



# **IC 323 -Comunicación de Datos**

## **Unidad N°7: Antenas y Radio Enlaces**

**Antenas y sus características**

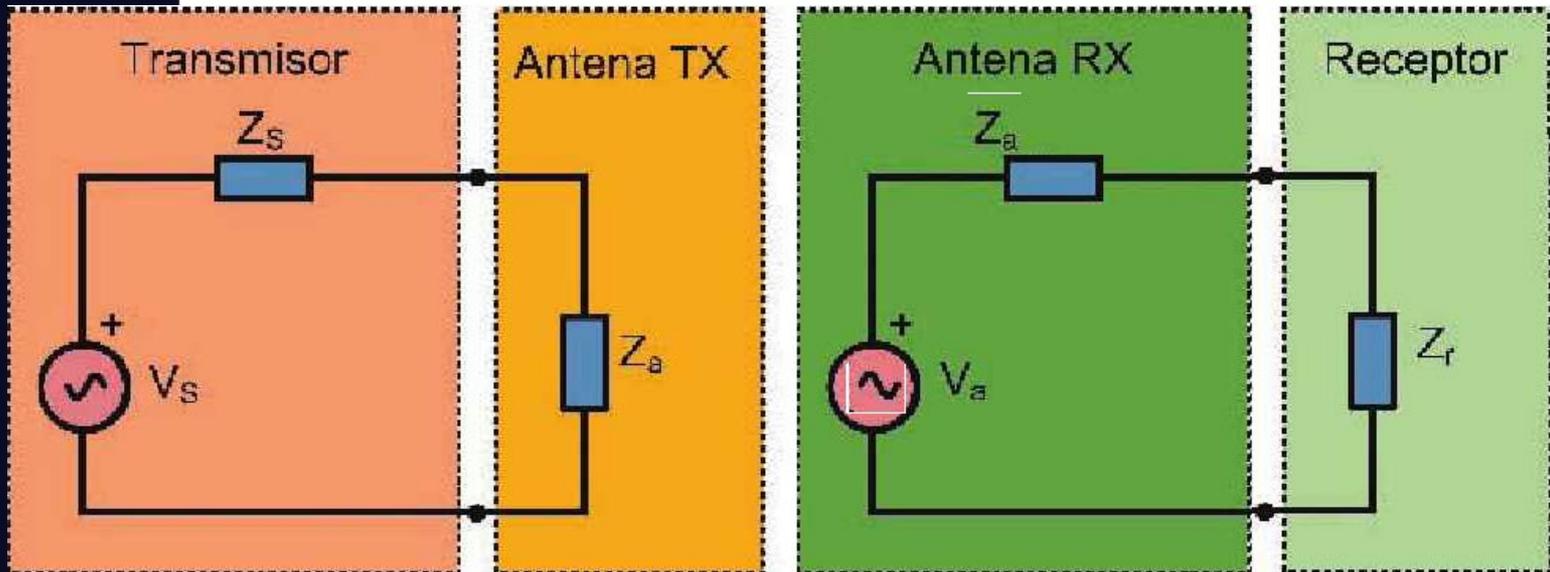
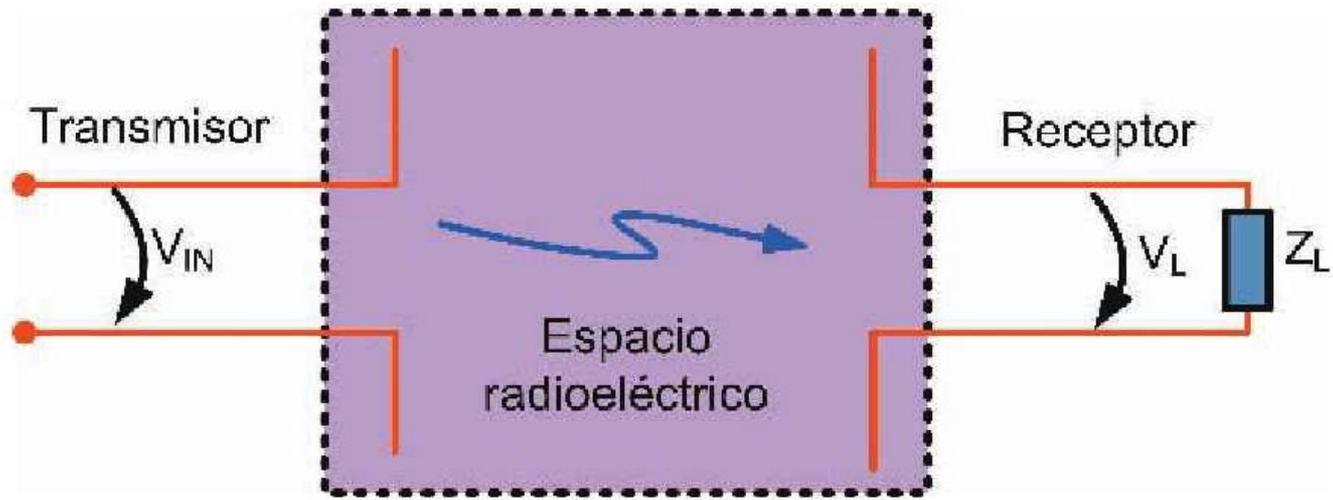


# Parámetros de las Antenas

- Las antenas son una parte fundamental de los sistemas de comunicación inalámbrica
- Actúan como emisores y/o receptores de las ondas electromagnéticas
- Son una interfaz entre una zona donde existe una onda guiada y una onda en el espacio libre (conecta líneas de transmisión con el espacio libre y viceversa)



# Circuito equivalente de una Antena





# Reciprocidad de Antenas

- Las antenas son elementos recíprocos pasivos cuyas propiedades pueden considerarse bidireccionales
- Sus propiedades y características, como ganancia, ancho de banda, directividad, etc. son idénticas tanto en transmisión como en recepción
- Sin embargo, a nivel constructivo, las antenas de transmisión trabajan con potencias mucho más altas, por lo tanto se realizan con materiales para soportar altas tensiones y corrientes
- Para poder utilizar una antena tanto en transmisión como recepción se utiliza un diplexor



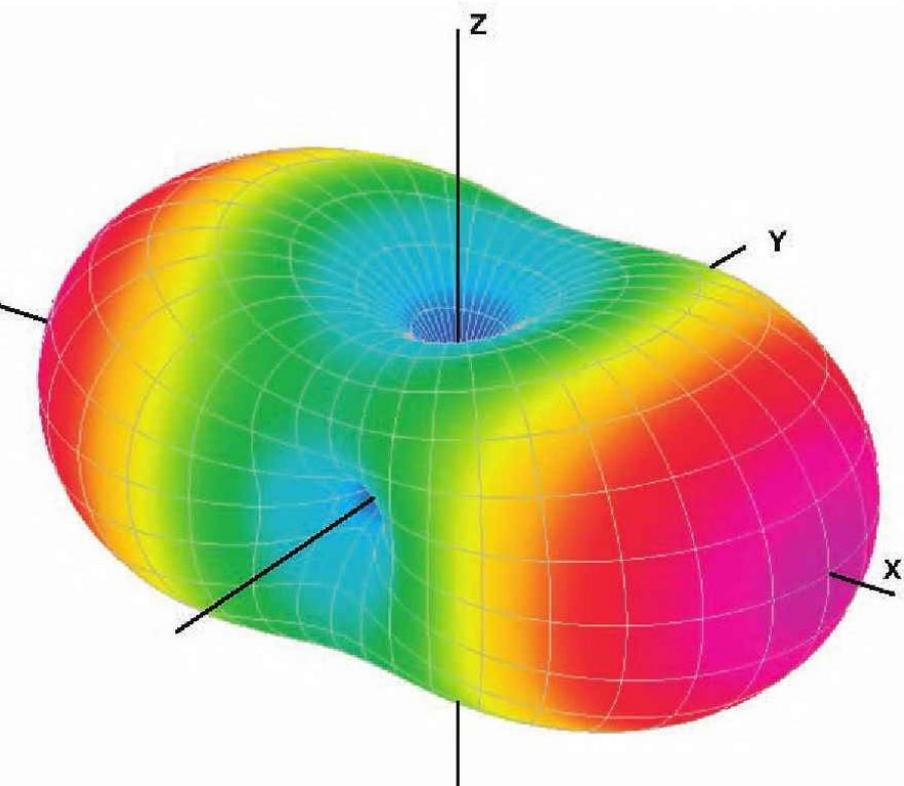
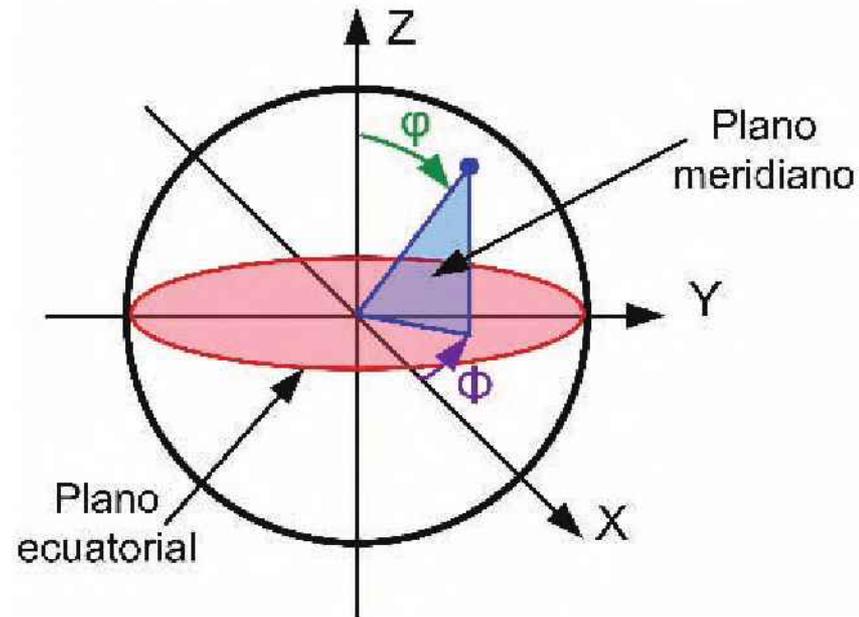
# Diagrama de Radiación

- Es la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las distintas direcciones del espacio a una distancia fija.
- Se diferencian:
  - **Diagrama de radiación absoluta** (en términos de intensidad de campo o densidad de potencia – se representa una potencia fija frente a una distancia variable)
  - **Diagrama de radiación relativa** (distancia fija e intensidad de campo variable) Este es el más utilizado



# Diagrama de Radiación

- Sistema de coordenadas polares:

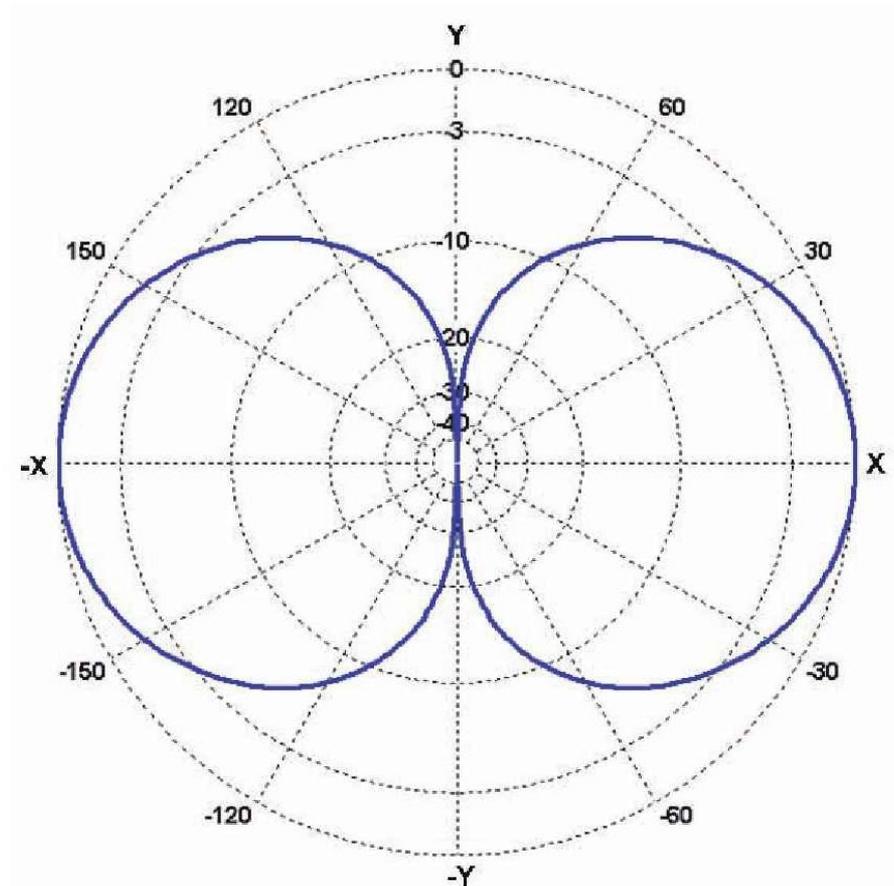


Puede hacerse utilizando el campo magnético, eléctrico o la densidad de potencia. Lo más común es el eléctrico



# Diagrama de Radiación

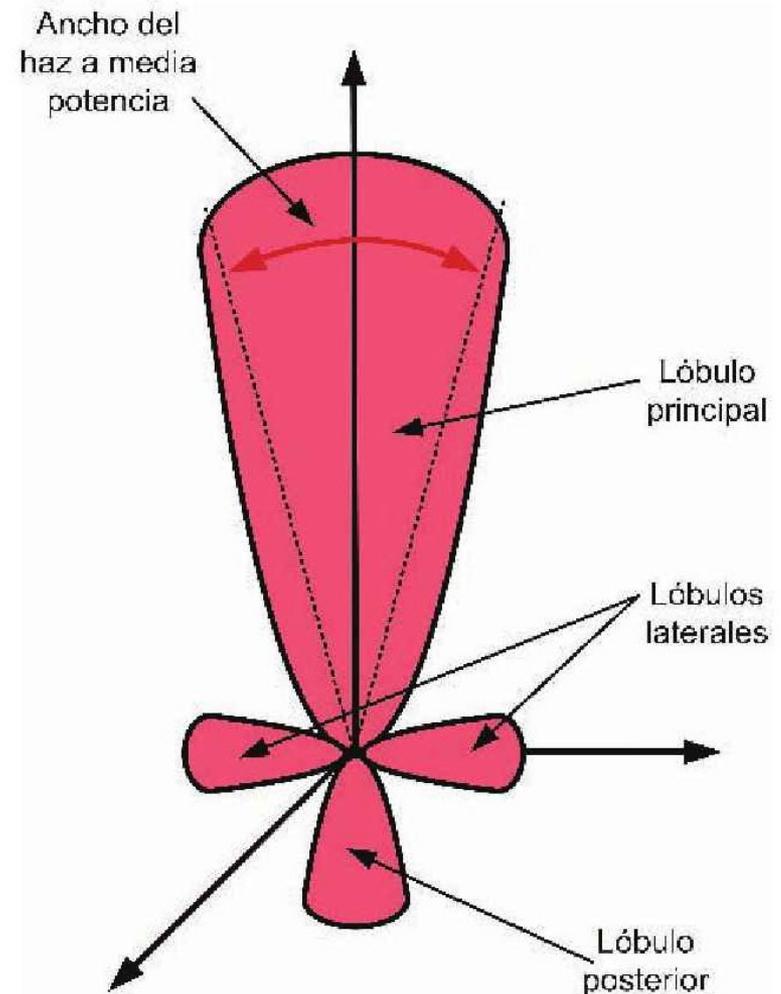
- Lo más común es utilizar representaciones en dos dimensiones a modos de cortes del diagrama tridimensional.
- Ejemplo:





# Diagrama de Radiación

- Descriptores del diagrama de radiación:
  - Lóbulo principal
  - Lóbulos laterales
  - Lóbulo secundario
  - Lóbulo posterior
  - Ancho del haz a mitad de potencia
  - Ancho de haz entre ceros
  - Relación delante-detrás
  - Relación lóbulo principal-lóbulo secundario





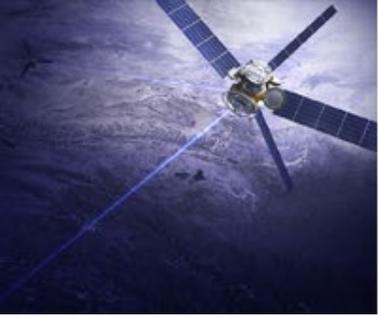
# Impedancia de Entrada

- Cuando conectamos una antena a un transmisor perseguimos que se transfiera la máxima potencia, debiendo existir adaptación de impedancias entre el transmisor y la antena.
- La impedancia de entrada de la antena es la relación entre la tensión y la intensidad medida en el punto de conexión:

$$Z_e = \frac{V_{entrada}}{I_{entrada}}$$

- Esta impedancia de entrada posee una parte real y una imaginaria, ambas dependientes de la frecuencia:

$$Z_e = R_e(\omega) + jX_e(\omega)$$



# Impedancia de Entrada

- Suponiendo que toda la potencia transferida por el emisor llega a la antena (están adaptados en impedancia), no se irradia toda esta potencia.
- Existen pérdidas que se modelan separando la parte real de la impedancia en dos términos:
  - La resistencia de radiación  $R_r$
  - La resistencia de pérdidas  $R_p$

La potencia radiada puede expresarse como:

$$P_{radiada} = i^2 R_r$$

La potencia perdida es equivalente a:

$$P_{disipada} = i^2 R_p$$

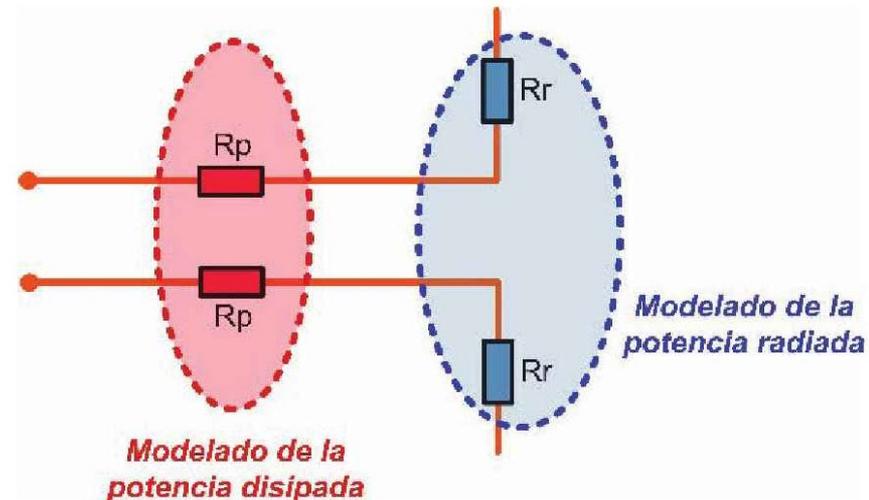


# Impedancia de Entrada

En general, la resistencia de pérdidas es mucho menor a la de radiación (salvo situaciones donde la longitud de onda es mayor a las dimensiones de la antena).

Se define un **rendimiento o eficiencia de la antena**:

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{P_{radiada}}{P_{radiada} + P_{disipada}} = \frac{R_r}{R_p + R_r}$$





# Ganancia directiva

Ganancia directiva es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y a una distancia dada, y la densidad de potencia en ese mismo punto para una antena isotrópica de referencia (suponiendo que ambas están radiando la misma potencia)

$$D(\phi, \varphi) = \frac{d(\phi, \varphi)}{d_{\text{referencia}}}$$

$$D(\phi, \varphi) = \frac{d(\phi, \varphi)}{d_{\text{referencia}}} = \frac{d(\phi, \varphi)}{\frac{P_{\text{referencia}}}{4\pi R^2}}$$



# Directividad

Directividad es la ganancia directiva máxima de una antena. Es el cociente entre la densidad de potencia en la dirección del lóbulo de máxima intensidad y la densidad de potencia que radiaría una antena de referencia en el mismo punto

$$Directividad = D_{\text{maximo}} = \frac{d_{\text{maximo}}}{d_{\text{referencia}}} = \frac{d_{\text{maximo}}}{\frac{P_{\text{referencia}}}{4\pi R^2}}$$



# Ganancia de Potencia

Es similar a la ganancia directiva con la excepción de que se emplea la potencia total que alimenta la antena (se considera el rendimiento)

En el supuesto de no tener pérdidas, la ganancia de potencia se expresa como:

$$G_{potencia}(\phi, \varphi) = \eta \cdot d(\phi, \varphi)$$
$$G_{potencia}(dB) = 10 \log \left( \frac{\eta \cdot d(\phi, \varphi)}{d_{referencia}} \right)$$

(si la ganancia de potencia se refiere a una antena tipo dipolo de media onda, se emplea la unidad dBd)

Cuando la referencia es una antena isotrópica, se utiliza dBi)



# Ganancia de Potencia

La antena no tiene la capacidad de suministrar más potencia que la que recibe a su entrada, pero sí tiene la capacidad directiva de concentrar la densidad de potencia en una dirección de interés, por lo que aparentemente se observa una ganancia en dicha dirección.

Las antenas en recepción también tienen directividad y ganancia de potencia, del mismo modo que las antenas en transmisión



# Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE)

Es la cantidad de potencia que una antena isotrópica teórica tendría que irradiar para poder alcanzar la misma densidad de potencia observada en la dirección de máxima ganancia de una antena

PIRE permite comparar distintas antenas con independencia del su tipo, forma o tamaño y viene expresada por:

$$PIRE = P_{radiada} \cdot D_{maximo}$$



# Polarización

La polarización es la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética al propagarse.

La polarización puede variar en relación a la dirección. Por ello, se hace mención a la polarización en la dirección donde la antena radia con más potencia

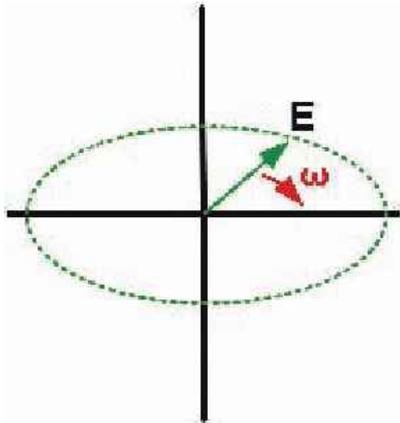
Las antenas pueden estar polarizadas linealmente (en el plano vertical o en el plano horizontal), circularmente o elípticamente.

Las antenas sencillas suelen tener polarización lineal. En frecuencias inferiores a los megahercios, usan polarización vertical

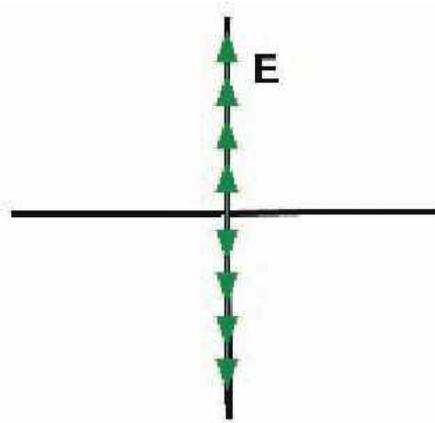
En FM, VHF, y UHF, polarización horizontal



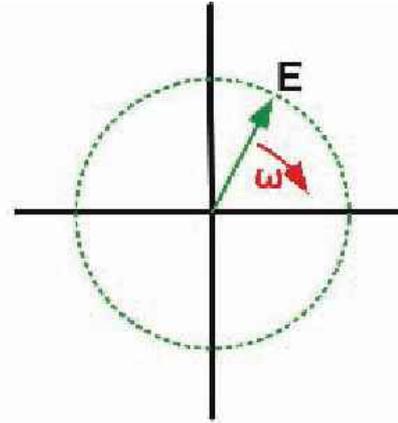
# Polarización



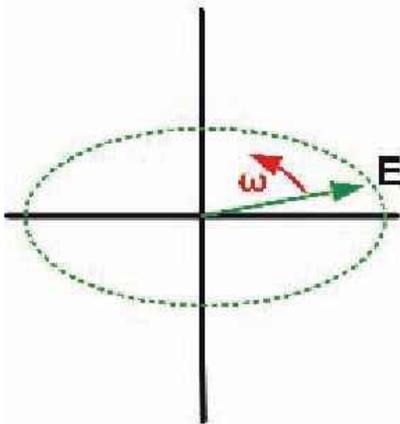
Polarización elíptica a izquierdas



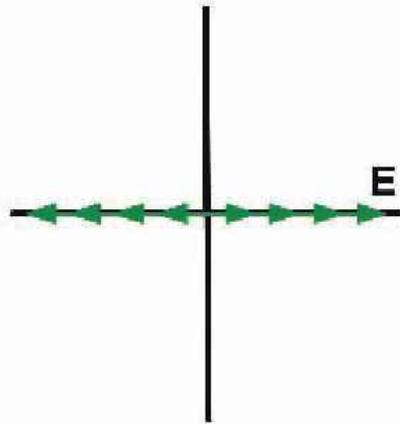
Polarización lineal vertical



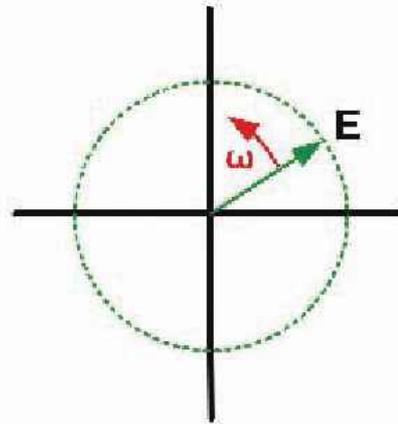
Polarización circular a izquierdas



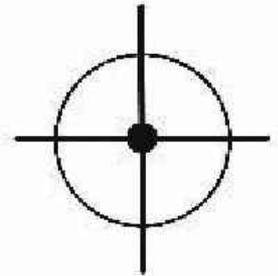
Polarización elíptica a derechas



Polarización lineal horizontal



Polarización circular a derechas



Dirección de propagación de la onda



# Adaptación

La impedancia de salida del transmisor y la de entrada de la antena deben ser complejos conjugados

$$Z_S = R_S + jX_S = Z_E^* = R_E - jX_E$$

$$R_S = R_E$$

$$X_S = -X_E$$

La medición del grado de adaptación se hace con el ROE

$$ROE = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

$$\rho = \frac{Z_E - Z_O}{Z_E + Z_O}$$



# Área y longitud efectiva

A pesar de la reciprocidad, en transmisión o en recepción son utilizados parámetros diferentes.

Por ejemplo, en transmisión se usa ganancia de potencia para indicar la propiedad de direccionalidad.

En recepción, se utiliza el término **área de captación o área efectiva**.

**Es la relación entre la potencia que la antena entrega a su carga (la captada por la antena) y la densidad de potencia de la onda incidente sobre la antena**

$$A_{\text{efectiva}} = \frac{P_{\text{carga}}}{d_{\text{incidente}}}$$



# Área y longitud efectiva

La impedancia de la antena debe estar adaptada a la carga para que se produzca la máxima transferencia de potencia  
La onda recibida debe tener la misma polarización que la antena

En las antenas polarizadas linealmente se define el término longitud efectiva: relación entre la tensión inducida en un circuito abierto en los bornes de la antena y la intensidad de campo incidente en la misma

$$l_{efectiva} = \frac{|V_{ca}|}{|E_{incidente}|}$$

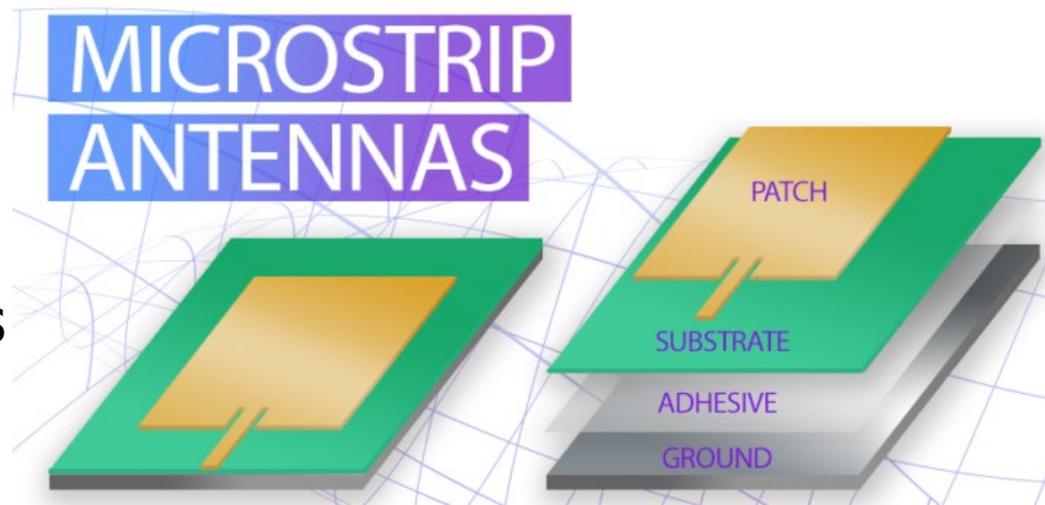


# Tipos de Antenas

Existe una amplia variedad de antenas establecida principalmente en función de la aplicación y de la banda de frecuencias de trabajo.

