

### 3.1 Consideraciones generales sobre antenas.

El “*Institute of Electrical and Electronics Engineers*” (IEEE) define una antena como “*aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas*” (IEEE Std. 145-1983). Las antenas tienen en común el hecho de ser una región de transición entre la zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en espacio libre, a la cual se le puede asignar un carácter direccional. La representación de una onda se realiza por tensiones y corrientes (hilos conductores) o por campos (guías de onda) en espacio libre mediante campos.

La misión de la antena es la de radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas para la aplicación. Por aplicación se entiende la función que desarrollara la antena, como por ejemplo para la transmisión de canales de TV, se transmite de manera omnidireccional para que llegue al máximo número de usuarios.

En cada aplicación se impondrán unos requisitos sobre la zona en la que se quiere concentrar la energía, para así poder captar en algún punto del espacio la onda radiada. Es por ello que las dos funciones básicas de una antena es: la **transmitir** y **recibir**, imponiendo en cada caso las condiciones particulares sobre la direccionalidad de la antena, los niveles de potencia que se deben soportar, las frecuencias de trabajo y otros parámetros que definiré más adelante.

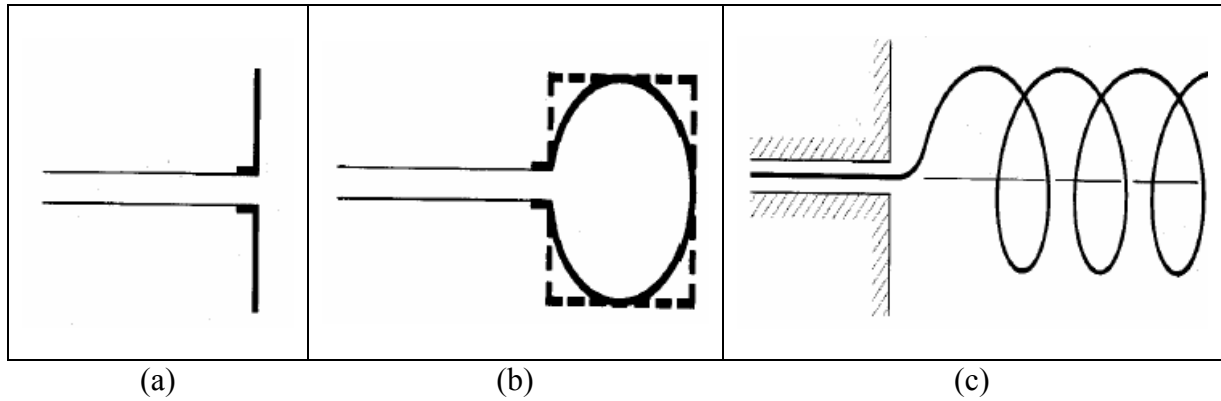
La banda de frecuencia de trabajo va a definir el tipo de antena, e incluso sus propiedades más importantes, porque estas propiedades van a depender del *tamaño eléctrico* de las antenas, es decir, de la relación entre su longitud ( $l$ ) y la longitud de onda ( $\lambda=c/f$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío  $3 \cdot 10^8$  m/s y  $f$  la frecuencia).

Para nuestro caso trabajaremos en la banda para WLAN, es decir, a la frecuencia de 2.4GHz. ( $\lambda=0.1228m$ ).

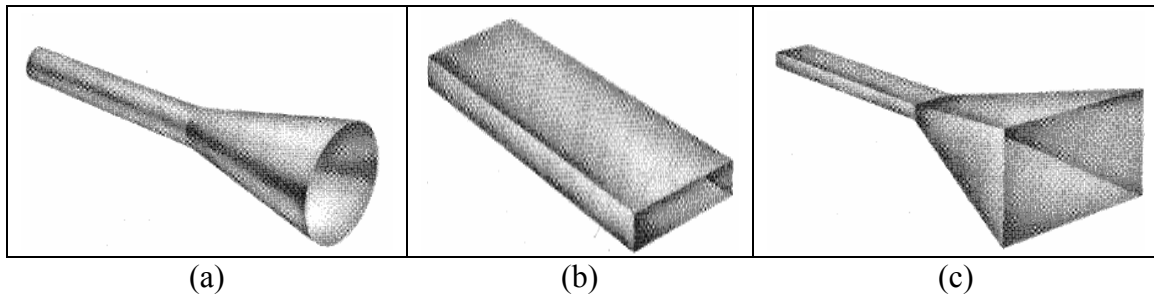
### 3.1 Tipos de antenas.

