



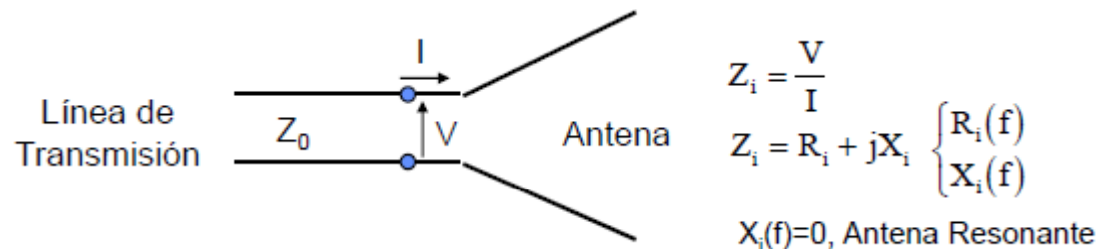
- Los parámetros de una antena son los que permiten especificar el funcionamiento de las mismas y por lo tanto son susceptibles de ser medidos. Las definiciones dadas aquí están en consonancia con el estándar IEEE 145-1983, y van a permitir tratar a la antena como una “caja negra”, para ser insertada en un sistema de radiocomunicaciones.
- De hecho lo habitual es que el ingeniero de sistemas especifique la antena como un conjunto de parámetros conectados con los requisitos del radioenlace (buena calidad y bajo nivel de interferencias con otros servicios), siendo tarea del ingeniero de antenas el diseño de la estructura radiante que cumpla estos requisitos.
- En concreto, en este capítulo, se verán:
 - ***Parámetros de antenas en transmisión:***
 - *Impedancia*
 - *Intensidad de radiación*
 - *Diagrama de radiación*
 - *Directividad*
 - *Polarización*
 - *Ancho de banda*
 - ***Parámetros de antenas en recepción***
 - ***Ecuación de transmisión***
 - ***Temperatura de ruido de una antena***





Impedancia de entrada

- Los parámetros más importantes que caracterizan una antena, como si de un circuito se tratara, son *la impedancia de entrada*, la *resistencia de radiación* y el *rendimiento*.
- La *impedancia de entrada de una antena* se define como la relación entre la tensión en sus bornes y la intensidad de corriente que la atraviesa.



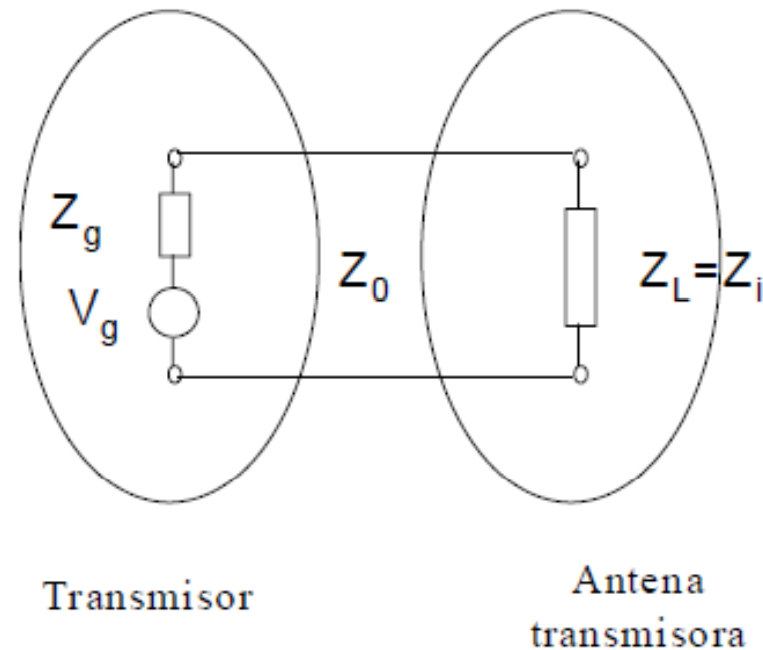
- En general será un número complejo que varía con la frecuencia, tanto en su parte real como en su imaginaria, ya que las dimensiones “eléctricas” de la misma (dimensiones físicas divididas por las longitudes de onda), varían cuando lo hace la frecuencia.
- Normalmente la antenas se diseñan para ser resonantes a la frecuencia central de la banda de utilización, puesto que así se facilita la adaptación de impedancias a la propia línea de transmisión que es siempre real.





Impedancia de entrada

- En frecuencias bajas esto no siempre es posible ya que se requerirían dimensiones físicas muy grandes, por lo que las antenas, en esas frecuencias, suelen ser “*eléctricamente cortas*”.
- En estos casos, el valor de su reactancia puede ser mucho mayor que el de su resistencia, ocasionando, a veces, problemas de “fugas” y “arcos” por las elevadas tensiones que parecen en su bornes.
- En transmisión, desde el punto de vista circuital, la antena se puede sustituir por una impedancia de carga igual a su impedancia de entrada. Esta impedancia se conecta al generador a través de la correspondiente línea de transmisión.





Impedancia de entrada

- Cuando se alimenta la antena con una tensión V se genera una distribución de corriente en la misma (fijada por las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de contorno), que produce una radiación electromagnética caracterizada por los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} , lo que ocasiona que radie una potencia P_{rad} al espacio libre

- La parte real de la impedancia de entrada de la antena transmisora, R_{iT} es en realidad la suma de dos componentes:

- La *resistencia de pérdidas*, R_{per} , asociada a la parte de energía que se disipa

- La *resistencia de radiación*, R_{rad} , que se define como *aquella que disiparía la misma potencia que radia la antena, si, por dicha resistencia, circulara la misma corriente con que se alimenta la antena*

$$Z_{iT} = R_{iT} + jX_{iT}$$

$$R_{iT} = \text{Re}[Z_{iT}] = R_{per} + R_{rad}$$

$$R_{rad} = 2 \frac{P_{rad}}{|I|^2} \quad R_{per} = 2 \frac{P_{dis}}{|I|^2}$$





Impedancia de entrada

- El *rendimiento de radiación* de una antena, η_{rad} , se define como el cociente entre la *potencia radiada por la antena*, P_{rad} , y la potencia *Entregada por el Transmisor a la antena*, P_{ET} , esto es **la potencia que la antena acepta de la disponible del transmisor.**
- Este cociente va a ser igual al cociente entre la resistencia de radiación y la de entrada.

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ET}} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{per}}$$

- En la mayoría de las antenas, la resistencia de pérdidas es despreciable frente a la de radiación, dando lugar a rendimientos de radiación próximos a la unidad.
- La principal excepción la constituyen las antenas eléctricamente cortas, con resistencias de radiación muy bajas (de valores comparables a las de pérdidas). También pueden tener rendimientos de radiación muy bajos los arrays de antenas impresas sobre sustratos dieléctricos, donde las pérdidas se producen a lo largo de las líneas de transmisión que alimentan los elementos radiantes.





Impedancia de entrada

- En *altas frecuencias*, en lugar de definir la impedancia de entrada, se definen otra serie de parámetros más fácilmente medibles, como son el **coeficiente de reflexión**, Γ_T , la **relación de onda estacionaria**, *ROE*, o las **pérdidas de retorno**, *P.R.*, definidas como el cociente entre la potencia de la onda reflejada, P_{ref} , y la potencia de la onda incidente, P_{inc} , en decibelios.

$$\Gamma_T = \frac{Z_{iT} - Z_g^*}{Z_{iT} + Z_g}$$

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

$$P.R.(dB) = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} = 20 \log |\Gamma_T|$$





Impedancia de entrada

- Si la antena está conectada directamente al generador (o el generador está perfectamente adaptado a una línea de transmisión sin pérdidas), **la potencia incidente es la potencia entregada a la antena, P_{ET} , que coincide con la disponible en el transmisor, P_{DT} .**

$$P_{ET} = P_{DT} = \frac{1}{8} \frac{|V_g|^2}{R_g}$$

- En el caso en el que la línea tuviera pérdidas o no estuviera bien adaptada al generador, habría que considerar ambos efectos a la hora de calcular la potencia entregada. En este caso, la potencia entregada a la antena, P_{ET} , se puede obtener en función de las potencias definidas anteriormente .

$$P_{ET} = P_{DT} - P_{ref} = P_{DT} \left(1 - |\Gamma_T|^2 \right)$$





Diagrama de radiación de una antena

- Una antena no radia del mismo modo en todas las direcciones del espacio, sino que, según *su geometría, sus dimensiones o su forma de excitación*, es capaz de **orientar su energía en unas determinadas direcciones del espacio**.
- El diagrama de radiación es una “*representación gráfica*” de las propiedades direccionales de radiación de una antena en el espacio.
- Para obtener esa característica direccional, y dado que, en campo lejano o zona de radiación, la dependencia del campo radiado con la distancia r es conocida, (e^{-jkr}/r) , el diagrama de radiación **se representa para una esfera concreta r eliminando de este modo la dependencia radial.**
- Normalmente se utilizan diagramas relativos, ya que, normalmente, interesa estudiar la dependencia angular, aunque los tipos de diagramas con que nos vamos a encontrar son muy amplios.