Inicialmente, se puede establecer una clasificación en función de la geometría:

- Antenas alámbricas o de cable: se construyen empleando hilos conductores (dipolos, monopolos, antenas en V, rómbicas, espiras, helicoidales, etc.)
- Antenas de apertura: suelen excitarse empleando guías de ondas (bocinas piramidales o cónicas, ranuras sobre planos conductores, microstrip)





# Tipos de Antenas

- Reflectores (parabólicas):



Agrupación de antenas o arrays (se combinan varias antenas)





# Tipos de Antenas

Clasificación de acuerdo con la relación entre su dimensión física y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia que se desea transmitir:

- Antenas elementales: las dimensiones físicas de la antena son muy pequeñas en relación a la longitud de onda (Por ejemplo: dipolo elemental y espira elemental)
- Antenas resonantes: las dimensiones son del orden de media longitud de onda (se consigue que la impedancia de entrada de la antena sea puramente resistiva)
- Antenas directivas: dimensión física mucho mayor a la longitud de onda.

A continuación se estudian las antenas comúnmente utilizadas.

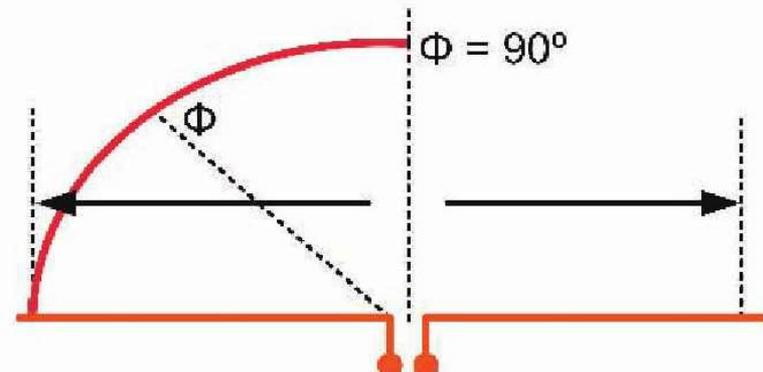
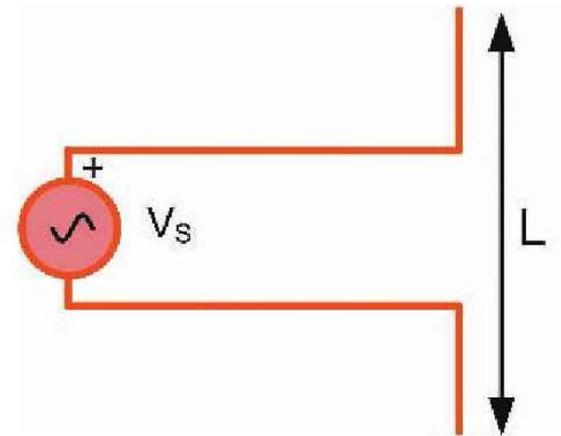


# 1. Dipolo Elemental

Dipolo corto o hertziano,  
Muy sencillo, consiste en un circuito  
abierto formado por dos conductores  
alimentados en su centro

Longitud muy inferior a la longitud de  
onda (10 veces o más)

Se supone que es recorrido por una  
corriente de amplitud uniforme en  
toda su longitud que varía  
sinusoidalmente con el tiempo





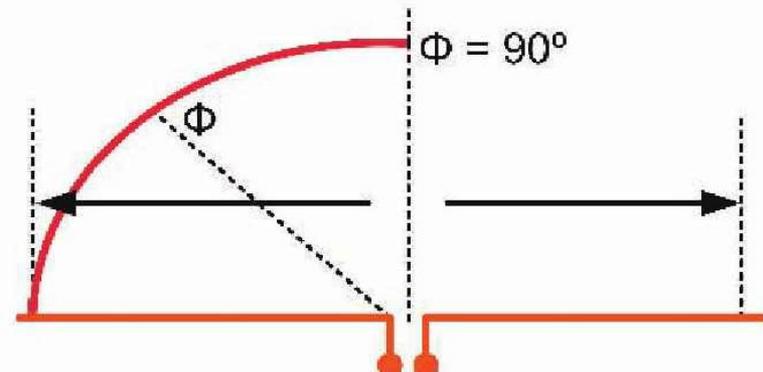
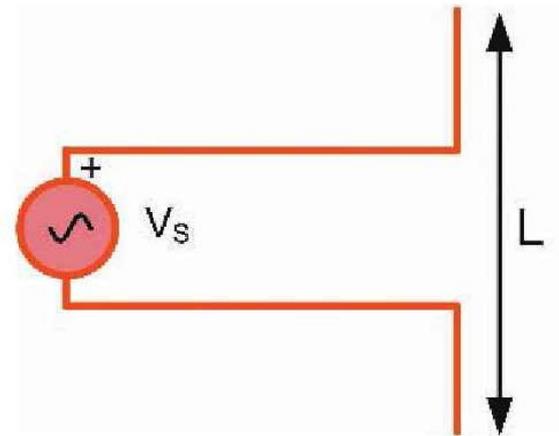
# 1. Dipolo Elemental

Un elevado número de antenas de baja frecuencia se comportan de igual manera.

Mediante la superposición de elementos de corriente es posible analizar distribuciones de mayor longitud y de geometría no uniforme.

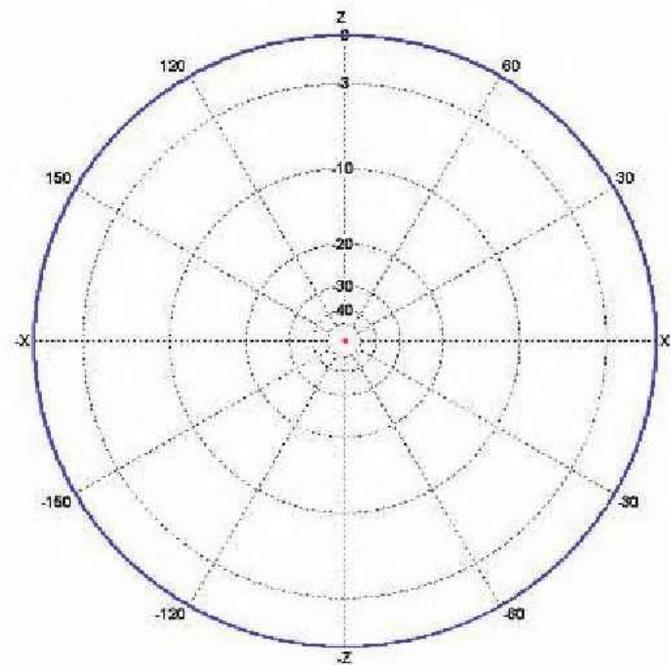
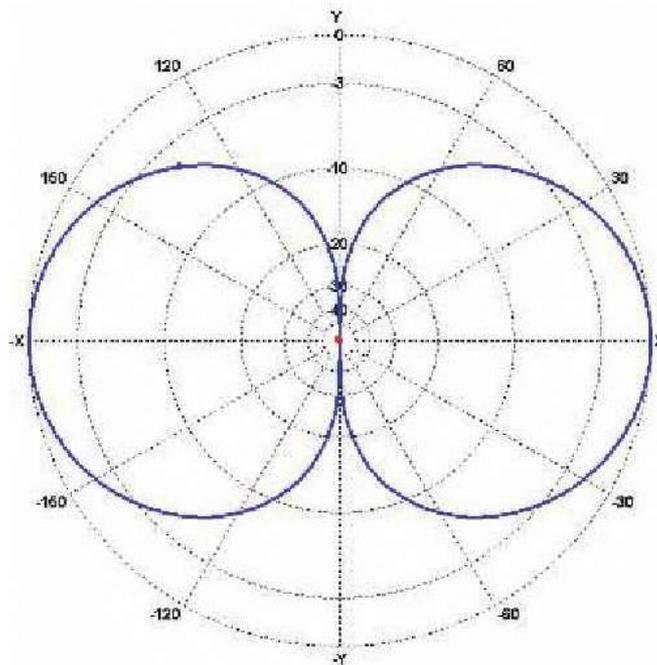
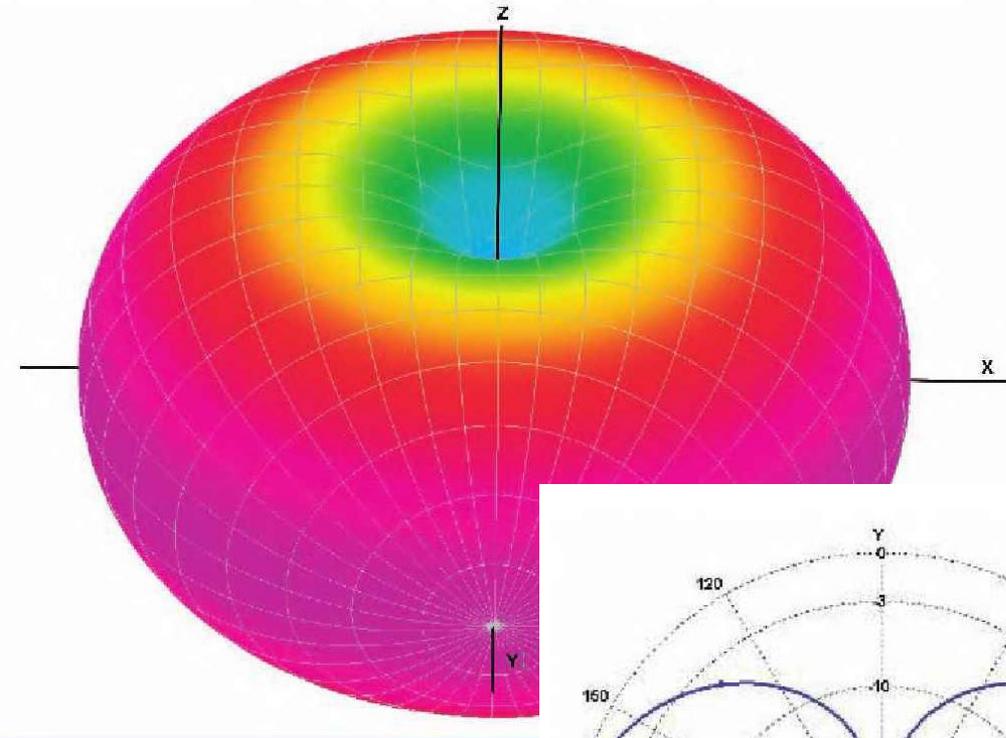
El campo lejano de radiación está dado por:

$$E = \frac{60\pi \cdot I_{RMS} \cdot l_d}{\lambda R} \text{sen}(\theta)$$





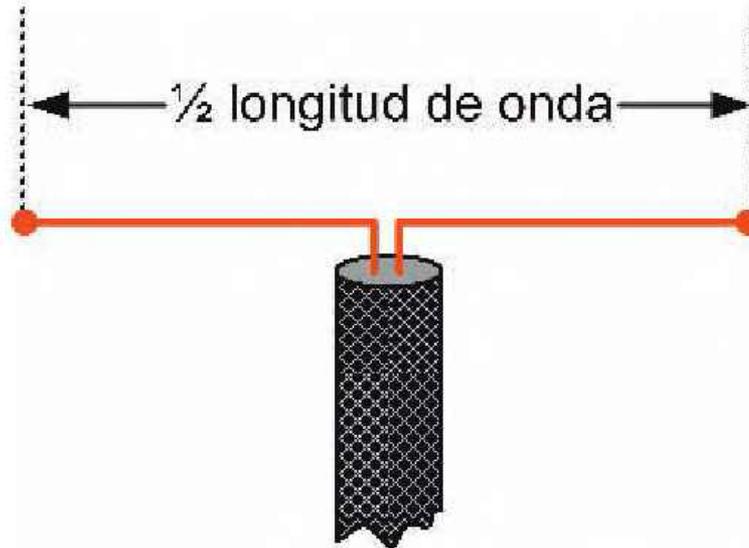
# 1. Dipolo Elemental





## 2. Dipolo de media longitud de onda

Antena construida con dos conductores de una longitud total igual a media longitud de onda.

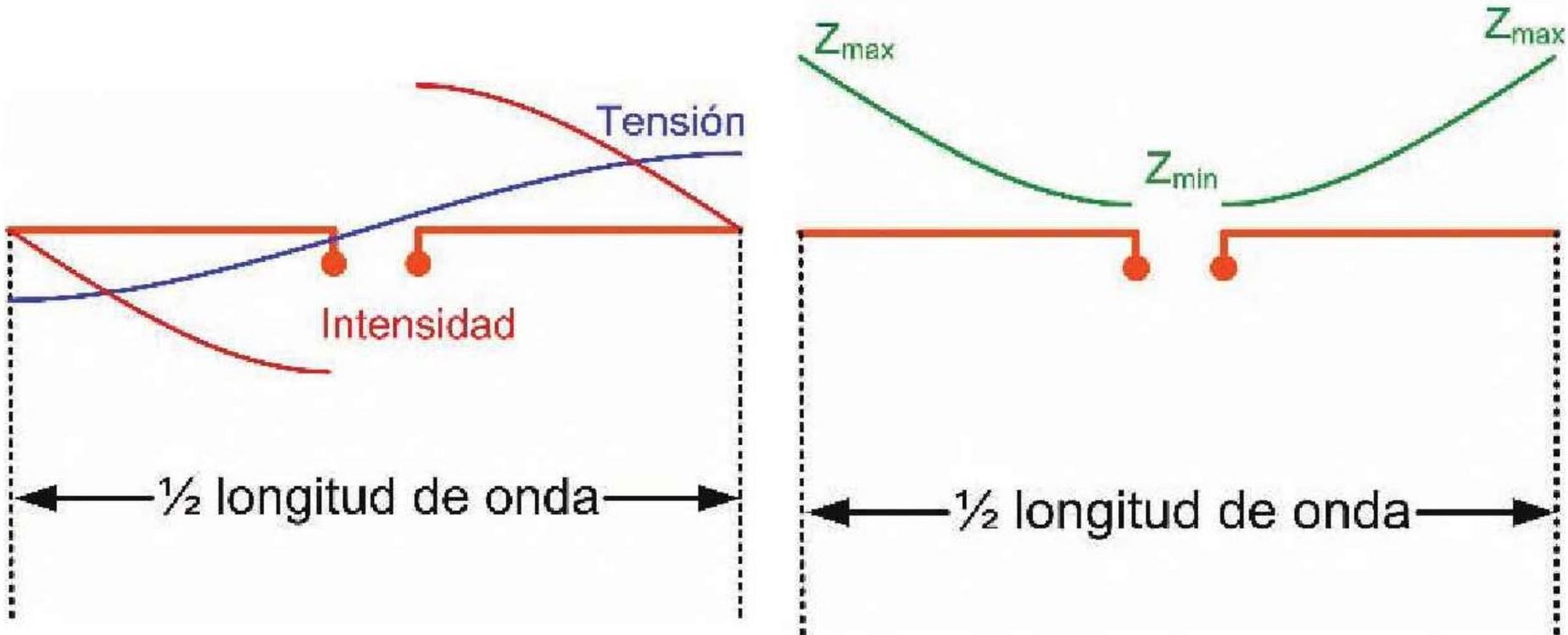


- Es muy utilizada a frecuencias superiores a los 2 o 3 MHz
- Fácil de implementar con bajo costo de puesta a punto.
- Radiación omnidireccional (en todo el plano horizontal)