Cada aplicación y cada banda de frecuencia presentan características peculiares que dan origen a unos tipos de antenas muy diversas. De una forma más amplia y no tan exhaustiva, los tipos más comunes de antenas se pueden agrupar en los siguientes bloques:

- **Antenas de hilo:** se distinguen por que están construidas con hilos conductores que soportan las corrientes que dan origen a los campos radiados. Pueden estar formados por hilos rectos (dipolos, rombos, V), espirales (circular, cuadrada o cualquier forma arbitraria) y hélices.
- **Antenas de apertura:** en estas antenas la onda radiada se consigue a partir de una distribución de campo soportada por la antena y se suelen excitar por guías de onda. Son antenas de apertura las bocinas (piramidales o cónicas), las aperturas sobre planos y ranuras sobre planos conductores y las guías de onda.



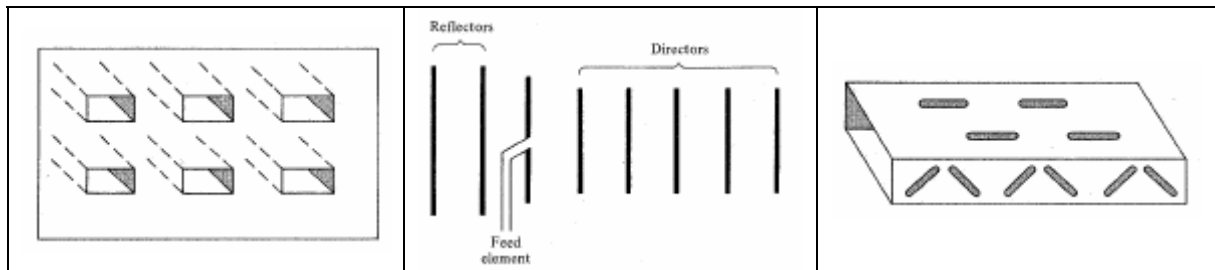
**Figura 3.0** Todas estas antenas son antenas de hilo, (a) es un dipolo, (b) es una circular o cuadrada, y (c) es una antena de hélice.



**Figura 3.1** Todas estas antenas son antenas de apertura, (a) es bocina cónica, (b) es guía de onda y (c) es una bocina piramidal.

El uso de antenas de apertura antes descritas haciendo de alimentador y de reflectores permite la transmisión de señales a gran distancia. Como reflector es común el uso de parabólicas.

- **Agrupaciones de antenas:** en algunas aplicaciones son requeridas características de radiación que no se pueden conseguir con un único elemento, es por ello que con la combinación de varias antenas podemos obtener una gran flexibilidad.



**Figura 3.2** Agrupación de antenas, (a) agrupación de aperturas, (b) es un array de aYagi-Uda y (c) es guía de ondas ranurada.

## 3.2 Parámetros de una antena.

Una antena forma parte de un sistema muy amplio, por lo que es necesario caracterizar con una serie de parámetros que la describan y permitan evaluar el efecto sobre el sistema de una determinada antena, o bien especificar el comportamiento deseado de la antena para poder incluirla en nuestro sistema.

A efectos de definición de los parámetros de la antena, conviene definirlos según sean para transmitir o para recibir, pero que en definitiva son equivalentes, por lo que los utilizaremos para ambos casos.

### 3.2.1 Impedancia.

La antena se conectará a un transmisor y radiará el máximo de potencia posible con el mínimo de pérdidas. La antena y el transmisor se deben adaptar para una máxima transferencia de potencia. Normalmente, la antena estará a una cierta distancia del transmisor y se conectará mediante un cable o una guía de ondas que participa también en la adaptación, teniéndose en cuenta su impedancia característica, la atenuación y la longitud.

El transmisor produce corrientes y campos que pueden ser medidos en puntos característicos de la antena.

A la entrada de la antena se puede definir la impedancia de entrada  $Z_e$  mediante relaciones tensión-corriente. La impedancia de una antena se define como suma de una parte real  $R_e(\omega)$  y una parte imaginaria  $Z_e(\omega)$  dependientes de la frecuencia. Si  $Z_e(\omega)$  no presenta una parte reactiva a una frecuencia dice que es una antena resonante. Dado que la antena radia energía hay una pérdida neta de potencia hacia el espacio debida a la radiación, que puede ser asignada a una resistencia de radiación  $R_r$ , definida como el valor de la resistencia que disipa únicamente la misma potencia que la radiada por la antena.