Diagrama de radiación de una antena

- Los diagramas de radiación dependen de muchos factores, dependiendo de:
 - La magnitud a representar:
 - **Diagramas de campo**: módulo absoluto del campo, valor absoluto de cada una de las componentes (E_θ y E_ϕ), fases de dichas componentes, valor absoluto o fase de las componentes de campo copolar y contrapolar,...
 - **Diagramas de potencia**: densidad de potencia, ganancia, directividad,...
 - Su normalización:
 - **Diagramas absolutos**: se representan campos o densidades de potencia para una potencia entregada a la antena dada y a una distancia constante y conocida
 - **Diagramas relativos**: cuando los diagramas absolutos se normalizan respecto al máximo valor de la función representada. Se suelen hacer en dB. (En este caso coinciden los diagramas de campo y de potencia)
 - Sus coordenadas:
 - θ y ϕ , cuando se utilizan como ejes de abscisas, las coordenadas angulares directamente
 - u y v , cosenos directores de las direcciones consideradas respecto a los ejes x e y





Diagrama de radiación de una antena

- Los diagramas de radiación dependen de muchos factores, dependiendo de:
 - Su representación gráfica
 - *Tridimensionales*
 - *Diagramas 2D*
 - *Cortes por planos*, $\theta=\pi/2$, o $\phi=cte$, o $\theta=cte$, etc...
 - Para antenas directivas y polarización lineal suele bastar con conocer los cortes de los diagramas de los planos principales. Estos cortes son:
 - Plano **E**: plano que contiene el vector de campo eléctrico **E** y a la dirección de máxima radiación
 - Plano **H**: plano que contiene al vector de campo magnético **H** y a la dirección de máxima radiación, y por lo tanto es perpendicular al anterior
 - Además, todos los diagramas de radiación anteriores se pueden representar en :
 - **Polares**
 - **Cartesianas**





Diagrama de radiación de una antena (Diagramas 2D)

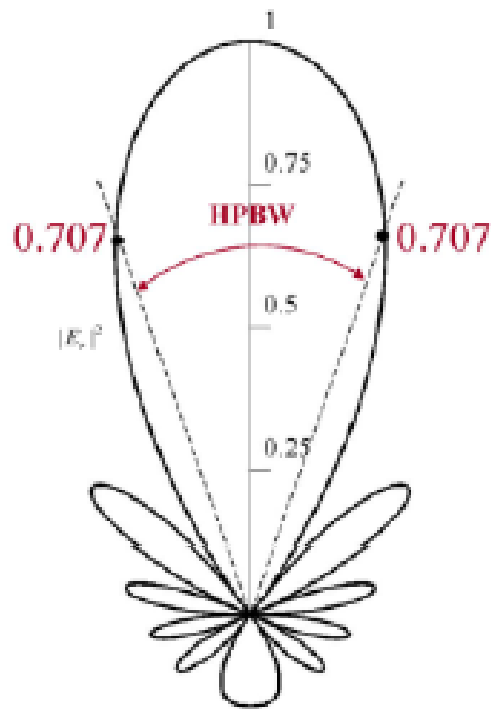


Diagrama normalizado de campo

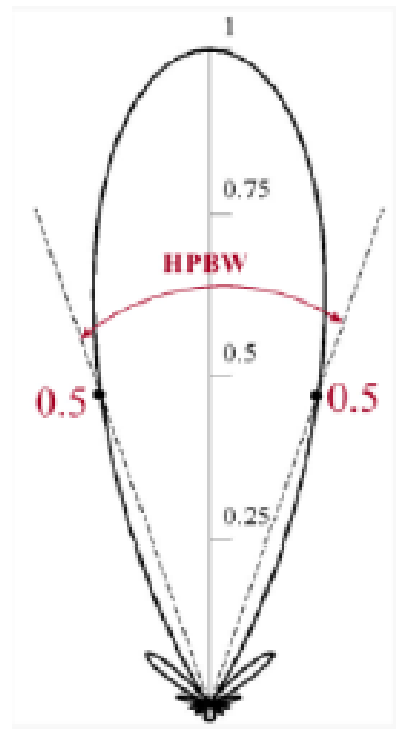


Diagrama normalizado de potencia

$$10 \log \frac{\langle S \rangle}{\langle S \rangle_{\max}} = 20 \log \frac{|E|}{|E|_{\max}}$$





Diagrama de radiación de una antena (Diagramas 2D)

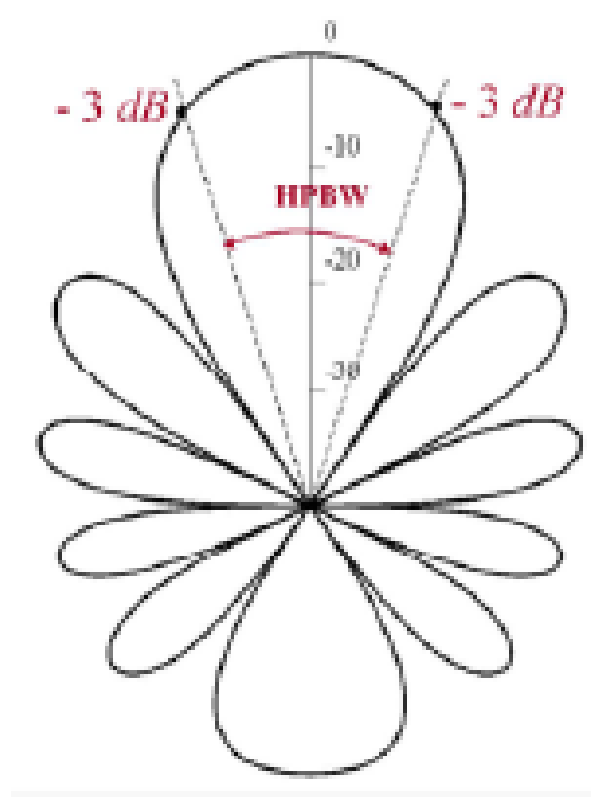


Diagrama normalizado en dB





Diagrama de radiación de una antena (Diagramas 3D)

