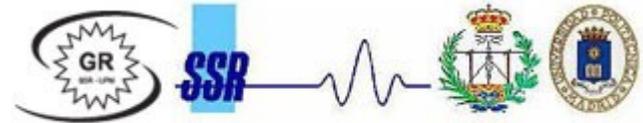


# Antenas y Circuitos de Alta Frecuencia Segunda parte, Tema I

Master en Ingeniería Informática y de Telecomunicación,  
2º cuatrimestre (6 créditos ECTS)

Profesores: Jorge A. Ruiz Cruz ([jorge.ruizcruz@uam.es](mailto:jorge.ruizcruz@uam.es))  
Jose Luis Masa Campos ([joseluis.masa@uam.es](mailto:joseluis.masa@uam.es))

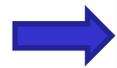
Grupo colaborador: Grupo de Radiación. Dpto. SSR.UPM



Dpto. de Ingeniería Informática  
Escuela Politécnica Superior  
**Universidad Autónoma de Madrid**



# Segunda parte de ACAF: Antenas



I. Principios básicos de una antena

II. Antenas lineales

III. Antenas impresas

IV. Antenas banda ancha, multibanda e independientes de la frecuencia

V. Agrupación de antenas. Arrays

VI. Antenas de apertura. Bocinas

VII. Reflectores

Antenas y Circuitos de Alta Frecuencia. [www.eps.uam.es/~acaf](http://www.eps.uam.es/~acaf)  
Master en Ingeniería Informática y Telecomunicaciones  
Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid  
José Luis Masa Campos. [jose Luis.masa@uam.es](mailto:jose Luis.masa@uam.es)

# I. Principios básicos de una antena

1. Concepto de Antena. Tipos de antenas.
2. Fundamentos de radiación.
3. Definición de campo lejano.
4. Parámetros básicos de una antena:
  - a. Impedancia de entrada
  - b. Diagrama de radiación
  - c. Directividad (Intensidad de radiación)
  - d. Ganancia (P.I.R.E y eficiencia)
  - e. Polarización
5. La antena en recepción
  - a. Reciprocidad en antenas.
  - b. Area equivalente.
  - c. Fórmula de Friis.
  - d. Pérdidas en un enlace
  - e. Temperatura de Ruido de una antena

# 1.- Concepto de antena

- Dispositivo “metálico” capaz de radiar y recibir ondas de radio que adapta la salida del transmisor o la entrada del receptor al medio

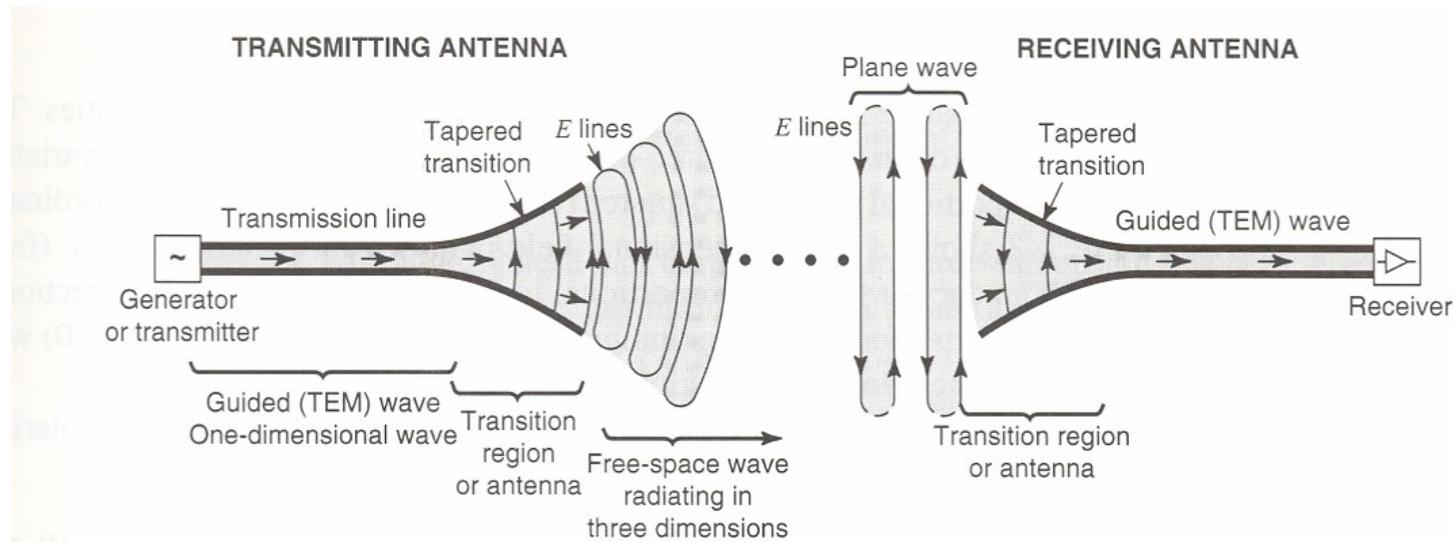
- Propiedades de una buena antena:

- Buen rendimiento de radiación

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{entr}}$$

- Diagrama de radiación adecuado

- Adaptación a la línea de transmisión



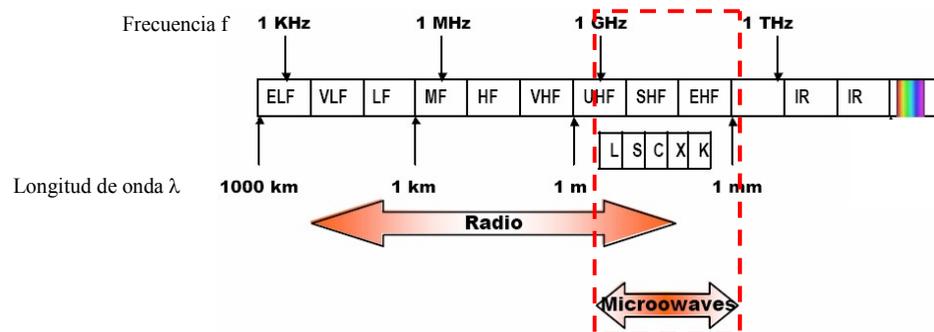
# 1.- Concepto de antena. *Banda de frecuencias*



Frequency band	Designation	Typical service
3–30 kHz	Very low frequency (VLF)	Navigation, sonar
30–300 kHz	Low frequency (LF)	Radio beacons, navigational aids
300–3000 kHz	Medium frequency (MF)	AM broadcasting, maritime radio, Coast Guard communication, direction finding
3–30 MHz	High frequency (HF)	Telephone, telegraph, and facsimile; shortwave international broadcasting; amateur radio; citizen's band; ship-to-coast and ship-to-aircraft communication
30–300 MHz	Very high frequency (VHF)	Television, FM broadcast, air traffic control, police, taxicab mobile radio, navigational aids
300–3000 MHz	Ultrahigh frequency (UHF)	Television, satellite communication, radiosonde, surveillance radar, navigational aids
3–30 GHz	Superhigh frequency (SHF)	Airborne radar, microwave links, common-carrier land mobile communication, satellite communication
30–300 GHz	Extremely high frequency (EHF)	Radar, experimental

# 1.- Concepto de antena. *Banda de frecuencias*

Band	Min freq	Max. freq	Max. $\lambda$	Min. $\lambda$
L	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
S	2 GHz	4 GHz	15 cm	7.5 cm
C	4 GHz	8 GHz	7.5 cm	3.75 cm
X	8 GHz	12.4 GHz	3.75 cm	2.42 cm
Ku	12.4 GHz	18 GHz	2.42 cm	1.66 cm
K	18 GHz	26.5 GHz	1.66 cm	1.11 cm
Ka	26.5 GHz	40 GHz	11.1 mm	7,5 mm
mm	40 GHz	300 GHz	7.5 mm	1 mm

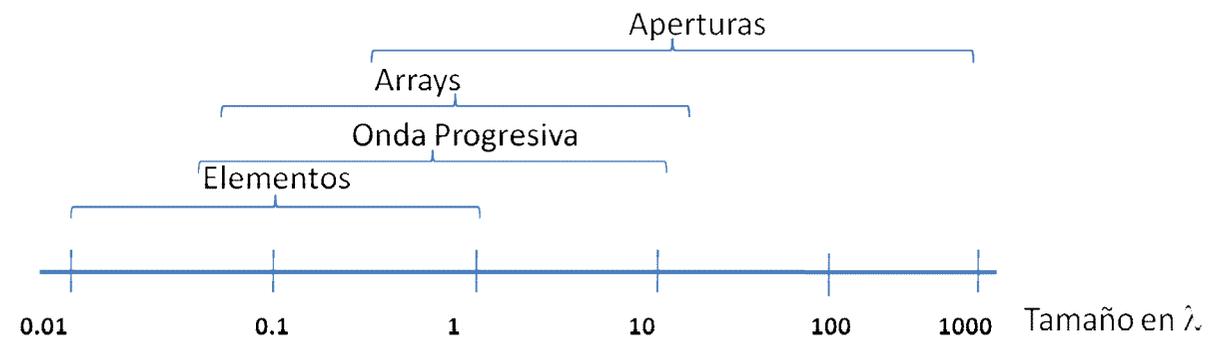
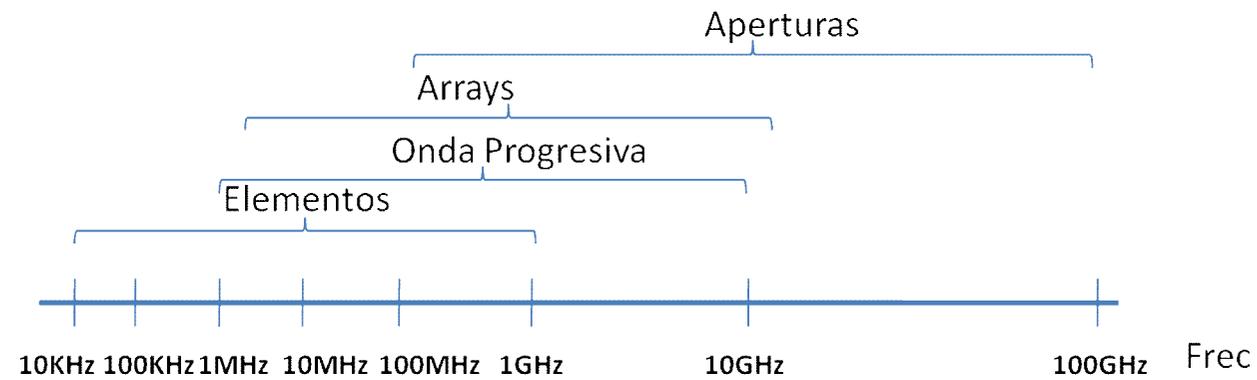


Longitud de onda en espacio libre[m]:

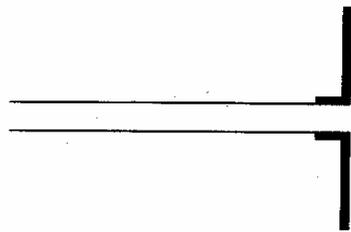
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

# 1.- Tipos de antenas

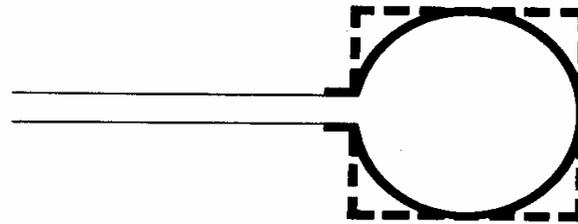
- Según el modo de radiación se definen 4 grupos de antenas



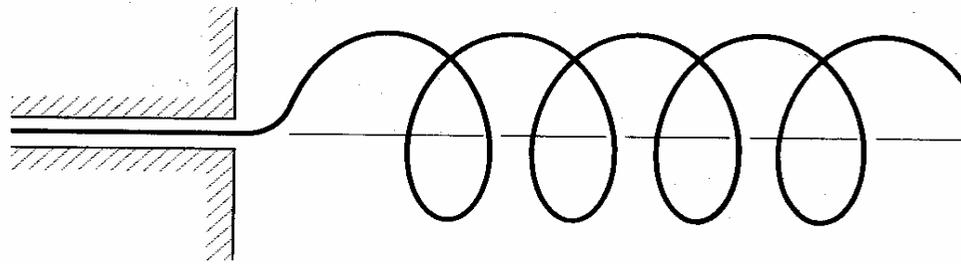
# 1.- Tipos de antenas. Antenas lineales (Elementos de corriente y Onda progresiva)



(a) Dipole



(b) Circular (square) loop



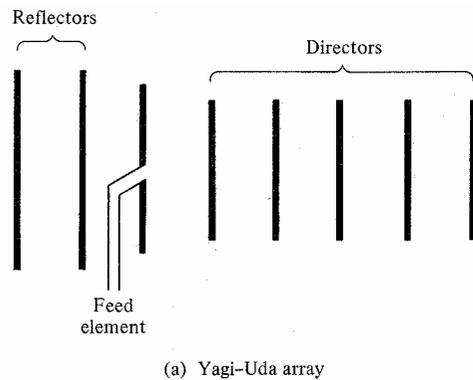
(c) Helix



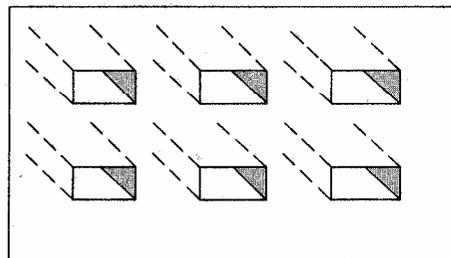
- **Análisis aproximado:**  
Establecer la corriente
- **Análisis preciso:** Método de los momentos



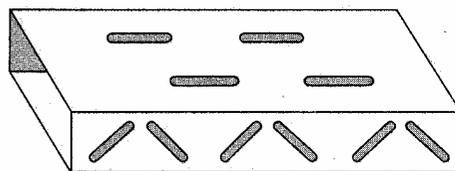
# 1.- Tipos de antenas. *Arrays*



(a) Yagi-Uda array



(b) Aperture array



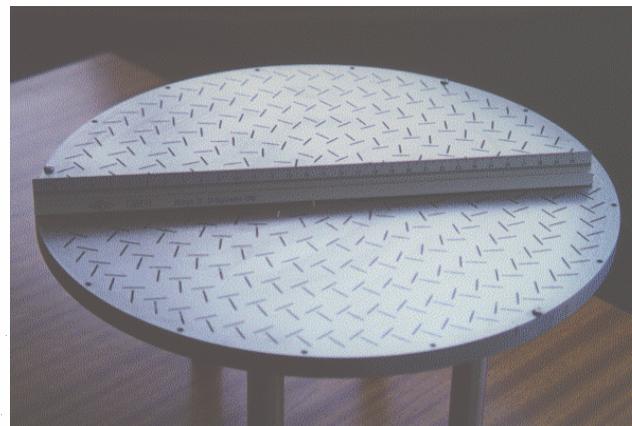
(c) Slotted-waveguide array

Figure 1.4 Typical wire and aperture array configurations.



