

Capítulo 7

Antenas

INTRODUCCIÓN

Una antena es un dispositivo cuya función es radiar energía e interceptarla. Una antena transmisora puede ser empleada para recepción y viceversa. En comunicaciones bilaterales se puede emplear la misma antena tanto para transmisión como para recepción.

PATRONES DE RADIACIÓN

Las antenas no necesariamente se comportan con la misma efectividad en todas las direcciones. Al diagrama polar que indica cómo transmite o recibe una antena en diferentes direcciones, se le denomina patrón de radiación.

En la figura 7-1 se muestra el patrón de radiación de una antena conocida como *antena Marconi*.

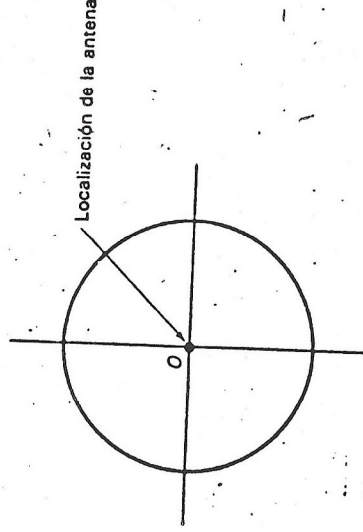


Figura 7-1

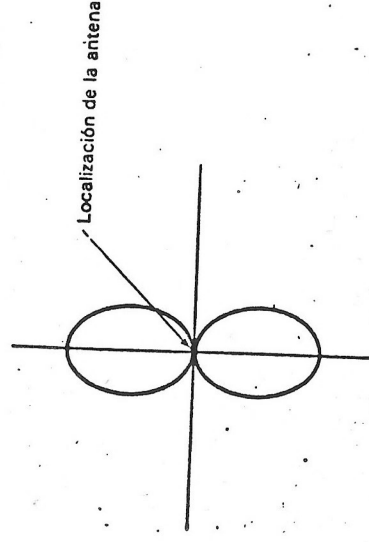


Figura 7-2

En la figura 7-2 se observa el patrón de radiación de la antena denominada *antena Hertz*. La distancia desde el punto de ubicación de la antena a un punto del patrón de radiación indica la intensidad relativa de la radiación en la dirección determinada por estos dos puntos.

Cuando se tiene un patrón de radiación como el de la figura 7-3 para determinar la intensidad relativa de la señal en el punto *A*, se dibuja una línea desde el origen, la cual une el punto *O* al punto *A*. La intersección de esta línea con el patrón de radiación determina el extremo del vector. Cuando se emplea una antena para propósitos de recepción el patrón de radiación resulta ser un *patrón de recepción*. La sección alargada de los lóbulos del patrón indica la mejor dirección para la recepción.

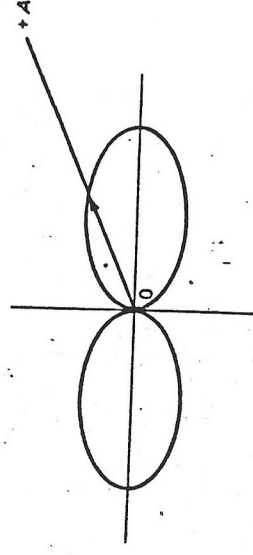


Figura 7-3

ANCHO DEL HAZ

Con frecuencia es necesario disponer de un medio rápido para comparar la directividad de las antenas sin que se tenga que hacer una comparación punto por punto sobre el patrón de radiación. Tal medio lo constituye el ancho del haz de la antena, que es el ángulo dentro del cual la potencia radiada está por encima de un medio de la que está en la dirección más preferente, o bien puede decirse, que el ancho del

