

Antenas

Parámetros

Horacio A. Mendoza

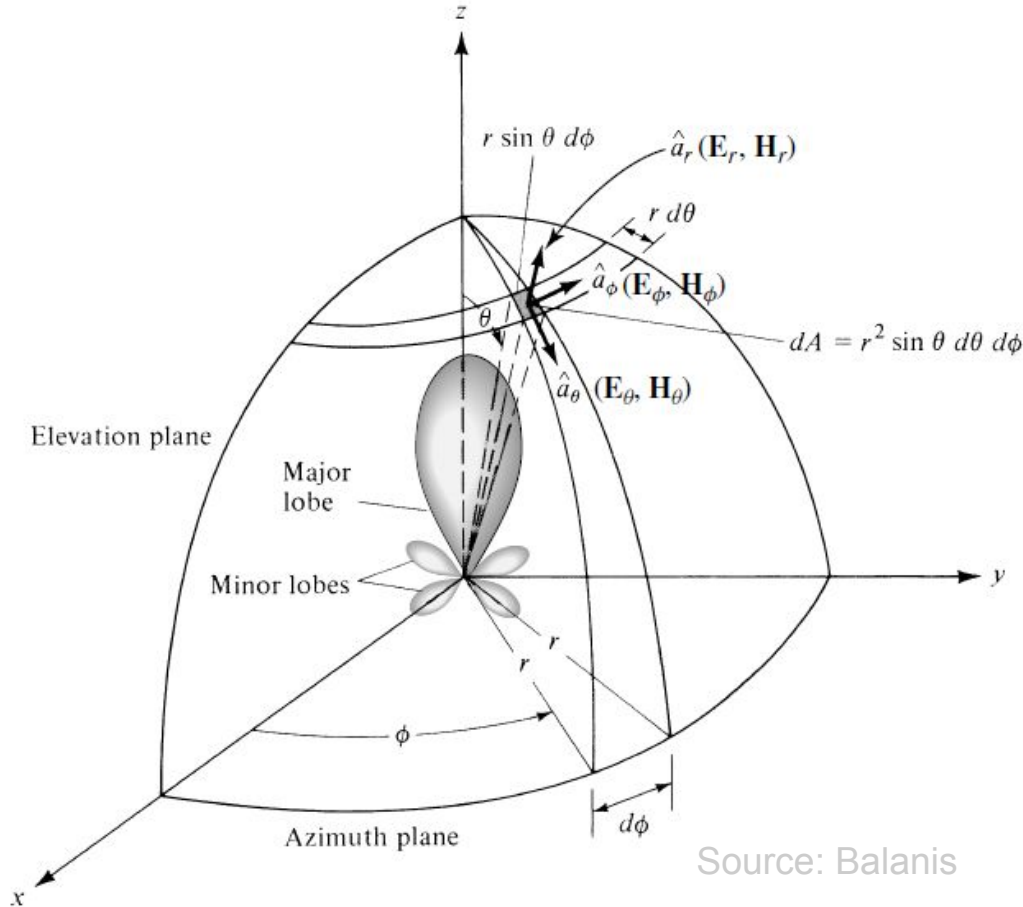


Objetivos

- Identificar los parámetros de las antenas para describir su desempeño.
- Comprender las relaciones entre los parámetros y las diferentes implementaciones de antenas
- Desarrollar criterios de selección de antenas en base a sus parámetros.



Patrón de radiación



Source: Balanis

Representación espacial
de las propiedades de
radiación de una antena.

Distribución espacial de la energía
radiada a través de un trayecto o
superficie de radio constante.

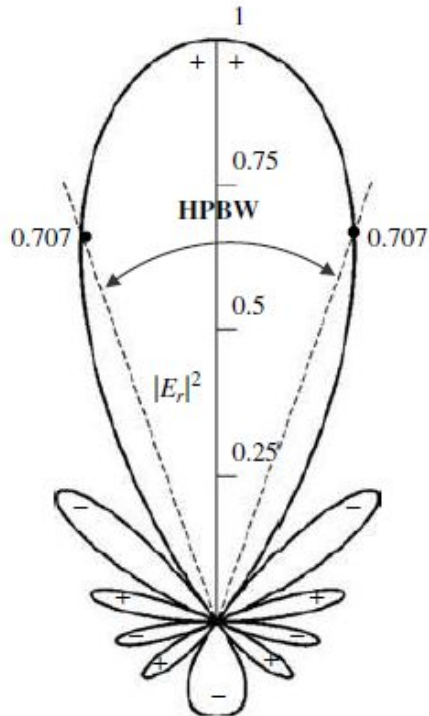
Patrón de radiación

Propiedades del patrón de radiación (Campo lejano):

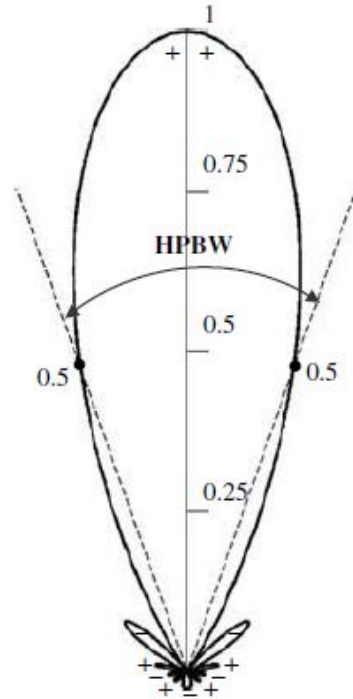
- Densidad de flujo de potencia.
- Intensidad de radiación.
- Intensidad de campo
- Directividad.
- Fase y polarización.



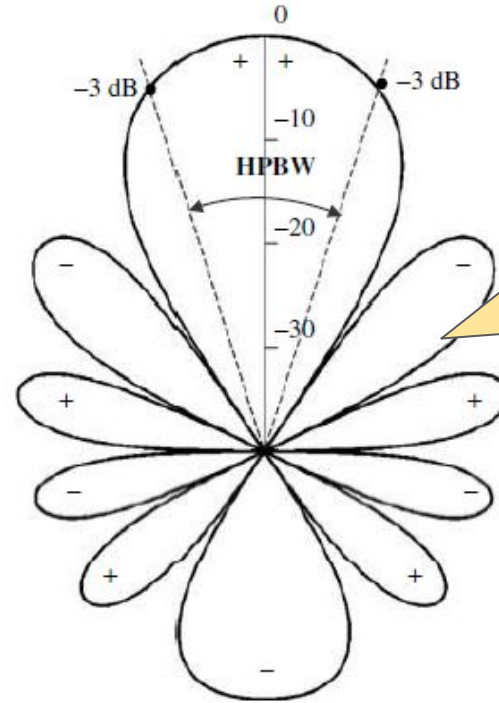
Patrón de radiación (2D)



Patrón de campo
(eléctrico o magnético)
Amplitud - Lineal

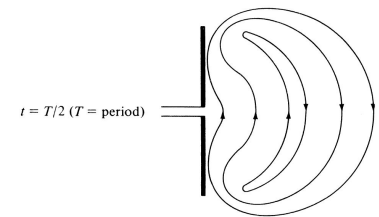


Patrón de potencia
Amplitud - Lineal



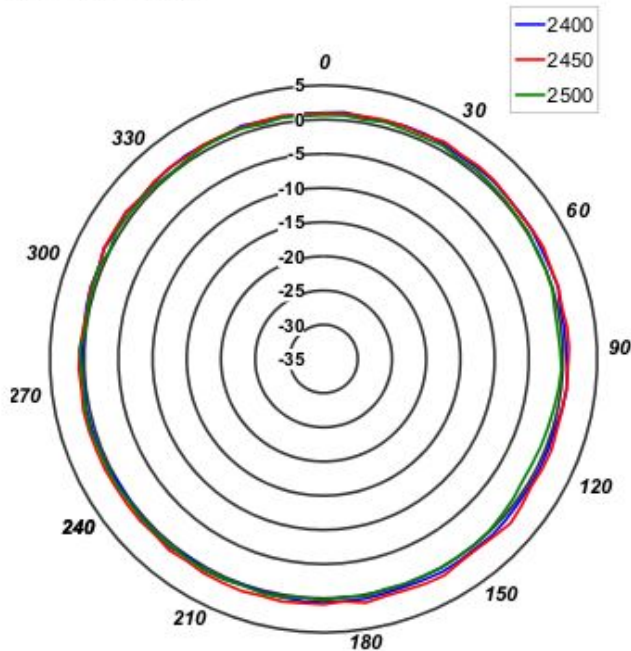
Patrón de potencia
Amplitud - Log. (dB)

Cambio de polarización de amplitud entre lóbulos en el cruce por los nulos.

