

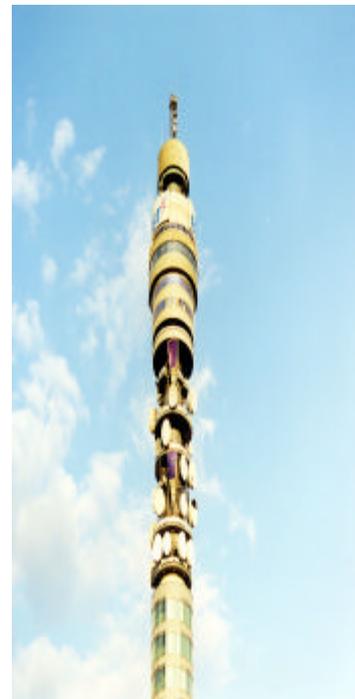
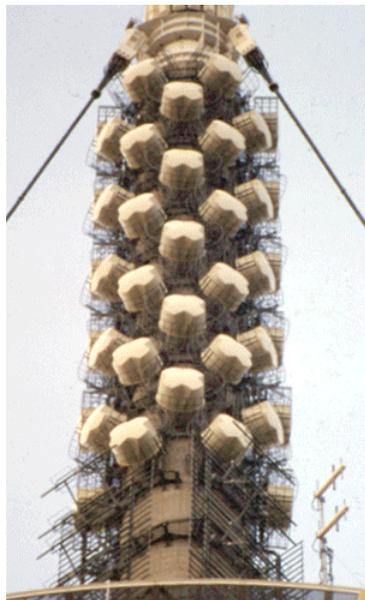
## Introducción

---

Las Antenas son las partes de los sistemas de telecomunicación específicamente diseñadas para radiar o recibir ondas electromagnéticas.

También se pueden definir como los dispositivos que adaptan las ondas guiadas, que se transmiten por conductores o guías, a las ondas que se propagan en el espacio libre.

Los sistemas de Comunicaciones utilizan antenas para realizar enlaces punto a punto, difundir señales de televisión o radio, o bien transmitir o recibir señales en equipos portátiles.



## Breve reseña histórica

---

Los primeros sistemas de comunicación eléctricos fueron la telegrafía, introducida en 1844, seguida por la telefonía, en el año 1878. En estos sistemas, 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 Guglielmo Marconi en 1897.

La primera comunicación transoceánica tuvo lugar en 1901, desde Cornualles a Terranova. En 1907 ya existían servicios comerciales de comunicaciones.

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, por lo que las antenas eran pequeñas comparadas 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.

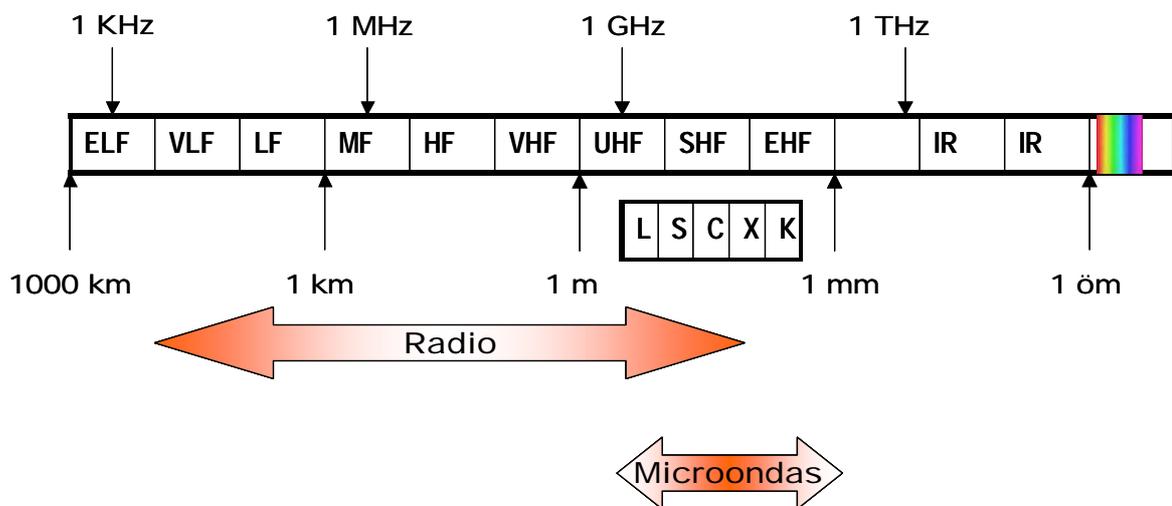
A partir de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron nuevos elementos radiantes (como guías de onda, bocinas, reflectores, etc). Una contribución muy importante fue el desarrollo de los generadores de microondas (como el magnetrón y el klystron) a frecuencias superiores a 1 GHz.

