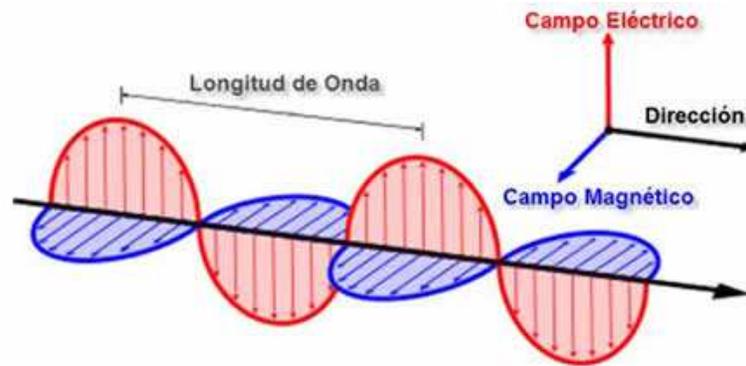


## POLARIZACIÓN DE ONDAS

Por definición, la polarización de una onda electromagnética es el plano en el que se encuentra el componente eléctrico de esta onda. Cada onda electromagnética está compuesta por dos campos, el eléctrico y el magnético, siempre situados en planos ortogonales (físicamente planos de 90 grados) y que varían en fase (0 grados). Estos campos se propagan en cualquier material aislante (dieléctrico) con una velocidad de propagación, cuyo vector está a 90 grados de los vectores de campo eléctrico y magnético. En el vacío, esta velocidad es la de la luz.

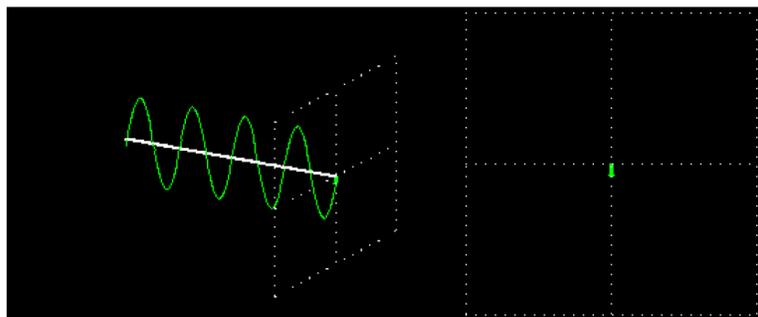
Un dipolo posicionado verticalmente, alimentado por un generador de frecuencia  $F$ , genera una onda electromagnética polarizada verticalmente, ya que el componente del campo eléctrico está en el plano vertical (y, en consecuencia, el componente del campo magnético está en el plano horizontal).

Vea la siguiente figura, donde aparecen los tres vectores  $E$ ,  $B$  y  $V$ , con 90 grados físicos entre cualquiera de ellos, con  $E$  y  $B$  variando en fase o con cero grados de retraso eléctrico, característica básica de la onda electromagnética:

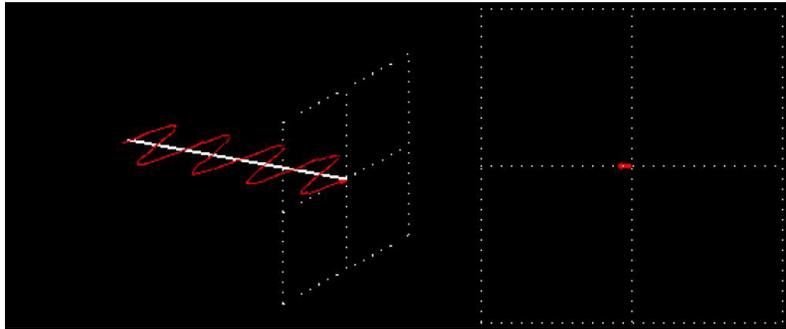


Como esta onda se sitúa siempre en el mismo plano, se llama onda con polarización lineal.

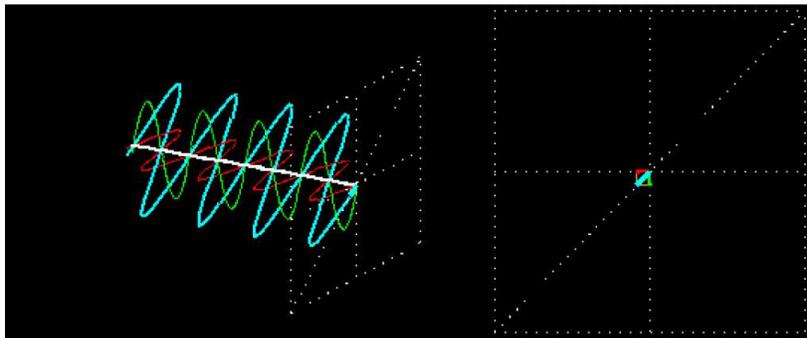
La siguiente figura ilustra una onda verticalmente polarizada linealmente que muestra solo el vector de campo eléctrico (el magnético siempre está presente y a 90 grados):



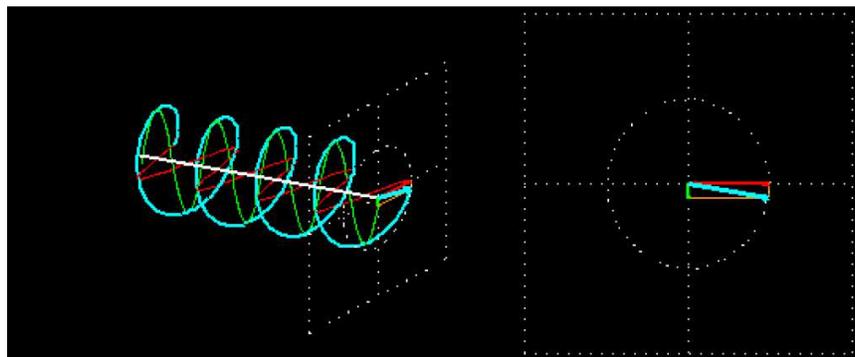
La siguiente figura ilustra una onda horizontalmente polarizada linealmente que muestra solo el vector de campo eléctrico (el magnético siempre está presente y a 90 grados físicos):