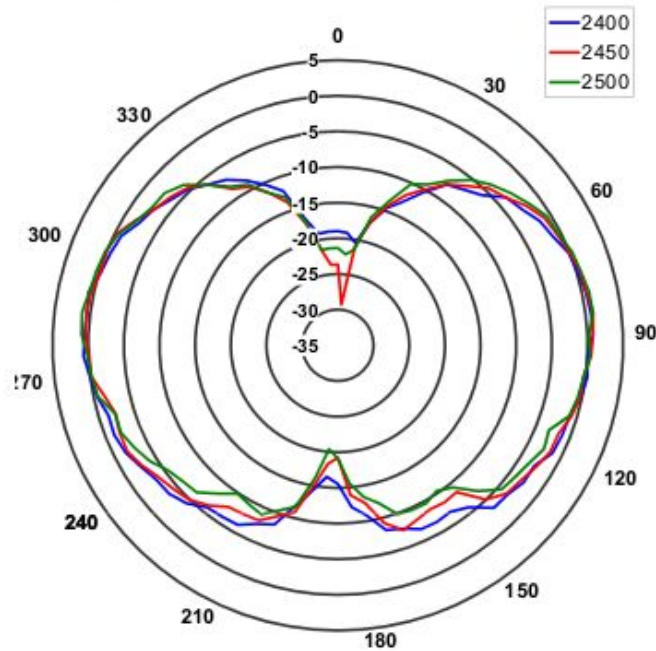


Patrón de radiación

Horizontal Plane



Vertical Plane



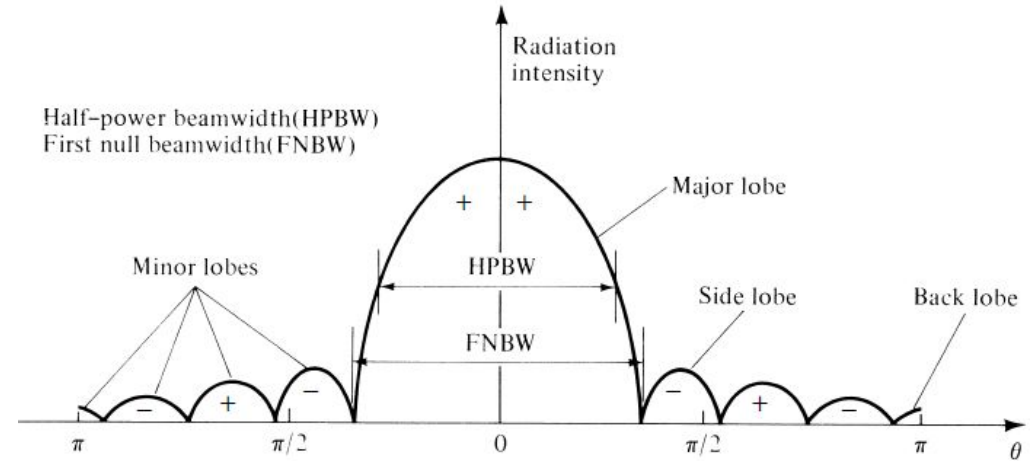
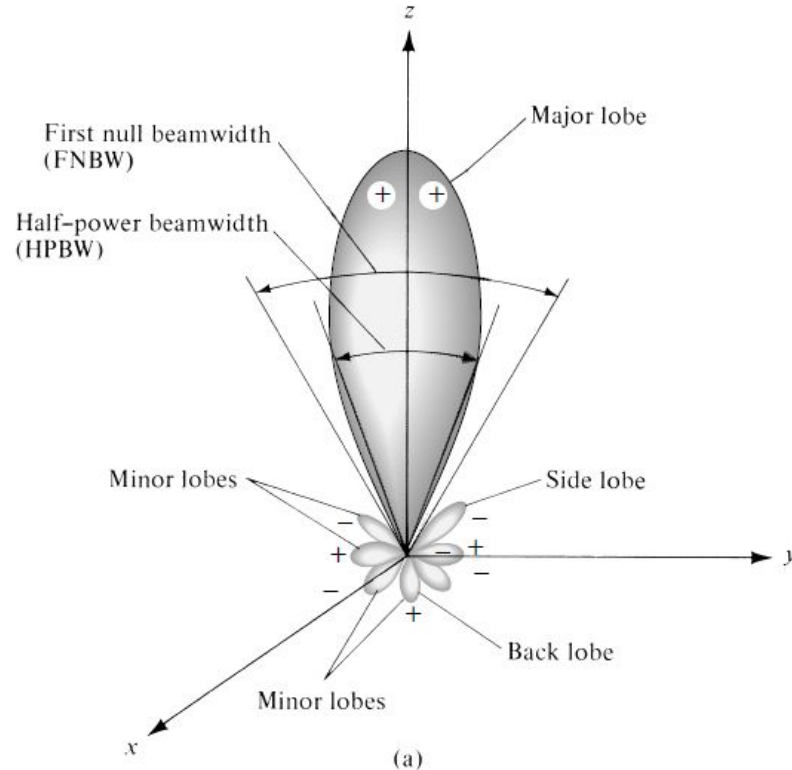
Wireless External Dual Band Antenna
for 2.4 GHz & 5.0 GHz Applications

