

Radiación e introducción a las antenas

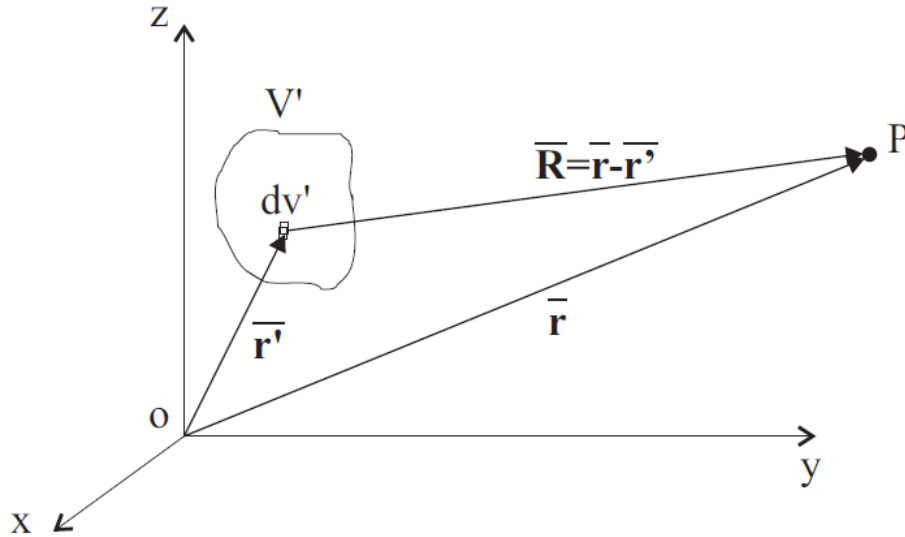
Grupo de Electromagnetismo Aplicado
Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Carlos III de Madrid

Luis Inclán Sánchez

- Introducción a la radiación.
- Parámetros fundamentales de las antenas.
- Fórmula de Friis.

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Potenciales electrodinámicos



$$\vec{E} = -\nabla\Phi - j\omega\vec{A}$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

Dato

$$\Delta\vec{A} + \omega^2\mu\epsilon\vec{A} = -\mu\vec{J}$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dv'$$

$$\Delta\Phi + \omega^2\mu\epsilon\Phi = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

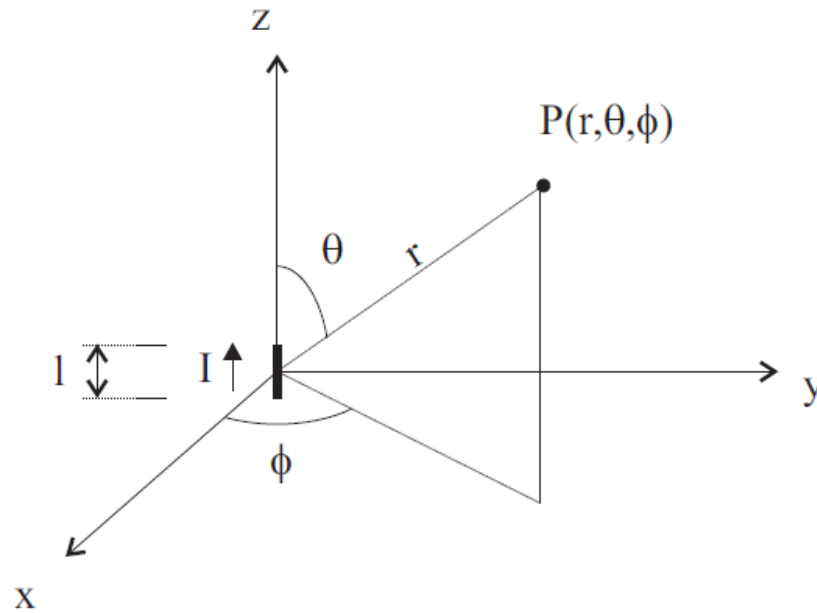
$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H}$$

Procedimiento para obtener el CEM radiado lejano

Integración de una corriente J > Potencial Vector A > Obt. Campo H > Obt. Campo E

CAMPO RADIADO POR UN DIPOLO INFINITESIMAL (I)



Dipolo ideal de radio infinitesimal y longitud “l”
Que excita una corriente variable en el tiempo y uniforme a lo largo del dipolo

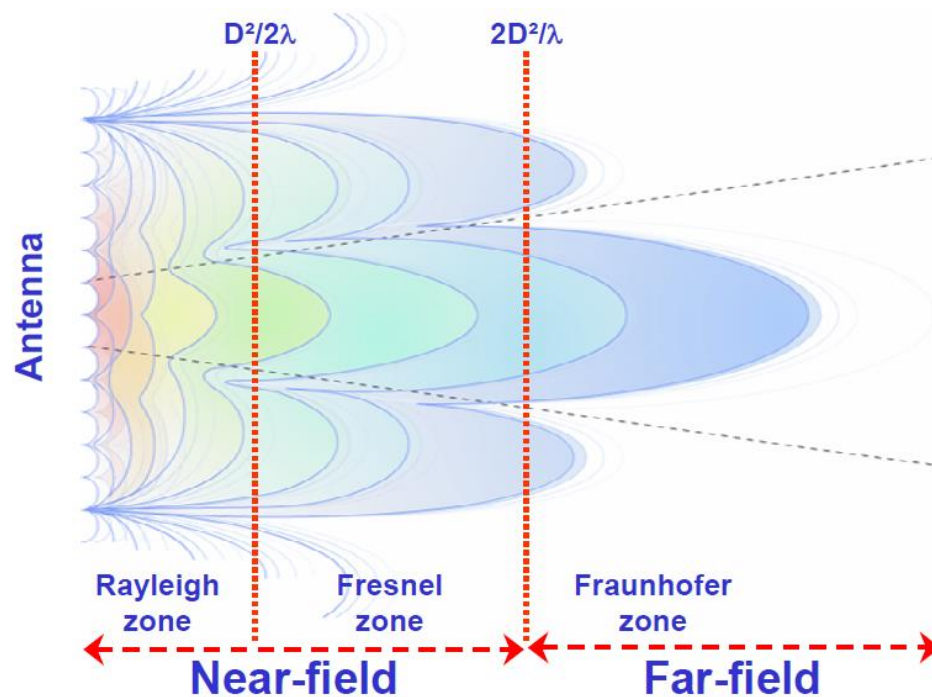
$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \vec{J} \frac{e^{-jkR}}{R} dv' = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \vec{I} \frac{e^{-jkR}}{R} dl' = \hat{z} \frac{\mu I_0}{4\pi r} \int_{-l/2}^{l/2} dz' = \hat{z} \frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr}$$

Pasando a esféricas:

CAMPO RADIADO POR UN DIPOLO INFINITESIMAL (II)

Fasor del campo radiado:

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos \theta}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr}$$
$$E_\theta = j\eta \frac{k I_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr}$$
$$E_\phi = 0$$
$$H_r = H_\theta = 0$$
$$H_\phi = j \frac{k I_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr}$$



CAMPO RADIADO POR UN DIPOLO INFINITESIMAL (III)

- Si $r \ll \lambda$ (campo cercano) despreciamos los términos en r/λ :

$$E_r = -j\eta \frac{I_o l \cos \theta e^{-jkr}}{2\pi k r^3}$$

$$E_\theta = -j\eta \frac{I_o l e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi k r^3}$$

$$E_\phi = 0$$

$$H_r = H_\theta = 0$$

$$H_\phi = \frac{I_o l e^{-jkr} \sin \theta}{4\pi r^2}$$

- Si $r \gg \lambda$ (campo lejano) predomina $1/r$ frente al resto:

$$E_r = 0$$

$$E_\theta = j\eta \frac{k I_o l \sin \theta e^{-jkr}}{4\pi r}$$

$$E_\phi = 0$$

$$H_r = 0$$

$$H_\theta = 0$$

$$H_\phi = j \frac{k I_o l \sin \theta e^{-jkr}}{4\pi r}$$

En general, para cualquier antena en campo lejano:

- A. El campo es transversal a la dirección de propagación
- B. \vec{E} está en fase con \vec{H}
- C. \vec{E} es perpendicular a \vec{H}
- D. Localmente la onda esférica es asimilable a una onda plana. Además se verifica que:

$$\vec{H} = \frac{\hat{r} \times \vec{E}}{\eta}$$

donde η es la impedancia intrínseca del medio.