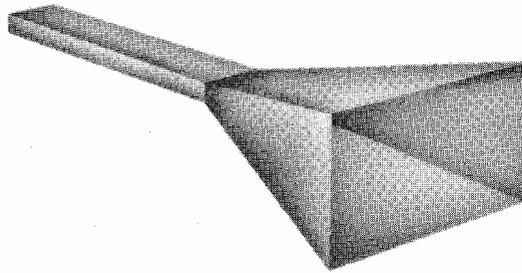
← Antena de estación base de telefonía móvil

- **Análisis: Multiplicación diagramas**
- **Factor de Array. Depende de la geometría y las corrientes de alimentación**
- **Diseño circuital de la red de alimentación**

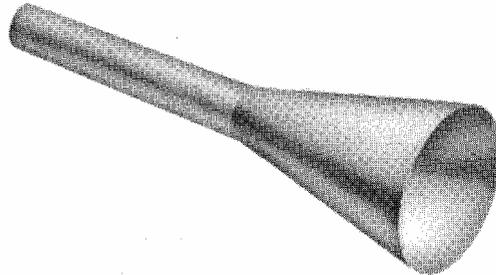


← Antena de ranuras para comunicaciones por satélite DBS

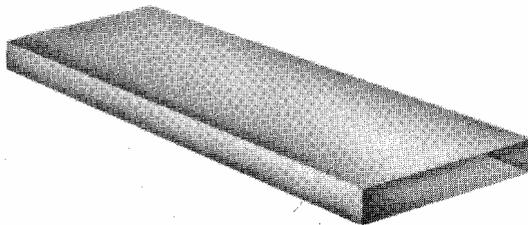
# 1.- Tipos de antenas. *Bocinas*



(a) Pyramidal horn



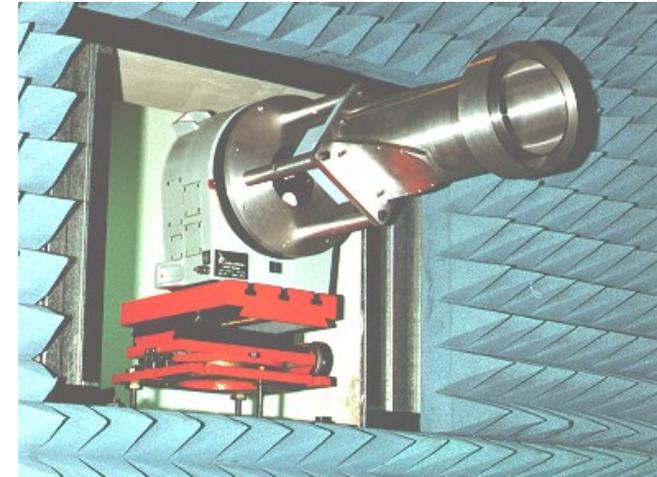
(b) Conical horn



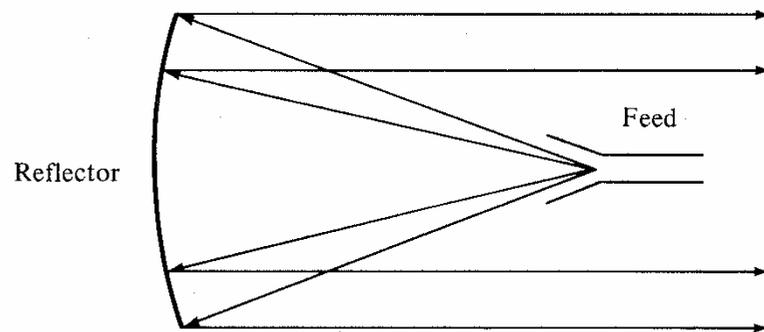
(c) Rectangular waveguide

Figure 1.3 Aperture antenna configurations.

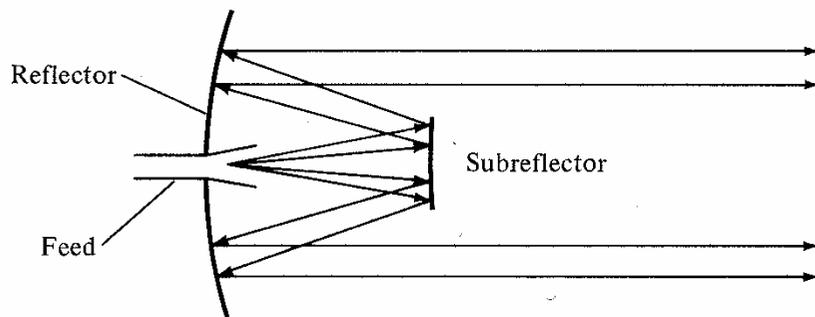
- **Análisis: Principios de equivalencia**
- **Utilización en rango microondas**
- **Alta ganancia**
- **Gran ancho de banda**
- **Fabricación sencilla**



# 1.- Tipos de antenas. *Reflectores*

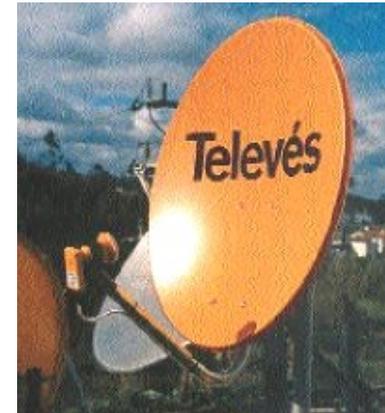


(a) Parabolic reflector with front feed



(b) Parabolic reflector with Cassegrain feed

- **Análisis: Óptica Geométrica, Óptica Física, GTD**
- **Convierte el diagrama poco directivo del alimentador en otro más directivo**



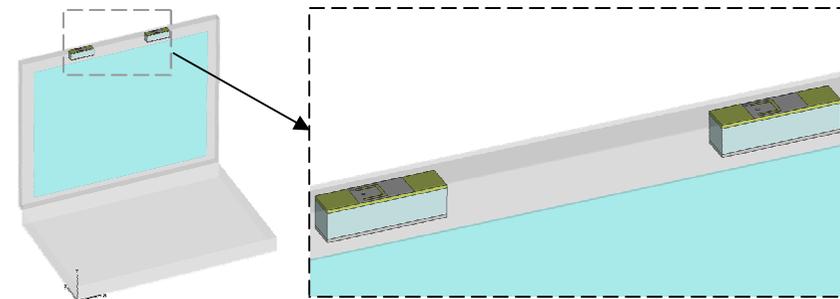
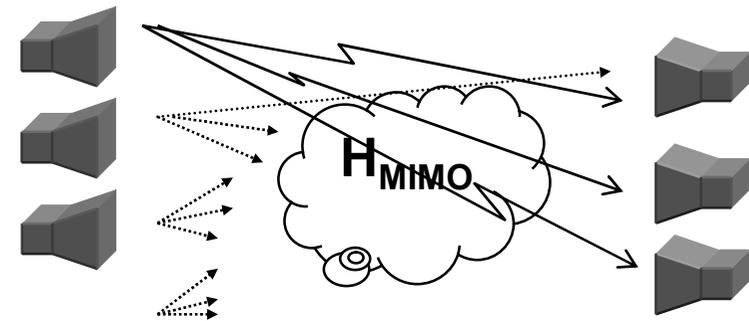
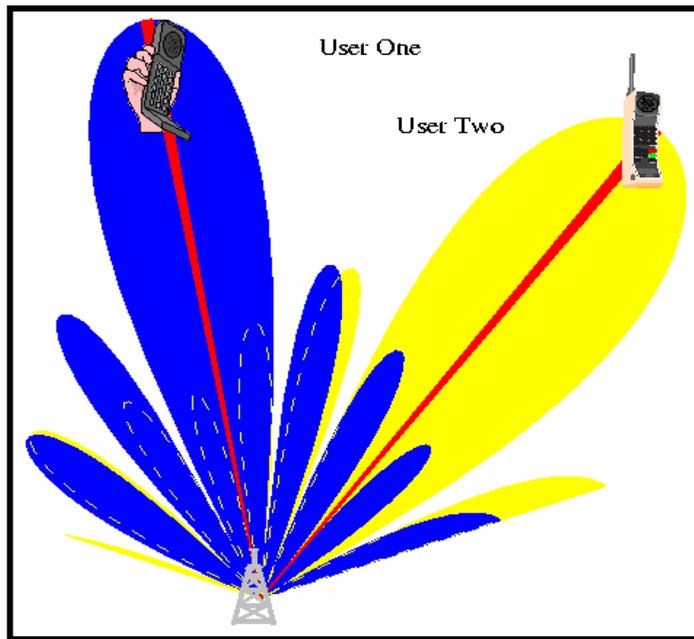
Antena para recepción por satélite de TV



Antena para comunicaciones por satélite en tren de alta velocidad

# 1.- Tipos de antenas. *Antenas inteligentes*

## Antenas adaptativas y sistemas MIMO



## 2.- Fundamentos de radiación. *Ecuaciones de Maxwell*



### CAMPOS

E: Intensidad de campo eléctrico  
H: Intensidad de campo magnético  
D: Inducción de campo eléctrico  
B: Inducción de campo magnético

### FUENTES

$\rho$ : Densidad de carga eléctrica  
J: Densidad de corriente  
 $J_c$ : Densidad de corriente de conducción

### MEDIO

$\epsilon$ : Permitividad eléctrica  
 $\mu$ : Permeabilidad magnética  
 $\sigma$ : Conductividad

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -j\omega\vec{B} \\ \nabla \times \vec{H} &= j\omega\vec{D} + \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{J} + j\omega\rho &= 0 \\ \vec{D} &= \epsilon\vec{E} \\ \vec{B} &= \mu\vec{H} \\ \vec{J}_c &= \sigma\vec{E}\end{aligned}$$

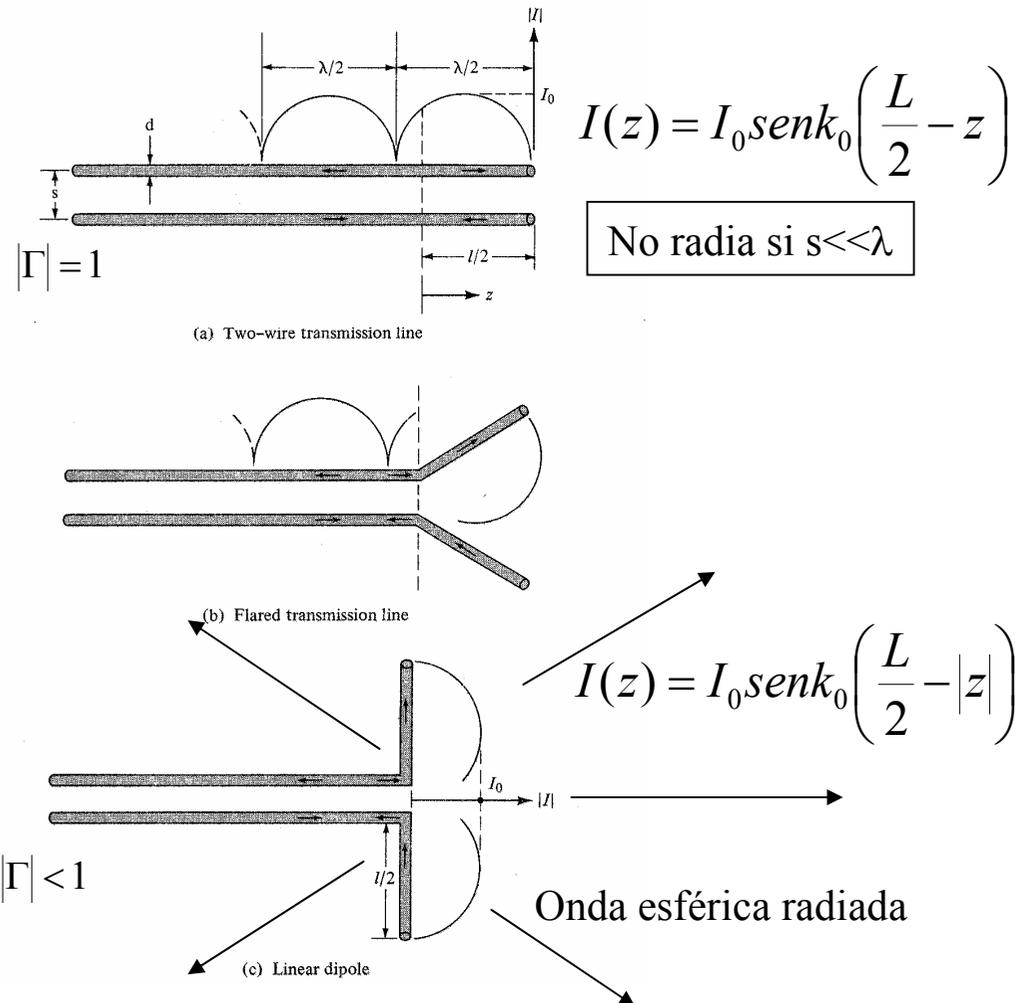
Ley de Faraday  
Ley generalizada de Amper  
Ley de Gauss  
Continuidad del flujo magnético  
Ecuación de continuidad  
Ecuaciones constitutivas de la materia

## 2.- Fundamentos de radiación. *Distribución de corriente*

- Es la función que define la forma que toma la corriente sobre la antena
- Está fijada por las condiciones de contorno de las Ecuaciones de Maxwell. Para régimen permanente sinusoidal, se cumple:

$$\begin{aligned} \overline{E}_{\text{tan}} &= 0 \\ \overline{J}_S &= \hat{n} \times \overline{H}_{\text{tan}} \end{aligned}$$

- En casos como el de la figura, la distribución se modela utilizando razonamientos simples. Corresponde a la distribución de corriente en onda estacionaria aproximada de un dipolo

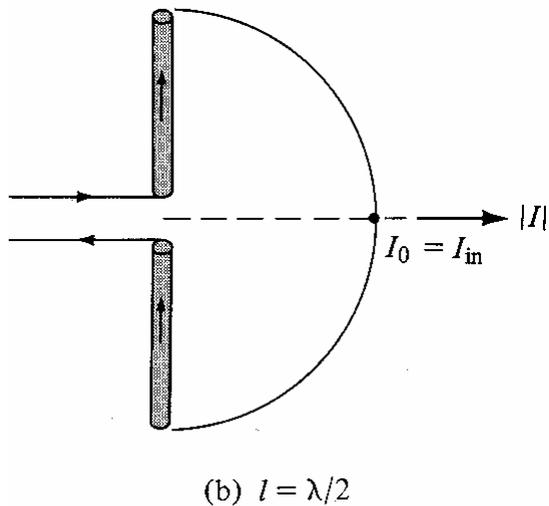


## 2.- Fundamentos de radiación. *Distribución de corriente*

• Dipolo  $L = \lambda/2$

Amplitud compleja:

$$I(z) = I_0 \cos(k_0 z)$$



Corriente instantánea:

$$I(z, t) = \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] = I_0 \cos(k_0 z) \cos(\omega t)$$

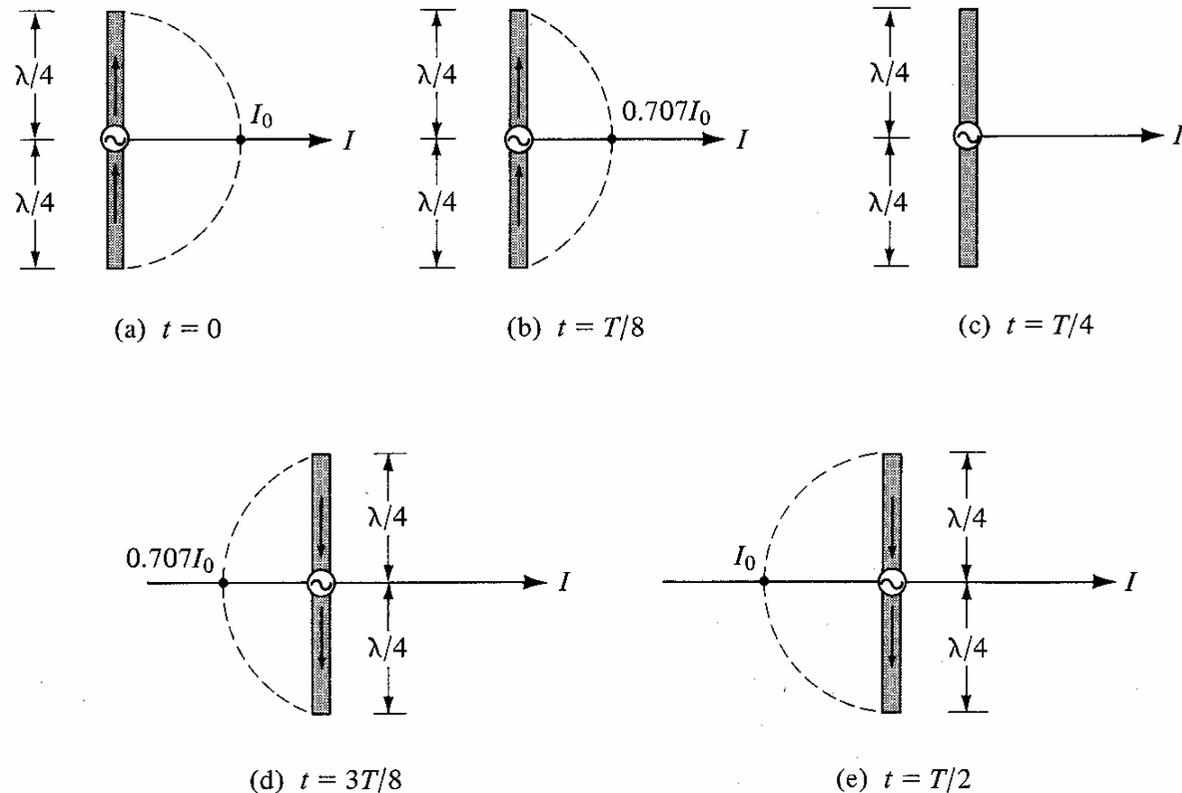


Figure 1.17 Current distribution on a  $\lambda/2$  wire antenna for different times.