Además se tendrá que considerar las pérdidas introducidas por los conductores de la antena. Todas las pérdidas pueden englobarse en una resistencia de pérdidas  $R_\Omega$ . La resistencia de entrada es la suma de la resistencia de radiación y de pérdidas.

La impedancia de entrada es un parámetro de gran trascendencia, ya que condiciona las tensiones que hay que aplicar al generador para obtener valores de corrientes en la antena, y en consecuencia, una determinada potencia radiada. Si la parte reactiva es grande, tendremos que aplicar tensiones altas para obtener corrientes apreciables, y si la resistencia de radiación es baja, se necesitan corrientes grandes para obtener una potencia radiada importante.

La aparición de pérdidas en la antena provoca que no toda la potencia liberada por el transmisor sea radiada, por lo que se define el rendimiento o eficiencia de la antena  $\eta$ , mediante de relación entre la potencia radiada y la liberada.

$$\eta_i = \frac{P_{radiada}}{P_{liberada}} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega}$$

### 3.2.2 Intensidad de radiación.

Una de las características fundamentales de una antena es la capacidad de radiar en una dirección del espacio, es decir, para concentrar la energía radiada en ciertas direcciones del espacio. Antes de definir este parámetro, es conveniente definir un plano de referencia donde esta situada la antena que queremos caracterizar, por ello se definen un sistema de coordenadas.

El sistema de coordenadas que se utiliza habitualmente en antenas son las coordenadas esféricas, ya que así podremos definir una dirección del espacio.

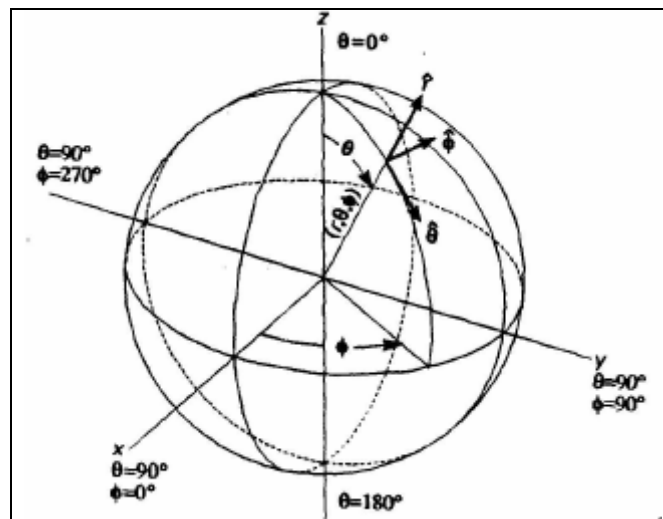


Figura 3.3 Sistema de coordenadas esféricas.

La onda electromagnética radiada se compone de un campo eléctrico  $E(V/m)$  y de un campo magnético  $H(A/m)$  (ecuaciones de Maxwell).

A partir de los valores eficaces de los campos se define la densidad de potencia por unidades de superficie como:

$$\vec{P}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad W/m^2$$

Por lo que se ha supuesto para los campos una variación temporal de la forma  $e^{j\omega t}$ , (\*) denota el conjugado del complejo,  $Re$  la parte real del complejo y  $\times$  el producto vectorial.

Para los campos radiados, el modulo del campo eléctrico y el campo magnético, están relacionados por la impedancia característica del medio  $NN$ , que en el vacío vale  $120\pi\Omega$

También podemos definir la densidad de potencia radiada:

$$P(\theta, \phi) = [ |E_\theta|^2 + |E_\phi|^2 ] / \eta$$

Y podemos obtener la potencia radiada total, como la integral de la densidad de potencia en una superficie esférica:

$$P_s = \iint \vec{\rho}(\theta, \phi) \cdot d\vec{s}$$

La densidad de potencia radiada es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección.

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

$$K(\theta, \phi) = \rho(\theta, \phi) r^2$$

y la potencia total radiada también se puede calcular integrando la intensidad de radiación en todas direcciones del espacio:

$$P_r = \iint_{4\pi} K(\theta, \phi) d\Omega$$

### 3.2.3 Diagrama de radiación.

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las diferentes direcciones del espacio.