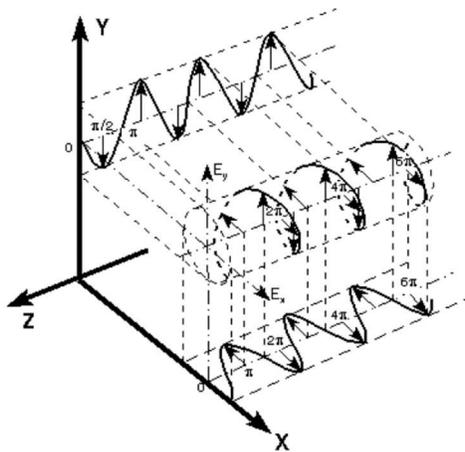
La combinación de dos ondas polarizadas linealmente, una vertical y una horizontal, y eléctricamente en fase, resulta en una onda linealmente polarizada inclinada, como se puede ver en la siguiente figura:



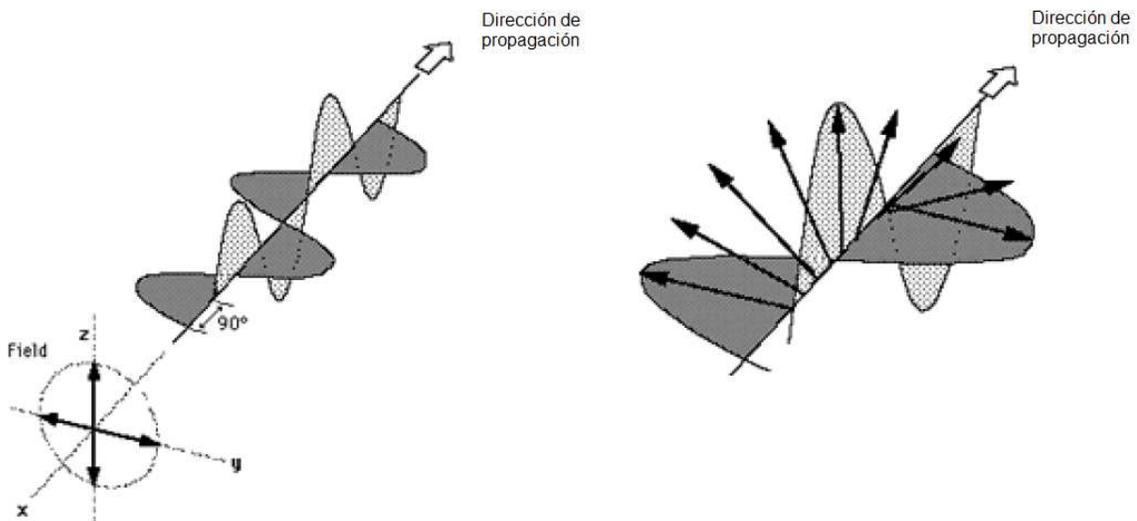
La combinación de dos ondas polarizadas linealmente, una vertical y otra horizontal, de la misma amplitud y 90 grados de retraso eléctrico, da como resultado una onda polarizada circularmente (como una figura de Lissajous) como se ve en la siguiente figura:



La siguiente figura también muestra cómo se obtiene una onda de polarización circular:



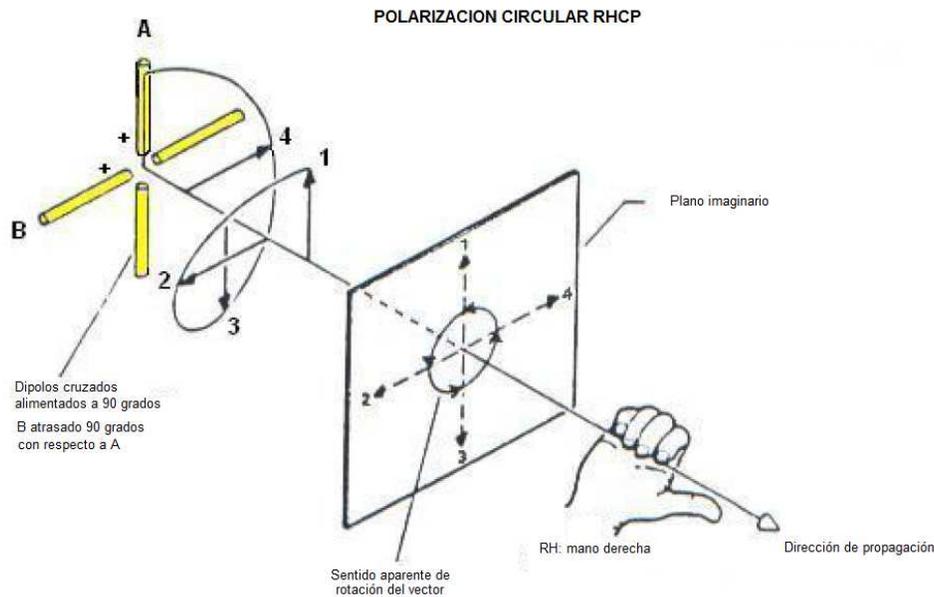
Combinación de dos ondas linealmente polarizadas H y V, desfasadas 90 grados.