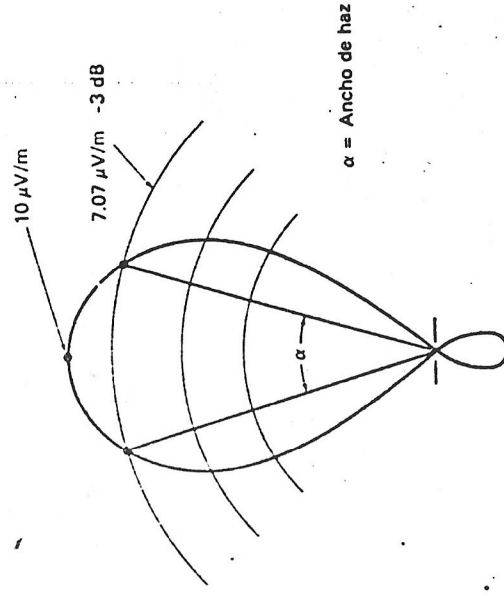


Figura 7-4

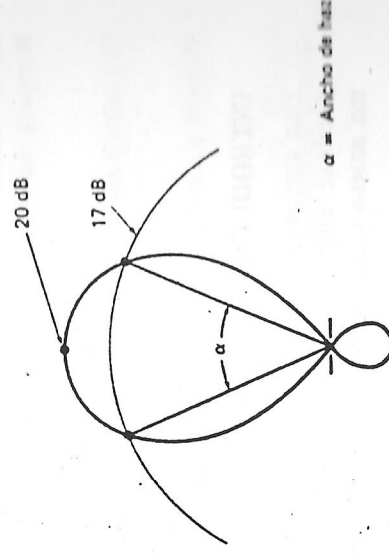


Figura 7-5

haz, es el ángulo en el cual el voltaje desarrollado por la antena receptora se mantiene dentro del 70.7% del desarrollado por ella cuando se la orienta hacia la dirección más preferente. Otra forma de describir los puntos de potencia mitad es refiriéndose a ellos como los puntos de 3 dB, puesto que la potencia mitad corresponde a -3 dB en la escala de estas unidades (véanse las figuras 7-4 y 7-5).

RESISTENCIA DE ANTENA

Si es potencia lo que se va a obtener en la antena se la debe conectar a una línea de transmisión. Es necesario que la impedancia característica de la línea de transmisión sea igual a la resistencia que presente la antena a fin de evitar que haya ondas estacionarias en la línea.

Si se intenta medir la resistencia de antena conectando un óhmetro a través de las terminales de antena, se obtendrá una lectura que indica que hay un circuito abierto puesto que este instrumento de medición emplea una fuente de cd para medir resistencia. Por lo tanto, se debe considerar alguna forma diferente de hacer la medición que no sea la del óhmetro. La resistencia que presenta la antena se conoce como *resistencia de radiación*.

La resistencia de radiación de una antena se define como una resistencia ficticia que disiparía tanta potencia como la que irradia la antena al ser conectada a la misma línea de transmisión (véase la figura 7-6). Una antena que está radiando 100 W cuando se extraen 2 A, tiene una resistencia de radiación de $100/2^2$ o 25Ω ($P/I^2 = R$). Debe tenerse presente que ésta no es una resistencia real, lo cual ocasiona pérdidas por calentamiento.

Existen pérdidas por calentamiento relacionadas con una antena, pero estas pérdidas no son las que se consideran en la resistencia de radiación. La resistencia de radiación se toma en relación con la potencia que se irradia. Existe otra resistencia asociada con una antena que se define para tomar en cuenta estas pérdidas por calentamiento y se la denomina *resistencia óhmica* de la antena. Representa las pérdidas reales originadas por la conversión de energía eléctrica en calor como resultado de la resistividad de los diferentes elementos conductores de la antena.

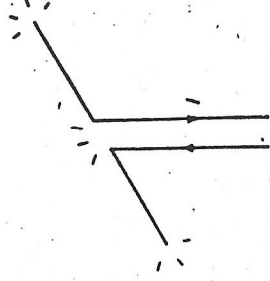
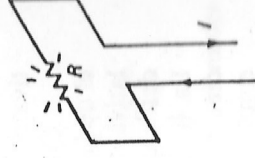


Figura 7-6



LA ANTENA COMO UN CIRCUITO RESONANTE

La impedancia que presenta una antena también posee una componente reactiva debida a corrientes y voltajes que se encuentran fuera de fase. La razón de este desfaseamiento se puede deber a que la antena no haya sido cortada a la longitud exacta necesaria para el tipo de antena considerada. En realidad, una antena es en gran medida como un circuito sintonizado en el que a su frecuencia central (aquella a la cual su geometría es correcta con exactitud) presenta a la línea de transmisión una impedancia máxima, cuya naturaleza es puramente resistiva (resistencia de radiación más resistencia óhmica). Conforme cambia la frecuencia de la señal entregada a la antena, la impedancia presentada a la línea de transmisión se vuelve reactiva, tal como ocurre con un circuito sintonizado. El ancho de banda y el Q de una antena se pueden analizar tal como se hizo con los circuitos sintonizados y estos términos conservan su significado original. La relación entre el ancho de banda y el Q de una antena es la misma que para los circuitos sintonizados.

$$\text{Ancho de banda} = \frac{f_0}{Q}$$

Si por alguna razón la frecuencia resonante de una antena está exactamente a la frecuencia a la que se va a transmitir, la antena igual puede ser sintonizada. Para este propósito se emplean *sintonizadores de antena* los cuales son circuitos reactivos sintonizables que al sintonizarse hacen con la antena una combinación que cancela los componentes reactivos. La reactancia capacitiva contrarresta a la reactancia inductiva y ésta a aquélla.