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 inabordable por métodos analíticos. Se desarrollaron métodos asintóticos de baja frecuencia (método de los momentos, diferencias finitas) y de alta frecuencia (teoría geométrica de la difracción GTD, teoría física de la difracción PTD).

En el pasado las antenas eran una parte secundaria en el diseño de un sistema, en la actualidad juegan un papel crítico. Asimismo en la primera mitad del siglo XX se utilizaban métodos de prueba y error, mientras que en la actualidad se consigue pasar del diseño teórico al prototipo final sin necesidad de pruebas intermedias.

## El espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda. El conjunto de todas las frecuencias se denomina espectro.



Las ondas se clasifican por bandas. Las denominaciones de las bandas de frecuencia se pueden realizar por décadas, como por ejemplo MF, HF, VHF, UHF.

Banda	Denominación	frec. mínima	frec. máxima	$\lambda$ máxima	$\lambda$ mínima
ELF	Extremely Low Frequency	-	3 kHz	-	100 km
VLF	Very Low Frequency	3 kHz	30kHz	100 km	10 km
LF	Low Frequency	30 kHz	300 kHz	10 km	1 km
MF	Medium Frequency	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High Frequency	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 Ghz	300 GHz	1 cm	1 mm

En Televisión y FM se utilizan otras denominaciones como Banda I, Banda II, Banda III, IV y V

Banda	frec. mínima	frec. máxima	Canales
I	47 MHz	68 MHz	2,3,4 VHF
II	88 MHz	108 MHz	FM
III	174 MHz	230 MHz	5 al 12 VHF
IV	470 MHz	606 MHz	21 al 37 UHF
V	606 MHz	862 MHz	38 al 69 UHF

A frecuencias de microondas se utilizan otras denominaciones, como bandas L,C,S,X, que provienen de los primeros tiempos del radar.

Banda	frec. mínima	frec. máxima	$\lambda$ máxima	$\lambda$ mínima
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

A frecuencias superiores nos encontramos con la parte del espectro electromagnético correspondientes al infrarrojo, visible y ultravioleta. A frecuencias superiores tenemos los rayos X y los rayos Gamma, de energía mayor y longitudes de onda más reducidas.

Banda	Denominación	frec. mínima	frec. máxima	$\lambda$ máxima	$\lambda$ mínima
	Región submilimétrica	300 GHz-	800 GHz	1 mm-	0,4 mm
IR	Infrarrojo	800 GHz	400 THz	0,4 mm	0,8 $\mu$ m
V	Visible	400 THz	750 THz	0,8 $\mu$ m	0,4 $\mu$ m
UV	Ultravioleta	750 THz	10000 THz	400 nm	12 nm

## Diagramas de radiación

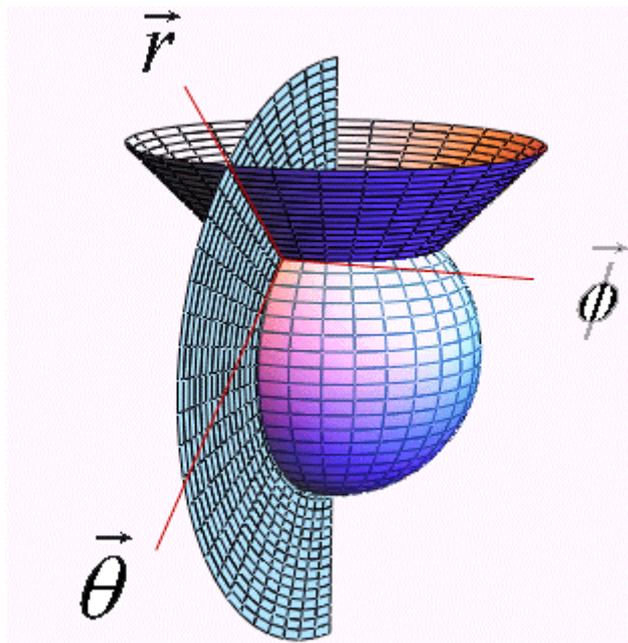
---

El diagrama de radiación de una antena se define como la representación gráfica de las características de radiación en función de la dirección angular.

