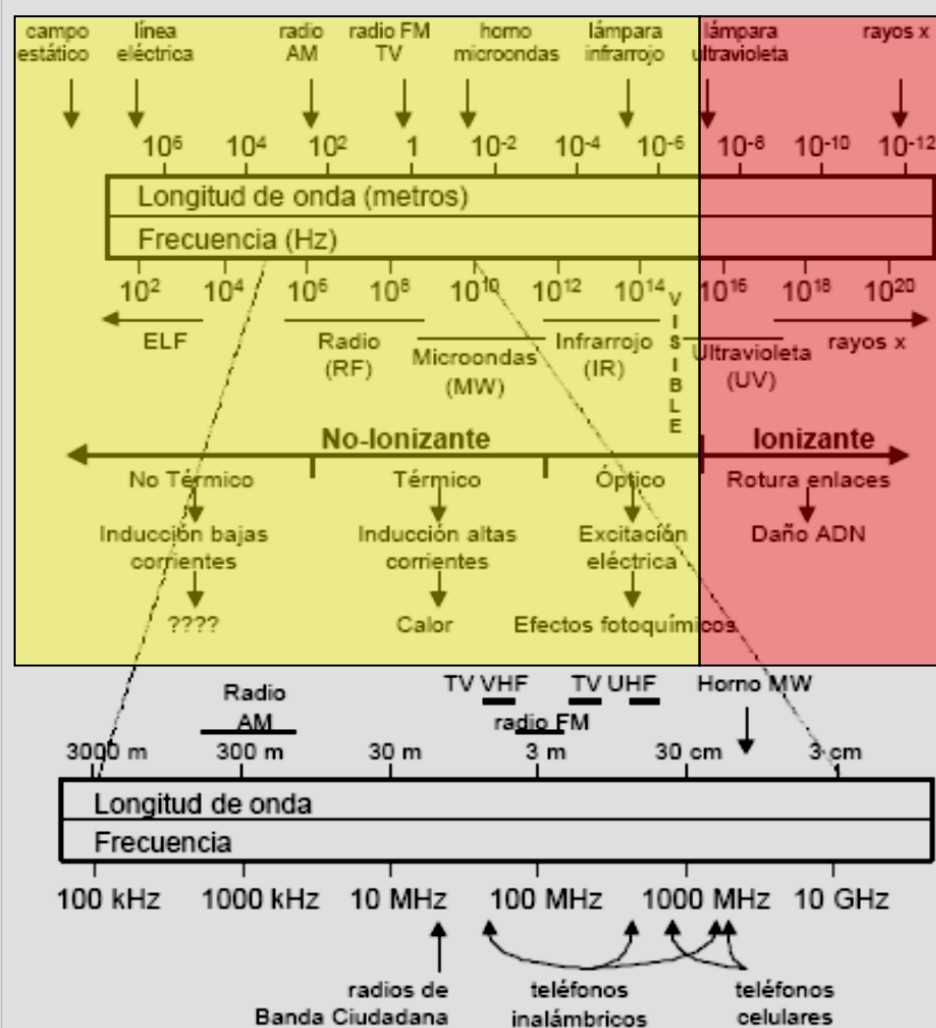


ANTENAS: INTRODUCCIÓN

PARÁMETROS DE ANTENAS

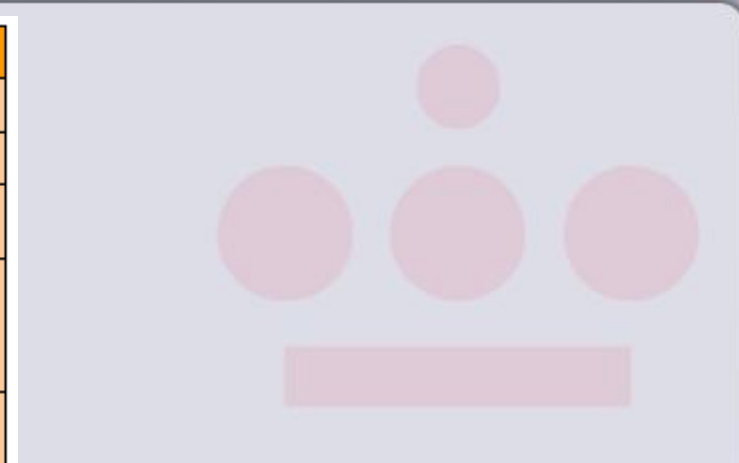
Espectro electromagnético



Introducción. Parámetros de Antenas.

Espectro electromagnético

Frequency Band	EM wavelength	Designation	Services
3 - 30 KHz	100 - 10 km	Very Low Frequency (VLF)	Navigation, sonar, submarine
30 - 300 KHz	10 - 1 Km	Low Frequency (LF)	Radio beacons, navigation
300 - 3000 KHz	1000 - 100 m	Medium Frequency (MF)	AM broadcast, maritime coastguard radio
3 - 30 MHz	100 - 10 m	High Frequency (HF)	telephone, telegraph, fax, amateur radio, ship-to-coast and ship-to-aircraft communications
30 - 300 MHz	10 - 1 m	Very High Frequency (VHF)	TV, FM broadcast; air traffic control, police
300 - 3000 MHz	100 - 10 cm	Ultra High Frequency (UHF)	TV, Satellite, radiosonde, radar
3 - 30 GHz	10 - 1 cm	Super High Frequency (SHF)	airborne radar, microwave links (WIMAX...), satellite, land mobile communications
30 - 300 GHz	10 - 1 mm	Extremely High Frequency (EHF)	radar, experimental



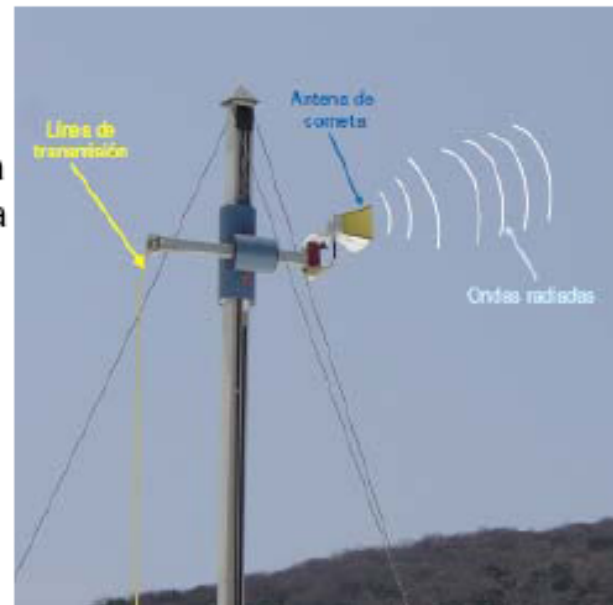
Microwave Band Designation

Frequency Band	Designation (Old)	Designation (New)
500 - 1000 MHz	VHF	C
1 - 2 GHz	L	D
2 - 3 GHz	S	E
3 - 4 GHz	S	F
4 - 6 GHz	C	G
6 - 8 GHz	C	H
8 - 10 GHz	X	I
10 - 12.4 GHz	X	J
12.4 - 18 GHz	Ku	J
18 - 20 GHz	K	J
20 - 26.5 GHz	K	K
26.5 - 40 GHz	Ka	K

ANTENA. Definición

Una antena es un dispositivo que radia y/o recibe ondas electromagnéticas

- Es la **transición** entre un dispositivo de guiado (línea de transmisión, guía de ondas) y el espacio libre
- Convierte **eficientemente** la energía guiada que le llega en energía radiada al espacio libre
- La potencia radiada tiene un cierto **patrón de distribución** en el espacio, envía la energía y la información que ella contiene a unas determinadas direcciones del espacio



Ecuaciones de Maxwell

- 1873. James Clerk MAXWELL formula el modelo matemático de electromagnetismo (Ecuaciones de Maxwell)
 - La luz es una onda electromagnética y todas las ondas EM se propagan por el espacio con la misma velocidad, la velocidad de la luz.



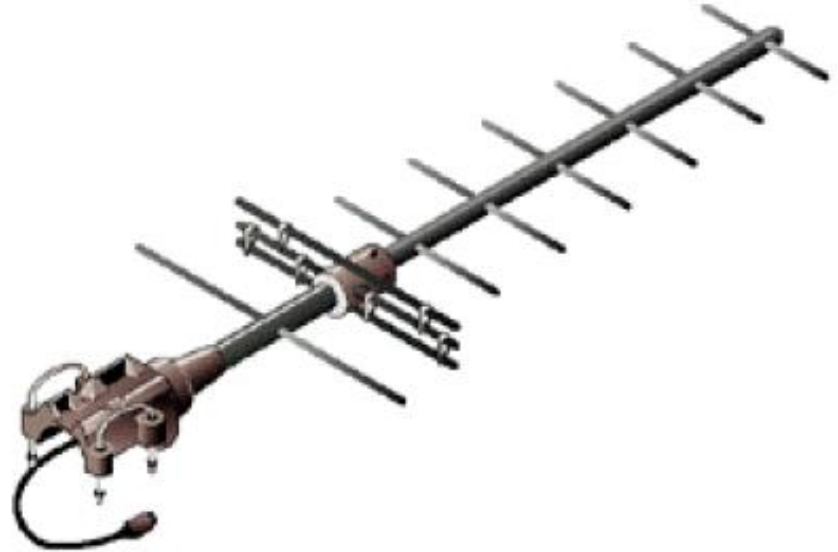
En el vacío	Caso general
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Antenas. Dipolos y Espiras



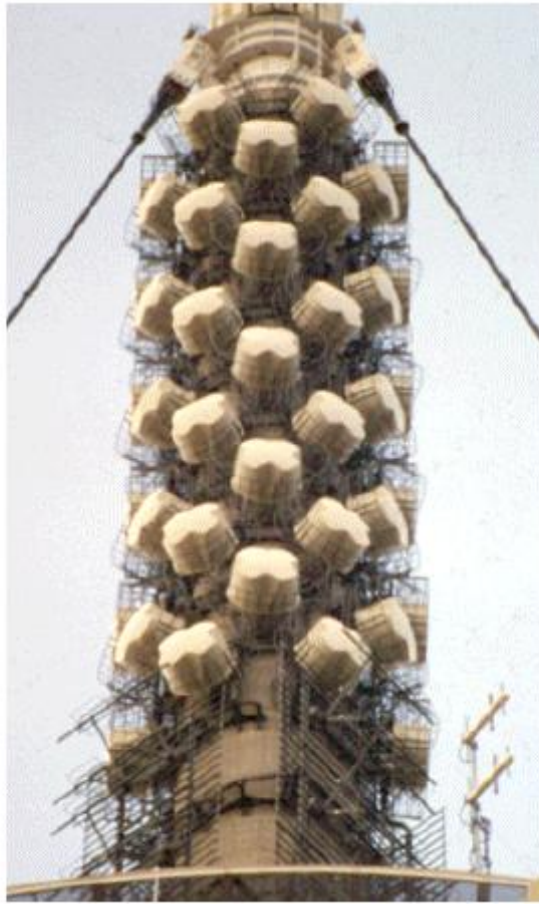
Introducción. Parámetros de Antenas.

Antenas. Yagi



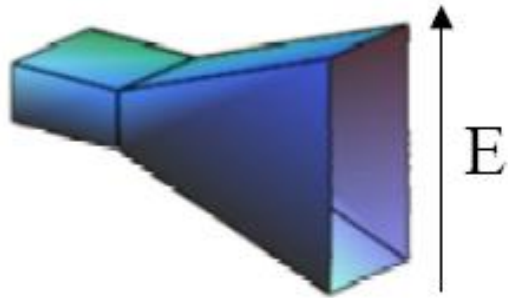
Introducción. Parámetros de Antenas.

Agrupaciones. Radiodifusión.

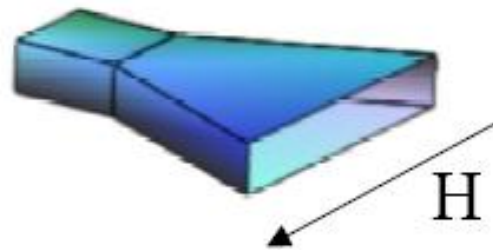


Introducción. Parámetros de Antenas.

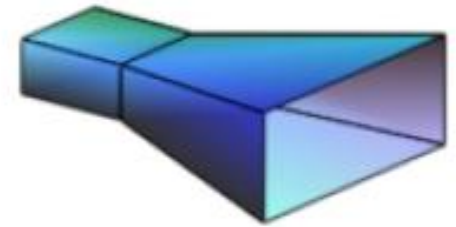
Antenas. Bocinas



Plano E

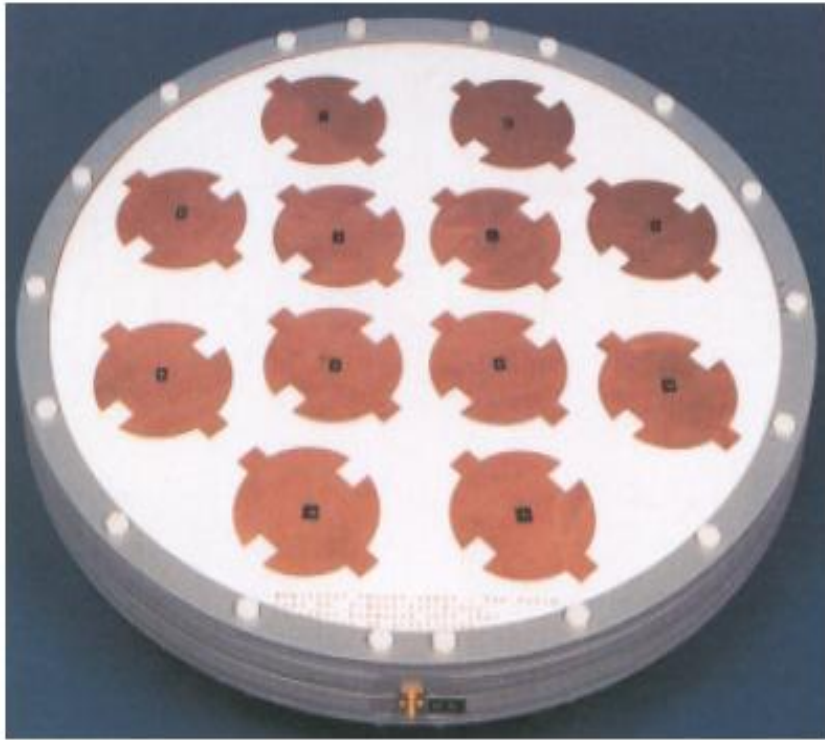


Plano H



Piramidal

Antenas. Impresas



Introducción. Parámetros de Antenas.

Antenas. Reflectores



Ámetros de Antenas.

Antenas. LogPeriódica



Introducción. Parámetros de Antenas.

ALGUNOS TIPOS DE ANTENAS

Barra-Mástil-Bandera.

Se utilizan normalmente en transmisión de señales FM, y telefonía móvil analógica (TACS), suelen tener diagramas de radiación horizontales de amplia apertura y simétricos. Llegando en algunos casos a ser sistemas omnidireccionales.



ALGUNOS TIPOS DE ANTENAS

Panel

En todos los casos son directivas y su utilización se centra en la telefonía móvil digital. Su forma queda determinada por el fabricante y el diagrama de radiación que se pretenda conseguir. El tamaño está determinado por el sistema a transmitir, teniendo en general unos 3 m para sistemas GSM y 1,7 m para DCS.



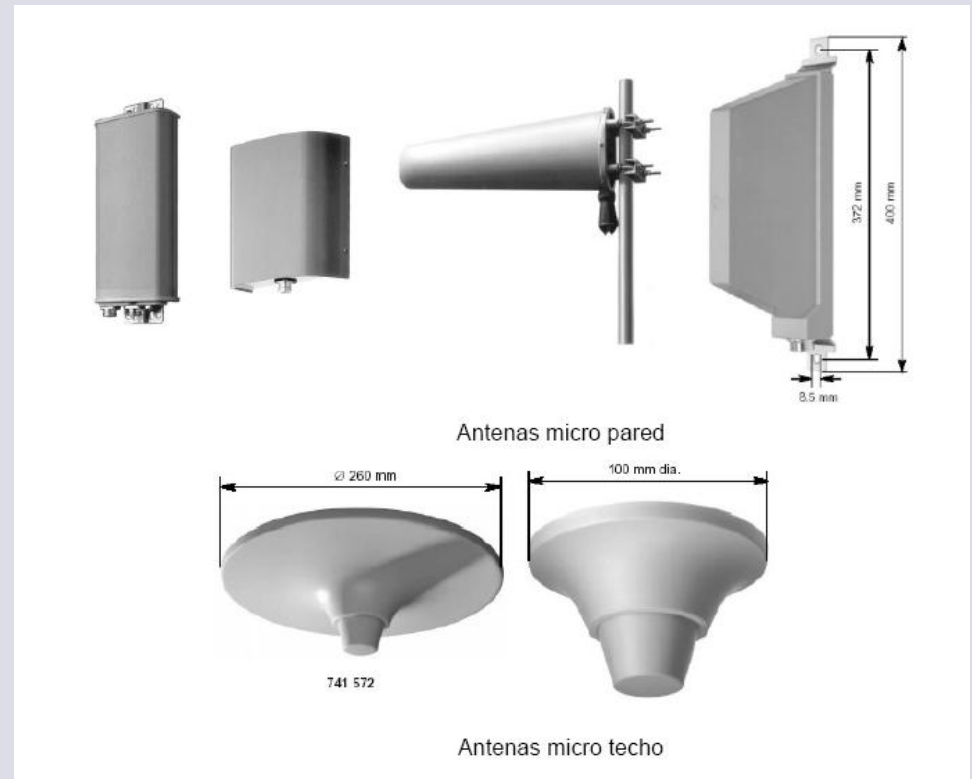
Antenas tipo panel

ALGUNOS TIPOS DE ANTENAS

Micro Celdas

En determinadas ocasiones es necesario el uso de sistemas de tamaño reducido, bien por que se desee una menor área cubierta o bien porque el espacio disponible para su colocación sea reducido. Se suelen instalar en el interior de los edificios públicos y en los centros urbanos, donde el número de usuarios por superficie suele ser alto y se pueden instalar un gran número de ellas.

Por el tamaño de este tipo de antenas suele ser más fácil ocultarlas a la vista y de este modo evitar los posibles problemas con las personas que vivan en su entorno.