FACTOR DE VELOCIDAD

Como se vio en el capítulo 6, las ondas electromagnéticas no viajan a la misma velocidad en todos los medios. Los valores 186 000 millas/s o 3×10^8 metros/s para la velocidad de la radiación electromagnética sólo son válidos para el espacio libre.

La velocidad de las ondas electromagnéticas es ligeramente diferente en un conductor según que el material de la antena sea de aluminio, cobre, etc. Como se mencionó antes, se emplea el factor de velocidad para tomar esto en cuenta. El factor de velocidad es el número que cuando se lo multiplica por la velocidad de la luz en el espacio libre da la velocidad de la luz en el medio en cuestión.

TIPOS DE ANTENAS

La antena dipolo de media onda y la antena Marconi

Las dos antenas básicas son la antena dipolo de media onda o antena Hertz, y la antena vertical de un cuarto de onda, o antena Marconi. La primera de las mencionadas se muestra en la figura 7-7 y la segunda en la figura 7-8.

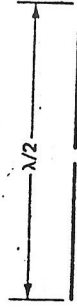


Figura 7-7



Figura 7-8

Como es obvio dadas sus denominaciones, la longitud óptima para cada una de las dos antenas es de media longitud de onda para la Hertz y de un cuarto de longitud de onda para la Marconi.

Antenas de haz

Una antena de haz es aquella que tiene propiedades altamente direccionales y que en forma esencial emite un haz de radiación electromagnética.

A la antena *Yagi-Uda* con frecuencia se la considera como una antena de haz dado su patrón de radiación altamente direccional.

Existen otras muchas antenas que tienen características de alta direccionalidad, y también son consideradas como antenas de haz. Una de éstas es la *antena rómbrica*, la cual se ve en la figura 7-9. Está construida en un plano horizontal y tiene un patrón de radiación como el dado. La resistencia de entrada de la antena rómbrica es de $800\ \Omega$.

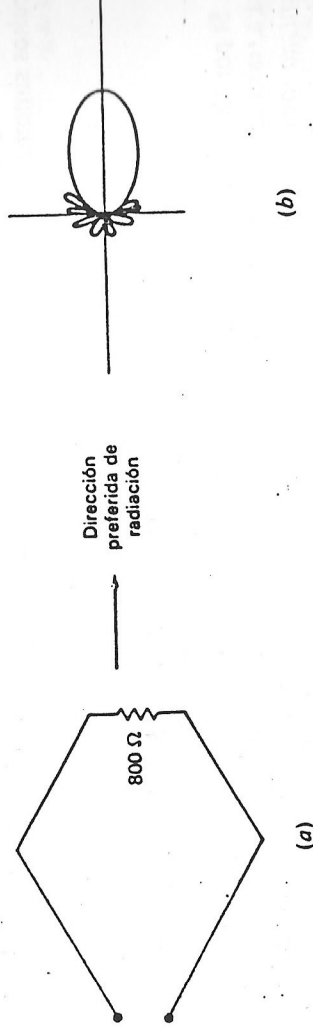


Figura 7-9

Antena de dipolo plegado

Dentro del análisis de las demás antenas considérese el dipolo plegado que se muestra en la figura 7-10. Esta antena es en realidad una variante de la dipolo: el dipolo plegado tiene una impedancia de entrada de aproximadamente $280\ \Omega$ y se la puede emplear en forma bastante conveniente con una línea de transmisión del tipo de cinta plana (twinex), la cual tiene una impedancia característica de $300\ \Omega$. El dipolo plegado con un reflector y línea de transmisión twinex es muy popular y se emplea en receptores de televisión para el hogar.