### Sistema de coordenadas

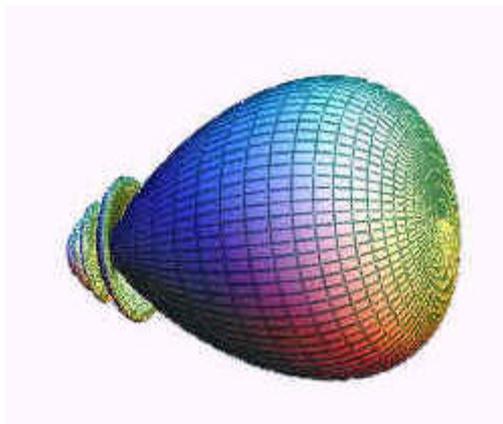
Se utilizará habitualmente un sistema de coordenadas esférico. Las tres variables de un sistema esférico son  $(r, \theta, \phi)$

En un sistema coordenado esférico las superficies  $r=\text{cte}$  son esferas,  $\theta=\text{cte}$  son conos, mientras que  $\phi=\text{cte}$  son semiplanos. La intersección de las tres superficies determina la orientación de los tres vectores unitarios, que son perpendiculares a las superficies respectivas.

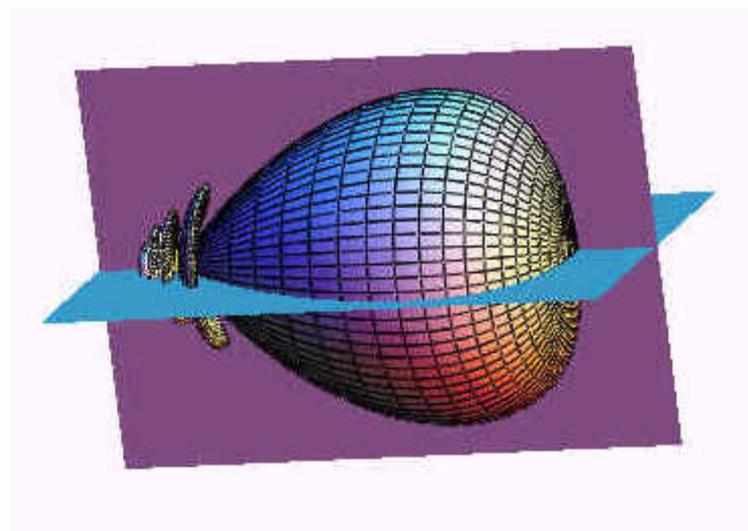


## Diagramas tridimensionales

Se puede representar el campo eléctrico, magnético o la densidad de potencia radiada. Dado que los campos son magnitudes vectoriales se pueden representar el módulo o la fase de sus componentes. Las formas de representación pueden ser tridimensionales o bidimensionales, en escalas lineal o logarítmica. La siguiente figura es la representación tridimensional de los campos radiados por una antena.

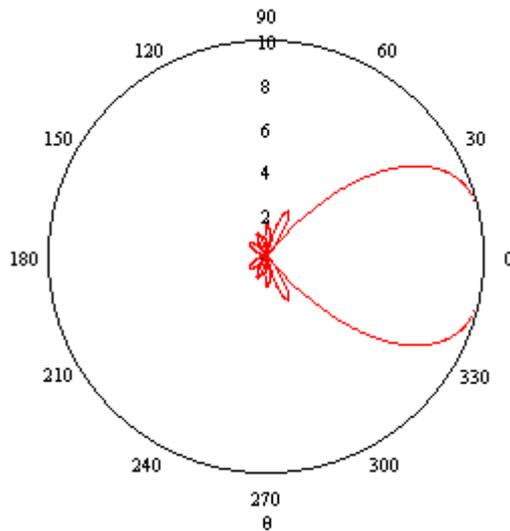


Dada la dificultad de representar gráficamente el diagrama tridimensional se opta por representar cortes del diagrama en coordenadas polares o cartesianas. Los cortes corresponden a la intersección del diagrama 3D con planos.