## 2. Dipolo de media longitud de onda

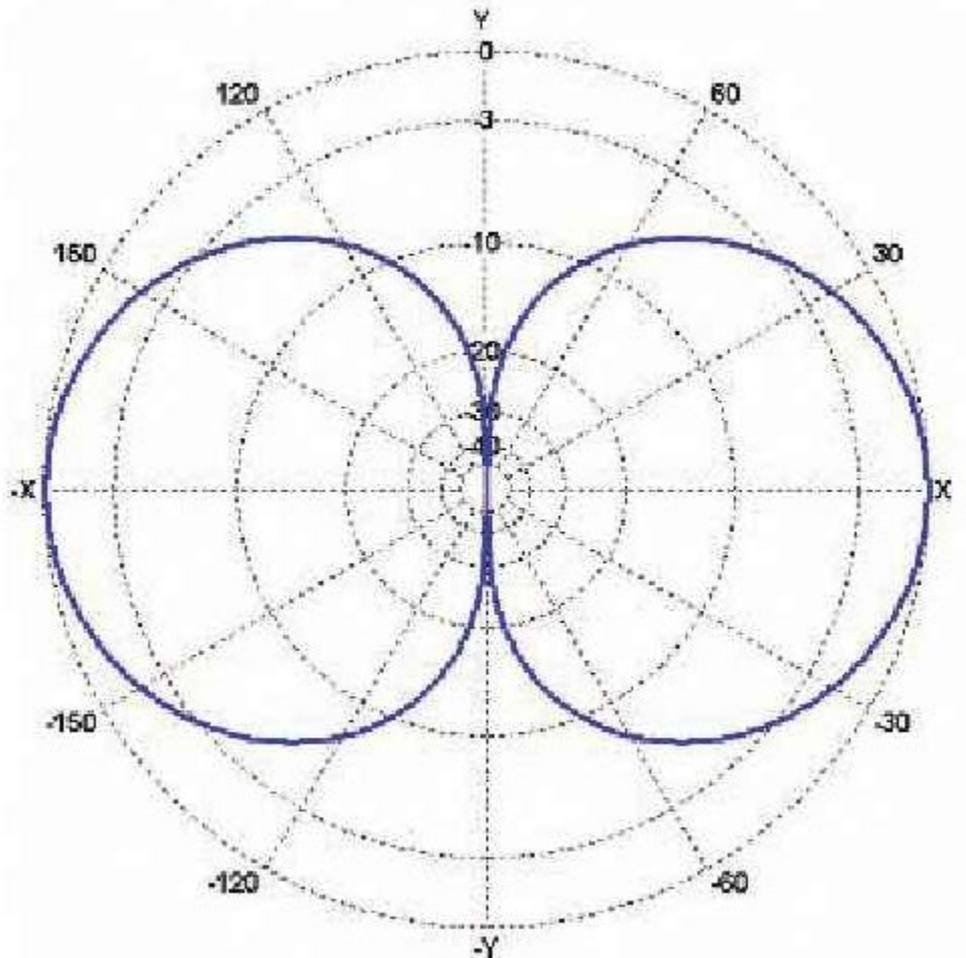
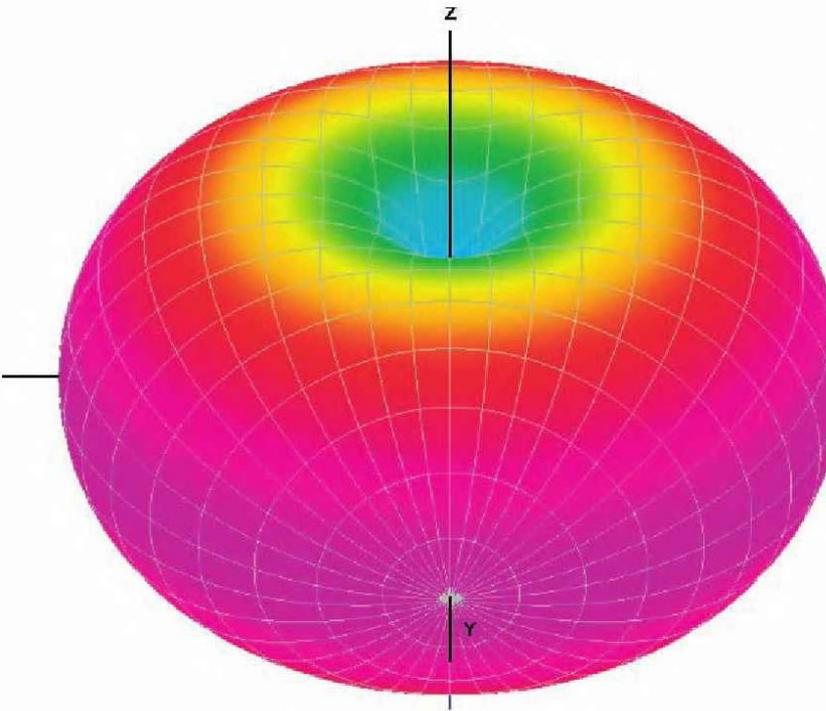
Distribución sinusoidal de la tensión -distribución de la impedancia





# 2. Dipolo de media longitud de onda

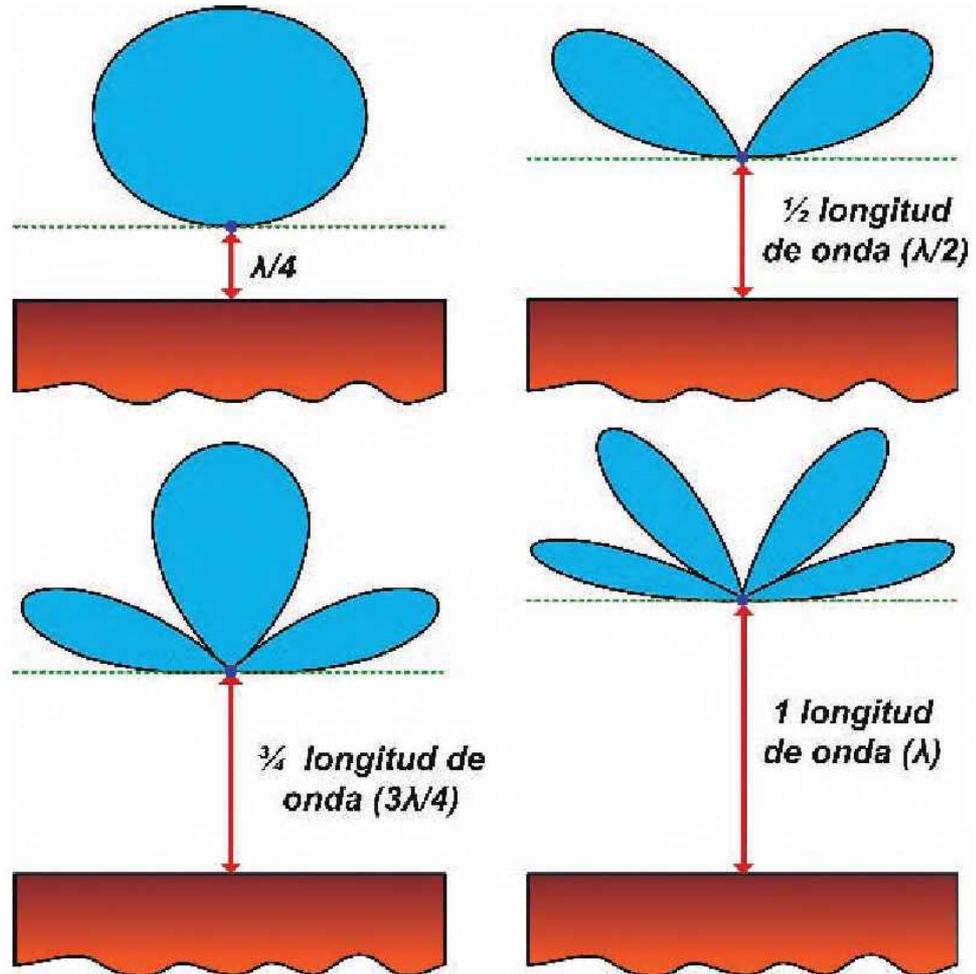
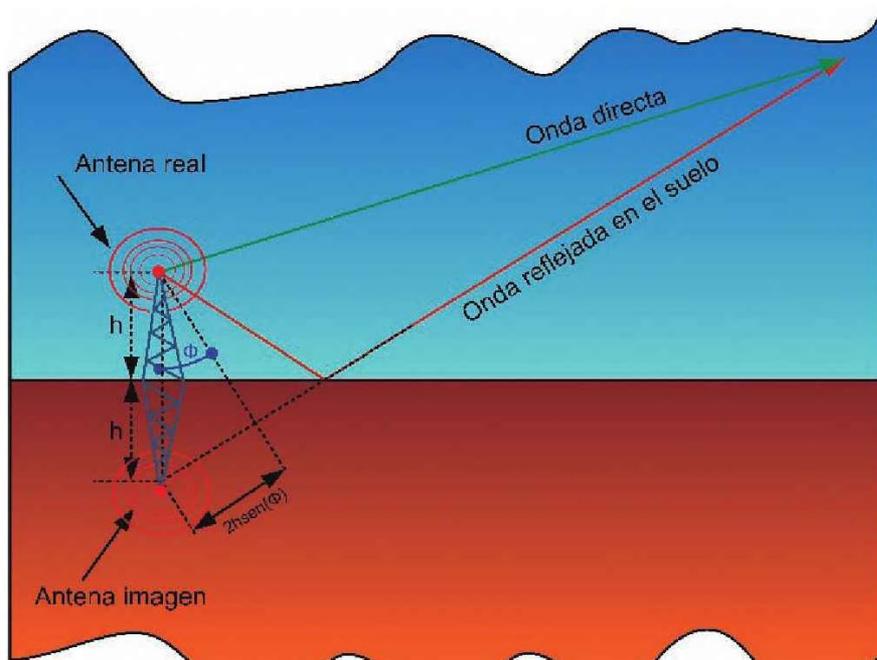
Diagrama de radiación (dipolo vertical a la superficie de la Tierra)





# 2. Dipolo de media longitud de onda: influencia de la superficie

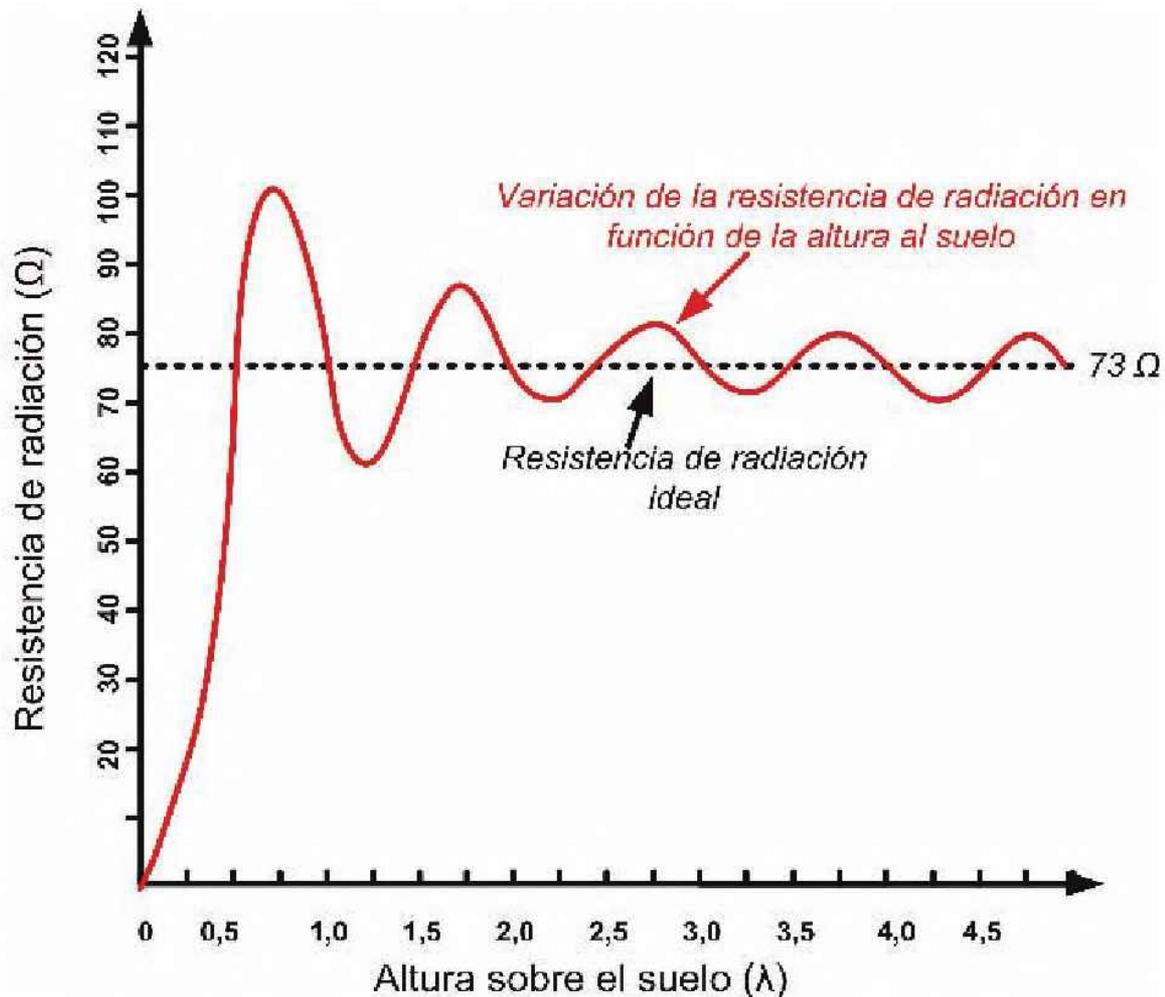
La intensidad de campo es la suma de la onda directa y la onda reflejada en la superficie





## 2. Dipolo de media longitud de onda: influencia de la superficie

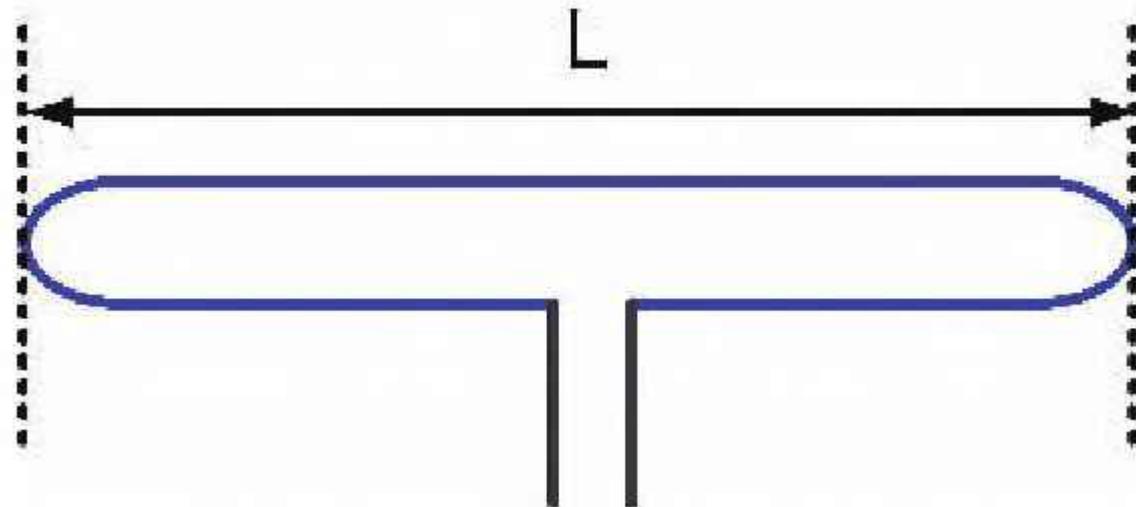
A medida que se aumenta la altura, el efecto de las reflexiones disminuye y el valor de la resistencia de radiación permanece prácticamente constante.