El vector resultante de la combinación de dos ondas de la misma amplitud, con polarización lineal, una horizontal y otra vertical, y desfasadas 90 grados, giran en torno al eje de propagación, recibiendo la denominación de *onda polarizada circularmente*.

El ejemplo anterior es de una onda LHCP.

La siguiente figura muestra dos dipolos cruzados A y B. B alimenta con 90 grados de desplazamiento de fase (retardo) con respecto al dipolo A y alimenta las polaridades instantáneas (+). En el pico positivo del voltaje sinusoidal aplicado al dipolo A, genera el vector 1, que será el primero en abandonar la antena y cruzar el plano. Un cuarto de período más tarde, es el turno del dipolo B para recibir el pico sinusoidal positivo, ya que está 90 grados atrás, y luego genera el vector 2, que será el segundo en cruzar el plano imaginario, y así sucesivamente, cuando llegue el pico negativo en el dipolo A que genera el vector 3, y luego el pico sinusoidal negativo en el dipolo B que genera el vector 4:



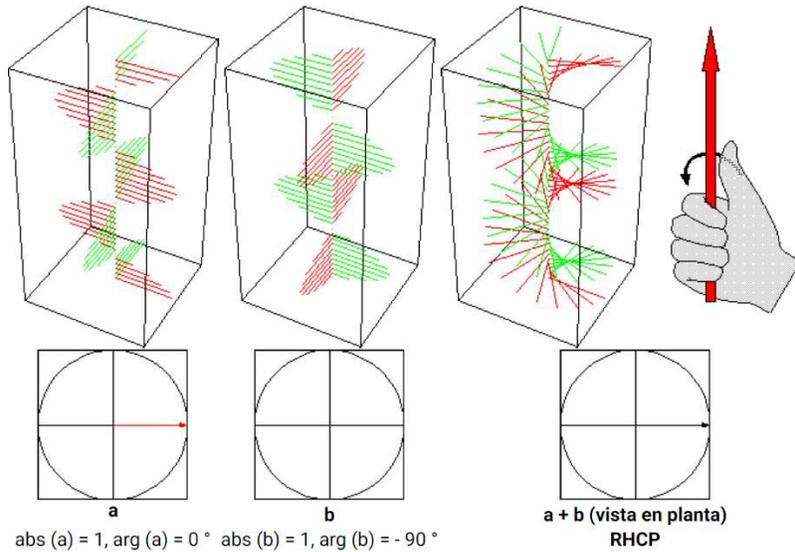
En la figura anterior tenemos una onda de polarización circular derecha (polarización circular derecha RHCP), porque el vector gira en sentido antihorario (regla de la mano derecha) mientras atraviesa un plano imaginario perpendicular al eje de propagación, visto desde el lado del plano donde la onda sale de este plano (los planos cuadrados en las figuras anteriores). Por supuesto, como el lado donde la misma ola entra en el plano, la rotación se invierte: a tiempo como lo hace cuando se mira en la dirección de propagación detrás de la fuente (IEEE).

**ATENCIÓN:** Es por eso que hay mucha confusión sobre el tema... y también porque en óptica clásica, la definición de luz polarizada circular se invierte de la definición IEEE para antenas y ondas de radio, que es adoptada por AMSAT y otras entidades. La luz solar, por ejemplo, se polariza aleatoriamente en todos los planos, por lo que se llama no polarizada porque no es lineal ni circular. Los filtros ópticos polarizadores le permiten separar ciertos planos de polarización de la luz natural.

Cambiando la fase a +90 grados, o invirtiendo la polaridad (fase) de una de las ondas, tenemos una polarización circular izquierda (LHCP). El vector de campo eléctrico (y magnético) de una onda polarizada circularmente gira a una velocidad de rotación igual a la frecuencia de la onda porque realiza una revolución completa por ciclo. Solo para comprender mejor, podríamos obtener una onda polarizada circularmente girando un dipolo con una velocidad igual a la frecuencia de la señal, es decir, en 100MHz, girando el dipolo 100,000,000 de veces por segundo.

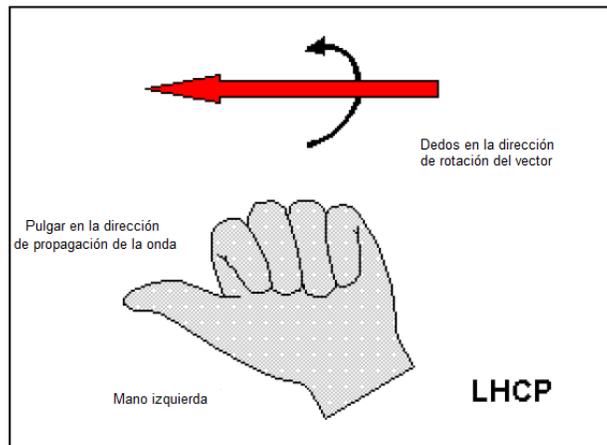
Aquí hay otro ejemplo de RHCP:

Rojo: campo eléctrico, verde: campo magnético. Dirección de propagación: de abajo hacia arriba.



a y b: las dos ondas linealmente polarizada y atrasadas 90 grados;  
a+b: la onda RHCP resultante.