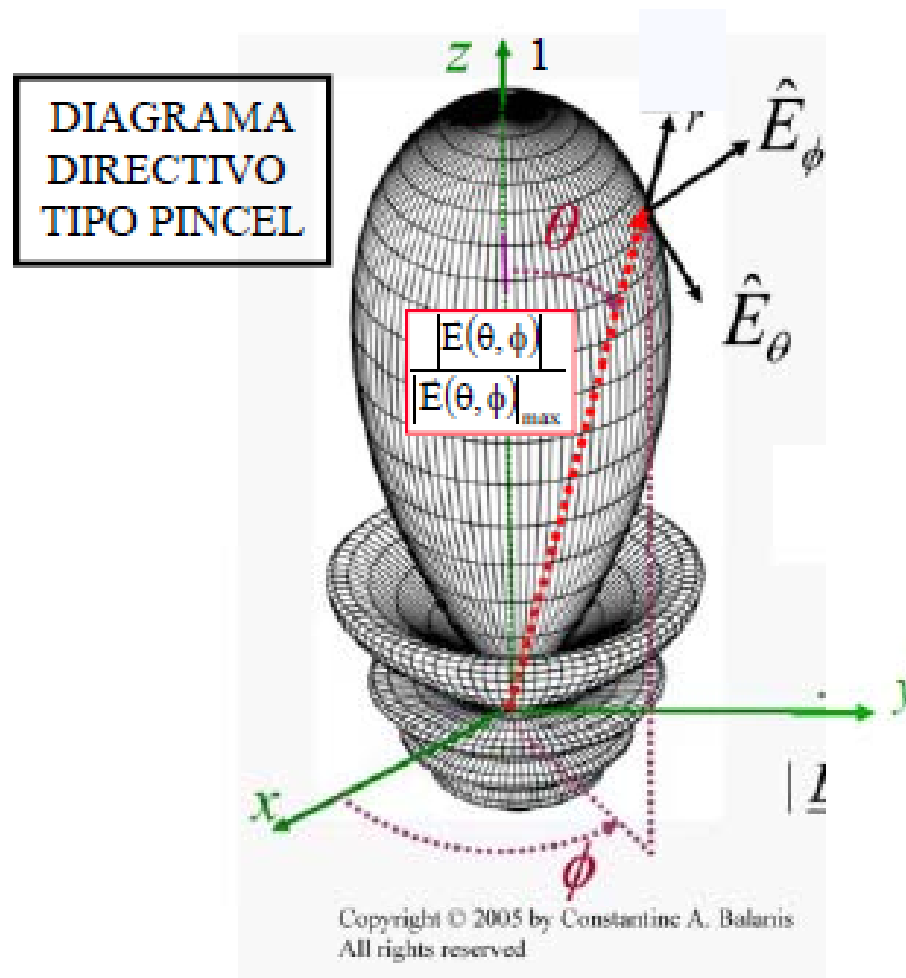




Diagrama de radiación de una antena (Diagramas 3D)

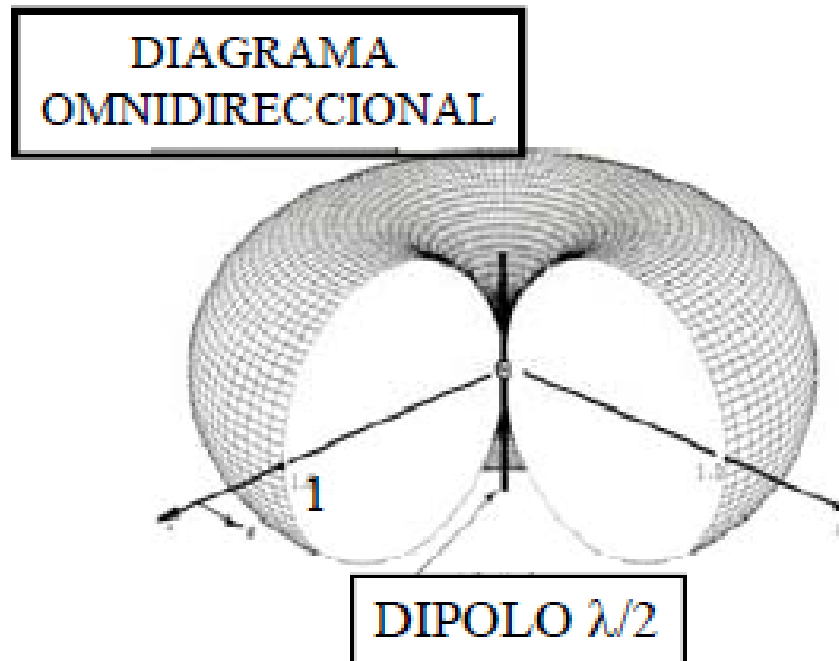




Diagrama de radiación de una antena (Planos principales)

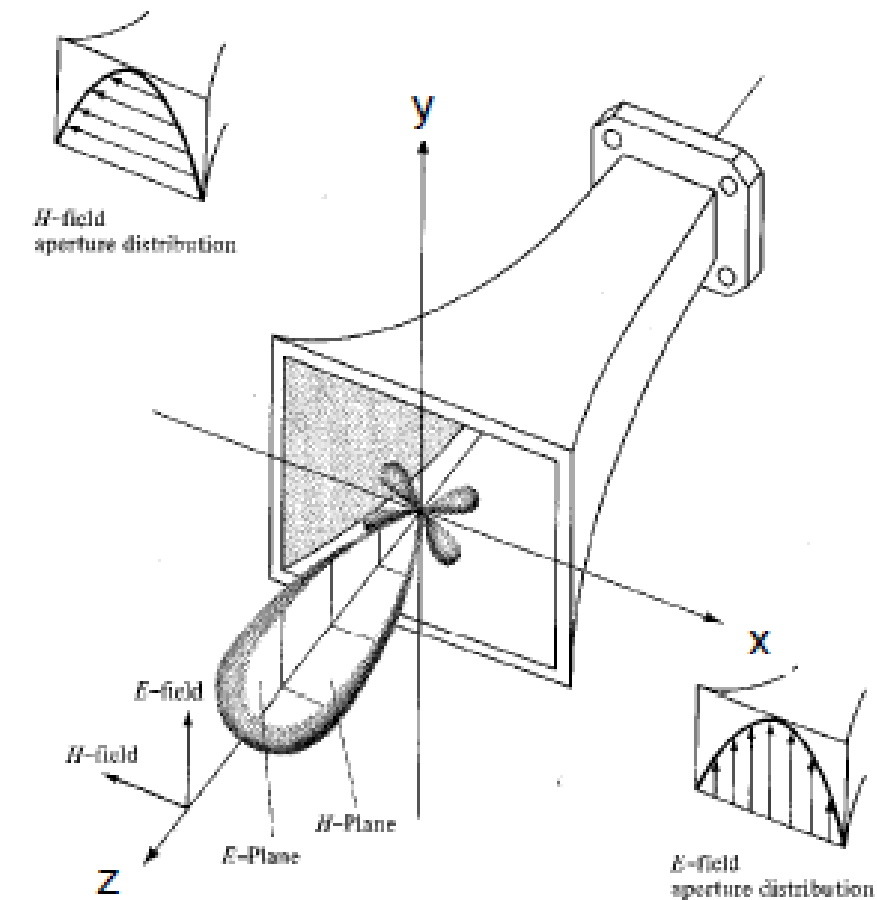
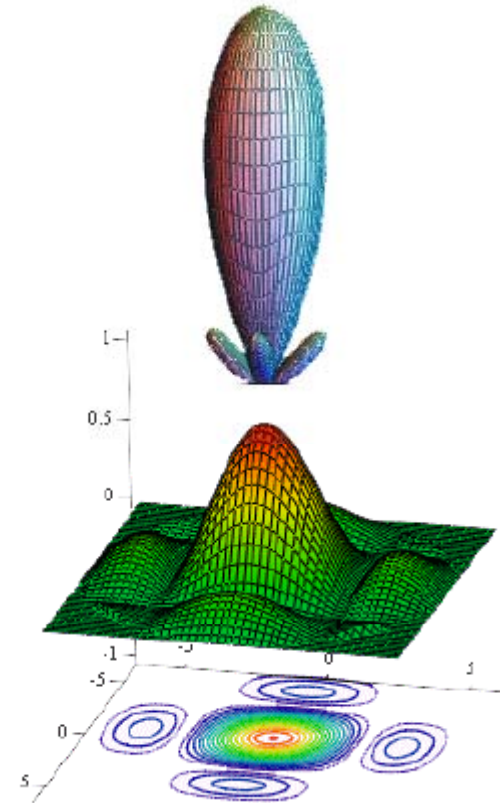
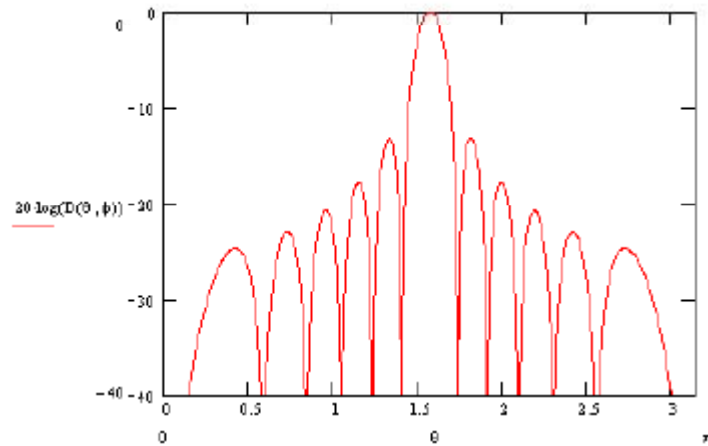
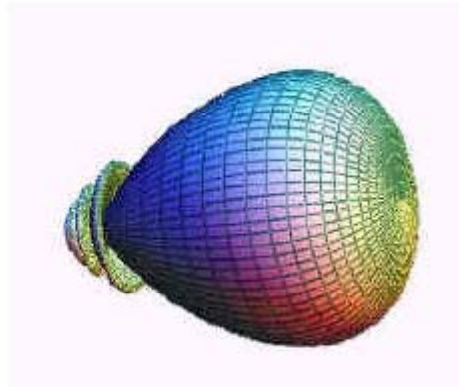
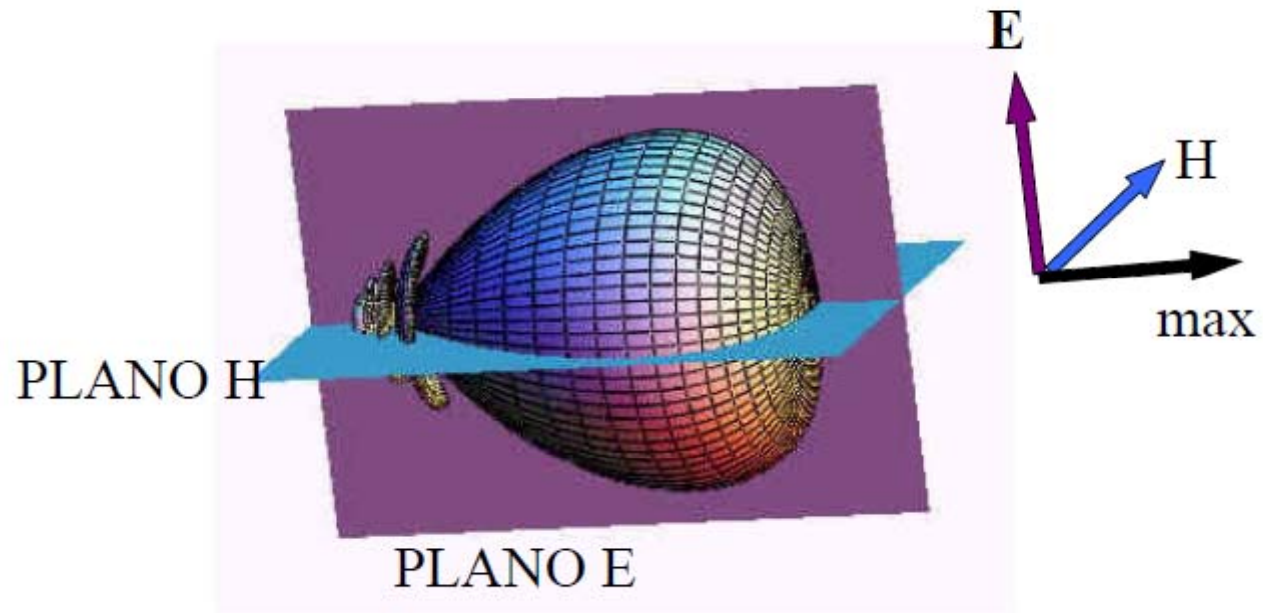