Pulse Part Number W1043

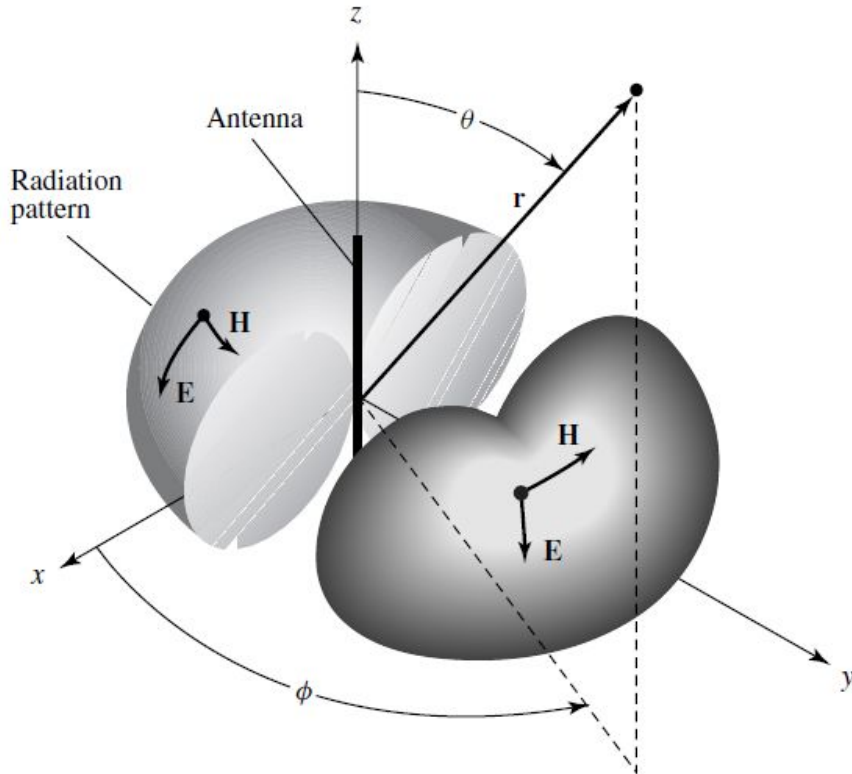


Patrón de radiación

Lóbulos de radiación

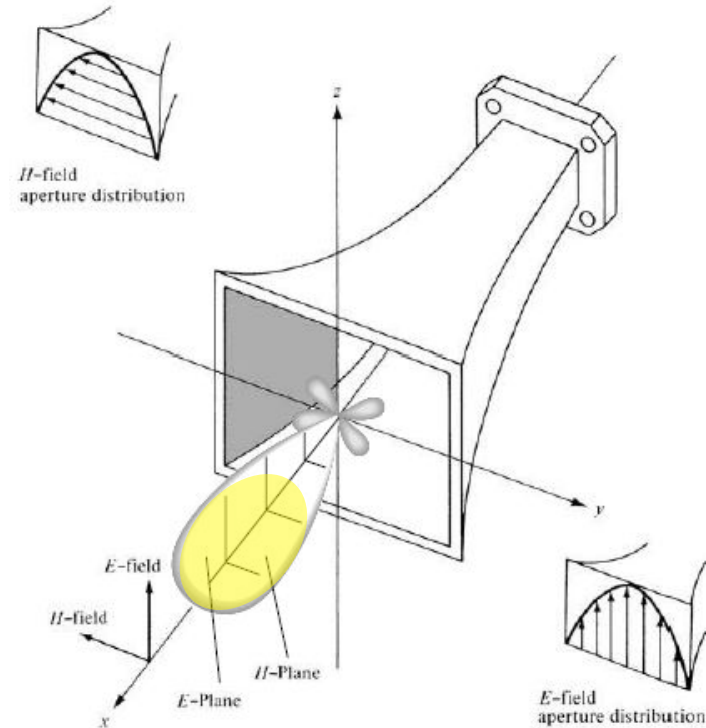


Patrón de radiación isotrópicos y directivos

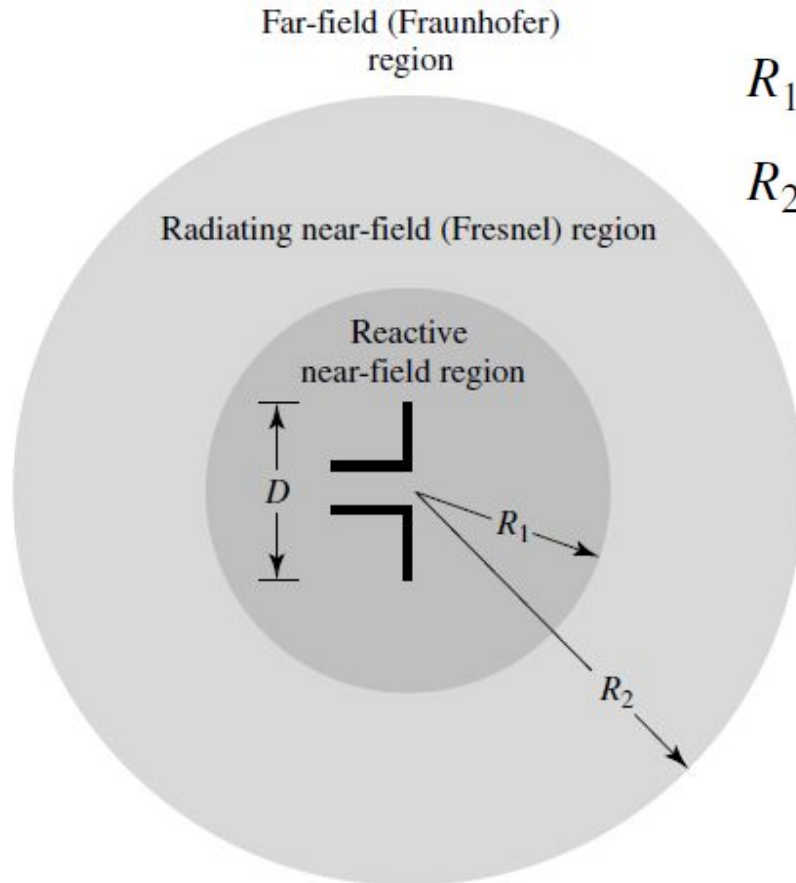


Omnidireccional

Directivo



Regiones alrededor de la antena



$$R_1 = 0.62 \sqrt{D^3/\lambda}$$

$$R_2 = 2D^2/\lambda$$

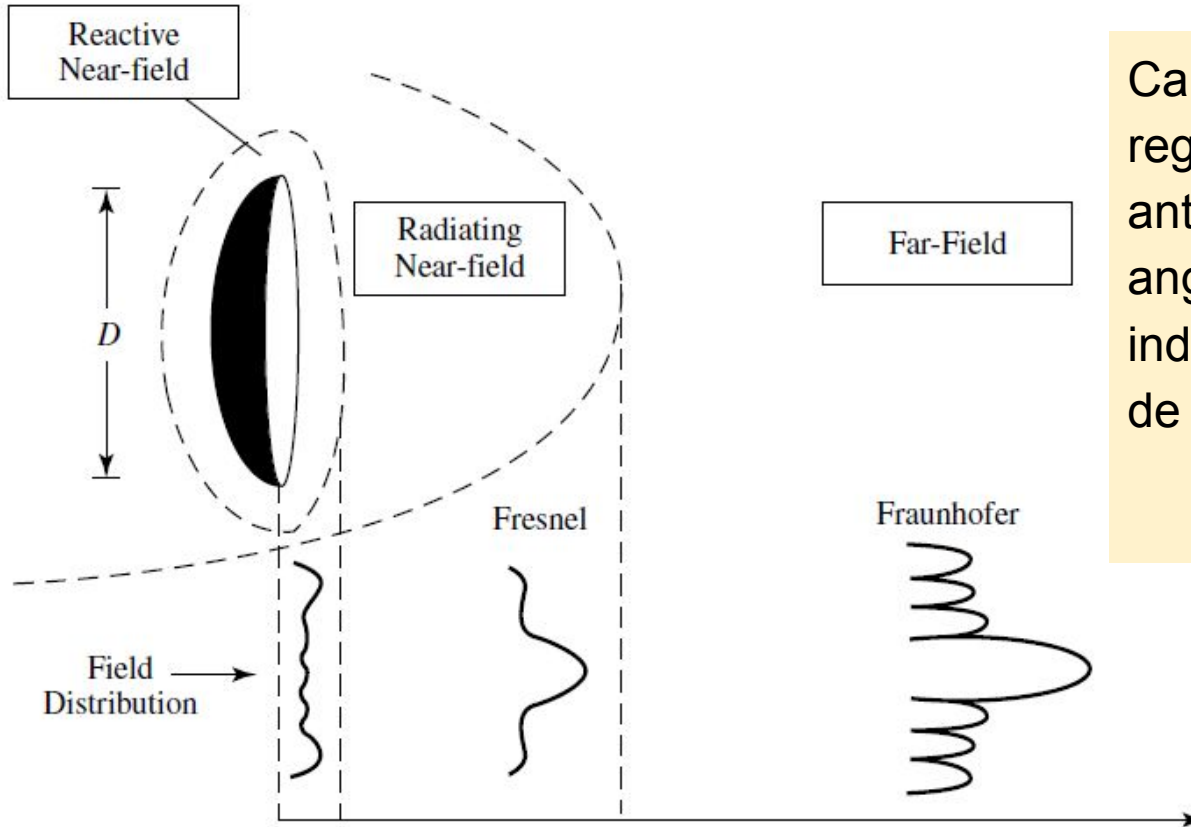
Campo cercano reactivo

- Los campos E y H no son perpendiculares.

Campo cercano radiante (Fresnel)

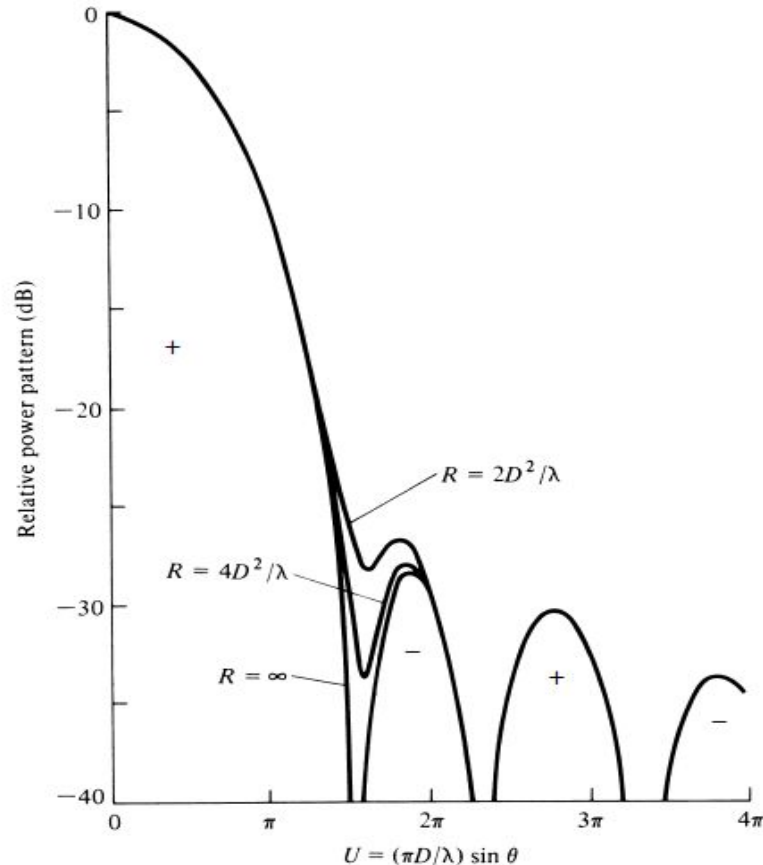
- El campo todavía depende de la distancia a la antena.

Regiones alrededor de la antena



Campo lejano (Fraunhofer): región del campo de una antena donde la distribución angular del mismo resulta independiente de la distancia de la antena.

Regiones alrededor de la antena



Variación del patrón de radiación con la distancia de observación más allá de la región límite de campo lejano.