### 3. Dipolo Doblado

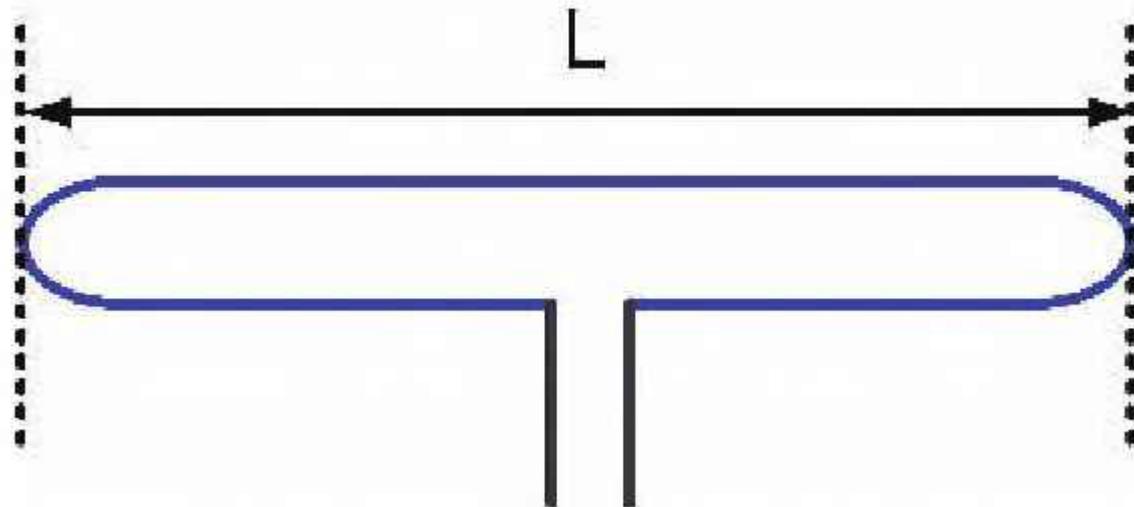
- Una de las limitaciones del dipolo de  $\lambda/2$  es un ancho de banda muy estrecho.
- El dipolo doblado cuenta con un ancho de banda más amplio
- Dipolo cuyos extremos se doblaron por la mitad y plegados sobre sí mismos, uniendo los dos extremos





## 3. Dipolo Doblado

- Se construye en una sola pieza con hilo conductor del mismo diámetro
- Su impedancia es cuatro veces la del dipolo simple ( $300 \Omega$ )
- Se emplea sobre todo en VHF y UHF





## 4. Dipolo de Brazos Plegados

- Se pliega una parte de cada extremo de los brazos parcialmente, consiguiendo economizar espacio pero reduciendo la eficiencia de la misma





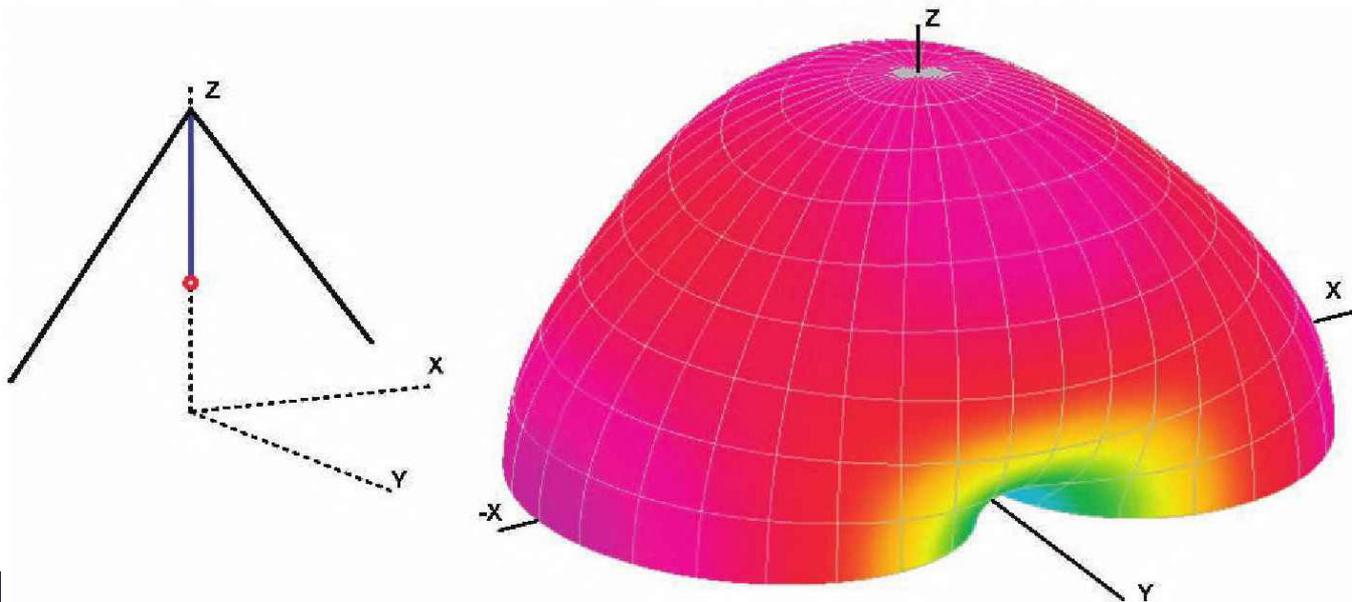
# 5. Dipolo Eléctricamente Acortado

- Un segmento de cada brazo (por ejemplo el tercio central) es substituido por una bobina o solenoide, consiguiendo una reducción de tamaño
- Se reducen también la eficiencia, el ancho de banda, la impedancia
- Se utiliza ampliamente en TV, radio, comunicaciones militares, etc.



## 6. La V invertida

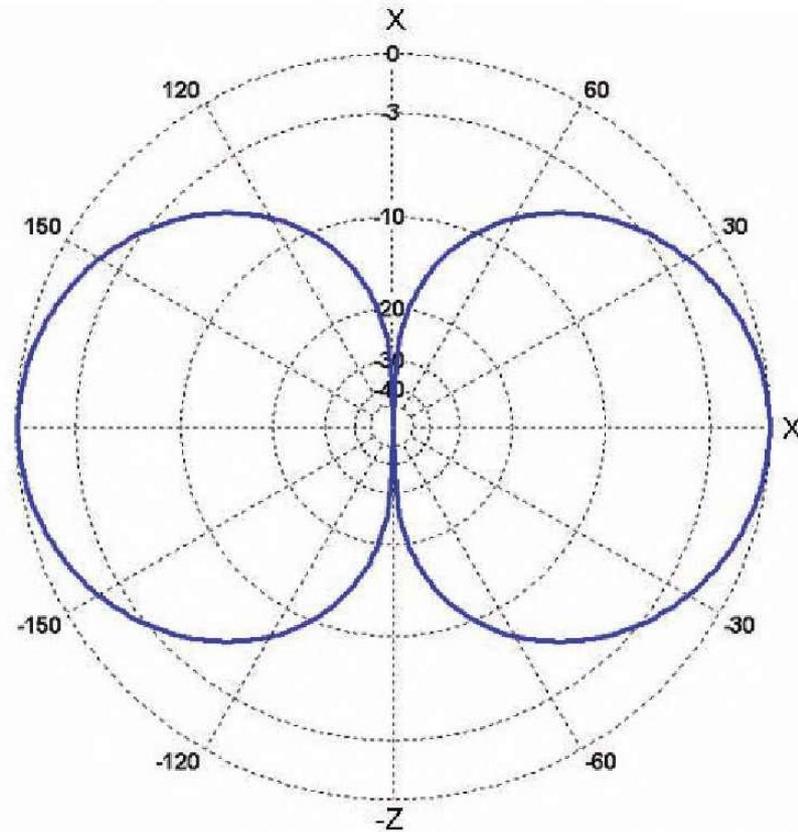
- Otra variante del dipolo de media onda con los brazos doblados el mismo ángulo
- No necesita estar instalado de forma muy elevada, alcanza un mástil (de unos 9 metros)





# 7. Antena Marconi

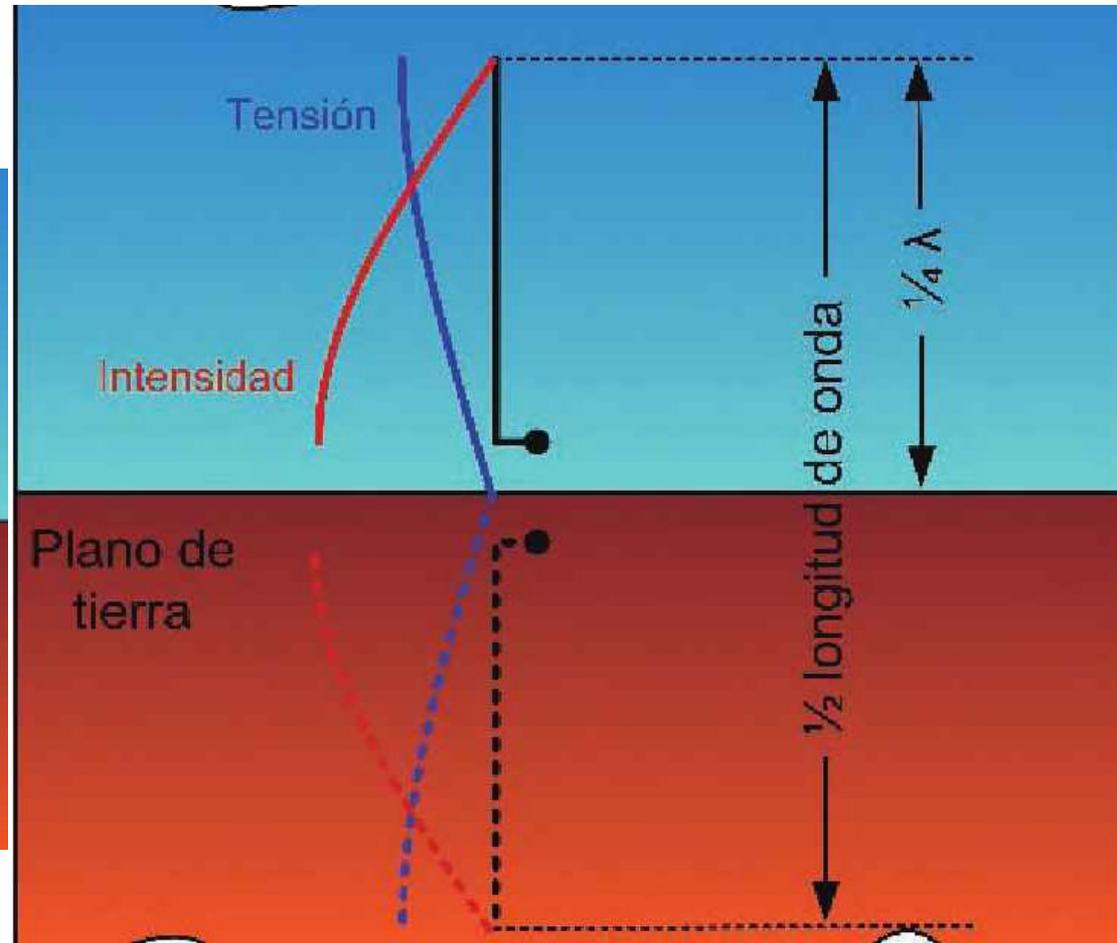
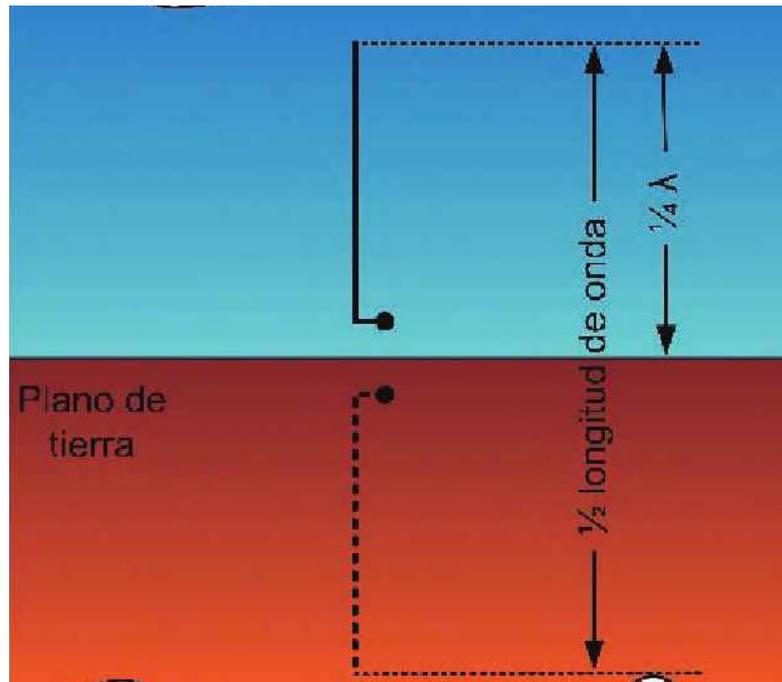
- Antena de un cuarto de longitud de onda de un único polo (monopolo)
- Se coloca en vertical sobre la superficie de la Tierra
- Impedancia de  $36 \Omega$  y ganancia de 5,14 dBi (respecto a una antena isotrópica)





# 7. Antena Marconi

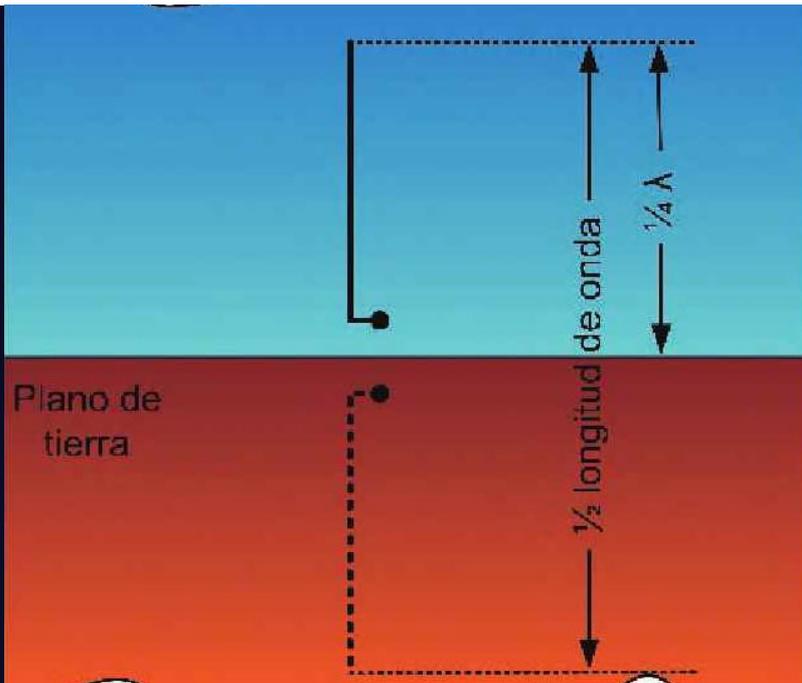
- Como consecuencia de las ondas reflejadas en el suelo, las características se asemejan al dipolo de  $\frac{1}{2}$  onda.





