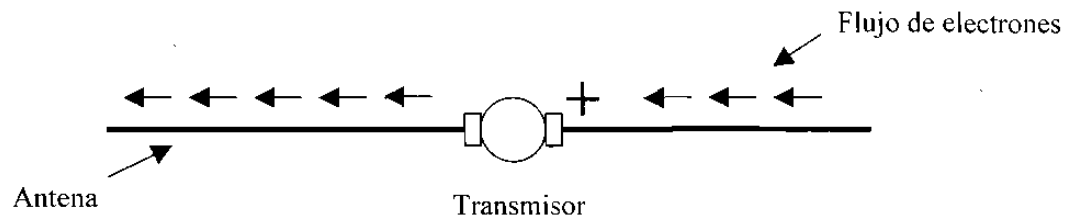


Fig. # 2.3

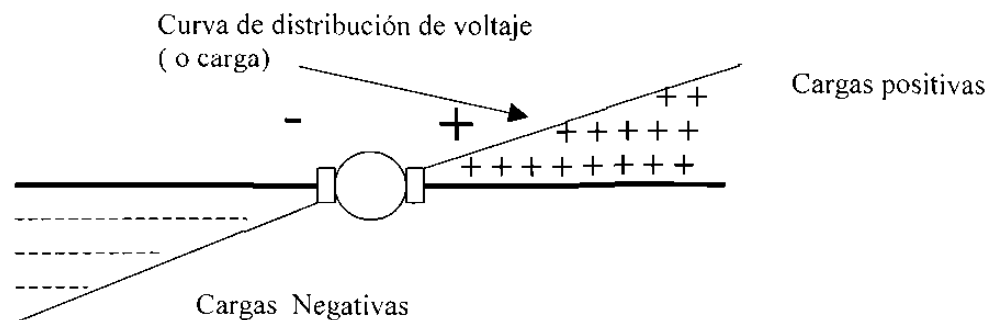


Fig # 2.4

La corriente de antena produce un campo magnético ya que, es bien sabido, que el flujo de corriente en cualquier conductor crea un campo magnético alrededor del mismo; la distribución de la carga a lo largo de la antena origina un campo eléctrico entre el extremo cargado positivamente y el de la carga negativa. Según se estudio en los cursos de campos, este siempre se produce entre dos cuerpos cualesquiera que tengan cargas opuestas.

2.4 VECTOR DE POYNTING

El producto vectorial de $\vec{E} \times \vec{H}$ da el flujo de energía por unidad de área en la región donde se han medido \vec{E} y \vec{H} . La integral de $\vec{E} \times \vec{H}$ sobre una superficie cerrada de la

razón del flujo de energía a través de dicha superficie. Esto es visto por el vector:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Que tiene las dimensiones de watts por metro cuadrado. Este es el teorema de Poynting el cual establece que el producto $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$, en cualquier punto, es una medida de la razón de flujo de energía por unidad de área en ese punto. La dirección de flujo es perpendicular a $\vec{E} \times \vec{H}$, y es la dirección del producto $\vec{E} \times \vec{H}$. El vector \vec{S} es conocido como vector de Poynting.

La interpretación de $\vec{E} \times \vec{H}$ como el flujo de potencia por unidad de área es un concepto extremadamente útil, especialmente en problemas de radiación. Por ejemplo, una integración de $\vec{E} \times \vec{H}$ sobre una superficie encerrando una antena transmisora de la potencia radiada por la antena.

2.5 CARACTERISTICAS GENERALES DE LA PROPAGACION ELECTROMAGNETICA

Las ondas electromagnéticas consisten de campos eléctricos y magnéticos entrelazados que varían en el tiempo, y que están relacionados entre sí, de manera que la energía total de la onda se divide por partes iguales entre el campo magnético y el campo eléctrico. Las líneas de fuerza de estos dos campos están siempre perpendiculares entre sí, y ambos campos a su vez; están siempre perpendiculares a cualquier plano que contenga la dirección de propagación.

En la fig. 2.5 vemos las líneas de fuerza eléctrica y magnética mirando de frente una onda electromagnética. En esta figura, la dirección de propagación es hacia el lector.

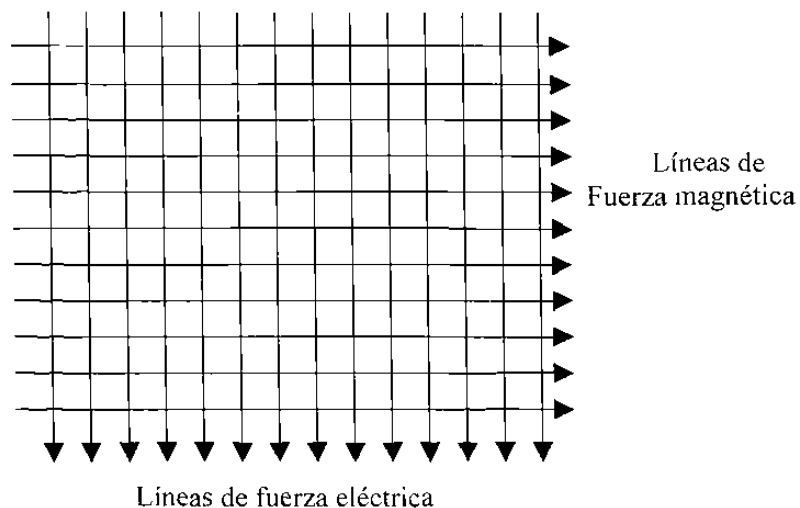


Fig. # 2.5

La velocidad de propagación; de las ondas electromagnéticas depende del medio en que se propagan, y es de aproximadamente 3×10^8 metros por segundo en el espacio vacío.

$$c = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde :

c = velocidad de propagación de la OEM

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

En cualquier otro medio, la velocidad de propagación es menor que en el vacío.

La velocidad de propagación, la longitud de onda y la frecuencia de una onda electromagnética están relacionadas según la siguiente ecuación:

$$c = \lambda f \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde c es la velocidad de propagación en metros por segundo, λ es la longitud de la onda en metros y f la frecuencia en ciclos por segundo (Hz).

2.6 POLARIZACION DE UNA ONDA ELECTROMAGNETICA

La polarización de una onda electromagnética queda arbitrariamente definida por la dirección de las líneas de fuerza del campo eléctrico. Generalmente se toma la superficie terrestre como plano de referencia. Si el campo eléctrico es paralelo a la superficie de la Tierra, decimos que la onda está horizontalmente polarizada; si el campo eléctrico es perpendicular a la superficie de la Tierra, decimos que la onda está verticalmente polarizada. Por ejemplo, la onda cuyo frente se representó en la figura 2.5 tiene polarización vertical. En algunos casos se da la polarización con referencia a alguna superficie reflectora determinada; en tal caso, es necesario especificar la posición de la superficie en cuestión.

Uno de los principales objetivos de la polarización es cancelar el ruido inherente que se produce cuando se está trabajando en una banda de frecuencia determinada, manejando o haciendo que la transmisión sea en una polarización contraria a la del ruido. Por ejemplo, el ruido que se induce en la banda de FM tiene una polarización horizontal, por lo tanto se tiene que transmitir en una polarización vertical.

2.7 FENOMENOS QUE SUFRE LA ONDA ELECTROMAGNETICA AL VIAJAR POR EL ESPACIO LIBRE

Los fenómenos que una onda electromagnética puede sufrir al viajar en el espacio libre son la refracción, reflexión, difracción y absorción.

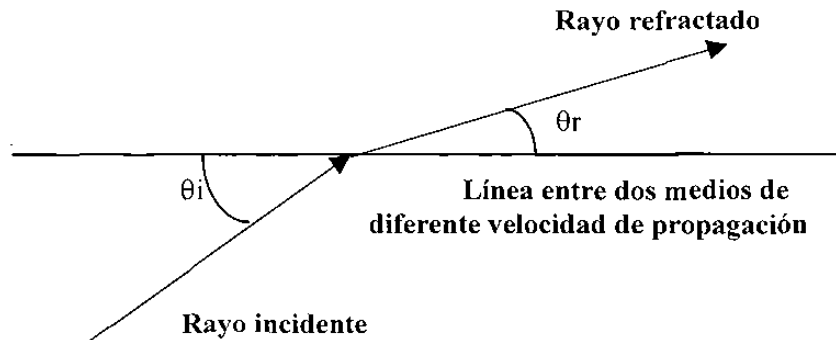
2.7.1 REFRACCIÓN

Cualquier cambio en la naturaleza del medio en que se propaga una onda altera su dirección de propagación. Lo mismo ocurre con las ondas de la luz, que también son ondas electromagnéticas, y en ambos casos, este fenómeno se llama refracción. La refracción se debe a que aquella parte del frente de la onda que llega primero a la discontinuidad del medio de propagación, sufre un retardo o adelanto con relación a la parte del frente que llega más tarde, con el consiguiente cambio de dirección de todo el frente de la onda. En la figura 2.6 se muestra

en forma esquemática cómo ocurre la refracción de una onda al pasar por el límite de dos medios de diferente naturaleza.

Fig.# 2.6

Donde θ_i es el ángulo incidente entre el límite de los dos medios. θ_r el ángulo refractado.
Condición $\theta_i \neq \theta_r$



2.7.2 ATENUACIÓN

La ley inversa cuadrática para la radiación matemática describe la reducción en la densidad de potencia con la distancia de la fuente. Conforme se aleja un frente de onda de la fuente, el campo electromagnético continuo, que es radiado desde esa fuente, se dispersa. Es decir, las ondas se alejan más unas de otras y, consecuentemente, el número de ondas por unidad de área disminuye. Nada de la potencia radiada se pierde o se disipa, porque el frente de la onda se aleja de la fuente; la onda simplemente se dispersará sobre un área más grande, disminuyendo la densidad de potencia. La reducción en la densidad de potencia con la distancia es equivalente a la pérdida de potencia y comúnmente se llama *atenuación de la onda*. Debido a que la atenuación se debe al esparcimiento esférico de la onda, a veces se llama *atenuación espacial de la onda*. La atenuación de la onda se expresa generalmente en términos del logaritmo común de la relación de densidad de potencia (pérdida en dB). Matemáticamente, la atenuación de la onda $\nabla_x \nabla_x E = \nabla(\nabla^2 \cdot E) - \nabla^2 E$, es;

$$\gamma_a = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

La reducción en potencia debida a la ley cuadrática inversa presume la propagación del espacio libre (un vacío o casi un vacío) y se llama atenuación de la onda. La reducción en la densidad de potencia debida a la propagación del espacio no libre se llama *absorción*.

2.7.3 REFLEXIÓN

Cuando una onda electromagnética encuentra en su camino una superficie de conductibilidad perfecta sufre una reflexión total, tal como ocurre con la luz en un espejo. El fenómeno de la reflexión puede explicarse de la siguiente manera: cuando una onda electromagnética incide sobre una superficie plana de conductibilidad perfecta, el campo eléctrico de la onda no puede seguir existiendo en la superficie, y su energía se convierte por completo en energía magnética debido a la corriente inducida en la superficie. Como la superficie es perfectamente conductora, la energía de la onda no puede ser absorbida, y por lo tanto es nuevamente irradiada en la única dirección posible, o sea si la onda incide

verticalmente, en dirección opuesta a la incidente. Si la onda incide con un ángulo diferente de 90 grados, el ángulo de reflexión será igual al ángulo de incidencia, tal cual ocurre con la luz en un espejo. Cuando la conductibilidad de la superficie reflectora no es perfecta, como es el caso para la superficie terrestre, parte de la energía de la onda es absorbida, y la otra parte es reflejada.

La magnitud de la onda depende del tamaño relativo y de la conductancia de la superficie reflectora. Cuando hablamos del tamaño relativo de una superficie reflectora, nos referimos a la relación que existe entre las dimensiones de la superficie en comparación con la longitud de la onda reflejada. Cuanto mayores sean las dimensiones de la superficie en comparación con la longitud de onda, mayor será la magnitud de la onda reflejada. Cuanto mayor es la conductancia de la superficie reflectora, mayor será la magnitud de la onda reflejada.

Algunos ejemplos de superficies reflectoras que tienen importancia en la práctica son: objetos metálicos, superficies de agua, especialmente el agua salada, la superficie terrestre, capas de aire de diferente densidad y diferentes grados de humedad, capas de aire ionizadas, zonas de precipitaciones meteorológicas, edificios, etc. Las reflexiones causadas por superficies pequeñas en comparación con la longitud de onda, revisten muy poca importancia. Las ondas electromagnéticas se reflejan casi totalmente en las grandes superficies de buena conductividad, como el mar, las tierras cultivadas y húmedas, y por supuesto, en superficies metálicas extensas.

2.7.4 DIFRACCIÓN

Cuando una onda electromagnética incide sobre el borde de una superficie opaca o cuando atraviesa capas de aire de densidades irregulares, se produce el fenómeno de la difracción. En este caso, una pequeña parte de la energía de la onda se dispersa en muchas direcciones, dando lugar a nuevos frentes de ondas. Debido a este fenómeno resulta posible recibir señales de radio en la sombra de objetos opacos a las ondas y en zonas donde no llega el rayo directo de la onda.

2.7.5 ABSORCIÓN

Una onda electromagnética que se propaga en el espacio vacío o en un medio diferente, pierde energía la cual es sustraída por el medio. En la atmósfera, esta energía perdida se gasta en hacer oscilar los electrones orbitales de los átomos y las moléculas del aire. Asimismo, las superficies que no tienen conductibilidad perfecta, por ejemplo la superficie terrestre, absorben energía de la onda, ya que al ofrecer resistencia a las corrientes inducidas causan pérdidas de calor. La cantidad de absorción sufrida por la onda depende de la frecuencia de la onda y del medio que absorbe la energía.

Los diferentes tipos de absorción que puede sufrir una onda, se reúnen comúnmente bajo la denominación de atenuación de la onda.

2.8 ANALISIS DE LA PROPAGACION EN EL ESPACIO LIBRE

CONDICIONES PARA EL ESPACIO LIBRE

-12

1. Permitividad : $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

2. Permeabilidad: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
3. Densidad de Carga Volumétrica: $\rho = 0$
4. Densidad de Corriente: $\bar{J} = 0$
5. Densidad de Flujo Eléctrico: $\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E}$
6. Densidad de Flujo Magnético: $\bar{B} = \mu_0 \bar{H}$

2.8.1 ECUACION DE ONDA PARA EL CAMPO MAGNETICO EN EL ESPACIO LIBRE

Partiendo de la identidad para el doble rotacional de \bar{H} tenemos:

$$\nabla_x \nabla_x H = \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H$$

como:

$$\nabla(\nabla \cdot H) = 0$$

Tenemos que:

$$\nabla_x \nabla_x H = -\nabla^2 H$$

Según la Segunda ecuación de Maxwell:

$$\nabla_x H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Y ya que $\bar{J}=0$ en el espacio libre, entonces:

$$\nabla_x H = \frac{\partial D}{\partial t}$$

Sustituyendo:

$$-\nabla^2_x H = \nabla_x \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right)$$

Como $\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E}$ sustituimos y obtenemos:

$$\begin{aligned} -\nabla^2 H &= \nabla_x \left[\frac{\partial (\epsilon_0 E)}{\partial t} \right] \\ -\nabla^2 H &= \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla_x E) \end{aligned}$$

Como $\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\partial B / \partial t$, entonces:

$$-\nabla^2 H = \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right)$$

Como $\bar{B} = \mu_0 \bar{H}$, sustituimos:

$$-\nabla^2 H = \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[-\frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 H) \right]$$

$$-\nabla^2 H = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

Cambiando signos:

$$\nabla_x \nabla_x H = -\nabla^2 H$$

$$\nabla^2 H = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

$\nabla_x \nabla_x H = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$
--

2.8.2 ECUACION DE ONDA PARA CAMPO ELECTRICO EN EL ESPACIO LIBRE

$$\nabla_x \nabla_x E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$$

$$\nabla(\nabla \cdot E) = 0 \therefore -\nabla^2 E = \nabla_x(\nabla_x E)$$

$$-\nabla^2 E = \nabla_x \left[-\frac{\partial B}{\partial t} \right]$$

$$-\nabla^2 E = -\mu_0 \left[\frac{\partial(\nabla_x H)}{\partial t} \right]$$

$$-\nabla^2 E = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right)$$

$$-\nabla^2 E = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial(\epsilon_0 E)}{\partial t} \right]$$

$$-\nabla^2 E = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla_x \nabla_x E = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E$$

2.8.3 ECUACION DE ONDA PARA EL CAMPO MAGNETICO EN TODOS LOS MEDIOS

Aplicando al doble rotacional de \vec{H} la identidad vectorial:

$$\nabla_x \nabla_x \vec{H} = \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H}$$

Como:

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) = 0$$

$$-\nabla^2 \vec{H} = \nabla_x(\nabla_x \vec{H})$$

Sustituyendo la Segunda Ecuación de Maxwell:

$$-\nabla^2 \vec{H} = \nabla_x \left[\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right]$$

Sustituyendo:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

Y

condicion: \vec{J} no se elimina porque no esta en el espacio libre

σ constante de conductividad $1/\Omega$ mts. \rightarrow

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

$$-\nabla^2 \vec{H} = \nabla_x \left[\sigma \vec{E} + \frac{\partial(\varepsilon \vec{E})}{\partial t} \right]$$

$$-\nabla^2 \vec{H} = \sigma(\nabla_x \vec{E}) + \varepsilon \frac{\partial(\nabla_x \vec{E})}{\partial t}$$

Como:

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

y

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Entonces:

$$\sigma \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left[-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right] = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 (\mu \vec{H})}{\partial t^2}$$

$$-\bar{\nabla}^2 H = -\left[\mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right]$$

$$\nabla_x \nabla_x H = -\nabla^2 H$$

$$\boxed{\nabla_x \nabla_x H = -\left[\sigma\epsilon\mu \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right]}$$

2.8.4 ECUACION DE ONDA DEL CAMPO ELECTRICO PARA CUALQUIER MEDIO

$$\nabla_x \nabla_x E = \nabla(\nabla^2 \cdot E) - \nabla^2 \bar{E}$$

$$-\bar{\nabla}^2 \bar{E} = \nabla_x(\nabla_x E)$$

$$-\nabla^2 E = \nabla_x \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right)$$

$$-\nabla^2 E = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla_x H)$$

$$-\nabla^2 E = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left[J + \frac{\partial D}{\partial t} \right]$$

condicion: \bar{J} no se elimina porque no esta en el espacio libre

σ constante de conductividad $1/\Omega \text{ mts.} \rightarrow$

Y sustituyendo términos

$$J = \sigma E$$

$$-\nabla^2 E = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left[\sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right]$$

$$+\nabla^2 E = +\mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla_x \nabla_x E = -\nabla E$$

Ecuación de onda del campo eléctrico para cualquier medio.

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

* $\mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t}$ \longrightarrow Componente de conducción de la ecuación de onda

* $\mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$ \longrightarrow Componente de la radiación de la ecuación de onda

Sí

$$E = E_{\max} e^{j\omega t}$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (E_{\max} e^{j\omega t})$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega (E_{\max} e^{j\omega t})$$

*Solución de la primera derivada

$$\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial E}{\partial t} \right]$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} (j\omega E_{\max} e^{j\omega t})$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = j\omega \frac{\partial}{\partial t} (E_{\max} e^{j\omega t})$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = j^2 \omega^2 (E_{\max} e^{j\omega t})$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = J^2 \omega^2 E \quad \text{Solución de la segunda derivada}$$

Sustituyendo los resultados de las derivadas, en la ecuación de la onda para todos los medios,

quedará:

$$\nabla^2 E = \mu\sigma(j\omega E) + \mu\varepsilon(j^2\omega^2 E)$$

Reacomodando

$$\nabla^2 E = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)E$$

2.9 CONSTANTE DE PROPAGACION (γ)

La constante de propagación describe en su totalidad el fenómeno de la propagación de la onda, α indica atenuación de la onda, por eso se le denomina constante de atenuación; β está vinculada con el cambio de fase.

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Donde:

- γ \longrightarrow Constante de propagación
- α \longrightarrow Constante de atenuación (nepers/m)
- β \longrightarrow Constante de fase (rad/m)

Relacionando las ecuaciones:

$$\nabla^2 E = \gamma^2 E$$

$$\gamma^2 E = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)E$$

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$$

$$\gamma = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$$

2.9.1 OBTENCION DE LA CONSTANTE DE ATENUACION

Si se tiene en cuenta que:

$$\alpha^2 - \beta^2 = -\omega^2 \mu \epsilon$$

Y

$$\beta = \frac{\omega \mu \sigma}{2\alpha}$$

Sustituyendo ambas ecuaciones se tiene:

$$\alpha^2 - \left[\frac{\omega \mu \sigma}{2\alpha} \right]^2 = -\omega^2 \mu \epsilon$$

Desarrollando se obtiene:

$$4\alpha^2 + 4\alpha^2 \omega^2 \mu \epsilon - \omega^2 \mu^2 \sigma^2 = 0$$

Utilizando la fórmula general:

$$x_{(1,2)} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Donde obtenemos:

$$\alpha^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \mu \epsilon \left[\frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} + 1 - 1 \right]$$

Aplicando la raíz:

$$\alpha = \omega \frac{\mu \epsilon}{2} \left[\frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} + 1 - 1 \right]$$

2.9.2 OBTENCION DE LA CONSTANTE DE FASE

$$\alpha^2 - \beta^2 = -\omega^2 \mu \epsilon$$

$$\alpha = \frac{\omega \mu \sigma}{2\beta}$$

$$\left[\frac{\omega \mu \sigma}{2\beta} \right]^2 - \beta^2 = -\omega^2 \mu \epsilon$$

$$4\beta^4 - 4\beta^2\omega^2\mu\epsilon - \omega^2\mu^2\sigma^2 = 0$$

$$x_{(1,2)} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\beta^2 = \frac{1}{2}\omega^2\mu\epsilon \left[\frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2} + 1 + 1 \right]$$

$$\beta = \omega \frac{\omega\epsilon}{2} \left[\frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2} + 1 + 1 \right]$$

2.10 LA IONOSFERA

La ionosfera es una parte de las regiones superiores de la atmósfera, y consiste de capas que contienen átomos y moléculas ionizadas. Esta ionización se debe principalmente a la radiación solar. Las capas ionizadas tienen la propiedad de refractar, reflejar y difractar las ondas electromagnéticas, o sea que alteran su dirección de propagación. La refracción total que sufre una onda al incidir sobre las capas ionizadas, depende de varios factores, como la frecuencia de la onda, su ángulo de incidencia y las condiciones de ionización de la capa. Refracciones sucesivas de la onda pueden tener el mismo efecto sobre la onda que resulta de la reflexión en una superficie conductora, o sea, que la onda puede ser regresada de vuelta hacia la Tierra.