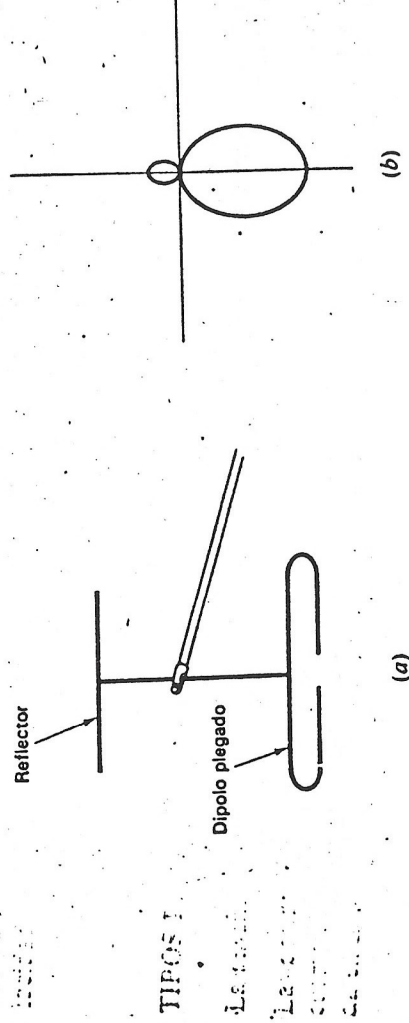


Figura 7-10

Antena cruzada

Se denomina antena cruzada a una interesante variante de la antena dipolo. Recuérdese el patrón de doble lóbulo en forma de ocho de la antena dipolo. Considérese el patrón de radiación que resultaría si se construyeran dos antenas dipolos sobre el mástil perpendiculares una a la otra, una radiando en la dirección norte-sur y la otra en la dirección este-oeste. Presentaría una forma de doble ocho, y en donde se

traslaparan las dos, se tendría una suma vectorial de los dos campos; el resultado sería una radiación casi circular en el plano horizontal (véase la figura 7-11). Los dos patrones de radiación indicados se basan en los dos dipolos alimentados por señales 90° fuera de fase pero idénticos en todo lo demás. La antena cruzada tiene una resistencia de entrada de 36Ω (la mitad de la de un dipolo, 72Ω).

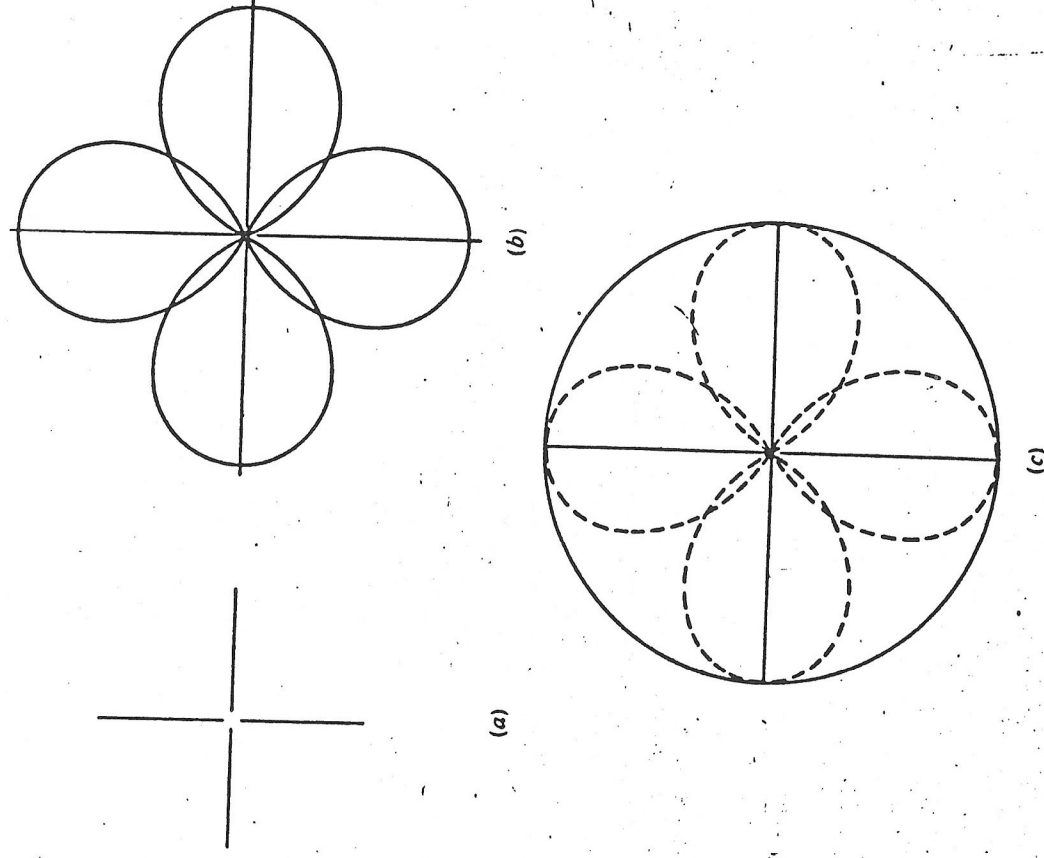
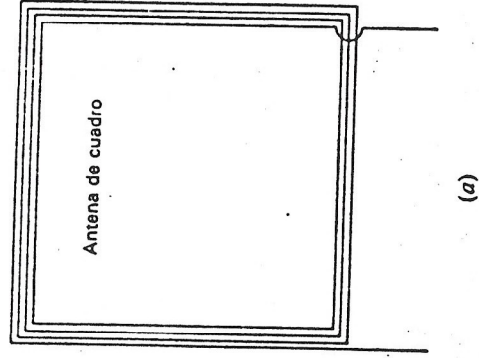