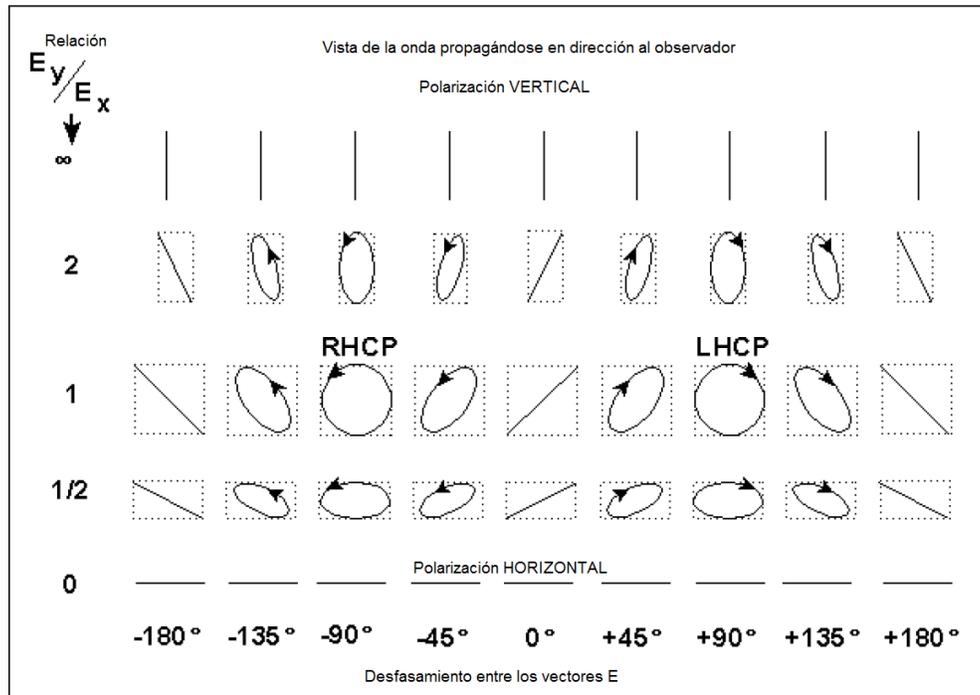
El nombre RH y LH (mano derecha, mano derecha e izquierda, mano izquierda) se deriva de la siguiente analogía:



Polarización circular LHCP: regla de la mano izquierda

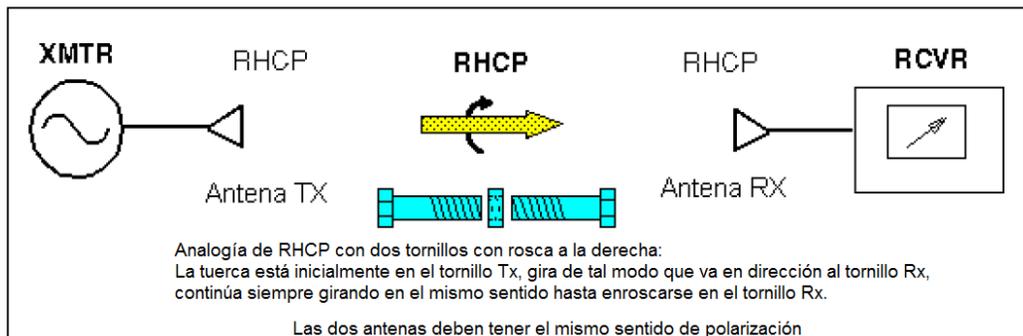
Si la rotación es contraria a la figura anterior, se aplica la regla de la mano derecha: RHCP.

La siguiente figura muestra el resultado de la combinación de dos ondas linealmente polarizadas y ortogonales, con diferentes amplitudes y relaciones de retraso, lo que demuestra que la resultante puede ser polarización lineal, inclinada, elíptica o circular. Detalle importante: en esta figura, la onda se ve acercándose al espectador (o abandonando el plano), por lo que la onda RHCP ahora gira en sentido antihorario. Cuidado, todo es relativo:



Polarización de la onda resultante en función de  $E_y/E_x$  y del desfasamiento

La siguiente figura muestra la analogía entre la forma de onda RHCP polarizada circularmente y los tornillos roscados a la derecha, y muestra por qué las dos antenas Tx y Rx de un bucle deben tener una polarización idéntica o copolarizada:



Para quienes gustan de las matemáticas, tengan en cuenta la posición de  $\pi/2$  (=90 grados), que puede afectar tanto la fase de alimentación ( $\Omega t$ ) como el desplazamiento axial ( $kz$ ), de ahí los dos métodos explicados a continuación:

$$\text{RHCP: } E = \hat{a}_x \frac{E_o}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + kz - \frac{\pi}{2}) + \hat{a}_y \frac{E_o}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + kz)$$

$$\text{LHCP: } E = \hat{a}_x \frac{E_o}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + kz) + \hat{a}_y \frac{E_o}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + kz - \frac{\pi}{2})$$

Ecuación de ondas RHCP y LHCP

### **Ventajas de la polarización circular**

Una ventaja de la polarización circular es que no se ve afectada por la rotación de Faraday en las ondas que atraviesan la atmósfera o la ionosfera, especialmente en las comunicaciones por satélite.