## 2.- Fundamentos de radiación. *Densidad de potencia*

- Se elige una superficie S que rodee la antena.
- El campo total se desdobra como:

$$\vec{E} = \vec{E}_i + \vec{E}_d \quad , \text{tal que,} \quad \vec{E}_i = -\frac{\Theta}{d} \hat{z} \quad , \text{campo impreso}$$

$$\vec{E}_d \quad , \text{campo dispersado}$$

- El balance de energía se establece mediante el Teorema de Poynting:

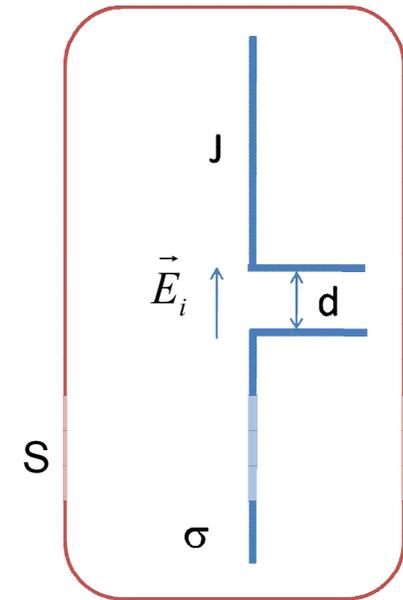
$$\underbrace{-\frac{1}{2} \text{Re} \left[ \iiint_V \vec{J}_{exct}^* \cdot \vec{E}_i dV \right]}_{P_{ENTREGADA}} = \underbrace{-\frac{1}{2} \iiint_V \sigma \vec{E}_d^* \cdot \vec{E}_d dV}_{P_{DISIPADA}} + \underbrace{\frac{1}{2} \text{Re} \left[ \oiint_S \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot d\vec{S} \right]}_{P_{RADIADA}}$$

- Se define la densidad de potencia transportada por la onda esférica  $\langle \vec{S} \rangle$ :

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \vec{E} \times \vec{H}^* \right] \quad (\text{W/m}^2) \quad \rightarrow \text{Vector de Poynting}$$

- El rendimiento de la antena relaciona cuanta potencia se ha radiado de aquella que le ha sido entregada a la antena:

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{entr}}$$



## 2.- Fundamentos de radiación. *Potencial vector*



- Para resolver más fácilmente los problemas de radiación se utilizan unos potenciales auxiliares derivados de las Ecuaciones de Maxwell.

$\vec{A}$  = Potencial vector magnético

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad \text{ya que} \quad \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) \equiv 0$$

$\Phi$  = Potencial escalar

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B}$$

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

$$k_o^2 \equiv \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$$

$$\nabla \times (\vec{E} + j\omega\vec{A}) = 0 \Rightarrow \vec{E} + j\omega\vec{A} = -\nabla\Phi \quad \text{ya que} \quad \nabla \times (\nabla\Phi) \equiv 0$$

- Ecuación de onda:

$$\Delta \vec{A} + \underbrace{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0}_{k_o^2} \vec{A} = -\mu \vec{J}$$

$$\Delta \Phi + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- Campo eléctrico y magnético

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

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \times \vec{H}$$

## 2.- Fundamentos de radiación. *Campo radiado por un elemento de corriente*

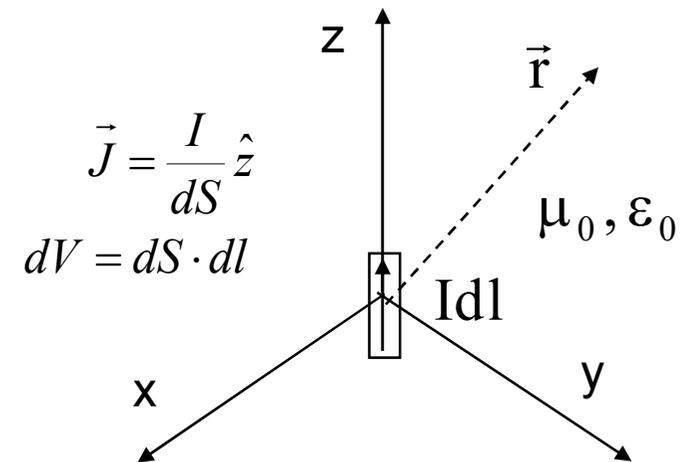
- La fuente de radiación más sencilla es un elemento diferencial, lineal de corriente, situado en un medio isótropo, homogéneo y sin pérdidas.
- El campo producido por esta fuente permiten, aplicando superposición, obtener el campo radiado por fuentes más extensas.
- Por simetría esférica del problema, solo habrá dependencia radial:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) + k_0^2 A_z = -\mu_0 J_z$$

- La solución a la ecuación (esférica de Bessel):

$$A_{z1} = C_1 \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \quad \text{Sentido } r \rightarrow \infty \quad , \text{ tal que, } \quad C_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \int J_z dV = \frac{\mu_0}{4\pi} Idl$$

$$A_{z2} = C_2 \frac{e^{jk_0 r}}{r} \quad \text{Sentido } r \rightarrow 0$$



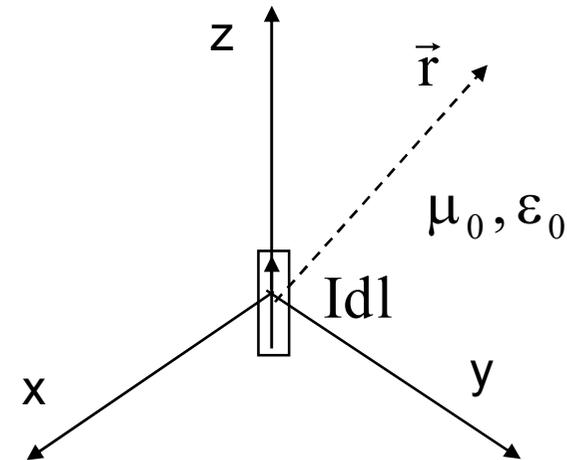
## 2.- Fundamentos de radiación. *Campo radiado por un elemento de corriente*

- El potencial vector obtenido es:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} Idl \left( \hat{r} \cos\theta - \hat{\theta} \sin\theta \right)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \times \vec{H}$$



- Finalmente, los campos radiados en cualquier punto del espacio serán:

$$\vec{H} = \hat{\phi} \frac{Idl \sin\theta}{4\pi r} \left( jk_0 + \frac{1}{r} \right) e^{-jk_0 r}$$

$$\vec{E} = \frac{j\eta Idl}{2\pi k_0} \left[ \hat{r} \cos\theta \left( \frac{jk_0}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) + \hat{\theta} \frac{\sin\theta}{2} \left( -\frac{k_0^2}{r} + \frac{jk_0}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \right] e^{-jk_0 r}$$

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi = 377\Omega \quad (\text{impedancia intrínseca del aire})$$

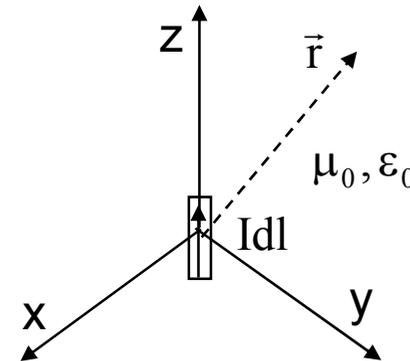
## 2.- Fundamentos de radiación. *Campo lejano radiado por un elemento de corriente*

- Si  $k_0 r \gg 1$  ( $r \gg \lambda$ ) predominan los términos en  $1/r$  frente a los  $1/r^2$  o  $1/r^3$ , obteniéndose las expresiones del campo en zona lejana:

$$\vec{H} = j k_0 I dl \sin \theta \frac{e^{-j k_0 r}}{4 \pi r} \hat{\phi}$$

$$\vec{E} = j \eta k_0 I dl \sin \theta \frac{e^{-j k_0 r}}{4 \pi r} \hat{\theta}$$

$$E \perp r, H \perp r, E \perp H$$



- La densidad de potencia radiada se dirige radialmente hacia fuera y decrece según  $1/r^2$  en un medio sin pérdidas (onda esférica progresiva)

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} [\vec{E} \times \vec{H}^*] = \left[ \frac{|I|^2 dl^2 k_0^2 \eta \sin^2(\theta)}{32 \pi^2 r^2} \right] \hat{r} = \frac{1}{2 \eta} |E|^2 \hat{r}$$

- Los términos en  $1/r^2$  y  $1/r^3$  representan energía reactiva almacenada en los campos. Sus valores solo son apreciables en las cercanías de la antena.

## 2.- Fundamentos de radiación. *Longitud de onda*

- Para visualizar la onda radiada, se visualiza la expresión instantánea de la fuente de corriente y el potencial vector asociado a la misma:

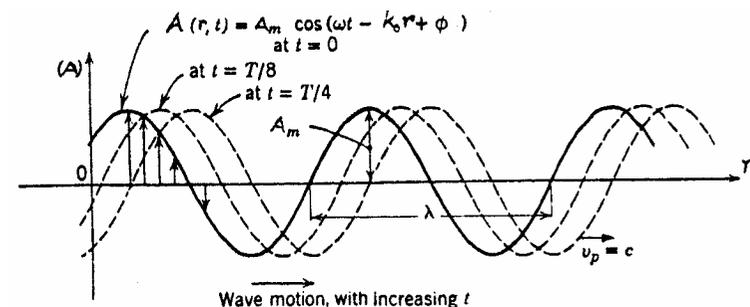
$$I(t) = \text{Re}[I \cdot e^{j\omega t}] = I \cdot \cos(\omega t)$$

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \text{Re}[\vec{A} \cdot e^{j\omega t}] = \text{Re}\left[\hat{z} \cdot C_1 \frac{e^{-jk_0 r}}{r} e^{j\omega t}\right] r = \hat{z} \cdot \frac{C_1}{r} \cos(\omega t - k_0 r) = \hat{z} \cdot \frac{C_1}{r} \cos\left[\omega\left(t - \frac{r}{c_0}\right)\right]$$

- $r/c =$  tiempo de propagación o retardo que tarda la onda en viajar desde el punto emisor hasta el de observación.
- **A gran distancia**, en un intervalo  $\Delta r \ll r$ , la onda esférica se comporta como plana con una longitud de onda  $\lambda$

$$\text{Longitud de onda} = \lambda = cT = \frac{c}{f} = \frac{2\pi}{k_0} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$$

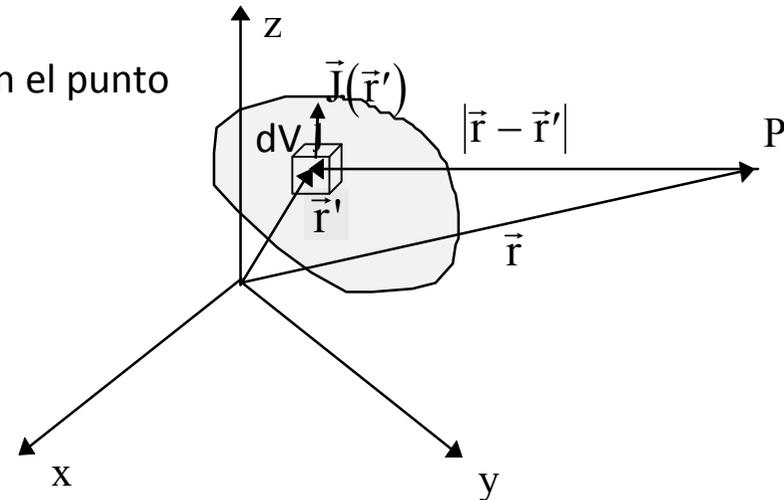
$$\text{Propagation constant} = k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$$



## 2.- Fundamentos de radiación. *Campo radiado por una antena*

- Una distribución real de corriente se supone formada por infinitos volúmenes diferenciales  $dV$  de corriente  $\mathbf{J}$  situados en un punto  $\mathbf{r}'$ .
- Cada uno de los infinitos volúmenes  $dV$  de corriente  $\mathbf{J}$  en el punto  $P$  generarán un diferencial de potencia vector  $d\vec{A}$  en el espacio

$$d\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \vec{J}(\vec{r}') dV$$



- El potencial vector total radiado será la superposición.