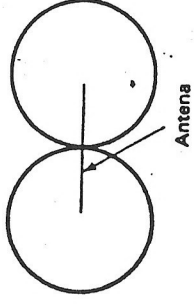
Figura 7-11

Antena de cuadro

Una antena que se emplea con mucha frecuencia, pero casi siempre como antena de recepción, es la antena de cuadro. Es común encontrarla en la parte posterior de los radios de mesa de CA-CD con forma cuadrada u oblonga. El número de vueltas de alambre es muy variable ya que puede ser desde una a unas docenas en una bobina que va pegada al interior del gabinete o en la cubierta posterior. En la figura 7-12 se muestra esta antena y su patrón de radiación.



(a)



(b)

Figura 7-12

GANANCIA DE ANTENA

La ganancia de antena es la comparación de la salida en una dirección determinada de la antena en cuestión y una *antena de referencia*. La antena de referencia puede ser una antena omnidireccional por ejemplo la Marconi de un cuarto de longitud de onda la cual emite cantidades iguales de radiación en todas las direcciones (un patrón de radiación circular), o un dipolo. Por lo tanto, si se dice que una antena tiene una ganancia de 10 dB, significa que con la antena en cuestión se obtiene una mejora sobre la antena de referencia, en esa dirección, de 10 dB. La potencia incrementada que se irradia en una dirección en particular se obtiene a expensas de las otras direcciones. Así, la ganancia de antena *no* se refiere a la obtención de una mayor potencia de salida en relación con la potencia de entrada. Es frecuente hacer la comparación de una antena con otra, evitándose así la necesidad de una referencia.

EFICACIA DIRECTIVA

La eficacia directiva es la razón expresada en dB de la salida en la dirección óptima a la salida 180° respecto de ella.

REFLECTORES Y DIRECTORES

Existen muchas situaciones en las cuales es deseable enfocar la potencia radiada en un área más limitada de la que es posible con un dipolo sencillo. Por ejemplo, en comunicaciones por radio entre dos estaciones es conveniente concentrar la potencia total radiada de la estación transmisora en una dirección. Este efecto deseado se puede obtener empleando reflectores y directores.

Éstos son elementos conductores adicionales que se emplean para obtener una mejora en la directividad de la antena. El director se coloca enfrente del elemento excitado (el dipolo) y el reflector detrás de él.

La figura 7-13 es el dibujo de una antena que consta de un dipolo, un reflector y un director. Nótese que el director es de una longitud menor a media longitud de onda y está a una distancia menor del dipolo que el reflector. El espaciamiento óptimo entre el dipolo y el director es de 0.1 de longitud de onda cuando la longitud del director es un 5% más pequeña que la del dipolo.

El reflector es ligeramente mayor de una media longitud de onda y está colocado a me-