Figure 2.3 Principal E - and H -plane patterns for a pyramidal horn antenna.



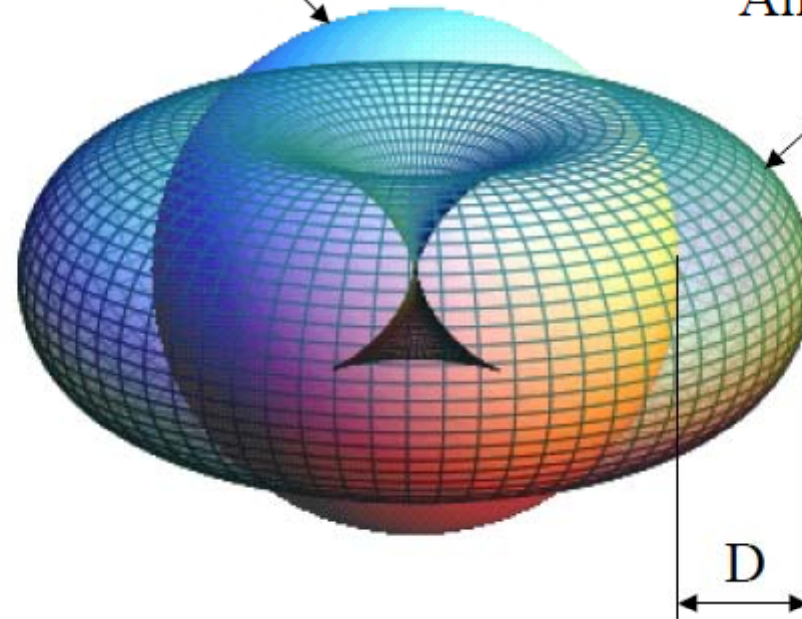






Antena isotrópica

Antena Directiva





Parámetros del diagrama de radiación de una antena

- Asociados al diagrama de radiación, se definen una serie de parámetros, que son los que habitualmente se utilizan a la hora de especificar el comportamiento de una antena. Para ello se define un **“lóbulo de radiación”**, como la porción del diagrama delimitada por regiones de menor radiación (nulos).
- Los lóbulos que se suelen definir son:
 - ***Lóbulo principal*** : el que contiene la dirección de máxima radiación
 - ***Lóbulos secundarios***: todos aquellos distintos al principal
 - ***Lóbulos laterales***: los adyacentes al principal, que generalmente son los más altos de todos los secundarios
 - ***Lóbulo posterior***: el que se encuentra en la dirección opuesta al principal