Densidad de potencia de radiación

Vector de Poynting

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H}$$

$\mathcal{W}$ = instantaneous Poynting vector (W/m²)

$\mathcal{E}$ = instantaneous electric-field intensity (V/m)

$\mathcal{H}$ = instantaneous magnetic-field intensity (A/m)

$$\mathcal{P} = \oint_S \mathcal{W} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \mathcal{W} \cdot \hat{\mathbf{n}} da$$

$\mathcal{P}$ = instantaneous total power (W)

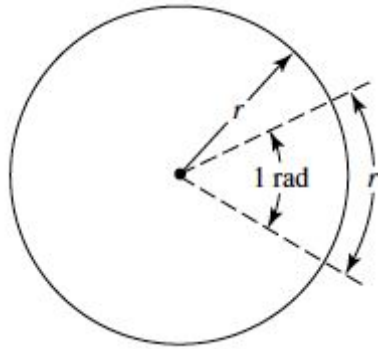
$\hat{\mathbf{n}}$ = unit vector normal to the surface

da = infinitesimal area of the closed surface (m²)

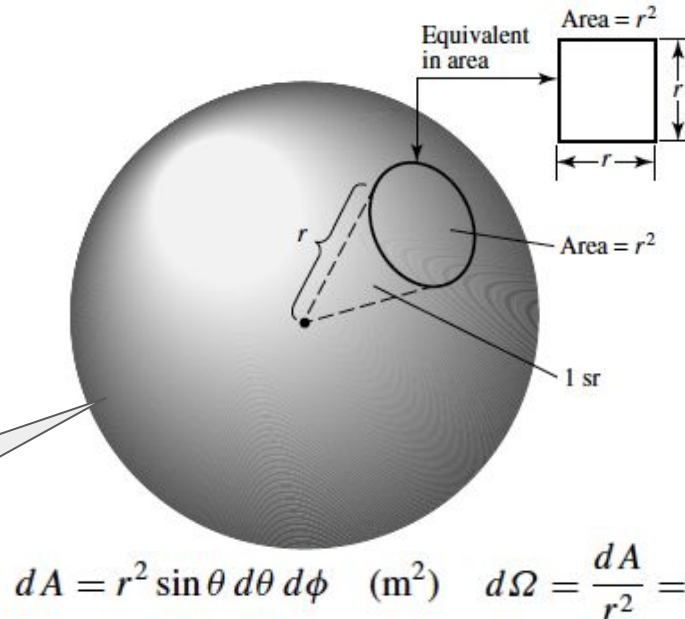
Definiciones (revisión)

Radián: ángulo subtendido por un arco de longitud igual al radio del círculo circunscrito.

Ángulo sólido: ángulo espacial que se corresponde con una zona de espacio limitado.



En una esfera hay 4π [sr]



Estereoradián: ángulo sólido subtendido por una superficie esférica de área igual al cuadrado del radio de la esfera circunscrita.

Densidad de potencia de radiación

El vector de Poynting describe la potencia asociada con un frente de onda:

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H}$$

$\mathcal{W}$ = instantaneous Poynting vector (W/m²)

$\mathcal{E}$ = instantaneous electric-field intensity (V/m)

$\mathcal{H}$ = instantaneous magnetic-field intensity (A/m)

La potencia total se encuentra integrando la densidad de potencia sobre una superficie perpendicular:

$$\mathcal{P} = \oint_S \mathcal{W} \cdot ds = \oint_S \mathcal{W} \cdot \hat{n} da$$

$\mathcal{P}$ = instantaneous total power (W)

$\hat{n}$ = unit vector normal to the surface

da = infinitesimal area of the closed surface (m²)

Densidad de potencia de radiación

Para campos variantes en el tiempo, especialmente armónicos, se toma el promedio. Para esto, se definen los campos complejos $\mathcal{E}$ y $\mathcal{H}$, que se relacionan con las magnitudes instantáneas como:

$$\mathcal{E}(x, y, z; t) = \text{Re}[\mathbf{E}(x, y, z)e^{j\omega t}]$$

$$\mathcal{H}(x, y, z; t) = \text{Re}[\mathbf{H}(x, y, z)e^{j\omega t}]$$

Aplicando la identidad:

entonces:

$$\text{Re}[\mathbf{E}e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\mathbf{E}e^{j\omega t} + \mathbf{E}^*e^{-j\omega t}]$$

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H} = \frac{1}{2}\text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] + \frac{1}{2}\text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}e^{j2\omega t}]$$

Densidad de potencia de radiación

De las dos componentes, una depende del tiempo (al doble de frecuencia que la excitación) y la otra no. De aquí que el promedio temporal se encuentre como:

$$W_{av}(x, y, z) = [W(x, y, z; t)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (\text{W/m}^2)$$

donde la parte imaginaria se interpreta como la parte reactiva del campo. Aunque en la zona de campo lejano esta cantidad sea despreciable, es decir el campo es predominantemente real.

Densidad de potencia de radiación

En base a la definición de la densidad media de potencia:

$$\begin{aligned} P_{\text{rad}} &= P_{\text{av}} = \oiint_S \mathbf{W}_{\text{rad}} \cdot d\mathbf{s} = \oiint_S \mathbf{W}_{\text{av}} \cdot \hat{\mathbf{n}} da \\ &= \frac{1}{2} \oiint_S \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{s} \end{aligned}$$

- El patrón de radiación resulta entonces una medida que es función de la dirección de la potencia media radiada por la antena.
- La observación se suele realizar a lo largo de la superficie de una esfera ubicada en la zona de campo lejano.
- Usualmente el patrón de potencia se reemplaza por el de ganancia o de patrones de potencia relativos.

Densidad de potencia de radiación

Un **radiador isotrópico** es una fuente que irradia de forma ideal en todas direcciones, aunque no existe en la práctica, constituye una buena referencia de comparación con otras antenas.

Por simetría, el vector de Poynting sólo será función de la componente radial; la potencia total radiada será:

$$P_{\text{rad}} = \oint_S \mathbf{W}_0 \cdot d\mathbf{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\hat{\mathbf{a}}_r W_0(r)] \cdot [\hat{\mathbf{a}}_r r^2 \sin \theta d\theta d\phi] = 4\pi r^2 W_0$$

por lo que la densidad de potencia de radiación resulta:

$$\mathbf{W}_0 = \hat{\mathbf{a}}_r W_0 = \hat{\mathbf{a}}_r \left(\frac{P_{\text{rad}}}{4\pi r^2} \right) \quad (\text{W/m}^2)$$

Uniformemente
distribuida sobre
la superficie de la
esfera.

Intensidad de Radiación

Para una dirección dada la **intensidad de radiación** es un parámetro de campo lejano y representa la potencia radiada por unidad de ángulo sólido.

$$U = r^2 W_{\text{rad}}$$

1 [sr]

$$U = \text{radiation intensity (W/unit solid angle)}$$

$$W_{\text{rad}} = \text{radiation density (W/m}^2\text{)}$$

- Parámetro de campo lejano.
- Se cuantifica afectando la potencia radiada por la distancia a la antena.
- Buscamos saber la preferencia espacial de la antena.

Intensidad de Radiación

La potencia total puede obtenerse integrando sobre la totalidad del ángulo sólido (4π):

$$P_{\text{rad}} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi$$

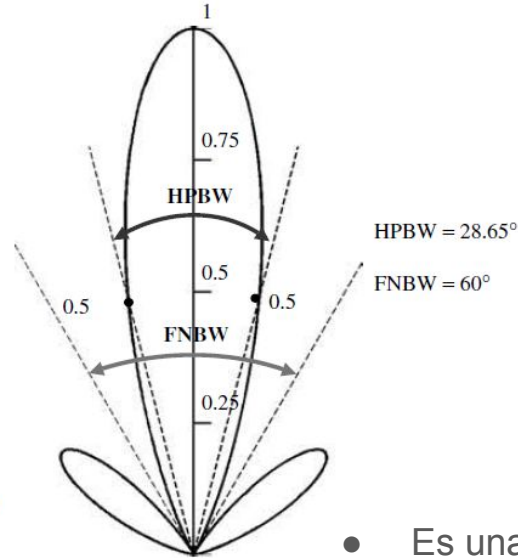
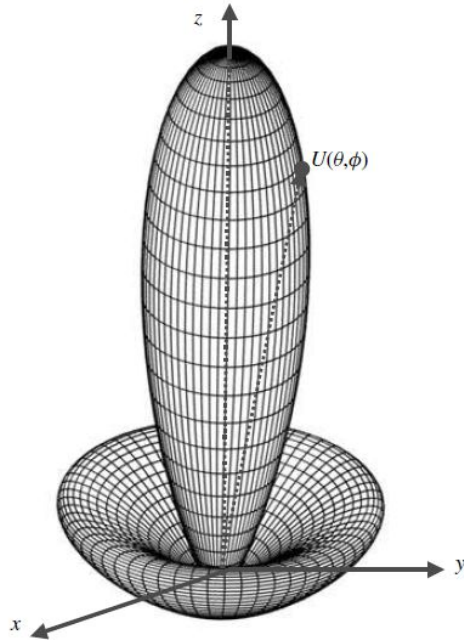
En el caso de un radiador isotrópico, U sólo depende de la componente radial:

$$P_{\text{rad}} = \oint_{\Omega} U_0 d\Omega = U_0 \oint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_0$$

De donde se deduce que la intensidad de radiación de una fuente isotrópica es:

$$U_0 = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi}$$

Ancho de lóbulo (BeamWidth)