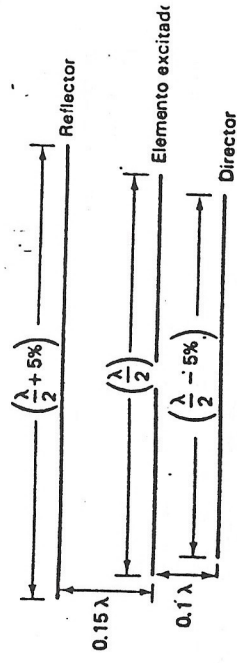


Figura 7-13

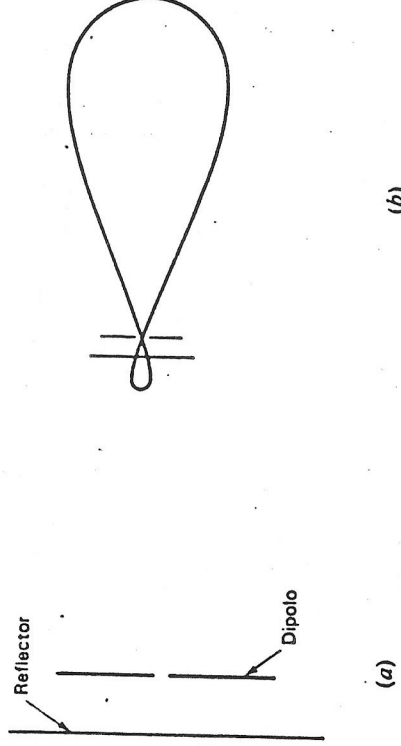


Figura 7-14

nos de un cuarto de longitud de onda detrás y en forma paralela al dipolo. El espaciamiento óptimo es de 0.15 de longitud de onda si el reflector es un 5% mayor que el dipolo. La figura 7-14 muestra el patrón de radiación resultante de la combinación formada por el dipolo y el reflector. Nótese el incremento de radiación en una dirección a expensas de las otras direcciones.

Los directores y reflectores se conocen como *elementos parásitos* puesto que cuando son empleados en una antena transmisora no se los conecta a la línea de transmisión, sino que obtienen su energía de la potencia transmitida por el dipolo, el cual sí se conecta a dicha línea. El dipolo es conocido como el *elemento excitado*. Una antena formada por un elemento excitado y un determinado número de elementos parásitos se llama red directiva de antena con elementos parásitos o pasivos. A un dipolo con reflectores y directores frecuentemente se la denomina antena Yagi-Uda o antena Yagi.

TRAMPAS DE ANTENA

Existen situaciones en las cuales una estación puede transmitir a diferentes frecuencias en distintos tiempos, para lo cual es conveniente estar en posibilidades de irradiar en forma eficiente en cada una de estas frecuencias. Una posibilidad es hacer uso de la misma línea de transmisión y de la misma antena, pero alargando ésta cuando se vayan a transmitir señales de mayor longitud de onda. Esto se puede hacer colocando circuitos LC en diferentes puntos sobre la antena. Estos circuitos LC tienen una impedancia que varía desde valores muy bajos a valores muy altos. Eligiendo en forma apropiada la combinación de inductancias, capacitancias y Q , se puede diseñar una unidad denominada trampa, la cual se comporta como un circuito abierto en un cierto intervalo de frecuencias, removiéndose con ello la porción de la antena comprendida entre la trampa y el extremo de aquélla, quedando activa sólo la porción comprendida entre el punto de excitación y las trampas. En un dipolo alimentado en el centro las trampas se encuentran por pares, una en cada una de las secciones de un cuarto de longitud de onda, y la longitud de la antena resulta ser la distancia comprendida entre las dos trampas cuando la antena opera a la frecuencia a la cual las trampas se consideran en circuito abierto (véase la figura 7-15).

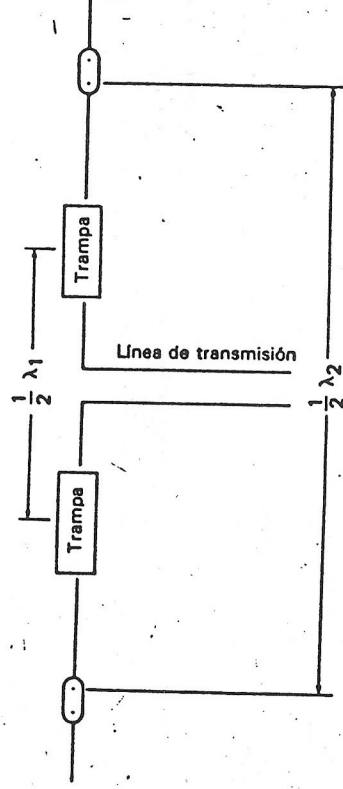


Figura 7-15

Las trampas se obtienen en forma comercial para diferentes frecuencias. Es aceptable tener más de un conjunto de trampas sobre una línea de tal manera que la longitud de la antena se pueda cambiar y adoptar diferentes valores.

PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS

1. Por la superficie terrestre (la *onda de tierra*).
2. En línea recta (la *onda de línea vista*).
3. Hacia arriba a la ionosfera, regresando a tierra (la *onda celeste*).