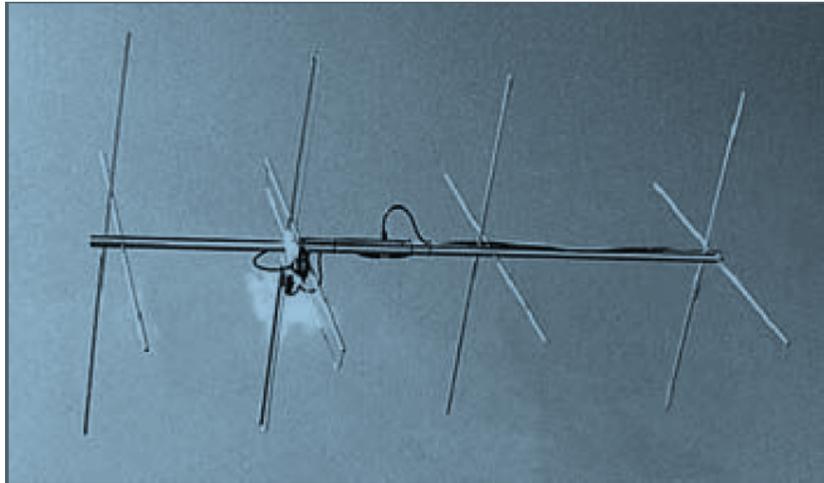
Otra ventaja es que no es necesario ajustar la polarización de la antena (posición alrededor del eje de propagación) como con las antenas polarizadas linealmente.

### **Características de la polarización circular**

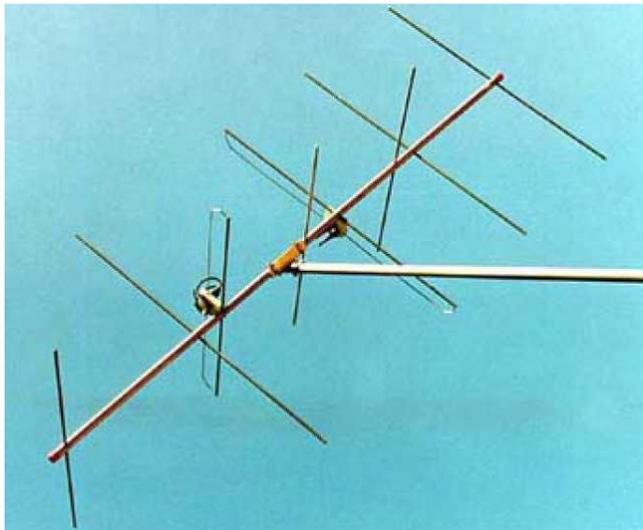
Una característica de la polarización circular es que cambia la dirección de rotación cuando se refleja en un plano conductor, como reflectores planos o parabólicos, reflexión lunar, etc. En la onda polarizada linealmente, solo cambia la fase (inversión o 180 grados) cuando se refleja. Otra característica de la polarización circular es la relación axial, que es la relación de las amplitudes de los vectores en el plano X y en el plano Y. En un círculo perfecto, esta relación es 1 o 0dB. La relación axial distinta de 0dB significa que la polarización no es perfectamente circular sino elíptica.

### **Antenas polarizadas circularmente**

Método 1: de lo anterior, se puede deducir que, para obtener antenas de polarización circular, a partir de antenas polarizadas linealmente (dipolos o Yagis, etc.), es suficiente colocar dos de estas antenas a 90 grados, sin desplazamiento longitudinal, y alimentarlas con 90 grados de desplazamiento de fase (con un cable con  $\frac{1}{4}$  de onda más largo en su longitud en una de las antenas, por ejemplo):

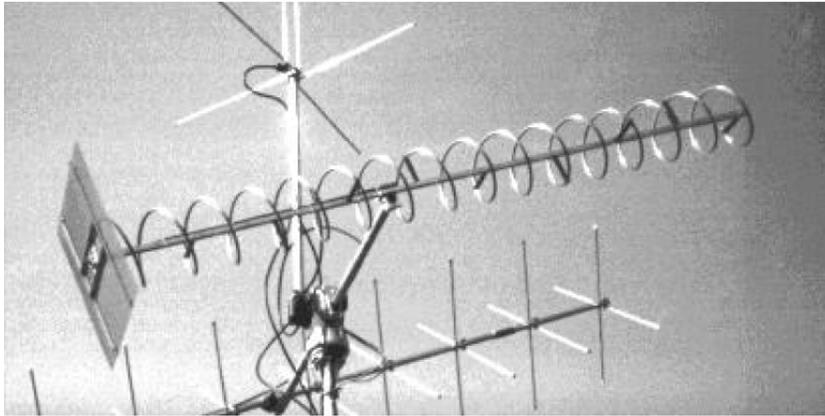


Método 2: otra forma de obtener este retraso es alimentar los dos dipolos en fase, pero moviendo uno de los dipolos de  $1/4$  de onda a lo largo del otro, longitudinalmente en la dirección de propagación, como en la foto a continuación:



Nota: los dos métodos anteriores solo generan una onda polarizada circularmente en la dirección de mayor ganancia, perpendicular al plano del dipolo. Fuera de esta dirección, la onda es elíptica, y a 90 grados de esta dirección, la onda está polarizada linealmente.

Método 3: otra forma es usar antenas que ya producen polarización circular directamente, como antenas helicoidales (longitudinales o axiales). Según IEEE, la dirección de rotación de la onda circular generada por una helicoidal es la misma que la rosca de un tornillo gigante en el que encajaría el helicoide. La imagen es RHCP, ya que tiene una "rosca" idéntica a la de un tornillo con una rosca derecha:



Importante: las antenas como el bucle circular, el bucle circular Yagi, el bucle magnético, el cuadro cúbico, el bucle delta, etc., generan ondas polarizadas linealmente. Solo una helicoidal en modo axial o longitudinal, o la asociación correcta de dos antenas lineales, da polarización circular. Y dos helicoidales, una RHCP y otra LHCP, alimentados por fase y colocados uno al lado del otro en la misma dirección, generan una onda polarizada linealmente.