Una antena no radia del mismo modo en todas las direcciones del espacio, sino que según su geometría, dimensiones o forma de excitación es capaz de orientar la energía en unas determinadas direcciones del espacio. El diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades direccionales de radiación de una antena en el espacio.

Un ejemplo de diagrama de radiación de un dipolo elemental es la **Figura 3.4** representado en tres dimensiones, y en la **Figura 3.5** se representa el mismo modelo de antena pero en dos dimensiones y en coordenadas polares para una mejor identificación de los parámetros de radiación.

A partir de los diagramas de radiación, podemos identificar las prestaciones de una antena. Dependiendo del tipo de utilidad que se le vaya a dar a una antena, nos interesara que sea mas o menor directiva, sectorial, etc. por lo que nos fijaremos a primera vista en el diagrama de radiación.

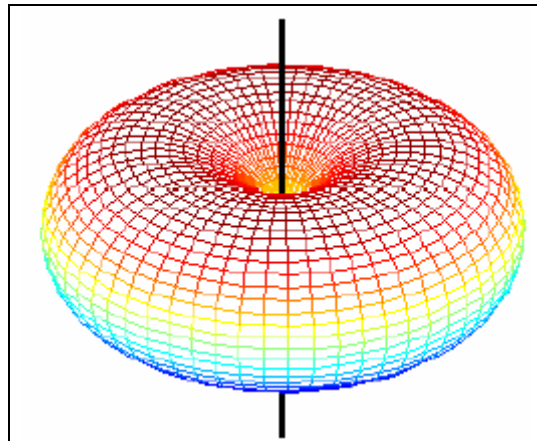


Figura 3.4 Diagrama de radiación de un dipolo elemental.

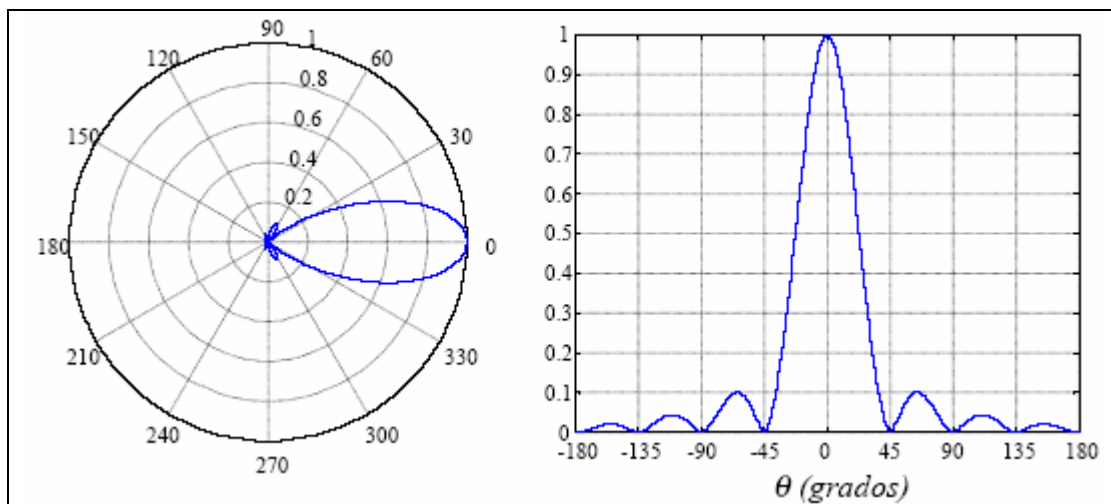


Figura 3.5 Diagrama de radiación de un dipolo elemental en polares y en dos dimensiones.

### 3.2.3.1 Parámetros del diagrama de radiación.

Asociados al diagrama de radiación, se definen una serie de parámetros, que son los que habitualmente se utilizan a la hora de especificar el comportamiento de una antena. Para ello, se define un *lóbulo de radiación* como la porción del diagrama delimitada por regiones de menor radiación (nulos). Los lóbulos que se suelen definir son:

- **Lóbulo principal:** aquel que contiene la dirección de máxima radiación.
- **Lóbulos secundarios:** todos aquellos distintos al principal.
- **Lóbulos laterales:** los adyacentes al principal, que generalmente son los más altos de todos los secundarios.
- **Lóbulo posterior:** el que se encuentra en la dirección opuesta al principal.