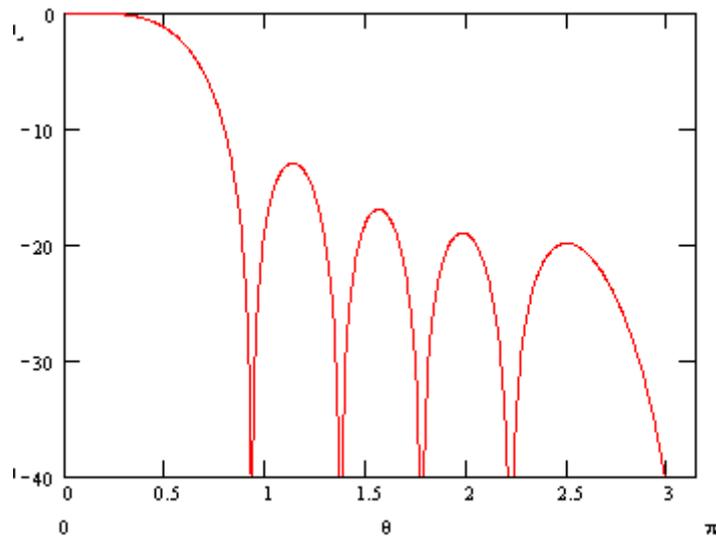


## Diagramas bidimensionales

Un corte bidimensional en coordenadas polares se representaría como

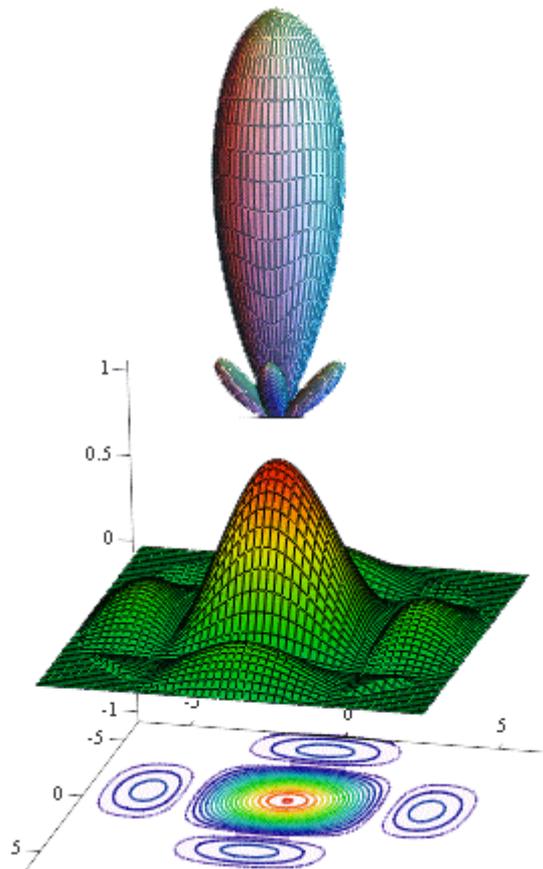


En coordenadas cartesianas y escala logarítmica



## Curvas de nivel

Cuando la antena es muy directiva, y especialmente en el caso de antenas bidimensionales, se suelen utilizar métodos de representación en forma de curvas de nivel o en forma de funciones tridimensionales. Las gráficas siguientes corresponden a una antena de apertura de dimensiones  $2 \times 2$  longitudes de onda.



## Parámetros Fundamentales de las Antenas

---

### Densidad de potencia radiada

La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección. Las unidades son vatios por metro cuadrado. Se puede calcular a partir de los valores eficaces de los campos como

$$\vec{P}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*)$$

La relación entre el módulo del campo eléctrico y el módulo del campo magnético es la impedancia característica del medio

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \mathbf{h}$$

Por lo tanto, la densidad de potencia radiada también se puede calcular a partir de las dos componentes del campo eléctrico.

$$\vec{P}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{E_q^2 + E_f^2}{\mathbf{h}}$$

La potencia total radiada se puede obtener como la integral de la densidad de potencia en una esfera que encierre a la antena.

$$W_r = \iint \vec{P}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot \vec{ds}$$

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección. Las unidades son vatios por estereoradián. Dicho parámetro es independiente de la distancia a la que se encuentre la antena emisora.

La relación entre la intensidad de radiación y la densidad de potencia radiada es

$$K(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = P(\mathbf{q}, \mathbf{f}) r^2$$

La potencia total radiada se puede calcular integrando la intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio.

$$W_r = \iint K(\mathbf{q}, \mathbf{f}) d\Omega = \iint K(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \sin(\mathbf{q}) d\mathbf{q} d\mathbf{f}$$

## Directividad

La Directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia, y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, a igualdad de potencia total radiada.

$$D(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{P(\mathbf{q}, \mathbf{f})}{\frac{W_r}{4\pi r^2}}$$

Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la Directividad se refiere a la dirección de máxima radiación

$$D = \frac{P_{\max}}{\frac{W_r}{4\pi r^2}}$$

La directividad se puede obtener en general a partir del diagrama de radiación de la antena

$$D = \frac{P_{\max}}{\frac{\iint P(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \sin(\mathbf{q}) d\mathbf{q} d\mathbf{f}}{4\pi r^2}}$$

Simplificando términos, resulta

$$D = \frac{4\pi}{\iint \frac{P(\mathbf{q}, \mathbf{f})}{P_{\max}} \sin(\mathbf{q}) d\mathbf{q} d\mathbf{f}} = \frac{4\pi}{\Omega_e}$$

$\Omega_e$  se define como el ángulo sólido equivalente.