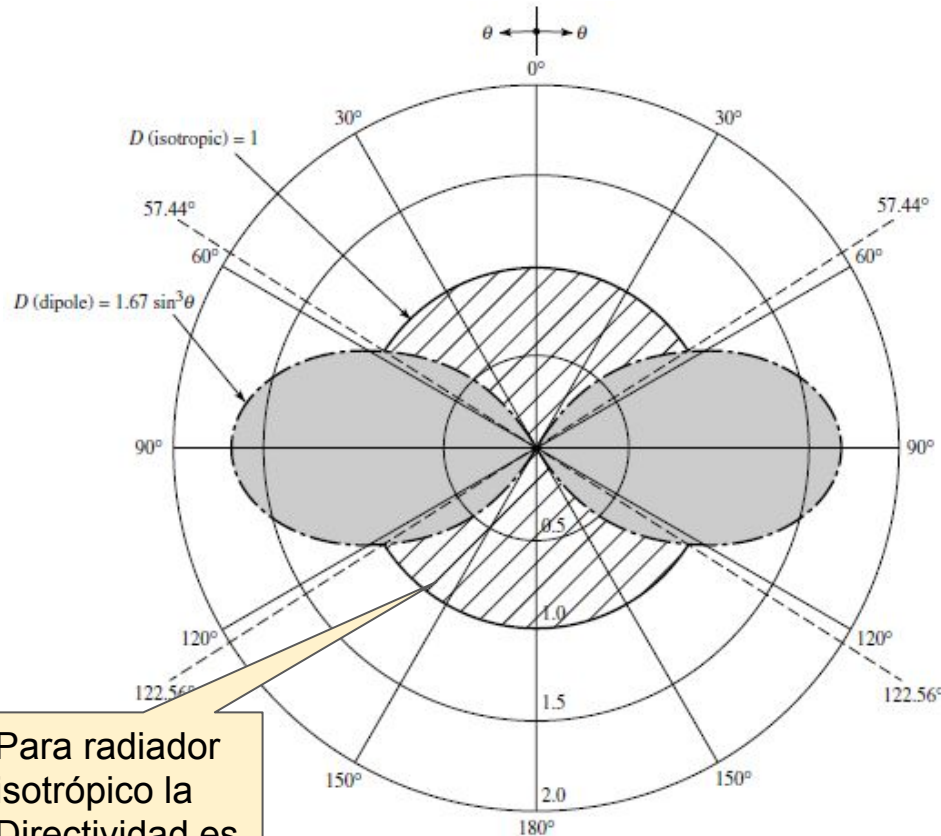


Según la IEEE:

“In a plane containing the direction of the maximum of a beam, the angle between the two directions in which the radiation intensity is one-half value of the beam.”

- Es una figura de mérito para indicar la situación relativa entre el lóbulo principal y los laterales.
- Indica la capacidad de resolución espacial de la antena. La capacidad de distinguir dos fuentes de radiación adyacentes.

Directividad



Para radiador
isotrópico la
Directividad es
unitaria

Directivity of an antenna is defined as “the ratio of the radiation intensity in a given direction from the antenna to the radiation intensity averaged over all directions.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}}$$

Directividad

- La directividad de una fuente isotrópica es unitaria dado que la potencia se irradia uniformemente en todas direcciones.
- Para otras fuentes de radiación la directividad máxima será mayor a uno y constituye una figura de mérito relativa que muestra la preferencia espacial de una antena en comparación con una fuente isotrópica.

Consideremos una intensidad de radiación de una antena de la siguiente forma:

$$U = B_0 F(\theta, \phi) \simeq \frac{1}{2\eta} [|E_\theta^0(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi^0(\theta, \phi)|^2]$$

Donde B_0 es una constante y $F(\theta, \phi)$ es una función (...de intensidad) que depende de las coordenadas angulares.

Directividad

de aquí se desprende que la Directividad máxima será:

$$U_{\max} = B_0 F(\theta, \phi)|_{\max} = B_0 F_{\max}(\theta, \phi)$$

y la potencia radiada total se encuentra como:

$$P_{\text{rad}} = \iint_{\Omega} U(\theta, \phi) d\Omega = B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi$$

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{sr})$$

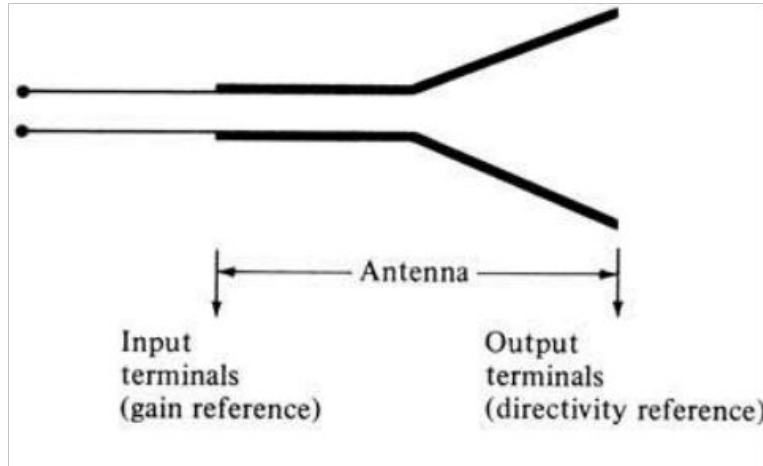
entonces la expresión general de Directividad es:

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}$$

$$D_0 = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}$$

Directividad
máxima

Eficiencia de antena



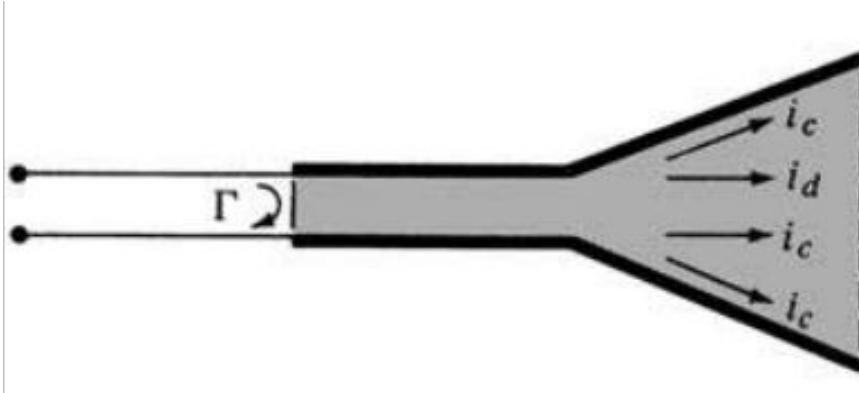
La idea es tener en cuenta las pérdidas a la entrada de la antena y dentro de la estructura de la misma.

- ROE $\frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$
- I^2R (Conductores y dieléctricos)

Γ : Coeficiente de reflexión en la terminal de entrada de la antena.

Z_0 : Impedancia característica de la línea de transmisión.

Eficiencia de antena



Pérdidas por reflexión, conducción y dielectricos.

- ROE
- I^2R

$$e_0 = e_r e_c e_d$$

$$e_o = e_r e_c e_d = e_r e_{cd}$$

$e_r =$ Reflection efficiency

$$e_o = (1 - |\Gamma_{in}|^2) e_{cd}$$

$e_{cd} =$ Radiation efficiency

$e_o =$ Total efficiency

Ganancia

$$P_{rad} = e_c e_d P_{in}$$

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in}$$

Si se tiene en cuenta las pérdidas en la preferencia espacial de radiación (Directividad), tenemos la ganancia.

La ganancia de una antena se define como la proporción entre la intensidad en una dirección dada y la que se obtendría si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de forma isotrópica.

$$\text{Gain} = 4\pi \frac{\text{radiation intensity}}{\text{total input (accepted) power}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{dimensionless})$$

Recordar que
la $U_0 = P_{rad}/4\pi$

Ganancia

$$\text{Gain} = 4\pi \frac{\text{radiation intensity}}{\text{total input (accepted) power}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{dimensionless})$$

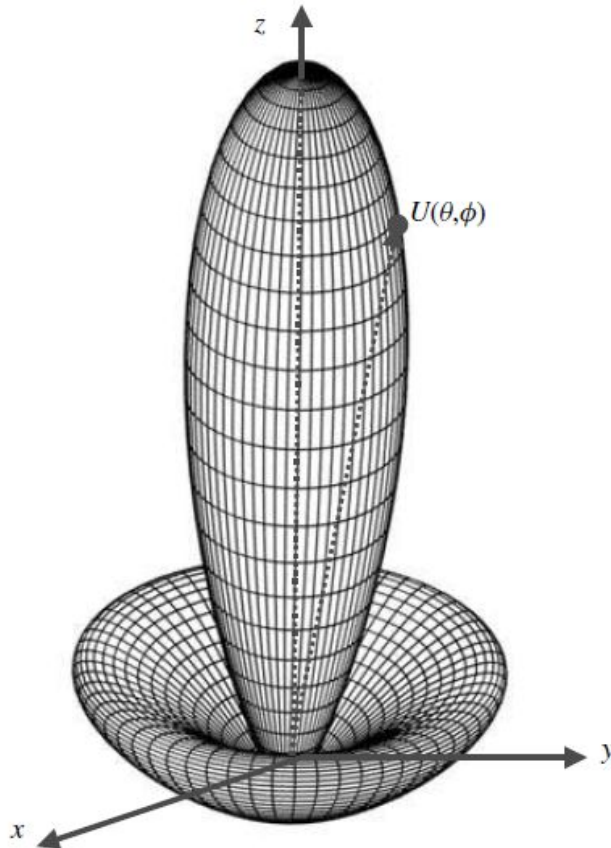
$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \Rightarrow P_{in} = \frac{P_{rad}}{e_{cd}}$$

