

POLARIZACIÓN DE ONDAS

Por PY4ZBZ el 09/09/2005 rev. 2016-04-04

[András Szilágyi](#) y [Takuichi Hirano](#) © Figuras animadas

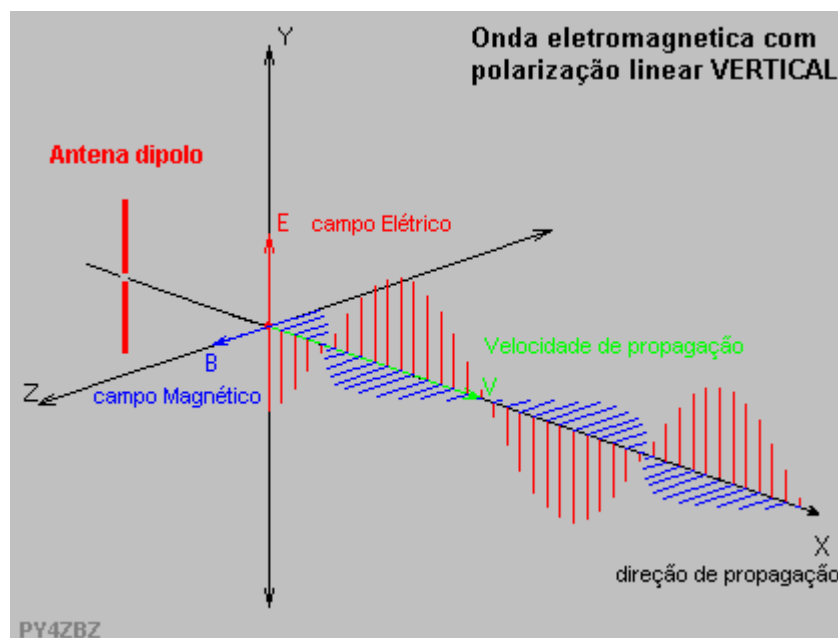
Por definición, la **polarización** de una **onda electromagnética** es el plano en el que se encuentra el componente **ELÉCTRICO** de esta onda.

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.

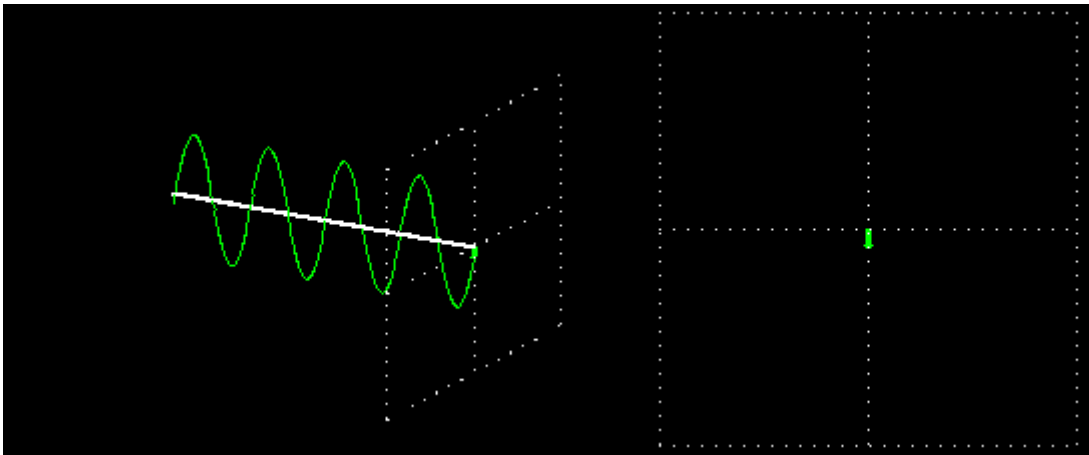
Un dipolo posicionado **verticalmente**, alimentado por un generador de frecuencia F , genera una onda electromagnética polarizada **verticalmente**, ya que el componente del **campo eléctrico** está en el plano **vertical** (y, en consecuencia, el componente del **campo magnético** está en el plano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