Por último, la densidad de potencia radiada se calculará a partir del vector de Poynting:

$$\vec{W} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) = \hat{r} \frac{1}{2\eta} |E|^2 = \hat{r} \frac{\eta}{2} \left| \frac{k I_0 l}{4\pi} \right|^2 \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$$

(para el dipolo infinitesimal)

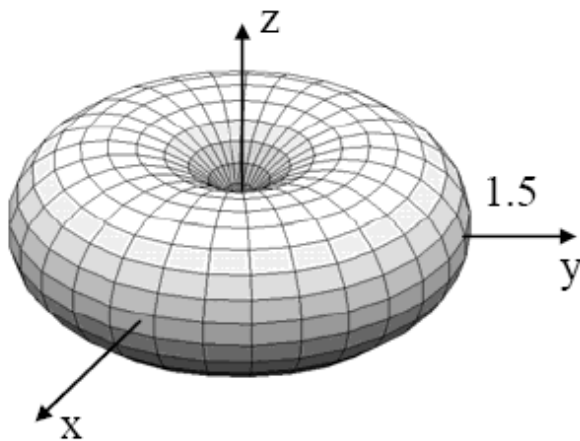
□ Dipolo infinitesimal

□ Representación de la energía radiada

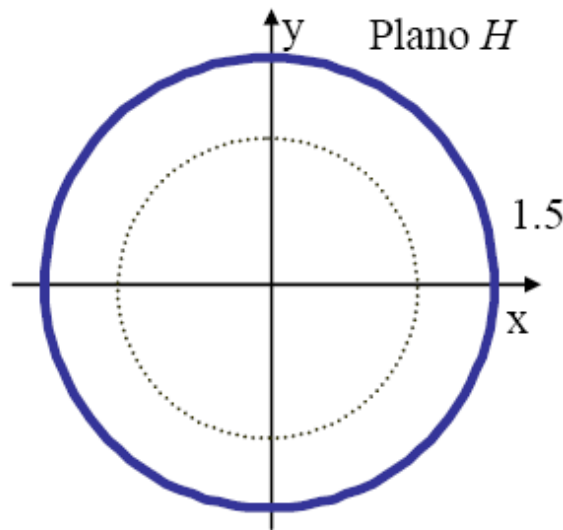
- En una función de variables espaciales
- 3D o por planos
- No radia en el eje
- El máximo es a 90°

$$\begin{aligned}H_r &= 0 \\H_\theta &= 0 \\H_\phi &= j \frac{k I_0 l \sin \theta e^{-jkr}}{4\pi r}\end{aligned}$$

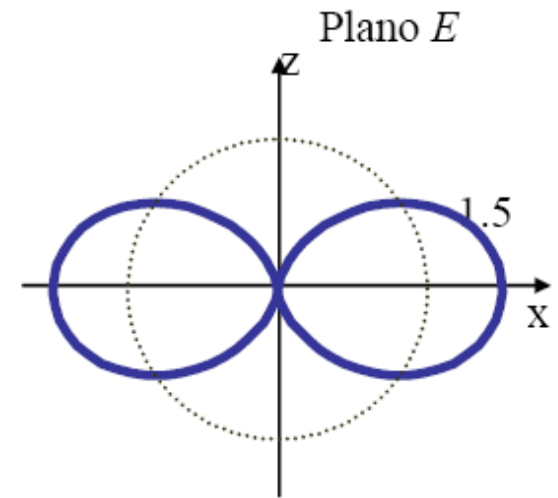
$$\begin{aligned}E_r &= 0 \\E_\theta &= j\eta \frac{k I_0 l \sin \theta e^{-jkr}}{4\pi r} \\E_\phi &= 0\end{aligned}$$



(a)



(b)



(c)

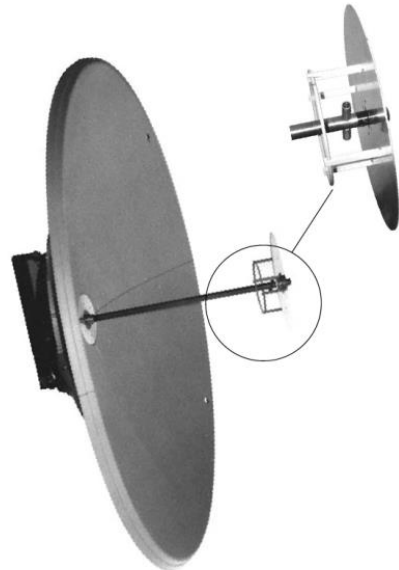
□ ¿Por qué son necesarias las antenas?

- Transición suave propagación guiada/radiación
- Transductor
- Utilizar el espacio libre como canal de telecomunicaciones

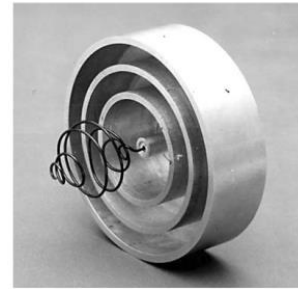


Antenas acústicas?

- ¿Por qué son necesarias las antenas?
 - Transición suave propagación guiada/radiación
 - Transductor
 - Utilizar el espacio libre como canal de telecomunicaciones
- ¿Qué parámetros definen su comportamiento?
 - Directividad/diagrama de radiación
 - Eficiencia/ganancia
 - Anchura de banda/frecuencia
 - Polarización



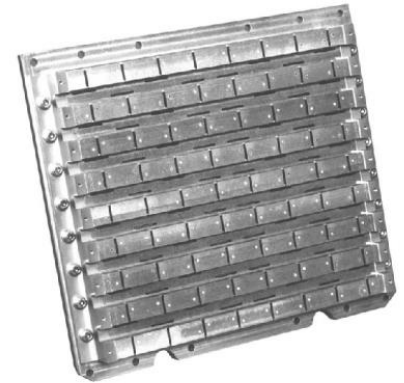
Reflector antenna with dipole-disk feed



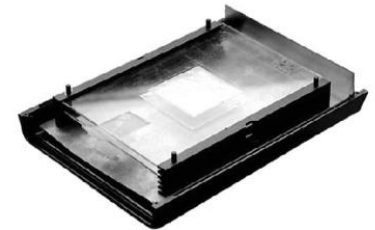
Spiral wire antenna on corrugated disk



Corrugated horn antenna



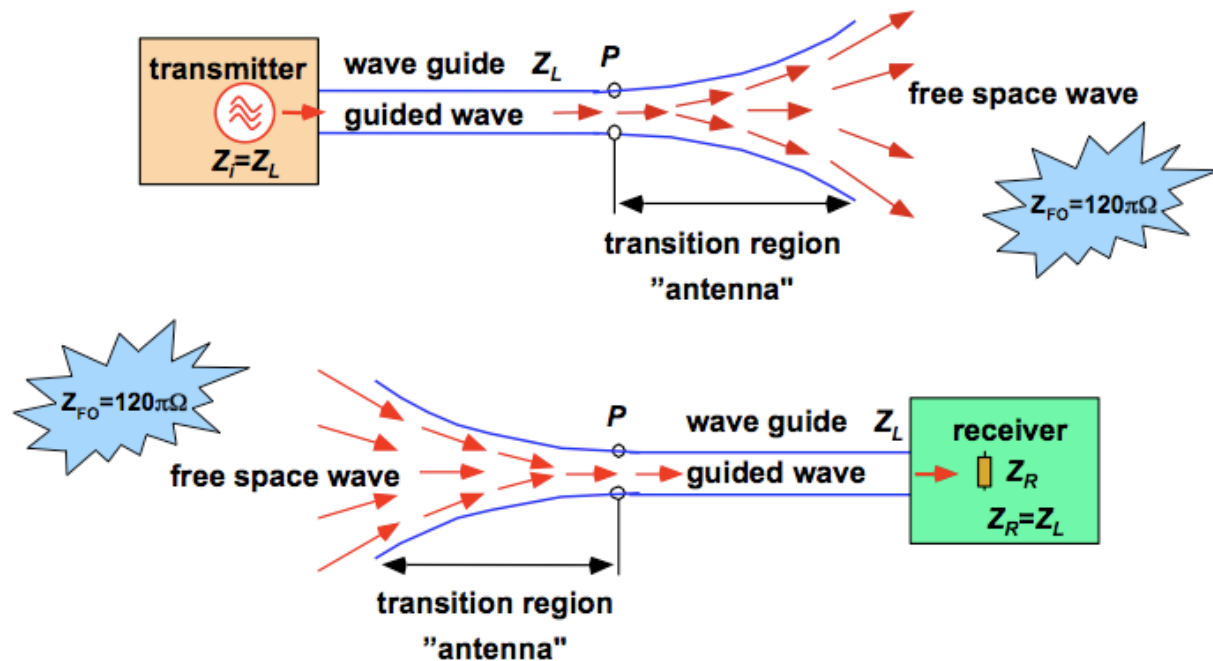
Waveguide slot antenna array



Aperture-coupled stacked microstrip antenna (model for tuning)