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad} / e_{cd}} = e_{cd} \underbrace{\left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right]}_D$$

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi)$$

$$G_0 = G(\theta, \phi)|_{\max} = e_{cd} D(\theta, \phi)|_{\max} = e_{cd} D_0$$

Ganancia

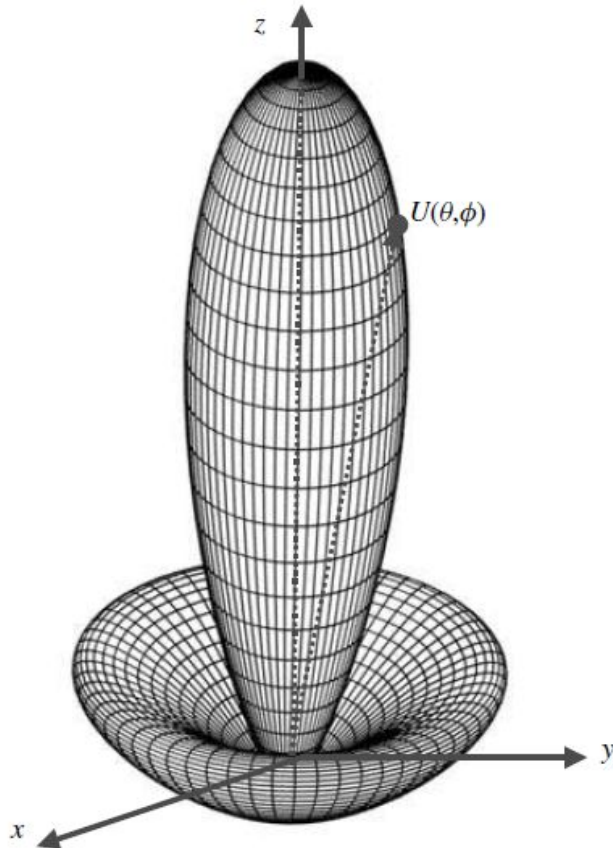


$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi)$$

Boresight

$$G_0 = G(\theta, \phi)|_{\max} = e_{cd} D(\theta, \phi)|_{\max} = e_{cd} D_0$$

Ganancia



$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi)$$

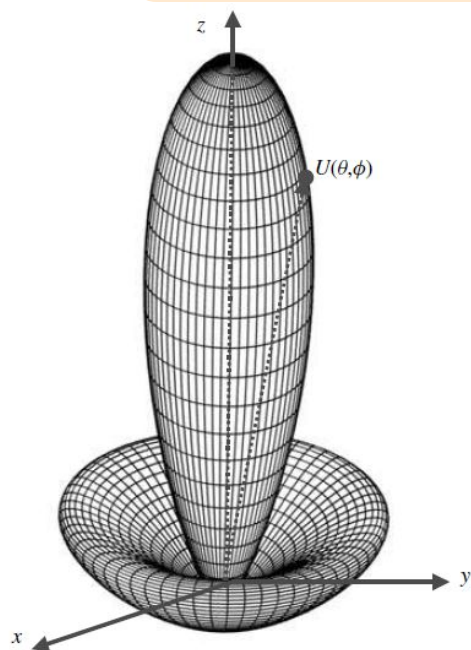
$$e_r = (1 - |\Gamma|^2)$$

$$\begin{aligned} G_{abs}(\theta, \phi) &= e_r G(\theta, \phi) = (1 - |\Gamma|^2) G(\theta, \phi) \\ &= e_r e_{cd} D(\theta, \phi) = e_o D(\theta, \phi) \end{aligned}$$

La idea es incluir las pérdidas por desadaptación.

Eficiencia de Haz

$$\text{BE} = \frac{\text{power transmitted (received) within cone angle } \theta_1}{\text{power transmitted (received) by the antenna}} \text{ (dimensionless)}$$

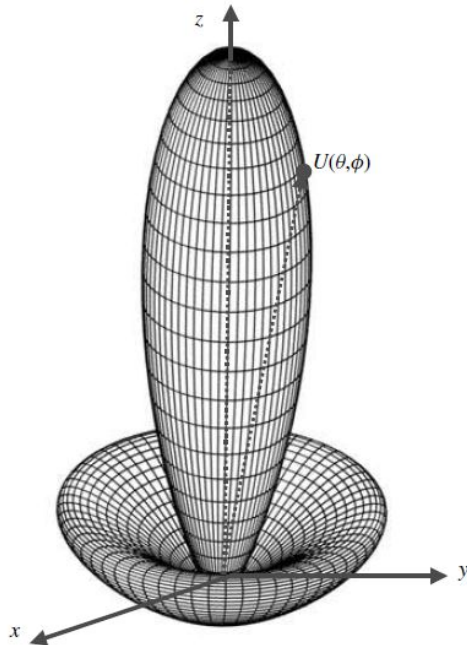


$$\text{BE} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}$$

Métrica para valorar cuánto de la energía transmitida se concentra dentro del lóbulo principal. Válido para patrones de un sólo haz.

Ancho de Banda (BW)

El rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena con respecto a sus parámetros se ajusta a un estándar determinado.



- Para antenas de banda ancha, el BW se suele expresar como la relación entre la frecuencia máxima y mínima. (Ej. 10:1)
- Para antenas de banda angosta el BW se suele expresar como porcentaje de la frecuencia central de operación (5%).

Ancho de Banda (BW)

El rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena con respecto a sus parámetros se ajusta a un estándar determinado.

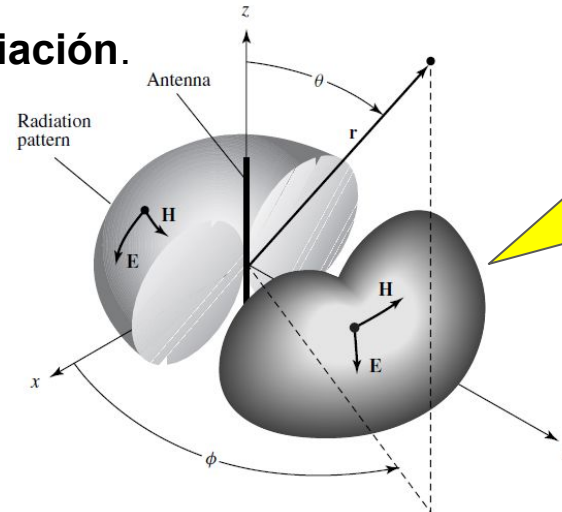
No todos los parámetros de las antenas varían de la misma manera con la frecuencia y de aquí que no suele existir una única forma de especificarlo.

- Ancho de banda del **patrón de radiación**.

- Directividad/Ganancia.
- Nivel de lóbulos laterales.
- Ancho de haz principal.
- Polarización.
- Dirección de haz principal.

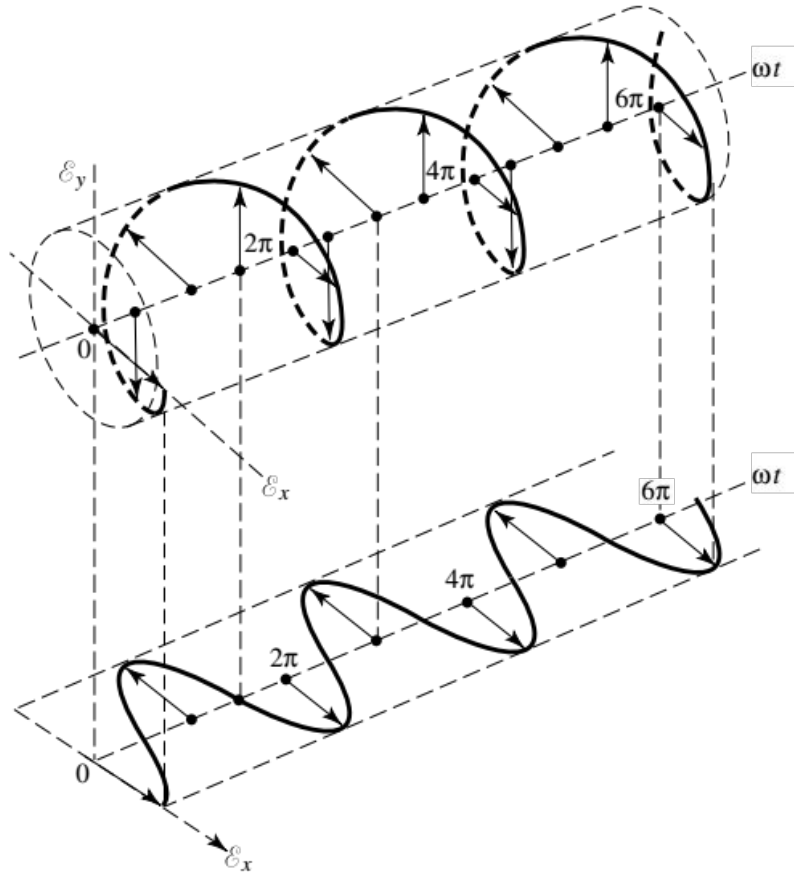
- Ancho de banda de **Impedancia**

- Impedancia de entrada
- Eficiencia de radiación



Dipolo de $l < \lambda/2$, su patrón de radiación no depende de la frecuencia, si lo hace su impedancia.