Parámetros del diagrama de radiación de una antena

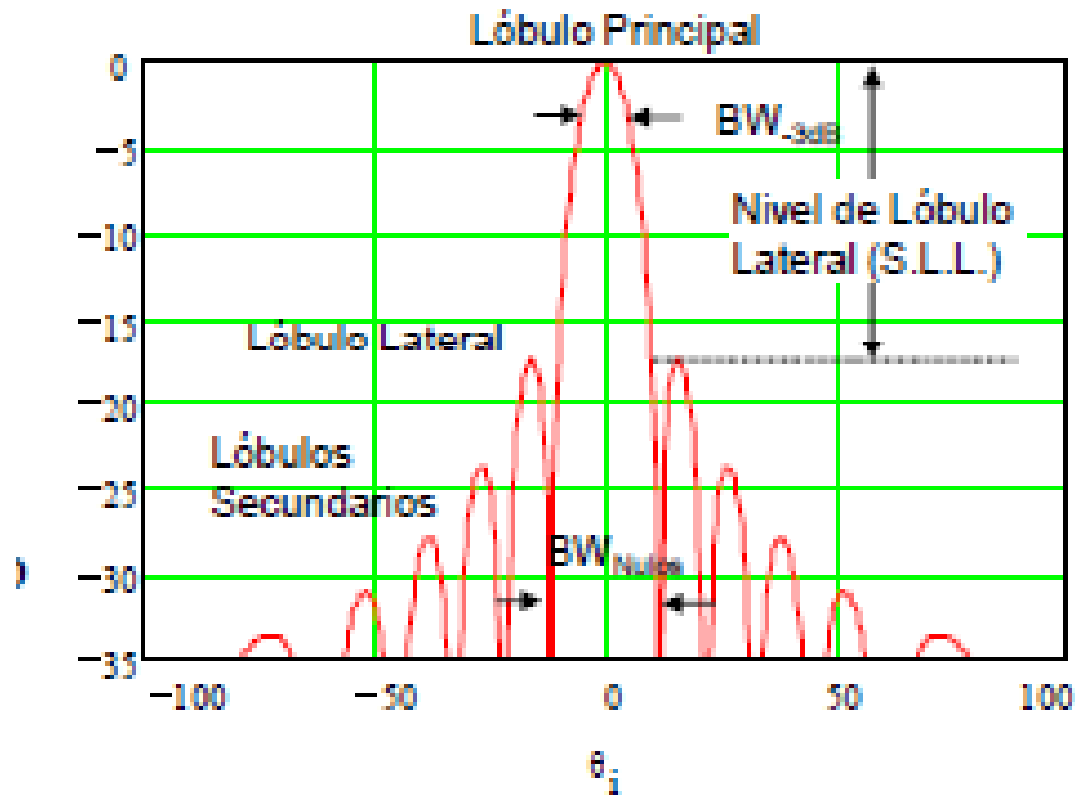


Diagrama de radiación 2D en dB.
Representación cartesiana





Parámetros del diagrama de radiación de una antena

- Una vez definidos los lóbulos, se determinan los siguientes parámetros:
 - ***Nivel de lóbulos secundarios***: el nivel del mayor lóbulo secundario respecto al principal. A veces se utiliza la relación “lóbulo principal a lóbulo secundario”, que coincide con el negativo del anterior en dB. Los lóbulos secundarios radian potencia no deseada en direcciones no controladas que pueden dar lugar a interferencias. En aplicaciones RADAR pueden dar lugar a la aparición de falsos blancos.
 - ***Ancho de haz principal a -3dB***: ancho del lóbulo principal entre puntos de potencia mitad, en el plano considerado.
 - ***Ancho del haz principal entre nulos***: ancho del lóbulo principal completo. Para el mismo plano, la relación entre los dos parámetros anteriores está comprendida entre 2 y 3.

$$BW_{nulos} = 2.25 BW_{-3dB}$$

- ***Relación delante-atrás***: relación entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior.





Clasificación de las antenas según su diagrama de radiación

- Atendiendo a la forma del diagrama de radiación, las antenas se pueden clasificar en:
 - ***Isótropas***: es un elemento de referencia que radia por igual en todas direcciones. No puede existir en la realidad.
 - ***Omnidireccionales***: cuando en uno de los planos radia de forma isótropa. En este caso el diagrama tiene simetría de revolución. (Antena tipo dipolo).
 - ***Directivas***: cuando la antena es capaz de concentrar la radiación en un pequeño cono angular. Según la forma de concentrar la energía se pueden dividir en:
 - ***Haz pincel***: cuando es un haz cónico estrecho en ambas coordenadas angulares. (Comunicaciones punto a punto).
 - ***Haz en abanico*** (haz sectorial): cuando en un plano tenemos un haz muy estrecho y en el otro más ancho.
 - ***Haz contorneado***: cuando la forma del haz se ajusta a un contorno específico
 - ***Haz conformado***: cuando el diagrama de la función se ajusta a una función
 - ***Antenas multihaz***: cuando la antena tiene varios lóbulos principales.





Clasificación de las antenas según su diagrama de radiación

- Atendiendo a la forma del diagrama de radiación, las antenas se pueden clasificar en:
 - **Multidiagrama**: cuando se dispone de varios diagramas diferentes dependiendo de la puerta de excitación.
 - **Antenas de haz reconfigurable**: cuando se puede controlar el diagrama de radiación de forma remota según las necesidades del sistema de comunicaciones
 - **Antenas adaptativas**: cuando el diagrama de radiación se adapta instantáneamente al entorno radioeléctrico.





Clasificación de las antenas según su diagrama de radiación

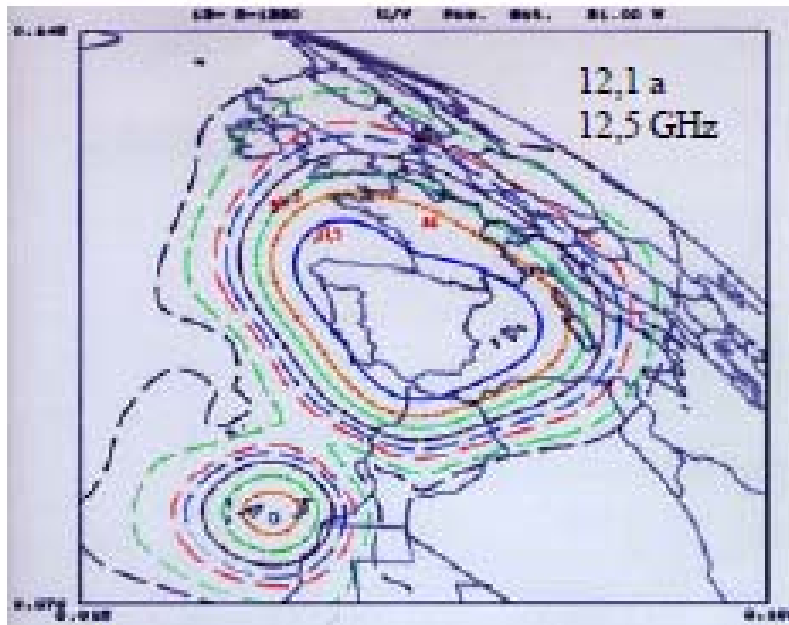
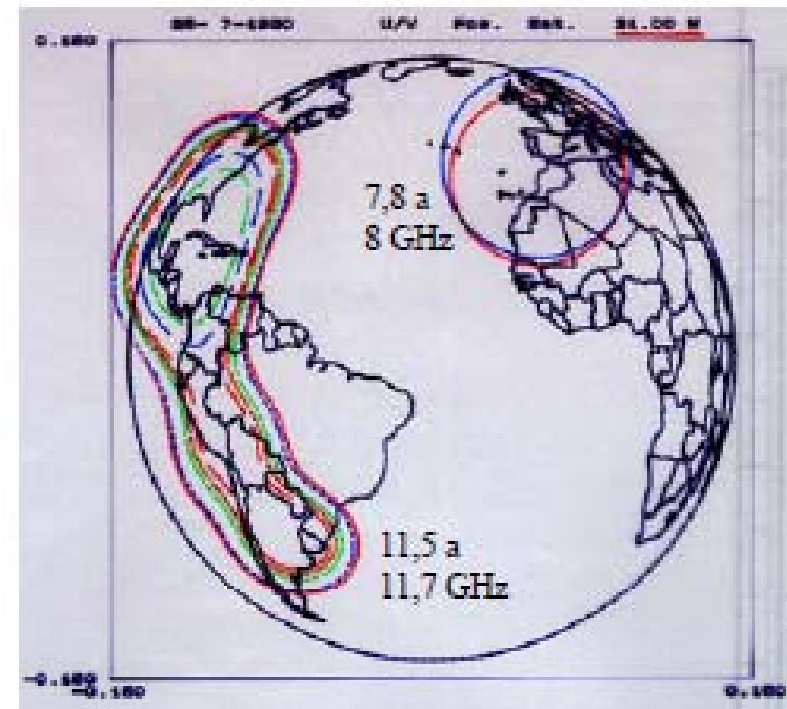


Diagrama multihaz de haces contorneados de la antena DBS del satélite HISPASAT.



Diagramas de la antena TVA-GOV (antena multidibrama) del satélite HISPASAT.