DEFINICIÓN Y TIPOS DE ANTENAS. Historia

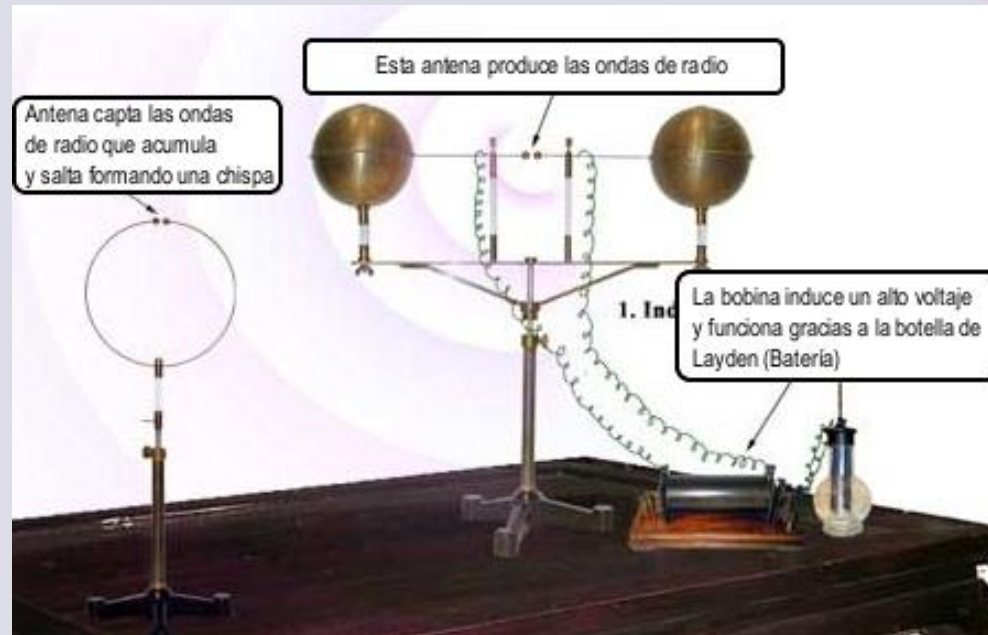
- En la telegrafía, introducida en 1844, seguida por la telefonía, en el año 1878, las señales se enviaban a través de líneas de transmisión de dos hilos conductores, que conectaban el emisor con el receptor.
- La teoría de las antenas surge a partir de los desarrollos matemáticos de James C. Maxwell, en 1854, corroborados por los experimentos de Heinrich R. Hertz, en 1887, y los primeros sistemas de radiocomunicaciones de Marconi en 1897.
- La primera comunicación transoceánica tuvo lugar en 1901, desde Cornualles a Terranova.
- Desde la invención de Marconi, hasta los años 40, la tecnología de las antenas se centró en elementos radiantes de hilo, a frecuencias hasta UHF. Inicialmente se utilizaban frecuencias de transmisión entre 50 y 100 kHz, lo que generaba antenas pequeñas en comparación con la longitud de onda. Tras el descubrimiento del tríodo por De Forest, se pudo empezar a trabajar a frecuencias entre 100 kHz y algunos MHz, con tamaños de antenas comparables a la longitud de onda.

DEFINICIÓN Y TIPOS DE ANTENAS.Historia

- A partir de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron nuevos elementos radiantes (guía ondas, bocinas, reflectores, etc).
- Importante fue el desarrollo de los generadores de microondas (como el magnetrón y el klystron) a frecuencias superiores a 1 GHz.
- En las décadas de 1960 a 1980 los avances en arquitectura y tecnología de computadores tuvieron un gran impacto en el desarrollo de la moderna teoría de antenas. Los métodos numéricos se desarrollaron a partir de 1960 y permitieron el análisis de estructuras inabordables por métodos analíticos.

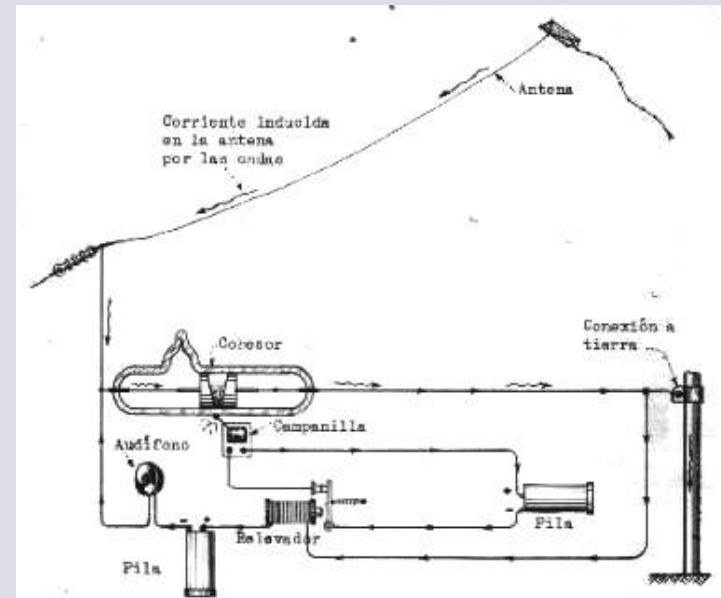
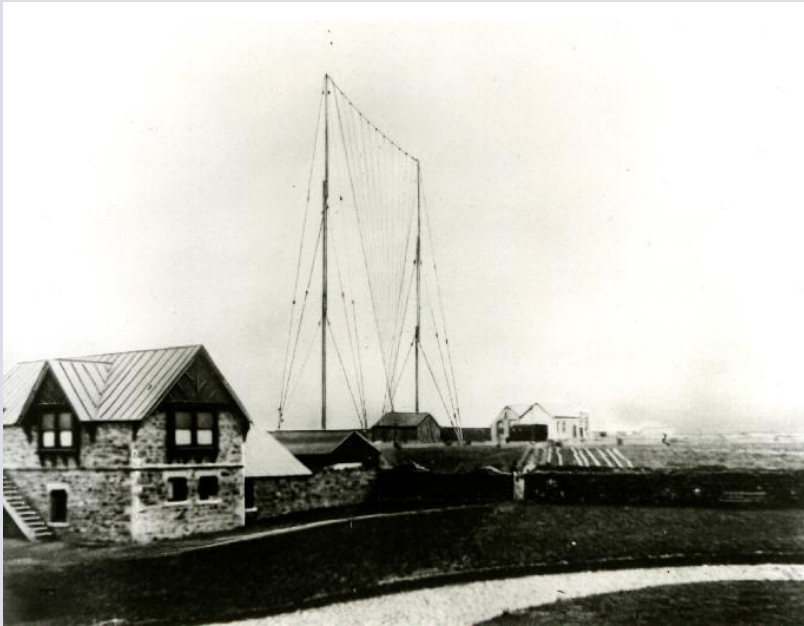
HITOS HISTÓRICOS

- 1886 Rudolph Heinrich HERTZ prueba la teoría electromagnética de Maxwell
Crea el primer sistema inalámbrico de transmisión de ondas.



HITOS HISTÓRICOS

- 1901 Guillermo MARCONI realiza la **primera comunicación transoceánica** entre Gran Bretaña y Terranova
Antena emisora: monopolo en abanico 820 KHz ($\lambda \approx 366\text{m}$)
Antena receptora: hilo metálico suspendido de una cometa



HITOS HISTÓRICOS

- II Guerra mundial:
Radar y telecomunicaciones:
 - Aperturas
 - Reflectores
 - Arrays
 - Radar....



HITOS HISTÓRICOS

- 2ª mitad S.XX
Desarrollo tecnología de microondas
 - Radioastronomía y comunicaciones vía satélite: Reflectores y arrays
 - Comunicaciones móviles y personales: Tecnologías impresas



ALMA (Atacama Large Millimeter Array)

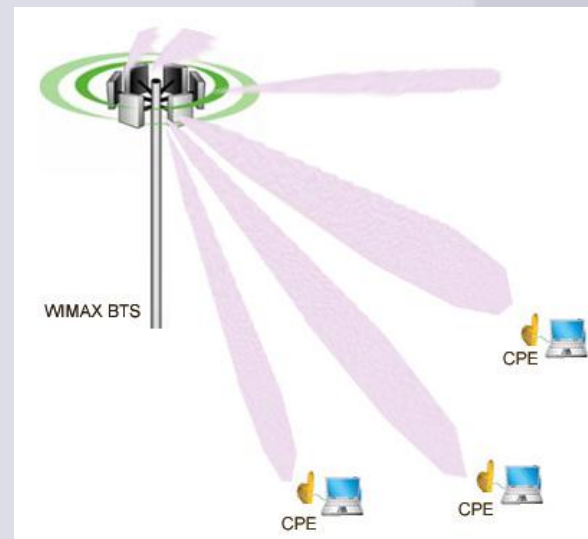


HITOS HISTÓRICOS

- Tendencias actuales
 - Antenas reconfigurables para comunicaciones vía satélite.
 - Miniaturización e integración de elementos radiantes. Tecnología impresa. Antena activa.
 - Arrays adaptativos: procesamiento de las señales individuales de los elementos sensores.



Antena IRMA (In-orbit Reconfigurable Multibeam Antenna)



TIPOS DE ANTENAS

Hay diferentes formas de clasificar las antenas:

- Según sus características de radiación espacial:
 - Omnidireccionales
 - Direccionales
- Según sus características frecuenciales:
 - Resonantes (banda estrecha)
 - Banda ancha (independ. de la frec., Ultra Wide Band)
- La más típica:
 - **Antenas de hilos**
 - **Antenas de apertura**
 - **Antenas impresas**
 - **Arrays de antenas**
 - **Reflectores y lentes**
- Según la aplicación habrá una antena con mejores características según nuestras necesidades.



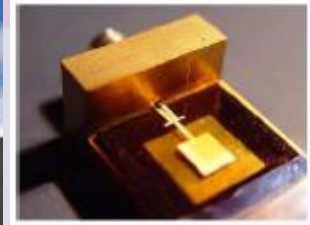
Dipolo



Antena de bocina



Array de dipolos



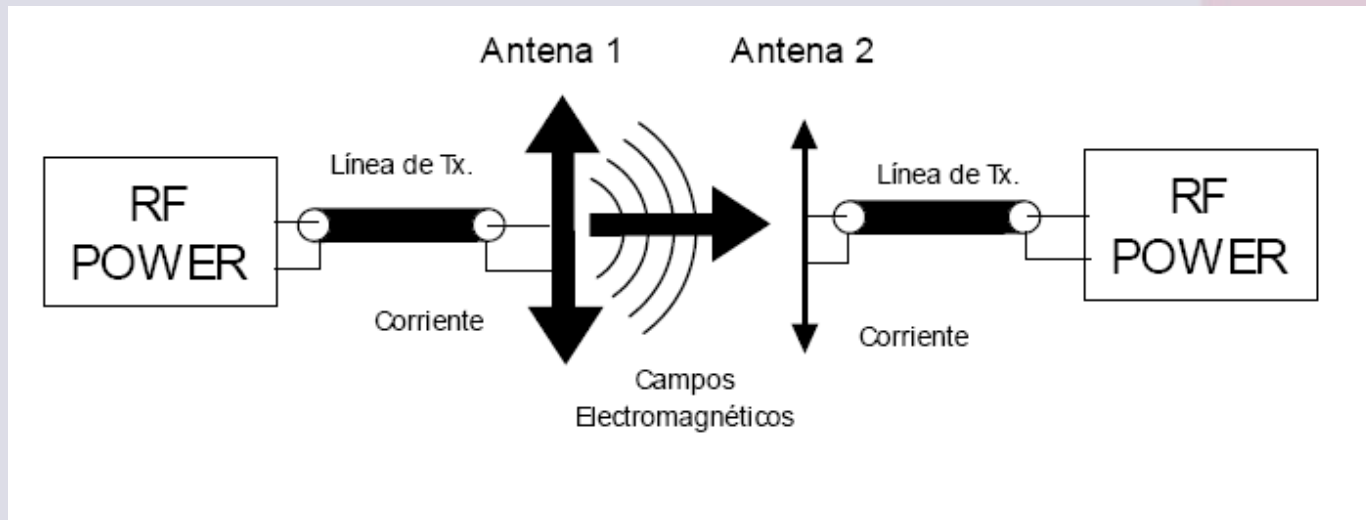
Patch antenna



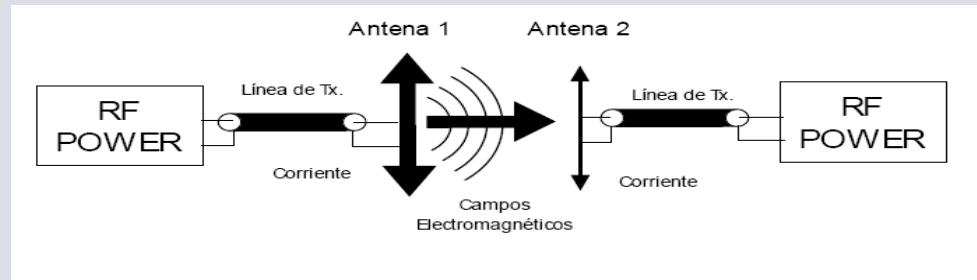
Waveguide lens antenna

DEFINICIÓN Y TIPOS DE ANTENAS. Definición

Una antena es un dispositivo pasivo (un arreglo de conductores eléctricos) que convierte potencia Radio-Frecuencia (RF) en campos electromagnéticos o en su defecto intercepta éstos mismos y los convierte a energía RF.



DEFINICIÓN Y TIPOS DE ANTENAS

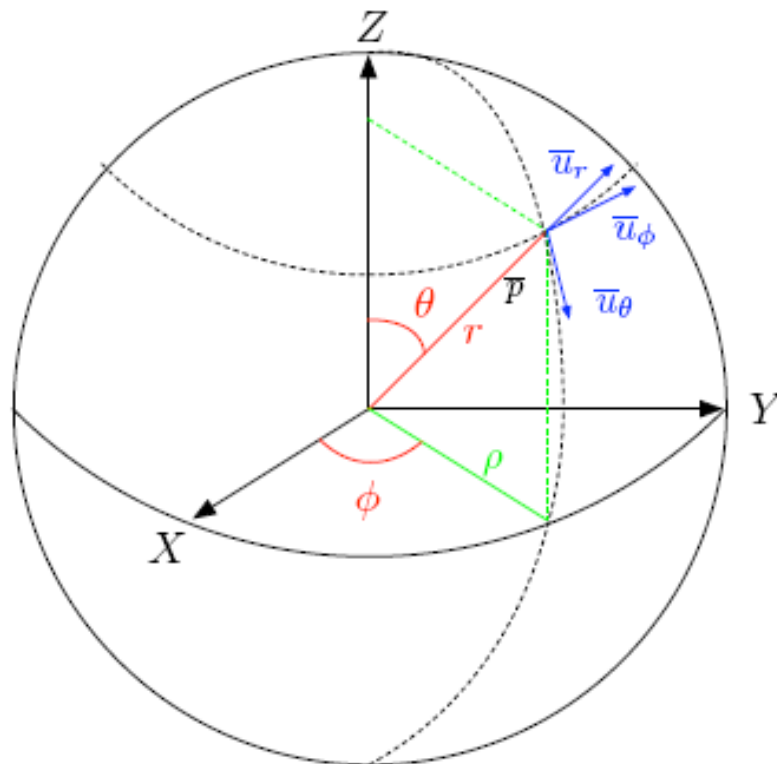


1. La potencia RF produce un flujo de corriente en la antena
2. La corriente genera una radiación campo electromagnético a través del espacio libre
3. El campo electromagnético induce pequeñas corrientes en cualquier conductor que alcance.
4. Estas pequeñas corrientes son réplicas idénticas de la corriente original en la antena de Tx.

SISTEMA DE COORDENADAS

El sistema de coordenadas utilizado habitualmente en antenas es el esférico.

1.3. Coordenadas esféricas



Un punto \bar{p} genérico en coordenadas esféricas se representa por:

$$\bar{p} = r \cdot \bar{u}_r + \theta \cdot \bar{u}_\theta + \phi \cdot \bar{u}_\phi,$$

donde:

$$0 \leq r \leq \infty,$$

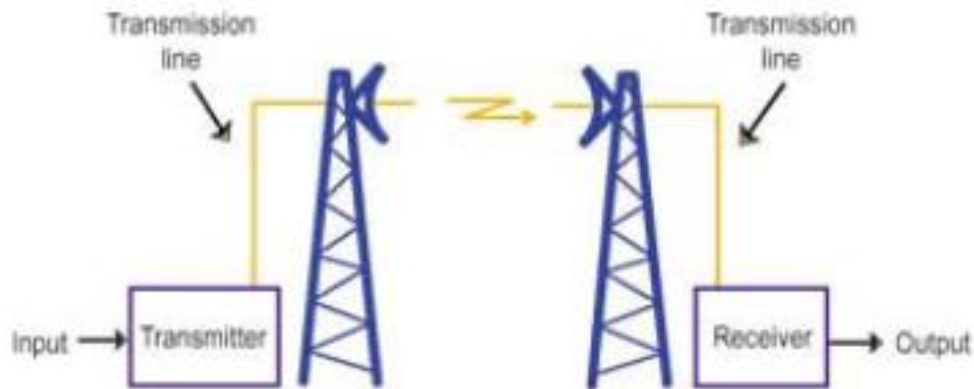
$$0 \leq \theta \leq \pi,$$

$$0 \leq \phi \leq 2\pi.$$

PARAMETROS FUNDAMENTALES ANTENAS

Como las expresiones de los campos son excesivamente complejas, se recurre a la caracterización de las antenas a través de parámetros medibles de más fácil interpretación.

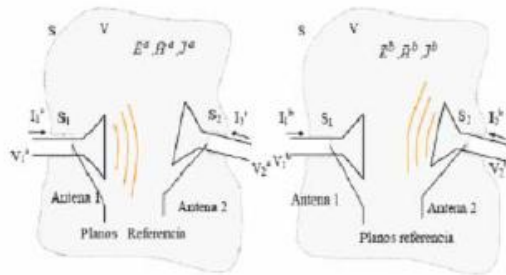
La antena forma parte de un sistema (radiocomunicación, radar, ...etc), influirá decisivamente en la calidad del enlace.