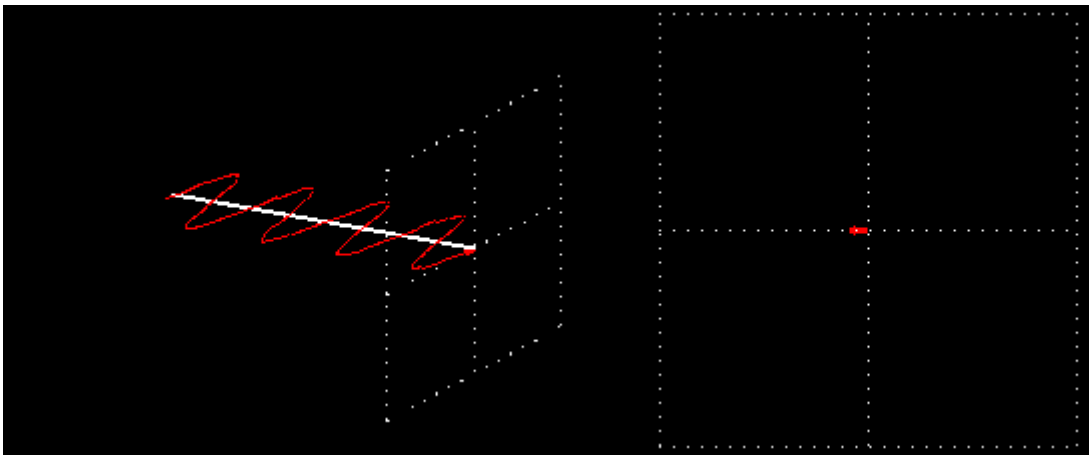


Como esta onda se sitúa siempre en el mismo plano, se llama onda con **polarización lineal**.

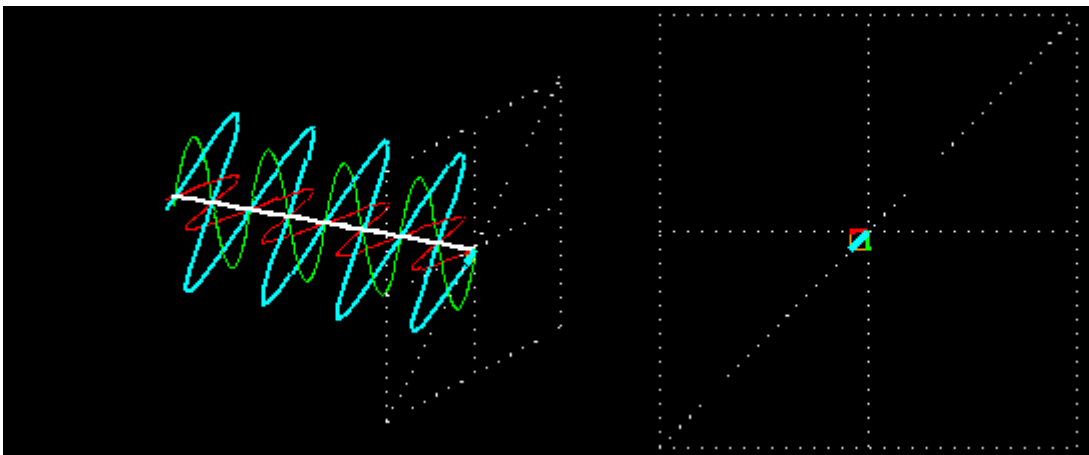
Las siguientes figuras animadas ilustran una **onda verticalmente polarizada linealmente** que muestra solo el vector de **campo eléctrico** (el magnético siempre está presente y a 90 grados):