No existe ningún límite marcado entre las capas de la ionosfera; cada una se confunde poco a poco con la siguiente. Sin embargo, para facilitar el estudio, se supone que hay varias capas totalmente distintas y separadas una de la otra.

La capa más baja de la ionosfera se ubica entre 40 y 80 kilómetros de altura, aproximadamente; a esta capa se le llama capa D. Sólo se produce durante el día, no obstante lo cual, su grado de ionización es bajo. Inmediatamente encima de la capa D está la capa E, que se extiende desde 80 hasta 145 kilómetros de altura, aproximadamente. En la capa E, la densidad de ionización es máxima a unos 110 kilómetros sobre la Tierra, la capa E es mucho más fuerte que la capa D y no desaparece durante la noche, aunque se debilita bastante. La densidad máxima de la capa E ocurre aproximadamente a medio día.

La última capa de la ionosfera es la capa F, que se extiende desde una altura de 145 kilómetros hasta el límite superior de la ionosfera, o sea, 560 kilómetros. De noche sólo hay capa F, pero durante el día ésta se diferencia frecuentemente en dos partes, denominadas F₁ y F₂. La capa F₂, que es la de mayor altura, tiene una densidad iónica más alta que cualquiera de las capas ionosféricas. Las capas F₁ y F₂ se combinan nuevamente en la capa F, poco después del crepúsculo. La figura 2.7 nos muestra estas capas de la ionosfera, así como sus distancias.

Debido a sus propiedades específicas, la ionosfera produce dos efectos sobre las ondas espaciales: absorbe en cantidades variables la energía que contengan y desvía de su trayectoria o

dobla las ondas que atraviesan oblicuamente las distintas capas de aire, fenómeno llamado refracción. La capacidad que tenga la ionosfera para desviar una onda hacia la Tierra depende de la frecuencia de la onda y del ángulo al que ésta incida en la ionosfera, así como de la densidad iónica de las diferentes capas ionosféricas.

La capa D absorbe la mayor parte de la energía que tienen las ondas de baja frecuencia, de modo que casi ninguna de ellas pueda llegar a las capas E y F, donde se produce la refracción.

Las ondas de alta frecuencia pasan a través de la capa D con poca pérdida de energía y al penetrar en las capas E y F son repelidas por la atmósfera ionizada, se doblan y abandonan la ionosfera para regresar finalmente a la Tierra.

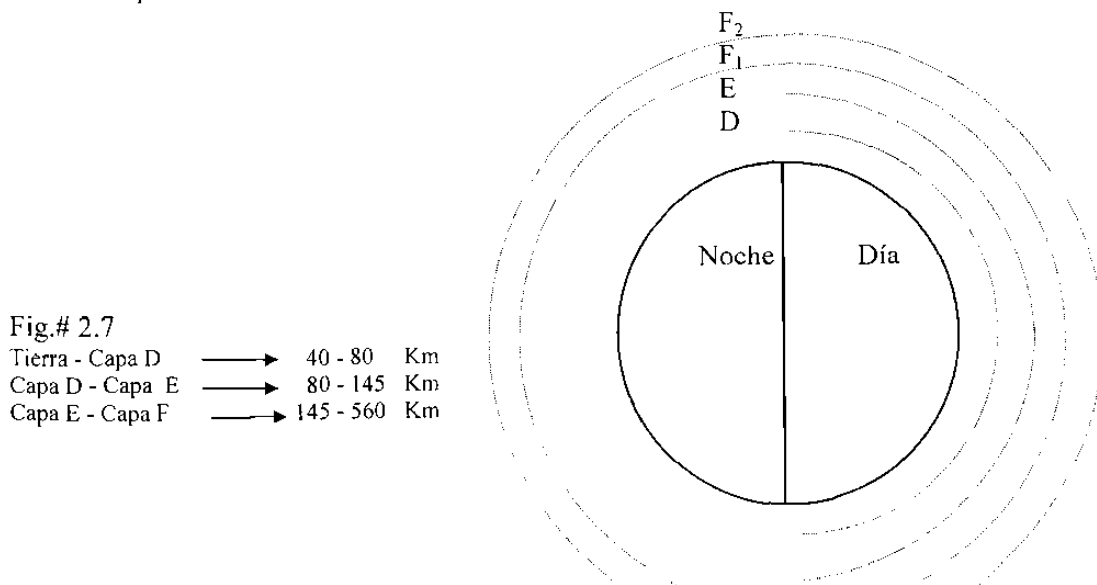
Durante el día la capa D absorbe las ondas espaciales de baja frecuencia e impide toda radiotransmisión por medio de ellas. Pero de noche esta capa desaparece y entonces el rango de frecuencias a las que se pueden transmitir señales por medio de la onda espacial es mucho más amplio.

Para cada capa existe una frecuencia crítica superior para la cual, al dirigirse una onda vertical hacia arriba, ésta no es devuelta a la Tierra, ni tampoco las ondas de frecuencia superior a la crítica. Sin embargo, cuando el ángulo de incidencia de la onda es menor que 90 grados, también las ondas de frecuencia superior a la crítica serán reflejadas a la Tierra. Cuanto menor es el ángulo de incidencia, mayor podrá ser la frecuencia de la onda para que todavía sea reflejada. La frecuencia más alta que todavía es reflejada, para un ángulo de incidencia determinado, se llama frecuencia máxima utilizable. La frecuencia máxima utilizable puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$f_m = f_c / \text{sen } \phi \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde f_m es la frecuencia máxima utilizable, f_c es la frecuencia crítica en el punto de reflexión, y ϕ es el ángulo de incidencia sobre la capa ionizada. La condición para que exista transmisión es $90^\circ < \phi < 0^\circ$. La frecuencia crítica varía con las horas del día y con las estaciones del año, y depende de la altura y el grado de ionización de la capa reflectora. Cuando menor altura tiene una capa ionizada, menor es la frecuencia crítica para esa capa.

Hay varios organismos en el mundo que se dedican al estudio de la ionosfera, y que publican periódicamente predicciones sobre las frecuencias críticas para las diferentes capas de la ionosfera en diferentes partes del mundo. Asimismo, se predicen las alturas virtuales de las diferentes capas con varios meses de anticipación, de manera que resulta posible elegir la mejor frecuencia para un circuito determinado.



2.11 CAMINOS DE PROPAGACION

Cualquier onda electromagnética se propaga en el espacio vacío en línea recta, no importa la frecuencia que tenga. Pero, sobre nuestro planeta, la propagación de las ondas electromagnéticas ocurre en la atmósfera y en las inmediaciones de una gran masa, opaca a la onda la esfera terrestre. Debido a esto tenemos que tomar en cuenta las refracciones, reflexiones, la dispersión, la absorción y otros factores que contribuyen a que la onda no se propague necesariamente en línea recta. Los factores que más afectan el camino de propagación de las ondas dependen, en alto grado, de la frecuencia de la onda. Por lo tanto, para diferentes frecuencias habrá diferentes caminos posibles.

En general podemos clasificar los posibles caminos en tres tipos, de acuerdo con la relativa importancia que tiene la ruta seguida por la onda para las comunicaciones. Estos tres posibles caminos son: la onda directa, la onda terrestre y la onda ionosférica. La figura 2.8 ilustra estos tres caminos.

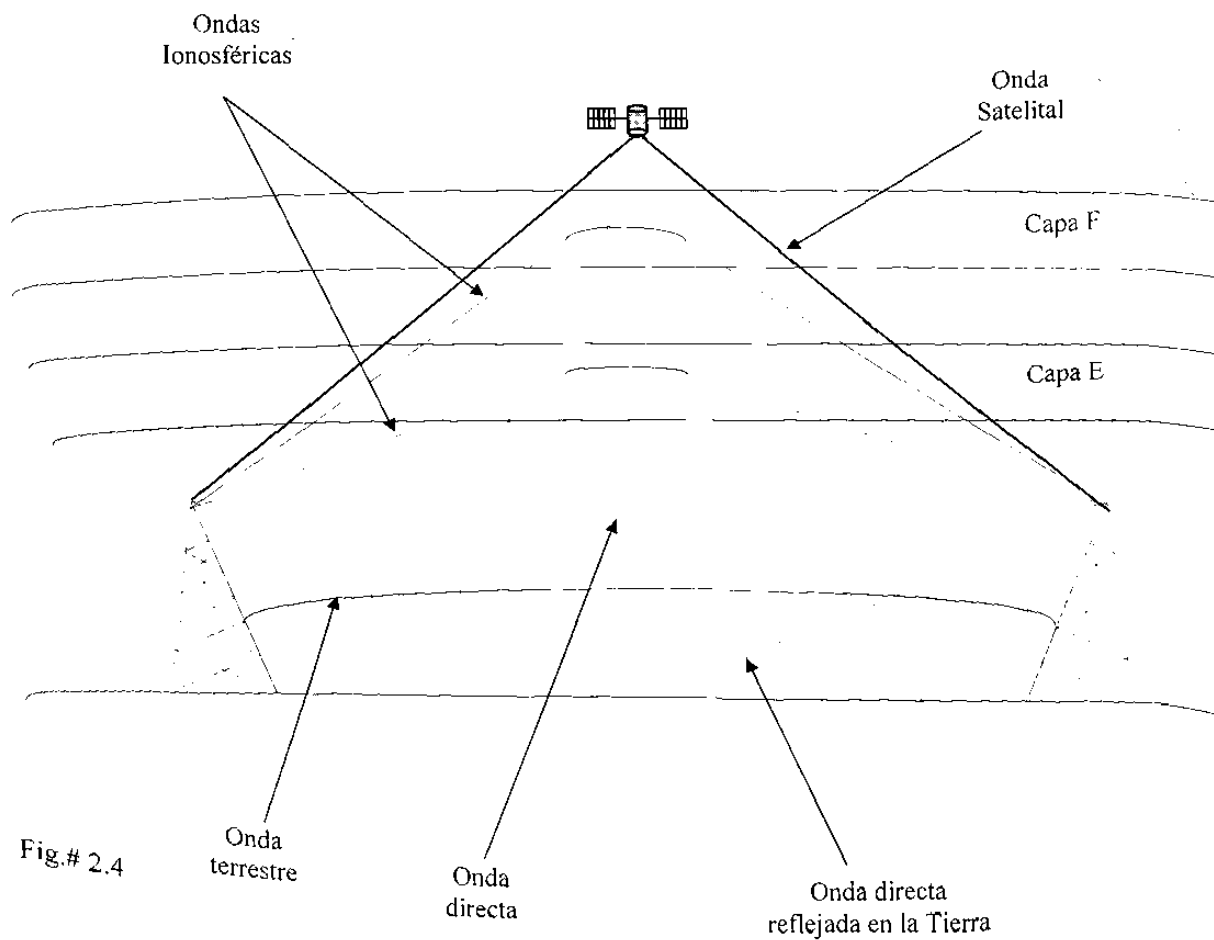


Fig.# 2.4

2.11.1 LA ONDA DIRECTA

La onda directa, o rayo directo, es de primordial importancia en las comunicaciones a corta distancia. En las frecuencias superiores a los 50 MHz las comunicaciones se efectúan casi exclusivamente por la onda directa; quiere decir, que la estación transmisora y la estación receptora deben estar al alcance de la línea visual, lo que limitaría la distancia máxima hasta el horizonte óptico. Sin embargo, debido a las refracciones en las capas inferiores de la atmósfera, el alcance del rayo directo en las frecuencias muy elevadas es algo mayor que la distancia al horizonte. De hecho, el rayo directo se compone en realidad en el punto de recepción de dos campos, uno debido al rayo directo, el otro debido al rayo reflejado en la superficie de la Tierra.

2.11.2 LA ONDA TERRESTRE

Las ondas que se irradian a las superficies de la Tierra pierden parte de su energía por la absorción de la Tierra. Ésta pérdida de energía causa la inclinación del frente de la onda, de manera que ésta se ciñe a la curvatura de la superficie terrestre. La absorción de la Tierra es muy alta en las frecuencias elevadas, y muy baja en las frecuencias bajas y muy bajas. En las frecuencias elevadas es en realidad tan fuerte que la onda terrestre sufre tanta atenuación, que su utilidad es prácticamente nula. En cambio en las frecuencias bajas la poca absorción de la Tierra es suficiente para curvar la trayectoria de las ondas y permitir a la vez la propagación a grandes distancias con atenuaciones tolerables.

2.11.3 LA ONDA IONOSFÉRICA

Esta onda se conoce también como onda de firmamento u onda espacial. Cuando una onda de frecuencia menor que la frecuencia máxima utilizable incide sobre la ionosfera, sufre sucesivas refracciones y es regresada de vuelta hacia la Tierra. Al incidir sobre la superficie de la Tierra la onda es nuevamente reflejada hacia la ionosfera, de manera que resulta posible conseguir comunicaciones satisfactorias a gran distancia por medio de reflexiones múltiples en la ionosfera y en la Tierra, o sea, por varios saltos de la onda.

En la figura 2.9 vemos una representación de varias posibilidades de reflexión de ondas ionosféricas. Las señales recibidas en determinado punto, no provienen necesariamente de una sola reflexión, y pueden llegar al mismo punto varias ondas que recorren diferentes caminos.

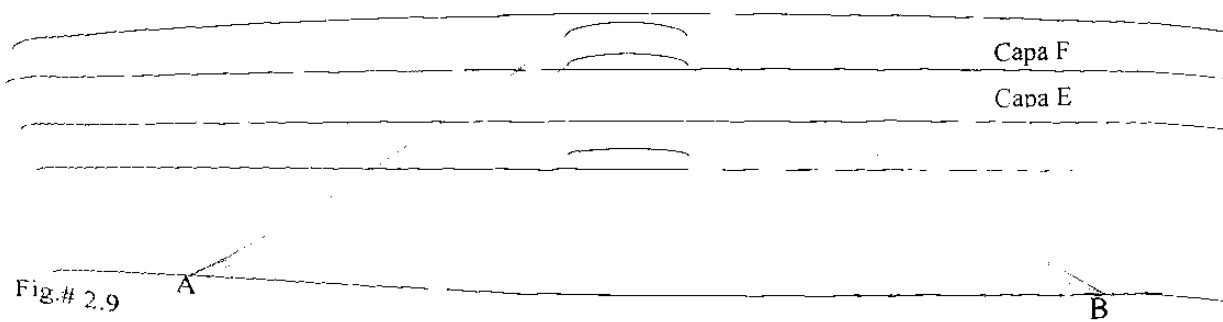


Fig.# 2.9

En la tabla 2.1 se puede apreciar las características de los diferentes caminos de propagación de la onda electromagnética y algunas aplicaciones.

Caminos de propagación	Frecuencia	Potencia	Arreglos de antenas	Aplicaciones
Onda terrestre	Bajas Muy bajas	Muy alta	Muy grandes y de difícil construcción.	Radio, ayuda a la navegación.
Onda ionosférica	Medias	Medias	Medianos y siguen siendo caros.	Radio aficionados, AM comercial.
Onda directa	Altas	Bajas	Pequeños y de fácil construcción.	Microondas, Radar, TV comercial.

TABLA 2.1

CAPITULO 3

ESPECTRO DE RADIOFRECUENCIA

3.1 INTRODUCCION

El espectro de radiofrecuencia se usa para comunicaciones de punto a punto, móvil, radiodifusión de audio y televisión, meteorología, radionavegación, radio localización, radio astronomía, radiodifusión de frecuencia estándar y radioaficionados.

Como el espectro es del dominio público, debe reglamentarse. Las naciones del mundo formaron la Unión Internacional de Telecomunicaciones acordándose dividirlo en bandas.

3.2 CLASIFICACION

El espectro de las ondas electromagnéticas utilizadas en las comunicaciones radioeléctricas se divide en diferentes bandas. Cada una de ellas se caracteriza por sus propiedades de propagación y por el empleo que se les da. A continuación damos una tabla de las diferentes bandas, su abreviatura adoptada por convenios internacionales y el rango de frecuencias y longitud de onda que abarca.

BANDAS	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
1. - VERY LOW FRECUENCY (VLF)	10 - 30 KHz	3 - 10 Km
2. - LOW FRECUENCY (LF)	30 - 300 KHz	10 - 1 Km
3. - MEDIUM FRECUENCY (MF)	300 - 3,000 KHz	1000 - 100 mts
4. - HIGH FRECUENCY (VHF)	3 - 30 MHz	100 - 10 mts
5. - VERY HIGH FRECUENCY (VHF)	30 - 300 MHz	10 - 1 mt
6. - ULTRA HIGH FRECUENY	300 - 3,000 MHz	100 - 10 cm
7. - SUPER HIGH FECUENCY (SHF)	3 - 30 GHz	10 - 1 cm
8. - EXTREMELY HIGH FRECUENCY (EHF)	30 - 300 GHz	10 - 1mm

Las abreviaturas para designar cada banda provienen del idioma inglés. (VLF very low frequency; LF low frequency; MF medium frequency; HF high frequency; VHF very high frequency; UHF ultra high frequency; SHF super high frequency; EHF extremely high frequency.)

3.3 DIVISION DE BANDAS SEGUN SU ONDA DE PROPAGACION

VLF LF	ONDA TERRESTRE
MF MF	ONDA IONOSFERICA
VHF UHF SHF EHF	ONDA DIRECTA SATELITE

		3
1 KHz	1,000 Hz	1×10^3 Hz
		6
1 MHz	1,000,000 Hz	1×10^6 Hz
		9
1GHz	1,000,000,000 Hz	1×10^9 Hz
		12
1 THz	1,000,000,000,000 Hz	1×10^{12} Hz

BANDAS Y APLICACIONES

3.4 BANDA VLF (Muy baja frecuencia)

Características de propagación: Camino de propagación por onda superficial, es un sistema muy confiable que utiliza altas potencias de Tx y requiere de sistemas de antenas muy grandes y costosos, la señal de esta banda es absorbida por la capa ionosférica.

La característica principal de esta banda es la muy baja atenuación que sufren estas ondas sobre la superficie de la tierra. Lo mismo puede decirse de la onda reflejada en la ionosfera. Además de ser muy baja, la atenuación es también muy constante durante las horas del día y de la noche y durante las estaciones del año. Todo esto contribuye a que esta banda ofrezca un máximo de seguridad para las comunicaciones a larga distancia. Hasta los mil kilómetros de distancia, la onda terrestre es la que predomina ampliamente sobre la onda ionosférica, con la consiguiente ventaja de no hacer sufrir desvanecimientos de la señal. Más allá de los mil kilómetros comienza a predominar la onda ionosférica y su alcance puede llegar a muchos miles de kilómetros.

La propagación de las frecuencias muy bajas es algo efectuada por la actividad de las manchas solares y por las tormentas magnéticas. Las desventajas de esta banda son dos: (1) los sistemas de antenas, a fin de ser eficientes, deben tener dimensiones físicas muy grandes, lo que los hace muy costosos; y (2) el espectro disponible en esta banda es muy restringido, dando cabida solamente a unas pocas estaciones.

Esta banda se utiliza por lo tanto en circuitos de muy largo alcance, con emisores de muy alta potencia y para las comunicaciones entre puntos fijos, con servicios continuos, exclusivamente en telegrafía lenta. Esto último se debe a que en estas frecuencias muy bajas el ancho de banda que puede emitirse está limitado a unos pocos cientos de ciclos por segundo, lo que imposibilita las transmisiones telefónicas, y permite solamente la telegrafía lenta.

Aplicación de la banda: Su principal aplicación es la radioayuda a la navegación, tanto marítima, aérea, como terrestre. Esta banda es utilizada principalmente por servicios gubernamentales (Marina, Armada, etc.), esta banda no se utiliza comercialmente y está restringida para uso de radioayuda.

3.5 BANDA LF (Frecuencias bajas)

Características de propagación: Su principal camino de propagación es por onda superficial, pero la capa ionosférica ejerce menos atenuación que la banda anterior utilizan sistemas de alta potencia y arreglos de antenas grandes, tanto en esta banda como en la anterior el alcance es de miles de Km.

En esta banda la atenuación de la onda terrestre es algo mayor que en las frecuencias muy bajas. Especialmente las frecuencias del extremo superior de esta banda se atenúan bastante durante el día, tanto sobre la tierra como en la atmósfera. Esto tiene como consecuencia la reducción del alcance diurno. Sin embargo es posible obtener con la onda ionosférica alcance similar a las frecuencias muy bajas. Debido a que los sistemas de antenas para estas frecuencias pueden construirse de manera que sean más eficientes, se compensa con eso las desventajas por la mayor atenuación.