TRANSMISION-RECEPCIÓN

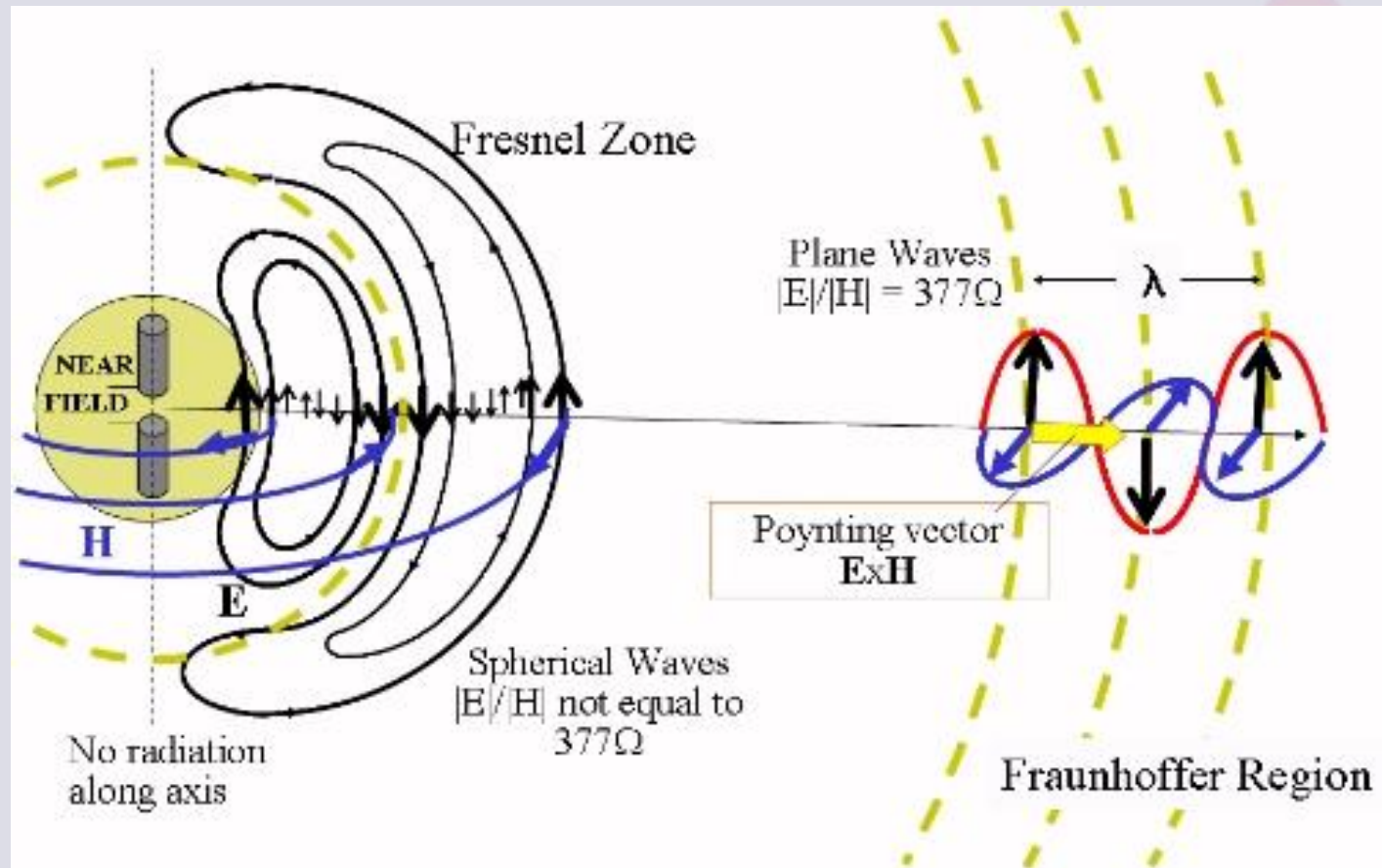
■ PRINCIPIO DE RECIPROCIDAD

- Hemos definido todos los parámetros en TRANSMISIÓN pero...
- La antena se comporta igual en transmisión y en recepción.
 - Sus parámetros:
 - Diagrama de radiación
 - Directividad
 - Ganancia
 - **SON LOS MISMOS**



- **PARAMETROS EN TRANSMISIÓN**
 - IMPEDANCIA DE ENTRADA
 - COEFICIENTE DE REFLEXIÓN
 - EFICIENCIA DE LA ANTENA
- **PARAMETROS EN RECEPCIÓN**
 - AREA EQUIVALENTE O EFECTIVA

RADIACIÓN: INTENSIDAD, DENSIDAD ENERGÍA



DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA $\langle S \rangle$

Se define como la potencia radiada por unidad de superficie en una determinada dirección

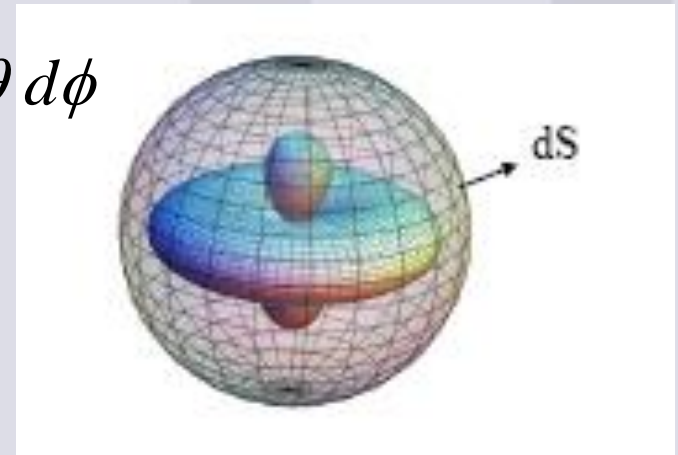
$$\langle S(\theta, \phi) \rangle = \langle S \rangle = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E \times H^*) \quad (\text{W/m}^2)$$

Y la potencia total radiada...

$$P_{tot} = \int_s \langle S \rangle ds = \int_s \langle S \rangle r^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

Una antena isotrópica
radia igual en todas
direcciones

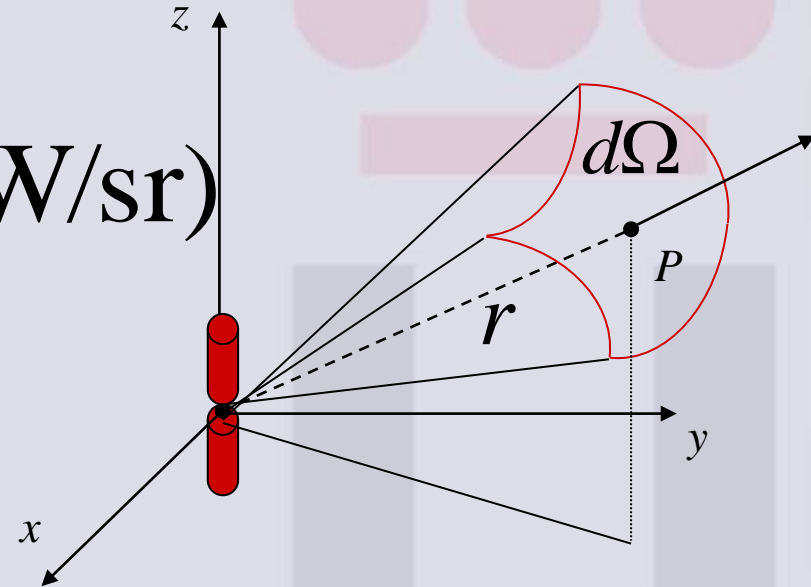
$$\langle S_{iso} \rangle = \frac{P_{tot}}{4\pi \cdot r^2}$$



INTENSIDAD DE RADIACIÓN (U)

Es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección. A grandes distancias es independiente de la distancia a la que se encuentre la antena

$$U(\theta, \phi) = \langle S \rangle \cdot r^2 \quad (\text{W/sr})$$



$$P_{tot} = \int_s \langle S \rangle ds = \int_s \langle S \rangle r^2 \sin\theta d\theta d\phi = \int_s U(\theta, \phi) d\Omega$$

DIRECTIVIDAD

Relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena

$$D(\theta, \phi) = \frac{\langle S(\theta, \phi) \rangle}{\langle S_{iso} \rangle} = \frac{\langle S(\theta, \phi) \rangle}{P_{tot.rad} / (4\pi r^2)}$$

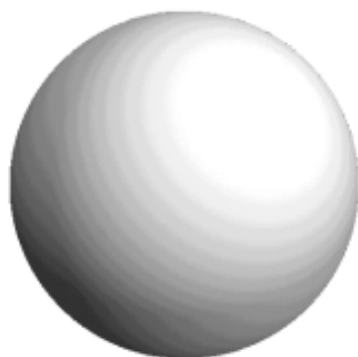
Antena
isotrópica:
Directividad: 1

Intensidad de radiación de una antena dada y la intensidad de radiación de una antena isotrópica

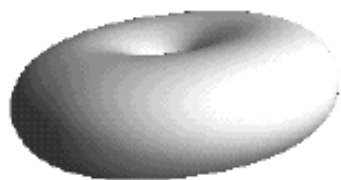
$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{iso}} = \frac{U(\theta, \phi)}{P_{tot} / 4\pi}$$

Si no se especifica dirección angular, se entiende que hablamos de la dirección de máxima radiación

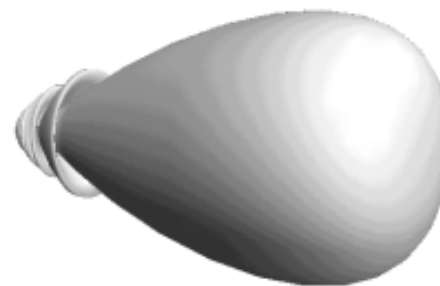
Directividad



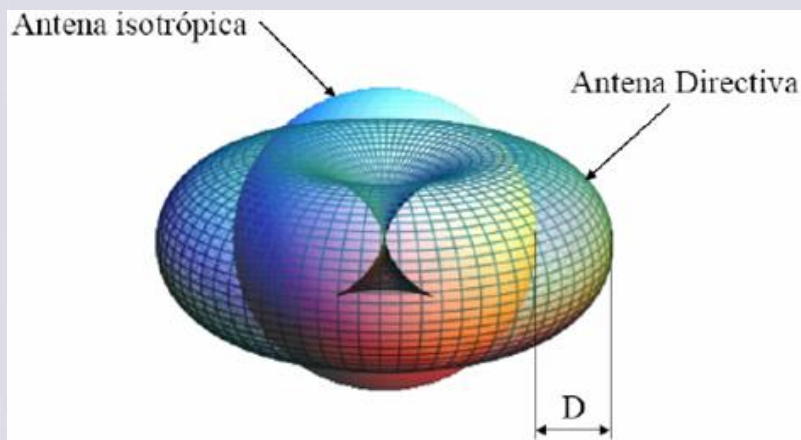
ISOTRÓPICO



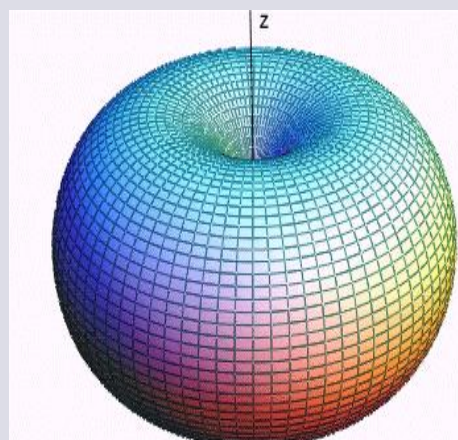
OMNIDIRECCIONAL



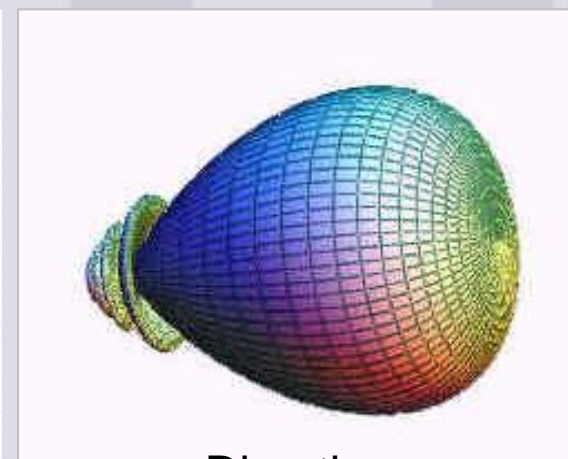
**DIRECTIVO
Tipo pincel**



Isotrópica



Omni



Directiva

ANGULO SÓLIDO EQUIVALENTE

Se define angulo sólido equivalente como:

$$\Omega_e = \frac{4\pi}{D_{\max}} = \int \frac{\langle S \rangle}{\langle S_{\max} \rangle} \text{sen } \theta \, d\theta \, d\phi$$

Ángulo sólido $d\Omega$

Antenas directivas implican Ω_e pequeños

$$\text{En antenas muy directivas : } D = \frac{4\pi}{\Omega_e} = \frac{4\pi}{\theta_1 \theta_2}$$

En antenas muy directivas se puede obtener una directividad aproximada considerando radiación uniforme en el ángulo sólido de los anchos de haz a -3dB en los dos planos principales

Puesto que en antenas muy directivas el haz se abre muy poco y el ángulo sólido es muy cercano a una superficie plana

GANANCIA

- La relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias **entregadas** a la antena (puesto que la potencia entregada a la antena y la radiada no son iguales, hay pérdidas Joule...)

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

La capacidad que posee una antena para concentrar la radiación en una determinada región del espacio se denomina **GANANCIA**. Se suele expresar en decibelios referidos a la isotrópica (dBi), antena ideal empleada como referencia

La definición es muy similar a la de **DIRECTIVIDAD**, sustituyendo Potencia radiada por Potencia **entregada**

$$\text{Eficiencia } \eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada \text{ a la antena}}} \quad D(\theta, \phi) = \frac{\langle S(\theta, \phi) \rangle}{\frac{P_{tot.rad}}{4\pi r^2}}$$

GANANCIA. Ejemplo

Un emisor de 1000 watos de potencia, emite una señal mediante una antena de eficiencia 0.95 y de directividad 3

¿Cuál es la ganancia de la antena?,

La potencia radiada es: $0.95 \times 1000 = 950 \text{ W}$

La densidad de potencia radiada en la dirección del lóbulo principal es 3 veces mayor que la que tendríamos con una antena isotrópica que radiara 950 W

La potencia radiada en la dirección del lóbulo principal es $3 \times 950 = 2850 \text{ W}$

La ganancia es pues: $G = 0.95 \times 3 = 2.85$

GANANCIA. Ejemplo telefonía móvil

Las antenas utilizadas en las estaciones base de telefonía móvil suelen tener ganancias entre 10 y 16 dBi, lo que equivale a decir que en la dirección de máxima radiación la antena emite una potencia de 10 (10dB) a 40 (16dB) veces superior a la potencia que recibe del transmisor. Esto no quiere decir que la antena amplifique la potencia, sino únicamente que no radia la potencia a todo el espacio y la concentra en una zona alrededor de la dirección de máxima radiación emitiendo muy poca o ninguna potencia en otras direcciones

Cada transmisor entrega a la antena una potencia de 12.6W. Cada antena suele tener señal de hasta 4 transmisores. Si la antena tiene una ganancia máxima de 16 dBi (40 veces). La potencia máxima que puede radiar es de:

$$12.6 \times 4 \times 40 = 2000 \text{ W}$$

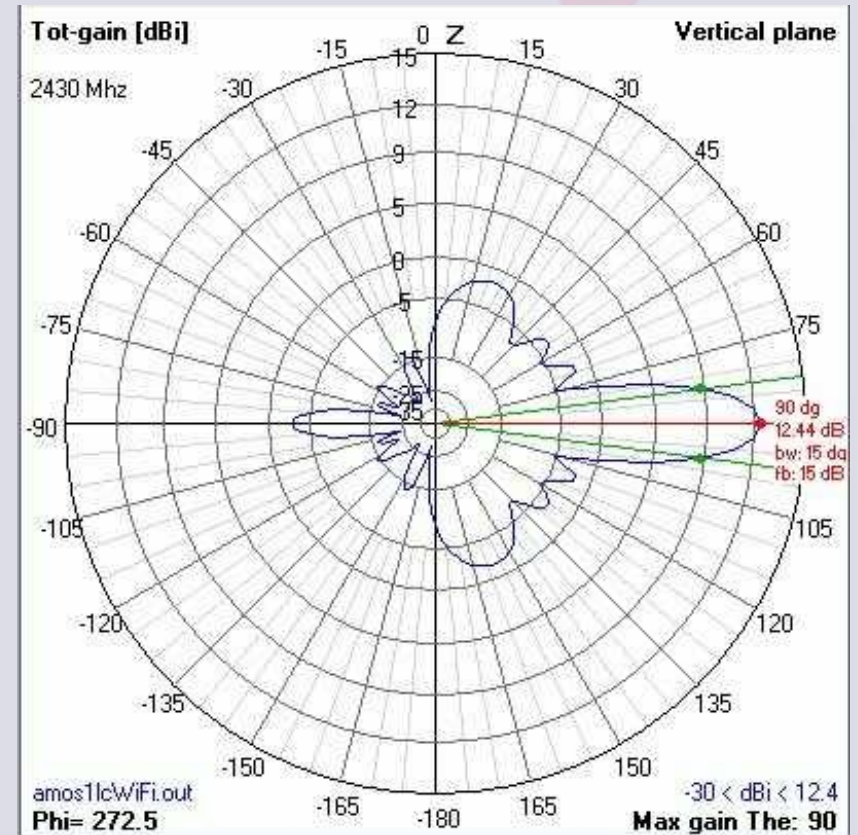
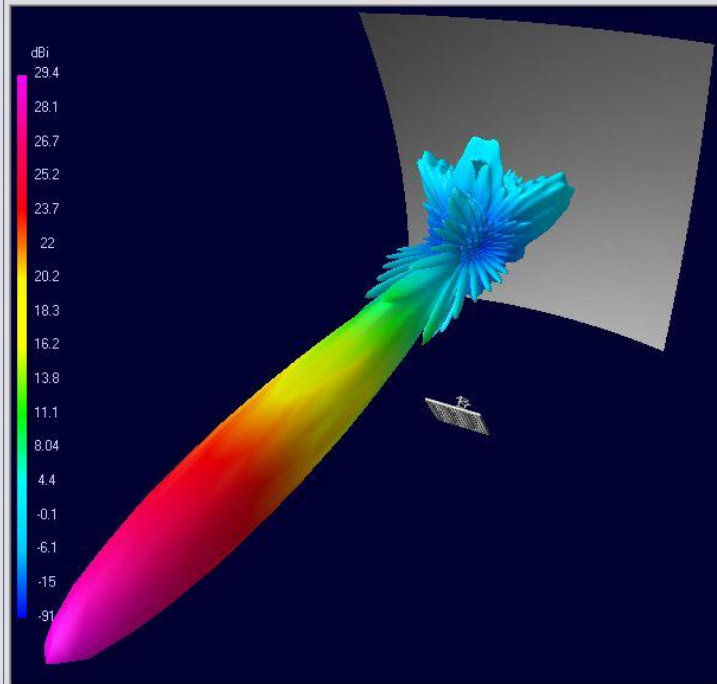
DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

Es la representación gráfica de la radiación de una antena en función de las direcciones espaciales y a una distancia fija. Nos facilita la distribución espacial de la energía que radia una antena.