Para antenas directivas, con un solo lóbulo principal y lóbulos secundarios de nivel despreciable, se puede obtener una directividad aproximada considerando que se produce radiación uniforme en el

ángulo sólido definido a partir de los anchos de haz a  $-3\text{dB}$  en los dos planos principales del diagrama de radiación.

$$D = \frac{4p}{\Omega_e} = \frac{4p}{q_1 q_2}$$

## Ganancia

La ganancia de una antena se define como 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.

$$G(\mathbf{q}, f) = \frac{P(\mathbf{q}, f)}{\frac{W_e}{4pr^2}}$$

Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la Ganancia se refiere a la dirección de máxima radiación.

$$G = \frac{P_{\max}}{\frac{W_e}{4pr^2}}$$

En la definición de Directividad se habla de potencia radiada por la antena, mientras que en la definición de ganancia se habla de potencia entregada a la antena. La diferencia entre ambas potencias es la potencia disipada por la antena, debida a pérdidas óhmicas.

La eficiencia se puede definir como la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma. La eficiencia es un número comprendido entre 0 y 1.

La relación entre la ganancia y la directividad es la eficiencia

$$G(\mathbf{q}, f) = D(\mathbf{q}, f)h$$

Si una antena no tiene pérdidas óhmicas, la Directividad y la Ganancia son iguales.

## Polarización

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

La polarización de una onda es la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo, en una posición dada. Para ondas con variación sinusoidal dicha figura es en general una elipse. Hay una serie de casos particulares.

Si la figura trazada es una recta, la onda se denomina linealmente polarizada, si es un círculo circularmente polarizada.

El sentido de giro del campo eléctrico, para una onda que se aleja del observador, determina si la onda está polarizada circularmente a derechas o a izquierdas. Si el sentido de giro coincide con las agujas del reloj, la polarización es circular a derechas. Si el sentido de giro es contrario a las agujas del reloj, la polarización es circular a izquierdas. El mismo convenio aplica a las ondas con polarización elíptica.

Se define la relación axial de una onda polarizada elípticamente, como la relación entre los ejes mayor y menor de la elipse de polarización. La relación axial toma valores comprendidos entre 1 e infinito.

Los campos se pueden representar en notación fasorial. Para determinar la variación temporal es suficiente con determinar el valor real de cada una de las componentes. Los ejemplos que se citan a continuación son para ondas planas que se propagan en la dirección del eje z.

Las expresiones siguientes representan campos con polarización lineal

$$\vec{E} = \hat{x}e^{j(\omega t - kz)}$$
$$\vec{E} = (\hat{x} + 0.5\hat{y})e^{j(\omega t - kz)}$$

Las expresiones siguientes representan campos con polarización circular, la primera a izquierdas y la segunda a derechas

$$\vec{E} = (\hat{x} + j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)}$$

$$\vec{E} = (\hat{x} - j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)}$$

Finalmente los siguientes ejemplos corresponden a polarizaciones elípticas

$$\vec{E} = (2\hat{x} + j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)}$$

$$\vec{E} = ((1 + j)\hat{x} - j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)}$$

Se produce una polarización lineal cuando las fases de dos componentes ortogonales del campo eléctrico difieren un múltiplo entero de  $\pi$  radianes. Se produce polarización circular cuando las amplitudes son iguales y la diferencia de fase entre las componentes es  $\pi/2$  o  $3\pi/2$ . La polarización es elíptica en los demás casos.

Cualquier onda se puede descomponer en dos polarizaciones lineales ortogonales, sin más que proyectar el campo eléctrico sobre vectores unitarios orientados según dichas direcciones. Aplicando el mismo principio, cualquier onda se puede descomponer en dos ondas polarizadas circularmente a derechas o izquierdas.