# 7. Antena Marconi

- Para que las pérdidas sean mínimas, el suelo debe ser un buen conductor (arcillosos son buenos conductores, arenosos o rocosos no)
- En frecuencias de 300 KHz a 3MHz (AM), el plano de masa es la propia Tierra



- Si la superficie no es un buen conductor, se precisará crear un plano de tierra artificial

Plano reflector formado con varillas



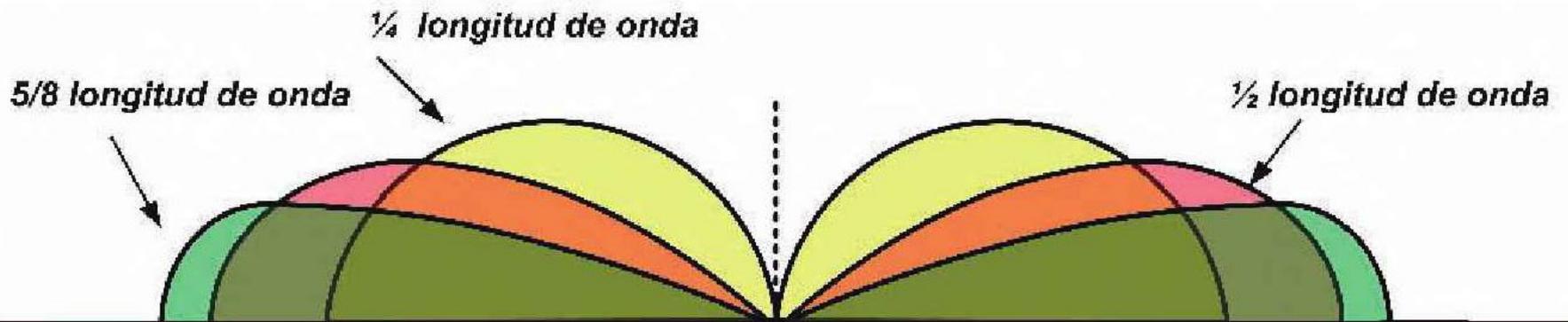


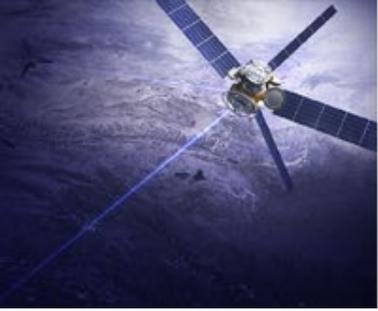
# 7. Antena Marconi

- La principal desventaja con respecto al dipolo  $\lambda/2$  es que deben estar junto al suelo.
- En la práctica, la impedancia se ve reflejada por los objetos colindantes
- Los monopolos se usan en el rango de frecuencias desde los 300KHz hasta 1 GHz
- Se emplean en la transmisión AM



# Radiación para antenas de distintas longitudes de onda





# Agrupaciones de Antenas

- Cuando dos o más elementos de antenas se combinan
- Los campos electromagnéticos radiados por cada una interactúan entre sí
- Se produce un patrón de radiación equivalente a la suma de los patrones individuales.





# Agrupaciones de Antenas

- Los elementos pueden ser de dos tipos:
    - **Elementos excitados:** se conectan directamente a la línea de alimentación. Se excitan directamente por la señal
    - **Elementos parásitos:** No son conectados a la línea de transmisión pero reciben energía a través de la inducción de otro elemento (excitado o parásito)
  - Los elementos parásitos se clasifican a su vez en dos tipos:
    - **Reflectores:** cuando el elemento parásito es más largo que el excitado. Se dice reflector porque tiene el efecto de reducir la intensidad de señal en su dirección y aumentarla en el sentido contrario
    - **Directores:** son más cortos que los elementos excitados. Aumentan la intensidad de señal en su dirección y la reducen en sentido contrario
- El agrupamiento refuerza la radiación en unas direcciones y empobrece en otras**



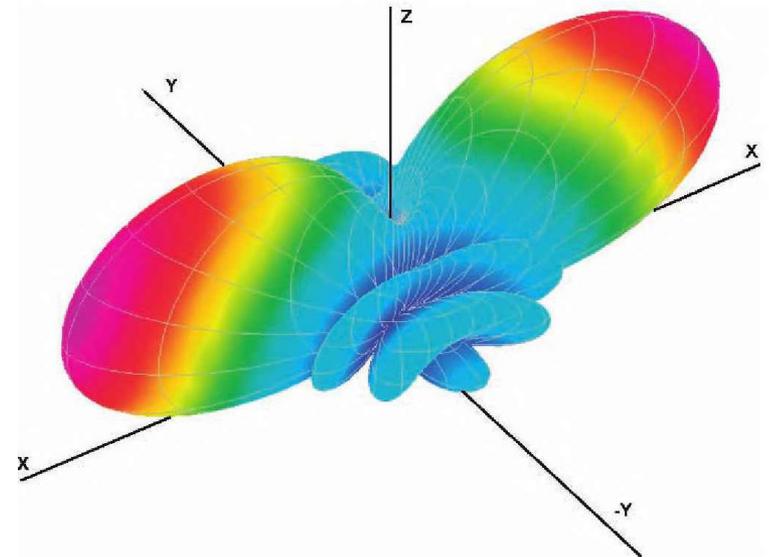
# Agrupaciones de Antenas





# Agrupaciones de Antenas

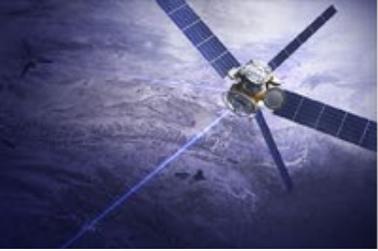
- Los agrupamientos de antenas también pueden clasificarse en función de la dirección de la radiación máxima , distinguiendo entre agrupamientos de antenas de radiación transversal y longitudinal
  - **Agrupamiento de radiación transversal (radiación lateral o broadside):** la máxima radiación ocurre en un plano transversal al plano que forma el conjunto





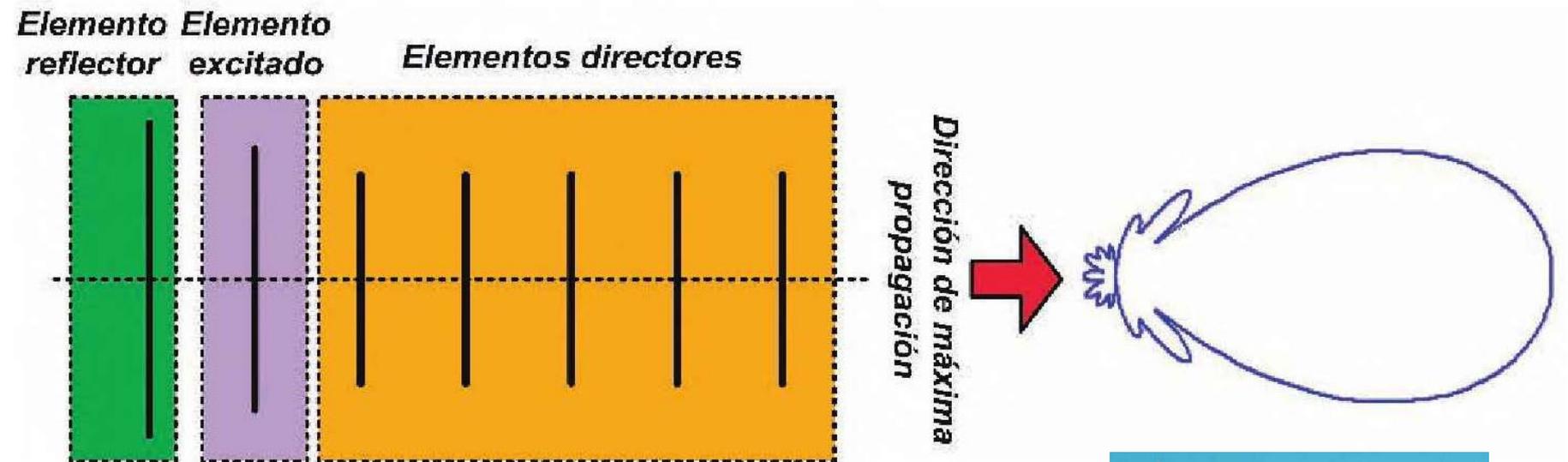
# Agrupaciones de Antenas

- Los agrupamientos de antenas también pueden clasificarse en función de la dirección de la radiación máxima , distinguiendo entre agrupamientos de antenas de radiación transversal y longitudinal
  - **Agrupamiento de radiación longitudinal (redes end-fire): la máxima radiación ocurre a lo largo del eje principal que forman los elementos**



# Antena Yagi-Uda

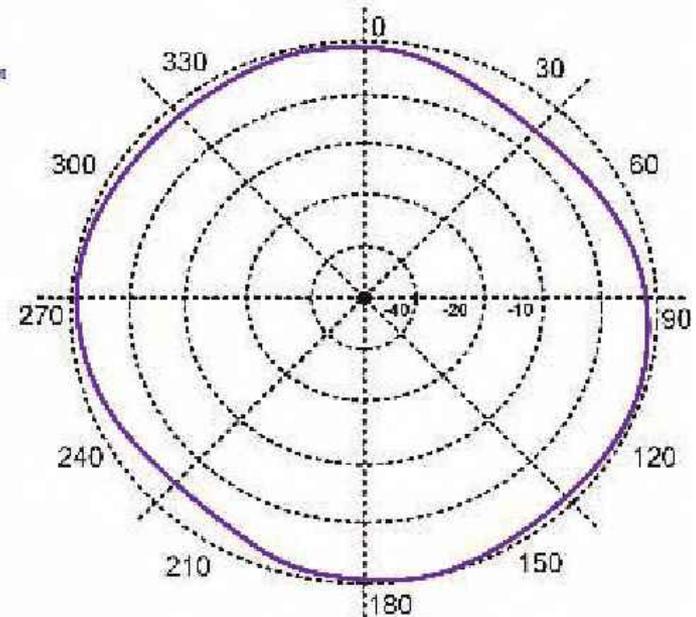
- Es una red de radiación longitudinal formada por un elemento excitado y dos elementos parásitos, uno tipo reflector y uno o más elementos directores

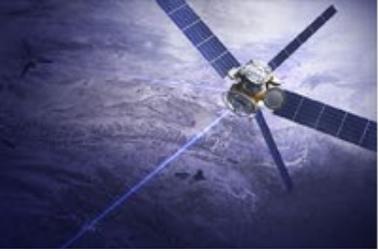




# Antena de Torniquete

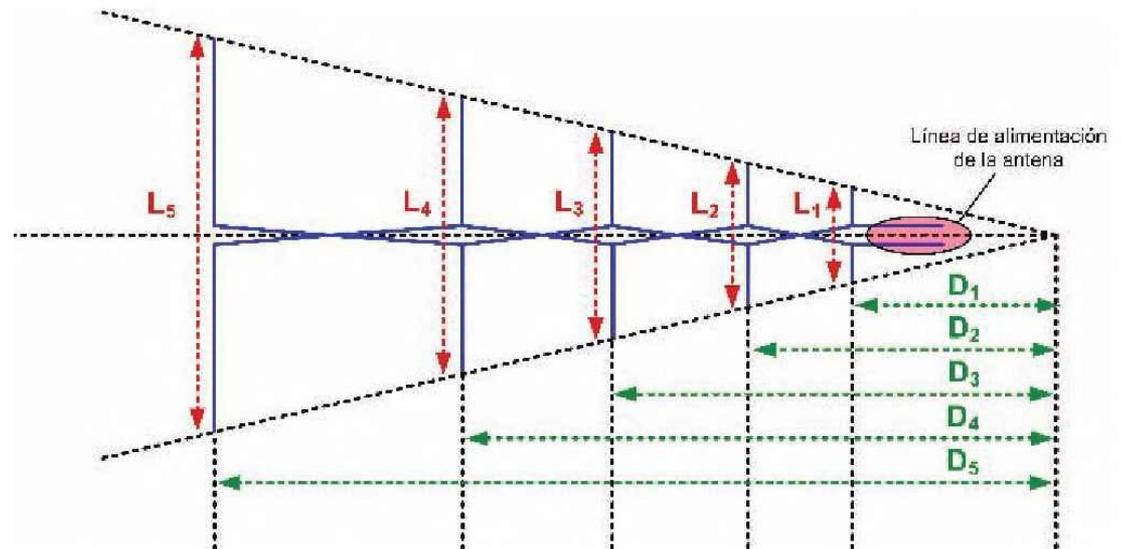
- Dos dipolos dispuestos en ángulo recto.
- Se obtiene una distribución casi omnidireccional de la radiación