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV'$$

Volumen

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S'} \frac{\vec{J}_s(\vec{r}') e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dS'$$

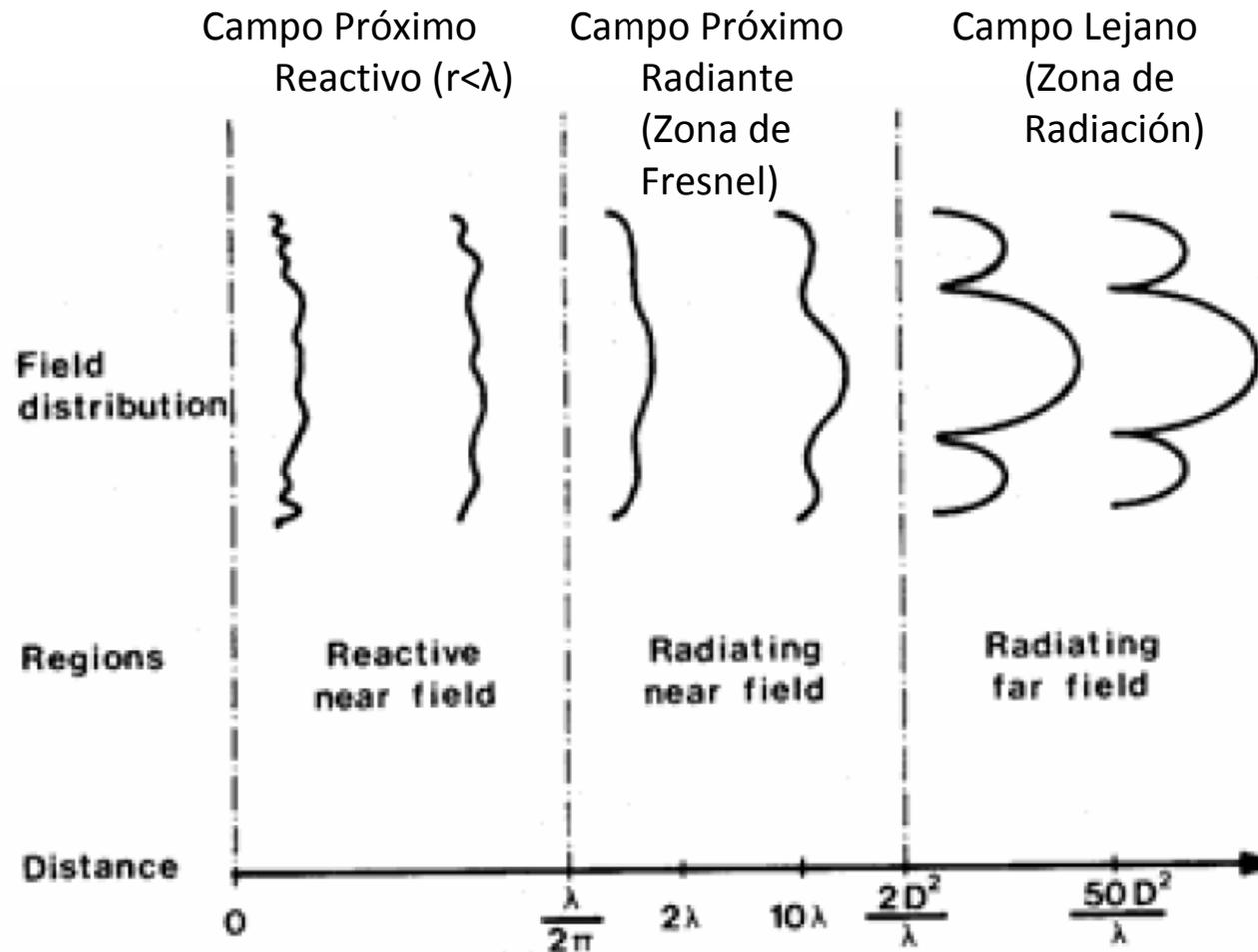
Superficie

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{L'} \frac{I(\vec{r}') e^{-jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} d\vec{l}'$$

Antena de hilo  
(diámetro  $\ll \lambda$ )

## 2.- Fundamentos de radiación. Regiones en el *campo radiado* por una antena

- El espacio que rodea una antena se divide en tres regiones en cuanto a la consideración de su campo radiado:



### Condición de campo lejano

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{y} \quad r \gg \lambda$$

D = Dimensión mayor de la antena

### 3.- Aproximación de campo lejano

- Campo lejano:

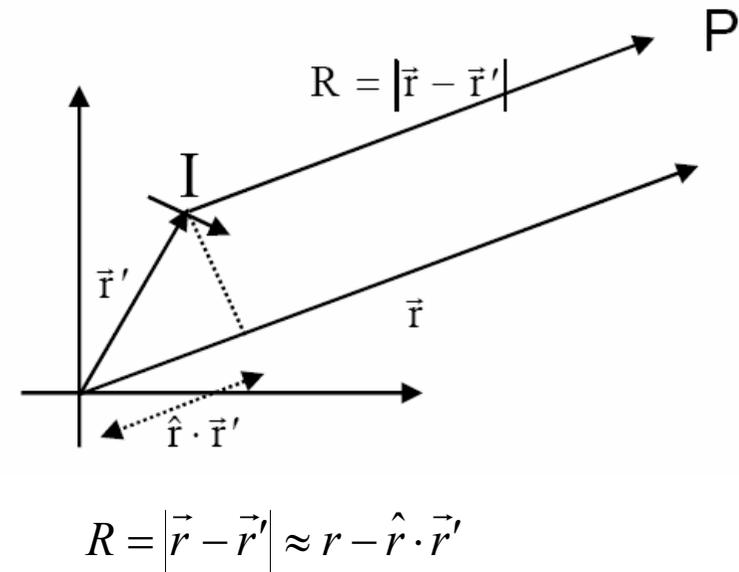
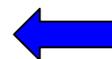
$$k_0 |\vec{r} - \vec{r}'| \gg 1 \quad \text{y} \quad r \gg r'_{\max} \quad \leftrightarrow \quad r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{y} \quad r \gg \lambda$$

- Por lo tanto el potencial vector,

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{L'} \frac{I(\vec{r}') e^{-jk_0 |\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{l}'$$

se simplifica como,

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \int_{L'} I(\vec{r}') e^{-jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}'} d\vec{l}'$$



- Y los campos radiados en campo lejano quedan:

$$\begin{aligned} \vec{H} &= -\frac{j\omega}{\eta_0} (\hat{r} \times \vec{A}) & \vec{H} &= \frac{(\hat{r} \times \vec{E})}{\eta_0} & \vec{E} &\perp \vec{H} \\ \vec{E} &= -j\omega \left( (\hat{r} \times \vec{A}) \times \hat{r} \right) & \vec{E} &= \eta_0 (\vec{H} \times \hat{r}) & \vec{E} &\perp \hat{r} \\ & & & & \vec{H} &\perp \hat{r} \end{aligned}$$



### 3.- Aproximación de campo lejano

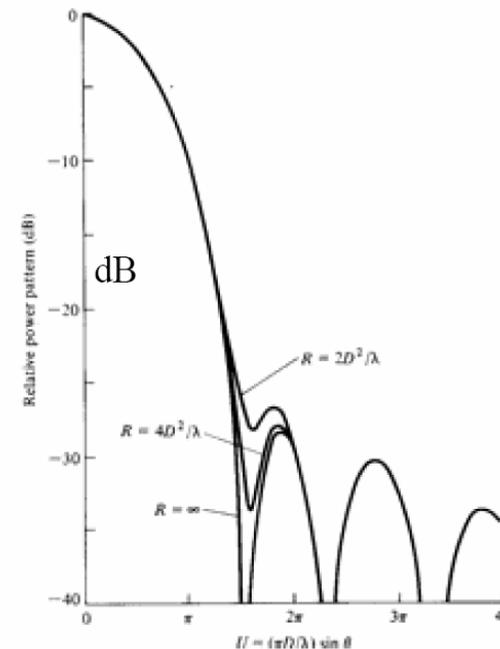
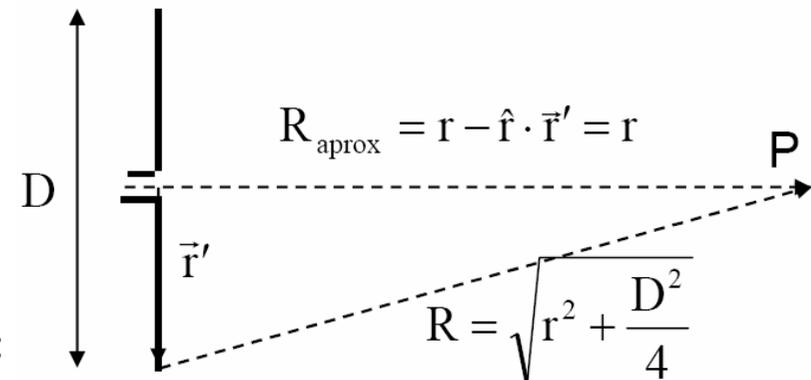
- El máximo error de fase es el que permite definir un criterio de distancia mínima para la región de campo lejano:

$$M_{\max}^{fase} = k_0 (R_{\max} - R_{\min}) = k_0 \sqrt{r^2 + \frac{D^2}{4}} - r = k_0 \frac{D^2}{8r}$$

- Se establece que un error de  $22.5^\circ$  ( $\pi/8$ ) es el mayor permitido. Por ello, la distancia mínima  $r_{\min}$  deberá ser:

$$r_{\min} = \frac{2D^2}{\lambda}$$

- A la hora de medir antenas, ésta es la distancia mínima a la que deben situarse la antena bajo prueba y la sonda de medida. En la determinación del nivel de lóbulos muy bajos, o nulos profundas, puede ser insuficiente dicha distancia



### 3.- Aproximación de campo lejano

- Los campos lejanos radiados por una antena cumplen:
  - La onda esférica radiada se comporta localmente como plana

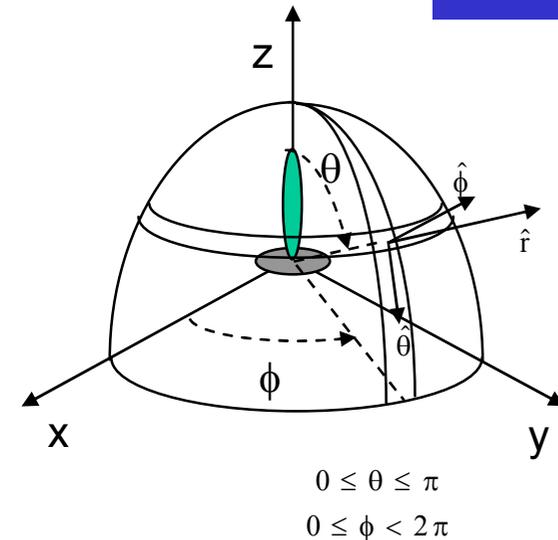
Fijada una dirección  $(\theta, \phi)$ :

$$\vec{E} \perp \hat{r} \quad \vec{E} \perp \vec{H}$$

$$\vec{H} \perp \hat{r} \quad |E| = \eta_0 |H|$$

- Los campos E y H no poseen componente radiales:

$$\left. \begin{aligned} \vec{A}(\vec{r}) &= A_r \hat{r} + A_\theta \hat{\theta} + A_\phi \hat{\phi} \\ \vec{E} &= -j\omega \left( (\hat{r} \times \vec{A}) \times \hat{r} \right) \end{aligned} \right\} \begin{array}{ll} E_r = 0 & H_r = 0 \\ E_\theta = -j\omega A_\phi & E_\theta / H_\phi = \eta_0 \\ E_\phi = -j\omega A_\theta & E_\phi / H_\theta = \eta_0 \end{array}$$



- La densidad de potencia que transporta la onda decrece como  $1/r^2$ . En un medio sin pérdidas toma la expresión:

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] = \frac{1}{2\eta} \left[ |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \hat{r}$$

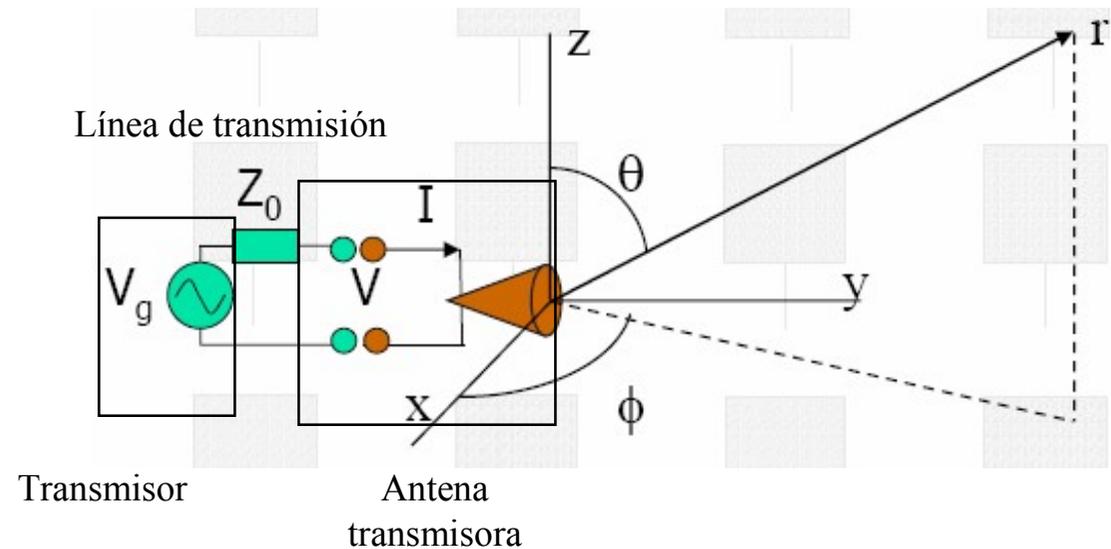
- La dependencia de E y H con r es siempre la de una onda esférica  $\frac{e^{-jk_0 r}}{r}$ . Los campos decrecen con la distancia como  $1/r$
- La onda electromagnética radiada se propaga radialmente en todas las direcciones del espacio

## 4.- Parámetros básico de una antena. a) Impedancia de entrada

- Los parámetros básicos de una antena permiten tratarla como una caja negra, y sirven para calcular los balances de enlace de una comunicación radio.
  - Impedancia de entrada
  - Diagrama de radiación
  - Ganancia
  - Polarización

$$Z_{ant} = \frac{V}{I} = R_{ant} + jX_{ant}$$

### Circuito equivalente de una antena transmisora



- Por lo general,  $X_{ant}(f)=0$ , lo que significa que la antena está en resonancia
- Se define el coeficiente de reflexión de la antena  $\Gamma_T$ , referido al transmisor:

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

## 4.- Parámetros básico de una antena. a) Impedancia de entrada



- En la resistencia de la antena  $R_{ant}$ , suma las pérdidas en la antena y la radiación generada por la misma

$$R_{ant} = R_{perd} + R_{rad}$$

$$P_{rad} = \frac{1}{2} |I|^2 R_{rad}$$

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} = \frac{R_{rad}}{R_{perd} + R_{rad}}$$

- Otros parámetros relacionados con la impedancia de entrada de la antena son, además del coeficiente de reflexión:

– Pérdidas de retorno (dB):

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

Relación de onda estacionaria:

$$R.O.E = \frac{1 + |\Gamma_T|}{1 - |\Gamma_T|}$$

- La potencia disponible por el generador (máxima que puede entregar), puede relacionarse con la que finalmente se entrega a la antena :

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

$$P_{ent} = P_{dg} - P_{ref} = P_{dg} (1 - |\Gamma_T|^2)$$

- $ROE_{MAX}$  admitida será 2  $\Rightarrow PR = -9.5dB \Rightarrow 12\%$  de potencia perdida

## 4.- Parámetros básico de una antena. b) Diagrama de radiación

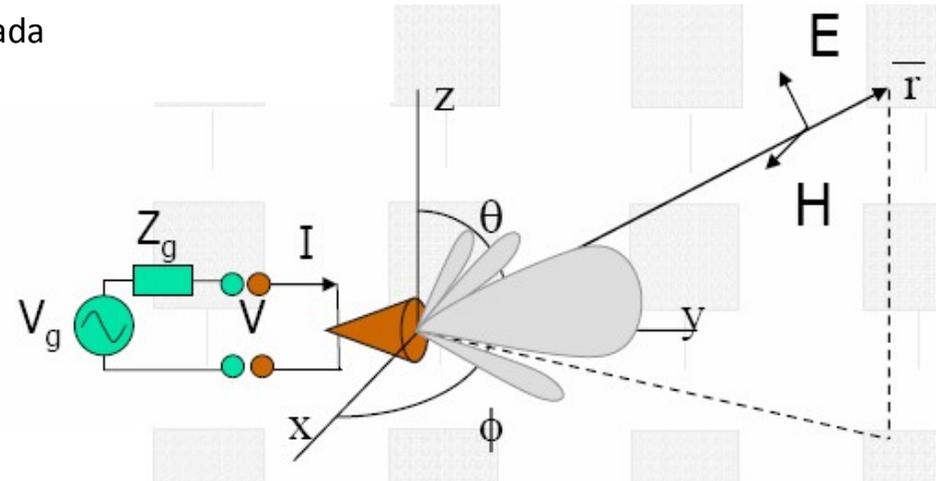
- Es la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas angulares del espacio.
- Se representan diagramas de
  - Campo:  $|E|$ ,  $E_\theta$ ,  $E_\phi$ ,  $\arg(E_\theta)$ ,  $\arg(E_\phi)$ ,  $E_{CP}$ ,  $E_{XP}$  de entrada
  - Potencia:  $\langle S \rangle$ , Ganancia, Directividad
- La representación puede ser:
  - Valores absolutos: Se hacen tomando una  $P_{ent}$  a la antena, a una distancia determinada.
  - Valores relativos: Se toma el máximo de la función a representar como normalización. El diagrama de potencia y de campo coinciden, ya que,