Estas frecuencias se utilizan principalmente para cubrir con mucha seguridad distancias hasta varios cientos de kilómetros con la onda terrestre. Los radiofaros aeronáuticos operan entre 200 y 400 KHz, y tiene alcances que varían según la potencia del transmisor. Para los circuitos transoceánicos se utiliza la onda ionosférica, empleándose estaciones transmisoras ubicadas en las cercanías de la costa del mar, ya que se ha comprobado que si el sistema de antenas se encuentra a cierta distancia de la costa, la onda irradiada sufre una atenuación apreciable. Las antenas se instalan preferentemente en terrenos pantanosos, para así tener poca resistencia a las altas corrientes que deben circular en la tierra.

Aplicaciones de la banda: Semejante a la banda anterior.

3.6 BANDA MF (Frecuencias medias)

Características de propagación: Muy variado y con alta atenuación por onda superficial, su principal camino de propagación comienza a ser la capa ionosférica, viajando a largas

distancias por medio de rebotes múltiples, en la ionosfera y en la superficie de la tierra. Es un sistema que depende de las características de la ionosfera y por lo tanto no es muy eficiente debido a que es una capa inestable; los sistemas de antenas son de más fácil construcción, pero aún siguen siendo de grandes dimensiones. Su alcance es muy variado y depende de la potencia con la cual se transmite; en esta banda empiezan a aparecer zonas de no-captación de la señal debido a los brincos múltiples.

A medida que aumenta la frecuencia, también aumenta la atenuación que sufren las ondas electromagnéticas. Por lo tanto en la banda de las frecuencias medias, la atenuación de la onda terrestre ya juega un papel mucho más importante que en las frecuencias bajas y muy bajas. A distancias mayores que unos pocos cientos de kilómetros la onda terrestre se atenúa tanto, que pierde toda utilidad como medio de comunicación. Para mayores distancias, únicamente la onda ionosférica resulta de utilidad.

Dentro de esta banda se halla la banda utilizada para los servicios de radiodifusión, entre 550 y 1600 KHz. En la radiodifusión no sólo se desea obtener señales inteligibles, sino también que estas señales tengan cierto grado de fidelidad; quiere decir que el ancho de banda a transmitirse es mayor que en las comunicaciones telefónicas y telegráficas, y la distorsión tolerable es mucho mejor. En radiodifusión, el alcance práctico de la onda terrestre no va más allá de 80 a 160 Km alcance que varía según la frecuencia, la potencia emitida, la conductibilidad del terreno, y el nivel de ruidos de la zona de recepción. El área cubierta por la onda terrestre se divide en dos zonas: la zona primaria, que durante el día y la noche recibe señales de buena intensidad y calidad, y la zona secundaria, algo más alejada, que durante el día tiene buena recepción, pero durante la noche recibe señales de calidad muy variable, con fuerte distorsión y desvanecimientos, a veces completos. La onda ionosférica de estas frecuencias se atenúan tanto durante el día, que no juega papel alguno en la propagación. En cambio, durante la noche la onda ionosférica llega con una intensidad y calidad relativamente buena a distancias hasta de más de 1,500 Km, según la potencia del transmisor. La calidad variable de la señal en la zona secundaria durante la noche se debe justamente a que en esta zona llega también una fuerte onda ionosférica, la que produce los desvanecimientos al combinarse con la onda terrestre, y la distorsión debida al desvanecimiento selectivo de las diferentes frecuencias que componen las señales de radiodifusión.

Aplicación de la banda: Utilizada por los radioaficionados y radioayudas a la navegación, se empieza a utilizar en la banda de A. M. comercial.

Radiodifusión de Amplitud Modular (AM)

La banda de 535 a los 1605 KHz se usa para radiodifusión de sonido de amplitud modulada (AM). Esta banda se divide en 107 canales de 10 KHz de ancho. Las frecuencias de las portadoras se asignan a intervalos de 10 KHz de 540 a 1600 KHz.

Se distinguen 3 tipos de canales

a.- Canales claros, clase IA, para estaciones de gran potencia, de 50 KW. No tiene canales adyacentes y su servicio se extiende a áreas grandes y grandes distancias. Usa la onda del firmamento también.

Clase IB, cuya potencia no debe ser menor de 10 KW ni más de 50 KW, permitiéndosele operación duplicada por la noche. Estaciones clase II; operan en canales claros de potencia

menor de 0.25 KW ni más de 50 KW, excepto que las clases IIA no operan durante la noche a menos de 10 Kw. Debe usar antena direccional para no interferir con las clases I o II.

b.- Canales Regionales, para estaciones de potencia intermedia. Se denominan clase III y se subdividen en clase IIIA para potencias no menores de 1KW y no más de 5 KW. La clase IIIB con potencia no menor de 0.5 KW y no mayor de 5 KW durante el día. El área de servicio es grande pero limitada.

c.- Canales Locales para estaciones de baja potencia llamados estaciones clase IV con servicio primario sólo en las ciudades y áreas contiguas suburbanas o rurales, con potencia no menor de 250 W. El límite superior es de 250 W por la noche y 1 KW en el día.

3.7 BANDA HF (Alta frecuencia)

Características de propagación: Propagación semejante a la banda anterior, pero con una mayor atenuación tanto en la capa ionosférica como en la superficie de la tierra, su principal camino de propagación es por la ionosfera teniendo mejor captación durante la noche. Los sistemas de antenas son más variados y las potencias son más pequeñas.

Las frecuencias superiores a los 3 MHz se atenúan tanto, que la onda terrestre pierde toda importancia, salvo para las comunicaciones a muy corta distancia, como es el caso en las comunicaciones dentro de una ciudad, y sobre el mar, para comunicaciones entre estaciones costeras y barcos que están cerca de la costa. Las comunicaciones a mayor distancia dependen exclusivamente de la onda ionosférica. Para conseguir la óptima propagación con la onda ionosférica entre dos puntos, debe elegirse la frecuencia de operación con sumo cuidado. La óptima frecuencia varía con el tiempo y las condiciones de la ionosfera. La frecuencia más favorable, desde el punto de vista de la intensidad de la señal recibida, sería justamente inferior a la máxima frecuencia utilizable, o sea la frecuencia que todavía resulta reflejada por la ionosfera. Como estas frecuencias varían constantemente, se elige una frecuencia que es menor entre un 10 y 15% a la frecuencia máxima utilizable, y esta frecuencia se llama entonces frecuencia óptima de trabajo.

La propagación de las ondas cortas se efectúa por reflexiones entre las diversas capas de la ionosfera y la superficie de la tierra. El camino que recorre una onda al sufrir una reflexión en la ionosfera se llama salto, y al haber varias reflexiones, habrá saltos múltiples. Las zonas que quedan entre la estación transmisora y el punto de recepción y entre los subsiguientes puntos alcanzados por otros saltos, se llaman zonas de silencio. Las señales que llegan a estas zonas son muy variables y en general tienen una intensidad que no llega a ser satisfactoria. En la figura 3.1 se han representado los posibles caminos de propagación en las capas de la ionosfera

Los posibles caminos que se representaron en la figura 3.1 no son todos válidos para una única frecuencia, sino para varias frecuencias, ya que si una frecuencia determinada es reflejada, por ejemplo, en el punto K de la capa E, no podrá llegar bajo el mismo ángulo de incidencia hasta las capas F1 y F2. Lo mismo puede decirse de la reflexión en el punto G de la capa F1. Esto depende naturalmente también del ángulo de incidencia. En este caso entra en juego la cantidad de lóbulos en el plano vertical que tiene el diagrama de irradiación de la antena transmisora. Generalmente se trata de llegar al punto de recepción en lo posible por un solo camino, para así evitar los desvanecimientos producidos por varias señales que recorren caminos de diferente longitud. A fin de conseguir esto, se diseñan las antenas para que irradian con un máximo la intensidad a un ángulo igual al ángulo de incidencia en la capa ionizada que se desea

utilizar, suprimiéndose en lo posible los ángulos más altos, para así evitar las reflexiones de las capas superiores de la ionosfera.

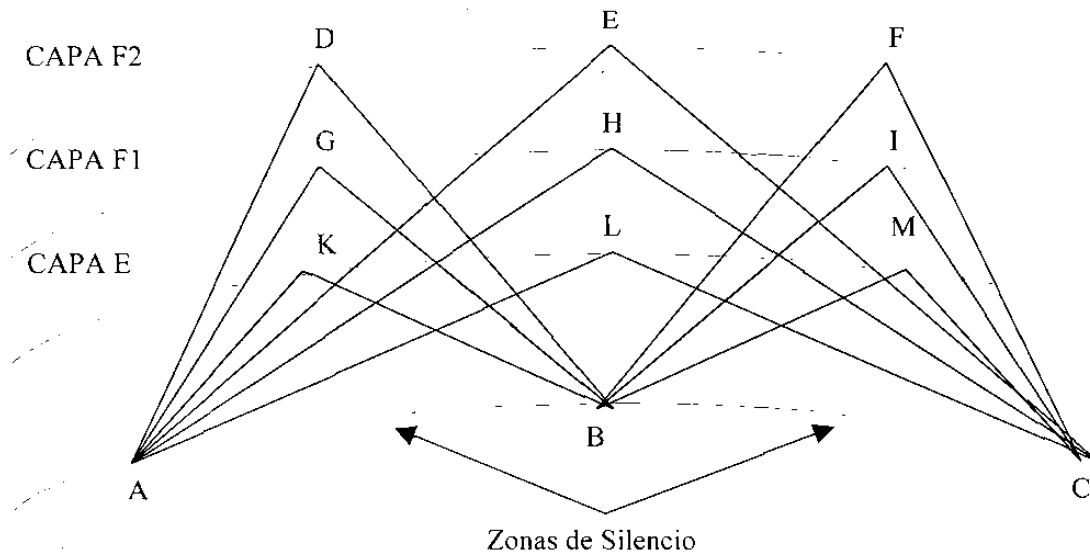


Fig. # 3.1

Aplicaciones de la banda: En la banda ciudadana, sistemas de radioayuda a la navegación radio amateur ó radio aficionados; ésta banda no esta restringida para uso común.

3.8 BANDA VHF (Muy alta frecuencia).

Características de propagación: Por línea directa o por línea de vista, alta atenuación por la ionosfera así como en la superficie de la tierra, su alcance aproximado por la curvatura de la tierra es de 50 Km (Depende de la topografía del lugar los sistemas de antena son muy pequeños y versátil su construcción).

Dentro de esta banda se encuentra la gama de frecuencias reservadas para la transmisión de televisión que por estar tan familiarizados con ella, nos detendremos un poco en su análisis. En estas frecuencias, la onda terrestre sufre tanta atenuación que pierde toda importancia aún para los alcances cortos. Se usa exclusivamente la onda directa y las ondas ionosféricas casi no existen, ya que las frecuencias son muy superiores a la frecuencia crítica de cualquiera de las capas de la ionosfera.

El rayo directo está limitado por el horizonte de la tierra, pero debido a leves refracciones en la atmósfera, el alcance es algo mayor. Estas refracciones tienen el mismo efecto, en lo que concierne al alcance, como si el radio de la tierra fuera mayor en un factor igual a $4/3$. En la figura 3.2 vemos un sector de la esfera terrestre, cuyo radio es de 6,370 Km. Multiplicándolo por $4/3$, para dar cuenta del mayor alcance por refracciones, tenemos un radio efectivo de 8,470 Km h_1 es la altura de la antena al horizonte. La distancia entre la antena A y el horizonte (B) es de acuerdo con el teorema de Pitágoras:

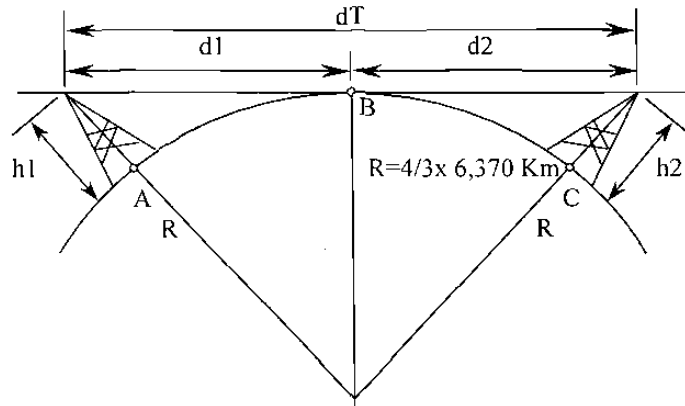


Figura # 3.2

- h_1 y h_2 Altura de las antenas tanto Tx como Rx dada en Mts.
 d_1 y d_2 Distancia de antenas tanto Tx como Rx a la superficie de la tierra dada en Km.
 R Radio de la Tierra 6,370 Km.
 d_T Distancia total del enlace.
 K Factor de corrección a la Superficie de la tierra, debido a las refracciones.

$$K = 4/3$$

Debido a que los dos triángulos de la figura anterior son exactamente iguales analizaremos solamente uno de ellos entendiéndose que el análisis del otro es el mismo.

$$d_T = d_1 + d_2$$

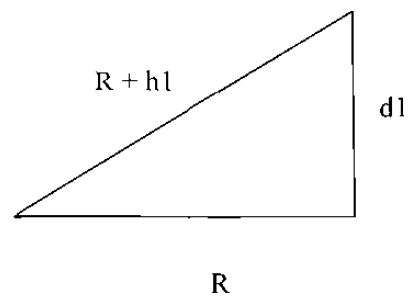
$$(R + h_1)^2 = R^2 + d_1^2 \text{ Pitagorás}$$

$$R^2 + 2Rh_1 + h_1^2 = R^2 + d_1^2$$

$$d_1^2 = R^2 + 2Rh_1 + h_1^2 - R^2$$

Donde se elimina el radio, quedando:

$$d_1 = \sqrt{2Rh_1 + h_1^2} \quad (\text{Ec. 3.1})$$



Como la altura de las antenas es muy pequeña en comparación con el radio de la tierra, podemos descartar el término h_1^2 de la ecuación (3.1), ya que al elevar a este valor al cuadrado, será aún más pequeño, y el error que cometemos no reviste importancia. De manera que:

Consideramos

$$\begin{aligned} h_1 &\lll R \\ h_1 &\text{ tiende a } 0 \end{aligned}$$

$$d_1 = \sqrt{2 R h_1} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Introducimos el valor efectivo del radio de la tierra, con el correspondiente factor de corrección $4/3$, y tenemos:

$$\begin{aligned} d_2 &= \sqrt{2 (6,370) (4/3) h_1} \\ d_1 &= 130.3 h_1 \quad (\text{Ec. 3.3}) \end{aligned}$$

En esta ecuación

d_1 = Dada en Km

h_1 = Dada en Mts.

Dado que la altura es siempre muchísimo menor que la distancia, conviene transformar esta ecuación de manera que podamos usar h_1 en metros, y obtengamos d_1 en kilómetros. Al poner h_1 en metros debemos dividirlo por 1,000 para mantener la correcta relación de unidades, o sea que dividimos el miembro derecho de la ecuación. (3.3) por:

$$\sqrt{1,000} = 31.6, \text{ y tendremos;}$$

$$\begin{aligned} d_1 &= 139.3 \sqrt{(h_1 / 1000)} \\ d_1 &= 4.12 \sqrt{h_1} \quad (\text{Ec. 3.4}) \end{aligned}$$

Para la distancia entre la antena (C) y el horizonte (B) obtenemos de manera similar la siguiente ecuación:

$$d_2 = 4.12 \sqrt{h_2} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

El alcance total entre estas dos antenas es por lo tanto:

$$\begin{aligned} d_T &= d_1 + d_2 \\ d_T &= 4.12 \sqrt{h_1} + 4.12 \sqrt{h_2} \\ d_T &= 4.12 \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \quad (\text{Ec. 3.6}) \end{aligned}$$

Donde d_T es el alcance máximo en kilómetros, h_1 y h_2 son las altitudes en metros sobre el nivel del mar de cada antena.

Hacemos notar nuevamente que la altura de las antenas no es la altura sobre el suelo, sino la altura sobre el nivel del mar, de manera que estaciones terrestres que se encuentran a bastante altitud sobre el nivel del mar, tendrán un alcance mayor que estaciones que están al nivel del mar.

En las frecuencias muy elevadas, cualquier objeto suficientemente grande resulta opaco a las ondas electromagnéticas, etc., producen sombras a las ondas electromagnéticas, y resulta muy difícil obtener recepción detrás de estos objetos.

Ejemplo: Determine $h_2 = ?$

Si $dT = 20$ Kms, $h_1 = 60$ mts.

$$h_2 = \left(\frac{dT}{4.12} - \sqrt{h_1} \right)^2$$

$$h_2 = \left(\frac{20}{4.12} - \sqrt{60} \right)^2$$

$$h_2 = 8.36 \text{ mts}$$

$$dT = 4.12 \left(\sqrt{8.36} + \sqrt{60} \right)$$

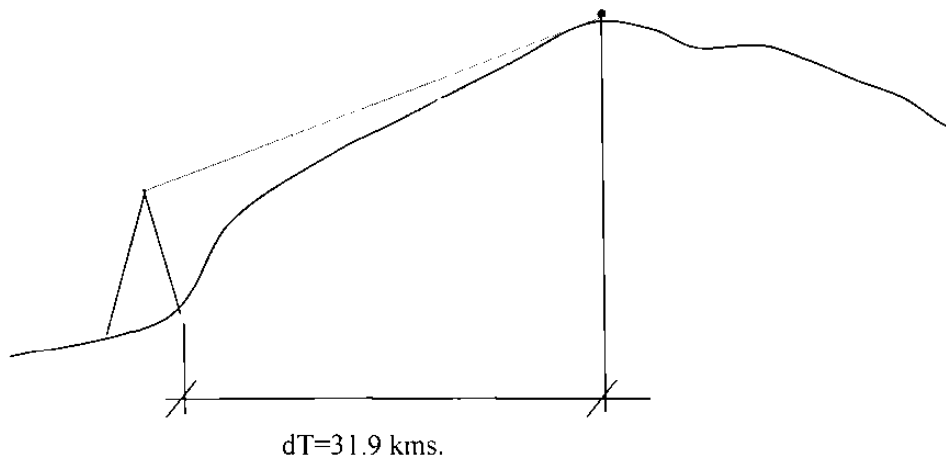
$$dT = 43.82 \text{ Km}$$

Sustituyendo $h_2 = 0$

$$dT = 4.12 \left(\sqrt{0} + \sqrt{60} \right)$$

$$dT = 31.90 \text{ Km}$$

Encontrar la mínima altura de la Torre



Ejemplos:

I.- Determine:
h1 = ? mts

Sí
dT = 50 Km
h2 = 20 mts.

II.- Determine:
dT = ? Km

Sí
h1 = 25 mts.
h2 = 30 mts.

Soluciones:

1. -

dT = 50 Km
h2 = 20 mts.
h1 = ?

$$[\sqrt{h1}]^2 = [(dT / 4.12) - \sqrt{h2}]^2$$

$$h1 = \{ (50 / 4.12) - \sqrt{20} \}^2$$

$$h1 = 12.13 - 4.47$$

$$h1 = 58.64 \text{ mts.}$$

II. - dT = ?

h1 = 25 mts.

h2 = 30 mts.

$$dT = 4.12 \left(\sqrt{h1} + \sqrt{h2} \right)$$

$$dT = 4.12 \left(\sqrt{25} + \sqrt{30} \right)$$

$$dT = 43.16 \text{ Km}$$

3.9 BANDA UHF (Ultra alta frecuencia).

Características de propagación: semejante a la banda UHF, pero con una alta atenuación a la ionosfera y a la superficie de la tierra. Los sistemas de antena son muy pequeños y de fácil construcción y debido a que es onda directa su propagación, no requiere de altas potencias de transmisión; se transmite en banda de microondas.

En general podemos decir que esta banda tiene características de propagación similares a las frecuencias muy elevadas. La ecuación (3.6) sigue siendo válida para calcular el alcance máximo, con tal que no haya obstáculos en la línea de propagación. La atenuación terrestre y atmosférica es muy pronunciada, pero esto puede componerse en parte por la alta directividad de las antenas para el caso de las comunicaciones entre puntos fijos.

Aplicaciones de la Banda: Televisión, Satélite, Radar, Radioenlaces de comunicación urbana (Bancos, Policías, Etc.)

3.9.1 RADIODIFUSIÓN DE MODULACIÓN DE FRECUENCIA.

Se le asigna el espectro de radio frecuencia de 88 a 108 MHz, dividido en 100 canales de 200 KHz cada uno. Se les denomina canal 201, (cuya frecuencia de la portadora es 88.1 mhz) a canal 300 (107.9 MHz).

Las intensidades de campo eléctrico son de aproximadamente 10 V/m por KW de potencia radial a unos 2 Km de la antena transmisora con una altura de 150 m y de la antena transmisora con una altura de 150m y de cerca 10 m para la antena receptora. En forma tabulada:

E V/m/1kw	Rad	Distancia Km.	Altura Antena Transmisora	Altura Antena en metros
5 10		2	150 m	10
2 3x10 a 7x10	3	15	30 a 100 m	10
3 40 a 3x10		45	30 a 1000 m	10
2 8 a 5x10		100	30 a 1000 m	10
-1 4x10		300	30 a 1000 m	10

Las clases de servicio son:

Estación clase A: para pequeñas áreas urbanas, suburbanas y rurales, con una potencia efectiva radiada no mayor de 3 kw y una altura de la antena sobre el terreno de 100 m (Potencia mínima de 100 W).