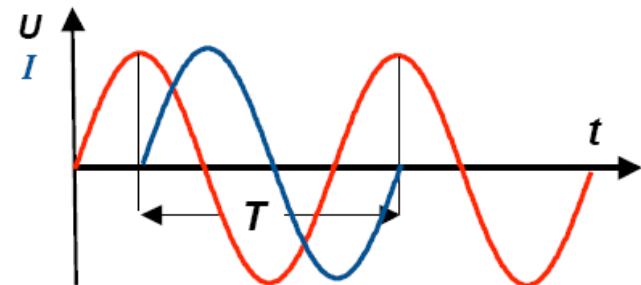
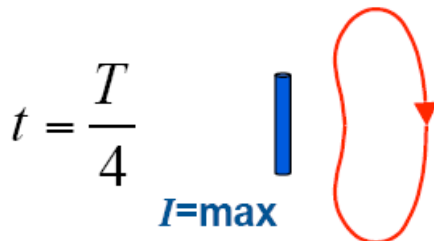
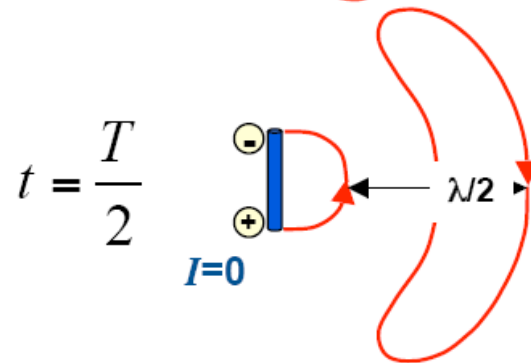
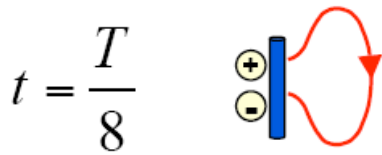
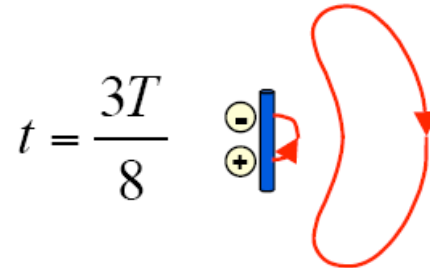
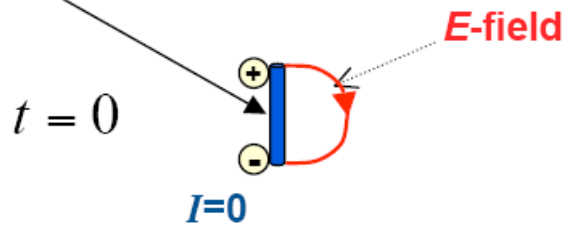
□ La antena realiza dos tareas fundamentales en todo sistema de comunicaciones radio:

- Transformación eficiente de energía EM (ondas) guiada en energía EM (ondas) radiada
- Reparto de la energía en direcciones / Filtrado espacial



Fundamentos de radiación: ondas EM

Hertzian Dipol



Fundamentos de radiación

- La antena radia un campo electromagnético: una onda esférica

$$\vec{E}_{rad} \quad \vec{H}_{rad}$$

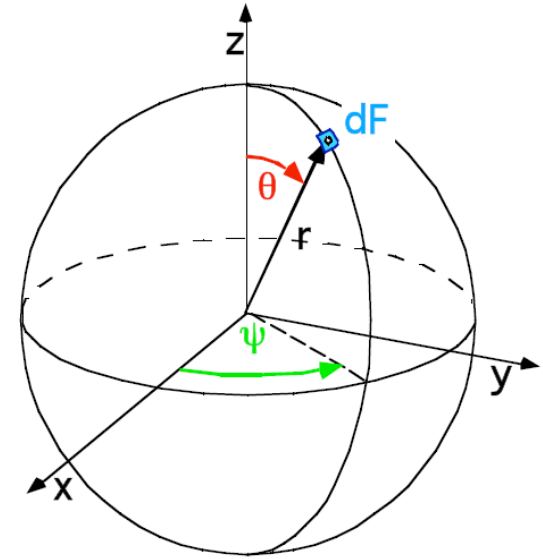
Es decir, radia una densidad de potencia

$$W_{rad} = \frac{1}{2} \left[\vec{E}_{rad} \times \vec{H}_{rad}^* \right]$$

Lejos de la antena...

$$W_{rad} = \frac{1}{2\eta} \left| \vec{E}_{rad}(r, \theta, \phi) \right|^2$$

Coordenadas esféricas!



donde $\vec{E}_{rad}(r, \theta, \phi) = E_{\theta}(r, \theta, \phi)\hat{\theta} + E_{\phi}(r, \theta, \phi)\hat{\phi}$

Parámetros básicos: Directividad/diagrama de radiación

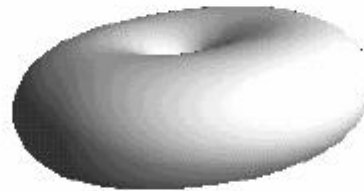
- ❑ Las antenas radian ondas esféricas (campos) creando una densidad de potencia (W/m^2)
- ❑ Envían esa densidad de potencia junto con la información contenida en ella en direcciones específicas
- ❑ La descripción detallada en 3D de esta distribución de potencia se llama *diagrama de radiación*
- ❑ Dependiendo de la aplicación se necesitará un tipo de diagrama