Una vez definidos los lóbulos se determinan los siguientes parámetros que se especifican en la **Figura 3.6**

- **Nivel de lóbulos secundarios:** el nivel del mayor lóbulo secundario respecto al principal. A veces se utiliza la relación de lóbulo principal a lóbulo secundario, que coincide con el negativo del anterior (en dB). Los lóbulos secundarios radian potencia indeseada en direcciones no controladas, que pueden dar lugar a interferencias en sistemas de comunicaciones.
- **Ancho del haz principal a -3 dB:** es el ancho del lóbulo principal entre puntos de potencia mitad, en el plano considerado.
- **Ancho del haz principal entre nulos:** es el ancho del lóbulo principal completo. Para el mismo plano, la relación entre los dos parámetros anteriores está comprendida entre 2 y 3, dependiendo de la distribución de corriente o de campo sobre la antena. A nivel práctico se suele utilizar:

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

- **Relación delante-atrás:** es la relación entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior. La radiación posterior puede ser causa de interferencias en radio enlaces, ya que muchas veces, debido a la simetría de los reflectores parabólicos, la radiación posterior asociada a la difracción en los bordes de éstos es elevada.

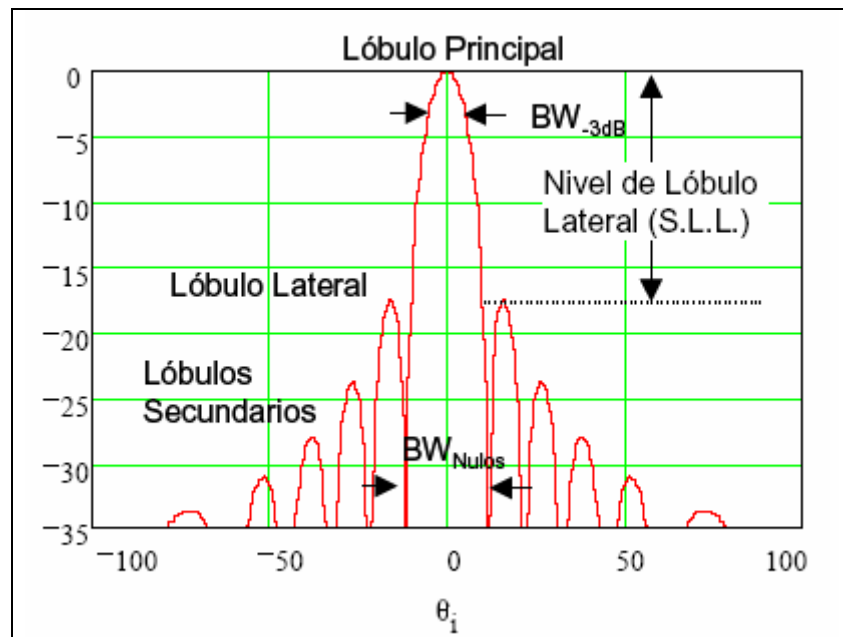


Figura 3.6 Parámetros del diagrama de radiación.

En radiocomunicaciones, los lóbulos secundarios representan radiaciones indeseadas que pueden lugar a interferencias con otros sistemas. En el caso de las estaciones terrenas de comunicaciones por satélite hay una normativa internacional de obligado cumplimiento para los gálbos que deben cumplir los lóbulos secundarios de las mismas (Normas UIT-R 580-1 a 580-5 y 465).

### 3.2.4 Directividad.

La directividad  $D$  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<sup>1</sup> que radie la misma potencia de que antena.