Estaciones o servicios clase B y C. Cubren áreas urbanas grandes. Las estaciones clase B no deben radiar una potencia efectiva mayor de 50 kw y una altura de la antena sobre el terreno promedio de 150 mts. (Potencia mínima de 5 kw).

Las estaciones clase C deben operar con una potencia efectiva radiada no mayor de 100 kW y una altura de la antena de 600 m (Potencia mínima de 25 kw).

3.9.2 TELEVISIÓN.

Se autorizan 86 canales de 6 MHz de ancho de banda para uso comercial y educativo.

Los canales se distribuyen en dos bandas:

Banda de frecuencia muy alta (VHF), donde a su vez se reconocen las bandas bajas y altas. Los canales 2 a 6 (el canal 1 no existe) distribuidos de 54 a 72 y de 76 a 88 MHz, se denominan de banda baja. Los canales 7 a 13 localizados de 179 a 216 Mhz son los de banda alta.

Banda de frecuencia extra alta, en esta banda se localizan los canales 14 a 84 en el rango de frecuencia de 470 a 890 MHz.

Los requerimientos de intensidad de campo eléctrico para la señal vs. la distancia es muy similar a los del FM.

3.10 BANDA SHF (Super alta frecuencia)

Características de propagación: Semejante al de luz de onda directa; propagación nula por la ionosfera y la señal no regresada a la superficie de la tierra. Alta atenuación por onda superficial, utiliza como guías de transmisión las guías de onda de todos tipos y longitudes variables. Alta atenuación por cable y para usar cables se debe utilizar en distancias de muy pocos metros.

Dentro de esta banda están las frecuencias utilizadas en radar y sistemas de enlace por microondas. La propagación es como en el caso de las frecuencias muy elevadas y ultra elevadas, por rayo directo, y las condiciones atmosféricas tienen aún mayor influencia sobre la propagación. Los sistemas de antenas empleados en varias direcciones, y por lo tanto resulta posible enviar casi toda la potencia del transmisor por un haz muy angosto, lo que compensa bien la gran atenuación que sufren estas ondas.

Aplicaciones de la banda: Comunicación vía satélite, enlaces de microondas urbanas, radio ayudas a la navegación.

3.11 BANDA EHF (Extremadamente altas frecuencias)

Características de propagación: Semejante a la de UHF y utiliza como medio de transmisión la Fibra Optica.

En estas frecuencias hay tanta atenuación atmosférica, que prácticamente resultan inútiles para comunicaciones seguras. Sus características de propagación son casi idénticas a las de la luz. Esta banda podría contener una enorme cantidad de canales, debido a su gran anchura, pero hasta el presente, la técnica actual no ha sido capaz de producir sistemas de suficiente potencia de transmisión y los receptores se encuentran todavía en su fase experimental. Sin embargo, por medio de guías de onda es posible transmitir estas frecuencias con muy poca atenuación. Es de suponer que el futuro traerá grandes progresos en este sentido.

Aplicaciones de la Banda: Experimental

NOTAS:

El Espectro de Radio Frecuencia nos ayuda para poder determinar ciertas características de los sistemas, teniendo en cuenta ya sea su banda ó su frecuencia. Dentro de estas características, las más importantes pueden considerarse. El camino de propagación, los sistemas

de antena, la eficiencia de la banda y el alcance característico entre otras.

Banda	Frecuencia	Longitud	Características de programación	empleo
Frecuencias muy bajas VLF	10-30 KHz	30-10Km	Atenuación muy baja y Poco variable, lo que da Alta seguridad. Propagación buena por onda terrestre y ionosférica.	Circuitos fijos de muy -- larga distancia en servicios continuos. Sistemas de antenas muy -- grandes. Emisores muy potentes.
Frecuencias bajas LF	30- 300KHz	10-1 Km	Propagación similar a las VLF, pero más atenuación durante el día.	Comunicaciones a larga distancia. Sistemas de ayuda a la navegación marítima y aeronáutica.
Frecuencia media MF	300-3,000 KHz	1,000-100m	Mayor atenuación de la onda terrestre y ionosférica. Atenuación muy -- variable, durante el día mayor que durante la noche, mayor en verano que en invierno.	Radiodifusión. Comunicaciones a corta distancia Servicios aeronáuticos, marítimos y policiales.
Frecuencias elevadas HF	3-30 MHz	100-10 m	Principal propagación por onda ionosférica. Atenuación es muy variable. Por saltos múltiples se llega a muy grandes distancias.	Se emplea para comunicaciones de todo tipo en gran variedad de alcance.
Frecuencias muy elevadas VHF	30-300 MHz.	10-1 m	Propagación útil únicamente por onda directa. no hay reflexiones en la ionosfera.	Comunicaciones a poca distancia entre puntos--fijos. Comunicaciones - entre aeronaves y estaciones terrestres. Radio ayudas a la aeronavegación. Televisión F.M. Comercial
Frecuencias ultra elevadas. UHF	30-3,000MHz	100-10 cm	Propagación similar a las VLF, pero más atenuación atmosférica.	Comunicaciones a muy corta distancia. Sistemas de enlace por microondas. Radar, Televisión. Radioayudas a la aeronavegación.
Frecuencias super elevadas. SHF	3,000-30,000 MHz	10-1 cm	Propagación similar a la luz. Muy alta atenuación.	Sistemas de enlace por microondas. Radar.
Frecuencias extra elevadas EHF	30 GHz a 300GHz	1cm – 1mm	Propagación muy similar a la de la luz, mayormente se propaga con fibra óptica	Enlaces de microondas y uso experimental

CAPITULO 4

PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

4.1 INTRODUCCIÓN

En el diseño de las antenas se busca siempre la mayor efectividad, es decir, que radie el mayor porcentaje de energía que llegue a ella, o capten la mayor energía posible para unas frecuencias determinadas. Para ello tienen que cumplir una serie de requisitos, como son dimensiones, impedancias etc.

En este capítulo se estudiarán estas características. Como primer paso se definirá la antena isotrópica que es una antena ideal, pero sirve como referencia para las antenas reales.

Una vez definida la antena isotrópica se desarrollarán los conceptos de los diferentes parámetros de la antena. Estos parámetros pueden ser agrupados en:

- Ganancia
- Patrones de radiación
- Impedancia
- Parámetros eléctricos
- Ancho de banda
- Potencias radiadas

Como un anexo a este capítulo se definirá que es el perfil topográfico y su elaboración

4.2 ANTENAS ISOTROPICAS

Las características de las antenas son con frecuencia expresadas en función de algunas antenas de referencia, ya que esto es más fácil que establecerlas directamente. La referencia estándar hoy día es la antena isotrópica.

Se llama antena isotrópica a una antena imaginaria que radiase igual energía exactamente en todas las direcciones; esta antena estaría en el centro de una esfera en la que todos los puntos de su superficie recibirían la misma cantidad de energía, como se muestra en la figura 4.1.

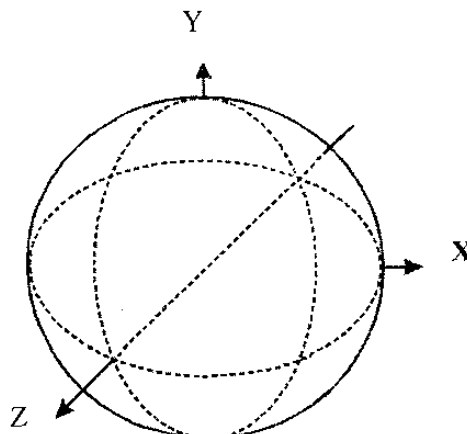


Fig. # 4.1

Como se muestra, esta es una antena ideal donde su eficiencia es del 100% y su ganancia es 1.

4.3 DENSIDAD DE POTENCIA

Para una antena isotrópica la densidad de potencia es constante alrededor de ella y se obtiene de la siguiente formula:

$$DP = \frac{Pt}{4\pi R^2} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

P_t	Potencia total radiada por la antena	(w)
$4\pi R^2$	Área de la esfera	(m^2)
D.P.	Densidad de potencia en un punto "P" a una distancia "R" del transmisor	(w/m^2)

Sin embargo para una antena real la cantidad usada para describir la potencia asociada con la OEM es el vector de Poynting que se interpreta como una densidad de potencia instantánea medida en watts / m^2 . Lo único que se puede demostrar rigurosamente es que la integración del vector de Poynting sobre una superficie cerrada proporciona la potencia total que atraviesa la superficie en un sentido hacia fuera. Sin embargo la interpretación como una densidad de potencia no está mal encaminada, especialmente cuando se aplica a campos que varían sinusoidalmente. Sin embargo se pueden encontrar resultados extraños cuando el vector Poynting se aplica a campos constantes en el tiempo.

4.4 GANANCIA Y DIRECTIVIDAD

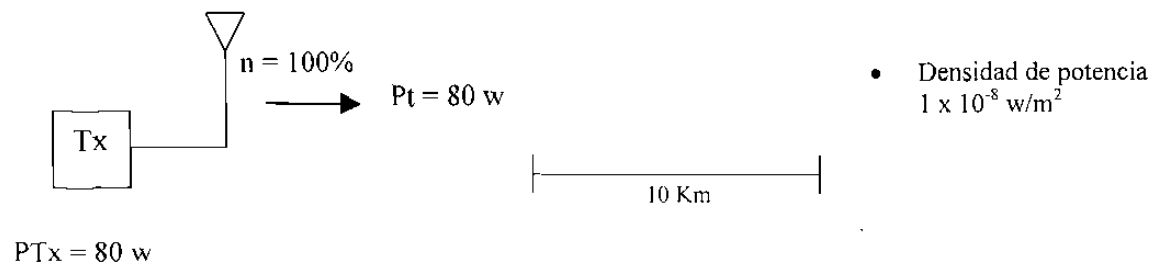
Enseguida se definirán los conceptos de ganancia y directividad, comparando a una antena real con la antena isotrópica.

4.4.1 GANANCIA DIRECTIVA

Cuando en dos antenas se tiene la misma potencia total radiada y una de ellas radia menos potencia en cierta dirección entonces radiará más en otras direcciones por lo que se define la ganancia directiva como la razón de la densidad de potencia (W/m^2) radiada en esa dirección a cierta distancia determinada, a la densidad de potencia que se radiara a la misma distancia por una antena isotrópica radiando la misma potencia total. Esta ganancia direccional puede ser diferente en diferentes direcciones.

Para determinar la ganancia directiva de una antena dada, es necesario calcular o medir la densidad de potencia en la dirección requerida (y a una cierta distancia) y entonces calcular la densidad de potencia (a la misma distancia) para una antena isotrópica que radie la misma potencia que la antena dada.(Figura 4.2)

ISOTROPICA



REAL

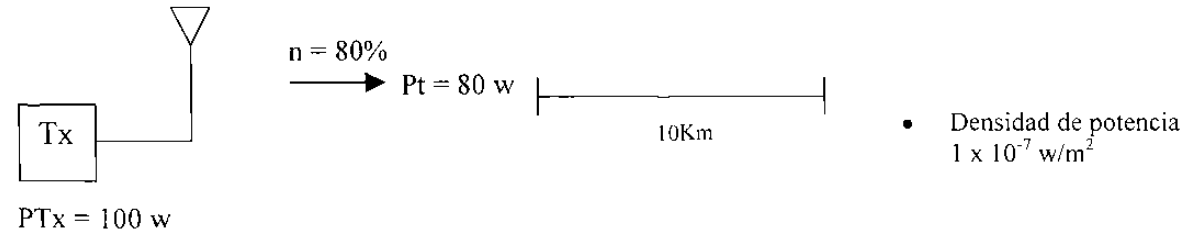


Fig. # 4.2

$$G_D = \frac{D.P_r}{D.P_i} \tag{Ec. 4.2}$$

donde

- D.P. r \longrightarrow Densidad de potencial real.
- D.P. i \longrightarrow Densidad de potencia isotrópica.

4.4.2 DIRECTIVIDAD

El hecho de que la antena concentre la potencia radiada en un área del espacio o el absorber más efectivamente la energía incidente de un área del espacio, se denomina directividad.

La razón de la densidad de potencia máxima al promedio radiada por la antena isotrópica define a la ganancia direccional máxima o directividad. (Figura 4.3)

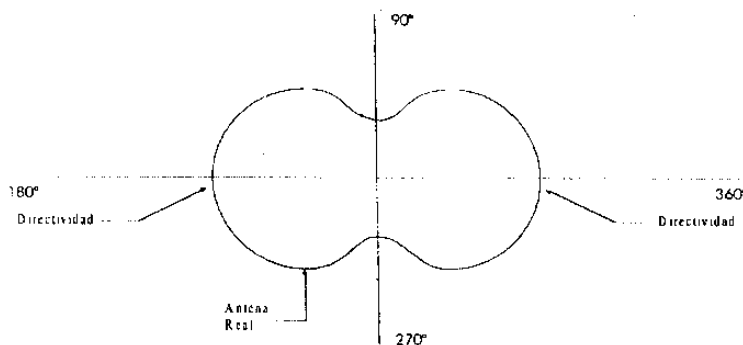


Fig. # 4.3

$$D = \frac{D.P.r}{D.P.i}$$

Esta ecuación es la 4.2, pero indica el valor máximo de ganancia directiva.

Si un transmisor radia una potencia P_t (watts) uniformemente en todas direcciones (radiador isotrópico), la densidad de potencia P (w/m^2) en un punto a una distancia R del transmisor es la indicada en la ecuación 4.1

Si se desea calcular la densidad de potencia máxima de una antena real, a partir de la medición de un campo eléctrico a una distancia dada, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$D.P.r = \frac{E_{rm}^2}{2\eta}$$

Donde:

E_{rm} Medición de la intensidad de campo eléctrico (mV/m)
 η Impedancia del espacio libre (377 ohms, o 120π)

Ejemplo. Una antena radia una potencia total de 100w. En la dirección de radiación máxima a 10 Km. se mide el campo eléctrico resultando de 12 mV/m. ¿Cuál es la directividad de la antena suponiendo propagación en el espacio libre?

La densidad de potencia máxima a 10 Km. es:

$$D.P.r = \frac{(12 \times 10^{-3})^2}{(2)(377)} = 191 \frac{nW}{m^2}$$

La densidad de potencia promedio es:

$$D.P.i = \frac{100}{(4)\pi(10,000)^2} = 79.6 \frac{nW}{m^2}$$

Entonces la directividad es:

$$D = \frac{D.Pr}{D.Pi}$$

$$D = \frac{191.0}{79.6} = 2.4$$

4.5 GANANCIA DE POTENCIA

Se define como la razón de la potencia alimentada a una antena isotrópica, para desarrollar una cierta intensidad de campo a una cierta distancia; a la potencia que se necesitaría alimentar a una antena real para desarrollar la misma intensidad de campo, a la misma distancia, en dirección máxima de radiación.

Si esta definición es comparada con la definición de directividad, se verá que la única diferencia real es que para la directividad se considera la potencia radiada por la antena directiva, mientras que para la ganancia de potencia se toma en cuenta la potencia alimentada a la antena. Expresando esto en forma más simple, los dos términos son idénticos, excepto que la ganancia de potencia toma en cuenta las pérdidas de la antena, esto puede ser descrito:

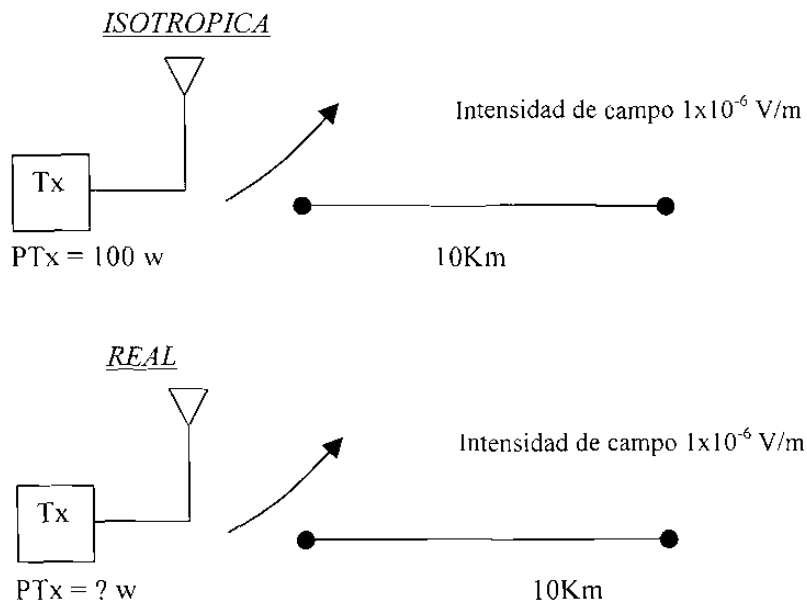


Fig. # 4.4

La potencia radiada por la antena real es ligeramente inferior a la potencia de entrada, debido a las pérdidas en la antena. Otra definición que supone estas pérdidas nulas es la que define la ganancia directiva D tal que $G = \eta D$, donde η es menor que 1, por lo que G es ligeramente menor que D . En la

práctica se usa generalmente la ganancia de potencia G y es expresada como un número sin dimensiones o en decibelios.

$$GP = \eta D \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

GP = Ganancia de potencia.

η = Eficiencia de la antena involucrada, y tiene un valor de 1 para la antena sin pérdidas (isotrópica).

D = Directividad (máxima ganancia directiva).

4.6 RESISTENCIA DE LA ANTENA

La resistencia de una antena tiene dos componentes; su resistencia de radiación, la cual considera la potencia que es convertida en ondas electromagnéticas, y la resistencia debido a las pérdidas en la antena y se explicaran a continuación:

- a) Resistencia de Radiación.
- b) Resistencia de Pérdidas.

4.6.1. RESISTENCIA DE RADIACIÓN

Es definida como la razón de la potencia radiada por la antena al cuadrado de la corriente en el punto de alimentación. Definiéndola de otra manera podremos decir que es la resistencia que, si reemplazara a la antena, deberá disipar la misma potencia que la que la antena radía.

$$R_r = \frac{\text{Potencia radiada}}{(\text{Corriente radiada})^2} \Omega \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde: R_r = Resistencia de radiación en ohms.

Ejemplo.

Una antena radia 15 w para una corriente de entrada de 400 mA.

Calcule la resistencia de radiación.

Solución:

$$\begin{aligned} R_r &= \text{Potencia radiada} / (\text{corriente de entrada})^2 = \\ &= 15 \text{ w} / (0.4\text{A})^2 = 15/0.16 = 93.75 \text{ ohm. } P/I^2 \text{ ohms.} \end{aligned}$$

4.6.2 RESISTENCIA DE PERDIDAS

Además de la energía que es radiada por la antena, la potencia puede ser disipada como resultado del calentamiento de los conductores, en los aisladores, en la tierra y en objetos situados cerca de la antena, tales como alambres ó algunas otras antenas. A esta potencia de pérdidas corresponde una resistencia pura, llamada resistencia de pérdidas.

Dicha resistencia se define como:

$$R_{per} = \frac{P_{per}}{I^2} = \frac{PA - Pr}{I^2} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Excepto para bajas frecuencias; la profundidad de piel = $\frac{2}{\sqrt{W\mu\sigma}}$ es mucho más pequeño que el radio del conductor y entonces la resistencia de pérdidas para una antena de longitud L que porta una corriente uniformemente axial es:

$$R_{per} = \frac{L}{2\pi a} R_s \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde:

L = Longitud del cable.

a = Radio del cable.

$$R_s = \frac{W\mu}{2r}$$

4.6.3 RESISTENCIA TOTAL ACTIVA

La potencia alimentada a la antena por el transmisor (Pa), se obtiene con la suma de la potencia de radiación (Pt) y la potencia de pérdidas (Pp).

$$Pa = Pt + Pp$$

$$Pa = I^2 (Rr + Rp)$$

$$Ra = Rr + Rp$$

$$Pa = I^2 Ra$$

Donde:

Pa = Potencia total activa.

Pt = Potencia radiada.

Pp = Potencia pérdida.

Rr = Resistencia pérdida.

I² = corriente en el punto de alimentación.

La resistencia que corresponde a la potencia suministrada a la antena, recibe el nombre de resistencia activa total de la antena.

$$Ra = \frac{Pa}{I^2} = Rr + Rp \quad (\text{Ec. 4.7})$$

4.7 EFICIENCIA (η)

Ahora podemos definir la eficiencia o rendimiento de la antena (η) como la relación entre la resistencia de radiación sobre la suma de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas.

$$\eta = \frac{I^2 R_r}{I^2 (R_r + R_p)} = \frac{R_r}{(R_r + R_p)} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Se debe advertir, sin embargo, que esta definición de la eficiencia no es realmente muy útil aún cuando puede ser ocasionalmente conveniente. El hecho es que tanto R_r como la R_p son cantidades ficticias, derivadas de mediciones de corriente y potencia; haciendo sustituciones de los valores equivalentes en potencia y corriente.

$$\eta = \frac{P_t}{\frac{P_t}{I^2} + \frac{P_p}{I^2}} = \frac{P_t}{P_t + P_p} = \frac{P_t}{P_a} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde:

P_t = Potencia total radiada.

P_p = Potencia de pérdidas o disipada.

Observando la fórmula de eficiencia en función de las resistencias se ve que para aumentar el rendimiento de una antena es indispensable aumentar la resistencia de radiación y disminuir la resistencia de pérdidas.