# Antena Log-periódica

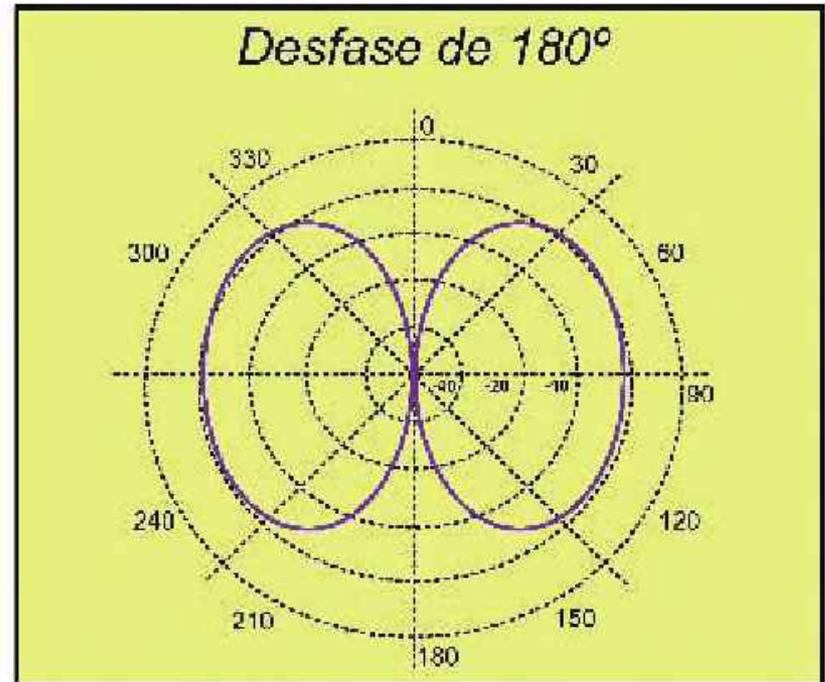
- Se parece a la Yagi pero todos los elementos son excitados
- La impedancia en el punto de excitación es una función periódica del logaritmo de la frecuencia de funcionamiento
- Presenta gran ancho de banda
- Está compuesta generalmente por dipolos de diferentes longitudes
- Muy común en la recepción de televisión

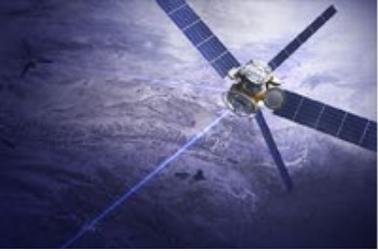




# Otras agrupaciones

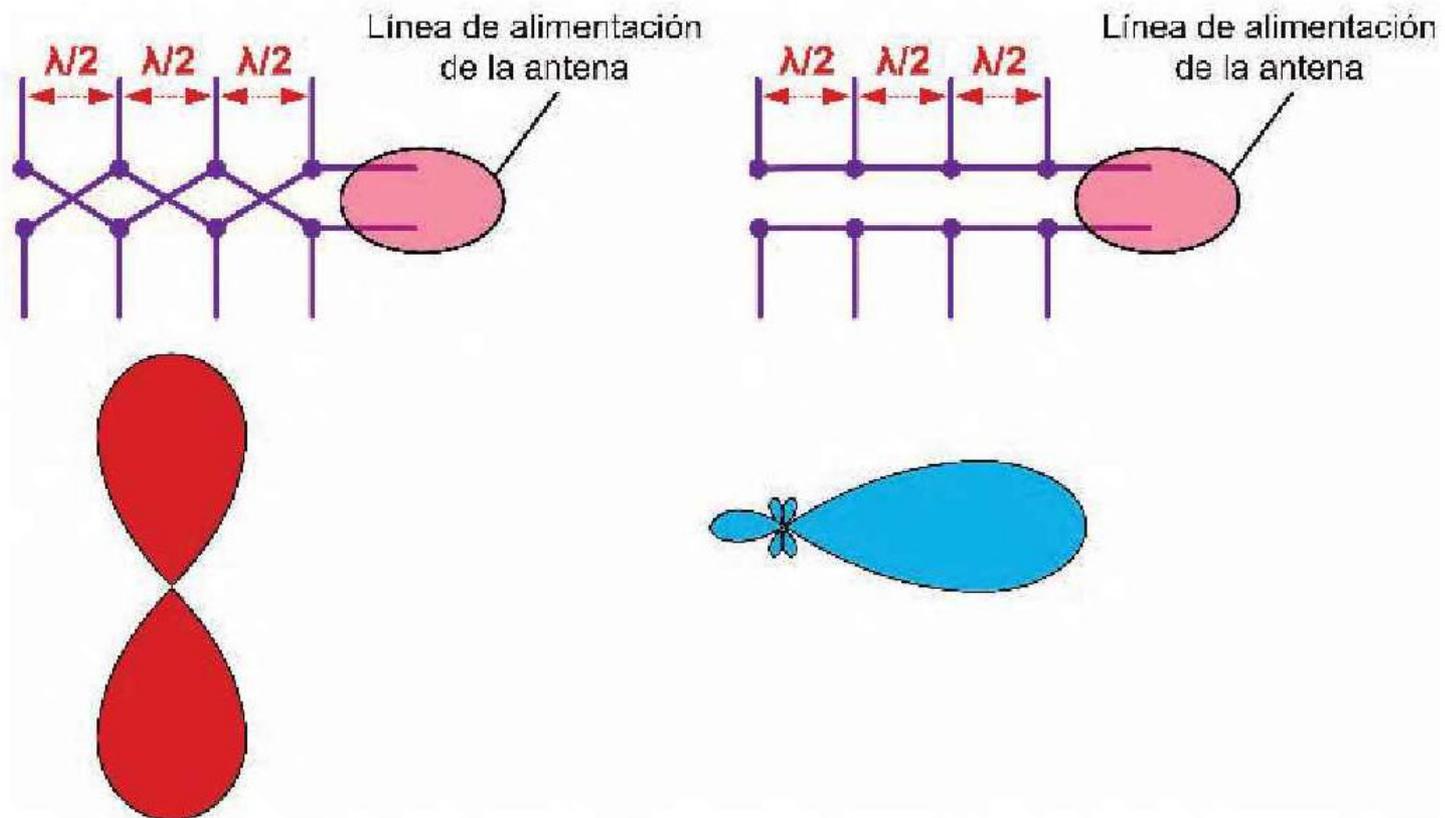
- Existe una gran cantidad de posibilidades de combinación
- Las más comunes son agrupaciones de monopolos o dipolos en fase o desfase

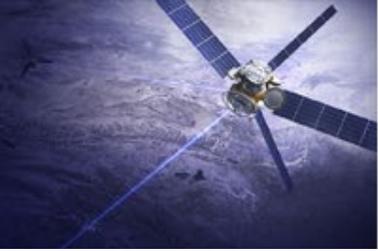




# Otras agrupaciones

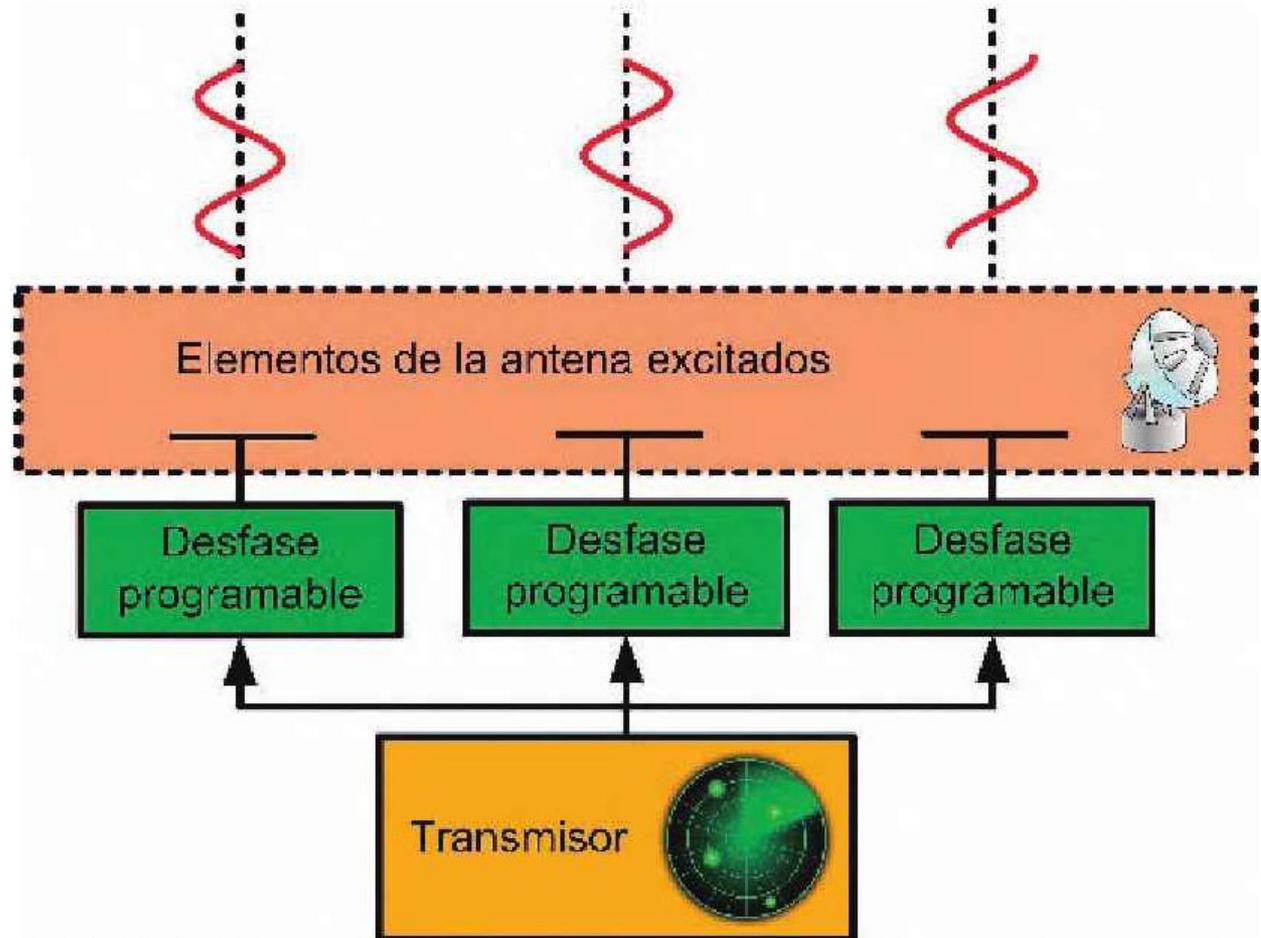
- Igualmente, es posible realizar una red de antenas empleando dipolos de media onda





# Otras agrupaciones

- Antenas de conjunto enfasado programable: se puede modificar el patrón de radiación sin variar la disposición física de las antenas





# Antena de Cuadro

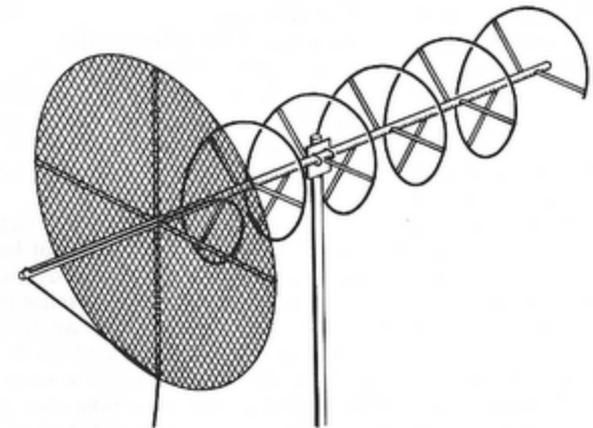
- Se realizan formando un bucle de un elemento conductor
- Se alimenta en sus extremos por una línea de transmisión equilibrada
- Puede adquirir la forma de cuadrado, círculo, etc.
- Se clasifican en dos tipos según el tamaño:
  - **Antenas pequeñas de bucle: el diámetro es mucho menor a la longitud de onda**
  - **Antenas de cuadro resonantes, el diámetro es aproximadamente igual a la longitud de onda**
- El comportamiento direccional es relativamente independiente de su forma exacta.
- El diagrama de radiación se asemeja al de un dipolo horizontal corto
- Recepción de AM (bajas frecuencias)





# Antena de Helicoidal

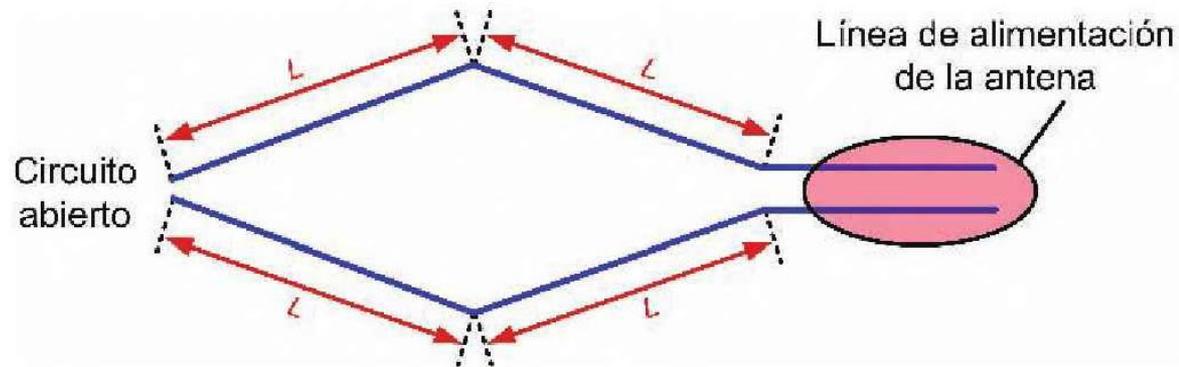
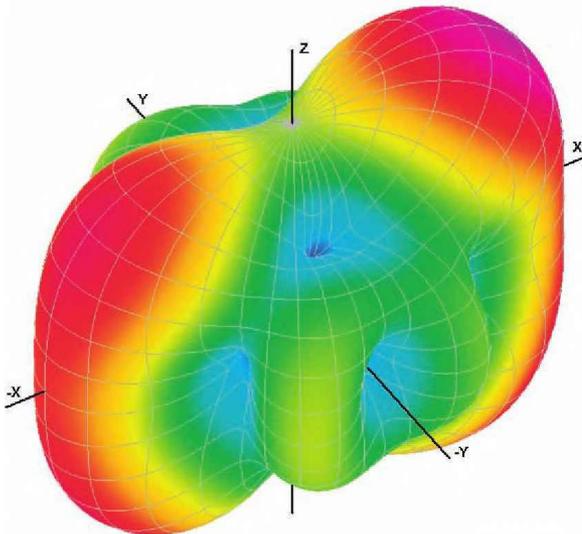
- Fue inventada por John Kraus en 1946
- Es una antena en forma de solenoide
- Es una evolución del monopolo vertical
- Es útil cuando se requieren polarizaciones circulares (en lugar de vertical u horizontal)
- Se distinguen dos modos de funcionamiento:
  - **Modo normal:** la radiación electromagnética se produce en ángulo recto respecto al eje de la hélice
  - **Modo axial:** La radiación electromagnética se produce en el plano longitudinal o axial, siendo bastante directiva
- Se trata de una antena bastante directiva, dimensiones aceptables, y un amplio ancho de banda
- Es muy utilizada en aplicaciones espaciales y comunicaciones móviles en la banda VHF