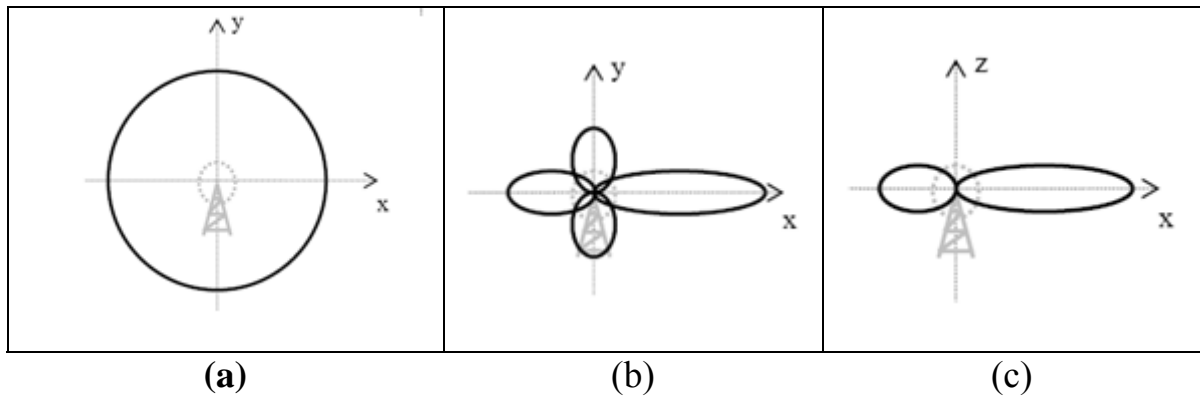
$$D(\theta, \phi) = \frac{\wp(\theta, \phi)}{P_r / 4\pi r^2}$$

Si no se especifica la dirección angular, podremos obtener la directividad en referencia a la dirección de máxima radiación.

$$D = \frac{\wp_{\max}}{P_r / 4\pi r^2}$$

La directividad se puede obtener a partir del diagrama de radiación de la antena. Si se define el diagrama de radiación normalizado mediante la expresión:

$$t(\theta, \phi) = \frac{\wp(\theta, \phi)}{\wp_{\max}} = \frac{K(\theta, \phi)}{K_{\max}}$$



**Figura 3.7** (a) diagrama de radiación de una antena isotrópica, (b) y (c) diagrama de radiación de antenas directivas en la dirección  $x$ .

La directividad se puede escribir de la forma:

$$D = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} t(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_e}$$

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

<sup>1</sup> Antena Isotrópica: antena que envía la potencia del transmisor repartida por igual en todas direcciones.

Si se obtuviera un diagrama de radiación uniforme para un cierto ángulo sólido y cero fuera de esa zona, en este caso, sería igual al ángulo sólido en el que está radiando. Para una antena isotrópica la directividad vale 1.

Conocida la directividad máxima  $D$  y el diagrama de radiación normalizado  $t(\theta, \phi)$ , la directividad en cualquier dirección se obtiene directamente del producto de ambos.

$$D(\theta, \phi) = Dt(\theta, \phi)$$

Otro parámetro directamente relacionado con la directividad es la ganancia de la antena  $G$ . La definición de ganancia es parecida pero con la diferencia en vez de potencia radiada es potencia entregada a la antena.

$$G(\theta, \phi) = \eta_l D(\theta, \phi)$$

### 3.2.5 Polarización.

La polarización de una antena es la “figura que traza en función del tiempo, para una dirección determinada, el extremo del vector de campo radiado y su sentido de giro, visto por un observador situado sobre la antena”.

Como la polarización depende de la dirección, se suele asignar a la antena la polarización de la dirección de máxima radiación. Esta polarización se mantiene habitualmente en una buena parte del lóbulo principal. Destacamos, que a la hora de determinar el sentido de giro del extremo del vector de campo, situamos al observador sobre la antena, mirando en la dirección de propagación. El concepto de polarización es importante en los sistemas de radiocomunicaciones, porque la antena receptora sólo es capaz de captar la potencia contenida en la polarización del campo coincidente con la suya propia.

En una **polarización lineal** el extremo del vector de campo eléctrico se mueve a lo largo de una recta. Algún ejemplo de polarización lineal.

$$\vec{E}(x, y, z) = (\hat{x} + 0.5\hat{y})e^{-jkz}$$

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \Re e \left[ \vec{E}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] = \cos(\omega t - kz)\hat{x} + 0.5 \cos(\omega t - kz)\hat{y}$$

Para tener una **polarización circular** el extremo del vector de campo eléctrico se tiene que mover a lo largo de una circunferencia. Algún ejemplo de polarización circular.

$$\vec{E}(r, \theta, \phi) = (\hat{\theta} + j\hat{\phi})e^{-jkr}$$

$$\vec{E}(r, \theta, \phi, t) = \Re e \left[ \vec{E}(r, \theta, \phi) e^{j\omega t} \right] = \cos(\omega t - kr)\hat{\theta} + \cos(\omega t - kr + 0.5\pi)\hat{\phi}$$

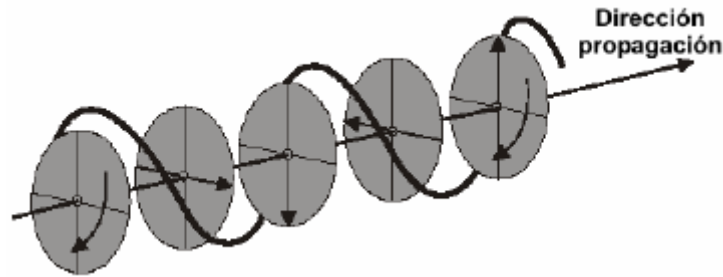


Figura 3.8 Polarización circular.