Ángulo sólido

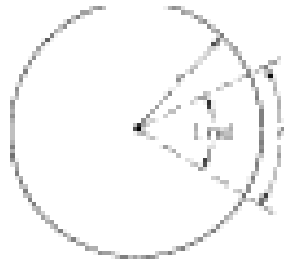


Fig. 1.1.1.1

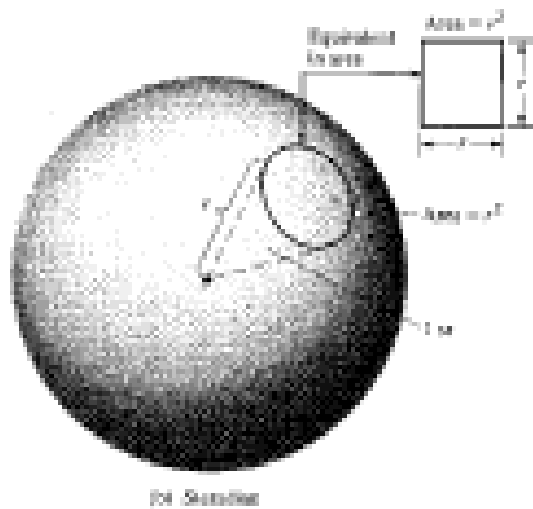
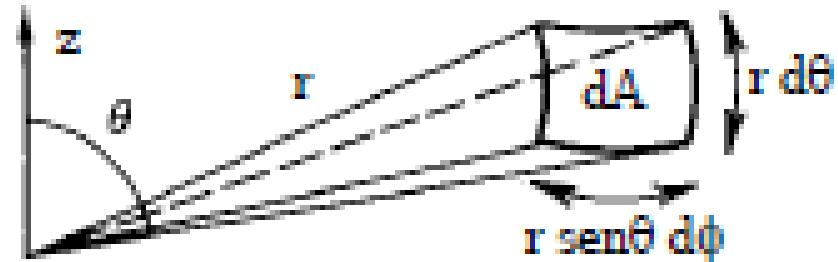


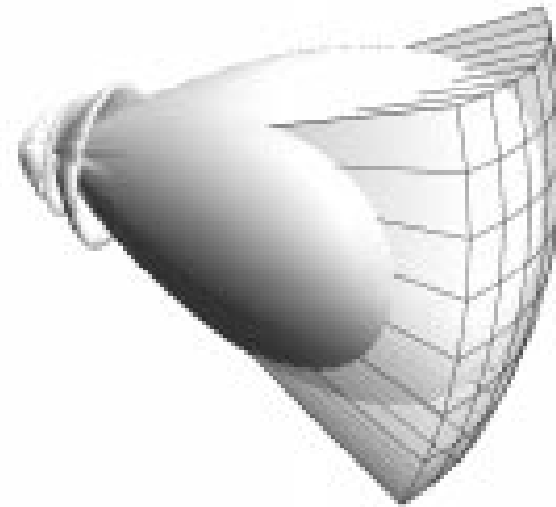
Fig. 1.1.1.2

$$\Rightarrow dA = r^2 d\Omega$$

Esteriorradiá



$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{r^2 \text{sen } \theta d\theta d\phi}{r^2} = \text{sen } \theta d\theta d\phi$$



Ángulo sólido = Zona del espacio abarcada por una sucesión de líneas radiales con vértice en el centro de una esfera





Intensidad de radiación

• La **intensidad de radiación, U** , es la potencia media radiada en una determinada dirección, por unidad de ángulo sólido, y representa la capacidad que tiene una antena de radiar la energía en dicha dirección. Sus unidades son watts por estereorradián, y en campo lejano es independiente de la distancia a la que se encuentra la antena.

• Su valor es

$$U(\theta, \Phi) = \frac{\langle S(r, \theta, \Phi) \rangle dA}{d\Omega} = r^2 \langle S(r, \theta, \Phi) \rangle$$

donde **S** es la densidad de potencia transportada por la onda radiada (en watts/m²).

• La **potencia media temporal total radiada** por una antena será:

$$P_{rad} = \oint_{4\pi} U(\theta, \Phi) d\Omega = \oint_{4\pi} r^2 \langle S(r, \theta, \Phi) \rangle d\Omega = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \langle S(r, \theta, \Phi) \rangle \sin\theta d\theta d\Phi$$





Ganancia directiva y directividad

- La intensidad de radiación, U , se utiliza para definir la denominada **ganancia directiva** de una antena $D(\theta, \phi)$, de acuerdo con los estándares del IEEE. Ésta se define como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación de una antena isótropa que radiara la misma potencia total

$$D(\theta, \Phi) = \frac{U(\theta, \Phi)}{U_{\text{isotrópica}}} = \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{\text{rad}} / 4\pi} = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)}{\int_{4\pi} U(\theta, \Phi) d\Omega} = 4\pi \frac{r^2 \langle S(r, \theta, \Phi) \rangle}{\oint \langle S(r, \theta, \Phi) \rangle dS}$$

- La **directividad, D** , de una antena es la máxima ganancia directiva de una antena, o sea la ganancia directiva en la dirección de máxima radiación. Se suele expresar en unidades logarítmicas (dBi, decibelios con respecto a la antena isótropa). Por definición, tiene que ser mayor que la unidad y vale:

$$D_{\text{max}} = D_0 = \frac{U(\theta, \Phi)_{\text{max}}}{P_{\text{rad}} / 4\pi} = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}}$$





Ganancia de potencia

- La **ganancia de potencia**, G , se define de forma equivalente a la ganancia directiva pero considerando la potencia entregada a la antena por el transmisor, P_{ET} , en lugar de la potencia radiada, P_{rad} :

$$G(\theta, \Phi) = \frac{U(\theta, \Phi)}{\frac{P_{ET}}{4\pi}} = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{ET}} = 4\pi \frac{r^2 \langle S(r, \theta, \Phi) \rangle}{P_{ET}}$$

- La ganancia en potencia se utiliza a nivel práctico porque es fácil medir la potencia entregada a la antena, mientras que la ganancia directiva es un concepto más usado a nivel teórico, porque la potencia radiada es más fácil determinarla a partir de los campos radiados.





Ganancia de potencia

- Se denomina *rendimiento o eficiencia de radiación* de una antena, al cociente

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ET}} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{per}} = \frac{4\pi U(\theta, \Phi) / D(\theta, \Phi)}{4\pi U(\theta, \Phi) / G(\theta, \Phi)} = \frac{G(\theta, \Phi)}{D(\theta, \Phi)} = \frac{G_0}{D_0}$$

- Del mismo modo que se ha definido un parámetro de *directividad*, como la ganancia directa en la dirección de máxima radiación, se puede definir un parámetro de **ganancia** G_0 como la ganancia de potencia en la dirección de máxima radiación.
- Este parámetro, G_0 , puede ser menos que la unidad, porque incluye el rendimiento de radiación de la antena, y también se suele expresar en dBi, como $10 \log G_0$
- Normalmente la eficiencia de una antena bien construida se aproxima al 100%.





Ganancia de potencia

- Por último, también se utiliza otro parámetro (en radioenlaces satelitales), que es la **potencia isotrópica radiada equivalente** o **PIRE**, definida como el producto de la ganancia de potencia y la potencia entregada a la antena.
- Se suele expresar en dBw y permite obtener la densidad de potencia radiada sin más que dividir el PIRE por $4\pi r^2$.

$$PIRE(\theta, \Phi) = G(\theta, \Phi) P_{ET} = D(\theta, \Phi) P_{rad}$$

$$\langle S(r, \theta, \Phi) \rangle = \frac{PIRE(\theta, \Phi)}{4\pi r^2}$$





Fórmulas aproximadas del cálculo de la directividad

- A partir del diagrama normalizado de potencia: $f(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\max}} \leq 1$

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{\int_{4\pi} U(\theta, \phi) d\Omega} = 4\pi \frac{f(\theta, \phi)}{\int_{4\pi} f(\theta, \phi) d\Omega} = D_0 f(\theta, \phi) \stackrel{\Delta}{=} 4\pi \frac{f(\theta, \phi)}{\Omega_A} \quad \boxed{D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A}}$$

donde Ω_A es el ángulo sólido del haz. $\Omega_A = \int_{4\pi} f(\theta, \phi) d\Omega$