Por ejemplo la siguiente expresión representa una onda polarizada elípticamente a derechas, con relación axial 3.

$$\vec{E} = (3\hat{x} - j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)}$$

Se puede descomponer en dos ondas polarizadas linealmente de amplitudes 3 y -1, o bien en dos ondas polarizadas circularmente a derechas e izquierdas

$$\vec{E} = (3\hat{x} - j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)} = A(\hat{x} - j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)} + B(\hat{x} + j\hat{y}) e^{j(\omega t - kz)}$$

Resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones se determinan los valores de A y B

$$A + B = 3$$

$$A - B = 1$$

Los valores son A=2, B=1.

## Impedancia

La impedancia de una antena se define como la relación entre la tensión y la corriente en sus terminales de entrada. Dicha impedancia es en general compleja. La parte real se denomina resistencia de antena y la parte imaginaria, reactancia de antena.

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a$$

Se define la resistencia de radiación como la relación entre la potencia total radiada por una antena y el valor eficaz de la corriente en sus terminales de entrada, elevada al cuadrado.

Se define la resistencia óhmica de una antena como la relación entre la potencia disipada por efecto de pérdidas resistivas y la corriente en sus terminales al cuadrado.

Por lo tanto la resistencia de antena la podemos considerar como la suma de la resistencia de radiación y la resistencia óhmica.

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a = (R_r + R_\Omega) + jX_a$$

La eficiencia de una antena se puede obtener a partir de las resistencias de radiación y óhmicas, teniendo en cuenta que es la relación entre la potencia total radiada y la potencia entregada a la antena.

$$h = \frac{W_t}{W_e} = \frac{W_t}{W_t + W_\Omega} = \frac{I^2 R_r}{I^2 (R_r + R_\Omega)} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega}$$

## Adaptación

Las antenas receptoras tienen un circuito equivalente de Thevenin, con una impedancia de antena y un generador de tensión. La transferencia de potencia entre la antena y la carga es máxima cuando ambas impedancias son complejas conjugadas.

$$W_r^m = \frac{|V_a|^2}{4R_a}$$

En general, si no hay adaptación, la potencia recibida por una carga  $R_L + jX_L$  conectada a una antena de impedancia  $R_a + jX_a$  se puede calcular como

$$W_r = \frac{|V_a|^2 R_L}{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2}$$

Se define el coeficiente de adaptación como la relación entre la potencia recibida y la potencia que se recibiría en el caso de máxima transferencia de potencia. Toma valores entre 0 y 1.

$$C_a = \frac{W_r}{W_r^m} = \frac{4R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2}$$

## Área y longitud efectivas

El área efectiva se define como la relación entre la potencia recibida y la densidad de potencia incidente en una antena. La antena debe estar adaptada a la carga, de forma que la potencia transferida sea la máxima. La onda recibida debe estar adaptada en polarización a la antena.

$$A_{ef} = \frac{W_r}{P_i}$$

La longitud efectiva de una antena linealmente polarizada se define como la relación entre la tensión inducida en una antena en circuito abierto y el campo incidente en la misma.

$$l_{ef} = \frac{V_a}{E_i}$$

## Ecuación de transmisión

---

Consideremos un enlace de comunicaciones entre dos puntos, con dos antenas separadas una distancia  $r$ . Si la antena transmisora fuera isotrópica, es decir si la potencia transmitida se repartiera por igual en todas las direcciones del espacio, la densidad de potencia en cualquier punto sería

$$P_i(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{W_t}{4\pi r^2}$$

En un caso real la antena transmisora es directiva, por lo que para calcular la densidad de potencia hay que tener en cuenta la definición de directividad

$$P_i(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{W_t}{4\pi r^2} D(\mathbf{q}, \mathbf{f})$$

La potencia recibida en una antena, en el caso de tener adaptación sera

$$W_r = P(\mathbf{q}, \mathbf{f}) A_{ef}(\mathbf{q}', \mathbf{f}')$$

Si las antenas transmisora y receptora están orientadas en la dirección de los máximos de los diagramas de radiación, la expresión final será

$$W_r = \frac{W_t}{4\pi r^2} D A_{ef}$$

La relación entre el área efectiva y la directividad de cualquier antena, tal y como se demostrará posteriormente es:

$$A_{ef} = D \frac{I^2}{4\pi}$$

La ecuación de transmisión queda finalmente como

$$W_r = \frac{W_t}{4\pi r^2} D_t \left( D_r \frac{I^2}{4\pi} \right)$$

$$\frac{W_r}{W_t} = \left( \frac{I}{4\pi r} \right)^2 D_t D_r$$