4.8.- IMPEDANCIA DE ENTRADA DE UNA ANTENA

Es la impedancia en las terminales de entrada de la antena, que tiene en general una componente activa y una componente reactiva. La componente activa es, en esencia, la resistencia total de la antena (R_a) referida a sus terminales de entrada, en tanto que la componente reactiva (X_a) viene determinada por el hecho de que en la zona de inducción de la antena existe un campo eléctrico y otro magnético desplazados en fase 90° y que son portadores de energía reactiva. Para aumentar el rendimiento de una antena se ajusta para que resuene a la frecuencia del generador. Entonces $X_a = 0$, y la antena representa para el generador una carga puramente activa.

$$Z_a = R_a \pm j X_a \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Donde:

Z_a = Impedancia de la antena.

R_a = Valor resistivo (valor real).

X_a = Valor reactivo (valor imaginario).

$$Z_a \implies R_a, \therefore X_a \implies 0$$

4.9 ANCHO DE BANDA, ANCHO DE HAZ Y POLARIZACIÓN

Hay otros tres parámetros importantes, relacionados con el rango de frecuencias de operación, el grado de concentración de su radiación, y la orientación en el espacio de las ondas que radia.

4.9.1 ANCHO DE BANDA

El término de ancho de banda se refiere al rango de frecuencias sobre el cual la operación es satisfactoria, y es generalmente tomado entre los puntos de potencia media.

La impedancia del punto de alimentación de una antena construida con elementos gruesos, varía menos que en una de elementos delgados, lo que indica que una antena con un Q bajo permite mayor anchura de banda que una con un Q alto, la cual sólo podrá ser utilizada en un margen muy estrecho de frecuencias.

Podríamos dar otras definiciones de la anchura de banda de una antena, atendiendo a factores tales como ganancia, impedancia, etc. pero estas características van ligadas al margen de frecuencia de funcionamiento.

La ganancia y la impedancia limitan normalmente el margen del funcionamiento en la región de frecuencias de HF, mientras que el cambio de características limita el margen de las de VHF.

4.9.2 ANCHO DE HAZ

El ancho de haz de una antena es la separación angular entre los dos puntos de potencia media del patrón de radiación de densidad de potencia. Es también, por supuesto, la separación angular entre los dos puntos de 3 dB sobre el patrón de radiación de intensidad de campo de una antena, y es ilustrado en la figura 4.5 c. El término es usado más frecuentemente con antenas de haz angosto que con cualquier otra y se refiere al lóbulo principal.

a) Densidad de potencia watts/mt²

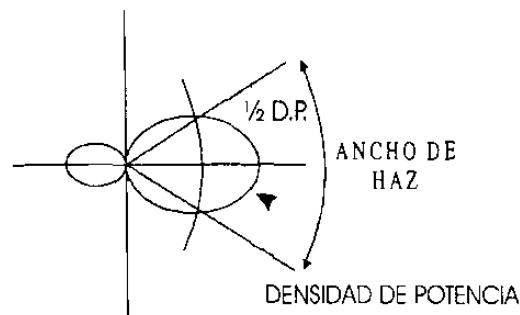


Fig. # 4.5a

b) Intensidad de campo mV/mt

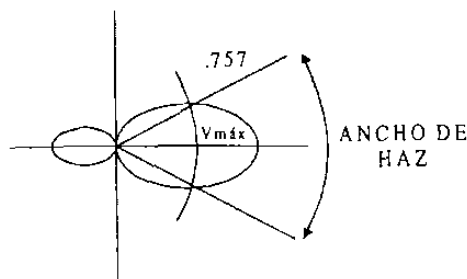


Fig. # 4.5b

c) Energía en dB

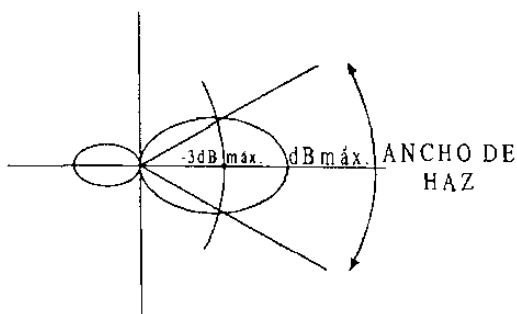


Fig. # 4.5c

4.9.3 POLARIZACIÓN

Una onda electromagnética emitida por una antena puede estar polarizada verticalmente u horizontalmente. En el primer caso, el vector del campo eléctrico es horizontal, por consiguiente, se dice que la onda está polarizada horizontalmente. Si se rotará el patrón 90°; el vector eléctrico sería vertical y la onda estaría verticalmente polarizada. Allí pues, el campo eléctrico determina la polarización de la onda (el vector del campo eléctrico) (Fig. 4.6). Una antena horizontal produce polarización horizontal, mientras que una antena vertical produce polarización vertical. La importancia de esto es que una onda horizontalmente polarizada inducirá voltaje máximo en una antena horizontal. Teóricamente una onda horizontalmente polarizada inducirá cero volts. en una antena vertical. Sin embargo, en la práctica, en HF y VHF, esto ocurre raramente porque hay algunos cambios de onda que se efectúan durante la propagación.

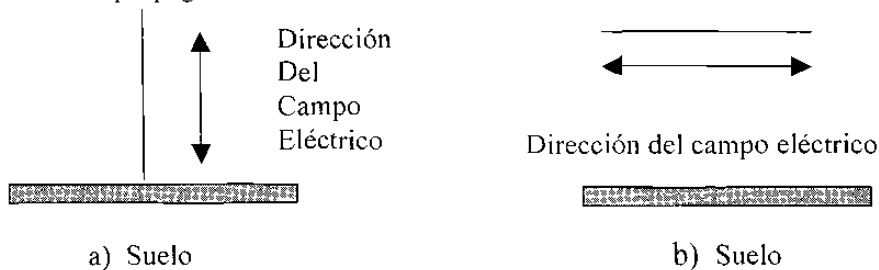


Fig.# 4.6 Polarización de una antena; a) vertical, b) horizontal.

Generalmente las antenas para VLF, LF y MF, así como muchas antenas de HF, son polarizadas verticalmente debido a la proximidad de la tierra, pero hay ventajas al utilizar antenas polarizadas horizontalmente a altas frecuencias, especialmente porque la mayoría del ruido producido por el ser humano tiene polarización vertical. Es también posible que la onda radiada por una antena sea de polarización circular o aún elíptica, lo cual significa que la polarización de la onda gira continuamente.

4.10 INTENSIDAD DE RADIACIÓN

A continuación se hace referencia sobre dos parámetros de gran importancia que definen con claridad la capacidad de radiación en función angular, y estos se dan a conocer a través de las siguientes definiciones:

4.10.1 RADIAN Y ESTERADIAN

La medida de un ángulo plano es un radián. Se define al radián como el ángulo plano con su vértice en el centro de un círculo de radio r que es subtendido por un arco cuyo radio es r . Una ilustración gráfica se ve en la figura 4.7 (a). Puesto que la circunferencia de un círculo de radio r es igual $2\pi r$, hay 2π rad ($2\pi r/r$) en un círculo completo.

Los steradianes se utilizan en 3 dimensiones. Son radianes al cuadrado (r^2). Puesto que el área de una esfera de radio r es $A = 4\pi r^2$ hay 4π steradianes ($4\pi r^2 / r^2$) en una esfera cerrada.

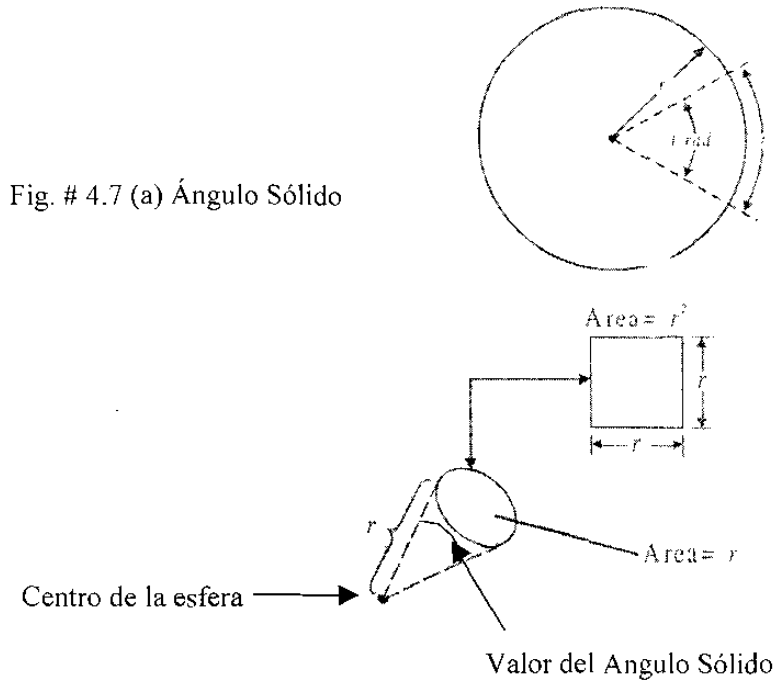


Fig. # 4.7 (a) Ángulo Sólido

Fig. # 4.7 (b) Ángulo Sólido

4.10.2 ANGULO SÓLIDO

Supongamos que en la superficie de una esfera, un área aproximadamente rectangular es marcada, como por ejemplo el cuadrángulo formado en la superficie de la tierra entre un par de latitudes y un par de longitudes; del centro de la esfera dibujamos líneas rectas a los esquemas de este cuadrángulo y unimos las líneas adyacentes por superficies planas. Estas superficies demarcan lo que se denomina como ángulo sólido en la misma forma que un par de líneas demarcan un ángulo plano. Fig. 4.2 (b). La magnitud del ángulo sólido es medida en steradianes. Es igual al área del cuadrángulo en la superficie de la esfera dividido por el cuadrado del radio de la esfera.

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Donde: Ω = Magnitud del ángulo sólido
 A = Área del cuadrángulo
 R = Radio de la esfera

Algunas equivalencias para el ángulo sólido son:

1 ángulo sólido en una esfera $\approx 4 \pi$ esteradianes

1 esteradian = (Ángulo sólido de una esfera) / (4 π)

1 esteradian = 1 rad² = (180 / π)² (grados²) = 3282.8064

entonces: 4 π esteradianes = 3282.8064 X 4 π = 41252.96 grados²

así:

1 ángulo sólido en una esfera = 41253 grados²

Una equivalencia importante para hacer cálculos la obtenemos del área infinitesimal de una superficie esférica en coordenadas polares:

$$dA = (r \text{ Sen}\theta \, d\phi)(r \, d\theta) = r^2 \text{ Sen}\theta \, d\theta \, d\phi$$

$$dA = r^2 \, d\Omega \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Donde :

dA = Diferencia de área de la superficie

r = radio o coordenada r

d Ω = diferencia del ángulo sólido (r Sen θ d ϕ)

4.10.3 INTENSIDAD DE RADIACIÓN

Se define como potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido. La intensidad de radiación es un parámetro de campo lejano y puede ser obtenida por la simple división de la potencia radiada entre ángulo sólido así.

147454

$$U = \frac{P_t}{\Omega} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Donde :

U = intensidad de radiación

(W / ángulo sólido)

P_t = potencia radiada

Ω = Angulo sólido

Si observamos la equivalencia de un ángulo sólido en coordenadas polares observamos que no influye la distancia [(Ω = Sen θ (φ) (θ)]. De aquí nos damos cuenta que la intensidad de radiación es independiente de la distancia.

Si queremos obtener la potencia total radiada por una antena simplemente integramos la intensidad de radiación .

$$Pr_{ad} = \int U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \text{Sen}\theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Donde:

$d\Omega$ Es el Angulo sólido del elemento

4.11.- PATRÓN DE RADIACIÓN

El patrón de radiación de una antena está definido como la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función del espacio de coordenadas.

Otra definición de esto podría ser que el patrón de radiación es una gráfica, usualmente en papel polar que muestra la forma en que el campo eléctrico (o el magnético) varía con respecto al ángulo θ, o el ángulo φ de las coordenadas esféricas. Físicamente, el patrón de radiación representa la distribución de la energía del campo electromagnético en el espacio.

Para fines prácticos se representan en dos dimensiones y se describen en términos de los planos de campo eléctrico E, campo magnético H y de la parte real del vector de Poynting (densidad de potencia, W/m²).

El patrón de intensidad de Campo Magnético H es semejante al de E porque en magnitud solo se afecta 377 ohms, aunque vectorialmente están a 90°.

El patrón de radiación propio de la antena se especifica con la expresión de la densidad de potencia a una distancia fija r en función de los ángulos θ y φ . Como $P = E^2 / 377 \text{ W} / \text{m}^2$, el patrón de radiación se puede expresar en términos de las unidades de intensidad de campo eléctrico, Volts/metro o de densidad de potencia Watts / m². Cuando se expresa en estas unidades se llama patrón absoluto.

El patrón de radiación nos provee de información tal como el ancho de haz de la antena, lóbulos de la antena, el alcance de la señal, así como determinar la temperatura de ruido de la antena.

En conclusión, los dos patrones de una importancia considerable por muchas antenas el patrón del campo eléctrico y del campo magnético. El principal plano E es un plano que contiene el vector del campo eléctrico y la dirección de la máxima radiación, y en el plano H es donde se encuentra el vector del campo magnético y la dirección de la máxima radiación.

Los diagramas de radiación se pueden obtener por medio de calculo o prácticamente haciendo mediciones de campo. Por ejemplo: podemos determinar el diagrama en el plano horizontal tomando lecturas en un instrumento medidor de radiofrecuencias (medidor de intensidad de campo), y desplazándose en un circulo con centro en el sistema de antenas. Si el instrumento medidor está construido para dar indicaciones que se relacionan linealmente con los ángulos de Azimuth, una grafica de esas lecturas con respecto a estos ángulos cereal diagrama de radiación en el plano horizontal. Los diagramas se trazan generalmente en términos de intensidad de campo relativa y no de intensidad de campo absoluta ya que el mayor interés está en la forma del diagrama.

Debemos conocer que la curva que representa un diagrama de radiación no es un límite, más allá del cual no existe señal. El diagrama simplemente nos representa como varía la intensidad relativa con la dirección desde la antena o sistema de antenas.

Para obtener una mayor información de los diagramas de radiación éstos son representados en coordenadas tridimensionales pero generalmente se obtiene suficiente información considerando la proyección del diagrama tridimensional sobre un plano vertical u horizontal.

Los diagramas de radiación pueden describirse de acuerdo con la forma del campo o de los campos que representa. La descripción según la forma del diagrama incluye generalmente la ubicación de los máximos y ceros y si es necesario se incluye también la ubicación de los lóbulos menores y de los mínimos. Existen varios tipos de diagramas, según la manera en que se radia la energía desde la antena. Cuando una antena o sistemas de antenas radia principalmente en dos direcciones se dice que el diagrama correspondiente es omnidireccional. Una antena, que radia principalmente en dos direcciones tiene un diagrama bidireccional. Si la radiación se concentra en una dirección se dice el diagrama es unidireccional.

Para especificar la intensidad de campo en varias direcciones de una antena, necesitamos algún método de describir como la intensidad de campo varía de una dirección a otra. Esta información puede ser tabulada o dada en forma de una gráfica. Dos tipos de gráficas son comúnmente usadas para especificar las características de las antenas y los contornas de intensidad de campo. Los dos se parecen mucho y no deben ser confundidos.

4.11.1.- TIPOS DE PATRONES DE RADIACIÓN

Los patrones de radiación de las antenas son divididos en tres tipos los cuales son:

- a) unidireccional
- b) bidireccional
- c) omnidireccional

A).- UNIDIRECCIONAL

Se le conoce de esta forma porque la radiación de la antena se concentra en una sola dirección y representado en una hoja polar, se observará que el lóbulo de energía se concentra en una dirección.
Densidad de potencia = W / m^2

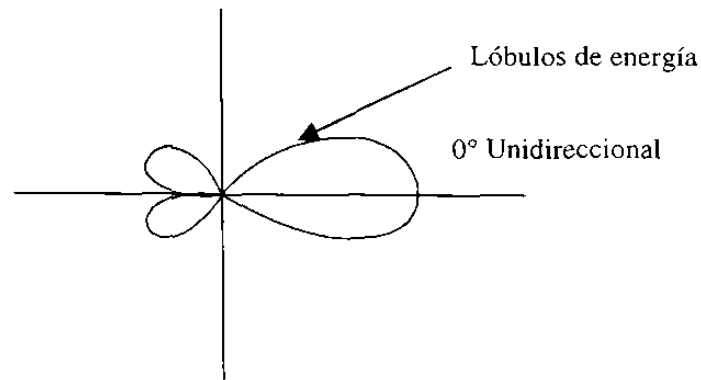


Fig. # 4.8

B).- BIDIRECCIONAL

Se le conoce así porque la antena radía en dos direcciones y su representación gráfica nos muestra los lóbulos de energía en dos direcciones.

Densidad de potencia = W / m^2

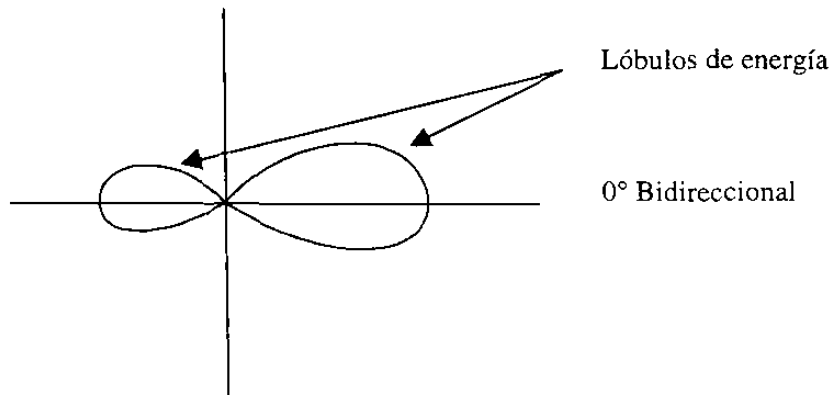


Fig. # 4.9

C).- OMNIDIRECCIONAL

Cuando una antena radía la energía igualmente en todas direcciones se dice que el diagrama correspondiente es omnidireccional.

Un patrón omnidireccional es uno que tiene amplitudes iguales en cada dirección en un plano de la antena. Este plano omnidireccional es usualmente horizontal para sistemas de comunicación.

Densidad de potencia = W / m^2



Fig. # 4.10

4.11.2 LÓBULOS

En general el patrón de radiación no es único sino que consta del lóbulo principal y lóbulos laterales y/o posteriores, definiéndose el nivel del lóbulo lateral o posterior como la razón en decibelios de la amplitud máxima del lóbulo principal a la amplitud máxima del lóbulo lateral o posterior.

Los lóbulos laterales son otro aspecto del patrón de radiación. En la práctica, es difícil obtener un patrón de radiación único. Más comúnmente, un lóbulo grande o mayor que representa al patrón deseado, se acompaña por uno o más lóbulos laterales de menor intensidad de campo.

El significado del lóbulo lateral para un sistema de antena es la disipación de energía en direcciones indeseadas. Similarmente para una antena receptora, el receptor está sometido a señales indeseadas de interferencia.

Existe un tipo de lóbulo llamado lóbulo de radiación que es una porción del patrón de radiación en el que la radiación es intensa.

El lóbulo mayor se define como el lóbulo de radiación que contiene la dirección de la máxima radiación.

Un lóbulo menor representa usualmente la radiación en direcciones no deseadas y por eso puede ser minimizado.

4.11.3 MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN

La representación gráfica del patrón de radiación se efectúa en una hoja polar en la que se representa el comportamiento de una antena transmisora, tomando como referencia una distancia constante entre la antena transmisora y el punto donde se va a tomar la medición; ésta medición tiene que ser la máxima ganancia directiva (máxima lectura obtenida por el equipo). Se van a tomar tantas lecturas como eficiente se quiera el patrón de radiación y estas alrededor de la antena que se esté estudiando.

a) Patrón de antena

Primero veamos el patrón de antena. Para simplificar las cosas, supongamos que la antena está localizada en una tierra plana, perfectamente conductora. Supongamos que una persona toma un medidor de intensidad de campo y camina alrededor de la antena a una distancia radial fija, digamos 1 (un) kilómetro, y a medida que camina, periódicamente lee la indicación de la intensidad de campo y registra su medición. Después de haberle dado toda la vuelta a la antena, él podría tener una serie de medidas como las presentadas en la siguiente tabla.

Esta información puede ser usada para delinear un patrón de antena en un diagrama circular, con la distancia radial del centro representando la intensidad de campo y la escala angular indicando la lectura en la cual la medida fue hecha. Esta delineación particular podría ser el patrón de nuestra antena a 1Km. De distancia. Si la potencia del transmisor fuera aumentada el patrón entero se extendería, pero la forma sería la misma. Si la potencia del transmisor fuera reducida, todo el patrón se encogería pero de nuevo la forma no cambiaría, es costumbre cuando se delinea un patrón, especificar la potencia que está siendo transmitida.

Para llevar una anotación práctica de los datos de las lecturas obtenidas se elabora una tabla en la que se representa la localidad en grados donde se tomó la lectura, la ganancia medida con el aparato, ubicación del punto donde se llevó la medición y observaciones como datos que puedan modificar nuestra ganancia como árboles, cables de alta tensión, edificios, antenas, etc.