Diagrama de radiación

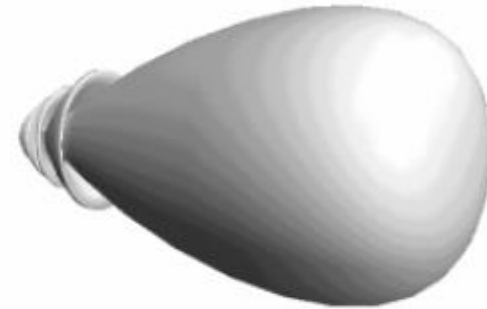
□ Ejemplos de diagramas de radiación



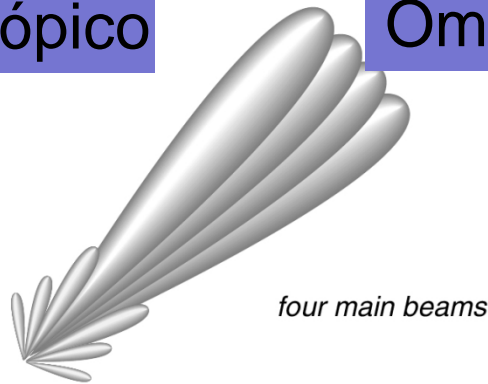
Isotrópico



Omniazimutal



Pincel/directivo

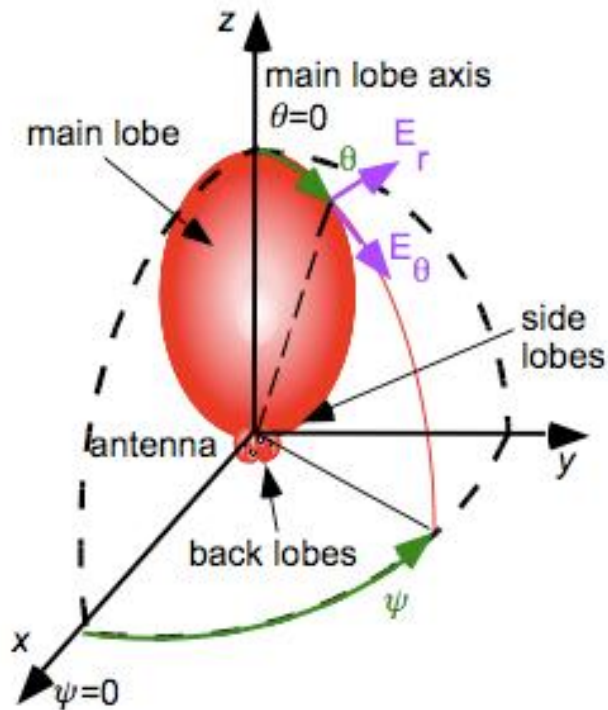


Multihaz

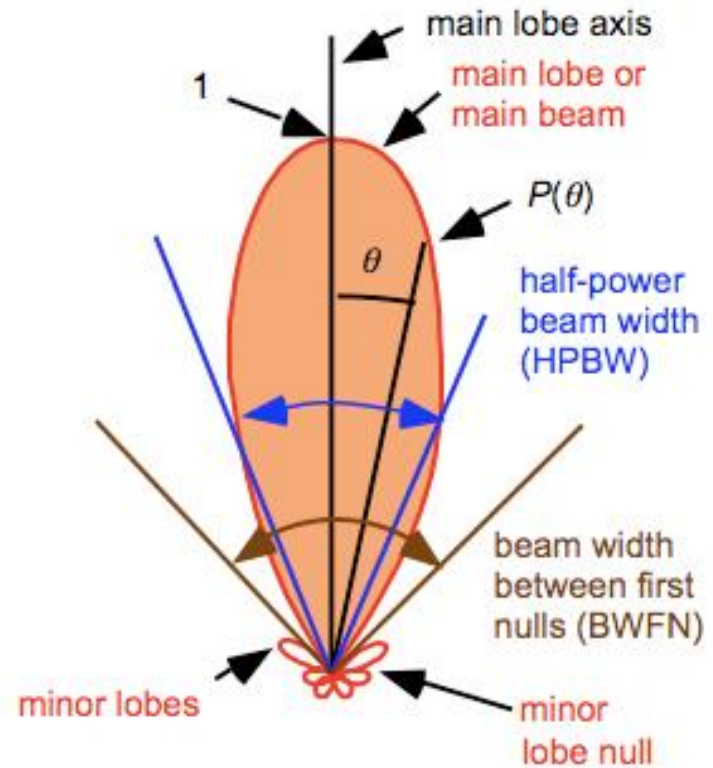
multibeam antenna

Representación del diagrama de radiación

Field pattern



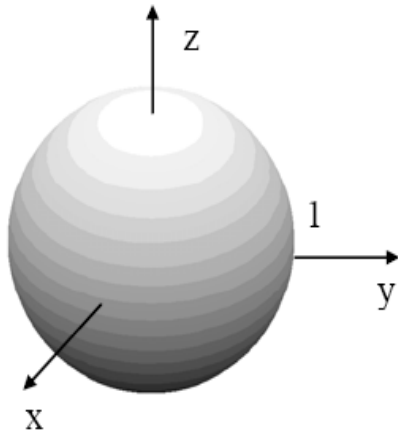
Power pattern



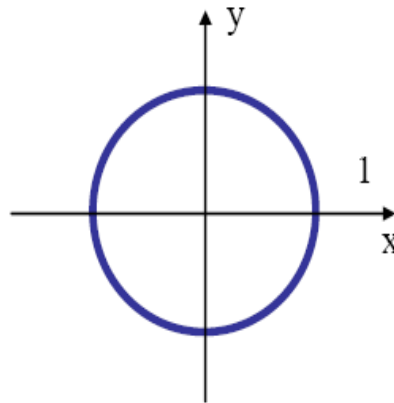
Antena isotrópica

- Antena **IDEAL** que radia la misma densidad de potencia en todas las direcciones
 - Se usa como referencia para definir algunos parámetros de la antena
 - Se necesitaría una fuente puntual para tener una antena así.

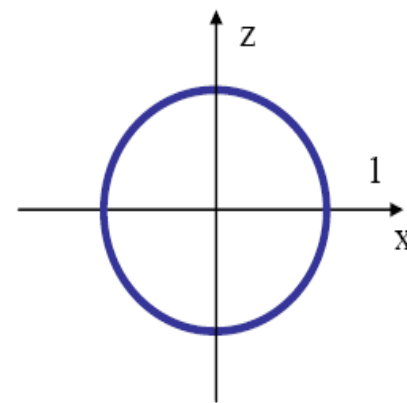
$$W_{iso} = \frac{P_{rad}}{4\pi r^2}$$



(a)



(b)



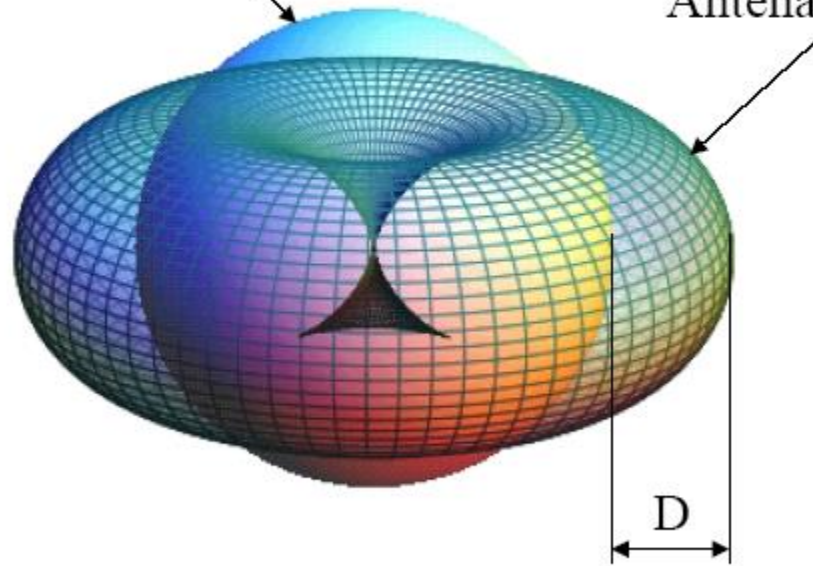
(c)

Directividad

- **Directividad:** *habilidad* de la antena para radiar en muchas o pocas direcciones (directamente relacionada con el diagrama de radiación)

Antena isotrópica

Antena Directiva



$D > 1$ (0 dB)

Ganancia y eficiencia

- Ganancia es similar a directividad pero considerando la potencia que llega a la antena, no la que se radia.

$$G_{\max} = e \cdot D_{\max}$$

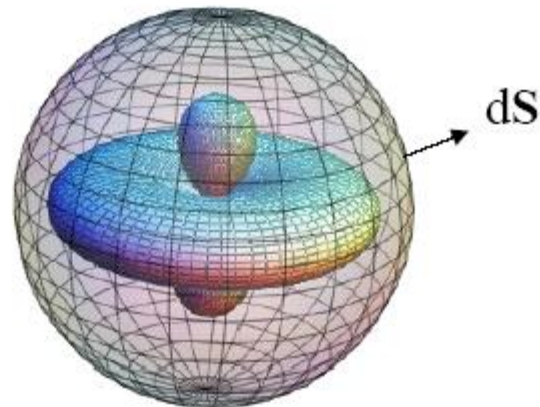
$$e \leq 1$$

$$G_{\max} \leq D_{\max}$$

$$e = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{ent}}}$$

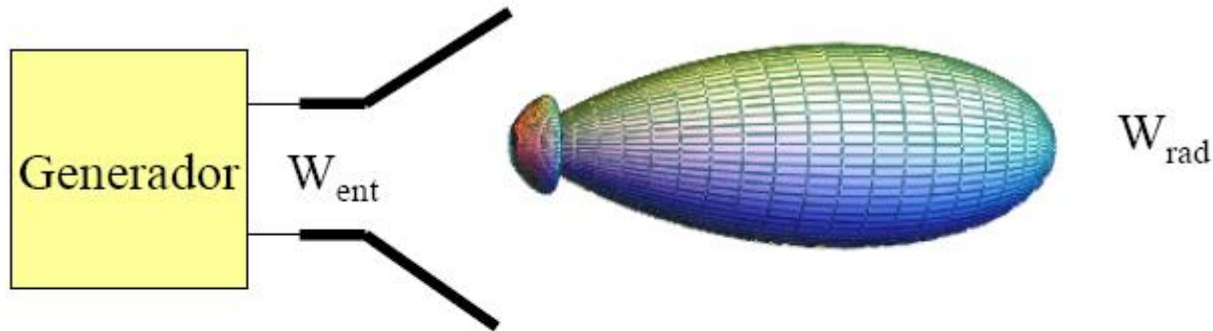
$$e = e_r \cdot e_c \cdot e_d$$

$$W_r = \iint \vec{P}(\theta, \phi) \cdot \vec{dS}$$



Ganancia

- Ganancia máxima ⇒ ¡Hay que medirla!