#### **Rechazo de polarización cruzada (Rechazo de "X-pol" o "XPD")**

Una característica de cualquier antena (además de ganancia, relación frontal/posterior, impedancia, ancho de banda, etc.) es su capacidad de rechazar o discriminar "X-pol" o "cross-pol". "XPD" en dB. Es decir, es la capacidad de la antena de rechazar su polarización ortogonal, como una antena de polarización vertical que rechaza la polarización horizontal (y viceversa) o una antena RHCP que rechaza LHCP (o viceversa). Una antena perfecta tendría un rechazo infinito de X-in.

Este rechazo generalmente es solo alto en frecuencias de VHF ascendentes, especialmente en microondas. El alto rechazo de entrada de X (20dB o más) le permite usar la misma frecuencia para dos transmisiones simultáneas diferentes, una con RHCP y otra con LHCP, o una vertical y otra horizontal, como es el caso de los satélites de comunicación y TV geoestacionaria. Pero, por supuesto, las dos antenas (TX y RX) de cada enlace deben tener el mismo tipo de polarización y un alto rechazo de entrada de X.

¡Capturar una onda polarizada circularmente con una antena de polarización lineal (o viceversa) siempre causa una pérdida de 3dB! (ni más ni menos. No hay rechazo X-in entre polarizaciones lineales y circulares, o más bien, el rechazo es igual a aceptación: -3dB, porque la onda circular está compuesta por dos componentes lineales. La antena lineal recoge solo uno de estos, por lo tanto, la mitad de la potencia = -3dB). Y capturar una onda RHCP con una antena LHCP sufre una pérdida igual al rechazo de polarización cruzada, que idealmente sería infinito.

A frecuencias por debajo de VHF, como ondas cortas y medias, la polarización de onda no mantiene su plano original debido a los fenómenos de propagación, y las antenas tienen un bajo rechazo de Xpol, lo que permite una polarización diferente en la transmisión

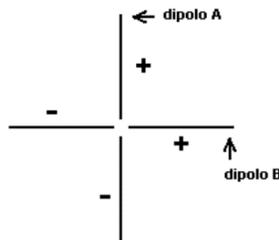
y recepción, sin mucha pérdida, es decir, usar antenas indiscriminadamente verticales y horizontales para TX y RX, sin mucho prejuicio.

### **Cómo obtener RHCP o LHCP con dipolos cruzados.**

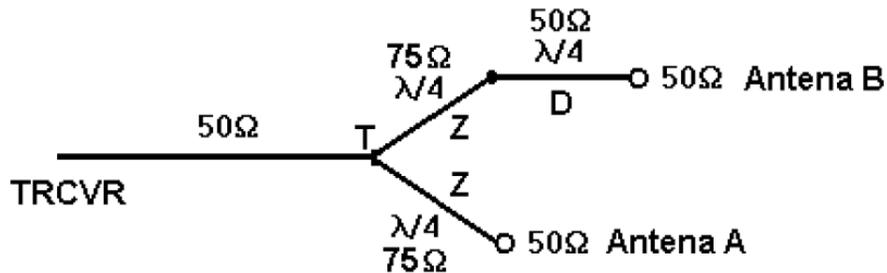
Mostraré a continuación cómo practicar los métodos 1 y 2 mencionados anteriormente. Por supuesto, además de los dipolos cruzados, se pueden cruzar las antenas más diversas con polarización lineal, como Yagis y otras. Pero siempre tendremos solo dos puntos de potencia, uno en cada elemento del radiador, llamados dipolos en el siguiente texto.

#### **Método 1:**

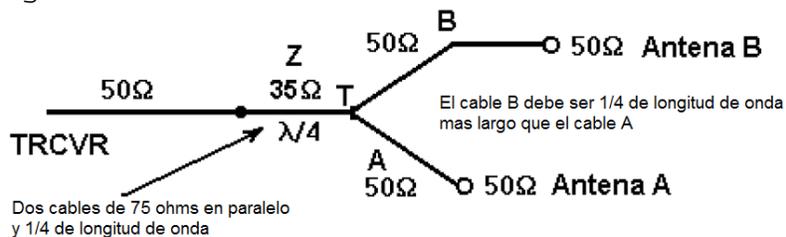
Los dos dipolos están en la misma posición longitudinal (en el mismo plano). Por lo tanto, deben ser alimentados con un retraso relativo de 90 grados. La siguiente figura muestra los dipolos vistos desde atrás, por lo que mirando en la dirección de propagación (si son dos Yagis, se ven desde el lado del reflector), en el instante indicado las polaridades corresponden por ejemplo al conductor interior del coaxial +, siendo - la malla de la parte coaxial u otro de los balun. Al alimentar el dipolo B con una señal retrasada de 90 grados con respecto al dipolo A, obtenemos RHCP, porque cuando el dipolo A obtiene el pico sinusoidal positivo, B no obtiene nada. Cuando B recibe el pico positivo después de 1/4 de período, A no recibe nada. Visto desde atrás, en la dirección de propagación, el vector de campo eléctrico cambia de vertical y hacia arriba a horizontal y a la derecha, por lo tanto, gira en sentido horario, entrando en un plano imaginario frente a la antena. Revertir este retraso relativo o invertir la polaridad de alimentación de uno de los dipolos dará LHCP.



La siguiente figura muestra un ejemplo de la configuración del cable para antenas con una impedancia de 50 ohms y obtiene RHCP, respetando las polaridades de la figura anterior. El paso de cable D de 50 ohms y son un cuarto de onda que genera el retardo (o desplazamiento de fase) en 90 grados y sin cambiar la impedancia de la antena. Los dos tendidos de cable Z de 75 ohm actúan como un transformador de impedancia, al convertir los 50 ohms de cada antena en 112 ohms, que están conectados en paralelo en la T, volver a 50 ohms (en realidad 56 ohms), y ambos introducen 90 grados de retraso. Pero lo que importa es que la fase de la antena B es 90 grados posterior de la antena, que se realiza mediante el cable D.