Enseguida se muestra el ejemplo de una tabla, en la que se llenan los datos obtenidos y las observaciones de las mediciones tomadas.

No. de Lectura	Localidad	Ganancia	Dirección	Observaciones
1	0°	60	Av. Juárez entre Padre Mier y Matamoros	Medición tomada frente a un edificio
2	15°	45		
3	30°	50		
4	40°			

Los pasos a seguir resumidos para obtener un patrón de radiación son:

- 1) Localizar la antena transmisora en un mapa de la ciudad.
- 2) Trazar un radio de acuerdo a los requerimientos del estudio.
- 3) Obtener las localidades de acuerdo al número de las lecturas.
- 4) Desplazarse a los sitios convenidos y obtener la medición.

b) Contorno de intensidad de campo constante

Otra manera de describir las características direccionales de una antena es delinear un contorno de intensidad de campo. Supongamos de nuevo que una persona equipada con un medidor de intensidad de campo, sale a medir las características direccionales de su antena, de nuevo camina completamente alrededor de la antena, pero esta vez no mantiene una distancia radial constante de la antena sino que

hasta que obtiene cierta indicación de su medidor de intensidad de campo, digamos 1 Volts/mto. En cada una de las direcciones, esta medición deberá ser restringida.

Ahora, si se traza esta información en una gráfica circular, a este trazo se le llama contorno de un Volt por metro de la antena. Aquí, otra vez, si la potencia del transmisor fuera incrementada, la curva del patrón de radiación podría extenderse, pero su forma no cambiaría. Igualmente si la potencia del transmisor fuera reducida la curva se comprime sin cambios de forma. En la curva de nivel también es especificada la potencia del transmisor.

La curva de nivel es importante ya que el área de servicio de una estación es protegida para una mínima curva de nivel de señal, para evitar la interferencia de otras estaciones. Otro uso de la curva de nivel es en dar responsabilidad para casos de interferencia en los receptores de los radioescuchas, las reglas de la SCT previenen que cualquier radiodifusora es responsable de ajustar todos los casos de interferencia a los aparatos receptores dentro de la curva de nivel de un Volt por metro.

No. de Lectura	Localidad	Ganancia	Distancia	Dirección	Observaciones
1	0°	100			
2	15°	100			
3	30°	100			
4	45°	100			

Enseguida se realizará un ejemplo práctico de un patrón de radiación pero antes se definirán algunas literales que se utilizan en la elaboración de estos problemas.

- n: número de elementos radiantes.
- α : diferencia de fase de corrientes de excitación.
- d: separación entre elementos radiantes adyacentes.
- ϕ : coordenada esférica (respecto eje Z).
- ϕ : coordenada esférica (respecto eje x).
- λ : longitud de onda.
- F_{a_n} : factor de arreglo normalizado.
- k: número entero.
- HPBW: Ancho de 3dB del Haz.

Definidas estas literales continuaremos a la realización del ejemplo.

4.11.4 EJEMPLO: OBTENGA EL PATRÓN DE RADIACIÓN DE ACUERDO CON LOS SIGUIENTES DATOS, Y SU ANCHO DE HAZ.

$$n = 2, \quad \alpha = 0^\circ, \quad d = \lambda/2, \quad \theta = 90^\circ$$

$$F_{A_n} = \cos(\pi R / 2 \text{ Sen } \phi) \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Paso 1: Hacemos una tabulación dándole valores a ϕ de 10 en 10 grados o de 15 en 15 grados. Así obtendremos los valores de ganancia en milivolts (mv).

ϕ	G (mv)	
0°	1.00	
10°	0.96	$G = \cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta\right)$
20°	0.85	
30°	0.70	$G = \cos\left(\frac{\pi}{2} \sin 10^\circ\right)$
40°	0.53	
50°	0.35	$G = \cos(90 \times 0.17)$
60°	0.20	$G = \cos(15.62)$
70°	0.09	$G = 0.96 \text{ mv}$
80°	0.02	
90°	0	
100°	0.02	Y así con los demás grados.
110°	0.09	
120°	0.20	Nota: el $\pi/2$ está en radianes que convertido a grados nos da 90°.
130°	0.35	
140°	0.53	
150°	0.70	
160°	0.85	
170°	0.96	
180°	1.00	
190°	0.96	De aquí en adelante los valores se repiten como al principio, por lo tanto el patrón es simétrico y esto quiere decir que basta con calcular los primeros 19 valores y al graficar, los valores restantes serán iguales a los primeros 19 pero graficados en la mitad inferior de la hoja.
200°	0.85	
210°	0.70	
220°	0.53	
230°	0.35	
240°	0.20	
250°	0.09	

Paso 2: De acuerdo al valor máximo de ganancia se realiza una escala en el eje de los 90° positivos.

En este caso el valor máximo es 1 así que tomaremos cada 5 círculos como 0.2 mv.

Paso 3: comenzamos a graficar el patrón de radiación colocándonos en el eje de los 0° grados y colocamos el punto en el valor de 1 mv y así de esa forma en los demás grados hasta completar la forma del patrón. Una vez colocados en la hoja polar todos los puntos, los unimos para formar el patrón de radiación, que en este caso es un dipolo de 1/2 onda.

Paso 4: Una vez graficado el patrón de radiación el siguiente paso es encontrar el ancho de haz, para obtenerlo primero se multiplica el valor máximo de ganancia por 0.707, como se explicó en el punto 4.9.2

$$0.707 V_{\max} = 0.707 \times 1 = 0.707 \text{ mV}$$

Se coloca este valor sobre el eje de 0° y de ahí se proyecta ayudándose de los círculos de la hoja polar hasta donde se cruce con la línea graficada del patrón de radiación tanto en la dirección a favor y en contra de las manecillas del reloj partiendo de 0° grados.

Una vez hecho esto, nos colocamos en la intersección y nos fijamos en que ángulo estamos y lo multiplicamos por dos y así encontramos el ancho de haz. .

$$\text{HPBW} = 30^\circ \times 2 = 60^\circ$$

Y para finalizar con la gráfica del patrón de radiación se calcula el número de nulos, que son las veces en los que la gráfica llega al punto cero u origen desde que se comienza a graficar hasta que se termina con la realización del patrón de radiación, que se muestra en la figura. 4.11

$$\text{NULOS} = \pm 90^\circ$$

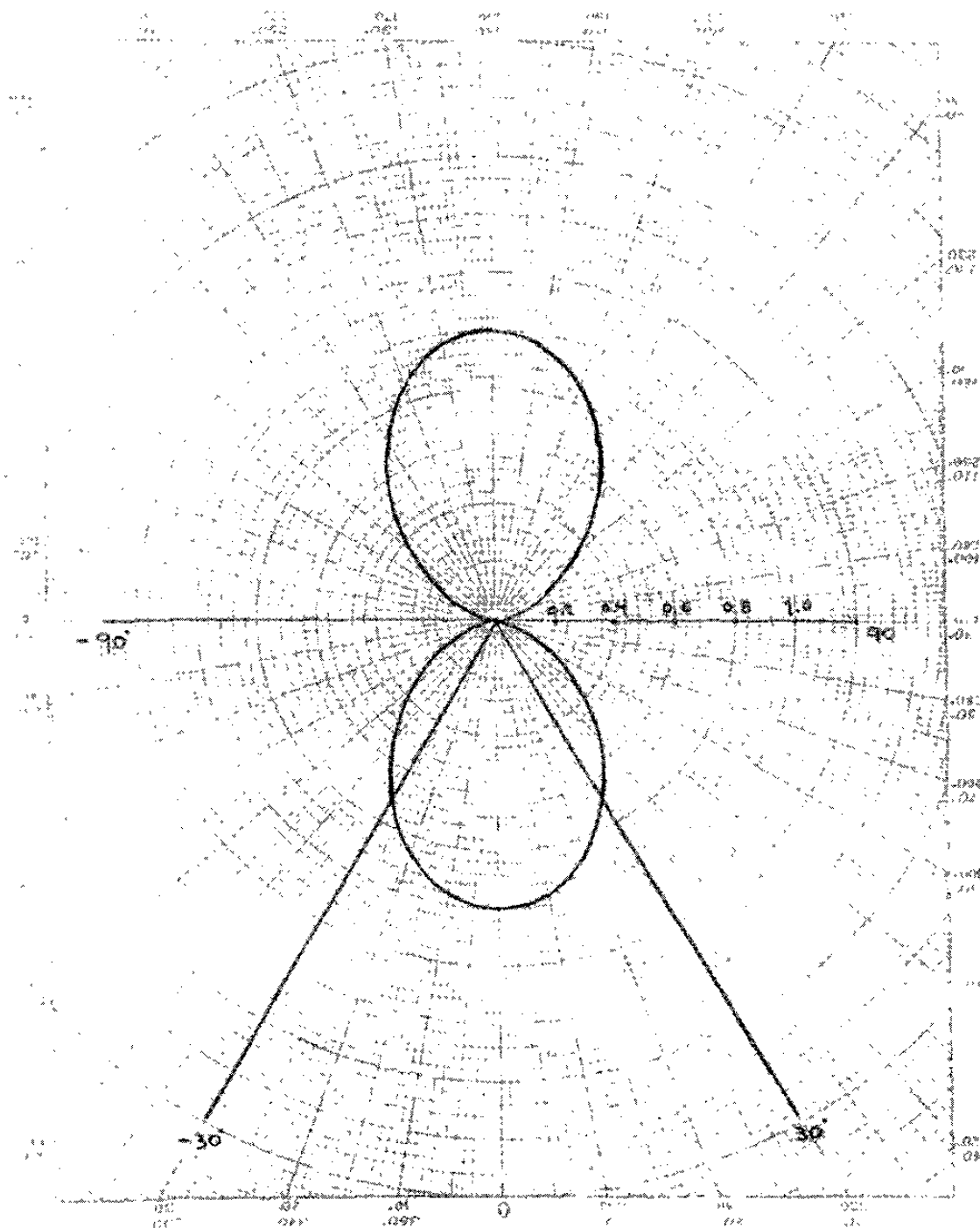


Fig. # 4.11

4.12 POTENCIAS RADIADA EFECTIVA, APARENTE E ISOTROPICA

En este punto se incluyen estos términos que son muy utilizados en la práctica de la radiodifusión. Las definiciones han sido tomadas de las normas técnicas adoptadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

4.12.1 POTENCIA RADIADA EFECTIVA (ERP)

A el producto de la potencia de entrada a la antena y la ganancia de potencia de la antena, se el llama potencia radiada efectiva.

Este debe ser expresado en Kw y en decibeles con relación a 1 Kw (dBK). Si se especifica una dirección en particular, la potencia efectiva radiada estará basada en la ganancia de potencia en esa dirección solamente. La potencia efectiva radiada autorizada está basada sobre el promedio de la ganancia en potencia de la antena para cada dirección en el plano horizontal.

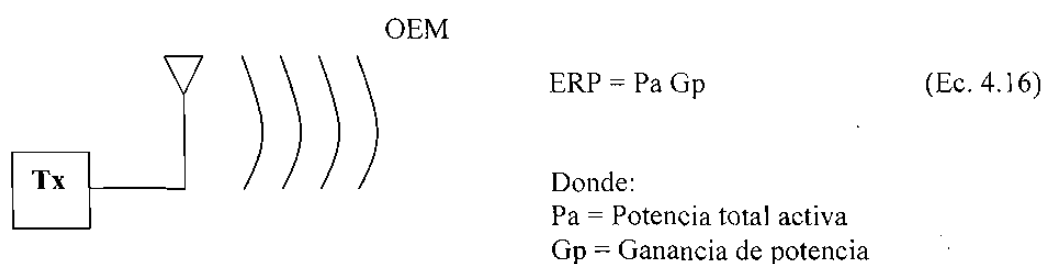


Fig. # 4.12

4.12.2 POTENCIA RADIADA APARENTE (ARP)

Es la potencia suministrada a la antena, multiplicada por la ganancia relativa de la antena, en una dirección dada.

La ganancia relativa se define a su vez como la ganancia de una antena en una dirección dada, cuando la referencia es un dipolo de media onda sin pérdidas (ideal).

$$ARP = Pa GR \quad (\text{Ec. 4.17})$$

Donde:

Pa = Potencia total activa o alimentada

GR = Ganancia teniendo como referencia una antena dipolo de 1/2 onda.

4.12.3 PIRE (POTENCIA ISOTROPICA RADIADA EFECTIVA)

Nos representa la calidad de la energía transmitida.

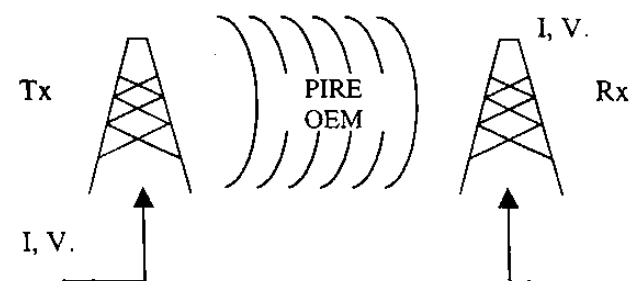


Figura # 4.13

4.13 PERFIL TOPOGRAFICO

Como se verá más adelante en el capítulo de diseño de enlaces VHF y UHF es necesario conocer la forma del terreno que existe entre los dos puntos a enlazar de este modo se podrán calcular las pérdidas ocasionadas por los cerros, montañas, bosques, etc. Para este efecto hay que hacer uso de una rama de la ingeniería Civil llamada topografía que incluye los planos topográficos que son los que nos interesan.

La topografía busca como determinar la localización espacial relativa de los puntos ubicados sobre las superficies terrestres o próximas a ellas, es el arte de medir las distancias horizontales y verticales entre objetos, de medir ángulos formados por líneas de determinar la dirección de estas y de establecer puntos por medio de mediciones angulares y lineales predeterminados.

Los planos topográficos incluyen la representación gráfica de todo los detalles materiales y artificiales como lagos ríos, contornos elementos de cultura (casas, puentes, poblados etc.). Además representan en forma tal el relieve del terreno, que las elevaciones se puedan determinar por simple inspección. El relieve se muestra por una serie de líneas irregulares llamadas curvas de nivel, dibujadas entre puntos de elevación idénticas. Los planos topográficos generales señalan las características topográficas y geográficas, las obras públicas y privadas, y generalmente se dibuja a escala pequeña.

Estos planos (o cartas) topográficas son las que se usan en el diseño para conocer las distancias en relieve del terreno, y algunos otros datos necesarios, entre los puntos a enlazar.

Para poder hacer uso de estos mapas se da a continuación una explicación de la interpretación y el uso de los mapas topográficos extraído de un manual del INEGI.

4.13.1 INTERPRETACION Y USO DE CARTAS TOPOGRAFICAS

I.-REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

A) ELEMENTOS NATURALES Y OBRAS HECHAS POR EL HOMBRE (PLANIMETRÍA).

Con relación a la hidrografía se representan los elementos naturales y artificiales, en lo que se refiere a patrones generales de drenaje: ríos, arroyos, canales, etc.; y almacenamiento y masas de agua: bordos, presas, lagunas, esteros, zonas sujetas a inundación, cajas de agua, etc.; en los casos pertinentes se indica si son perennes o intermitentes.

La representación de las obras hechas por el hombre varía cualitativamente, dependiendo de la escala de representación, pero en términos generales, contiene:

- Vías de comunicación: carreteras pavimentadas y autopistas, (que pueden ser federales, estatales, de cuota o de más de dos carriles); vías de ferrocarril, terracerías, brechas y veredas.
- Aeropuertos, indicando su superficie de rodamiento y su tipo (local, nacional, internacional).
- Líneas de conducción: eléctricas, telefónicas, telegráficas, ductos de diferente tipo, etc.
- Ciudades: en el caso de la escala 1 : 50,000 se indican sus servicios y principalmente escuelas, hospitales y cementerios.

Elementos diversos, a escala 1 : 50,000, como torres de microondas, faros e instalaciones portuarias diversas ya sean muelles, malecones o rompeolas.

Por lo que respecta a la vegetación, esta se indica únicamente cuando su densidad es tal que no permite conservar una alta precisión en el trazo de las curvas de nivel, sin importar que se trate de selva o de bosque. Asimismo, en la escala 1 : 50,000, se representan los patrones genéricos de las áreas dedicadas al cultivo.

B) RELIEVE (ALTIMETRÍA).

Obviamente, no basta la información anterior para obtener una imagen exacta del terreno; para complementarla se tiene que representar la orografía.

En las cartas topográficas el relieve se representa por medio de curvas de nivel. La curva de nivel es una línea que une todos los puntos que tienen la misma altura sobre el nivel del mar; se trazan con una separación en altura determinada de antemano (equidistancia entre curvas de nivel). (Ver fig. # 4.13).

La equidistancia fijada para las curvas de nivel dependen de la escala del mapa y de la pendiente del terreno: en la escala de 1 : 50,000 las equidistancias usadas son de 10, 20, y 40 metros para terrenos planos, accidentados y muy escabrosos, respectivamente. Para la carta 1: 250,000, se usan equidistancias de 20, 50 y 100 metros.

Para las cartas 1:1,000,000 y 1: 5,000,000 las equidistancias son de 200 y 500 metros, respectivamente.

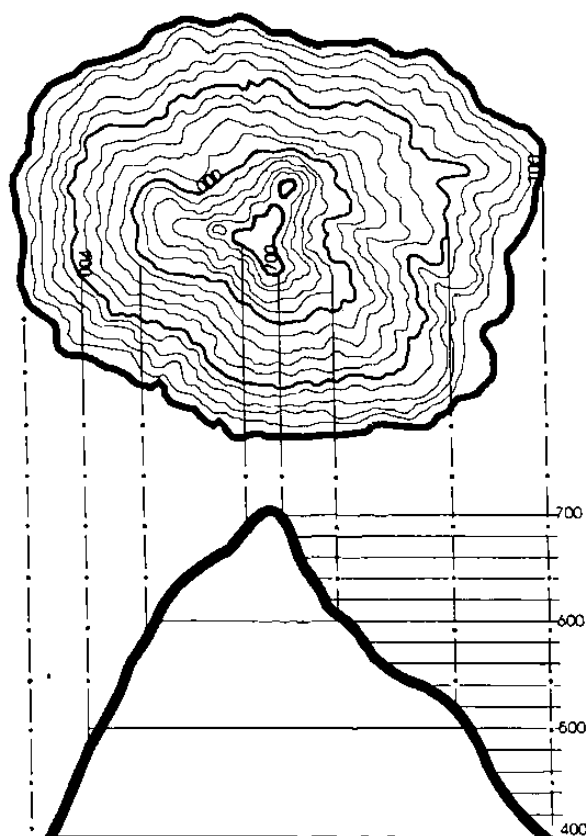


Fig. # 4.14

Para auxiliar en la interpretación del relieve, cada quinta curva de nivel está representada con una línea más gruesa y además se le acota (curvas de nivel maestro o índices).

Cuando ciertas partes del área representada son muy planas y no quedan bien definidas mediante la equidistancia elegida, se recurre a las llamadas curvas de nivel auxiliares, que se trazan a la mitad del intervalo.

En la carta topográfica 1 : 1,000,000, se emplean además diferentes colores y tonalidades .

II.-LECTURA Y APLICACIÓN DE LAS CARTAS TOPOGRÁFICAS.

La primera tarea para familiarizarnos con la carta será la de conocer la simbología empleada asociar casas, carreteras, brechas, ríos, etc. con los símbolos correspondientes.

Después, debemos familiarizarnos con el relieve del terreno: cerros, valles, parteaguas, puntos más altos y bajos. Para esto debemos tener en cuenta que la dirección en que escurren los arroyos se indica con una flecha y que las acotaciones de las curvas de nivel indican, con el pie del número, la parte más baja del terreno. Finalmente, conviene efectuar cálculos y mediciones sobre la carta: alturas, distancias, pendientes, etc.

A continuación incluimos una serie de ejemplos de las operaciones que pueden efectuarse sobre cartas topográficas a escala 1: 250,000 y mayores.