$$G(\theta, \phi) = \frac{P_{rad}(\theta, \phi)}{\frac{W_{ent}}{4\pi r^2}}$$

$$D(\theta, \phi) = \frac{P_{rad}(\theta, \phi)}{\frac{W_{rad}}{4\pi r^2}}$$

La antena es un dispositivo PASIVO

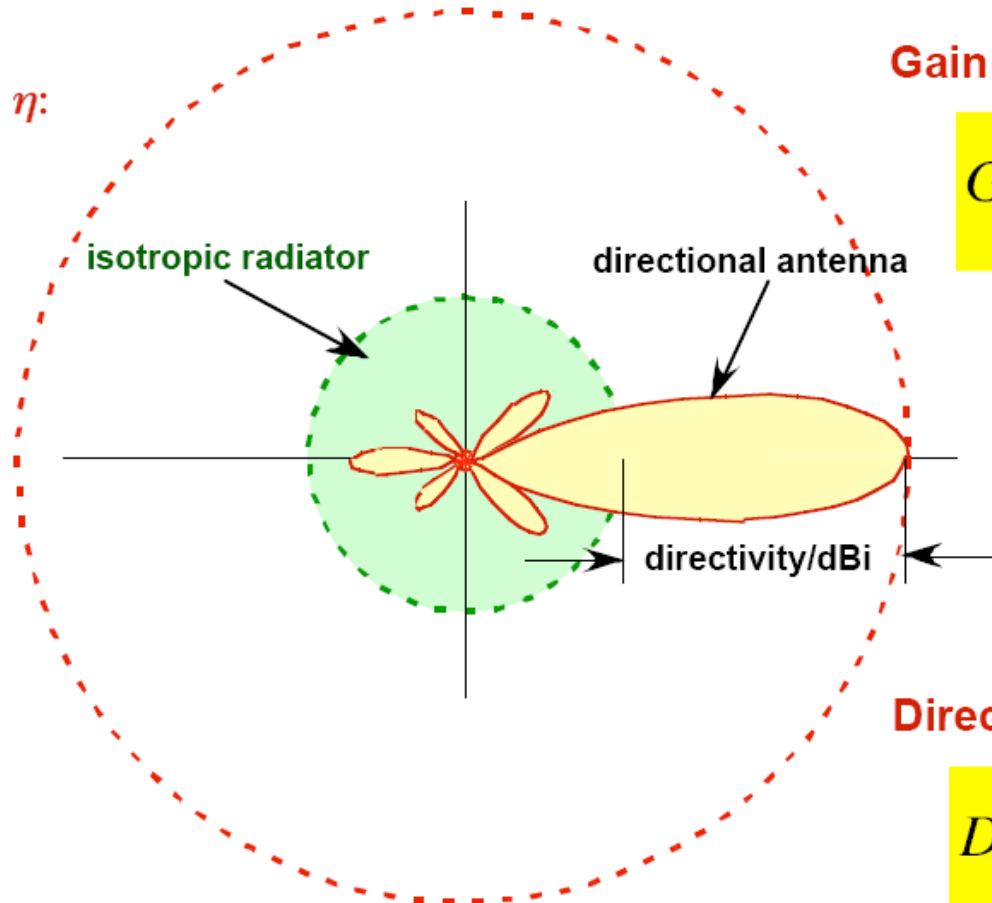
Ganancia y eficiencia

Ant. Efficiency η :

$$\eta = \frac{G}{D}$$

Gain G :

$$G_i = \frac{dP_T / d\Omega}{P_{in} / 4\pi}$$

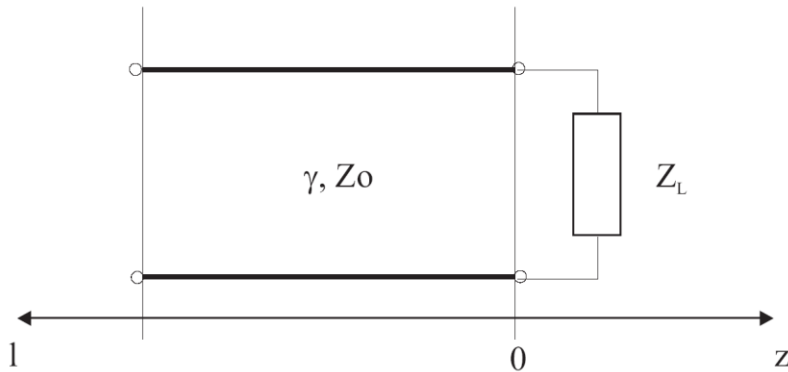
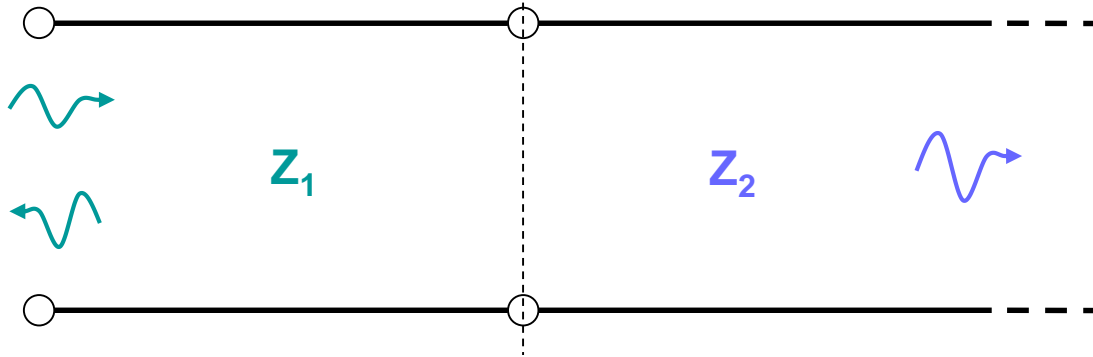


Directivity D :

$$D_i = \frac{dP_T / d\Omega}{P_T / 4\pi}$$

P_T = transmitted power; P_{in} = antenna input power

Líneas de transmisión



$$V(z) = V_o^+ [e^{j\beta l} + \Gamma \cdot e^{-j\beta l}]$$

$$I(z) = \frac{V_o^+}{Z_o} [e^{j\beta l} - \Gamma \cdot e^{-j\beta l}]$$

Pérdidas de retorno:

$$RL = -20 \cdot \log(|\Gamma|) \quad \text{dB}$$

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o^+} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o}$$

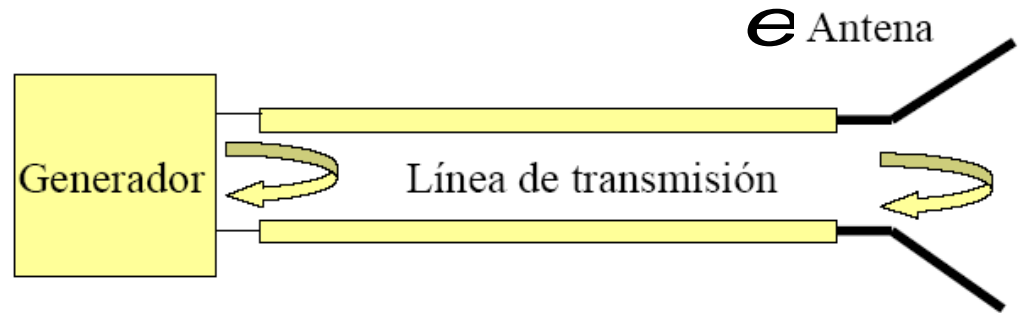
$$P_{av} = \frac{1}{2} \frac{|V_o^+|^2}{Z_o} (1 - |\Gamma|^2)$$

$$ROE = SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Adaptación y anchura de banda

- La antena tiene una impedancia de entrada que varía con la frecuencia. Esto produce reflexiones (desadaptaciones)

$$\Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_{ltx}}{Z_{ant} + Z_{ltx}}$$



- Γ es el coeficiente de reflexión de la antena (determina la anchura de banda)

Habitualmente la línea de transmisión se asume con $Z_{ltx}=50\Omega$

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

ROE (SWR)

- ❑ Los fabricantes muchas veces nos dan la Relación de Onda Estacionaria (ROE-SWR)

$$0 \leq \Gamma \leq 1$$

$$SWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

$$1 \leq SWR \leq \infty$$

- ❑ Cuanto más baja sea la ROE, más eficiente es la antena.

Clasificación de las antenas

- ❑ Diferentes clasificaciones:
 - ❑ Según sus características de radiación a una frecuencia dada:
 - ❑ Directivas
 - ❑ No directivas
 - ❑ Según su comportamiento en frecuencia:
 - ❑ Resonantes (banda estrecha)
 - ❑ Multibanda
 - ❑ Banda ancha (incluso UltraWideBand...)
 - ❑ La más común (académica):
 - ❑ Antenas de hilo
 - ❑ Antenas de apertura
 - ❑ Arrays
 - ❑ Reflectores and lentes

Sobre medida de antenas

❑ Necesidades generales:

- ❑ Evaluar las prestaciones de dispositivos radiantes
 - ❑ Antenas, teléfonos móviles, wireless LAN, GPS, estaciones base,
 - ❑ objetos complejos con antenas integradas

❑ Medir y evaluar

- Cantidad de energía radiada de microondas
- Dirección en la que se produce la radiación

❑ Antena/dispositivo criterios de funcionamiento

- ❑ **Pérdidas de retorno** (cantidad de energía entregada por el generador)
- ❑ **Directividad** (como de directiva es la antena)
- ❑ **Ganancia** (directividad con la contribución de pérdidas)
- ❑ **Eficiencia** (cantidad de pérdidas en la antena)
- ❑ **Diagrama de radiación** (forma en la que se produce la radiación)
- ❑ **Sensibilidad** (en el sistema de comunicaciones)
- ❑ **Effective Isotropic Radiated Power** (ganancia de antena x potencia Tx)

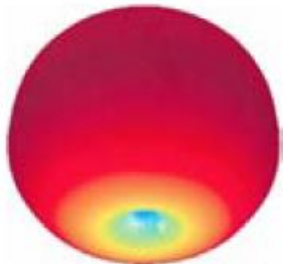


Medida de antenas

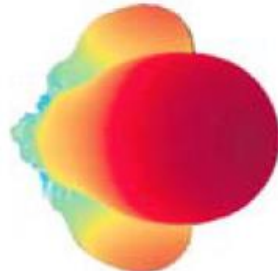
¿De qué estamos hablando?