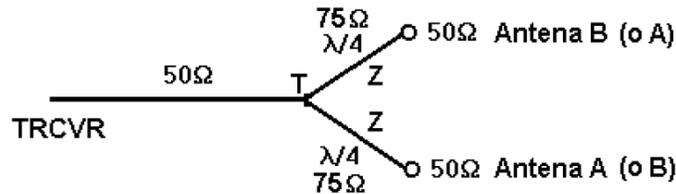


Es evidente que los cables Z también (y solo ellos) pueden tener longitudes iguales a  $1/4$  de longitud de onda impar, lo que a veces facilita su instalación, pero siempre que los dos cables también tengan la misma longitud. Nunca es demasiado recordar que la longitud de un cable coaxial es igual a la longitud de onda eléctrica deseada en el aire, multiplicada por el factor de velocidad del cable. Por supuesto, también se pueden hacer otras combinaciones de cables, siempre que la impedancia de las dos antenas pueda ser paralela a 50 ohms y al mismo tiempo el retraso relativo de 90 grados. Al cambiar la polaridad de las conexiones de una de las antenas, o al insertar otro cable de media onda en una de ellas, tendremos LHCP. Otra forma alternativa de conectar los cables es poner en paralelo las dos antenas de 50 ohms, lo que da como resultado 25 ohms en la T, y luego convertir estos 25 ohms a 50 ohms, con un cable de  $1/4$  de onda de 35 ohms, que se puede hacer con dos cables de 75 ohms en paralelo, como se muestra en la siguiente figura:



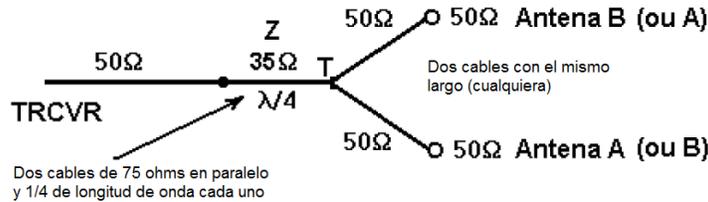
#### Método 2:

Ahora los dos dipolos (o ambas Yagis) se desplazan longitudinalmente por  $1/4$  de onda (en el aire). Por lo tanto, las dos antenas ahora deberían estar en fase. Usando la figura del dipolo anterior nuevamente, y suponiendo que el dipolo B está más cerca del observador detrás de la antena (es decir, más atrás de A en la dirección de propagación) tendremos RHCP. La pequeña desventaja de este método es que el brazo de la antena es  $1/4$  de longitud de onda más larga que el método 1, pero la gran ventaja sobre el método 1 es que no necesita el cable fador D, que debido a que tiene  $1/4$  de onda, puede causar una transformación de impedancia indeseable si la antena no tiene la misma impedancia que este cable. La siguiente figura muestra un ejemplo de interconexión:

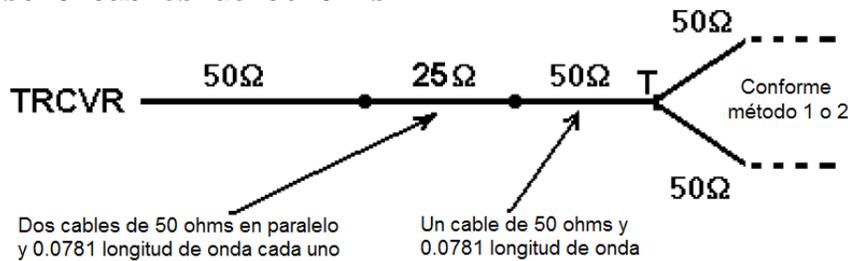


Todavía se aplican los comentarios anteriores sobre los cables de Z, y el cambio de la polarización.

También se puede utilizar la siguiente configuración de cable alternativa:



Y en los dos métodos alternativos anteriores, la transformación de 25 a 50 ohms se puede hacer aún mejor utilizando el transformador Regier o 1/12 lambda, como se muestra en la siguiente figura (no olvide el factor de velocidad del cable), con la gran ventaja de utilizar sólo cables de 50 ohms:



(Para líneas de 75 ohms, el resultado es  $75 \times 75 / 50 = 56.25$  ohms o  $(75/2) \times (75/2) / 25 = 6.25$  ohms. El transformador anterior proporciona exactamente 50 ohms de 25 ohms).

IMPORTANTE: en ambos métodos 1 y 2, la ganancia total de las dos antenas permanece igual a la ganancia de una sola, a diferencia de los sistemas colineales donde las antenas están en fase. Si, por ejemplo, una antena tiene una ganancia de 10dBi, dos de ellas cruzadas y eléctricamente 90 grados desfasadas por el método 1 o 2, tendrán una ganancia total de 10dBic, c indicando solo polarización circular.