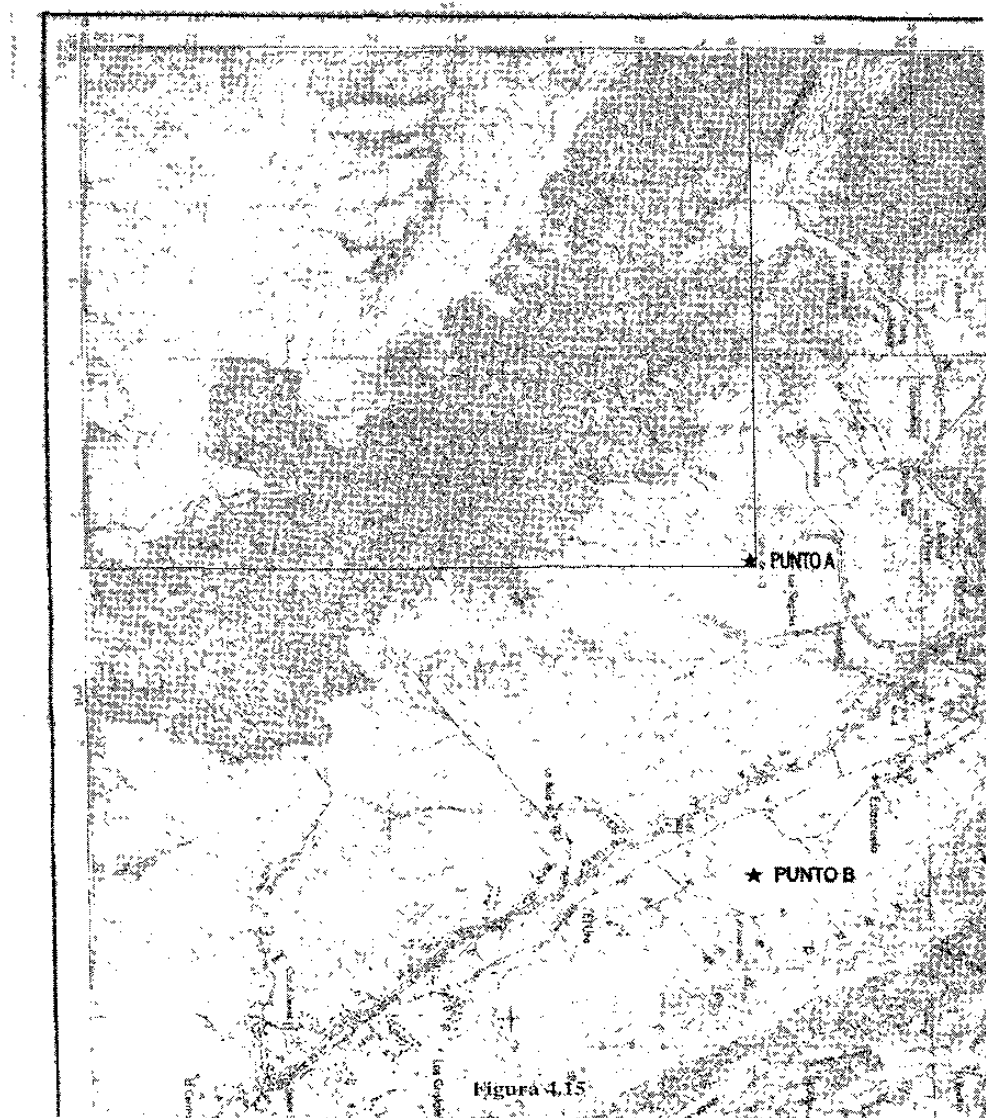
A) OBTENCIÓN DE LAS COORDENADAS DE UN PUNTO.

1).- COORDENADAS GEOGRÁFICAS.

Para determinar las coordenadas geográficas de un punto, tendremos que referirnos a los márgenes del mapa; en ellos se indican los valores de la latitud y longitud, cada 5 minutos existen subdivisiones al minuto.

Por ejemplo, la longitud de un punto (fig. # 4.15) se determina sumando al valor de la longitud más próxima que se localiza al este (derecha) del punto en cuestión (100 grados y 15 minutos en este caso) los minutos que le suceden de este a oeste (1 minuto).

Para la latitud se procede en forma similar, tomando como base el paralelo más próximo al punto en cuestión que se localice hacia el sur (en nuestro ejemplo), a este se le suman los minutos que le suceden hacia el norte (4 minutos).



2).- COORDENADAS RECTANGULARES

Debido a la complejidad que tienen las operaciones con valores angulares, en cartas a escala 1:250,000, y mayores se ha sobrepuesto un cuadrículado kilométrico, "denominado cuadrícula U.T.M." (Universal Transversa de Mercator), que permite la determinación de la posición de un punto referido a ejes rectangulares.

Las líneas horizontales están rotuladas con el valor de su distancia al ecuador en metros (coordenada "y"); el valor para el caso de la República Mexicana, varía de 1618000 m. en el sur, a 3622 000 m en el norte. Las líneas verticales (coordenadas "x") se miden desde un origen diferente para cada zona este origen es la línea que divide a cada huso (o zona) en dos partes iguales de 3°; a esta línea se le conoce como meridiano central y se le asigna un valor convencional de 500,000 m esto implica que las líneas al oeste del meridiano central tienen un valor menor de 500,000 m y las que se encuentran al este tendrán un valor mayor.

El valor completo tanto para X como para Y se da en la esquina inferior izquierda (sur oeste) de estas cartas; el resto de las coordenadas tiene una numeración abreviada. En la fig. # 4.15 el valor para X es de 366,000 E y los valores abreviados 67, 68, 69, 70 corresponden a E 367 000 m, 368 000 m, etc. . Igual procedimiento se sigue con la coordenada Y principiando con 2821 000 m N, N 2822 000 m.

Para la identificación de elementos mediante esta cuadrícula se emplean dos sistemas. El primero se conoce como sistema civil y consiste en dar el número de huso, la coordenada este, y la coordenada norte en metros.

Para determinar la coordenada X se mide o estima la distancia a la línea vertical más próxima al oeste y se suma este valor al indicado en el margen del mapa; el procedimiento es similar para la coordenada Y; el número de zona se obtiene de la información marginal y se antepone al valor anterior.

Siguiendo este procedimiento, las coordenadas del punto marcado en el punto fig. # 4.15 serian, 372 800 E 2828 250 N.

El otro método se conoce como sistema militar, y resulta fácil y rápido para ubicar puntos y hacer referencia a ellos.

Consiste en un número par de dígitos, cuya primera mitad nos da el valor X (este) y el resto nos proporciona la coordenada Y (norte).

En virtud de que estos valores se repiten cada 100 000 m, se añaden a la designación anterior las letras que identifican el cuadro de 100 000 m. En los mapas escala 1 : 250 000 se da esta identificación a fin de evitar ambigüedades.

Esta referencia aún no es única, y si bien no vuelve a aparecer otra igual más que a 3500 km. de distancia, si se quiere dar una referencia única en el mundo, hay que buscar en el margen del mapa el número de huso, así como la del sur del ecuador.

B) DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE UN PUNTO.

Se calcula a partir de las curvas de nivel; una forma aproximada de evaluarla es sumando a la curva de nivel inferior (menos altura) más cercana al punto en cuestión, el valor de la mitad de la equidistancia que existe entre ella y el del nivel siguiente (mayor altura) Fig. # 4.15, punto B.

Ejemplo : Equidistancia de las curvas de nivel = 20 m

$$h_B = 620 + 20 / 2 = 630\text{m}$$

Otra forma de proceder , con la que se puede obtener una mayor aproximación, consiste en sumar a la cota de la curva inferior el número de metros que resulten de multiplicar la equidistancia en las curvas de nivel por la relación de distancia (a/ b), donde (a) es la distancia entre el punto y la curva inferior y (b) la distancia entre las dos curvas que encierran el punto (mídase con regla graduada).

Ejemplo: mediante este procedimiento la altura del punto anterior resulta ser :

$$h_A = 620 + [(4 / 6.5)] \times 20] = 620 + 12.3 \text{ m}$$

Equidistancia entre curva de nivel = 20 m

$$h_A = 632.3 \text{ m}$$

$$(a) = 4$$

$$(b) = 6.5$$

$$\text{relación} = 4 / 6.5$$

C) MEDICIÓN DE DISTANCIAS

La manera más sencilla de medir distancias en la carta es usando el curvómetro de carátula o un escalímetro.

También puede obtenerse proyectando sobre el borde recto de una hoja de papel, la distancia o las distancias parciales en el caso de una línea discontinúa, y midiendo luego la longitud total resultante de la carta .

Cuando los puntos terminales de la distancia que deseamos calcular no se encuentran a la misma altura, este valor no es suficiente. En tal caso necesitamos obtener la diferencia del nivel entre los puntos finales y aplicando el teorema de Pitágoras obtendremos la distancia real.

D) TRAZOS DE PERFILES

El perfil es la construcción gráfica en donde se registrarán, a una escala vertical y otra horizontal, las variaciones de altura (desniveles) que se presentan a lo largo de una línea considerada: en otras palabras, es la intersección del terreno con un plano vertical cualquiera.

Para dibujar en perfil se procede de la siguiente manera:

- Sobre la hoja de trabajo se dibuja una recta llamada de comparación, paralela al borde de la hoja y a la que se le asigna una cota cuyo valor sea inferior a la mínima del terreno considerado.

- Se dibujan paralelas equidistantes a la recta anterior, a una escala apropiada, y a las que se les asigna valores congruentes con la equidistancia de las curvas de nivel.
- Se coloca el borde de la hoja de papel sobre la línea de corte escogida y se bajan perpendiculares de los puntos de intersección de esta línea con las curvas de nivel, haciendo corresponder la cota de la curva de nivel con la altitud correspondiente de la escala vertical.
- La unión de los puntos así obtenidos nos proporciona el perfil del terreno en la línea de corte considerada. (Ver fig. # 4.13).

E) CÁLCULO DE ÁREAS

En los mapas topográficos a escala 1: 50 000 y mayores es posible la obtención de áreas.

Recordando que la cuadrícula de la proyección circunscribe un número fijo de kilómetros cuadrados entre cada dos paralelos y meridianos, basta contar los cuadrados completos encerrados dentro del área que deseamos calcular y sumarle las fracciones de cuadrados incompletos, estos en forma estimativa.

Otro procedimiento que se pueden usar es el de subdividir el área en cuestión en triángulos y sumar las áreas de estos triángulos esto se hace tratando de obtener el menor número posible de lados comunes. Con el auxilio de la escala gráfica podremos conocer las bases y alturas de los triángulos.

F).- ORIENTACIÓN DE LA CARTA

Una carta está orientada en posición horizontal, el norte de la carta coincide con el norte geográfico, esto es cuando existe correspondencia entre los elementos del terreno y sus representaciones en la carta.

Esto puede lograrse fácilmente cuando el usuario conoce su posición sobre la carta y desde ella observa otro punto que puede identificar en el mapa; basta entonces con girar la carta hasta que la línea que une los puntos identificados sobre ella, coincida con la visual al punto observado.

Cuando no existen detalles que se puedan identificar en la carta, esta se puede orientar mediante brújula, con el sol o con la estrella polar, si queremos orientarla con brújula necesitamos conocer el norte magnético para lo cual los datos contenidos en la información marginal obtendremos el valor del ángulo (ángulo NC-NM) que existe entre el norte que indica la cuadrícula (norte de cuadrícula : NC) y el norte magnético (NM), así como su dirección y con ayuda de un transportador lo dibujamos sobre la carta . En las cartas topográficas escala 1 :50 000 más recientes se ha incluido una escala del transportador así como un punto pivote para facilitar esta operación.

A continuación colocamos la brújula sobre la carta haciendo coincidir la línea norte - sur de la cuadrícula con la línea dibujada y giramos suavemente ambas, carta y brújula, hasta que la aguja apunte hacia el norte magnético; en ese momento la carta estará orientada.

III.- NOMENCLATURA DE LAS CARTAS

La identificación de las cartas puede hacerse por el nombre de la hoja en cuestión y el de la Entidad Federativa a que pertenece.

Como este método está sujeto a ambigüedades, en el caso de las cartas a escala 1: 50 000 y 1:250 000 se emplea, además, una clave que esta basada y relacionada con sistemas internacionales de formato, distribución y nomenclatura.

Para el caso de la cartografía 1: 1 000 000, cada una de las cuatro hojas (norte, sur, noroeste y sureste) con que se cubre el Territorio Nacional, abarca a cuatro caras de la carta Internacional a esta escala; las cartas de la DGGTN tienen un formato de $8^{\circ} \times 12^{\circ}$.

Para las cartas escala 1:250 000 y 1:50 000 la subdivisión el formato y la nomenclatura están íntimamente relacionados con el sistema de proyección empleado (Universal Transversa de Mercator).

Partiendo del meridiano de Greenwich y en el sentido W tenemos 60 husos de 6° cada uno, numerados del 1 al 60; y del Ecuador hacia el N tenemos bandas transversales de 4° cada una, numeradas de la letra A en adelante.

Por esto los tres primeros caracteres son: el primero, alfabético que indica la banda transversal y dos dígitos que nos indican el huso de que se trata.

Para nuestro caso, la república queda comprendida entre las fajas (D) é (1) y los husos 11 y 16.

Para las hojas escala 1:250 000, tendremos uno o dos dígitos más, del 1 al 12, para obtener su ubicación; el número total de hojas que cubren la república es de 126, con un formato de $1^{\circ} \times 2^{\circ}$.

El cubrimiento territorial a escala 1:50 000 se logra con un total de 2370 cartas con formato de $15' \times 20'$. Para la identificación de estas cartas agregamos tres caracteres a los mencionados anteriormente; el primero, que es alfabético (A, B, C o D), resulta de los cuatro cuadrantes en que se divide la región definida por los tres primeros caracteres; y dos dígitos, que nos indican el renglón (1 al 8) y la columna (1 al 9) en que se ha subdividido cada cuadrante.

Para determinar el relieve del terreno y las alturas haremos uso del perfil topográfico que como habrán leído se trató en el inciso (d) del punto II del manual del INEGI.

Una vez que se obtiene él llamémosle "perfil rectangular" podemos, de este perfil, obtener la distancia total que a su vez se va a dividir en distancias más pequeñas con su respectiva altura y así obtener una tabla con distancias y alturas.,

Esta tabla se va a volver a graficar pero ahora con un perfil especial para los enlaces de antenas (fig. # 4.16), llamado "perfil curvo" el cual ya toma en cuenta la curvatura de la tierra y una constante de esa curvatura que se denomina K y que tiene un valor para muestra área $4/3$ (punto A).

Este "perfil curvado" tiene además de su curvatura 3 escalas de altura:

A - que va de 0 a 4000 mts.

B - que va de 0 a 1000 mts.

C - que va de 0 a 250 mts. (Punto B) que se divide en 50 espacios

Además de estas escalas de altura tiene 3 escalas de distancias que son:

A - 240 km.

B - 120 km.

C - 60 km. (punto C) que se divide en 60 espacios

Tiene también 2 columnas de datos de las dos estaciones a enlazar que incluyen nombre de la estación, altura con respecto al nivel del mar (altitud) y altura de la antena (punto D).

Los pasos para graficar la tabulación que se obtiene del "perfil rectangular" son los siguientes:

- 1.- Se resta la altura menor de la altura mayor de esta manera se obtiene la diferencia de alturas verticales entre los puntos. Con este valor se elige una escala de altura. Hay que aclarar que si la diferencia de alturas queda exacta en una escala hay que elegir la escala inmediata superior. Esto significa que si la diferencia de alturas es 250 mts no se elige la escala C sino la escala B.
- 2.- Se elige la escala horizontal (distancia). La escala que se eligió en la altura debe ser la misma que la horizontal. El perfil debe quedar centrado en el papel, esto es, no debe de quedar pegado a la izquierda o el derecho del papel.
- 3.- Una vez elegidas las escalas se procede a trasladar las distancias y las alturas de la tabulación al papel del perfil ($K = 4/3$). Se unen los puntos y se obtiene, finalmente el "perfil curvado". Por estético el valor más pequeño de altura debe quedar el ras de perfil.

4.13.2 EJEMPLO

Para entender mejor lo explicado anteriormente se procederá a hacer un ejemplo. Obtengamos el perfil topográfico entre ciudad satélite sur y el poblado San Roque (fig. # 4.17).

El primer paso es obtener el perfil rectangular; para tal efecto seguimos los pasos del inciso d) del punto número II del manual del INEGI. Así se obtiene la (fig. # 4.18).

A continuación elegimos una división de la distancia de modo que el perfil quede delimitado aproximadamente; en nuestro ejemplo el perfil queda delimitado casi como es, con la división de la distancia en intervalos de 500 mts. De esta división hacemos una tabulación con las distancias y sus respectivas alturas.

Distancia(kms)	Altura (mts)	Distancia(kms)	Altura (mts)
0	560	5.5	712
0.5	584	6	712
1	648	6.5	1040
1.5	760	7	744
2	900	7.5	580
2.5	1240	8	540
3	1344	8.5	520
3.5	100	9	512
4	760	9.5	496
4.5	660	10	488
5	960	10.5	480