- Caracterizar la antena en impedancia
- Caracterizar la antena en radiación

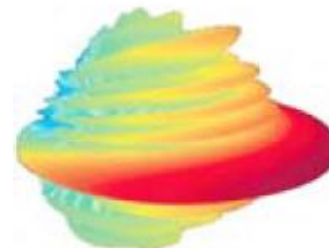
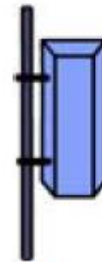
*Omni
Directional
Antenna*



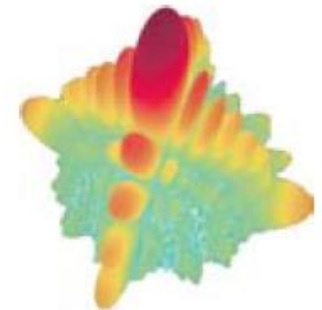
*Low Directional
Antenna*



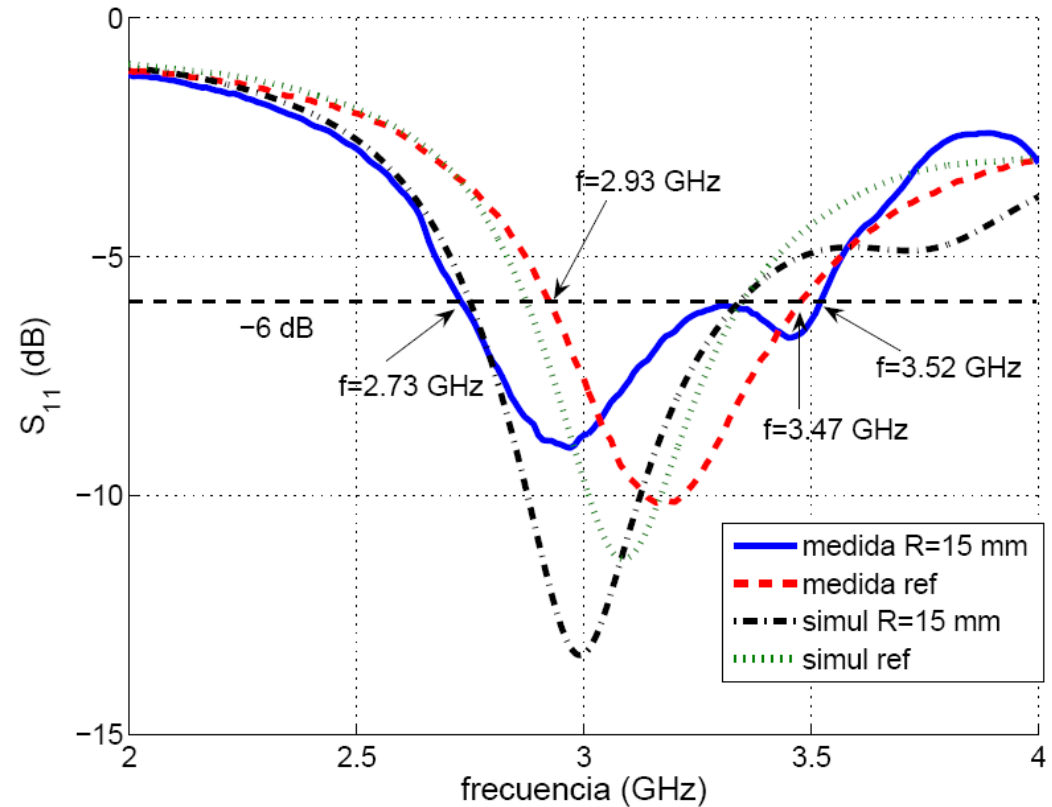
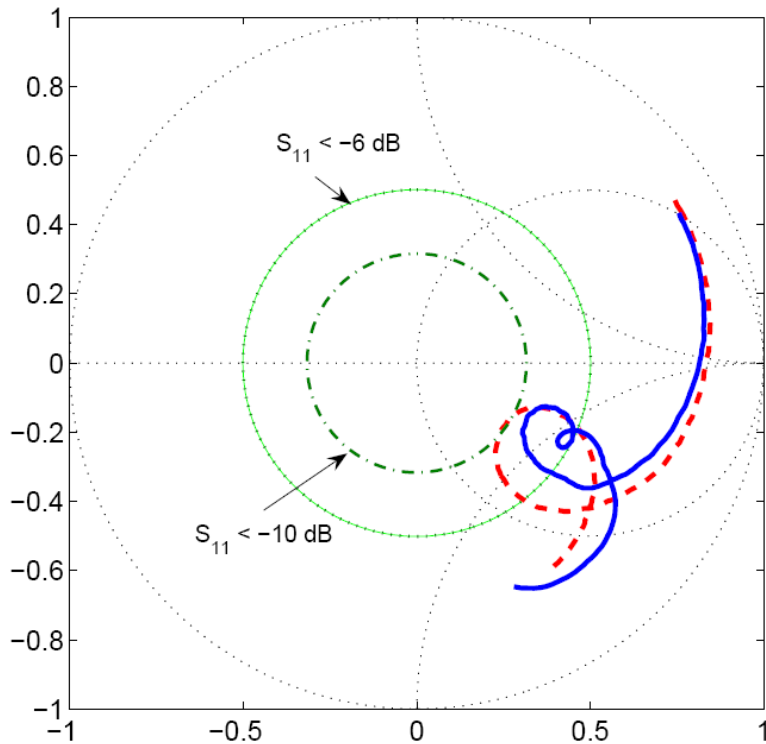
*Semi
Directional
Antenna*



*Directional
Antenna*



Medida de antenas. Ejemplos



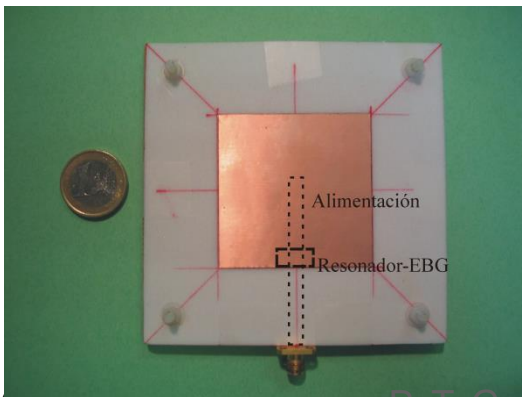
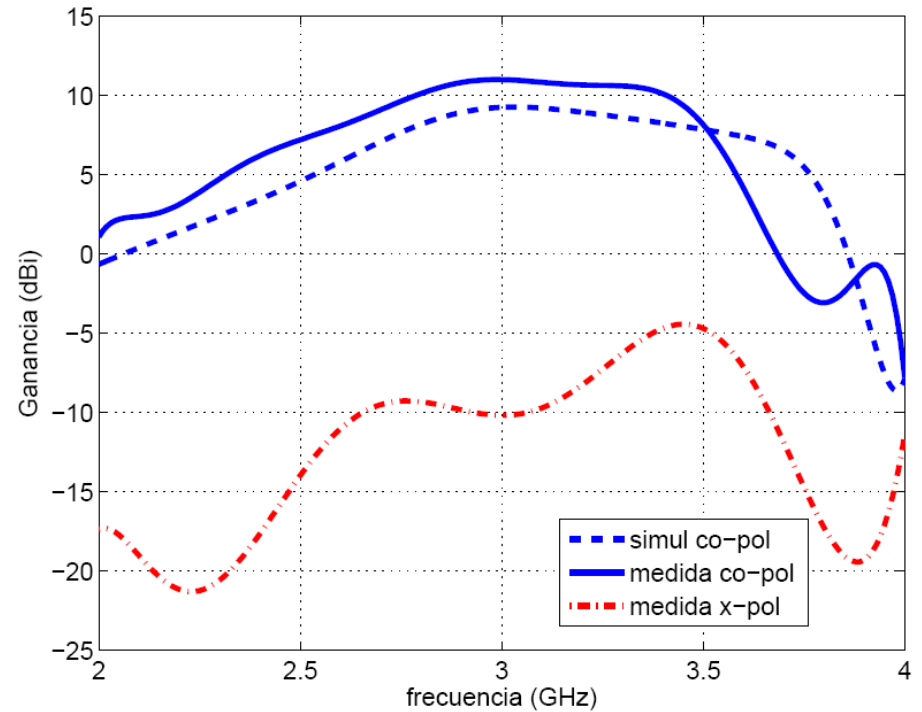
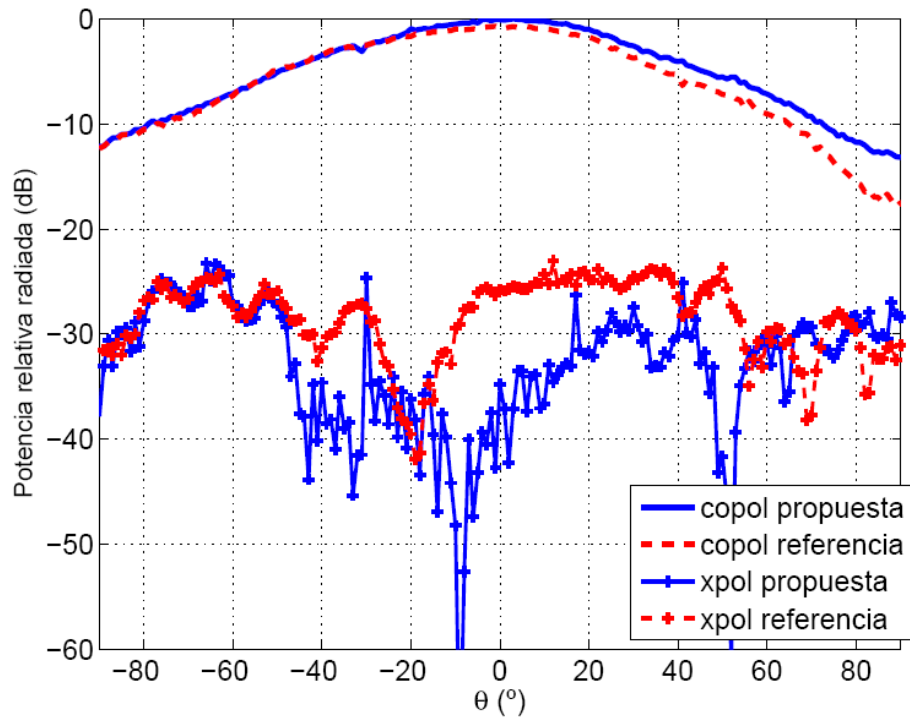
Medida en impedancia