Para tener una **polarización elíptica**, primero intentaremos descartar los casos de polarización lineal y elíptica, y será entonces cuando sabremos si una antena tiene polarización elíptica o no. Algún ejemplo de polarización elíptica.

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = (\hat{\theta} + 0.7e^{j0.5} \hat{\varphi}) e^{-jkr}$$

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi, t) = \Re e[\vec{E}(r, \theta, \varphi) e^{j\omega t}] = \cos(\omega t - kr) \hat{\theta} + 0.7 \cos(\omega t - kr + 0.5) \hat{\varphi}$$

### 3.2.6 Ancho de banda.

Debido a la geometría finita de la antena, estas limitadas a operar satisfactoriamente en una banda o margen de frecuencias. Este intervalo de frecuencias es conocido como ancho de banda. Lo podemos definir a partir de varios parámetros, como son el diagrama de radiación, la directividad, la impedancia, etc.

Los parámetros descritos a continuación están referidos al receptor, pero tanto en transmisión como en recepción estos parámetros son recíprocos, son tanto equivalentes en transmisión como en recepción. Una antena hace las funciones de transmisor como de receptor. Cuando no esta transmitiendo, esta recibiendo.

### 3.2.7 Adaptación.

Desde los terminales de la antena, el receptor se ve así mismo como una impedancia de carga  $Z_L = R_L + jX_L$ , mientras que el receptor ve a la antena como un generador ideal de tensión  $V$  e impedancia  $Z_a = R_a + jX_a$ . La transferencia de potencia sea máxima cuando haya adaptación conjugada ( $Z_L = (Z_a)^*$ ), y entonces la potencia liberada por la antena a la carga será:

$$P_{L \max} = \frac{|V_{co}|^2}{4R_a}$$

en general, si no hay adaptación tendremos

$$P_L = P_{L\max} C_a$$

siendo  $C_a$  el coeficiente de desadaptación dado por:

$$C_a = 1 - |\rho_L|^2 = \frac{4R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 (X_a X_L)^2}$$

donde  $\rho_L$  es el coeficiente de reflexión.

### 3.2.7 Área y longitud efectiva.

La antena extrae la potencia del frente de ondas incidentes, por lo que presenta una cierta área de captación o área efectiva  $A_{ef}$ , definida como la relación entre la potencia que libera la antena a su carga y la densidad de potencia de la onda incidente que representa la porción del frente de onda que la antena ha interceptado y de la cual ha entregado toda la potencia a la carga.

$$A_{ef} = \frac{P_L}{\wp}$$

La definición anterior lleva implícito la dependencia el área efectiva con la impedancia de carga, la adaptación y la polarización de la onda.

$$\wp = |E|^2 / \eta \quad A_{ef} = \frac{|V_{co}|^2}{4R_r \wp} = \frac{|V_{co}|^2 \eta}{|E|^2 4R_r} = \frac{l_{ef}^2 \eta}{4R_r}$$

Donde se ha introducido un nuevo parámetro, la longitud efectiva LEF, mediante la relación entre la tensión inducida en el circuito en bornes de la antena y la intensidad de campo incidente.

La longitud y el área efectiva están definidas a partir de magnitudes eléctricas y no coinciden necesariamente con las dimensiones reales de las antenas. De nuevo esta definición lleva implícito una dependencia con la polaridad de la onda.

$$l_{ef} = \frac{|V_{co}|}{|E|}$$

Después de definir los parámetros anteriores ya estaríamos en disposición de poder caracterizar una antena, sea del tipo y frecuencia que sea. Todas las antenas se definirán igual.

Para el estudio de la antena que queremos fabricar, definiremos los parámetros anteriores e intentaremos medir todos ellos aunque no siempre es posible con los aparatos de instrumentación disponibles.