Las formas de representación pueden ser tridimensionales, bidimensionales, en escalas lineal o logarítmica

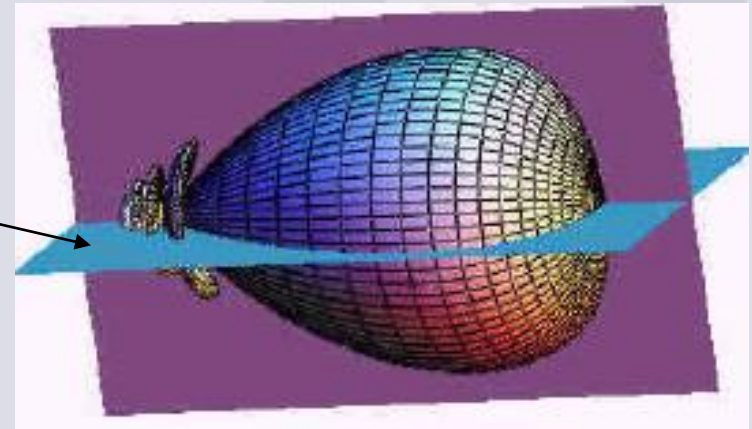
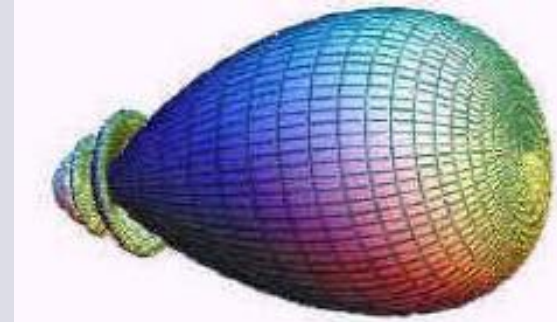
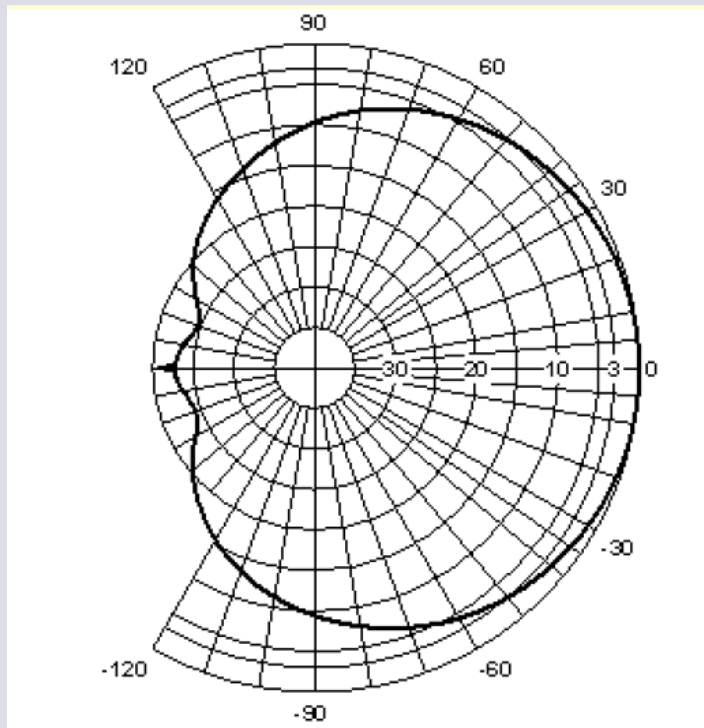
$$DR(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\max}} = \frac{D(\theta, \phi)}{D_{\max}}$$

Diagramas de radiación



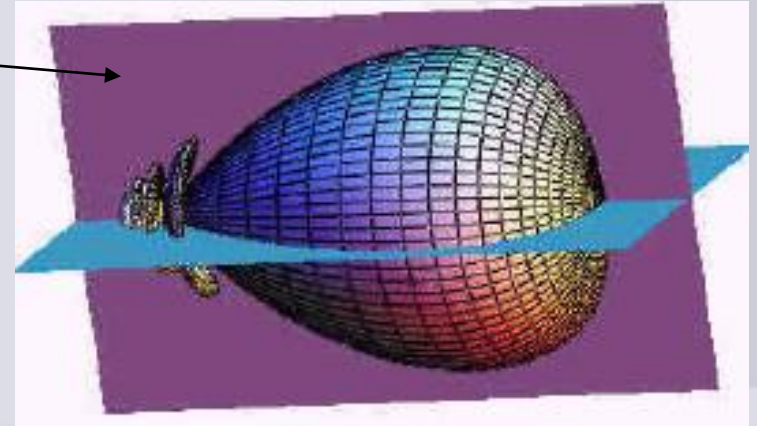
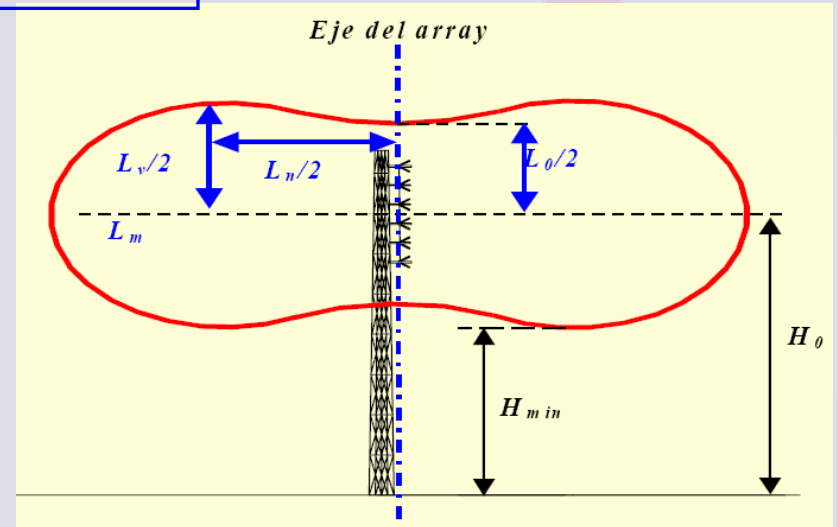
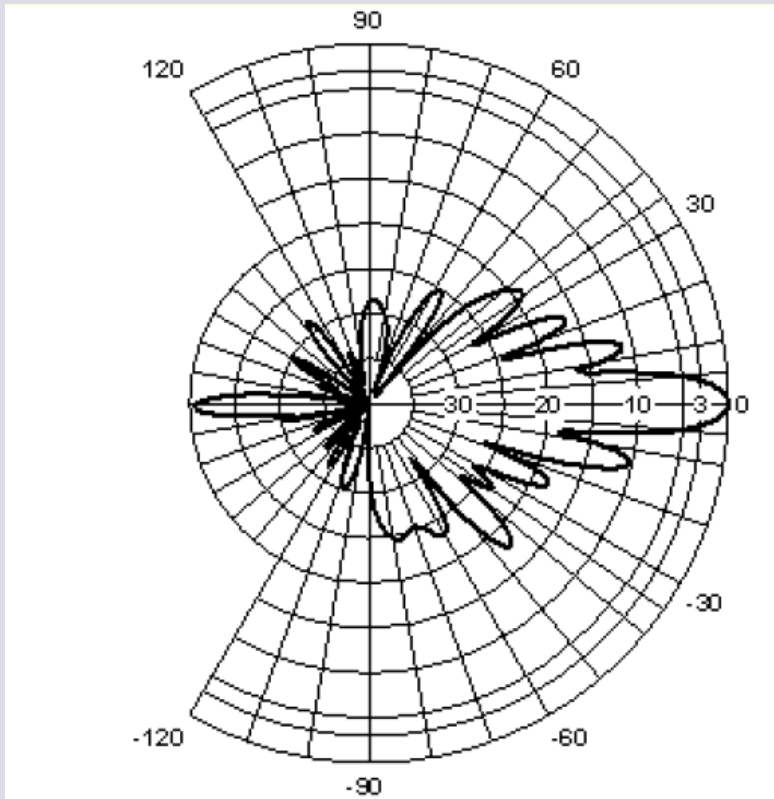
DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

Diagrama HORIZONTAL

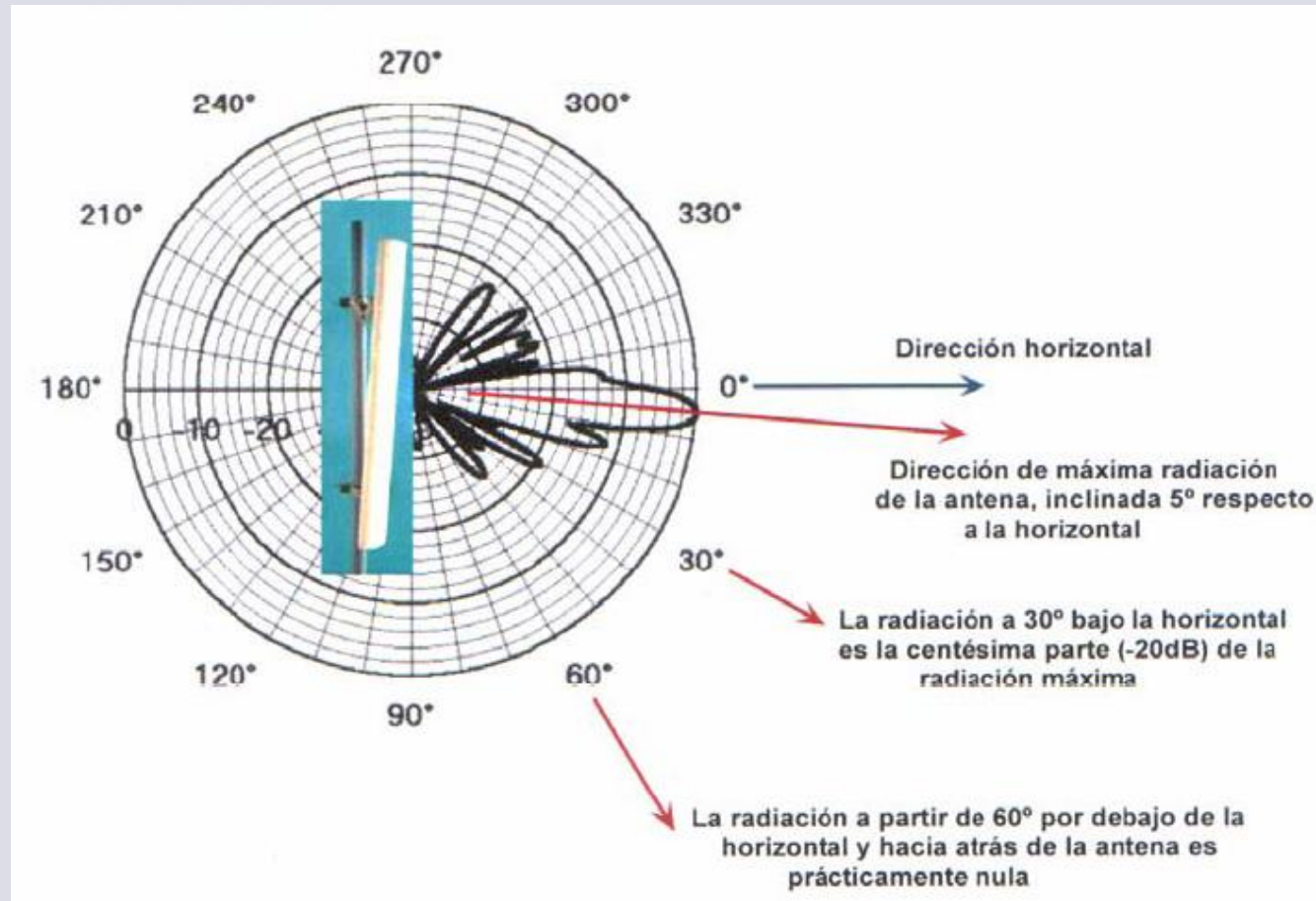


DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

Diagrama VERTICAL



DIAGRAMAS DE RADIACIÓN



La escala desde el centro de la figura hacia el exterior, está dividida en unidades logarítmicas (decibelios) de modo que -20 dB representa la centésima parte de la potencia emitida en la dirección de máxima radiación.

P.I.R.E. (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente)



$$\text{PIRE} = G \cdot P_S$$

P en Kw, w, mw...

$$\text{PIRE} = G + P_S$$

P en dBK, ,dBw, dBm, dBμ cuando la referencia es un Kilovatio,...

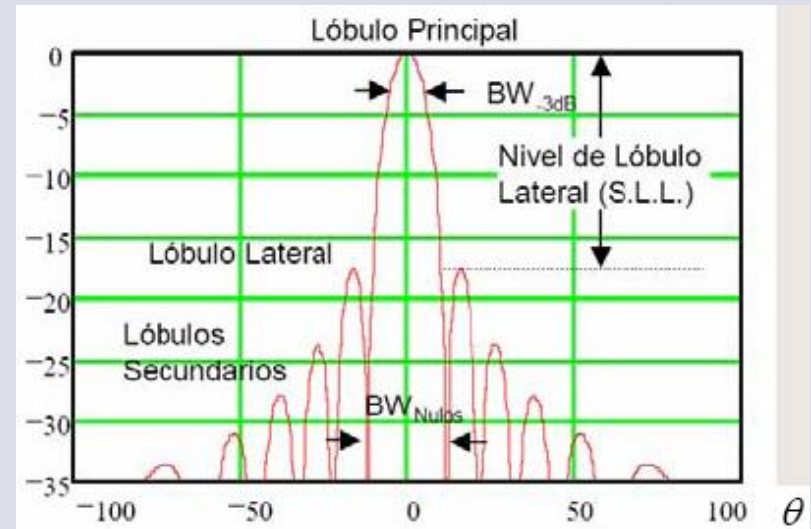
PIRE: Potencia isotrópica radiada equivalente.

Se suele utilizar para expresar la potencia radiada por una antena. La potencia radiada por una antena es igual al producto de la potencia suministrada a la antena (P_S), y la ganancia de la antena (G), (además de un factor de eficiencia que en la mayoría de los casos es de 0.9 o 1). Si se utilizan unidades logarítmicas el producto se transforma en una suma.

DIAGRAMAS DE RADIACIÓN. Parámetros

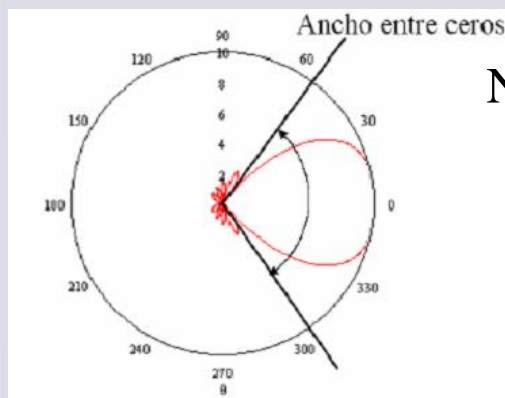
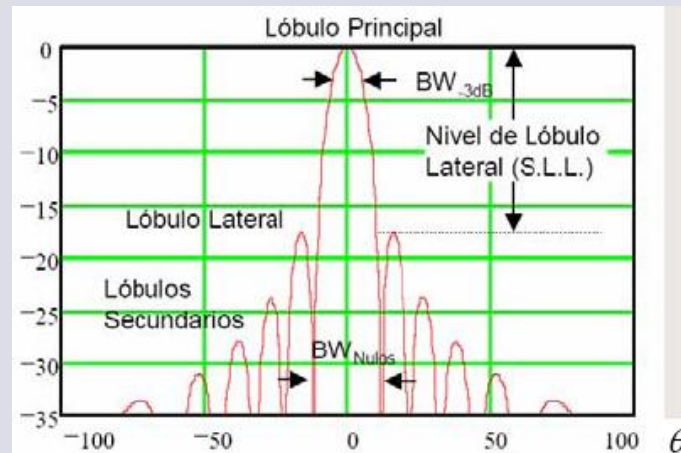
Parámetros del diagrama de radiación:

- Lóbulo: porción del diagrama delimitada por regiones de radiación más débil
1. PRINCIPAL : contiene la dirección de máxima radiación
 2. SECUNDARIOS : los no principales
 3. LATERALES : adyacentes al lóbulo principal
 4. POSTERIOR : en dirección opuesta al principal
- Nivel de lóbulos secundarios: relación entre el lóbulo principal y el mayor lóbulo secundario
 - Relación delante-atrás: entre el lóbulo principal y el posterior
 - Ancho del haz principal a 3 dB (entre puntos de potencia mitad)
 - Ancho del haz principal entre nulos

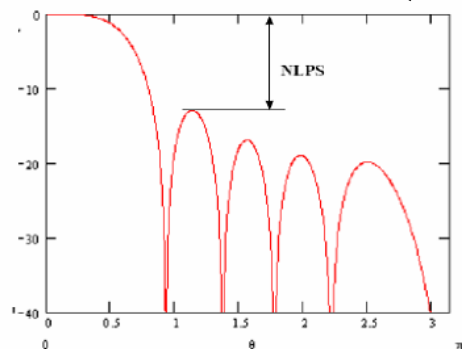


Diagramas de Radiación. Parámetros

- *Haz principal o lóbulo principal*: zona de radiación máxima
- *Lóbulos laterales*: zonas que rodean a los máximos de menor amplitud
- *Lóbulo secundario*: lóbulo lateral de mayor amplitud
- *Ancho de haz a -3dB*: es la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo



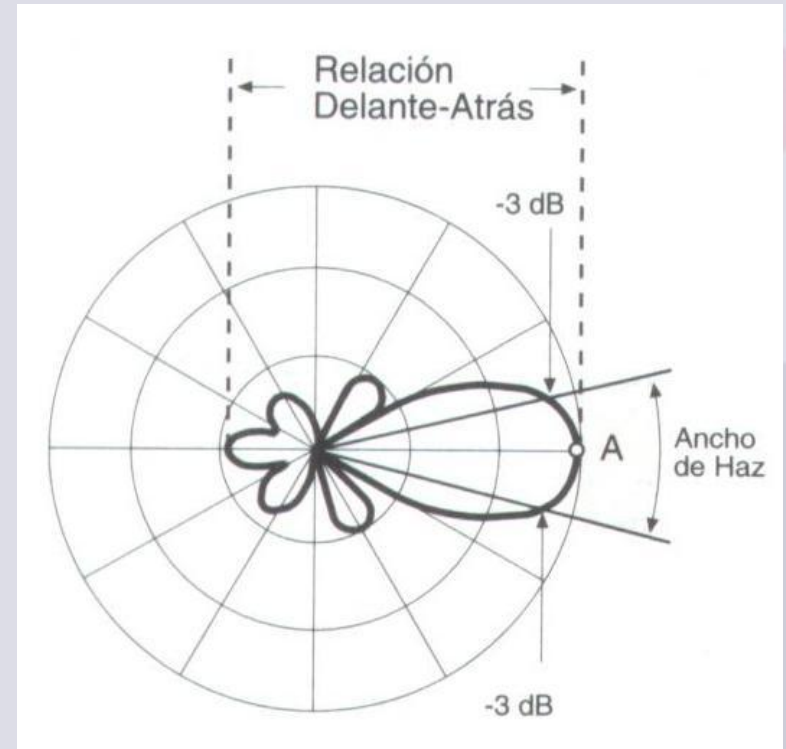
$$NLPS \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{\max}}{P_{\text{sec}}} \right)$$



- *Ancho de haz entre ceros*: separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo.
- *Relación de lóbulo principal a secundario (NPLS)* es el cociente, expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario
- *Relación delante-atrás*: cociente, en dB, entre el valor del diagrama en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta

Diagrama de Radiación (II)

- Parámetros que caracterizan **estructura lobular**:
 - Anchos de Haz (Beam Width):
 - Entre nulos
 - A -3dB....
 - A -10 dB
 - Lóbulos
 - Principal
 - Secundario
 - Lateral
 - Posterior
 - Relación delante-atrás



DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

Diagrama de radiación de una antena ISOTRÓPICA

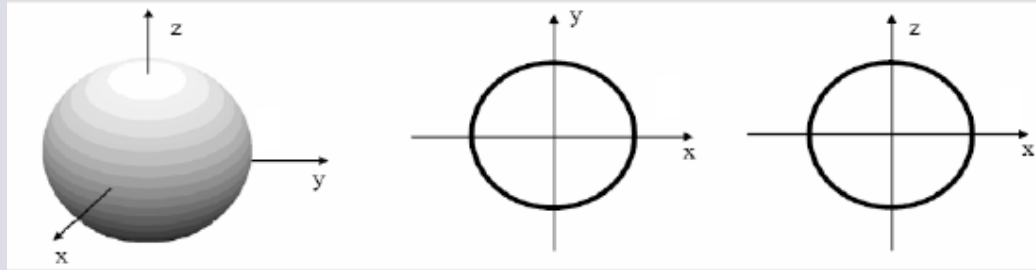
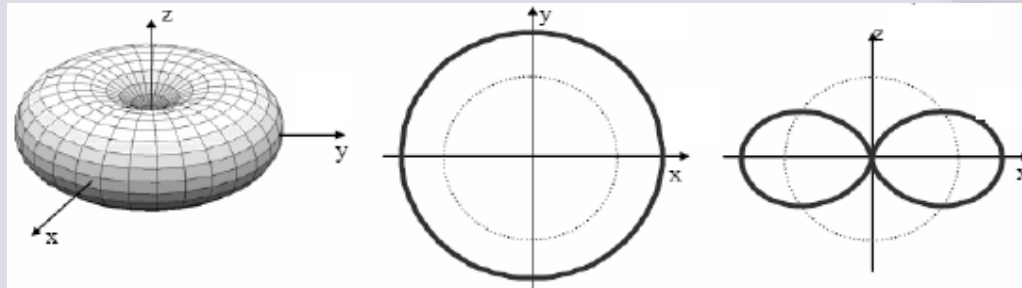
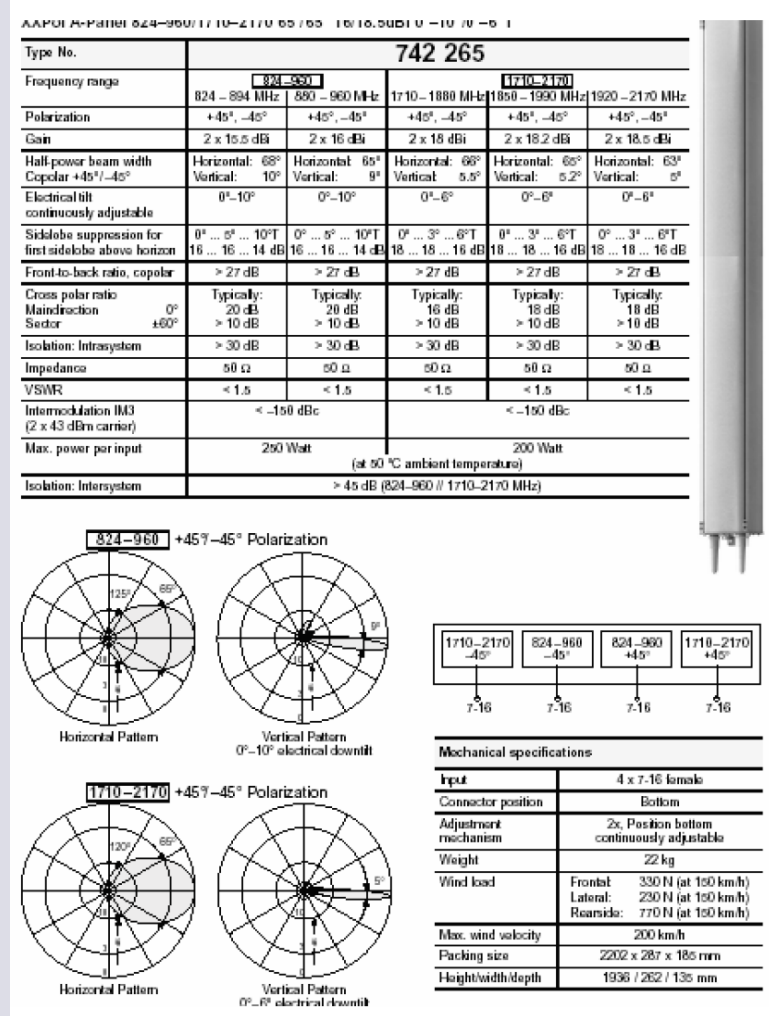


Diagrama de radiación de un DIPOLO



DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

En las especificaciones técnicas de una antena, siempre se incluyen los diagramas de radiación horizontal y vertical, los cuales siempre se exigen en las certificaciones de estaciones radioeléctricas



Diagramas de radiación. Tipos de antenas

En función del diagrama de radiación

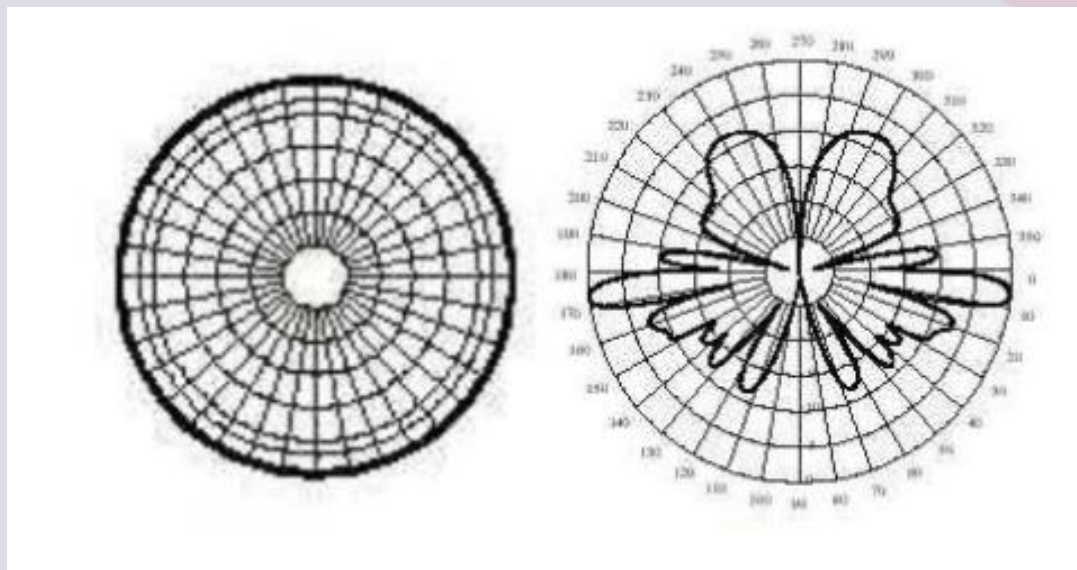
No-directiva u omnidireccional

- El diagrama de radiación en este caso no posee ningún azimut preferente.
- Se suelen utilizar en el centro de pequeñas poblaciones y para cubrir grandes áreas rurales.

Diagramas de radiación. Tipos de antenas

El diagrama horizontal corresponde a un círculo, dando el mismo servicio a los 360°

El diagrama vertical muestra una cobertura irregular orientada preferentemente hacia el suelo, aunque aparecen dos lóbulos importantes hacia arriba.



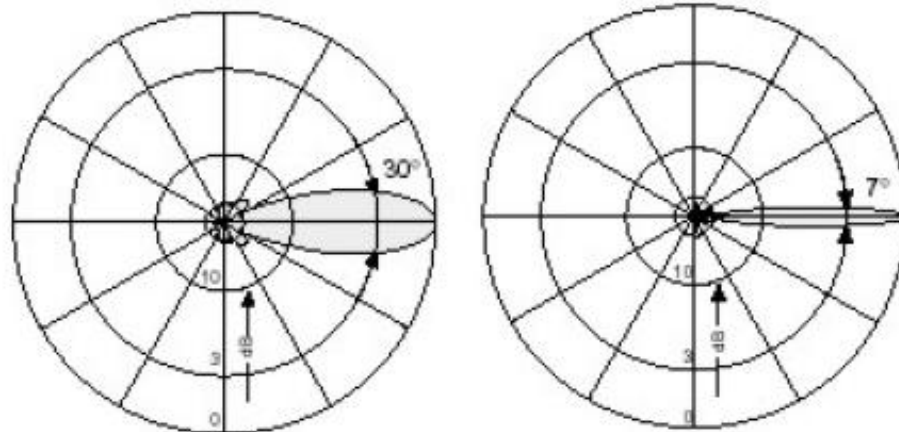
Estas imperfecciones, ya que el diagrama ideal sería exclusivamente hacia el suelo, se deben a las limitaciones espaciales y de diseño que se presentan en las antenas tipo mástil que suelen tener diagramas no-directivos.

Diagramas de radiación. Tipos de antenas

Directiva

Existe un gran número de opciones que los fabricantes proporcionan para cubrir las necesidades

- En caso de que el área donde esperamos encontrar usuarios sea muy limitado usaremos antenas muy directivas como las que se muestran



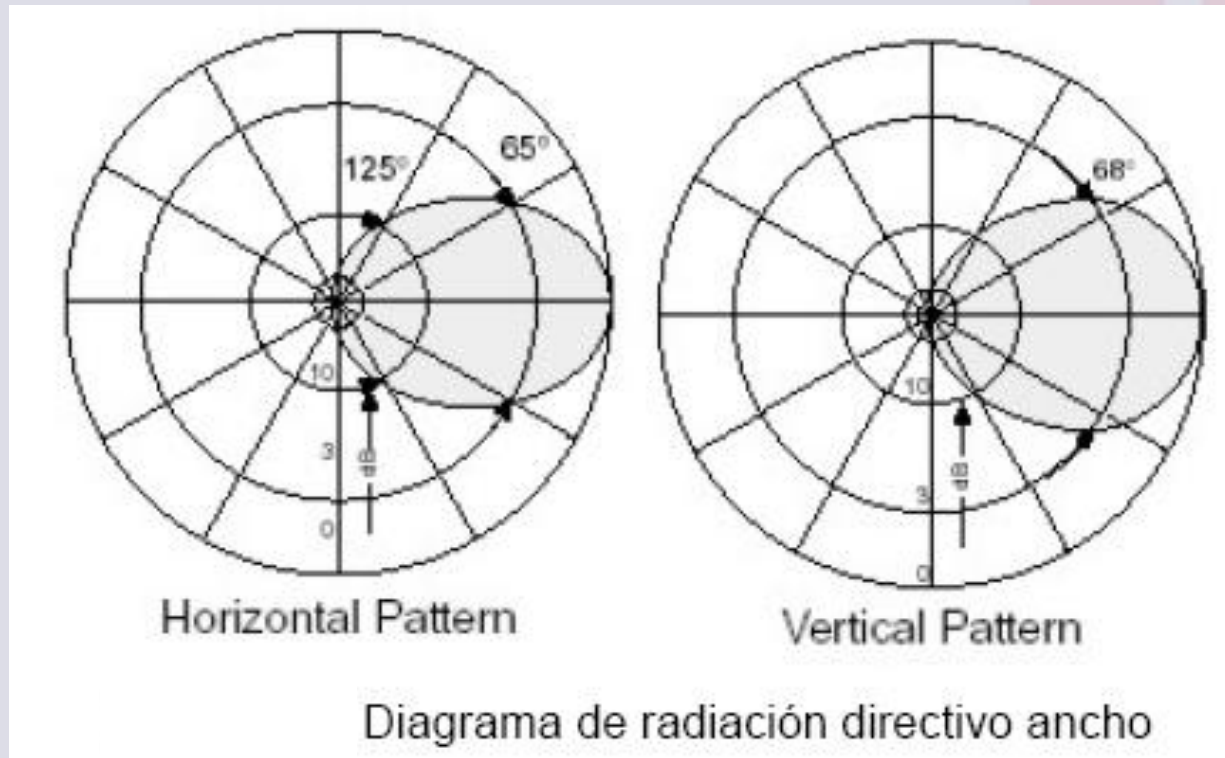
Horizontal Pattern

Vertical Pattern

Diagrama de radiación directivo estrecho

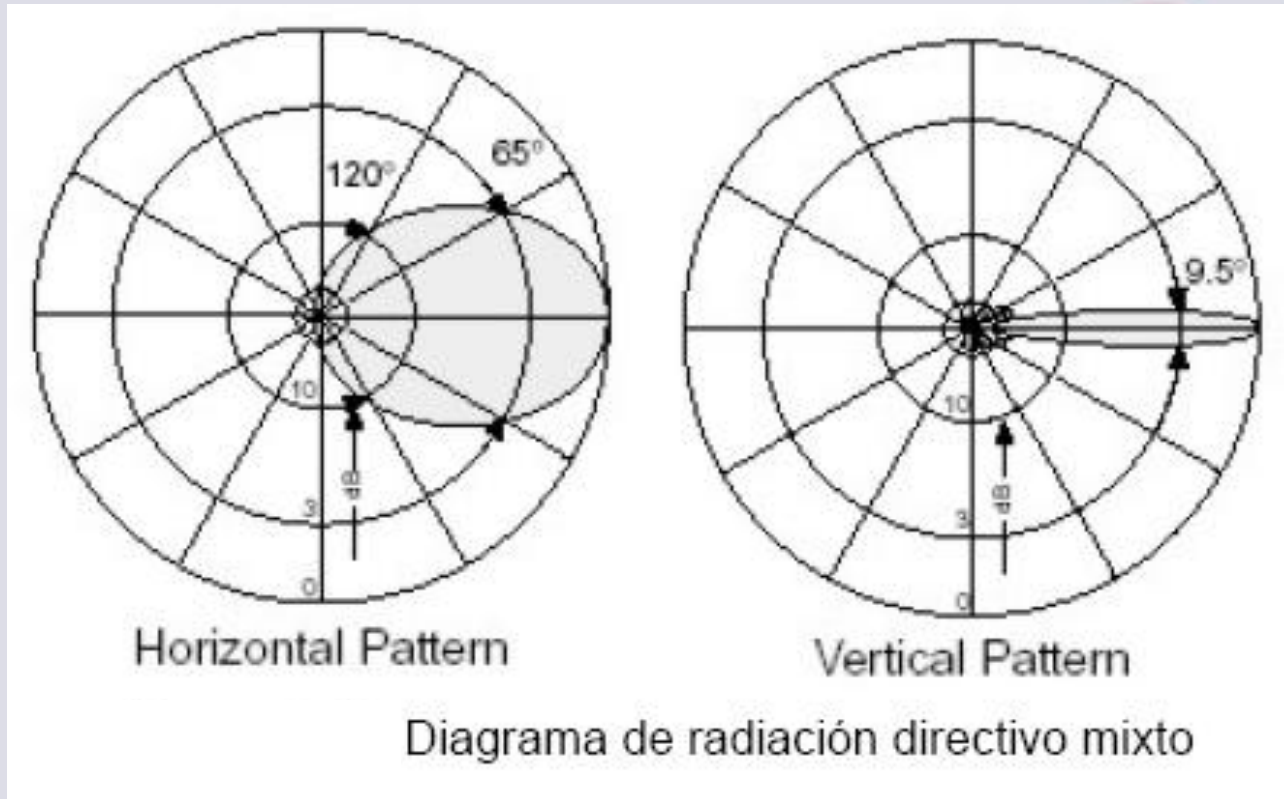
Diagramas de radiación. Tipos de antenas

- Si el área a cubrir es más amplia. Un diagrama vertical amplio se suele utilizar cuando a nuestro frente tengamos una superficie con un desnivel considerable.



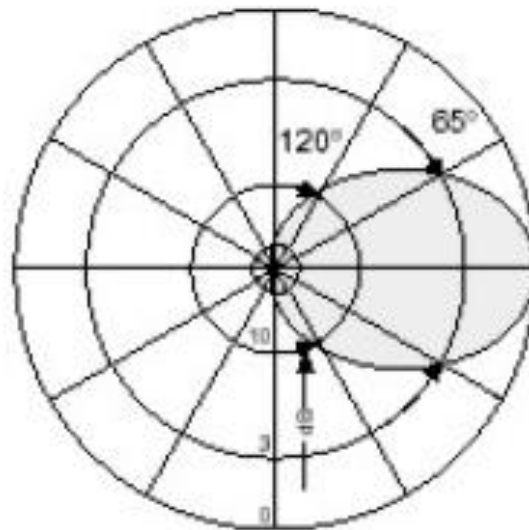
Diagramas de radiación. Tipos de antenas

- En otras ocasiones será necesaria una combinación de ambas opciones;

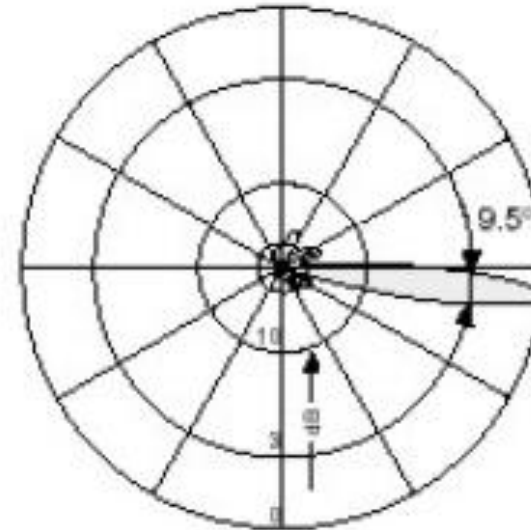


Diagramas de radiación. Tipos de antenas

- Debido a la ubicación de las antenas tipo panel, algunos fabricantes proporcionan antenas que 'miran' hacia abajo, es decir, presentan una inclinación o downtilt.



Horizontal Pattern



Vertical Pattern
6° electr. downtilt

Diagrama de radiación directivo con downtilt

Diagramas de radiación. Tipos de antenas

- Existen también otros diagramas de radiación que no resultan tan lineales y con un número de lóbulos secundarios mayor.