Véase la figura 7-16

La frecuencia de la señal es la que determina cuál de estos modos es el que predomina. Véase la figura 7-17.

La falta de efectividad de la onda de línea de vista consiste, como su nombre lo indica, en que está limitada por la línea de vista entre las antenas transmisora y receptora.

Se puede emplear la siguiente ecuación para calcular la distancia máxima entre antenas transmisoras y receptoras para ondas directas de línea de vista de modo que resulten efectivas,

$$d = \sqrt{2h_t} + \sqrt{2h_r}$$

en donde h_t es la altura de la antena transmisora en pies, h_r es la altura de la antena receptora en pies, y d es la distancia máxima en millas, sobre la cual puede tener lugar la comunicación entre ellas por medio de la onda directa de línea de vista.

que varía
incluyendo
comunicación
antena
cabeza
cuerpo
de la antena
de la antena

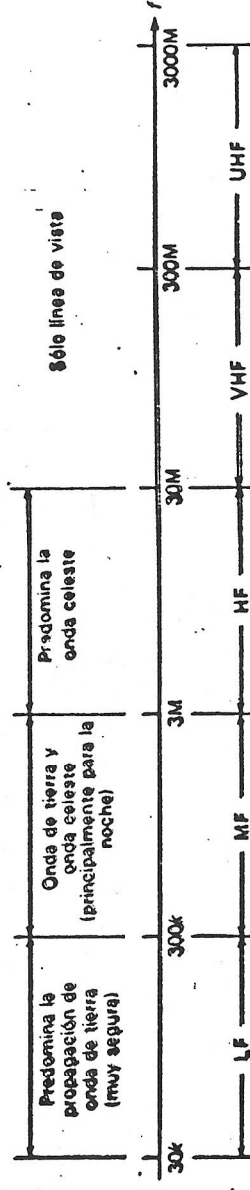
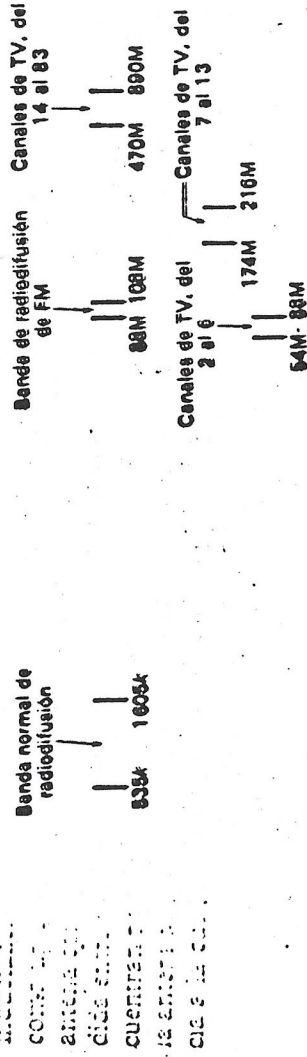


Figura 7-17

Figura 7-16

- 7.18 ¿Hasta qué distancia de una antena transmisora de 1 500 pies de altura puede ser efectiva una onda de línea de vista? Supóngase que la antena receptora tiene una altura de 25 pies. Véase la figura 7-31.

SOLUCIÓN

Dadas: $h_t = 1\,500$ pies
 $h_r = 25$ pies

Encuéntrese: d

Empleando la fórmula que relaciona la distancia en millas y la altura de la antena en pies,

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{2h_t} + \sqrt{2h_r} \\ &= \sqrt{2(1500)} + \sqrt{2(25)} \\ &= \sqrt{3000} + \sqrt{50} \\ &= 54.77 + 7.07 \end{aligned}$$