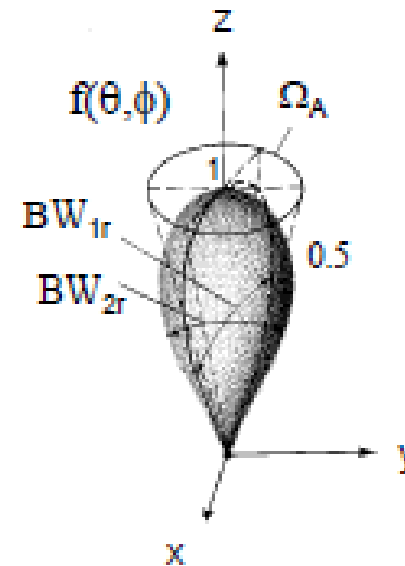
- Para antenas directivas, de diagrama tipo pincel o abanico

$$\Omega_A \cong BW_{1r} \cdot BW_{2r} \text{ (Anchuras de haz a } -3\text{dB)}$$

$$D_0 \cong \frac{4\pi}{BW_{1r} \cdot BW_{2r}}$$

- Para antenas omnidireccionales:

$$D_0 \cong \frac{4\pi}{2\pi \cdot BW_{\theta r}}$$





Ancho de banda

- El ancho de banda de una antena se define como el margen de frecuencias dentro del cual los parámetros anteriores (impedancia, diagramas de radiación, ganancia, ...) cumplen con unas especificaciones determinadas.
- Para antenas de banda estrecha (antenas resonantes) se expresan, normalmente, en % de la frecuencia de resonancia.
- Para antenas de banda ancha se suele expresar como la relación entre la frecuencia superior de la banda a la inferior, como por ejemplo una octava (2:1). Una década (10:1)





Antena en recepción

- Los parámetros anteriores se han definido considerando la antena en transmisión. Cuando consideramos antenas pasivas, el principio de reciprocidad del electromagnetismo nos asegura que los parámetros anteriores son independientes de que la antena esté en transmisión o en recepción.
- Sin embargo, existe otro parámetro que caracteriza la capacidad de recepción de potencia de una antena como es el *área equivalente de absorción*.
- Su definición asume que la antena está iluminada por una onda plana, es decir que *la antena receptora está en campo lejano con respecto a la transmisora, como ocurre en la mayoría de los radioenlaces*.
- Comenzaremos este apartado estudiando el *esquema circuital de la antena en recepción*, para continuar con los parámetros de *área equivalente de absorción* y *longitud efectiva*.

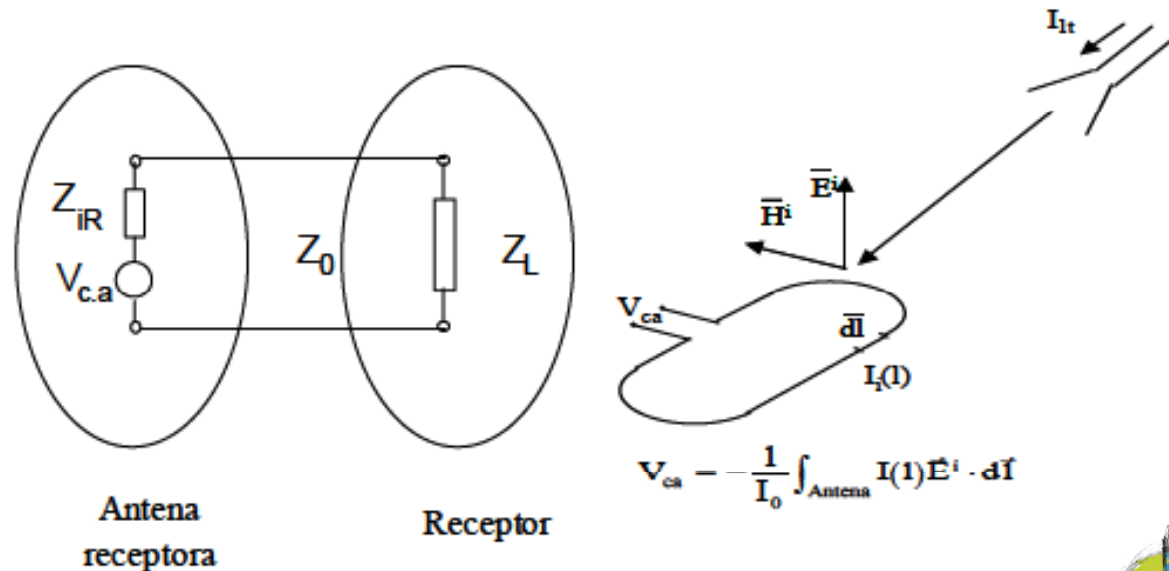




Modelo circuital de la antena en recepción

- La tensión en circuito abierto V_{ca} de este esquema representa *la tensión que aparece en bornes de una antena*, cuando, estando ésta en circuito abierto, incide sobre ella una onda localmente plana caracterizada por unos campos eléctrico y magnético, \mathbf{E}^i y \mathbf{H}^i .
- Esta tensión es, por lo tanto, proporcional a la amplitud del campo que transporta dicha onda. La impedancia serie del generador, Z_{iR} , debe ser igual a la impedancia de entrada de la antena definida en transmisión, Z_{iT} (*Teorema de la Reciprocidad*).

- El resto de los parámetros son la impedancia característica de la línea de transmisión que une la antena con el receptor, Z_0 , y la impedancia de carga del receptor, Z_L





Modelo circuital de la antena en recepción

- A partir de los parámetros del modelo anterior, se puede definir la **potencia disponible en bornes de la antena receptora**, P_{DR} , y la **potencia entregada al receptor**, P_{ER} , del mismo modo que en cualquier circuito de radiofrecuencia.

- **Potencia disponible en la antena receptora**
$$P_{DR} = \frac{1}{8} \frac{|V_{ca}|^2}{R_{iR}}$$

- En el caso en el que hubiese una línea de transmisión (no adaptada) habría que considerar las desadaptaciones en ambos extremos de la línea las pérdidas de la misma, mediante el coeficiente de reflexión.

- **Coefficiente de reflexión**
$$\Gamma_R = \frac{Z_L - Z_{iR}^*}{Z_L + Z_{iR}}$$

- **Potencia entregada al receptor**
$$P_{ER} = \frac{1}{2} |I_L|^2 R_L = P_{DR} (1 - |\Gamma_R|^2)$$





Área equivalente de absorción

- Si se considera la antena receptora como una apertura capaz de captar energía de la onda electromagnética incidente sobre ella, se puede definir *un área equivalente de antena* o “*área efectiva*”, como la *relación entre la potencia disponible en bornes de la antena, P_{DR} y la densidad de potencia de la onda incidente* (consideramos acoplo perfecto de polarización ente la onda incidente y la antena).

$$A_e(\theta, \Phi) = \frac{P_{DR}}{\langle S_i(\theta, \Phi) \rangle} \Rightarrow P_{DR} = A_e(\theta, \Phi) \langle S_i(\theta, \Phi) \rangle$$

- El área equivalente de absorción de cualquier antena *también se puede expresar en función de la ganancia de potencia de la misma* (Teorema de la Reciprocidad)

$$A_e(\theta, \Phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\theta, \Phi)$$

- Cuando dicha expresión se caracteriza en la dirección del máximo de radiación, se define *el área equivalente máxima*

$$A_{e\max} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_0$$





Área equivalente de absorción

- Para las antenas que tienen una apertura bien definida, el área equivalente máxima se obtiene multiplicando el área física de la apertura por el producto de la eficiencia de radiación y de la eficiencia de la apertura de la antena.
- La eficiencia de apertura indica la capacidad que tiene la antena de absorber la densidad de potencia incidente sobre ella y es siempre menos o igual a uno.
- Su valor depende de la ley de iluminación en amplitud y fase de la apertura