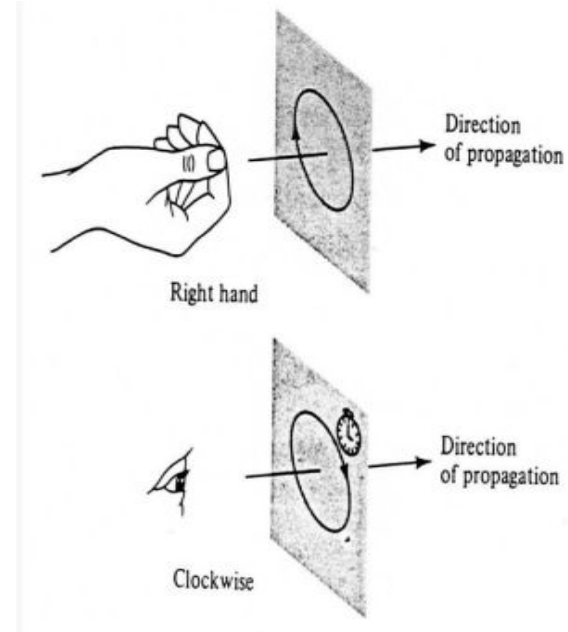
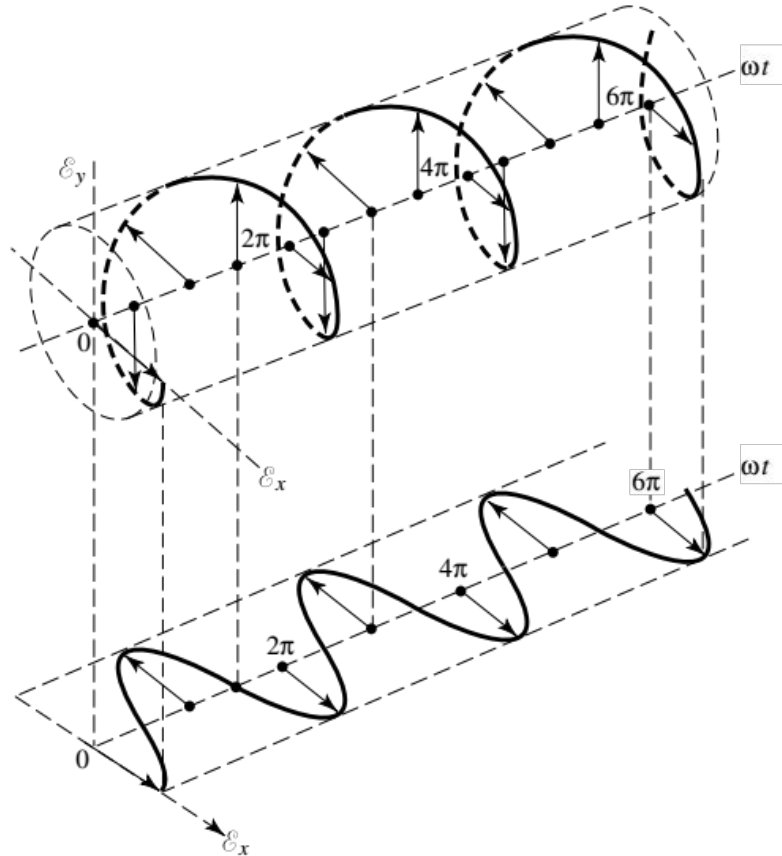
Polarización



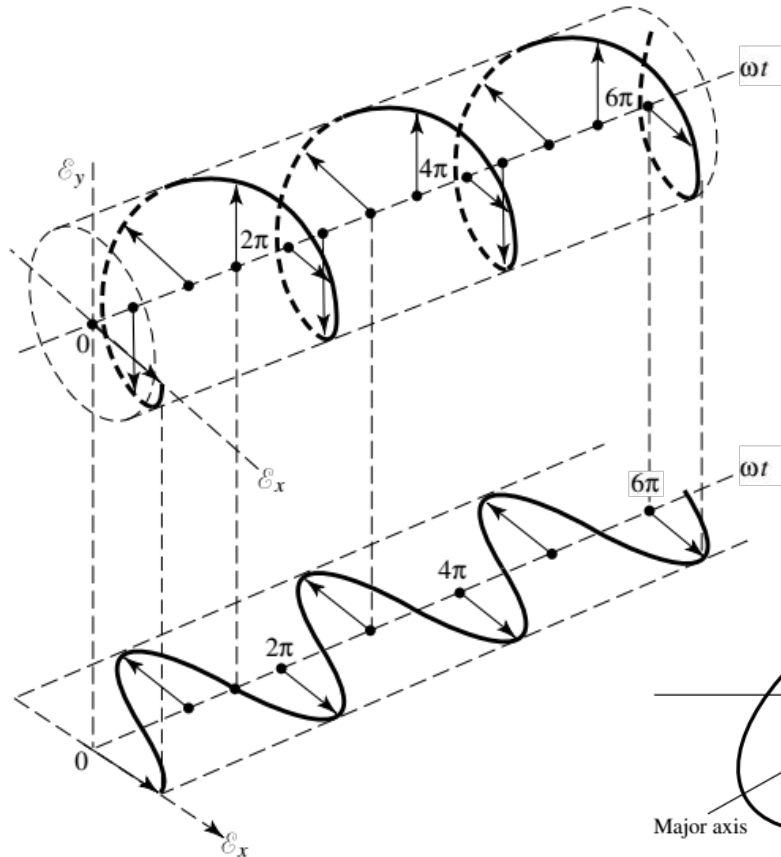
La polarización de un frente de onda se define como la trayectoria espacial y variante en el tiempo de la magnitud del vector de campo eléctrico.

- Debe observarse en la dirección de propagación del frente de onda.
- Se puede especificar en términos del Tx o del Rx.

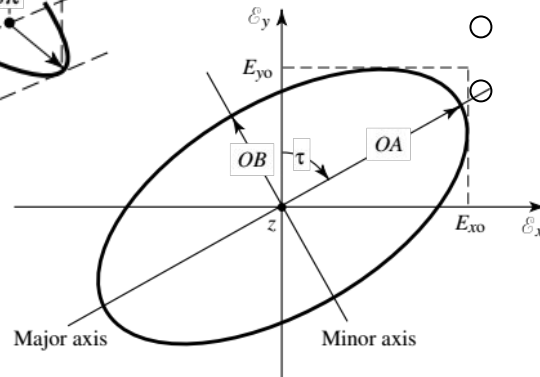
Polarización



Polarización



- Lineal (El vector describe una recta en su propagación)
- Circular
 - CW (RH)
 - CCW (LH)
- Elíptica (Relación Axial)
 - CW (RH)
 - CCW (LH)



Polarización

Las características de polarizaciones de una antena pueden ser representadas por un patrón de de polarizaciones;

“La distribución espacial de polarizaciones de campos de un vector de campo tomado sobre su esfera de radiación”

Se deben especificar líneas de referencia sobre la esfera para indicar inclinaciones y direcciones. (Opción: familia de líneas tangentes a cada punto de la esfera θ y ϕ de las coordenadas esféricas, esto da lugar a direcciones ortogonales llamadas: co-polarizaciones y polarizaciones cruzadas)

Polarización (Modelado)

A partir del campo instantáneo de un frente de onda que se desplaza en la dirección del eje z negativo puede expresarse como:

$$\mathcal{E}(z; t) = \hat{\mathbf{a}}_x \mathcal{E}_x(z; t) + \hat{\mathbf{a}}_y \mathcal{E}_y(z; t)$$

y se relaciona con su parte compleja como:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_x(z; t) &= \text{Re}[E_x^- e^{j(\omega t + kz)}] = \text{Re}[E_{xo} e^{j(\omega t + kz + \phi_x)}] \\ &= E_{xo} \cos(\omega t + kz + \phi_x)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_y(z; t) &= \text{Re}[E_y^- e^{j(\omega t + kz)}] = \text{Re}[E_{yo} e^{j(\omega t + kz + \phi_y)}] \\ &= E_{yo} \cos(\omega t + kz + \phi_y)\end{aligned}$$

Polarización (Lineal)

Para el caso de un frente polarizado de forma lineal, la diferencia de fase temporal entre las dos componentes se puede pensar como.

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Es decir que el campo eléctrico tenga una sola componente o dos componentes ortogonales que se encuentren en fase o con 180° de desfase. Es decir colineales.