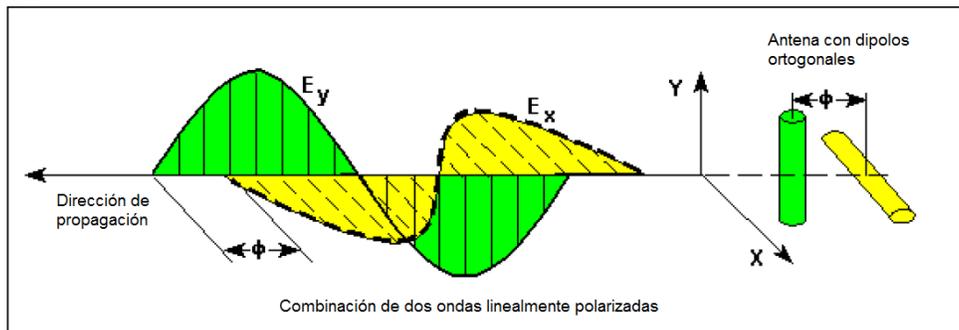
#### Método intermedio 1 y 2

Podemos combinar los dos métodos anteriores (pero ¿por qué complicarnos?) al hacer los 90 grados requeridos en parte eléctrica y en parte física. Por ejemplo, podemos desplazar longitudinalmente las dos antenas de 1/8 de onda (en el aire) que equivale a 45 grados eléctricos. Todavía quedan 45 grados por hacer con un trozo de cable de 1/8 más de onda en una de las antenas. Para obtener RHCP, por ejemplo, utilizamos el ejemplo del método 1 pero con el cable D 1/8 de onda (no olvide el factor de velocidad del cable) y movemos las antenas como en el ejemplo 2, pero solo 1/8 de onda en el aire. Cualquier otra combinación, como

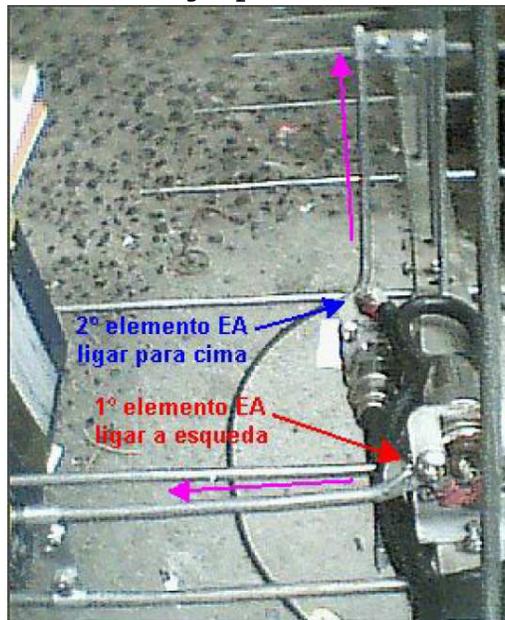
cable 1/12 + onda offset 1/6 (30 grados +60 grados) también funciona... Una desventaja de este método es que no permite invertir de RHCP a LHCP simplemente cambiando la polaridad de una de las antenas.

### Conclusión

Es evidente que se pueden hacer muchas otras formas de interconexión, polaridades, longitudes, compensaciones, impedancias de antena, impedancias de cable, etc. Simplemente verifique la correcta transformación y combinación de impedancias, y como el vector de onda electromagnética de cada radiador se encuentra en la dirección de propagación con respecto al otro radiador, incluyendo desplazamiento de fase eléctrica en los dos radiadores:



En otras palabras, vea este ejemplo del método 2:



En la imagen de arriba tenemos una antena hecha por Luciano PY2BBS. Está es vista desde atrás (según lo ordenado por IEEE). El vector que viene primero de esta antena es lógicamente uno de los dipolos más avanzados (más delante de la antena), que en este caso es el dipolo vertical. Dado que ambas antenas tienen alimentación de fase, al mismo tiempo que el dipolo vertical recibe el pico positivo de la onda sinusoidal de voltaje, generando un vector

vertical ascendente (12 horas en el reloj, flecha hacia arriba), el dipolo horizontal también recibe el mismo pico positivo, y por lo tanto genera un vector horizontal e izquierdo (9 en punto en el reloj). Esto se debe a que la polaridad de la conexión coaxial es: conductor interno hacia arriba en el dipolo vertical y conductor interno a la izquierda del dipolo horizontal. Como el primer vector que emerge del frente de la antena es el vertical hacia arriba (12 horas), seguido (después de un cuarto de onda) por el horizontal izquierdo (9 horas), el vector, cuando se propaga en la dirección de propagación y mirando desde atrás, giró en sentido antihorario (de 12 a 9 en punto), por lo que corresponde a una onda LHCP. No importa si giramos la antena alrededor de la pluma, siempre tendremos LHCP, incluso girándola hacia atrás. ¡La rosca de un tornillo no cambia con su posición!

Al cambiar la polaridad de solo uno de los cables, por ejemplo, al conectar el conductor coaxial interno a la derecha del dipolo horizontal, obtenemos RHCP, porque el dipolo horizontal ahora genera un vector horizontal a la derecha (3 horas) mientras el dipolo vertical continúa generando las mismas "12 horas". El primer vector que sale de la antena sigue siendo "12 en punto" seguido de un cuarto de período más tarde por "3 en punto", por lo que ahora gira en sentido horario y genera, según IEEE, RHCP. Pero si miramos la antena, la onda se mueve hacia nosotros (ya no se aleja), la dirección de rotación del vector se invierte (fuera del plano), pero la polarización es siempre la misma. En un tornillo de rosca derecha, gira la tuerca hacia la derecha para apretar y hacia la izquierda para aflojar, pero la rosca siempre es correcta.

Detalle interesante: los dos dipolos también irradian hacia atrás hacia el observador de la foto anterior, ¡pero generando una onda RHCP! Esta onda será redirigida al frente de la antena por los reflectores. A medida que la onda circular cambia de dirección a medida que se refleja, esta onda reflejada ahora está en la misma dirección LHCP que la onda generada hacia adelante y, por lo tanto, suma y contribuye constructivamente a la ganancia de la antena, siempre que la distancia relativa de los reflectores / dipolos sea correcta.

Autor: PY4ZBZ