# Antena Rómbica

- Es una antena no resonante que puede funcionar en un ancho de banda elevado
- Ideal para HF y con elevada ganancia
- Desventaja: Presenta lóbulos secundarios muy significativos
- Existen básicamente dos tipos:
  - **Bidireccional simple o sin terminación: dos brazos de longitud  $L$  (múltiplo de  $\lambda/2$ ) en forma de V enfrentadas, resultando un diagrama bidireccional con dos lóbulos principales en el eje que forman los brazos y dos secundarios en el eje transversal**

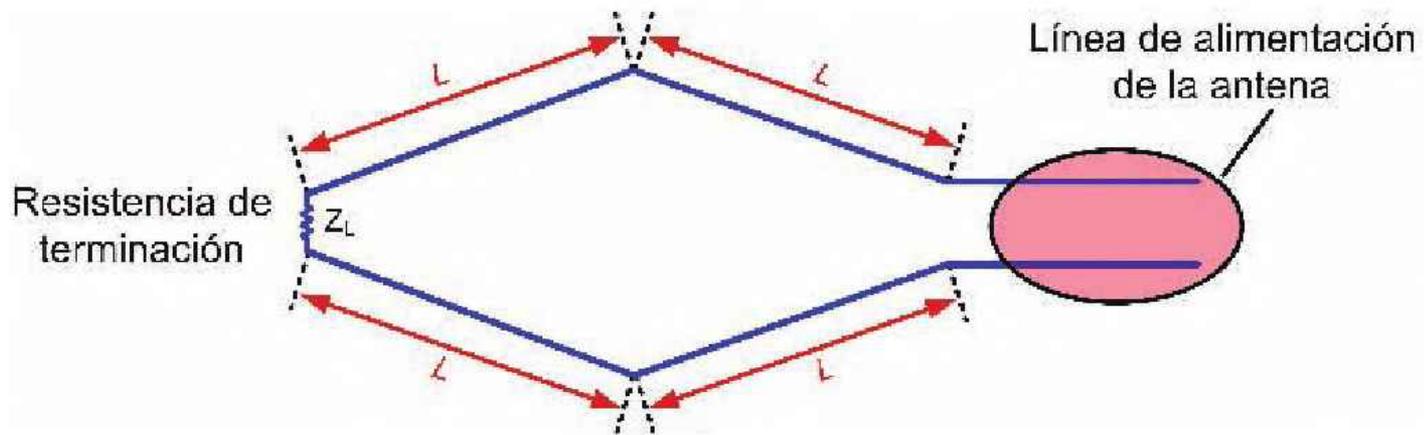


*Antena rómbica sin terminación.*



# Antena Rómbica

- Antena rómbica terminada en carga resistiva: es más directiva, pero con una ganancia máxima inferior (que se explica porque parte de la potencia que procede de la fuente se disipa en la carga)

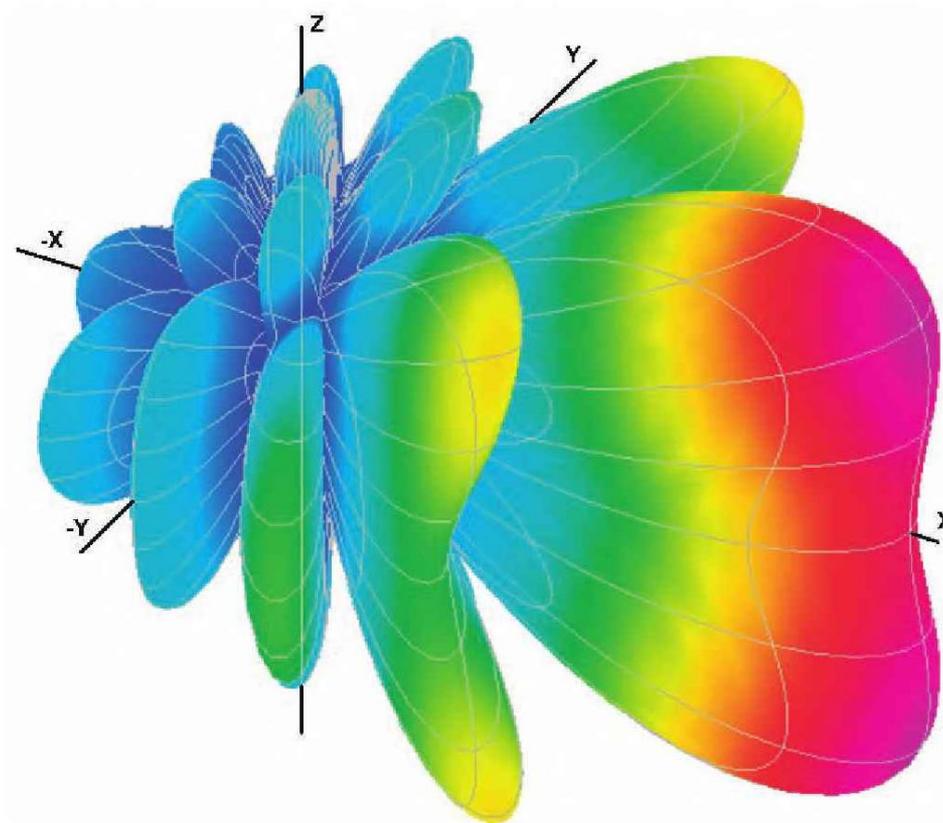


*Antena rómbica con resistencia de terminación.*



# Antena Rómbica

- Antena rómbica terminada en carga resistiva: es más directiva, pero con una ganancia máxima inferior (que se explica porque parte de la potencia que procede de la fuente se disipa en la carga)





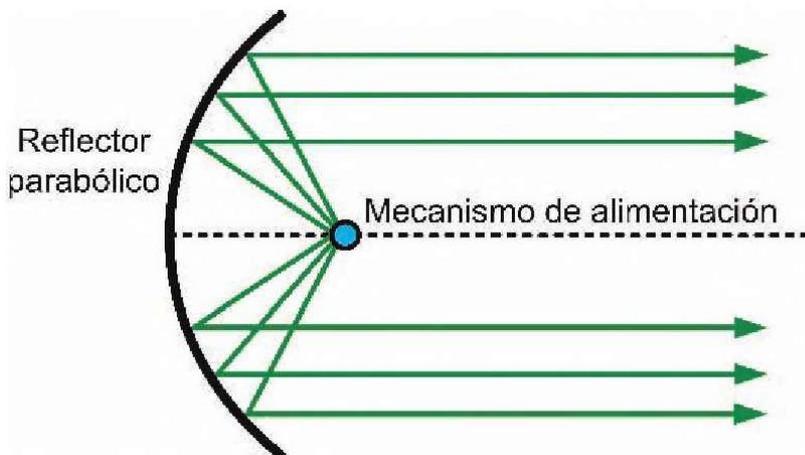
# Antenas de Microondas

- Las antenas empleadas en la banda de microondas (de 0,3 a 300 GHz) deben ser extremadamente direccionales (se concentra la potencia irradiada en un delgado haz)
- Se puede llegar a tener una apertura de haz de apenas  $1^\circ$
- Se utilizan en enlaces de radio y comunicaciones vía satélite
- Inconvenientes de desvanecimiento y estabilidad mecánica para alinear la antena
- Las dos características más importantes son:
  - **Eficiencia direccional o relación frente a espalda:** se suelen instalar en la misma torre de espaldas entre sí
  - **Acoplamiento lado a lado y espalda a espalda:** indican pérdidas de acoplamiento, por lo que se aconsejan que sean valores altos



# Antenas de Reflector Parabólico

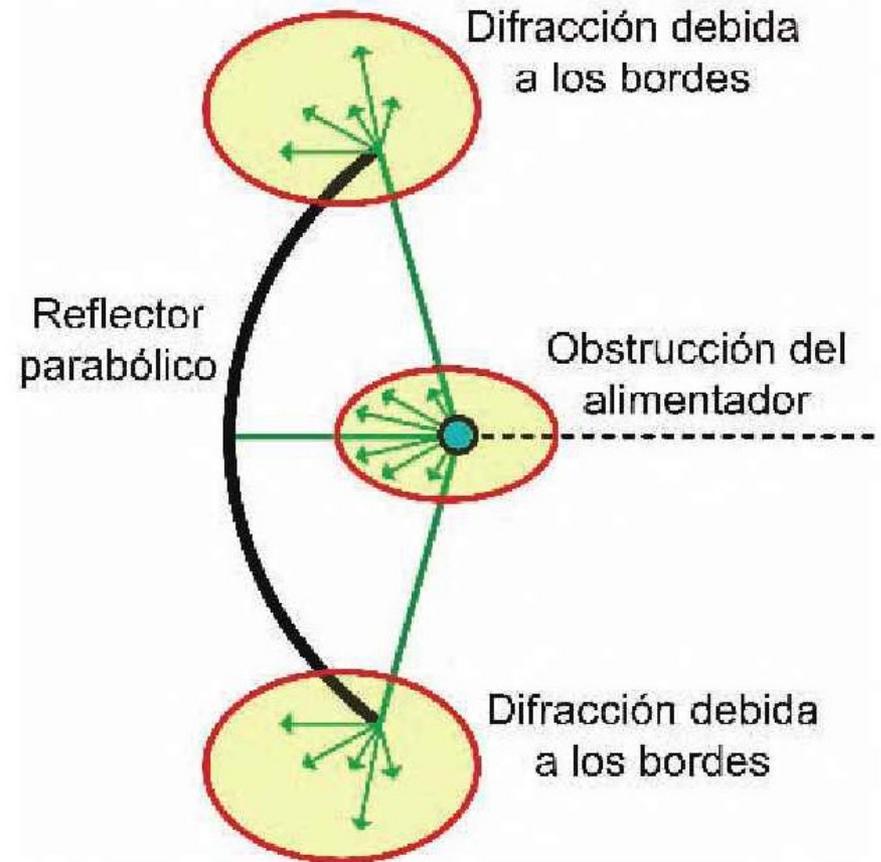
- Está formada por dos elementos fundamentales:
  - **Un reflector parabólico**
  - **Elemento activo o mecanismo de alimentación (dipolo o red de dipolos)**
- El mecanismo de radiación irradia la señal uniformemente hacia el reflector, la emisión resultante tiene una distribución muy concentrada y con todas las ondas reflejadas en fase, formando un frente de onda de rayos paralelos al eje del paraboloide





# Antenas de Reflector Parabólico

- El haz que se radia, idealmente, es cilíndrico, con una sección transversal del mismo diámetro que el reflector parabólico
- En condiciones reales, el alimentador no radia la superficie del reflector de forma uniforme, ni de manera única
- La energía irradiada en el borde de la parábola sufrirá de difracción y se radiará en otras direcciones, incluso hacia atrás

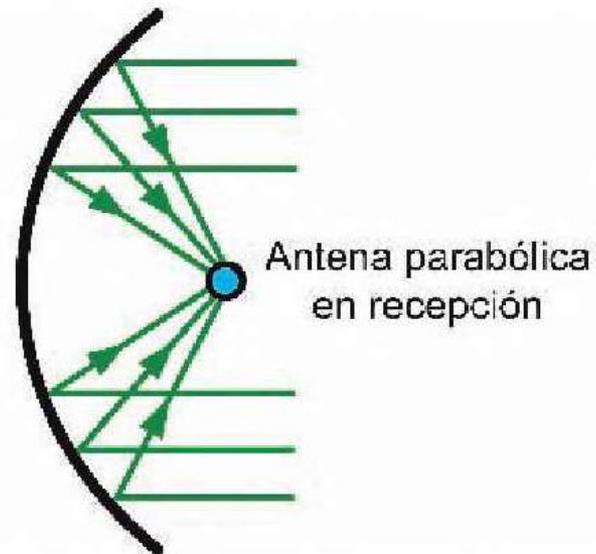
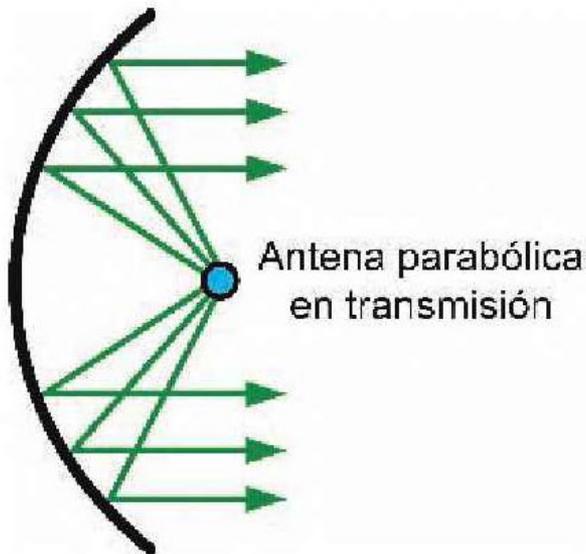


**La eficiencia teórica se reduce entre el 55% y el 70% de su valor teórico**



# Antenas de Reflector Parabólico

- Por el principio de reciprocidad, las señales recibidas perpendiculares al plano que contiene la boca del reflector, son reflejadas directamente en el foco, mientras que las procedentes de otras direcciones, se anulan





# Antenas de Reflector Parabólico

- Un parámetro importante es la **relación de abertura o abertura de la parábola**: relación entre la distancia focal (distancia entre el foco donde se coloca el alimentador y el fondo de la parábola) y el diámetro de la boca de la parábola
- La superficie del reflector no tiene que ser totalmente sólida, pudiendo emplearse una malla con la misma forma (presenta menos resistencia al viento)
- La apertura del haz de 3dB está dada por

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

- La apertura entre ceros:

$$\phi_0 = 2\theta = \frac{140\lambda}{D}$$





# Antenas de Reflector Parabólico

- La eficiencia de la antena parabólica ( $\eta$ ) hace referencia a las imperfecciones descritas en las antenas reales (absorción del reflector, difracción en bordes, efecto del soporte del alimentador, desalineación, etc.)

55 % ( $\eta=0,55$ )



# Ganancia de Potencia

- La ganancia de potencia (respecto a la antena isotrópica) en transmisión responde a:

$$G_{potencia} = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

- Es directamente proporcional al cuadrado del diámetro de la boca del reflector e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda.

$$A_{captura} = kA_{real}$$



# Importancia de la Polarización

- Posición en la recepción y transmisión