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

- Las coordenadas angulares que se utilizan para la representación gráfica son:
  - $(\theta, \phi)$
  - $(u, v)$ , donde:

$$u = \text{sen}\theta \cdot \cos\phi$$

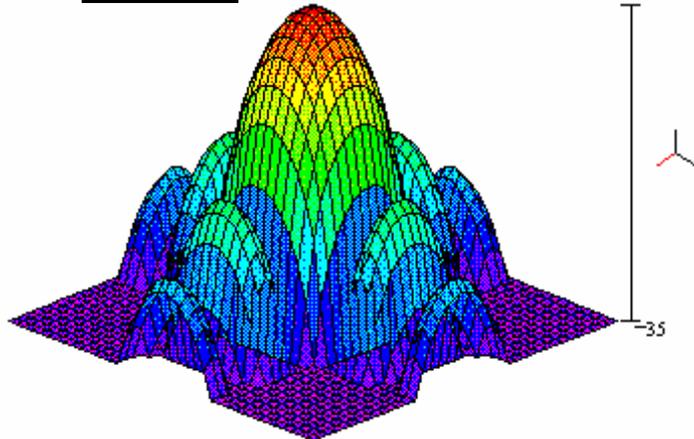
$$v = \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\phi$$



# 4.- Parámetros básico de una antena. b) Diagrama de radiación

- Desde el punto de vista de representación gráfica, se realizan 3 tipos de diagramas.

## 3D (u,v)

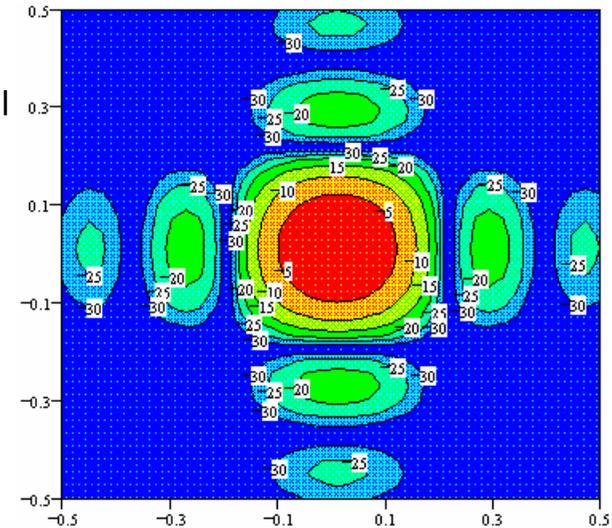


## 2D (u,v)

Representación de curvas de nivel

$$u = \text{sen}\theta \cdot \cos\phi$$

$$v = \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\phi$$



## 2D Cortes $\theta=\text{cte}$ y $\phi=\text{cte}$

- Cortes del diagrama por superficies planas:  $\theta=\text{variable}$  y  $\phi=90^\circ$

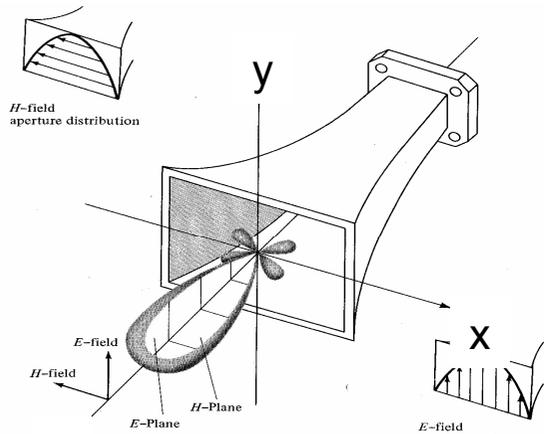
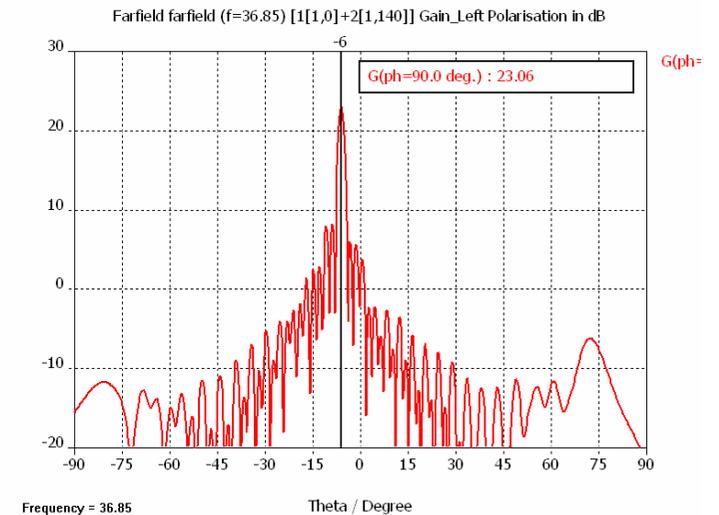


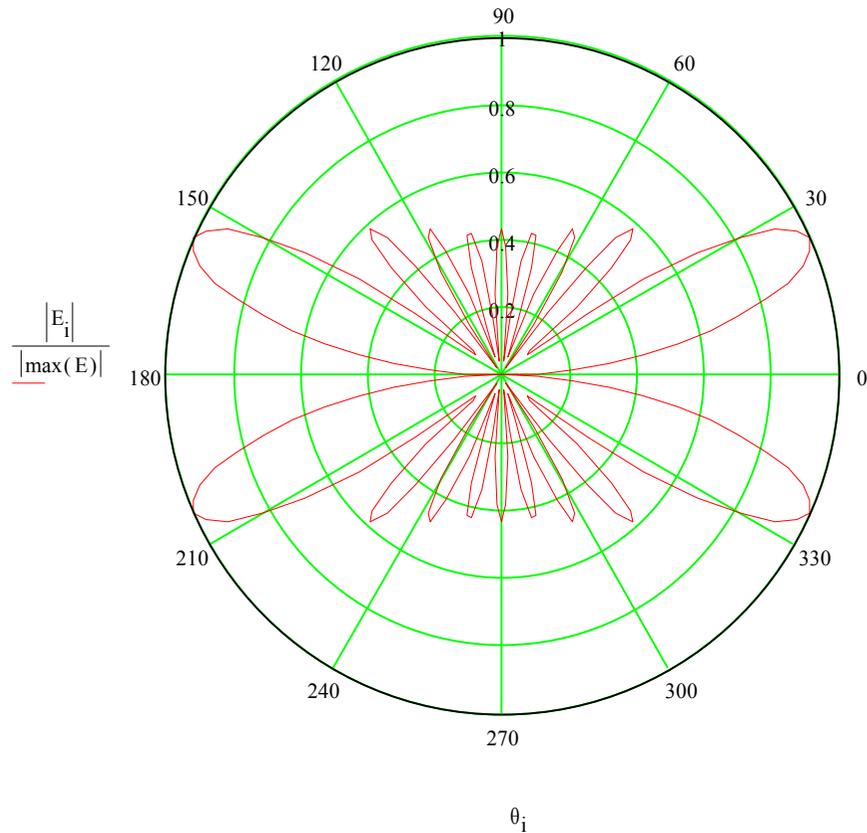
Fig. Z Principal E- and H-plane patterns for a pyramidal horn antenna.

- Para antenas directivas y polarización lineal, basta con conocer los diagramas de los planos principales
  - Plano E:** Contiene el vector E y la dirección de máxima radiación
  - Plano H:** Contiene el vector H y la dirección de máxima radiación

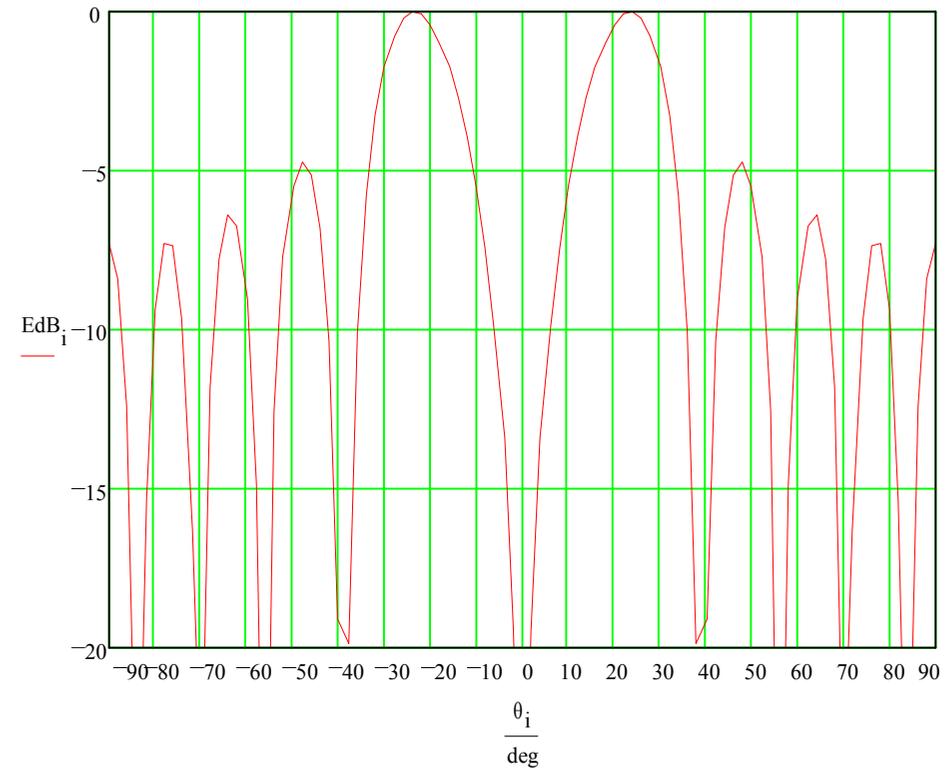


## 4.- Parámetros básico de una antena. b) Diagrama de radiación

- A veces la representación por cortes, se muestra en ejes polares.



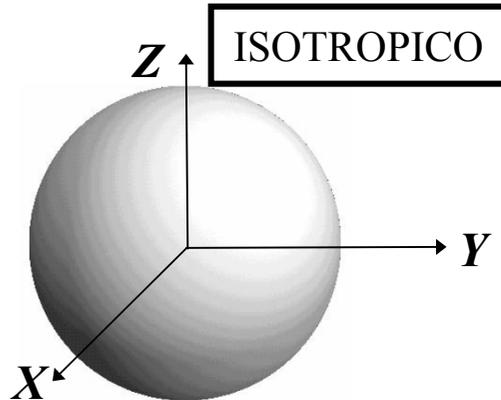
Polar (Lineal)



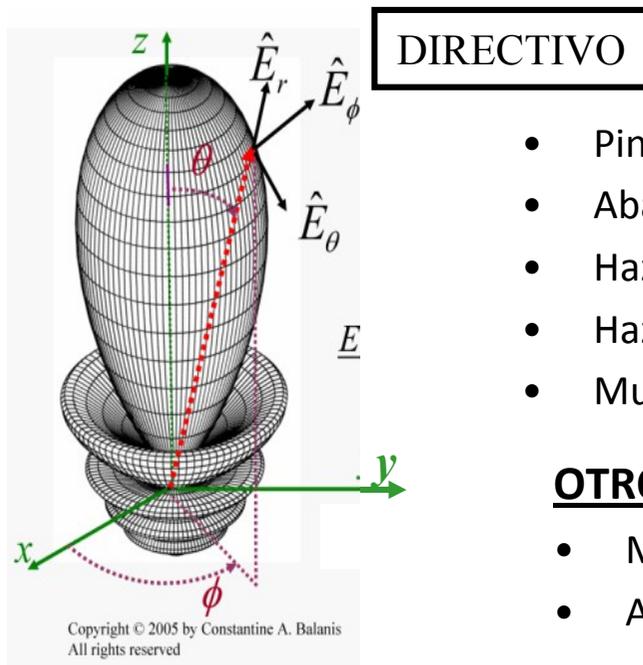
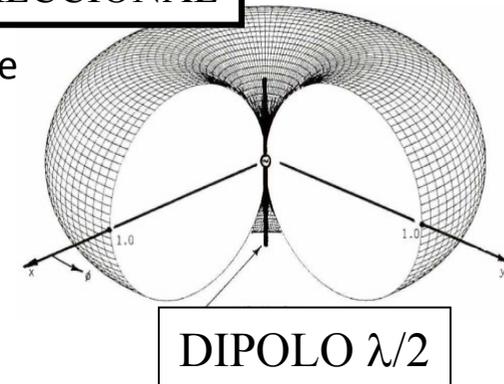
Cartesiano (dB)

## 4.- Parámetros básico de una antena. b) Diagrama de radiación

- Desde el punto de vista del servicio que presta la antena, los diagramas se clasifican en:



- Direccionales en un plano e isotrópicos en el otro



- Pincel: Haz cónico (Comunicaciones punto a punto)
- Abanico (antenas sectoriales de estaciones base telefonía móvil)
- Haz contorneado (servicios de cobertura DBS satélite)
- Haz conformado (radar de vigilancia)
- Multihaz (varios lóbulos principales)