Polarización (Circular)

Para el caso de un frente polarizado de forma circular, se logra cuando las magnitudes de las componentes son iguales y la diferencia de fase temporal entre las dos componentes sea múltiplo impar de 90° :

$$|\mathcal{E}_x| = |\mathcal{E}_y| \Rightarrow E_{xo} = E_{yo}$$
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +(\frac{1}{2} + 2n)\pi, n = 0, 1, 2, \dots & \text{for CW} \\ -(\frac{1}{2} + 2n)\pi, n = 0, 1, 2, \dots & \text{for CCW} \end{cases}$$

Polarización (Elíptica) - 1

Para el caso de un frente polarizado de forma elíptica, se logra en un caso:

cuando las magnitudes de las componentes **no** son iguales y la diferencia de fase temporal entre las dos componentes sea múltiplo impar de 90° :

$$|\mathcal{E}_x| \neq |\mathcal{E}_y| \Rightarrow E_{xo} \neq E_{yo}$$

$$\text{when } \Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +(\frac{1}{2} + 2n)\pi & \text{for CW} \\ -(\frac{1}{2} + 2n)\pi & \text{for CCW} \end{cases}$$

$n = 0, 1, 2, \dots$

Polarización (Elíptica) - 2

Para el caso de un frente polarizado de forma elíptica, se logra en otro caso:

Cuando sin importar las magnitudes de las componentes, la diferencia de fase temporal entre las dos componentes no sea múltiplo de 90° :

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi = \begin{cases} > 0 & \text{for CW} \\ < 0 & \text{for CCW} \end{cases}$$
$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Polarización

Factor de pérdida

En general la polarización de una antena receptora no coincidirá con la del frente de onda.

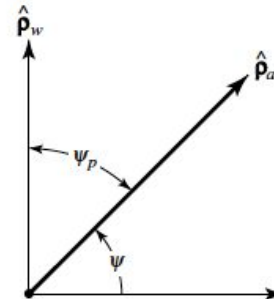
La cantidad de potencia extraíble del frente de onda no será máxima debido a la falta de alineación de polarizaciones. Esta pérdida de potencia se conoce como Factor de Pérdida de Polarización (Polarization Loss Factor- PLF).

Si conocemos las orientaciones relativas de los campos eléctricos:

$$\mathbf{E}_i = \hat{\rho}_w E_i$$

$$\mathbf{E}_a = \hat{\rho}_a E_a$$

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \text{ (dimensionless)}$$



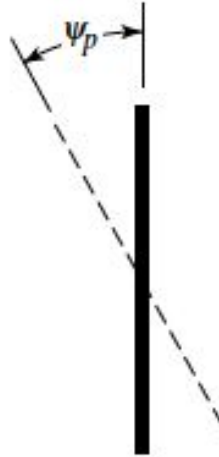
Polarización

Factor de pérdida



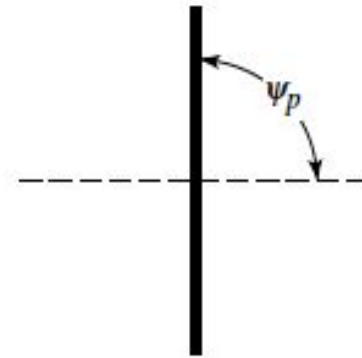
$$\text{PLF} = |\hat{\mathbf{p}}_w \cdot \hat{\mathbf{p}}_a|^2 = 1$$

(aligned)



$$\text{PLF} = |\hat{\mathbf{p}}_w \cdot \hat{\mathbf{p}}_a|^2 = \cos^2 \psi_p$$

(rotated)

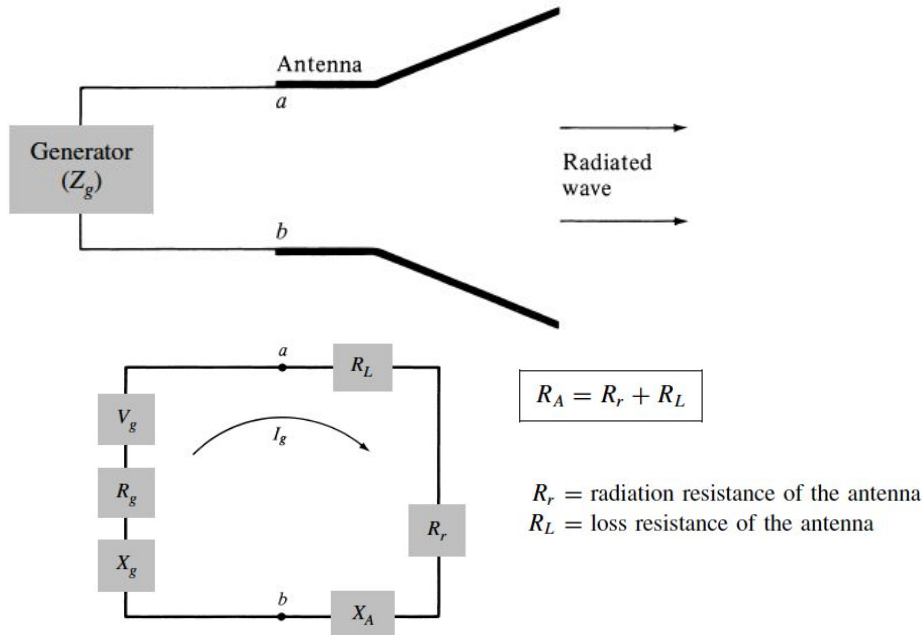


$$\text{PLF} = |\hat{\mathbf{p}}_w \cdot \hat{\mathbf{p}}_a|^2 = 0$$

(orthogonal)

Impedancia de entrada

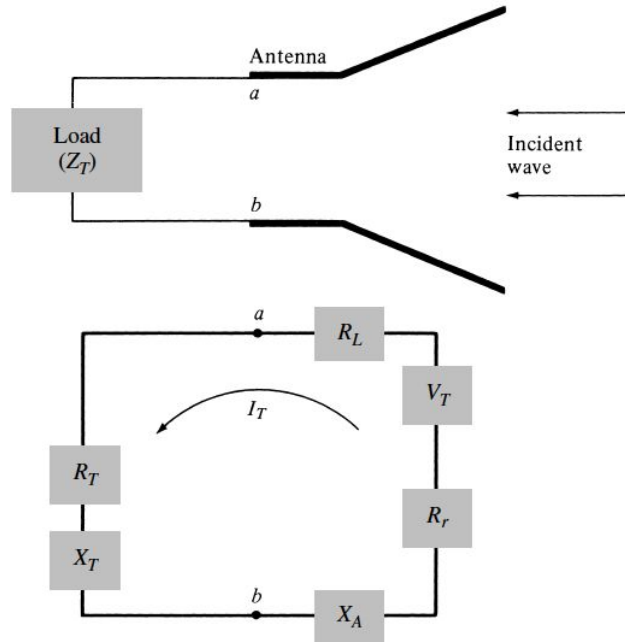
Es la impedancia presente en los terminales de entrada de la antena.



- La parte resistiva es conocida como resistencia de radiación.
- En el caso de máxima transferencia de potencia, la mitad de la potencia se disipa en la resistencia interna del generador y la otra mitad es entregada a la antena.
- De la potencia que llega a la antena, una parte se irradia por la resistencia de radiación y una parte se pierde por calor.

Impedancia de entrada

Es la impedancia presente en los terminales de entrada de la antena.



- El proceso es similar.
- La potencia disipada en R_r , se conoce como potencia dispersada (*scattered*)
- Para que llegue la mitad de la potencia capturada a R_T , la mitad debe ser dispersada. Todo esto bajo condiciones de máxima transferencia de potencia (Mejor caso).

Área efectiva de antena

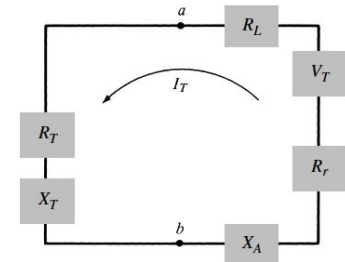
- En el caso de recepción, hay cierta cantidad de energía electromagnética recolectada.
- Es posible pensar que existe una superficie que permite recolectar cierta cantidad de potencia. Independientemente de la forma geométrica de la antena.
- El tamaño de esta superficie, se conoce como área efectiva de antena.

$$A_e = \frac{P_T}{W_i} = \frac{|I_T|^2 R_T / 2}{W_i}$$

A_e = effective area (effective aperture) (m²)

P_T = power delivered to the load (W)

W_i = power density of incident wave (W/m²)



Standard de Patrones de radiación

TIA/EIA-804-B es un estándar para el formato digital de patrones de antena. Fue desarrollado por la Asociación de la Industria de Telecomunicaciones (TIA, por sus siglas en inglés) y la Alianza de Industrias Electrónicas (EIA, por sus siglas en inglés). El estándar especifica el formato para almacenar e intercambiar patrones de antena, incluyendo lo siguiente:

- El número de puntos en el patrón
- El rango angular del patrón
- La ganancia de la antena en cada punto
- La polarización de la antena
- El tipo de antena

Sumario

- Patrón de radiación
- Regiones alrededor de la antena
- Vector de Poynting
- Intensidad de radiación
- Beamwidth
- Directividad
- Eficiencia de antena
- Ganancia
- Ancho de banda
- Polarización
- Impedancia de entrada
- Área efectiva de antena

Referencias:

- Balanis, C. A. (2015). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
- Zahn, M. (1988). *Teoría electromagnética* (No. 543.087 Z19t). Edit. Iberoamericana.
- "IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas," in *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)*, vol., no., pp.1-50, 6 March 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6758443.