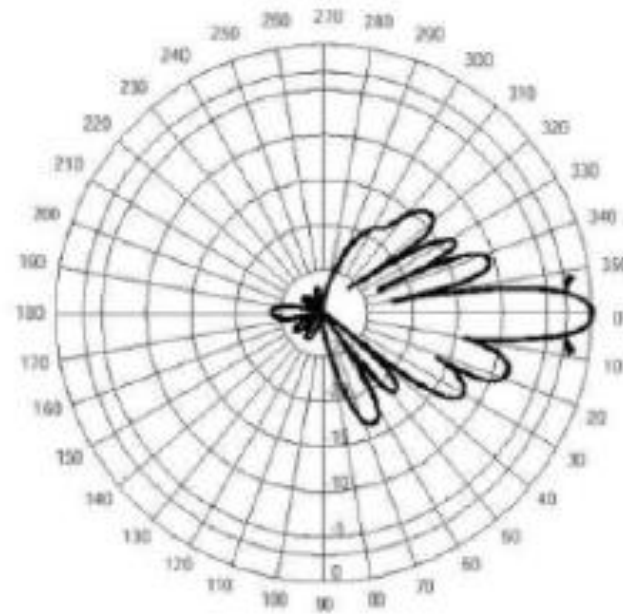
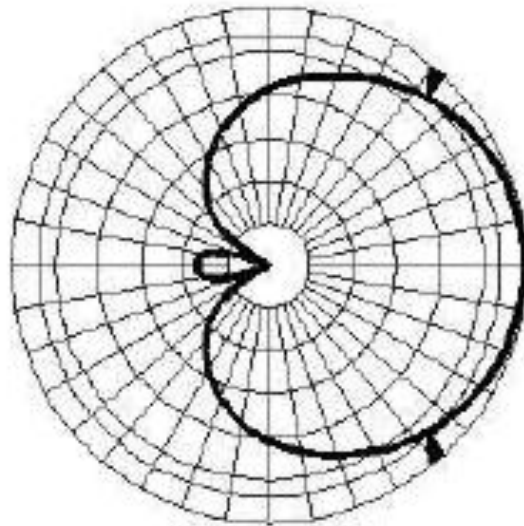
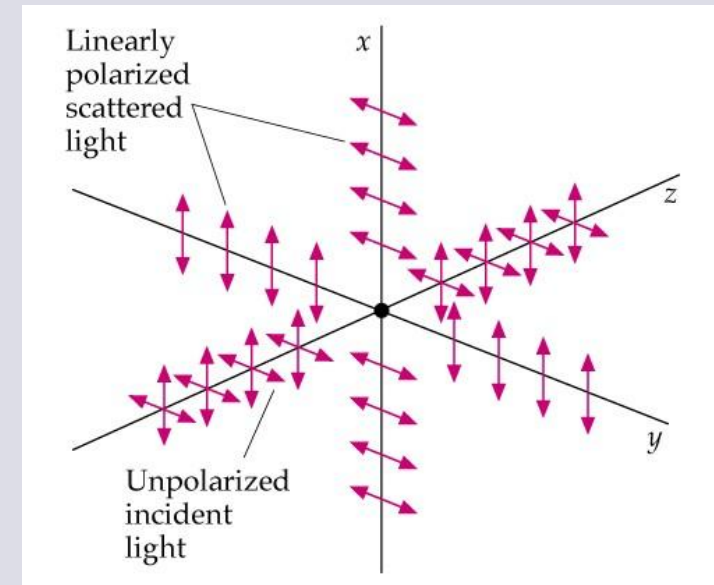
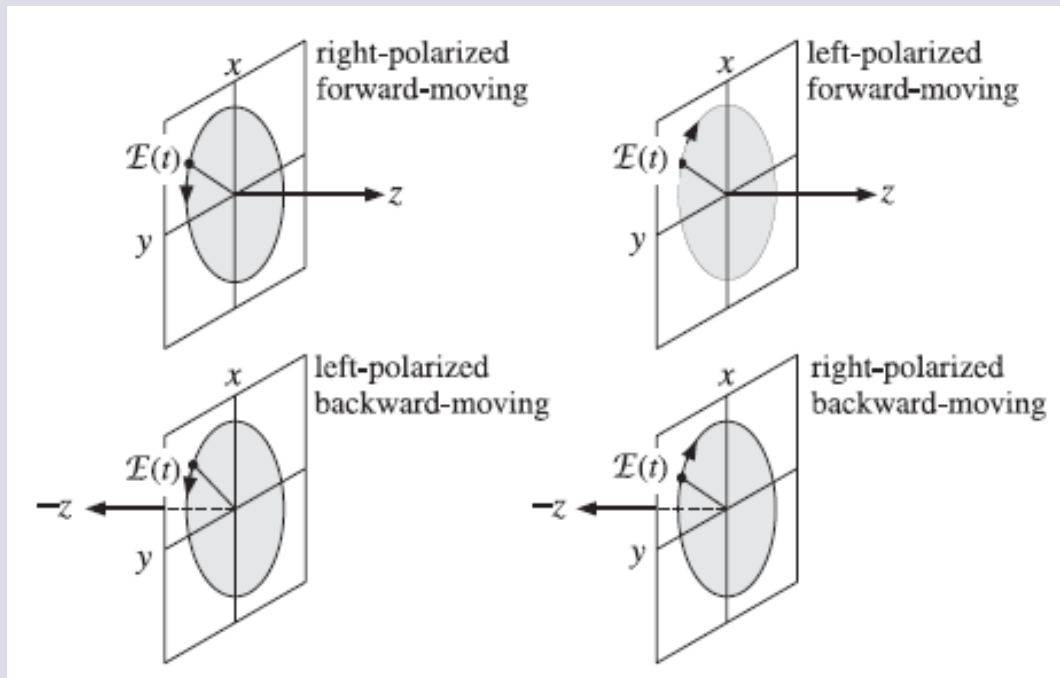


Diagrama de radiación directivo con lóbulos secundarios

POLARIZACIÓN

Es la polarización de la onda radiada por dicha antena en una dirección dada.

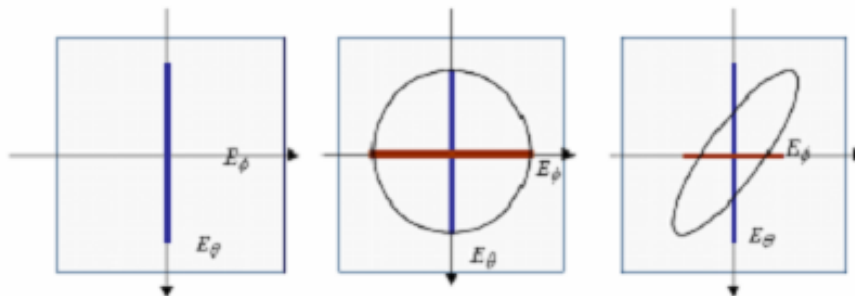
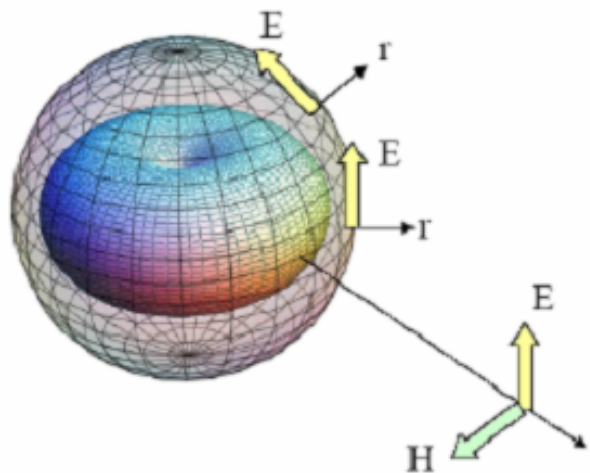


Polarización

Es la polarización del campo que radia la antena en cada dirección

Puede variar según la dirección

En general se refiere a la polarización en la dirección de máxima radiación de la



Cualquier onda se puede descomponer en dos polarizaciones lineales ortogonales, sin más que proyectar el campo eléctrico sobre vectores unitarios orientados según dichas direcciones.

- Sentido de Giro (sentido horario= derechas)
- Relación axial

Aplicando el mismo principio, cualquier onda se puede descomponer en dos ondas polarizadas circularmente a derechas o izquierdas.

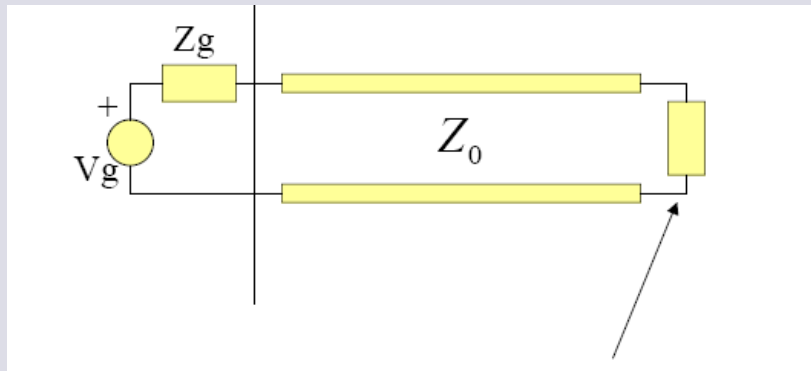
ANCHO DE BANDA

- Debido a la geometría finita de las antenas, están limitadas a operar satisfactoriamente en una banda o margen de frecuencias.
- Se puede especificar como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumplen las especificaciones y la frecuencia central. Se suele expresar en %

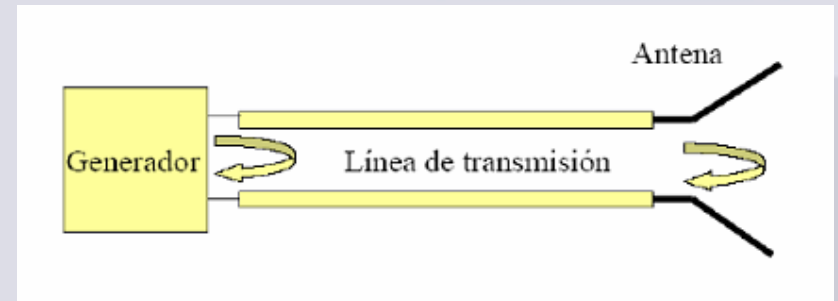
$$BW = \frac{f_{MAX} - f_{MIN}}{f_0}$$

IMPEDANCIA DE ENTRADA (Transmisión)

Este parámetro es importante para que la antena sea capaz de radiar toda la potencia que le llega



- **COEFICIENTE DE REFLEXIÓN**
Medida del grado de acoplamiento entre la impedancia de antena Z_{ant} y la impedancia característica de la línea de transmisión Z_0



$$\Gamma = \frac{V_{\text{Reflejada}}}{V_{\text{incidente}}} = \frac{Z_{ant} - Z_0}{Z_{ant} + Z_0}$$

$$\text{si } \Gamma = 0 \Rightarrow Z_{ant} = Z_0 \Rightarrow \text{antena adaptada}$$

Antena Resonante

La antena ha de conectarse a una línea y radiar el máximo de potencia, para ello ha de estar adaptada.

La impedancia de entrada de la antena (Z_{in}) depende de la frecuencia:

$$Z_{in} = R(\omega) + jX(\omega)$$

Las antenas resonantes anulan la parte imaginaria para una determinada frecuencia

La parte resistiva de una antena se compone de una parte de “radiación” y de una parte “óhmica”

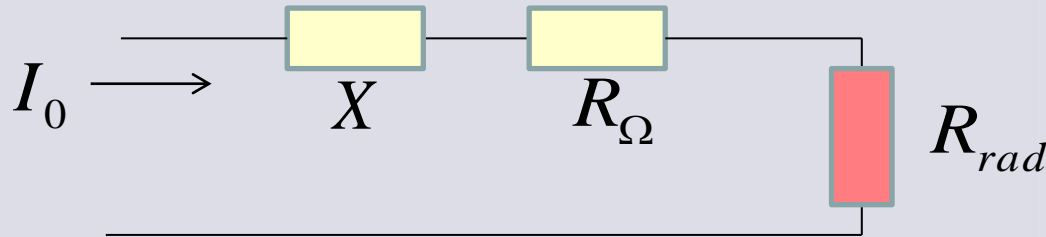
$$R(\omega) = R_{rad} + R_{\Omega}$$

Antena Resonante

Resistencia de radiación: valor de la resistencia que disipa la misma potencia total radiada por la antena

Resistencia óhmica: pérdidas por conductores y/o dieléctricos en la antena

Una antena ideal debería de tener una elevada resistencia de radiación y una nula resistencia óhmica



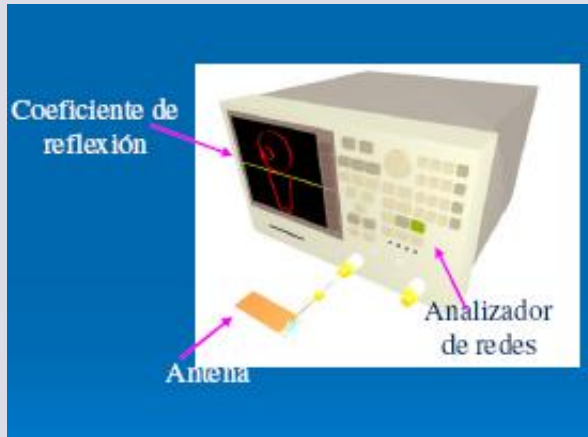
$$P_{in} = \frac{1}{2} |I_0|^2 \operatorname{Re}[Z_{in}]$$

Potencia entregada

$$P_{in} = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_{rad}$$

Potencia Radiada

COEFICIENTE REFLEXION (Transmisión)



Usualmente los fabricantes especifican un valor de VSWR (o ROE: razón de onda estacionaria):

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$

VSWR=1, adaptación perfecta, máx. transferencia de potencia

EFICIENCIA (Transmisión)

- EFICIENCIA DE LA ANTENA

La existencia de pérdidas en la antena hace que no toda la potencia transmitida sea radiada

Las eficiencias se suelen dar en dB no en %

$$e = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{\Omega}} = \left(1 - |\Gamma|^2\right)$$

$$(e)_{dB} = 10\log(e)$$

$$e_{ant} = 90 \% \Rightarrow -0.5 \text{ dB}$$

$$e_{ant} = 80 \% \Rightarrow -1.0 \text{ dB}$$

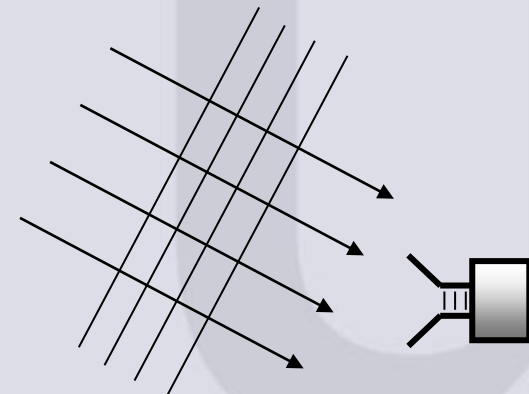
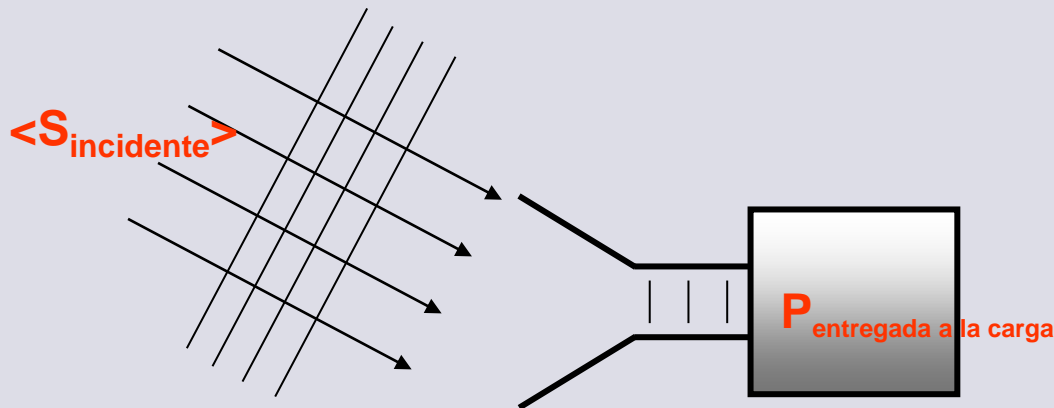
$$e_{ant} = 64 \% \Rightarrow -2.0 \text{ dB}$$

Una muy buena antena: $e = -0.1 \text{ dB}$

ANTENAS EN RECEPCIÓN

Apertura efectiva. Área equivalente

- Caracterizar antena en función de la energía electromagnética que es capaz de capturar
- Se relaciona con la ganancia $A_{e\max} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$
- Se relaciona con el área física en antenas de apertura. Intuitivamente una **antena grande captará más potencia** incidente por unidad de superficie.
- Unidades: Superficie (m²)



Apertura efectiva

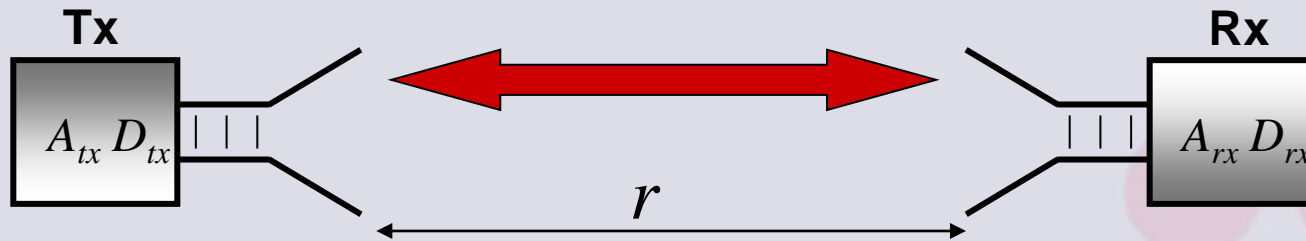
- Se define apertura equivalente como:

$$A_{ef} = \frac{\text{Potencia entregada}}{\text{Densidad de potencia incidente}} = \frac{P_L}{\langle S_i \rangle} = \frac{|I_L|^2 R_L / 2}{\langle S_i \rangle}$$

- Valor que no tiene por qué coincidir con las dimensiones (físicas) de la antena.
- Cuando la antena es plana, la relación entre la apertura física (A_f) y la apertura efectiva (A_{ef}) se conoce como **eficiencia de apertura**, verificándose que:

$$A_{ef} = \varepsilon_{ap} A_f \quad \text{con } 0 \leq \varepsilon_{ap} \leq 1$$

Relación directividad y apertura efectiva máxima



$$\phi_{tx} = \frac{P_{tx}}{4\pi \cdot r^2} D_{tx}$$

$$P_{rx} = \phi_{tx} A_{rx} = \frac{P_{tx} D_{tx} A_{rx}}{4\pi \cdot r^2} \longrightarrow D_{tx} A_{rx} = \frac{P_{rx}}{P_{tx}} (4\pi r^2)$$

$$D_{rx} A_{tx} = \frac{P_{tx}}{P_{rx}} (4\pi r^2)$$

Relación directividad y apertura efectiva máxima

- ...Seguimos

$$\frac{D_{tx}}{A_{tx}} = \frac{D_{rx}}{A_{rx}} \Rightarrow \frac{D_{tx}}{A_{tx,m}} = \frac{D_{rx}}{A_{rx,m}}$$

- La solución anterior es válida para cualquier par de antenas. Se puede demostrar que, para un dipolo infinitesimal se verifica:

$$A_{ef} = \frac{3\lambda^2}{8\pi} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D$$

Relación ganancia y apertura efectiva máxima

- Si hay pérdidas asociadas a la antena, la apertura efectiva máxima será:

$$A_{ef} = \eta_{cd} \left(1 - |\Gamma|^2\right) \frac{\lambda^2}{4\pi} D = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ef}$$