### OTROS TIPOS DE DIAGRAMAS

- Multidiagrama: Varios diagramas simultáneos
- Antenas de haz reconfigurable

## 4.- Parámetros básico de una antena. b) *Diagrama de radiación*

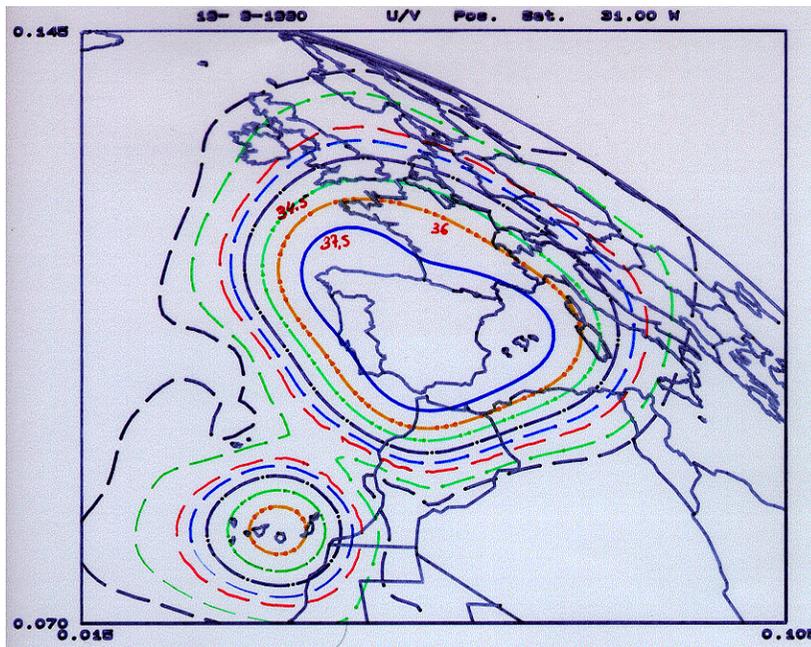
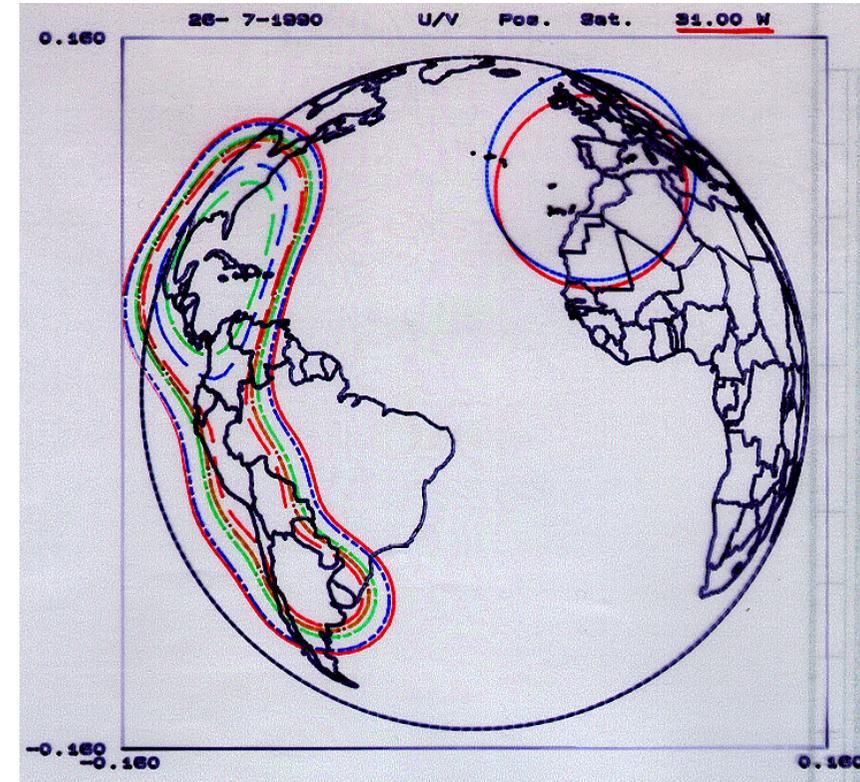


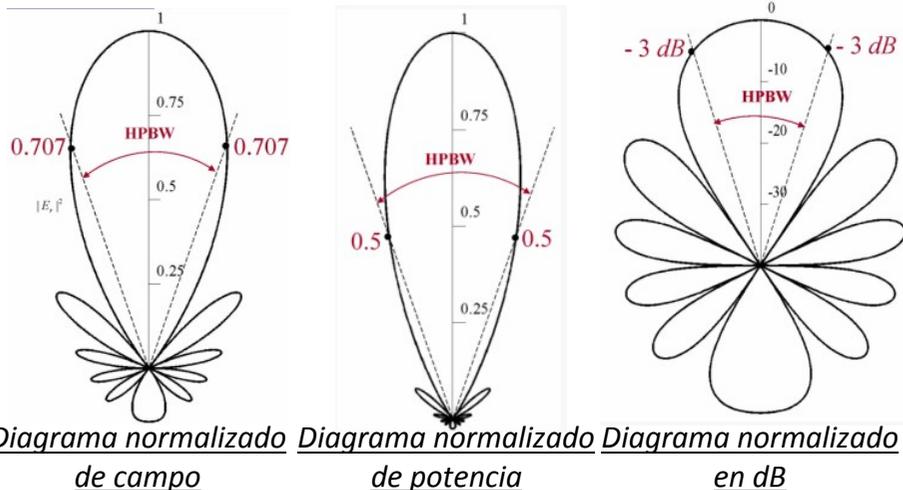
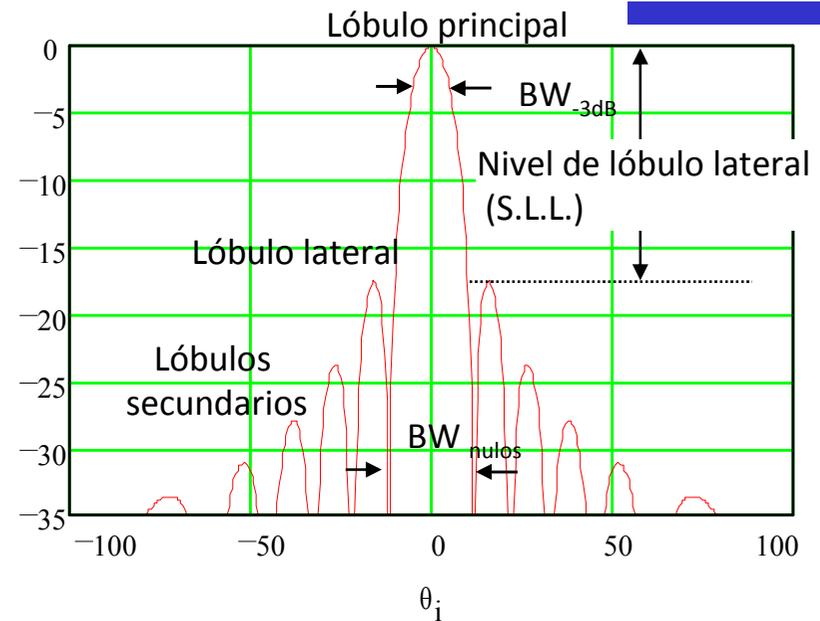
Diagrama multihaz de haces contorneados de la antena DBS del satélite HISPASAT.



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

## 4.- Parámetros básico de una antena. b) Diagrama de radiación

- **Lóbulo:** Porción del diagrama delimitada por regiones de radiación más débil.
  - **Lóbulo principal:** contiene la dirección de máxima radiación.
  - **Lóbulos secundarios:** los lóbulos distintos del principal
  - **Lóbulos laterales:** los lóbulos secundarios que se encuentran adyacentes al principal.
  - **Lóbulo posterior:** lóbulo situado aprox. a  $180^\circ$  respecto del principal.
- **Nivel de lóbulos secundarios:** relación entre el nivel del lóbulo principal y los lóbulos laterales
- **Ancho de haz a -3dB** (entre puntos de potencia mitad del lóbulo principal)



- **Ancho de haz entre nulos**

$$BW_n \approx 2.25 \cdot BW_{-3dB}$$

- **Relación delante-atrás,** entre lóbulo principal y posterior

## 4.- Parámetros básico de una antena. c) *Directividad (Intensidad de radiación)*

- **Angulo sólido:**

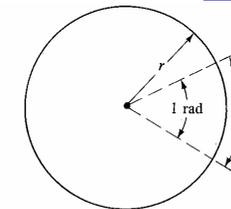
- Zona del espacio abarcada por una sucesión de líneas radiales con vértice el centro de una esfera
- Unidades: estereoradián (ángulo sólido abarcado por una superficie esférica de valor  $r^2$ , situada sobre una esfera de radio  $r$ )

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{r^2 \sin\theta d\theta d\phi}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi$$

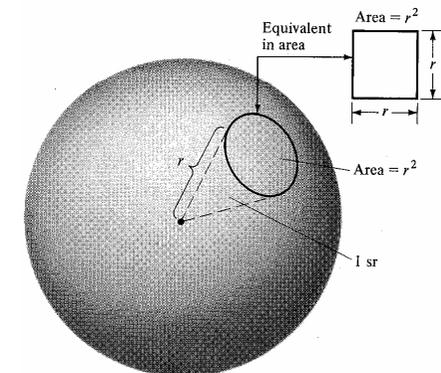
- **Intensidad de radiación:**

- Potencia radiada por unidad de ángulo sólido
- Representa la capacidad que tiene una antena para radiar energía en una determinada dirección

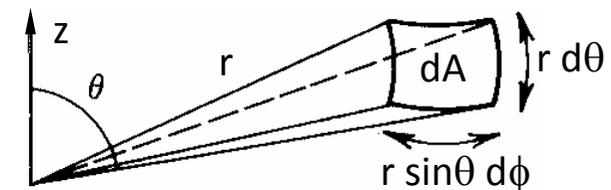
$$U(\theta, \phi) = \frac{\langle S(r, \theta, \phi) \rangle dS}{d\Omega} = r^2 \langle S(r, \theta, \phi) \rangle$$



(a) Radian



(b) Steradian



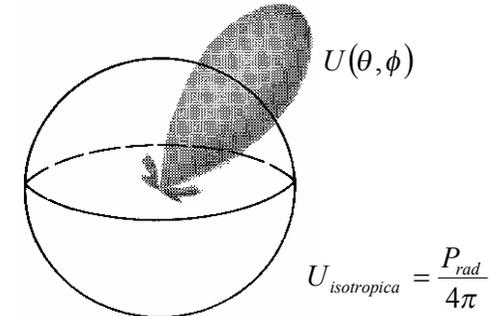
## 4.- Parámetros básico de una antena. c) Directividad

- **Directividad:  $D(\theta, \phi)$**

- Relación entre la intensidad de radiación de la antena en cada dirección del espacio, y la de una antena isotrópica que radiase la misma potencia total.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{isotropica}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} = 4\pi r^2 \frac{\langle S(\theta, \phi) \rangle}{P_{rad}}$$

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



- **Directividad máxima:  $D_0$**

- Valor de la directividad en la dirección  $(\theta_0, \phi_0)$  de máxima radiación. Se expresa en dBi, ya que, está referida a la radiación de una antena isotrópica de igual  $P_{rad} \rightarrow 10 \log D_0 \geq 0 \text{ dBi}$

- **Diagrama normalizado de potencia:**

$$f(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{MAX}} \leq 1$$

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{\int_{4\pi} U(\theta, \phi) d\Omega} = 4\pi \frac{f(\theta, \phi)}{\int_{4\pi} f(\theta, \phi) d\Omega}$$

$$= D_0 f(\theta, \phi)$$

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

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

- **Directividad y ancho de haz (-3dB):**

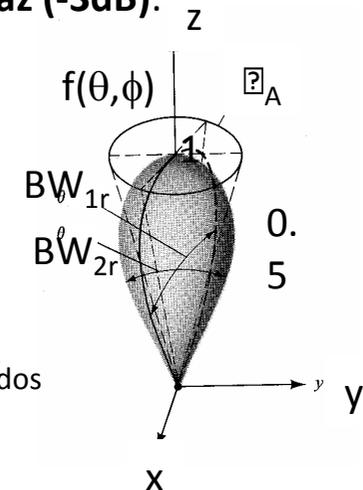
- Antenas directivas diagrama tipo pincel:

$$\Omega_A \cong BW_{1r} \cdot BW_{2r} \quad \text{radianes}$$

$$D_0 \cong \frac{4\pi}{BW_{1r} \cdot BW_{2r}} = \frac{41253}{BW_{1g} \cdot BW_{2g}}$$

- Antenas omnidireccionales: grados

$$D_0 \cong \frac{4\pi}{2\pi \cdot BW_{2r}} = \frac{114.6}{BW_{2g}}$$



## 4.- Parámetros básico de una antena. d) *Ganancia*



- **Ganancia de potencia:  $G(\theta, \phi)$** , es la relación en todas las direcciones del espacio, entre la intensidad de radiación de la antena y la de una antena isotrópica que aceptase la misma potencia entregada  $P_{ent}$  de la antena bajo análisis.

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

- **Ganancia máxima:  $G_0$** , valor de la ganancia de potencia en la dirección de máxima radiación  $\rightarrow 10\log G_0$  dBi. Puede ser  $< 0$  dBi
- **Rendimiento de radiación o eficiencia de antena (suele ser muy próximo a 1):**

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} = \frac{G_0}{D_0}$$



$$G(\theta, \phi) = \eta_{rad} \cdot D(\theta, \phi)$$

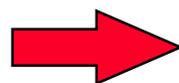
- Se suele dar en porcentajes. Ejemplos: Dipolo y bocina 90%, parche 80%, arrays impresos 70%, reflectores 65%
- **Potencia Isotrópica Radiada Equivalente, P.I.R.E:** Es una figura de mérito del conjunto transmisor antena. Se presentan curvas de P.I.R.E en dBW

$$\langle S(r, \theta, \phi) \rangle = \frac{G(\theta, \phi) \cdot P_{ent}}{4\pi r^2} = \frac{PIRE(\theta, \phi)}{4\pi r^2}$$

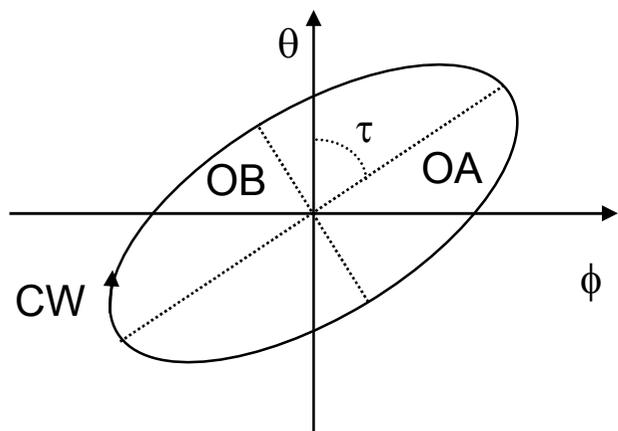
## 4.- Parámetros básico de una antena. d) Polarización

- Es la polarización del campo eléctrico radiado en la dirección de máxima radiación. Es la figura que traza en función del tiempo, para una dirección fija, el extremo del vector del campo radiado y su sentido de giro, visto por un observador desde la antena

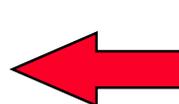
$$\vec{E} = E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi} \Rightarrow \begin{cases} E_\theta = |E_\theta| \cdot e^{j\delta_\theta} \\ E_\phi = |E_\phi| \cdot e^{j\delta_\phi} \end{cases}$$



$$\begin{aligned} E_\theta(t) &= |E_\theta| \cdot \cos(\omega t + \delta_\theta) \\ E_\phi(t) &= |E_\phi| \cdot \cos(\omega t + \delta_\phi) \end{aligned}$$



Elipse de polarización



$$\left( \frac{E_\theta(t)}{|E_\theta|} \right)^2 - 2 \frac{E_\theta(t)}{|E_\theta|} \frac{E_\phi(t)}{|E_\phi|} \cos \delta + \left( \frac{E_\phi(t)}{|E_\phi|} \right)^2 = \sin^2 \delta$$

$\delta = \delta_\phi - \delta_\theta =$  diferencia de fase entre las componentes  $E_\phi$  y  $E_\theta$ .