- Representación del parámetro s_{11} en la SC
- Pérdidas de retorno de la antenna medida

Se considera
adaptada la antenna

- $|s_{11}|$ (dB) < -10 dB criterio general
- $|s_{11}|$ (dB) < -6 dB criterio suficiente para sist. Com.
- $|s_{11}|$ (dB) < -15 dB antenas embarcadas ESA

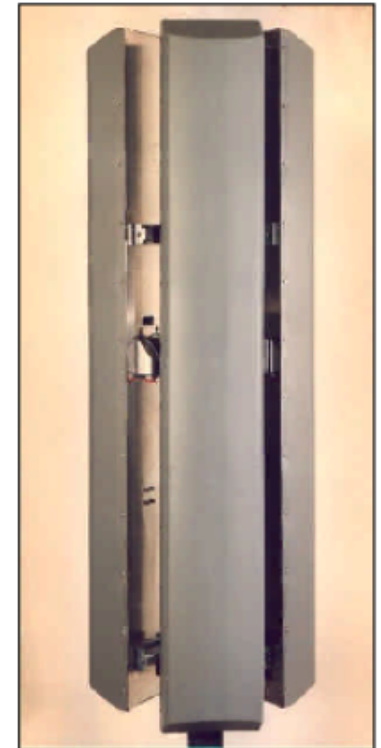
Medida de antenas. Ejemplos



- Diagrama de radiación plano E
- Ganancia estimada por comparación con antena patrón

Medida de antenas. Ejemplos

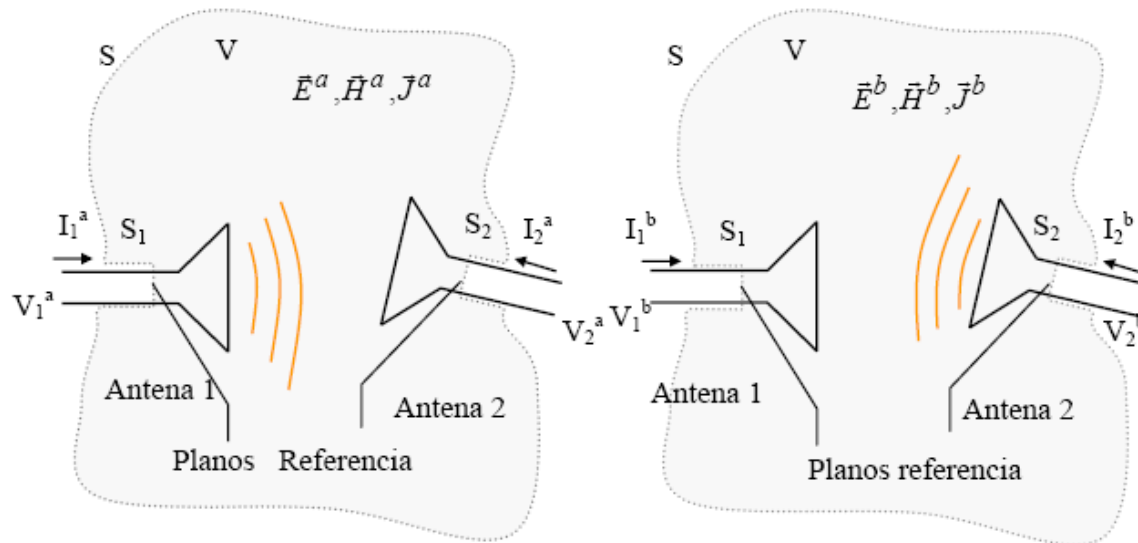
Frequency Range	870 ÷ 960 & 1710 ÷ 2170 MHz
Gain	17.5 dBi
VSWR	< 1.3 ÷ 1 GSM900 < 1.5 ÷ 1 DCS/UMTS
Polarization	Dual Slant ± 45
Horizontal Beamwidth	60°
Vertical Beamwidth	< 8°
Donwtilt	4° Both bands independently (6° under request)
Sidelobe supression	> 15 dB
Isolation between polarizations	>30 dB
Front Back Ratio	> 25 dB
Power rating	2 x 500 w GSM900 2 x 200 W DCS&UMTS
Impedance	50 Ω



Características típicas de una hoja de especificaciones

Reciprocidad

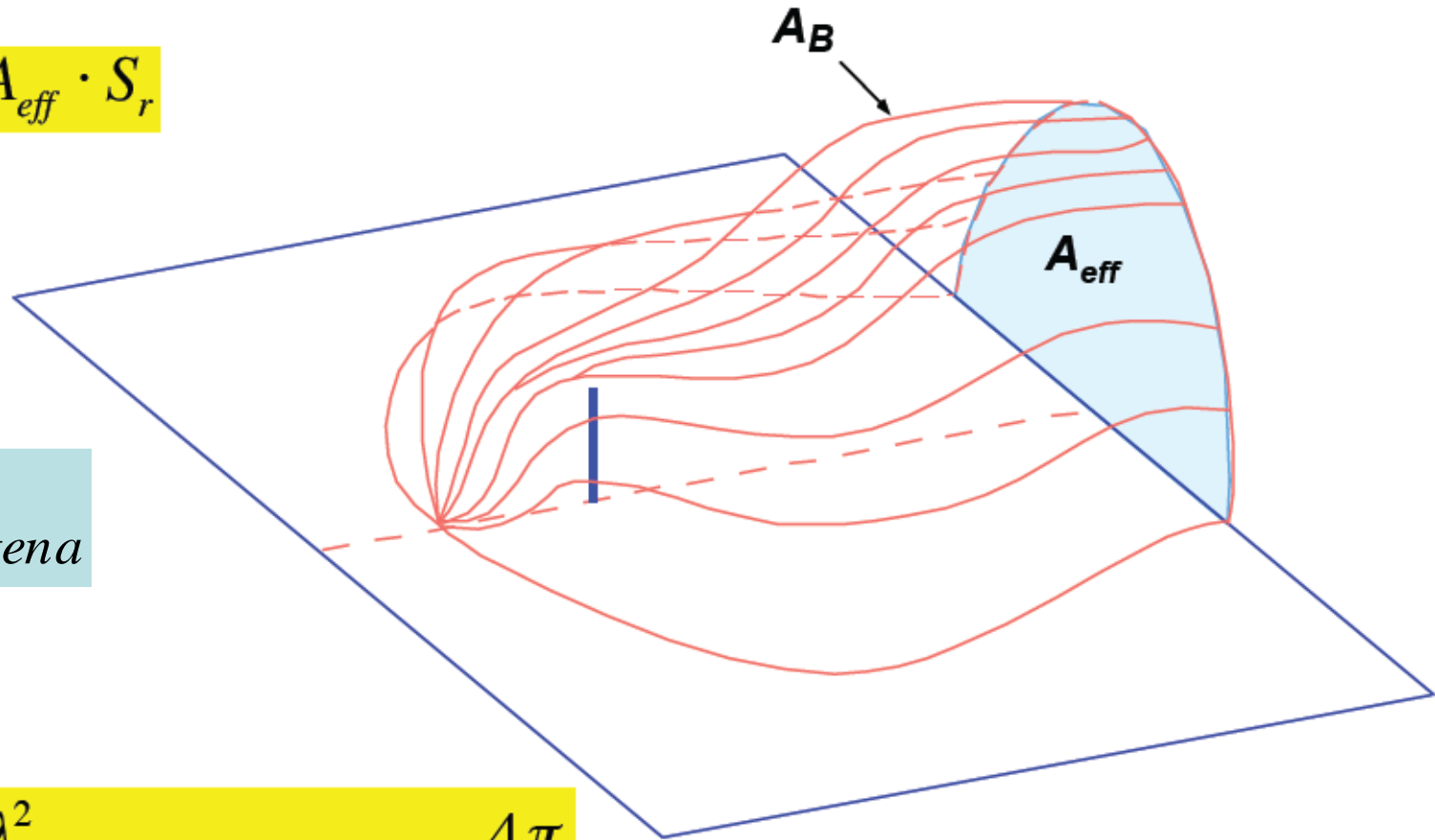
- Los parámetros de la antena son iguales en transmisión y en recepción: ganancia, diagrama de radiación, polarización, anchura de banda...