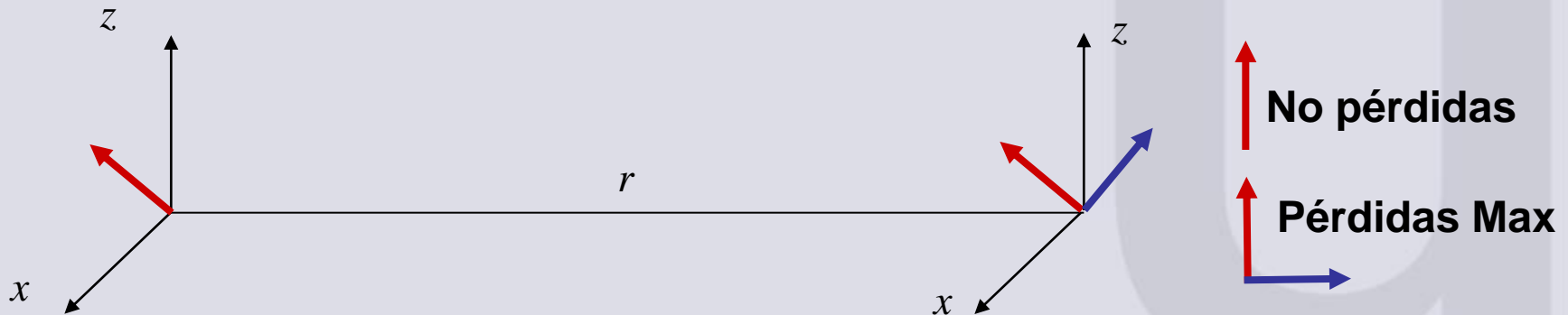
Acoplo polarización

- El desacoplo debido a la diferencia de polarización entre la antena transmisora y receptora se conoce como **factor de pérdidas de polarización**:

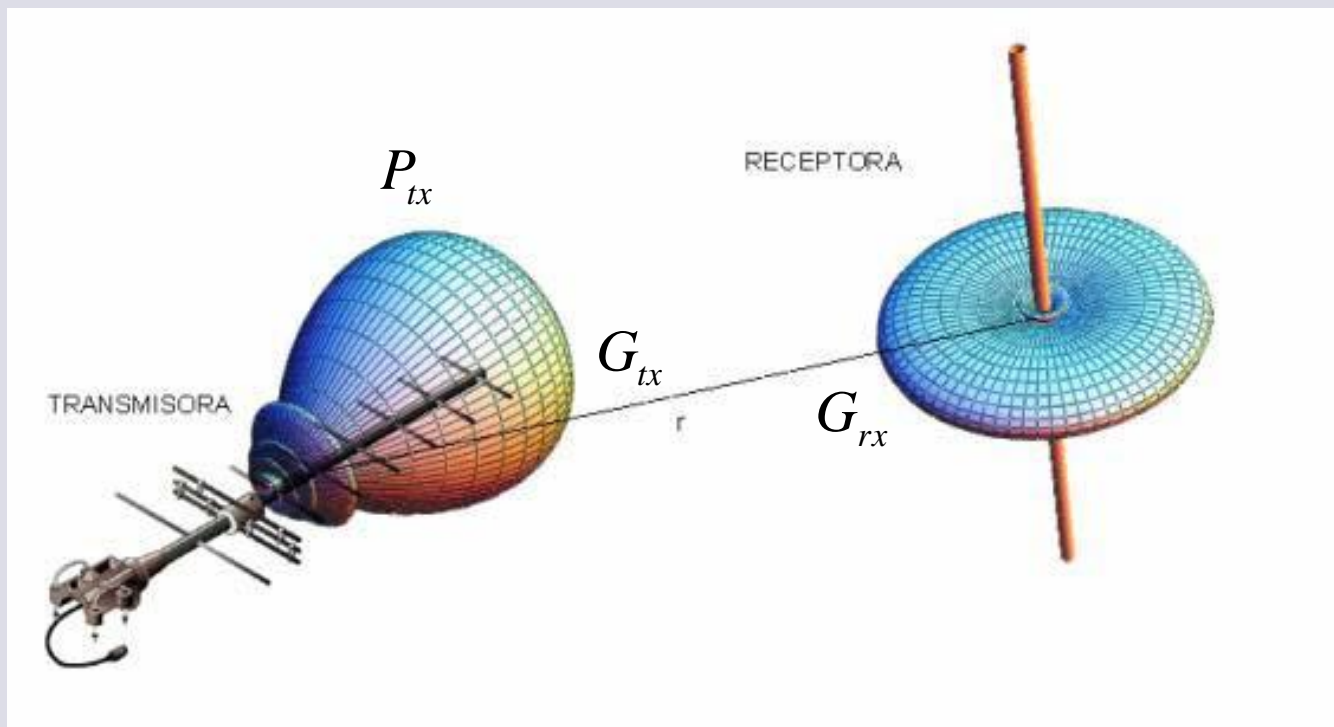
$$L_{polarización} = \left| \bar{e}_{tx} \cdot \bar{e}_{rx}^* \right|^2$$

Vector polarización
antena transmisora

Vector polarización
antena receptora



Ecuación de Friis



$$\phi_{tx} = \frac{P_{tx} G_{tx}}{4\pi r^2} = \frac{PIRE}{4\pi r^2}$$

$$P_{rx} = \phi_{tx} A_{rx} = \phi_{tx} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{rx} = \frac{P_{tx} G_{tx} G_{rx} \lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

Ecuación de Friis

P: potencia proporcionada por el generador a la antena

Considerando la eficiencia y el coef. de reflexión de la antena...

P_t : potencia transmitida por la antena

$$P_t = \eta_{cd,tx} (1 - |\Gamma_{tx}|^2) P$$

La densidad de potencia radiada por la antena...

$$\langle S \rangle = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t$$

La antena receptora capta una potencia de esa densidad de potencia...

$$P_r = \langle S \rangle A_{ef} = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

Considerando la eficiencia y la reflexión de la antena...

Ecuación de Friis

- Teniendo en cuenta las pérdidas

$$\frac{P_{rx}}{P_{tx}} = \eta_{cd,tx} \left(1 - |\Gamma_{tx}|^2\right) \eta_{cd,rx} \left(1 - |\Gamma_{rx}|^2\right) \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 D_{tx} D_{rx} \left|\bar{e}_{tx} \cdot \bar{e}_{rx}^*\right|^2$$

La potencia
recibida P_{rx}

$$P_{rx} = P_{tx} \left(1 - |\Gamma_{tx}|^2\right) \left(1 - |\Gamma_{rx}|^2\right) \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_{tx} G_{rx} \left|\bar{e}_{tx} \cdot \bar{e}_{rx}^*\right|^2$$

Balances de un enlace radioeléctrico (Más adelante lo veremos)

El balance de enlace es la relación entre la potencia emitida y la recibida teniendo en cuenta las diferentes ganancias y pérdidas que tienen lugar en el trayecto. (las potencias en dBm y las pérdidas y ganancias en dB)

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_b - L_{tt} - L_{tr}$$

P_r : potencia de recepción

P_t : potencia de transmisión

G_t , G_r : ganancias

L_b : pérdidas básicas de propagación

L_{tt} , L_{tr} : pérdidas en los circuitos de transmisión y recepción

Ejemplo balance

Un transmisor entrega una potencia de 10W a una antena de ganancia directiva de 8 dB y rendimiento del 95% a través de un cable con 1.2 dB de pérdidas. La antena receptora tiene una ganancia directiva de 3 dB y un rendimiento del 97.7% y la pérdida en el cable de conexión al receptor es de 1 dB. La pérdida básica de propagación es de 120 dB. Calcular la potencia recibida.

$$L_{at} = 10 \log \left(\frac{100}{95} \right) = 0.2 \text{ dB}$$

$$L_{ar} = 0.1 \text{ dB}$$

la ganancia modulada con la eficiencia nos da :

$$G_t = 8 - 0.2 = 7.8 \text{ dB}$$

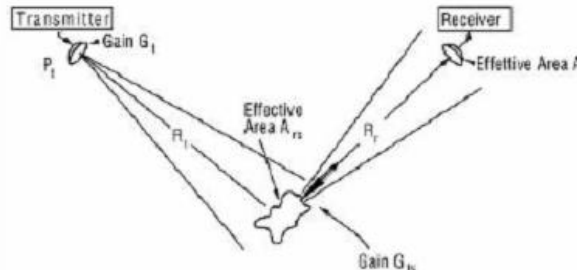
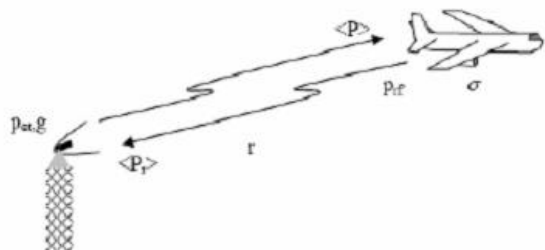
$$G_r = 3 - 0.1 = 2.9 \text{ dB}$$

la potencia emitida de 10W son 40 dBm

El balance queda :

$$P_r = 40 + 7.8 + 2.9 - 1.2 - 1 - 120 = -71.5 \text{ dBm}$$

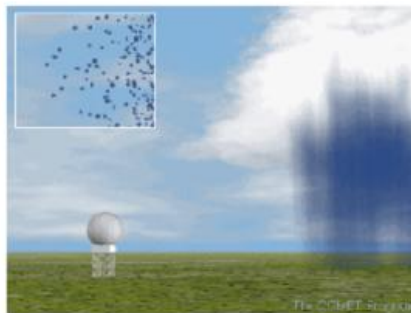
ECUACIÓN DEL RADAR



$$W_0 = \frac{P_t}{4\pi R_t^2} G_t$$

$$P_{rx} = W_0 \sigma \quad W_{rx} = \frac{P_{rx}}{4\pi R_r^2}$$

$$P_{rec} = W_{rx} A_e = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_t R_r} \right)^2 P_t G_t G_r \sigma$$



DENSIDAD DE POTENCIA...

Transmitida y que le llega al blanco

$$\langle S_t \rangle = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t$$

Potencia Retransmitida por el blanco

$$P_{target} = \langle S_t \rangle \cdot \sigma = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t \cdot \sigma$$

Densidad Potencia Retransmitida por el blanco

$$\langle S_r \rangle = P_{target} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi r^2}$$

Potencia Recibida por el radar

$$P_r = \langle S_r \rangle \cdot A_{eq} = \frac{P_t}{(4\pi r^2)^2} G_t \cdot \sigma \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_r$$

σ : sección recta del radar

ECUACIÓN DEL RADAR

Si consideramos factores de reflexión de la antena transmisora...

$$P_R = P_T \cdot \left(1 - |\Gamma_T|^2\right) \cdot \frac{G^2}{(4\pi R^2)^2} \cdot \sigma \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

P_R : potencia recibida por el radar tras la reflexión en el objeto

P_T : Potencia transmitida por el radar

Γ_T : coef. Reflexión antena radar

G : ganancia de la antena radar

R : distancia del radar al objeto

σ : sección radar (sección recta de retrodispersión)

λ : longitud de la onda empleada

Ecuación del radar. Sección recta de dispersión

σ : sección recta de dispersión del radar

- Es el área de intercepción de potencia incidente que dispersada isotrópicamente en todas las direcciones produce sobre el receptor una densidad de potencia igual a la proveniente del blanco.

- Define las características de reflexión del blanco, dependiendo de la geometría, composición...

- Se mide en m^2

A frecuencias de microondas (banda X) una avioneta puede poseer una sección recta del orden de $1 m^2$, un automóvil de unos $100 m^2$, un jumbo $10.000 m^2$ y un mercante de gran tonelaje $1.000.000 m^2$. Un hombre presenta una sección recta de $1 m^2$, un pájaro $0,01 m^2$ y un insecto $0,00001 m^2$.

Temperatura de ruido de una antena

El ruido es una perturbación eléctrica que limita la calidad de un enlace radioeléctrico.

El ruido procede de distintas fuentes naturales y artificiales

Naturales : ruido de suelo (Tierra), ruido del cielo, lluvia, gases...

Artificiales: actividades industriales

Ruido artificial:

Su espectro disminuye al aumentar la frecuencia. Por ello solo debe de tenerse en cuenta hasta 1 GHz aproximadamente

Ruido Natural del suelo

Suelo. Tierra.: Constante en frecuencia. $T = 290 \text{ }^\circ\text{K}$

Cielo (cósmico y atmosférico): La atmósfera como atenuador (pérdidas)

Cielo: cuerpo negro emisor de ruido

Temperatura de ruido de una antena

A estas fuentes de ruido, se les asocia en radiocomunicaciones, una:

Temperatura equivalente de ruido

Esta temperatura lleva asociada una potencia normalizada del ruido que suele expresarse de la forma:

$$P = K \cdot T_{eq} \cdot B$$

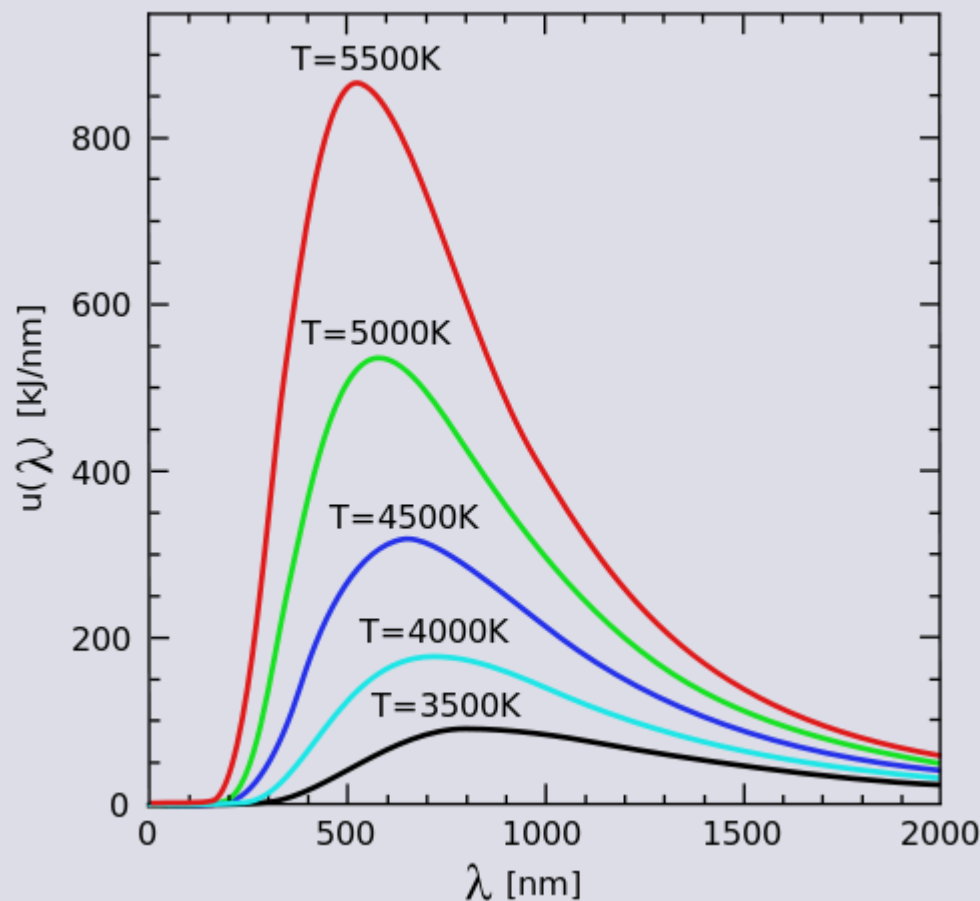
P: potencia de ruido en los bornes de la antena

K: constante de Boltzmann: 1.38×10^{-23} J/°K

B: ancho de banda

Planck: un cuerpo que posee una determinada temperatura, está emitiendo radiación electromagnética (cámaras termográficas) en un determinado ancho de banda

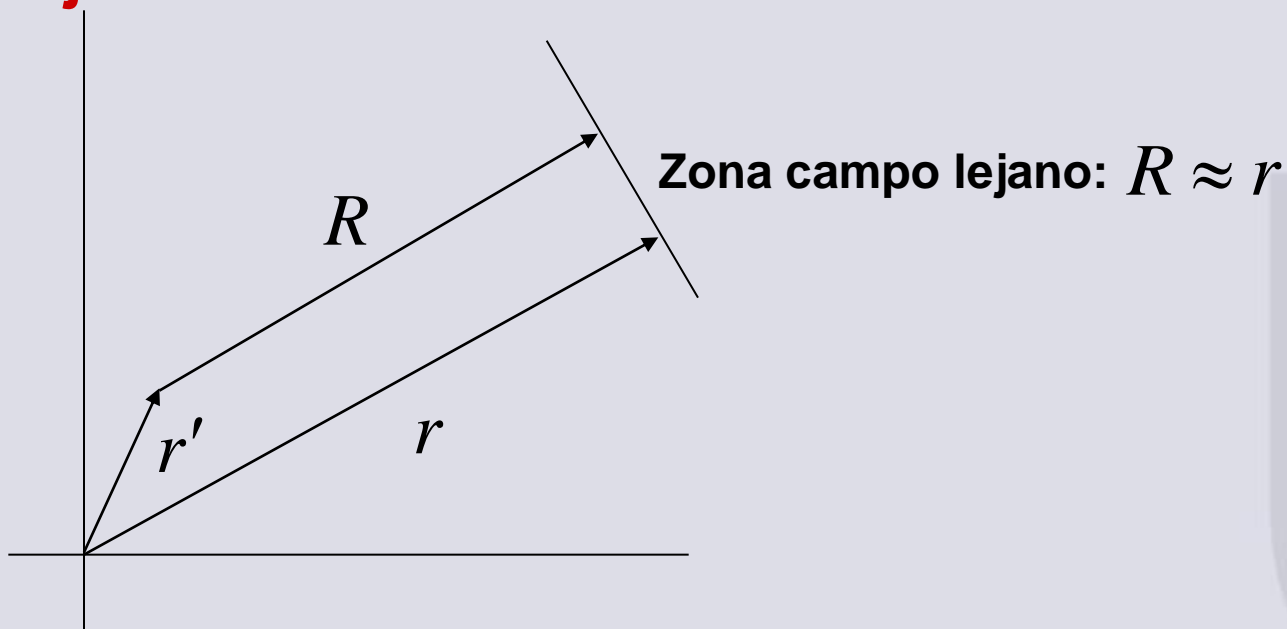
Radiación EM-Temperatura. Ley de Wien



$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2897.6 \mu\text{mK}$$

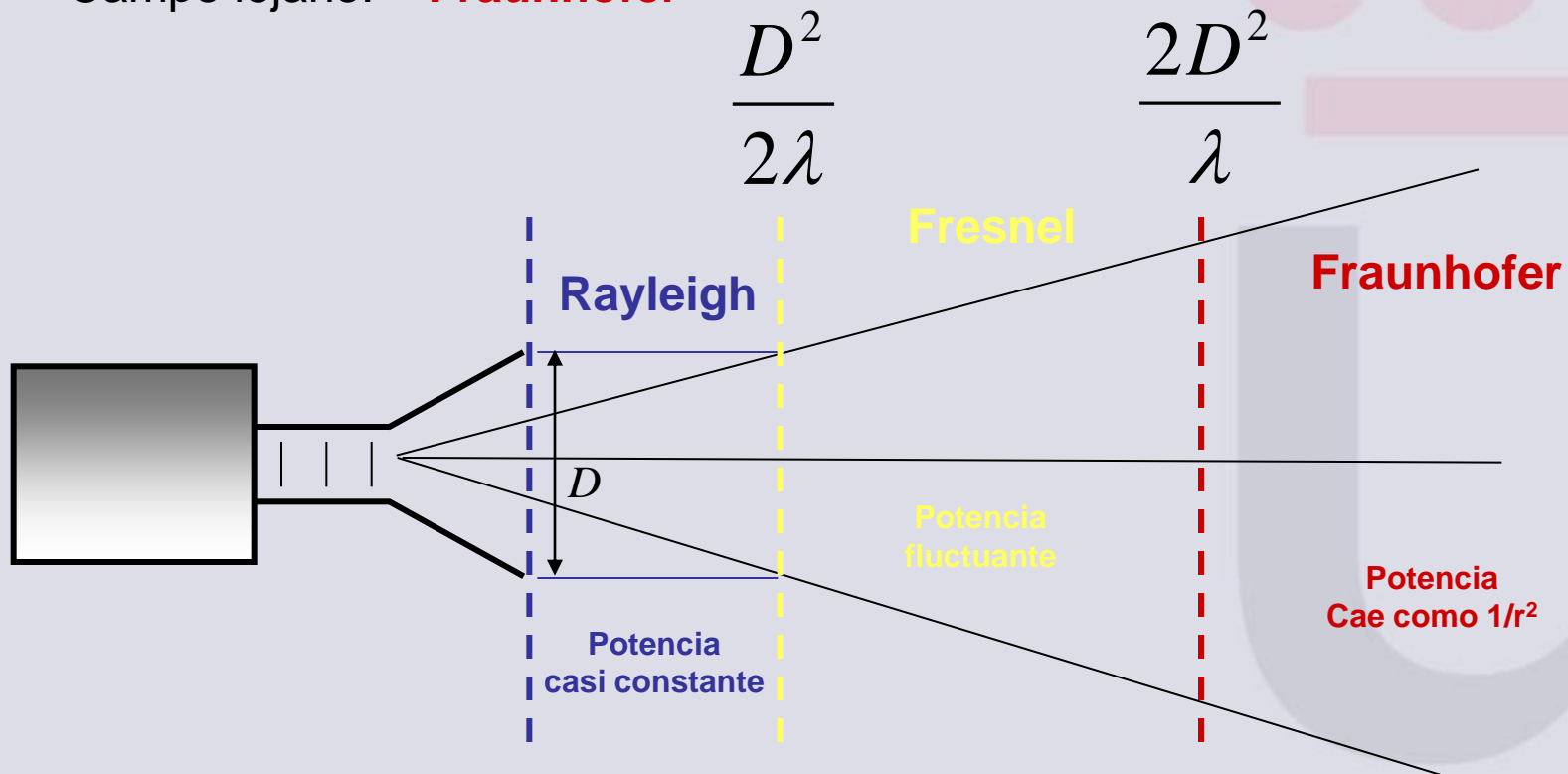
Zonas de radiación

- Sabemos que cuando $R \gg \lambda$, la onda radiada se comporta como una **onda plana**.
- Sin embargo, ¿cómo se puede saber si se está **cerca o lejos**?