### Características de la Elipse

#### Ángulo del eje mayor con $\theta$

$$\tau = \frac{1}{2} a \tan \left( \frac{2|E_\theta||E_\phi| \cos \delta}{|E_\theta|^2 - |E_\phi|^2} \right)$$

#### Relación axial

$$AR = \frac{OA}{OB} = \cot \left[ \frac{1}{2} a \operatorname{sen} \left( \frac{2|E_\theta||E_\phi| \operatorname{sen} \delta}{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2} \right) \right]$$

Si  $\delta = \pi/2$ , la elipse está centrada en los ejes ( $\tau = 0$ )

## 4.- Parámetros básico de una antena. d) Polarización

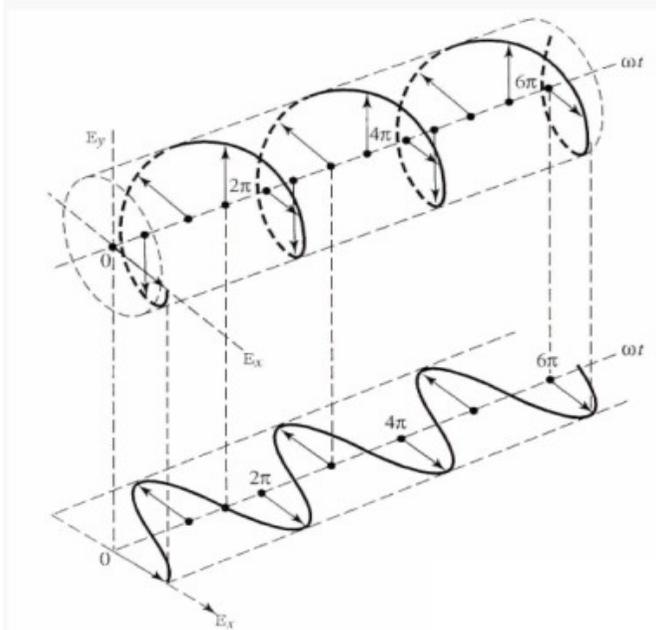
- Tipos de polarización

- Lineal: El campo se mueve sobre una recta ( $AR=\infty$ )

a)  $\delta=0$     b)  $E_{\theta}=0$     c)  $E_{\phi}=0$

- Circular: El extremo del campo se mueve sobre una circunferencia ( $AR=1$ )

$|E_{\theta}|=|E_{\phi}|$  y a)  $\delta=90^{\circ}$  (LHC=Circular a izquierdas)    b)  $\delta=-90^{\circ}$  (RHC=Circular a derechas)



Polarización circular a derecha

Polarización horizontal lineal

- Elíptica: El extremo del campo se mueve sobre una elipse. El sentido de giro será:

a)  $\delta<0$  (izquierdas)    b)  $\delta>0$  (derechas)

## 4.- Parámetros básico de una antena. d) Polarización

$$\vec{E}(\theta, \phi) = E_\theta(\theta, \phi)\hat{\theta} + E_\phi(\theta, \phi)\hat{\phi}$$



$$\vec{E}(\theta, \phi) = E_{CP}(\theta, \phi)\hat{u}_{CP} + E_{XP}(\theta, \phi)\hat{u}_{XP}$$

- Componentes CP y XP (son ortogonales entre sí).  
Los antenas se diseñan para radiar principalmente según su componente copolar

- Polarización lineal:

Según la 3ª definición de Ludwig para componentes lineales(copolar en eje y)

$$E_{CP}(\theta, \phi) = E_\theta(\theta, \phi)\sin\phi + E_\phi(\theta, \phi)\cos\phi$$

$$E_{XP}(\theta, \phi) = E_\theta(\theta, \phi)\cos\phi - E_\phi(\theta, \phi)\sin\phi$$

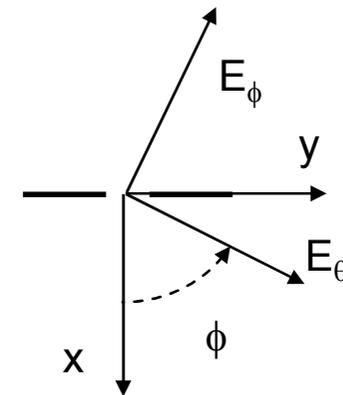
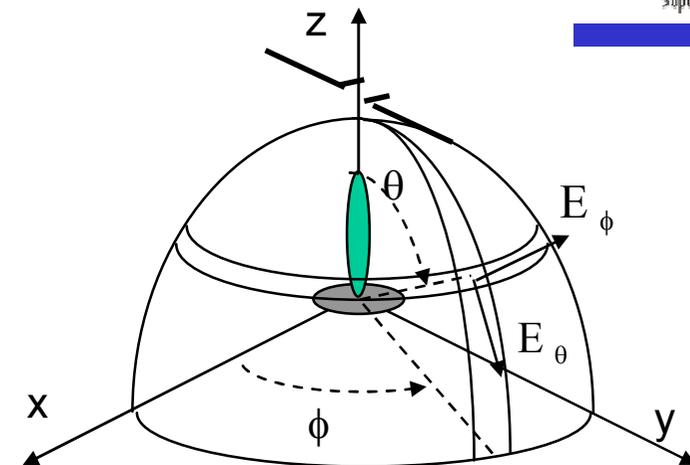
- Polarización circular:

$$E_{RHC}(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta(\theta, \phi) - jE_\phi(\theta, \phi))e^{-j\phi}$$

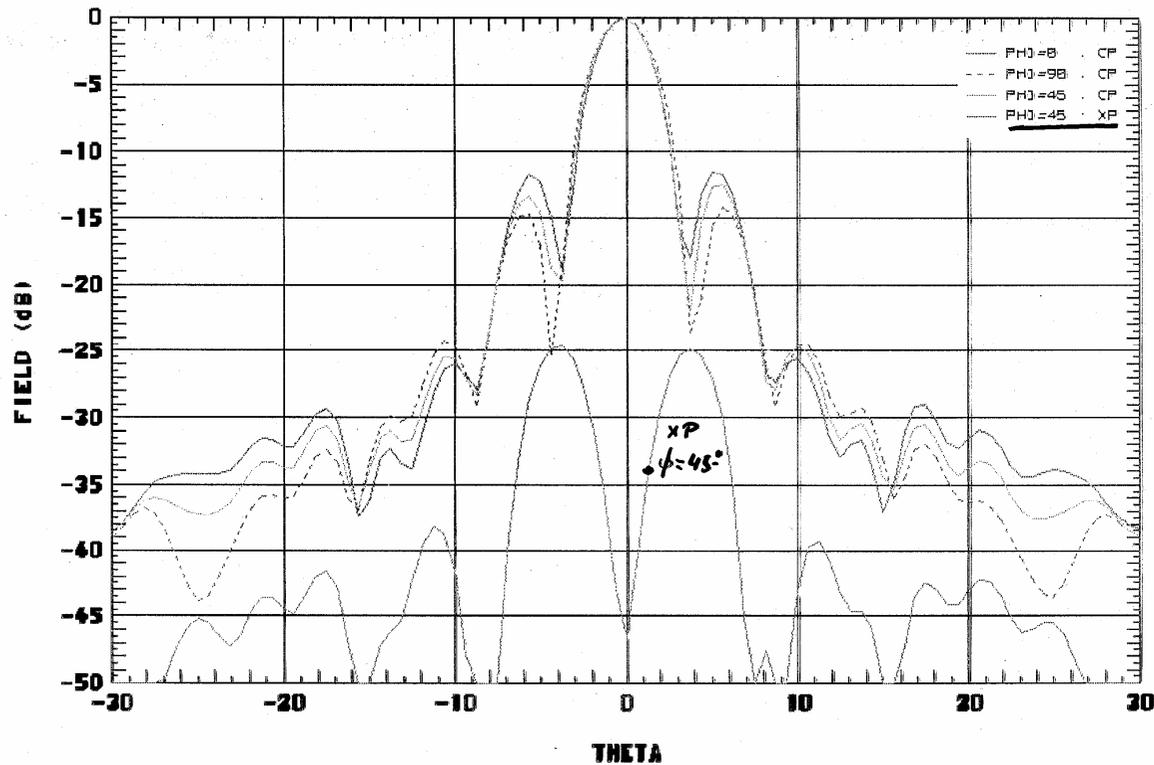
$$E_{LHC}(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta(\theta, \phi) + jE_\phi(\theta, \phi))e^{j\phi}$$

$$AR(\theta, \phi) = \frac{|E_{RHC}(\theta, \phi)| + |E_{LHC}(\theta, \phi)|}{||E_{RHC}(\theta, \phi)| - |E_{LHC}(\theta, \phi)||}$$

- Si  $AR = \infty \rightarrow$  Pol. Lineal
- Si  $AR = 1 \rightarrow$  Pol. circular



## 4.- Parámetros básico de una antena. d) Polarización



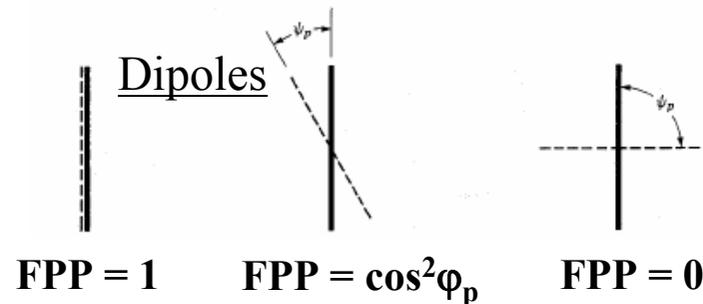
===== REFLECTOR IKUSI (SPLASH 3mm) =====  
===== F = 14.125 GHz =====

## 4.- Parámetros básico de una antena. d) Polarización

- En un enlace radio, la antena receptora solo acopla la componente de campo incidente con polarización igual a la suya. El **factor de pérdidas de polarización (FPP)**, establece la fracción de potencia transportada por la onda incidente en la polarización de la antena receptora.

$$FPP = |\hat{e}_{TX}(\theta, \phi) \cdot \hat{e}_{RX}(\theta, \phi)|^2$$

- Si ambas polarizaciones coinciden plenamente, el acoplo es perfecto  $\rightarrow FPP=1$
- En polarizaciones lineales  $\rightarrow FPP = \cos^2\varphi_p$  ( $\varphi_p$  = ángulo que forman las dos polarizaciones lineales)
- En polarizaciones circulares  $\rightarrow FPP = 1$ , con el mismo sentido de giro y  $FPP = 0$  con el opuesto
- Polarización lineal frente a circular  $\rightarrow FPP = 0.5$  siempre



## 5.- La antena en recepción. a) *Reciprocidad en antenas*

- **Antena en transmisión:**

- Alimentada por  $V_0$ , que genera una distribución de corriente  $I(l)$ . Dicha corriente, radia unos campos  $E$  y  $H$ , que localmente se comportan como onda plana.

- **Antena en recepción:**

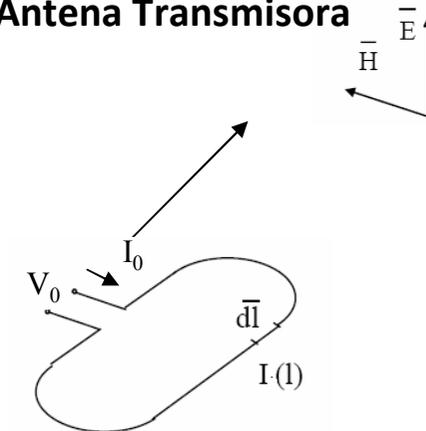
- Sobre la antena incide una onda localmente plana  $E^i$   $H^i$  (producida por otra antena transmisora alejada). Dicha onda genera una tensión  $V_{ca}$  sobre los terminales en circuito abierto de la antena.
- $V_{ca} \rightarrow E^i$  y  $H^i \rightarrow I_{1t}$  (distribución de corriente de la antena transmisora) y de la geometría de la antena receptora y distancia entre ambas

$$V_{ca} = -\frac{1}{I_0} \int_{ant} I(l) \vec{E}^i \cdot d\vec{l}$$

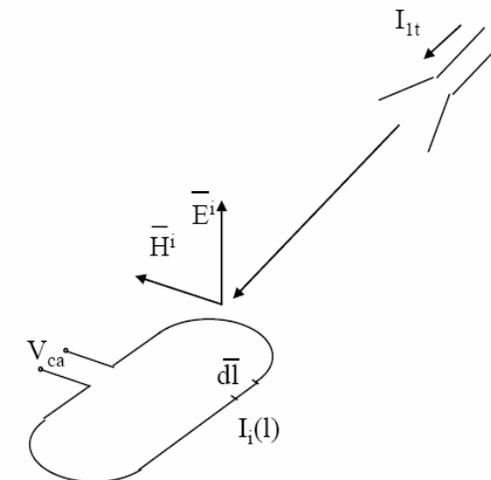
- Se define la impedancia mútua  $Z_{21}$  que mide el acoplo entr ambas antenas (con la receptora en circuito abierto)
- Dicho acoplo será simétrico.

$$Z_{21} = \frac{V_{ca2}}{I_{1t}} = Z_{12} = \frac{V_{ca1}}{I_{2t}}$$

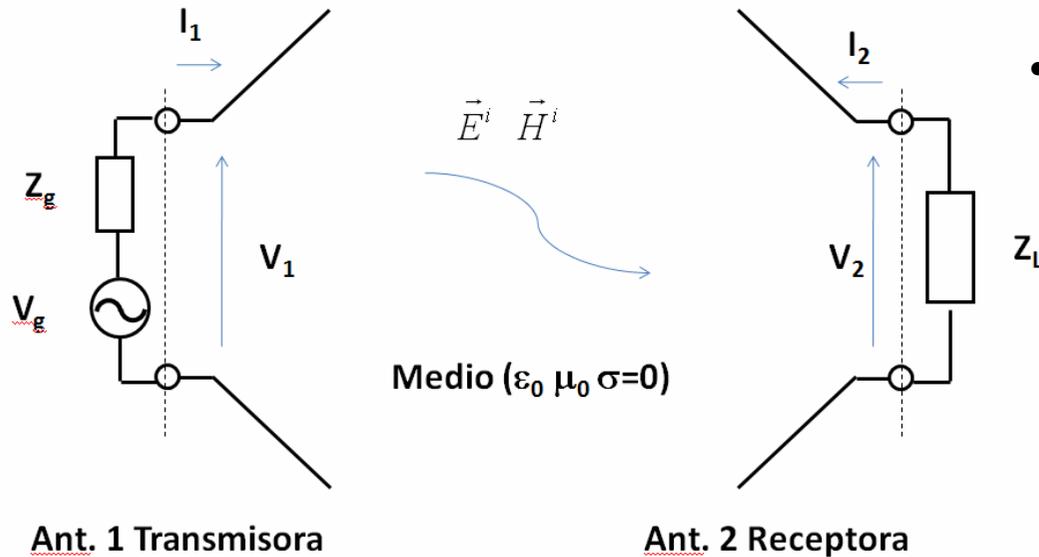
### 1. Antena Transmisora



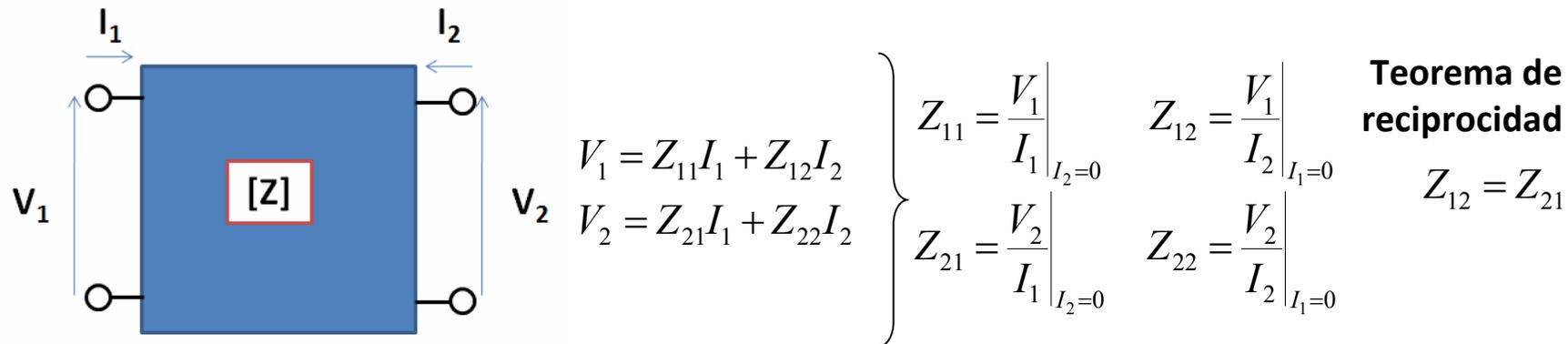
### 2. Antena Receptora



## 5.- La antena en recepción. a) *Reciprocidad en antenas*

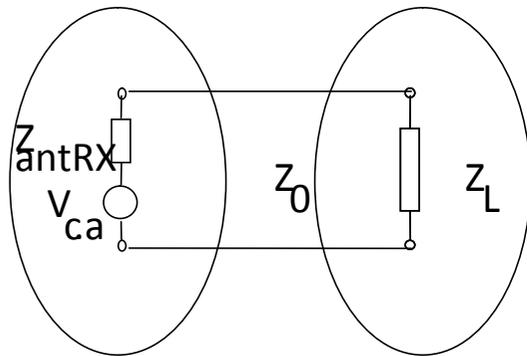


- **Teorema de reciprocidad de los diagramas**  
El diagrama de radiación en recepción y en transmisión de una antena es el mismo