- El papel entre antena transmisora y antena receptora es intercambiable

Área equivalente de la antena

$$P_R = A_{eff} \cdot S_r$$



$$A_e \leq S_{antena}$$

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_i \quad G_i = A_{eff} \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

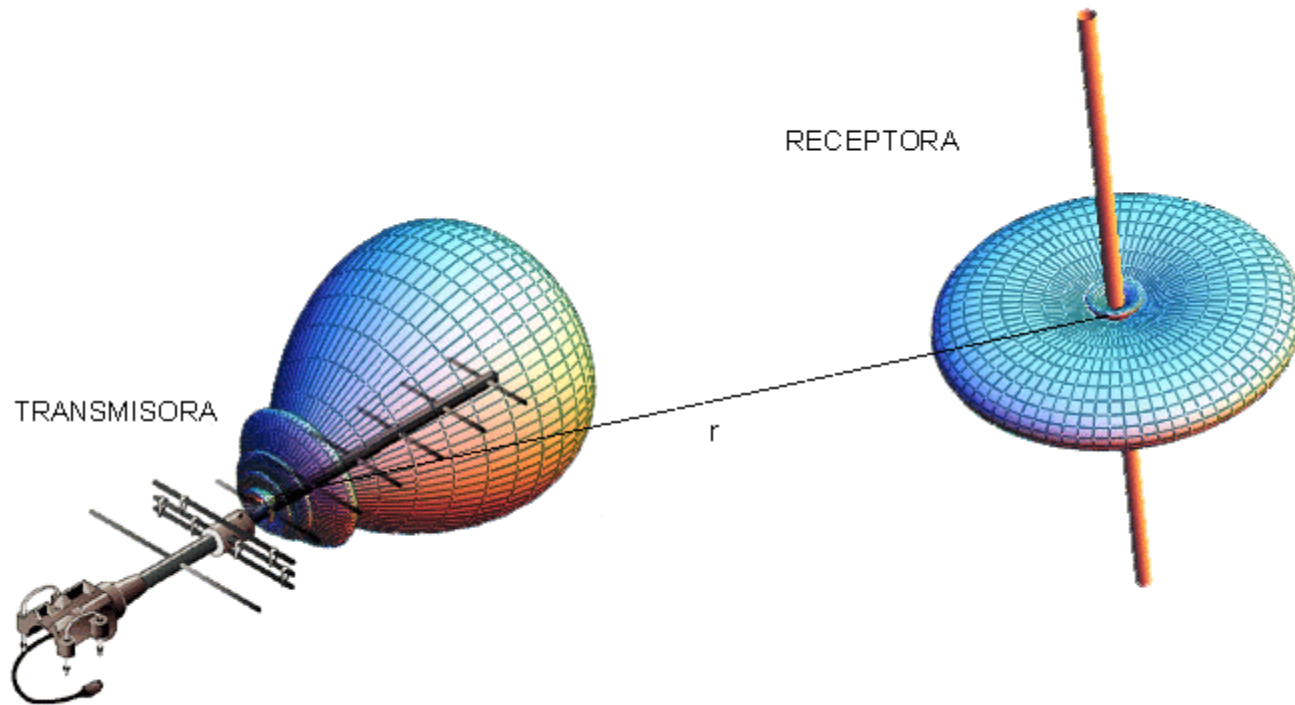
$$D_{max} \leq \frac{S_{antena} 4\pi}{\lambda^2}$$

Relaciona el tamaño eléctrico de la antena con su directividad

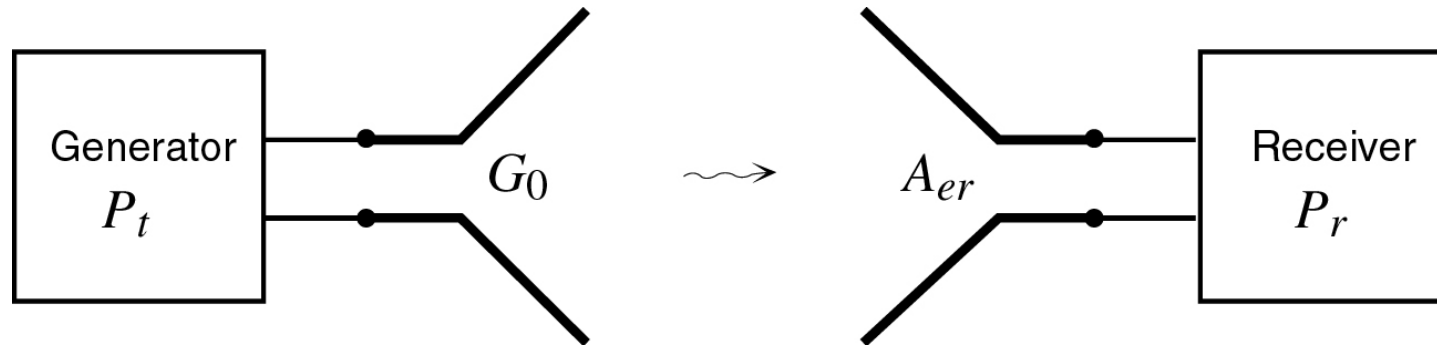
Algunas conclusiones

- ❑ La directividad depende del **tamaño eléctrico** (*en longitudes de onda*) de las antenas.
- ❑ El diagrama de radiación define la **directividad**.
- ❑ En las bandas de telefonía móvil: no es posible hacer antenas directivas en los terminales
- ❑ Existe un compromiso (limitación) entre: tamaño eléctrico de antena/eficiencia/anchura de banda.

Balance de enlace: ecuación de Friis o de las Telecomunicaciones



Balance de enlace



Power density:

$$W_0 = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_{0t}$$

Received power:

$$P_r = W_0 A_{er} = W_0 \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{0r} = P_t \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{0t} G_{0r}$$

Friis equation:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_{0t} G_{0r}$$

Free space atenuation

Balance de enlace

- La ecuación en dBs

$$P_{rec} = P_{trans} + G_{trans} + G_{rec} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2$$

- El término de **pérdidas por propagación en espacio libre**:

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2$$

- Además hay que añadir pérdidas en cables y si hay algún dato de atenuación adicional (por ejemplo por lluvia, etc.)

Pérdidas de polarización

(desadaptación en polarización)

- ❑ Cuando las ondas transmitidas y recibidas tienen distintas polarizaciones → se produce unas pérdidas por polarización:

$$\text{eficiencia}_{pol} = \left| \hat{e}_{tx} \cdot \hat{e}_{rx}^* \right|^2$$

- ❑ Cuando las polarizaciones son idénticas este factor es 1 y **NO hay pérdidas**
- ❑ Cuando las polarizaciones son ortogonales este factor es 0 y **no se recibe NADA**
- ❑ En el resto de casos, se recibe una parte de la potencia
- ❑ Polarizaciones ortogonales:
 - ❑ Vertical y horizontal
 - ❑ Circular a izquierdas y a derechas
 - ❑