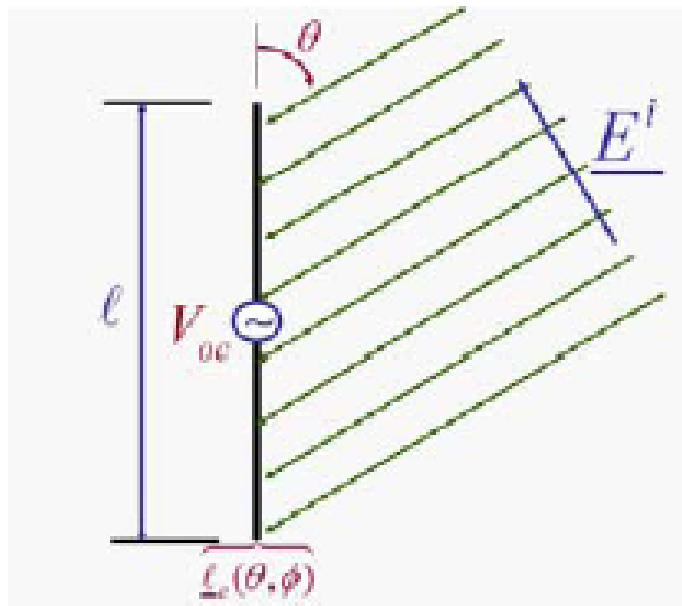
$$A_{e\max} = \eta_{rad} \epsilon_a A_{apertura}$$





Longitud efectiva

- Para antenas lineales se puede utilizar la longitud efectiva, que se define como el cociente entre la tensión inducida en sus bornes en circuito abierto y el campo incidente sobre la misma (con acoplo perfecto de polarización).
- Normalmente se define la Longitud efectiva máxima, como aquella que multiplicada por el módulo de campo incidente por la dirección de máxima recepción da la tensión en circuito abierto.



$$L_{e,max} = \frac{V_{ca}}{|E^i|}$$

- La longitud efectiva máxima coincide con la longitud física para un dipolo tipo Hertz (con corriente uniforme). Para los dipolos reales es siempre menor que la longitud física. Para un dipolo de longitud total $L=\lambda/2$, la longitud efectiva vale $L_e=2L/\pi=0.64 L$





Fórmula de Friis: propagación en espacio libre

- En todo sistema de radiocomunicaciones se necesita establecer un balance de potencia entre el transmisor y el receptor para poder calcular la potencia necesaria en el transmisor que permite alcanzar un nivel mínimo de señal en el receptor, que esté por encima del ruido.
- La *fórmula de Friis* permite calcular *las pérdidas de inserción de un radioenlace en función de parámetros de transmisión de ambas antenas asociados a las direcciones en que cada una ve a la otra.*
- **Estas pérdidas de inserción se definen como el cociente entre la potencia entregada al receptor, P_{ER} , y la potencia disponible en el transmisor P_{DT} .**
- Considerando la ganancia de la antena transmisora, se puede obtener la densidad de potencia incidente sobre la antena receptora así:

$$\langle S_i(r, \theta, \Phi) \rangle = G_T(\theta, \Phi) \cdot \frac{P_{ET}}{4\pi r^2} = \frac{PIRE(\theta, \Phi)}{4\pi r^2}$$





Fórmula de Friis: propagación en espacio libre

- Introduciendo la expresión anterior en la definición de área efectiva de la antena en recepción , se obtiene la relación entre la potencia disponible en la antena receptora y la potencia entregada por el transmisor.

$$\frac{P_{DR}}{P_{ET}} = G_T(\theta, \Phi) \cdot \frac{A_e(\theta, \Phi)}{4\pi r^2} = G_T(\theta, \Phi) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_R(\theta, \Phi)$$

- En la expresión anterior del mismo modo que se hace en la definición de área efectiva de la antena receptora, se ha considerado acoplo perfecto de polarización entre la onda generada por la antena transmisora y la antena receptora.
- Si esto no ocurre, hay que incluir un ***factor de pérdidas de polarización***, caracterizado por

$$FPP = \left| \hat{e}_T(\theta, \Phi) \cdot \hat{e}_R(\theta, \Phi) \right|^2$$





Fórmula de Friis: propagación en espacio libre

- A efectos prácticos para conseguir acoplo perfecto de polarización (FPP=1), las dos antenas deben tener exactamente la misma polarización.
- Introduciendo este factor en la fórmula anterior resulta la denominada *fórmula de Friis que nos proporciona las pérdidas de inserción de un radioenlace en espacio libre como cociente ente la potencia entregada al receptor y la potencia disponible del transmisor en condiciones de campo lejano.*

$$\frac{P_{ER}}{P_{DT}} = \left(1 - |\Gamma_T|^2\right) \left(1 - |\Gamma_R|^2\right) \left| \hat{e}_T(\theta, \Phi) \cdot \hat{e}_R(\theta, \Phi) \right|^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_R(\theta, \Phi) \cdot G_T(\theta, \Phi)$$



Desadaptaciones entre transmisor y antena transmisora
y entre antena receptora y receptor.





Fórmula de Friis: propagación en espacio libre

- A efectos prácticos para conseguir acoplo perfecto de polarización (FPP=1), las dos antenas deben tener exactamente la misma polarización.
- Introduciendo este factor en la fórmula anterior resulta la denominada ***fórmula de Friis que nos proporciona las pérdidas de inserción de un radioenlace en espacio libre como cociente ente la potencia entregada al receptor y la potencia disponible del transmisor en condiciones de campo lejano.***

$$\frac{P_{ER}}{P_{DT}} = \left(1 - |\Gamma_T|^2\right) \left(1 - |\Gamma_R|^2\right) \left| \hat{e}_T(\theta, \Phi) \cdot \hat{e}_R(\theta, \Phi) \right|^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_R(\theta, \Phi) \cdot G_T(\theta, \Phi)$$



Factor de pérdidas de polarización.
Refleja el desacoplo de polarización entre ambas antenas en la dirección del enlace.
Su valor es siempre menor o igual a uno





Fórmula de Friis: propagación en espacio libre

- A efectos prácticos para conseguir acoplo perfecto de polarización (FPP=1), las dos antenas deben tener exactamente la misma polarización.
- Introduciendo este factor en la fórmula anterior resulta la denominada ***fórmula de Friis que nos proporciona las pérdidas de inserción de un radioenlace en espacio libre como cociente ente la potencia entregada al receptor y la potencia disponible del transmisor en condiciones de campo lejano.***

$$\frac{P_{ER}}{P_{DT}} = \left(1 - |\Gamma_T|^2\right) \left(1 - |\Gamma_R|^2\right) \left| \hat{e}_T(\theta, \Phi) \cdot \hat{e}_R(\theta, \Phi) \right|^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_R(\theta, \Phi) \cdot G_T(\theta, \Phi)$$



Factor asociado a la pérdida de señal por propagación en el espacio libre





Fórmula de Friis: propagación en espacio libre

- A efectos prácticos para conseguir acoplo perfecto de polarización (FPP=1), las dos antenas deben tener exactamente la misma polarización.
- Introduciendo este factor en la fórmula anterior resulta la denominada ***fórmula de Friis que nos proporciona las pérdidas de inserción de un radioenlace en espacio libre como cociente ente la potencia entregada al receptor y la potencia disponible del transmisor en condiciones de campo lejano.***

$$\frac{P_{ER}}{P_{DT}} = \left(1 - |\Gamma_T|^2\right) \left(1 - |\Gamma_R|^2\right) \left| \hat{e}_T(\theta, \Phi) \cdot \hat{e}_R(\theta, \Phi) \right|^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_R(\theta, \Phi) \cdot G_T(\theta, \Phi)$$



Ganancia de ambas antenas en la dirección del enlace





Fórmula de Friis: propagación en espacio libre

- A efectos prácticos para calcular la potencia entregada al receptor en función de la densidad de potencia incidente, el área efectiva de la antena y otros parámetros se utilizará la siguiente fórmula.

$$P_{ER} = \left(1 - |\Gamma_R|^2\right) \left| \hat{e}_T(\theta, \Phi) \cdot \hat{e}_R(\theta, \Phi) \right|^2 \langle S_i(\theta, \Phi) \rangle A_e(\theta, \Phi)$$