$$d = 61.84 \text{ millas suponiendo que no hay obstrucciones}$$

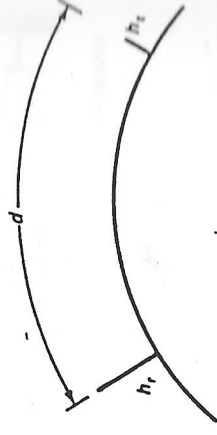


Figura 7-31

Problemas suplementarios

- 7.19 Bosquéjese el patrón de radiación de una antena Marconi.
Resp. Véase la figura 7-1
- 7.20 Bosquéjese el patrón de radiación de una antena Hertz.
Resp. Véase la figura 7-2
- 7.21 ¿Qué otro nombre tiene la antena Hertz?
Resp. Dipolo de media onda.
- 7.22 Expresese la diferencia existente entre la resistencia de radiación de una antena y su resistencia óhmica.
Resp. La resistencia de radiación se considera para la potencia radiada. La resistencia óhmica se toma en cuenta para el calor que se genera debido a la resistividad.
- 7.23 Determinese la resistencia de radiación de una antena que irradia 1 000 W al extraer 5 A.
Resp. 40 Ω
- 7.24 ¿Qué corriente extrae una antena al radiar 500 W, si tiene una resistencia de radiación de 300 Ω ?
Resp. 1.29 A
- 7.25 Una antena que tiene una resistencia de radiación de 50 Ω extrae 8 A. ¿Qué potencia está radiando?
Resp. 3 200 W
- 7.26 Calcúlese la resistencia de radiación de una antena que está alimentada con 12 A cuando irradia 10 kW.
Resp. 69.44 Ω

- 7.27 ¿Qué potencia irradiará una antena de 50Ω cuando se la alimenta con una corriente de 4 A?
 Resp. 800 W

$$P = I^2 R \quad f \cdot \lambda = v$$

- 7.28 Determine el Q de una antena cortada para una frecuencia de 14 MHz y que tiene un ancho de banda de 4 MHz.

$$\text{Resp. } Q = 3.5 \quad \text{frecuencia factor de calidad} \quad \text{ancho de banda} = \frac{f_0}{Q}$$

- 7.29 ¿Cuál es el ancho de banda de una antena cortada para 110 MHz y con un Q de 70?

$$\text{Resp. Ancho de banda} = 1.57 \text{ MHz}$$

- 7.30 Una antena cortada para una frecuencia de 30 MHz tiene un Q de 40. Determine su ancho de banda.

$$\text{Resp. Ancho de banda} = 750 \text{ kHz}$$

- 7.31 Calcúlese la longitud de una antena dipolo de media longitud de onda para una frecuencia de 75 MHz. Supóngase un factor de velocidad de 0.90.

$$\text{Resp. } 1.8 \text{ m}$$

$$\text{para una antena dipolo } \frac{\lambda}{2}$$

- 7.32 Suponiendo un factor de velocidad de 0.88, determínese la longitud óptima de una antena Marconi que se va a cortar para una frecuencia de 65 MHz.

$$\text{Resp. } 1.015 \text{ m}$$

$$\text{para una antena Marconi } \frac{\lambda}{4}$$

- 7.33 Calcúlese la longitud que se requiere en una antena dipolo de media onda para una frecuencia de 90 MHz si el factor de velocidad sobre la antena es de 0.87. Después determínese la longitud que se requiere para la antena, si el factor de velocidad fuera de 1.0.

$$\text{Resp. } 1.45 \text{ m}, 1.667 \text{ m}$$

- 7.34 Una antena Marconi tiene una longitud de 2.8 m. El factor de velocidad es de 0.80. ¿Para qué frecuencia se cortó esta antena?

$$\text{Resp. } 21.43 \text{ MHz}$$

- * 7.35 Una antena experimental tiene una ganancia de 3 dB por encima de una antena de referencia. ¿Qué potencia tendría que radiar la antena de referencia a fin de proporcionar la misma señal captada cuando se irradian 5 W por la antena experimental?

$$\text{Resp. } 10 \text{ W}$$

- 7.36 Se va a radiar la misma señal de prueba por la antena A y después por la antena B. Una antena receptora capta una señal de $5 \mu\text{V/m}$ cuando la transmisión se efectúa con la antena A. Cuando la misma señal de prueba se emite con la antena B, la antena receptora capta una señal de $20 \mu\text{V/m}$. Calcúlese la ganancia de la antena B sobre la antena A.

$$\text{Resp. } 12 \text{ dB}$$

- 7.37 Una antena que tiene una ganancia de 3 dB sobre una antena de referencia está radiando 1 500 W. ¿Qué potencia debe radiar la antena de referencia a fin de que se tenga la misma efectividad en la dirección por la que se tiene más preferencia?

$$\text{Resp. } 3 000 \text{ W}$$

$$A_{FB} = 10 \frac{P_2}{P_1}$$

- 7.38 Calcúlese la eficacia directiva de una antena que irradia 500 W en dirección norte y 50 W en dirección sur.

$$\text{Resp. } 10 \text{ dB}$$

$$A_{th} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

P_1 potencia de referencia
 P_2 potencia de referencia