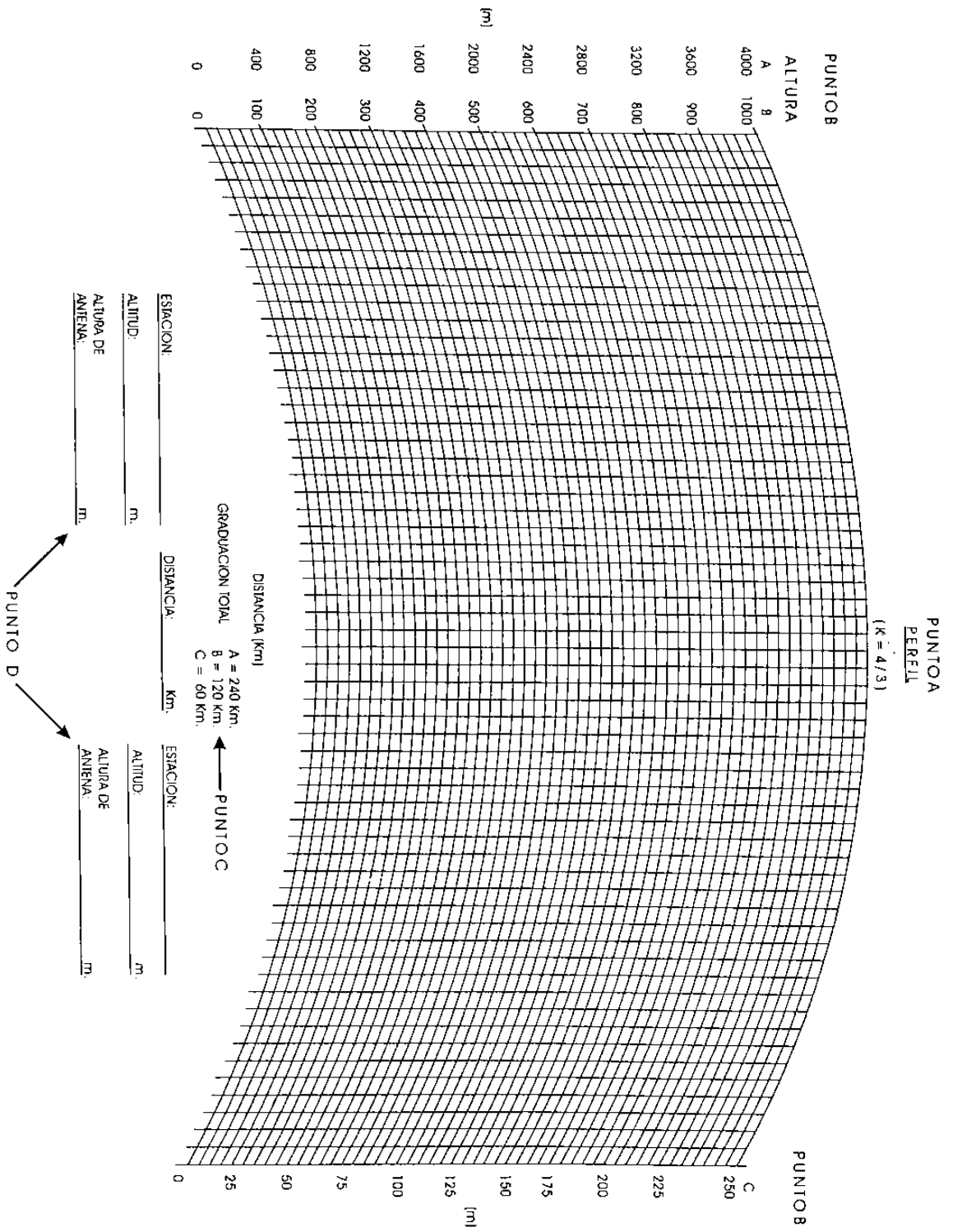


Fig. # 4.16

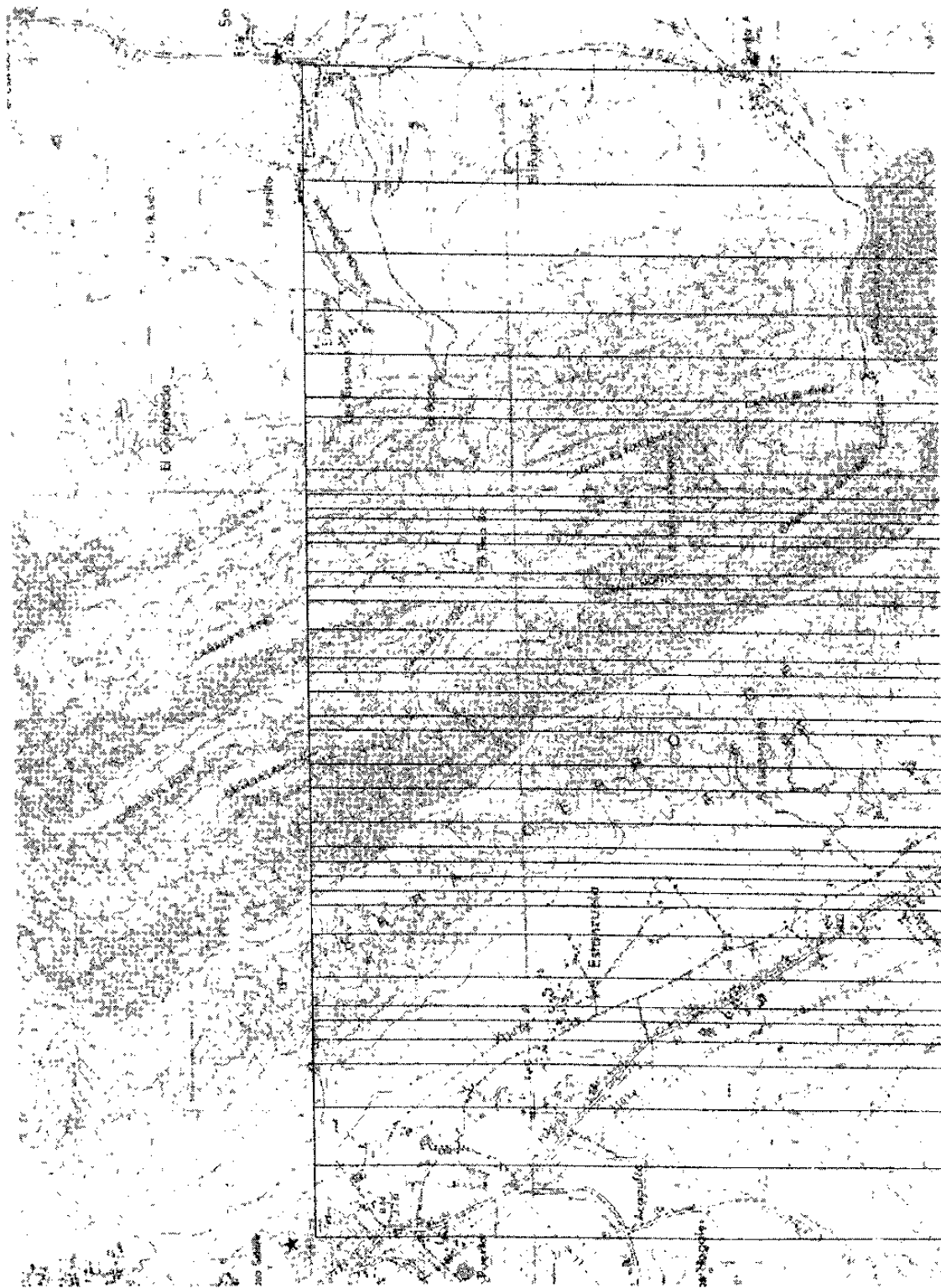


Fig. # 4.17

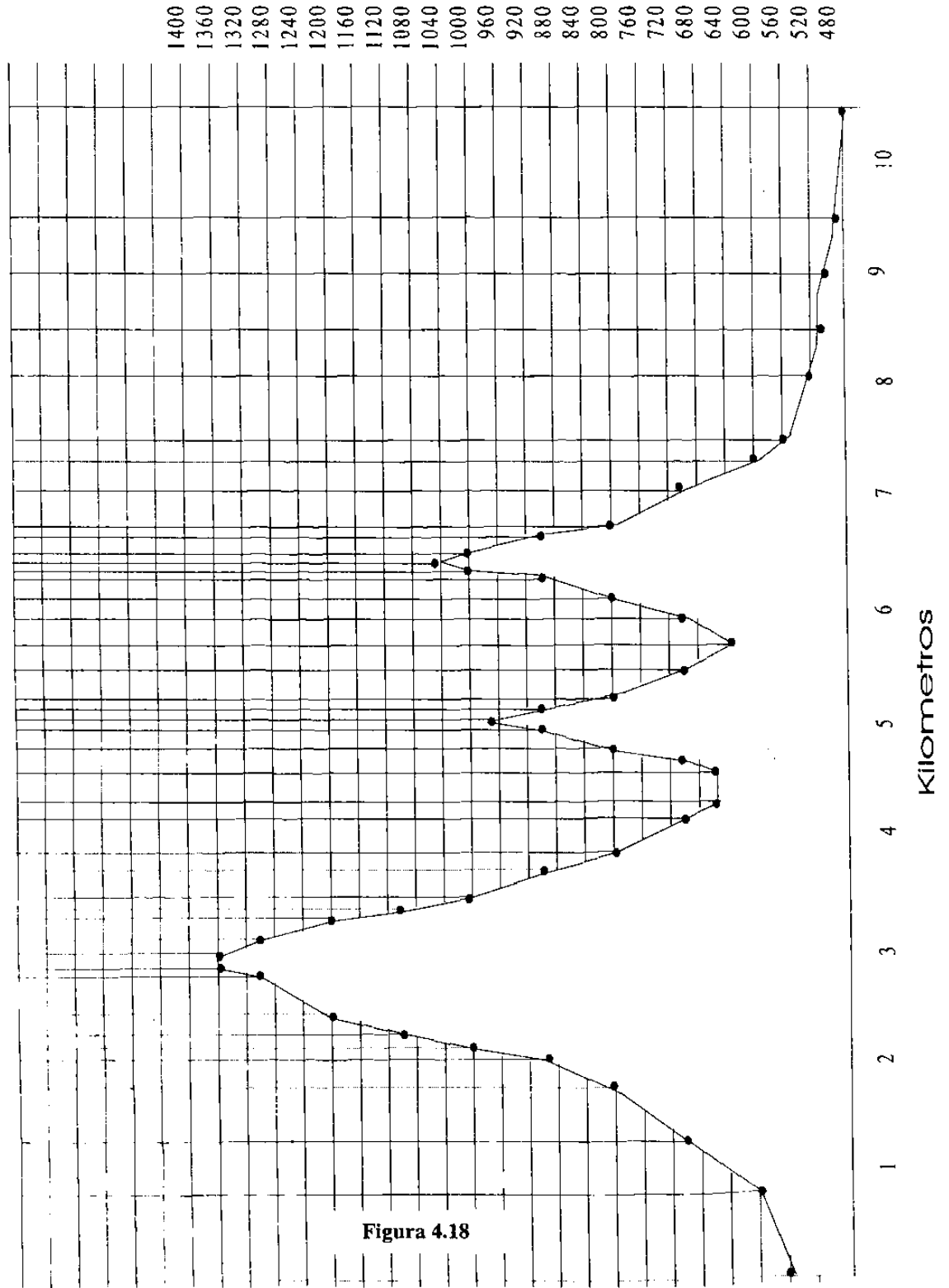


Figura 4.18

Una vez que hemos obtenido la tabulación de distancias contra altura procedemos a graficarla en el perfil curvo.

Primero restamos la altura menor de la mayor y obtenemos la escala de altura.

$$1344 - 480 = 864$$

Como la diferencia de alturas es mayor de 250 y menor de 1000 elegimos la escala B que es la misma escala horizontal que vamos a elegir (120 km).

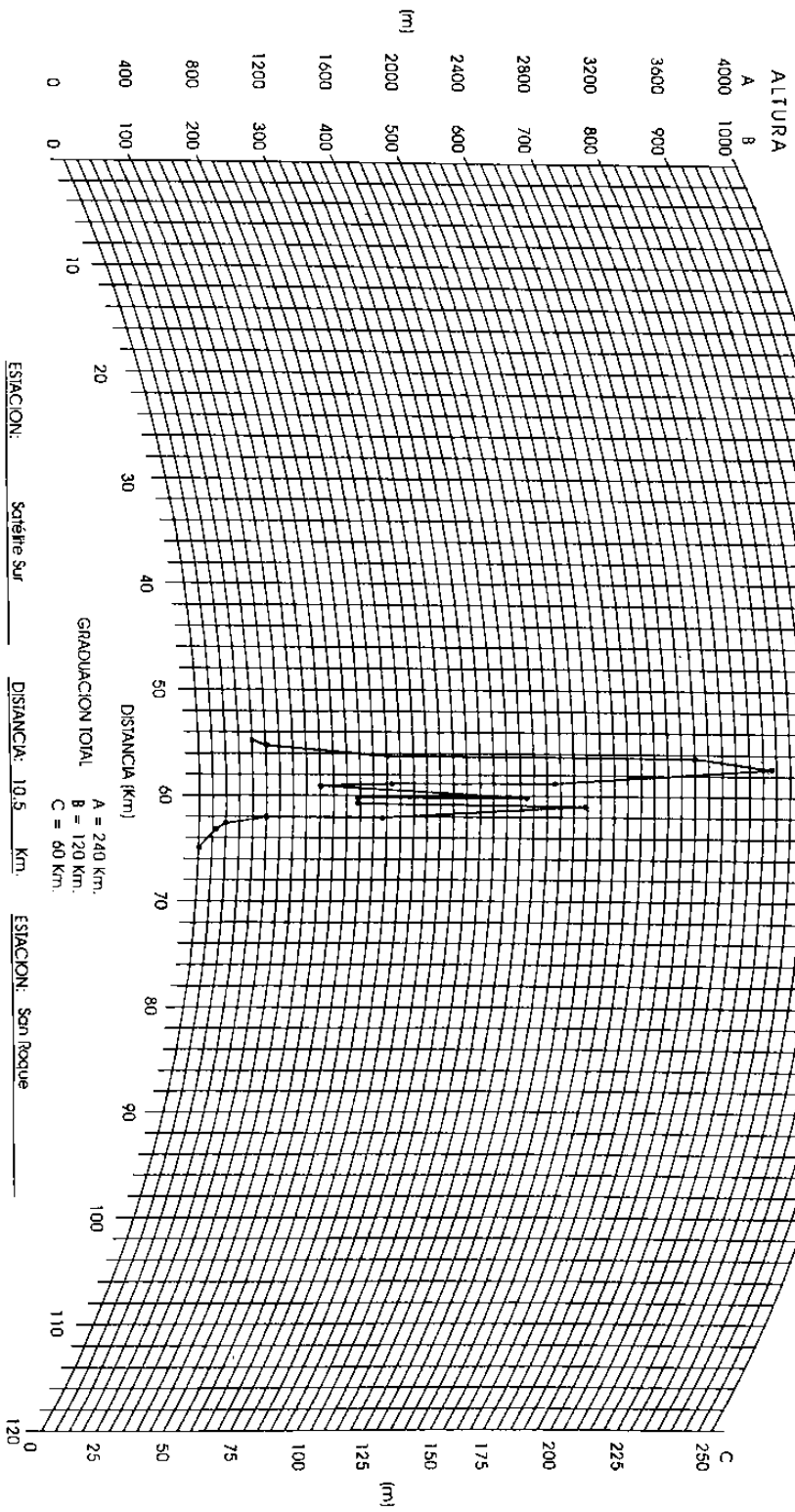
La hoja del perfil esta dividida en 50 espacios en forma vertical y 60 espacios en forma horizontal. De esto nos valemos para centrar el perfil; esto es, de los 120 kms. restamos la distancia, que son 10.5 km., lo dividimos entre 2 y es la distancia que debe haber a izquierda y derecha del perfil ya acabado (54.75 km.).

El valor menor de altura es el que queda en la parte baja del perfil, es decir, empezamos en lugar de cero de 480 y así le vamos sumando la altura.

Procedemos a graficar los puntos obtenidos y a unirlos por líneas rectas y finalmente obtendremos un perfil curvo como el mostrado en la fig. # 4.19. El perfil quedo muy angosto debido a que la distancia es corta. sin embargo en distancias mayores el perfil se ensancha. Este perfil nos va a servir para el capitulo de diseño de enlaces VHF y UHF.

PERFIL

[K = 4/3]



GRADUACION TOTAL
 A = 240 Km.
 B = 120 Km.
 C = 60 Km.

ESTACION: Sotefre Sur
 ALTUD.: 560 m.
 ALTURA DE ANTENA: 50 m.

ESTACION: San Roque
 ALTUD.: 480 m.
 ALTURA DE ANTENA: 50 m.

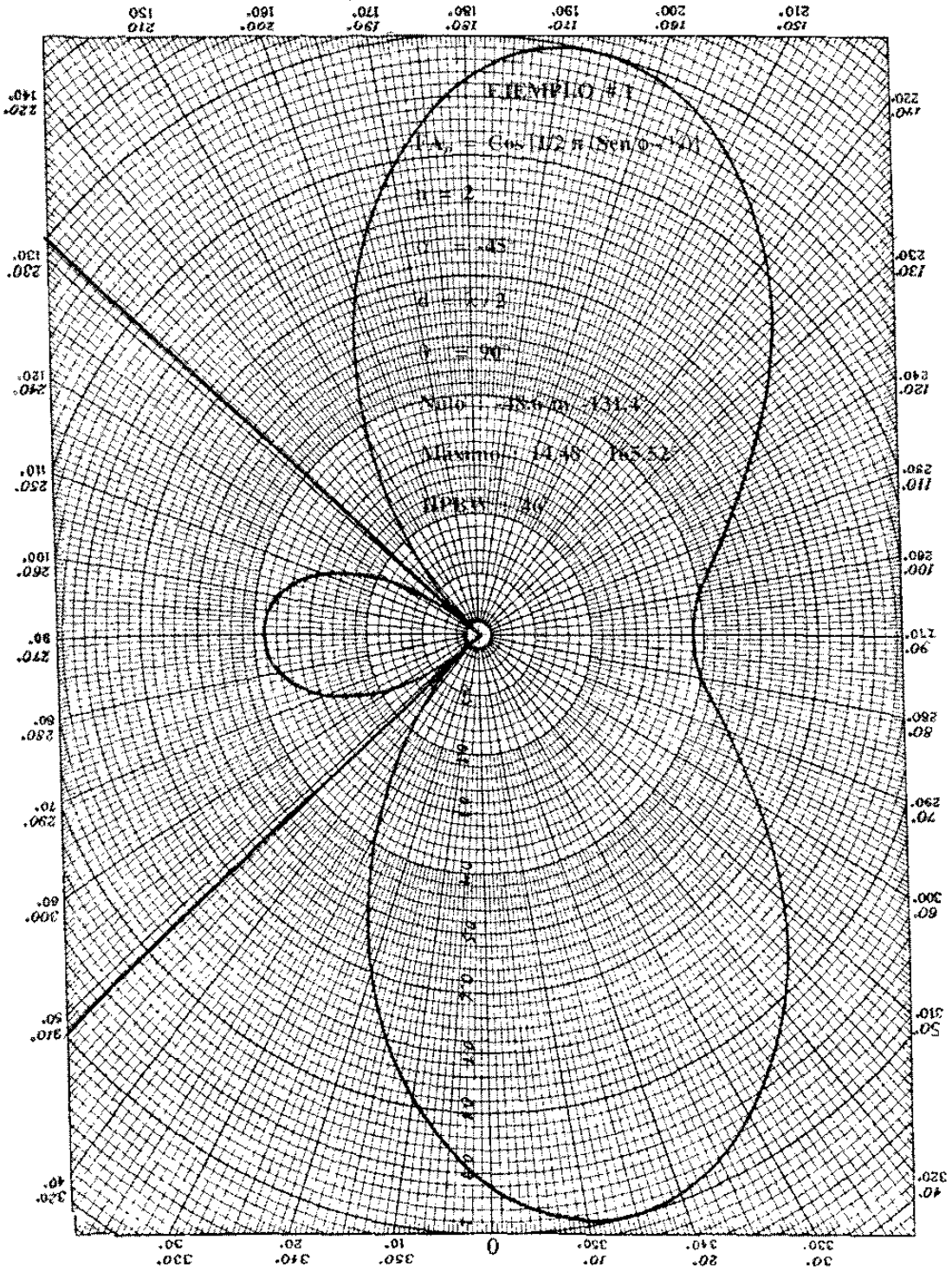
DISTANCIA: 10.5 Km.

4.14 EJEMPLOS DE PATRON DE RADIACION

EJEMPLO # 1

$$F_{An} = \text{Cos} [1/2\pi (\text{Sen}\phi - 1/4)]$$

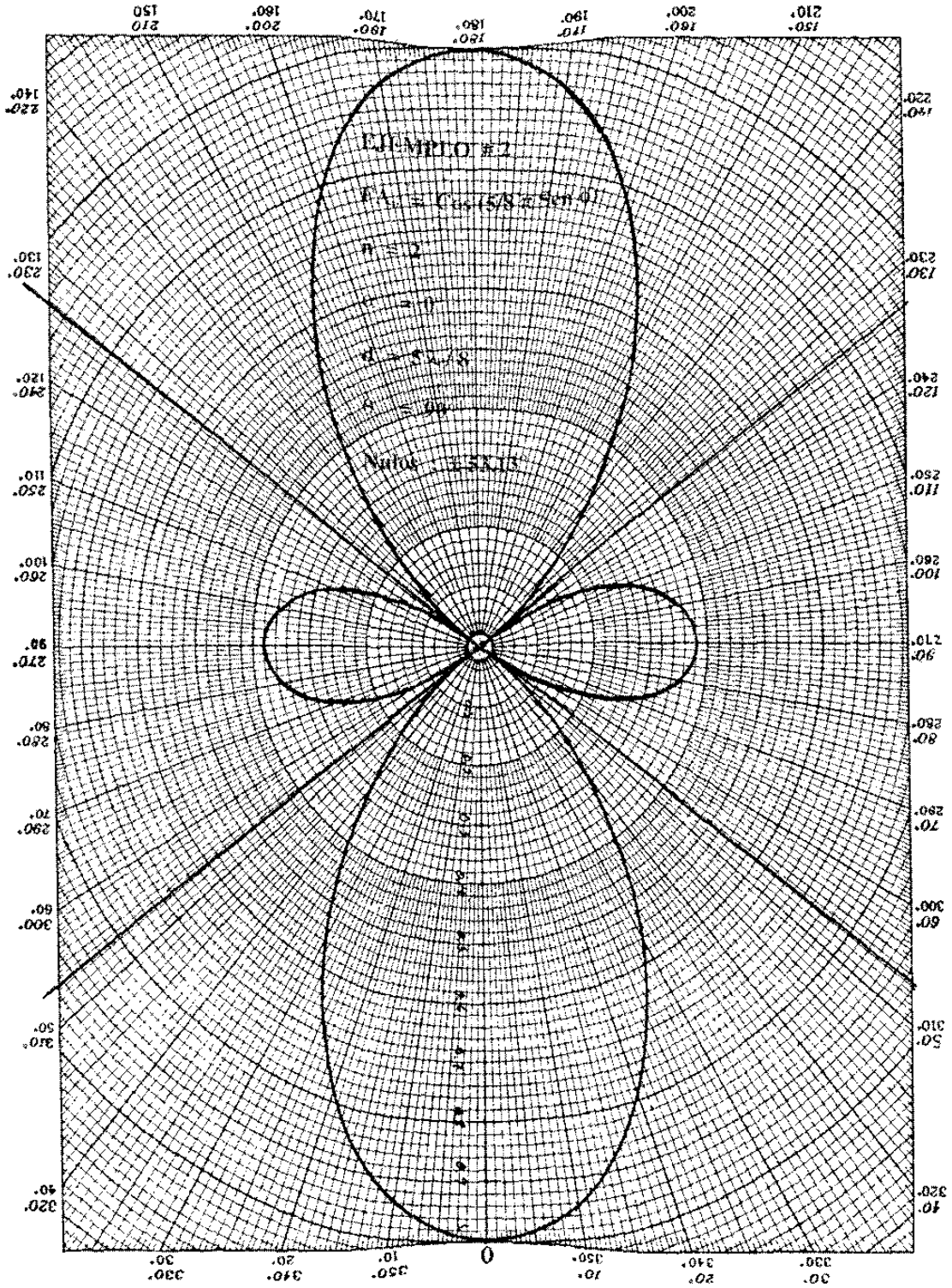
GRADOS	VALOR
0	0.9238
10	0.9928
20	0.9895
30	0.9238
40	0.8156
50	0.6890
60	0.5672
70	0.4683
80	0.4046
90	0.3826
100	0.4046
110	0.4683
120	0.5672
130	0.6890
140	0.8196
150	0.9238
160	0.9895
170	0.9928
180	0.9238
190	0.7866
200	0.5978
210	0.3826
220	0.1676
230	0.0251
240	0.1812
250	0.2935
260	0.3605
270	0.3826
280	0.3605
290	0.2935
300	0.1812
310	0.0251
320	0.1676
330	0.3826
340	0.5978
350	0.7866
360	0.9238



EJEMPLO # 2

$$F_{an} = \cos \left[\frac{5}{8} \pi \operatorname{Sen} \phi \right]$$

GRADOS	VALOR
0	1
10	0.942
20	0.782
30	0.555
40	0.303
50	0.066
60	0.129
70	0.270
80	0.354
90	0.382
100	0.354
110	0.270
120	0.129
130	0.066
140	0.303
150	0.555
160	0.782
170	0.942
180	1
190	0.942
200	0.782
210	0.555
220	0.303
230	0.066
240	0.129
250	0.270
260	0.354
270	0.382
280	0.354
290	0.270
300	0.129
310	0.066
320	0.303
330	0.555
340	0.782
350	0.942
360	1



4.15 SECCION DE PROBLEMAS PROPUESTOS

I. Encuentra el patrón de radiación así como los máximos y nulos de los siguientes problemas:

1. $n = 2$ $\theta = 90^\circ$
 $\alpha = -45^\circ$ $F_{An} = \text{Cos}[\pi/2(3/2 \text{Sen}\phi)]$
 $d = 3/4 \lambda$

2. $n = 2$ $\theta = 90^\circ$
 $\alpha = 0^\circ$ $F_{An} = \text{Cos}(\pi \text{Sen}\phi)$
 $d = \lambda$

3. $n = 2$ $\theta = 90^\circ$
 $\alpha = 90^\circ$ $F_{An} = \text{Cos}[\pi/4(3 \text{Sen}\phi - 1)]$
 $d = 3/4 \lambda$

II. Obtenga la distancia, así como los perfiles topográficos rectangulares y curvos entre los siguientes puntos.

1. El cerro de la campana y el centro de Cadereyta.
2. El punto ubicado a los $100^\circ 19'$ longitud y $25^\circ 40'$ latitud y el punto localizado a los $100^\circ 6'$ longitud y $25^\circ 34'$ latitud.
3. Ciudad Universitaria y Villa de Juárez.
4. El punto ubicado a los 376 000 mE y 2826 000 mN y el punto localizado en 391 000 mE y 2846 000 mN.
5. Villa de Santiago y Doctor González.
6. Monterrey y Mina.