## 5.- La antena en recepción. b) Area equivalente

- Por reciprocidad la impedancia de antena no depende de su modo de funcionamiento



Antena receptora

Receptor

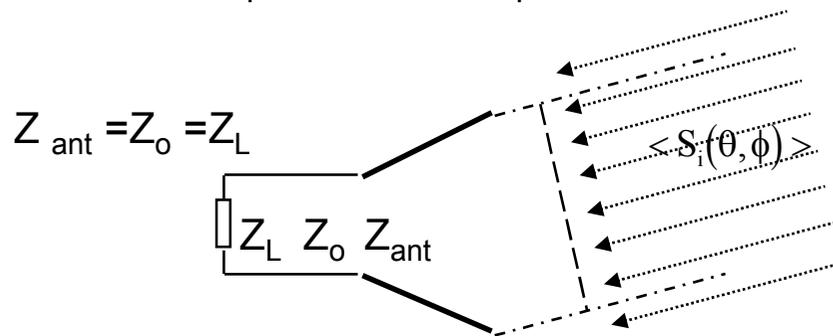
$$Z_{antRX} = Z_{antTX}$$

- Potencia disponible en la antena rx.:

$$P_{dRX} = \frac{1}{8} \frac{|V_{ca}|^2}{R_{antRX}}$$

- Potencia entregada al receptor:

$$P_{entRX} = \frac{1}{2} |I_L|^2 R_L = P_{dRX} (1 - |\Gamma_R|^2), \text{ donde, } \Gamma_R = \frac{Z_L - Z_{antRX}^*}{Z_{antRX} + Z_L} = \text{coef. reflexión}$$



- **Area equivalente de la antena**= Relación entre la potencia disponible en bornes de la antena y la densidad de potencia de la onda incidente. Indica que la antena es una apertura capaz de captar energía de una onda electromagnética incidente

$$A_e(\theta, \phi) = \frac{P_{dRX}(\theta, \phi)}{\langle S_i(\theta, \phi) \rangle} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\theta, \phi) \Rightarrow A_{e\max} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_0$$

- Relación con el área física de la antena

$$A_{e\max} = \eta_{rad} \cdot \eta_{aper} \cdot A_{aper} \Rightarrow G_0 = \eta_{rad} \cdot \eta_{aper} \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_{aper}, \text{ tal que, } \eta_{aper} = \text{eficiencia de apertura } (\leq 1, 0.5 - 0.8)$$

## 5.- La antena en recepción. c) *Fórmula de Friis*

- Resume el balance de enlace en condiciones de espacio libre, incluyendo la ganancia y desadaptaciones de las antenas transmisora y receptora

$$\langle S_i(r, \theta, \phi) \rangle = \frac{G_{TX}(\theta, \phi) \cdot P_{entTX}}{4\pi R^2} = \frac{PIRE(\theta, \phi)}{4\pi R^2}$$

$$A_e(\theta, \phi) = \frac{P_{dRX}(\theta, \phi)}{\langle S_i(\theta, \phi) \rangle} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{RX}(\theta, \phi)$$

$$\frac{P_{dRX}(\theta, \phi)}{P_{entTX}} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \cdot G_{RX}(\theta, \phi) \cdot G_{TX}(\theta, \phi)$$

**Fórmula de Friis con adaptación de impedancias y polarización**

- Incluyendo**

$$P_{entRX} = P_{dRX} (1 - |\Gamma_R|^2) \quad P_{entTX} = P_{dTX} (1 - |\Gamma_T|^2)$$



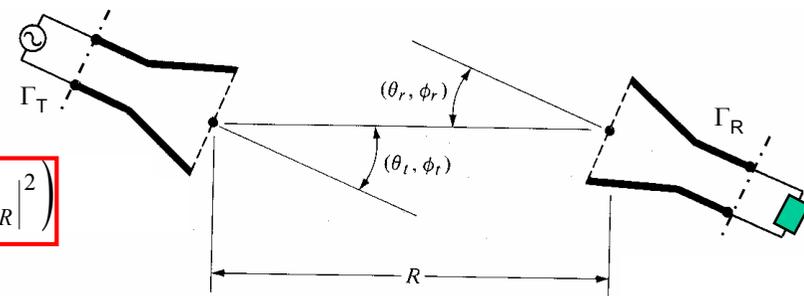
$$\frac{P_{entRX}(\theta, \phi)}{P_{dTX}} = |\hat{e}_{TX}(\theta, \phi) \cdot \hat{e}_{RX}(\theta, \phi)|^2 \cdot (1 - |\Gamma_T|^2) (1 - |\Gamma_R|^2) \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \cdot G_{RX}(\theta, \phi) \cdot G_{TX}(\theta, \phi)$$

**Fórmula de Friis genérica**



$$P_{entRX}(\theta, \phi) = \langle S_i(r, \theta, \phi) \rangle \cdot A_e(\theta, \phi) \cdot |\hat{e}_{TX}(\theta, \phi) \cdot \hat{e}_{RX}(\theta, \phi)|^2 (1 - |\Gamma_R|^2)$$

**Fórmula de Friis alternativa**



Geometrical orientation of transmitting and receiving antennas.

## 5.- La antena en recepción. d) *Pérdidas en un enlace*



- **Pérdidas de inserción del radioenlace (dB)** 
$$-10 \log \left( \frac{P_{entRX}(\theta, \phi)}{P_{dTX}} \right)$$
- **Pérdidas desacoplo polarización FPP** 
$$-20 \log \left( \left| \hat{e}_{TX}(\theta, \phi) \cdot \hat{e}_{RX}(\theta, \phi) \right| \right)$$
- **Pérdidas desadaptación de impedancias** 
$$-10 \log \left( 1 - |\Gamma_T|^2 \right) - 10 \log \left( 1 - |\Gamma_R|^2 \right)$$
- **Pérdidas de propagación en espacio libre** 
$$20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$
- **Ganancias de potencia de las antenas** 
$$G_{RX}(\theta, \phi)(dB), G_{TX}(\theta, \phi)(dB)$$

## 5.- La antena en recepción. e) *Temperatura de ruido de una antena*



- Todo cuerpo con temperatura diferente de 0°K desprende radiación incoherente (ruido)
- La antena capta esa radiación de los cuerpos que la rodean a través de su diagrama de radiación.
- La temperatura de ruido de la antena ( $T_A$  (°K)), da una idea de la potencia de ruido disponible en los bornes ( $N_{dRX}$ ) de la misma (captada a través de su diagrama de radiación)

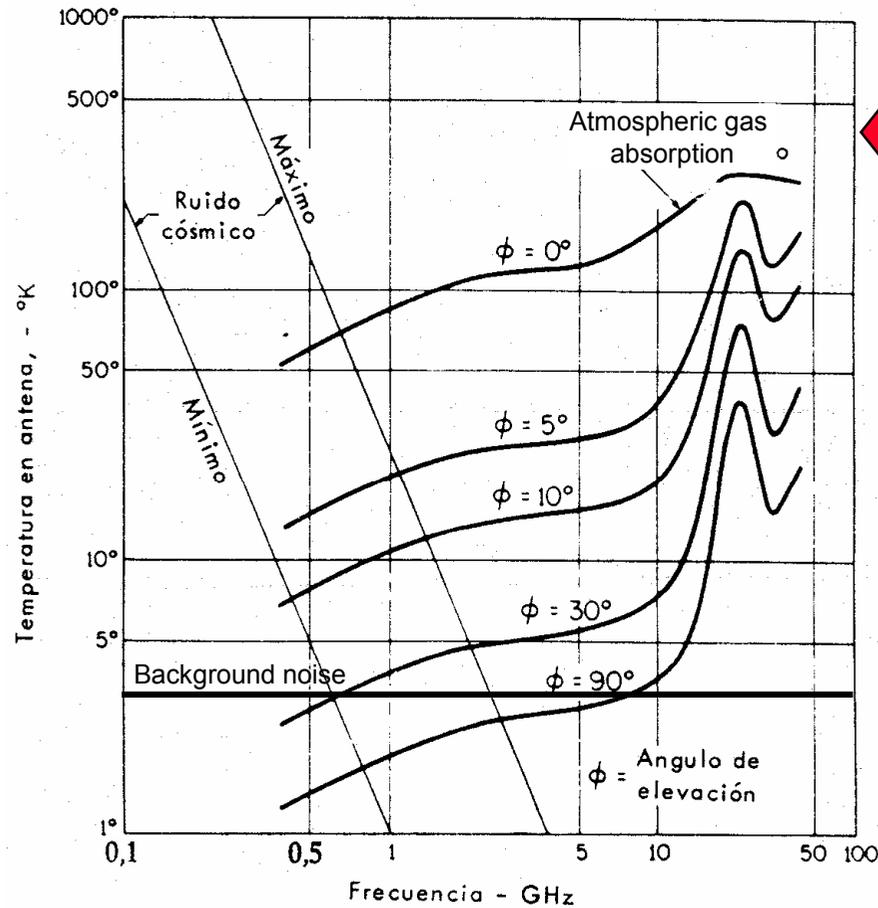
$$T_A = \frac{N_{dRX}}{k \cdot B_f}$$

- $k$  = cte. De Boltzman =  $1.38 \cdot 10^{-23}$  (julio/°K)
- $B_f$  = Ancho de banda de ruido (Hz)

- La temperatura de ruido de la antena depende de la orientación de la antena respecto de las radiofuentes celestes y de la atmósfera, así como de la banda de trabajo. Se puede calcular también en función de la temperatura de brillo  $T_b(\theta, \phi)$  asociada a la radiación de ruido que incide sobre ella

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} T_b(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega = \frac{1}{\Omega_A} \int_{\Omega_A} T_b(\theta, \phi) f(\theta, \phi) d\Omega$$

## 5.- La antena en recepción. e) *Temperatura de ruido de una antena*

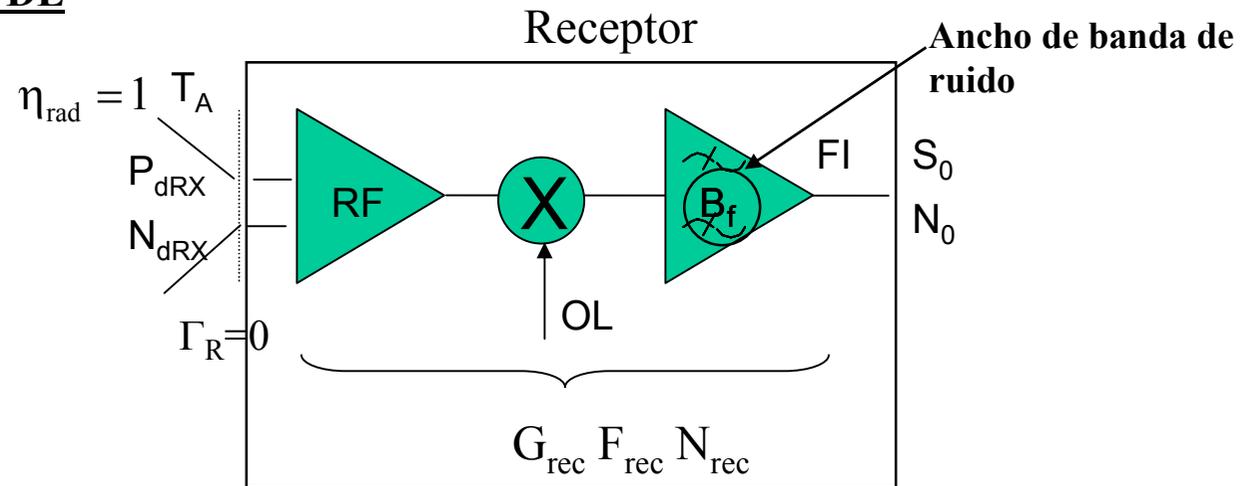


*Temperatura de ruido en frecuencias de microondas*

Atenuación atmosférica ( $L_{atm}$ , dB)	Temperatura de ruido adicional de la antena ( $\Delta T_A$ )
0,5 dB	27 K
1 dB	51 K
2 dB	92 K
3 dB	124 K
5 dB	170 K

## 5.- La antena en recepción. e) *Temperatura de ruido de una antena*

### ESQUEMA PARA EL ANALISIS DE RUIDO DE UNA ANTENA + RECEPTOR



**Potencia de ruido disponible en la antena:**

$$N_{dRX} = kB_f T_A$$

Temperatura de referencia = 290°K

$$N_{rec} = kT_{rec} B_f G_{rec} = k(F_{rec} - 1)T_o B_f G_{rec}$$

**Potencia de ruido introducida por el receptor**

**Señal a ruido a la salida, prefijada para asegurar la comunicación:**

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{G_{rec} \cdot P_{dRX}}{G_{rec} N_{dRX} + N_{rec}}$$

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{P_{dRX}}{kB_f (T_A + T_{rec})} = \frac{P_{dRX}}{kB_f T}$$

T = Temperatura de ruido total del sistema

## 5.- La antena en recepción. e) *Temperatura de ruido de una antena*



- La sensibilidad es la  $P_{dRX}$  mínima, que asegura el valor de relación señal a ruido necesaria para establecer las comunicaciones.

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{P_{dRX}^{\min}}{kB_f(T_A + T_{rec})} = \frac{P_{dRX}^{\min}}{kB_f T}$$

- Dicha  $P_{dRX}$  mínima permite, usando la fórmula de Friis, establecer la potencia del transmisor y la ganancia de las antenas más adecuadas para asegurar las comunicaciones.

$$\frac{P_{dRX}^{\min}(\theta, \phi)}{P_{dTX}} = |\hat{e}_{TX}(\theta, \phi) \cdot \hat{e}_{RX}(\theta, \phi)|^2 \cdot (1 - |\Gamma_T|^2) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot G_{RX}(\theta, \phi) \cdot G_{TX}(\theta, \phi)$$

- El parámetro G/T es una medida global del sistema receptor que conviene maximizar y que depende de la ganancia de la antena receptora  $G_{RX}$  y la temperatura total de ruido T.

$$P_{dRX}(\theta, \phi) = A_e(\theta, \phi) \cdot \langle S_i(\theta, \phi) \rangle$$

$$A_e(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{RX}(\theta, \phi)$$

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{\langle S_i(\theta, \phi) \rangle}{kB_f} \frac{\lambda^2}{4\pi} \left( \frac{G_{RX}(\theta, \phi)}{T} \right)$$