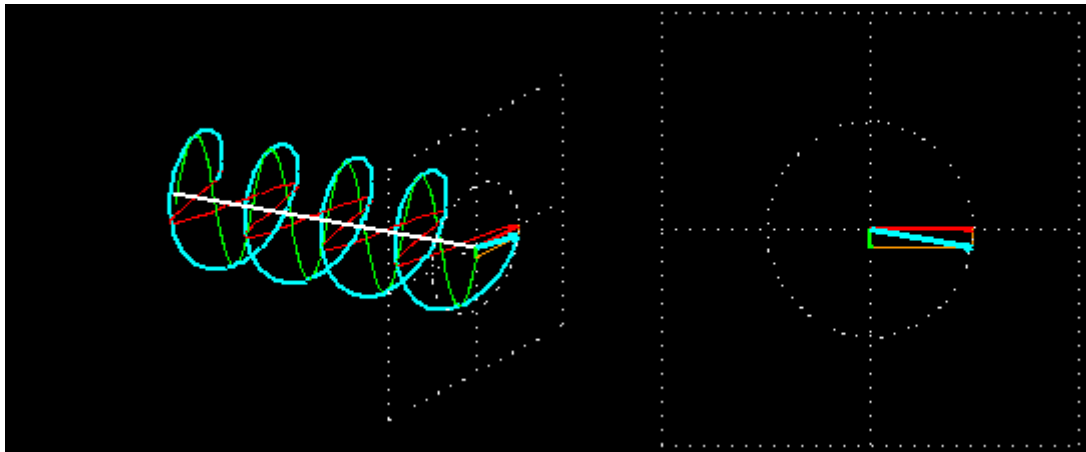
Las siguientes figuras animadas ilustran una **onda horizontalmente polarizada linealmente** que muestra solo el vector de **campo eléctrico** (el magnético siempre está presente y a 90 grados físicos):



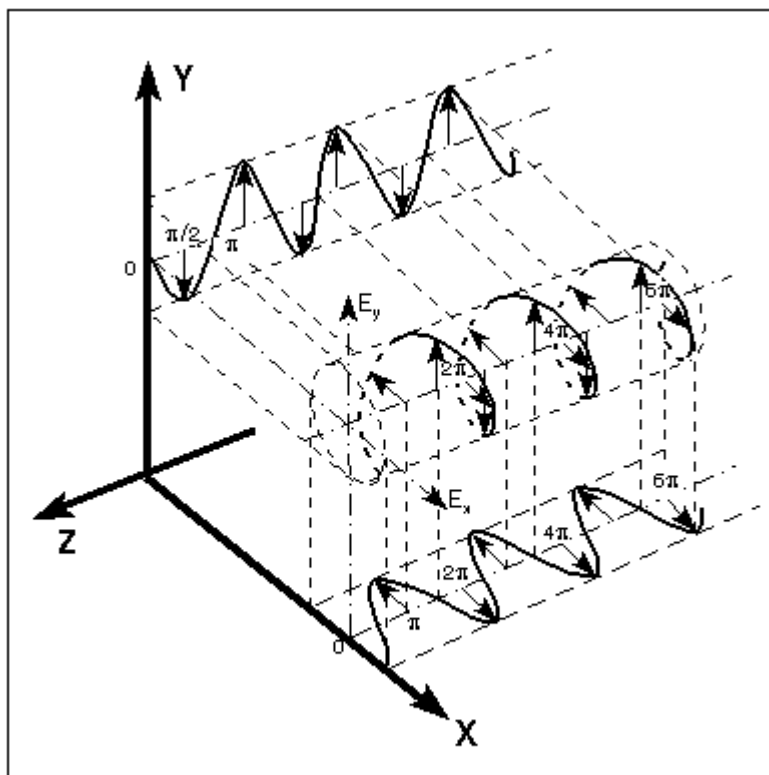
La combinación de dos ondas polarizadas linealmente, uno vertical y uno horizontal, y eléctricamente en **fase**, lo que resulta en una onda **linealmente** polarizada **inclinada**, como se puede ver en las siguientes figuras animadas:



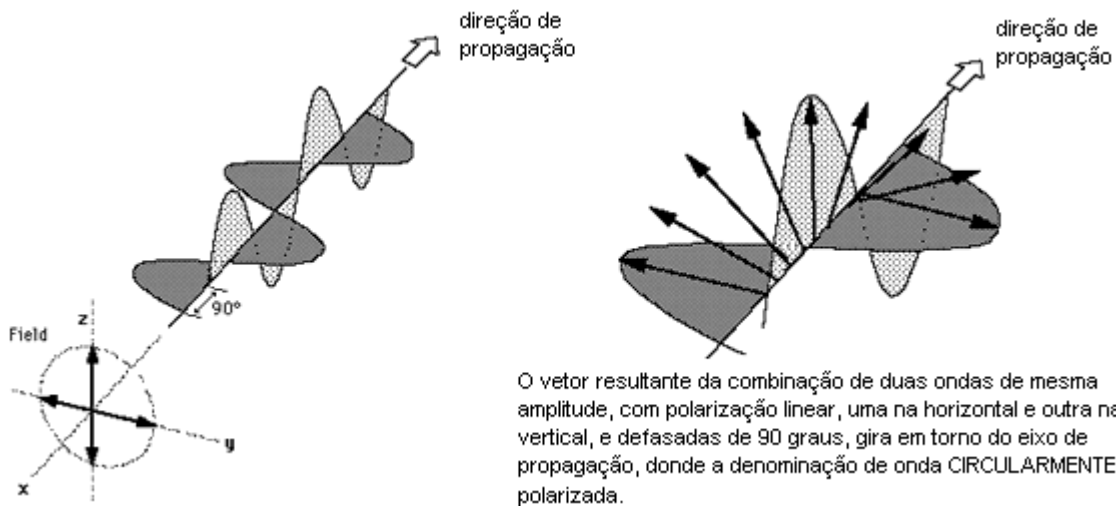
La combinación de **dos ondas polarizadas linealmente** , una **vertical** y otra **horizontal** , de la **misma amplitud** y **90 grados de retraso eléctrico** , da como resultado una onda **polarizada circularmente** (como una figura de Lissajous) como se ve en las siguientes figuras animadas:



Las siguientes figuras también muestran cómo se obtiene una onda de polarización circular:



Combinação de duas ondas linearmente polarizadas H e V, defasadas de 90 graus



El ejemplo anterior es de una onda **LHCP**, consulte la siguiente [definición de IEEE](#) :

Definición de RHCP y LHCP ([estándar IEEE](#))

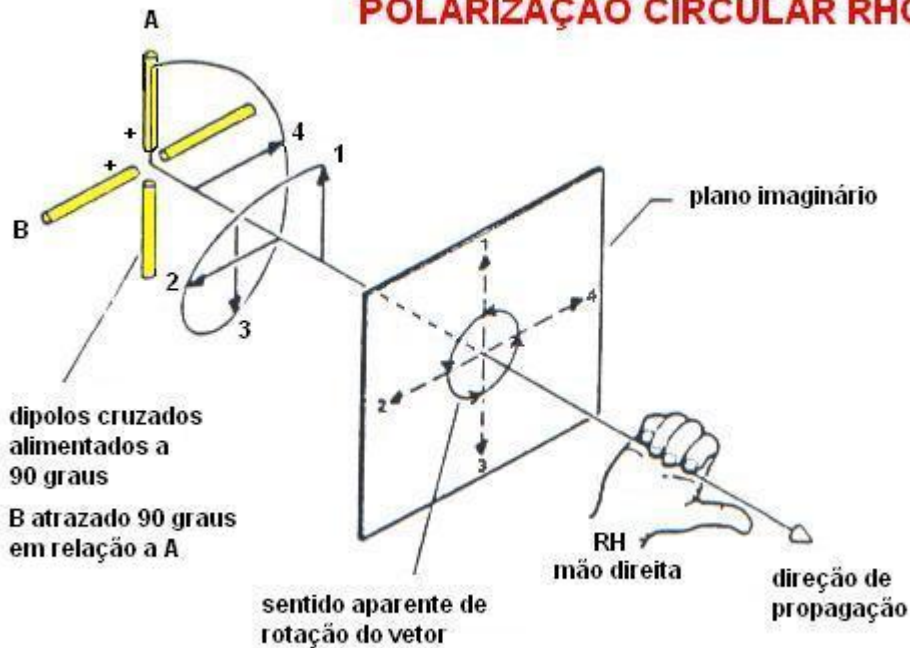
Extraído de :

"IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas"
(IEEE STD-145)

CIRCULAR POLARIZATION. It may be either right hand circular polarization (RHCP) or left hand circular polarization (LHCP). The sense of polarization is determined by observation of the direction of rotation of the electric field vector from a point behind the source, RHCP and LHCP correspond to clockwise and counter-clockwise respectively. **Note:** RHCP transmit requires a like polarization to receive.

La siguiente figura muestra dos dipolos cruzados **A** y **B**, y **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** :

POLARIZAÇÃO CIRCULAR RHCP



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. , y visto desde el lado del plano donde la onda sale de** este plano (los planos cuadrados en las figuras animadas 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).

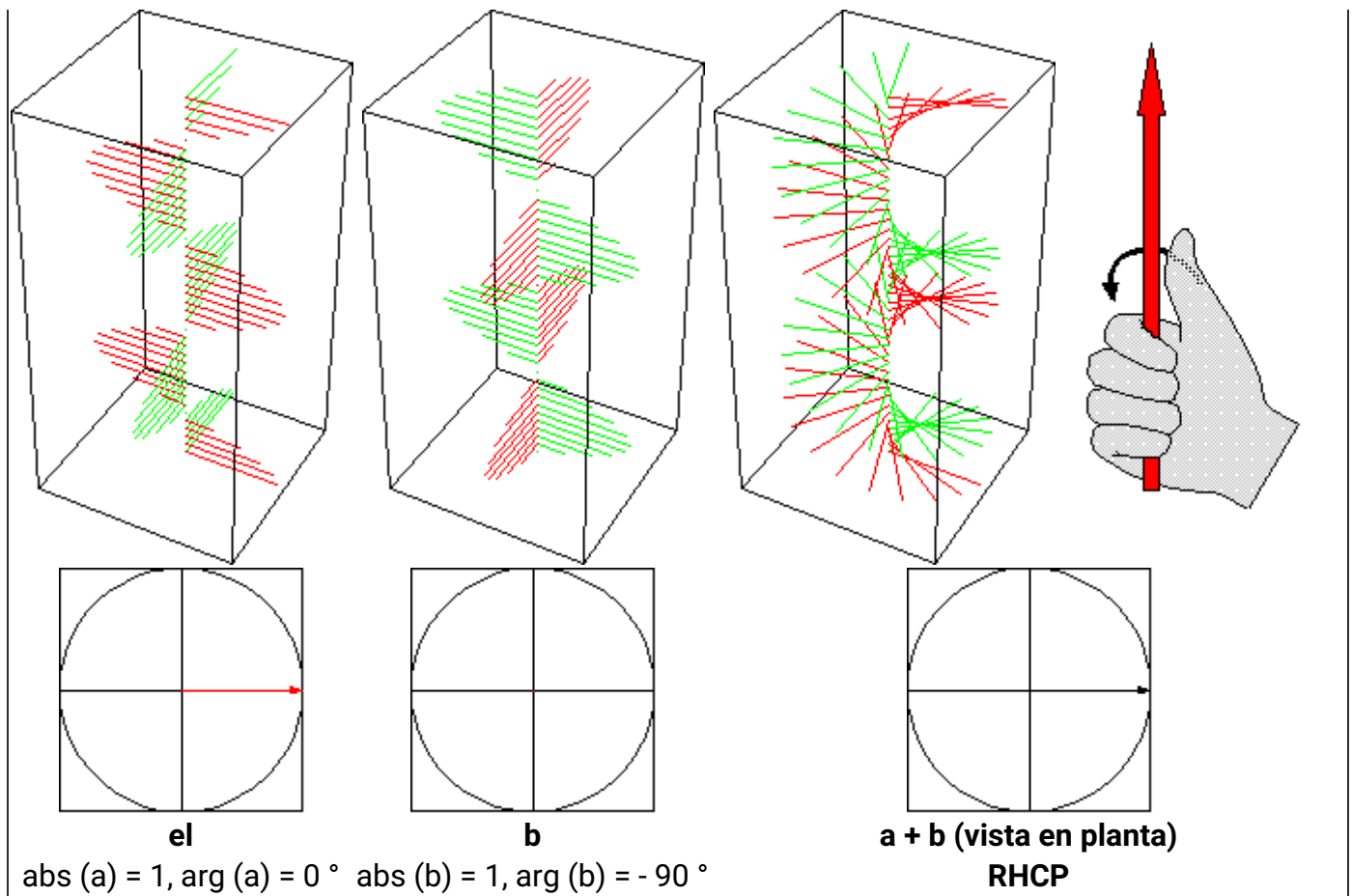
ATENCIÓN : Es por eso que hay mucha confusión sobre el tema ... y también porque en **óptica clásica** , la **definición de luz polarizada circular se invierte de la definición IEEE para antenas y ondas de radio** , que es adoptada por AMSAT y otros. entidades. La luz solar, por ejemplo, se polariza 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 100 MHz, girando el dipolo 100,000,000 veces por segundo.