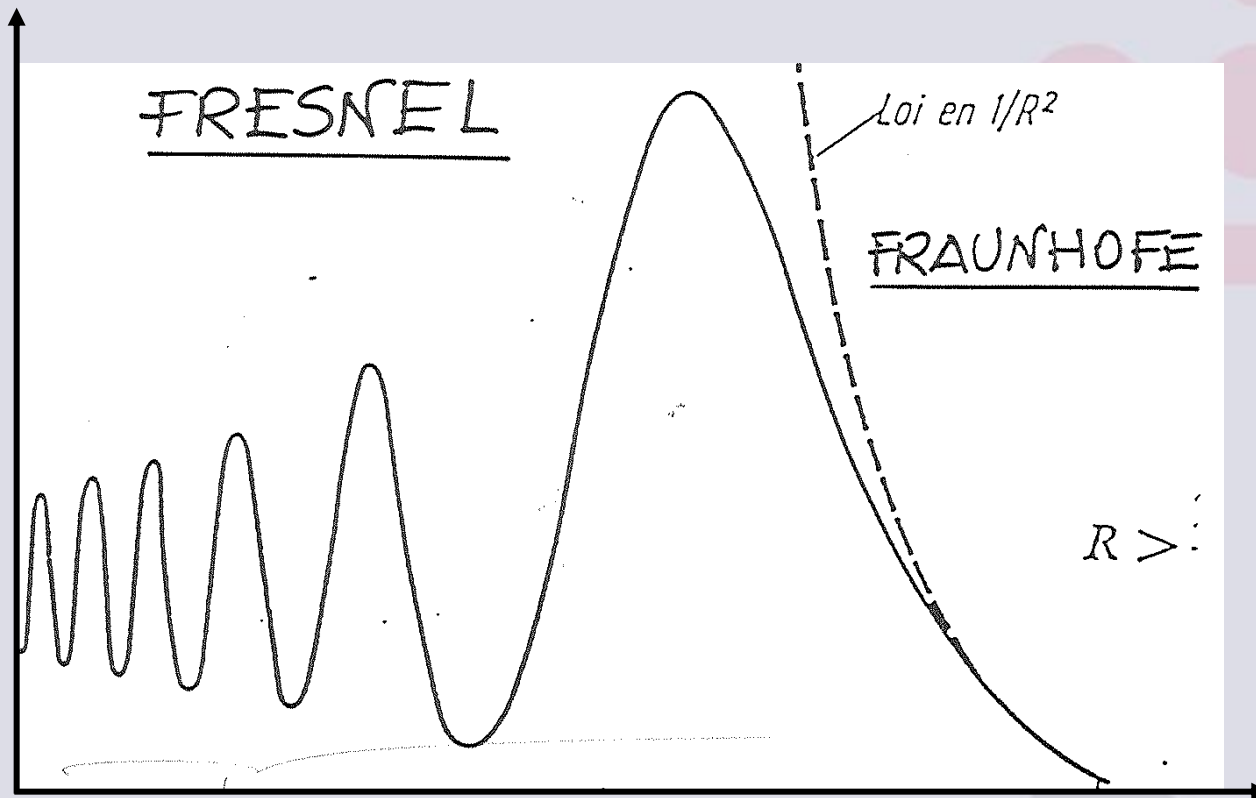
Zonas de radiación

- El espacio que rodea a una antena está dividido en tres regiones:
 - Campo cercano: **Rayleigh** (propagación tubular)
 - Campo cercano: **Fresnel** (interferencias)
 - Campo lejano: **Fraunhofer**



Zonas de radiación

- Examinando la amplitud del campo radiado

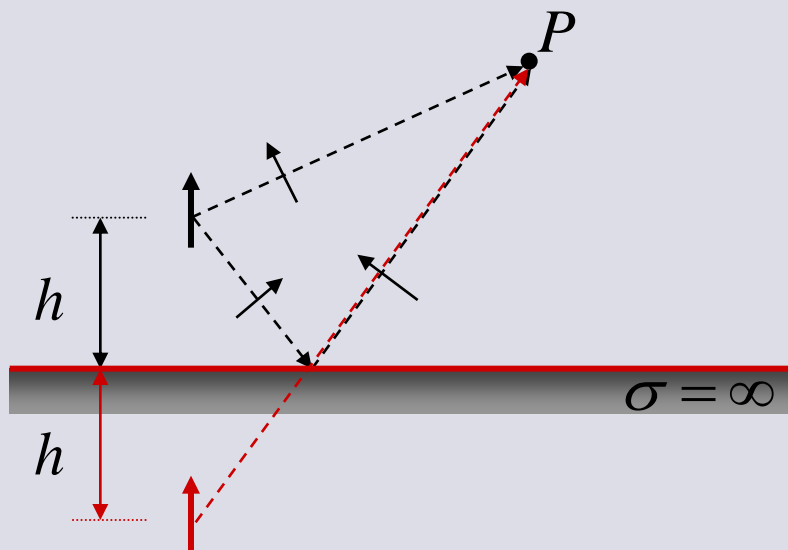


Zonas de radiación: campo lejano

- Conclusiones:
 - Potencia cae como el **cuadrado de la distancia**.
 - Condición de **onda plana**
 - E y H son perpendiculares
 - El módulo de E y H se relacionan a través de la impedancia del medio.
 - El tipo de antena influye **sólo** en la variación angular (**diagrama de radiación**).
 - La **dirección de propagación** coincide con la **línea de visión** con la antena transmisora

Teoría de las imágenes

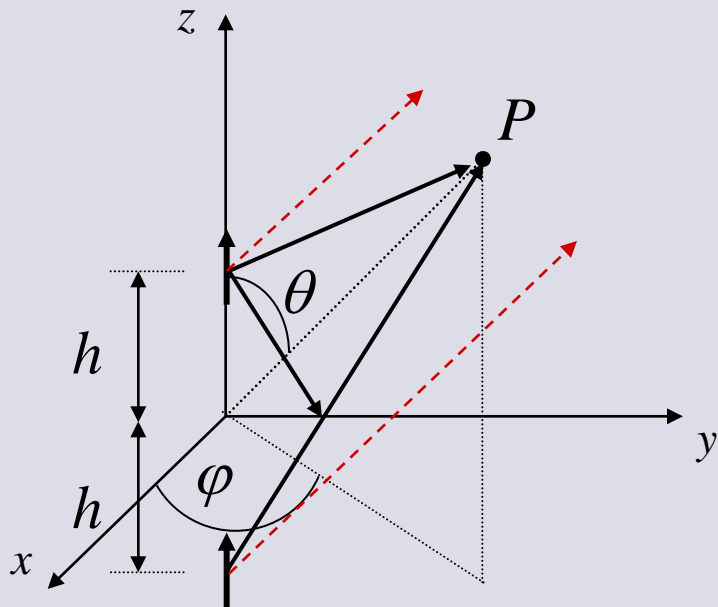
- Intuitivamente: el campo se refleja en el suelo....



- **Conductor perfecto:** toda onda transmitida se refleja se refleja
- **Campo en P :** resultado de una onda directa y una onda reflejada
- **Campo en P :** resultado de la fuente primaria y su imagen, en espacio libre.
- Resultado **válido** exclusivamente en la **región superior** al plano conductor

Teoría de las imágenes

- Ejemplo: campo producido por un dipolo infinitesimal



$$E_{\theta} \approx jZ_0 \frac{I_0 e^{-j\frac{2\pi r}{\lambda}}}{2\pi \cdot r} \sin \theta \left[2 \cos \left(\frac{2\pi \cdot h}{\lambda} \cos \theta \right) \right]$$

Campo
Dipolo Aislado

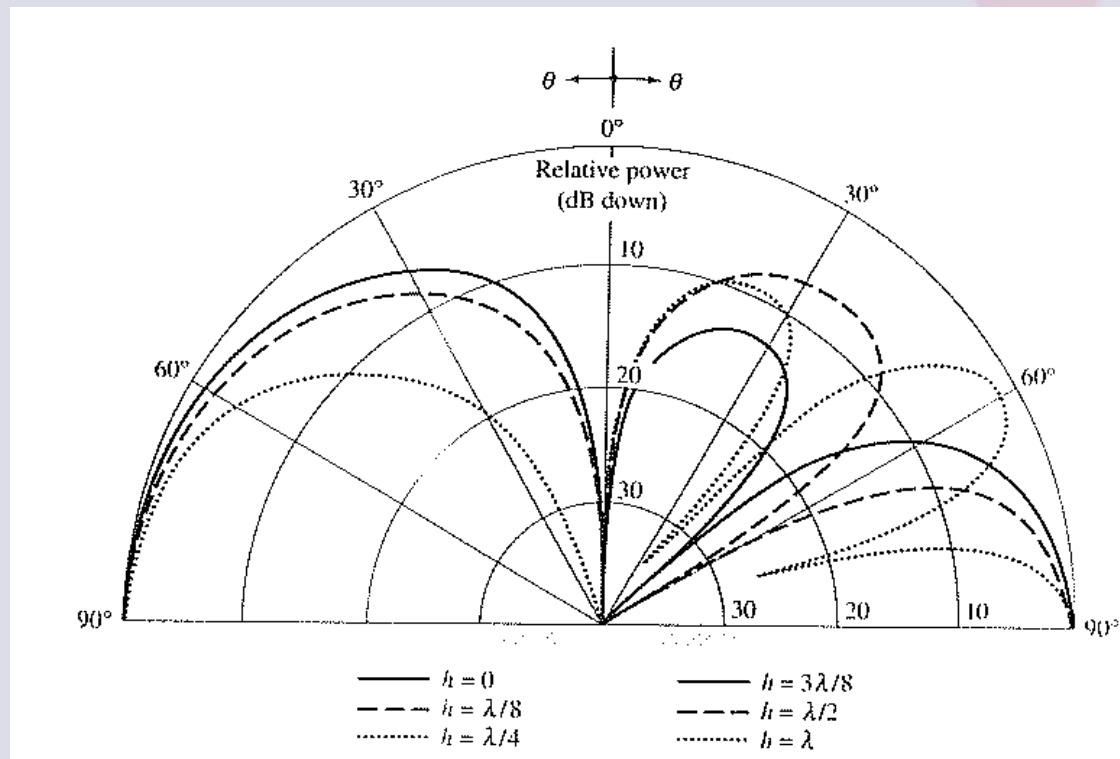
Contribución
de las dos antenas

Propiedades radiación cambian
en función de la relación

$$\frac{h}{\lambda}$$

Teoría de las imágenes

- Ejemplo (continuación)
 - Si $\lambda \gg h$ entonces, la **directividad**:
 - En otro caso....

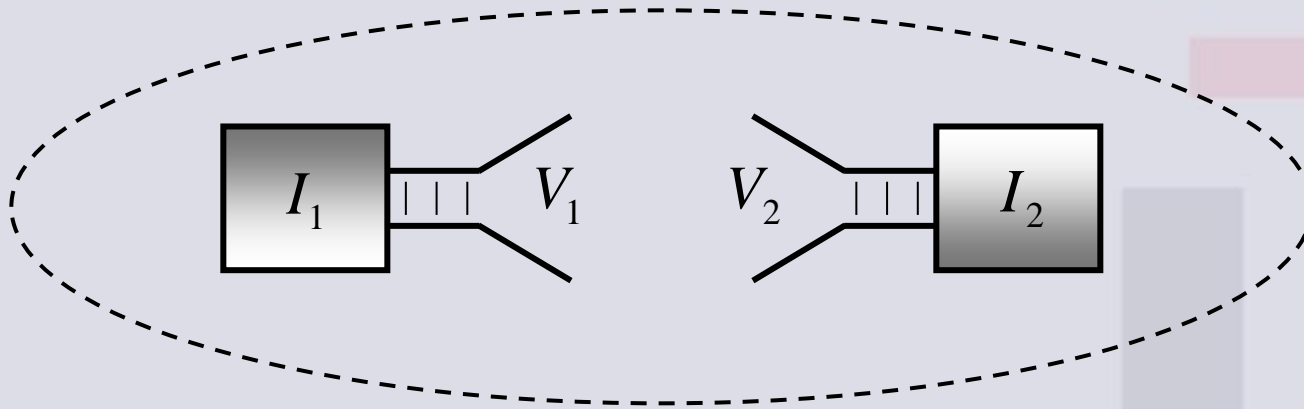


Teorema de reciprocidad

- Permite **relacionar** las propiedades de una **antena receptora** con las de una **emisora**.
- “ *En cualquier red compuesta de elementos lineales, bilaterales y concentrados, si uno aplica una **corriente** (voltaje) entre dos **nodos** (en cualquier rama) y mide el **voltaje** (corriente) entre otros dos **nodos** (en otras dos ramas cualquiera), entonces intercambiar la localización de la fuente y el medidor, no altera la medida*”.

Teorema de reciprocidad

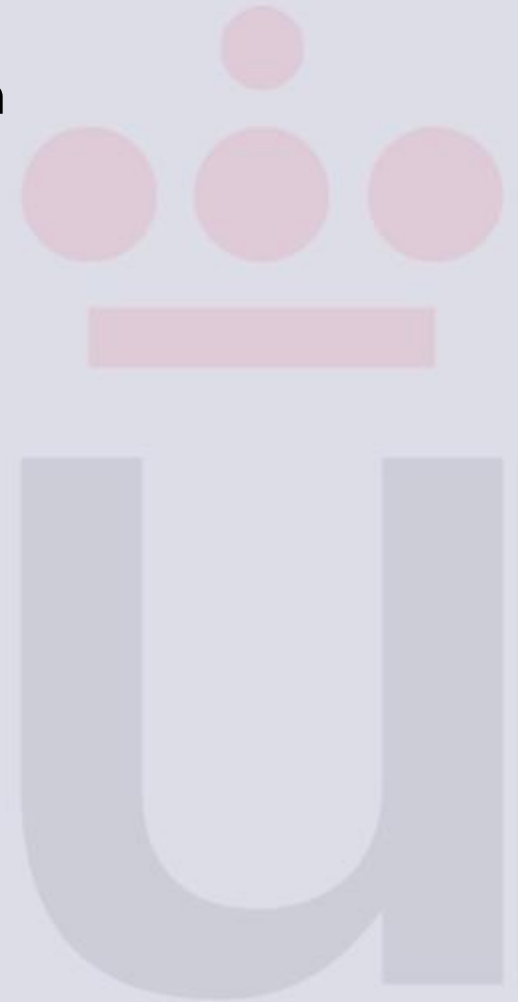
- Supóngase una cámara **anecoica** (sin eco) en la que se sitúan dos antenas que pueden transmitir y recibir, y que operan a la misma frecuencia.



- Se **pueden intercambiar los papeles** de emisión y recepción. Así, los **diagramas de radiación** en transmisión y recepción **coinciden**.
 $I_1 = I_2$

Teorema de reciprocidad

- Ejemplos:
 - Diagrama de radiación de un dipolo en recepción
 - Circuito equivalente de antena en recepción.



Principio de Unicidad

Sea una región del espacio con pérdidas y sin fuentes, delimitada por una superficie S .

Los campos eléctrico y magnético en dicha región, se pueden determinar DE FORMA ÚNICA, si se conocen sobre toda la superficie S :

- El campo eléctrico tangencial

ó

- El campos magnético tangencial

Esta unicidad en la solución nos va a permitir sustituir las fuentes que generan un campo, por otras fuentes ficticias que crean el mismo campo y son más sencillas de analizar

Principios de equivalencia

Se utilizarán para encontrar las fuentes equivalentes y ficticias comentadas en el principio de unicidad.

Sustituimos la antena por fuentes sencillas con los mismos campos tangenciales, y por unicidad el campo radiado será el mismo.

2º principio

Dada una superficie S que rodea una antena que produce sobre S el campo tangencial E_{tag} , se puede encontrar el problema equivalente sustituyendo el interior de S por un conductor perfecto ($\sigma=\infty$) sobre cuya superficie S fluye una densidad de corriente J_{sm} dada por:

$$\mathbf{J}_{sm} = -\mathbf{n} \times \mathbf{E}_{tag}$$

Principios de equivalencia

3º principio

En una superficie S donde conocemos H_{tag} , el problema equivalente viene dado por la sustitución del interior de S por un conductor magnético perfecto ($\sigma_m = \infty$) sobre cuya superficie S fluye una densidad de corriente J_s dada por:

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_{\text{tag}}$$

1º principio

Se usa en el caso de conocer E_{tag} y H_{tag} . El problema equivalente viene dado por la sustitución del interior de S por un conductor perfecto sobre cuya superficie S fluyen unas densidades de corriente J_s y J_{sm}