Aquí hay otro ejemplo de RHCP:

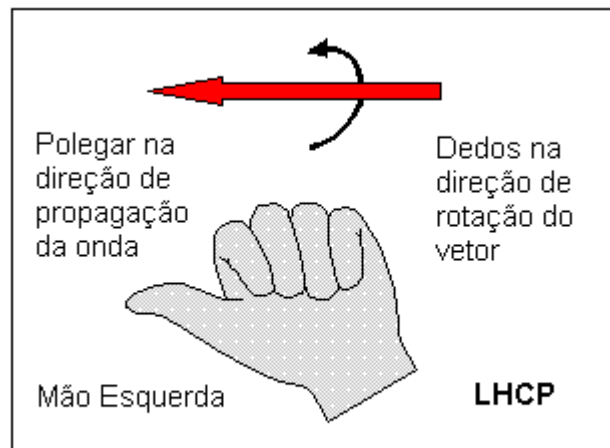
Rojo : campo eléctrico, **verde** : campo magnético. Dirección de propagación: de abajo hacia arriba.





una y b : las dos ondas linealmente polarizada y rezagados 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:

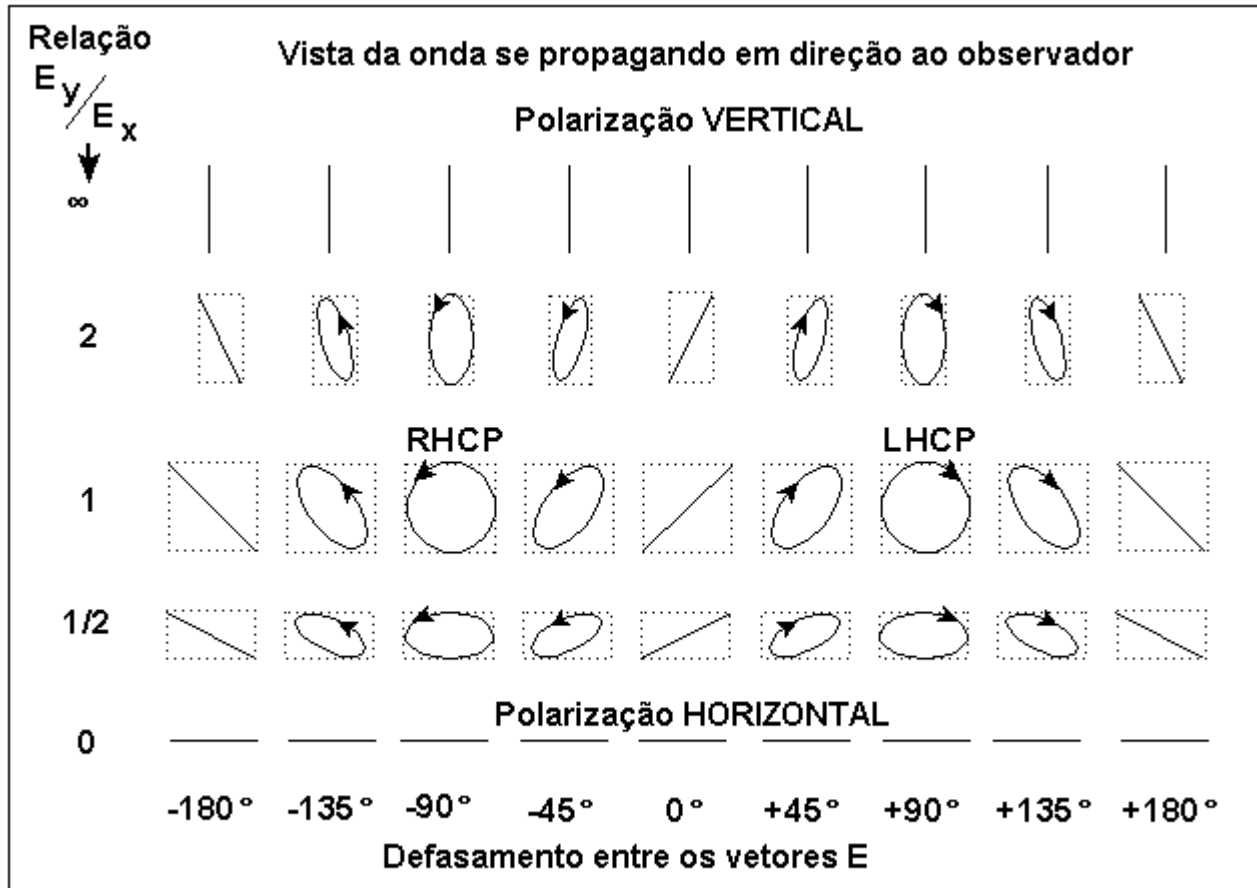


Polarização circular LHCP : regra da mão ESQUERDA

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

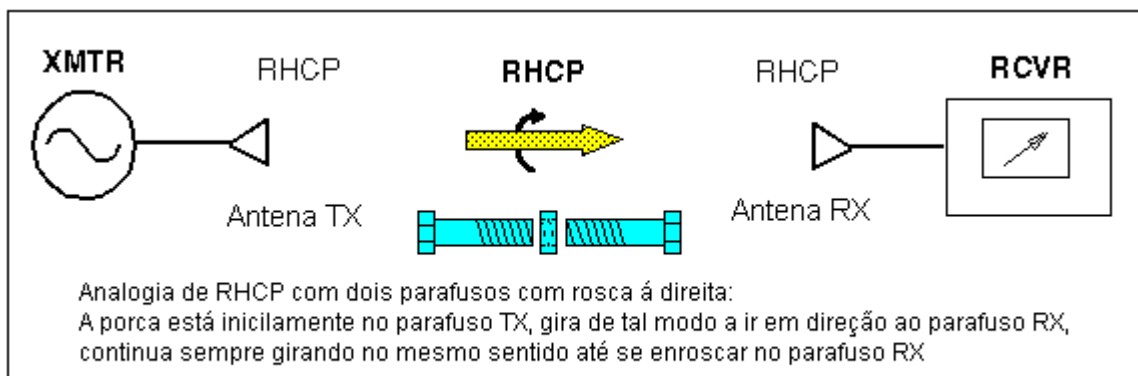
La siguiente figura muestra el resultado de la combinación de dos ondas linealmente polarizadas y ortogonales, con diferentes **amplitudes** y relaciones de **retraso**, lo que demuestra que la resultante puede ser polarización **lineal, inclinada, elíptica o circular**. Detalle **importante**: en esta figura, la onda

se ve **acercándose** al espectador (o **abandonando el avión**), por lo que la onda **RHCP** ahora gira en **sentido antihorario**. Cuidado, todo es **relativo**:



Polarização da onda resultante em função de E_y/E_x e do defasamento

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** (ver nota en la definición IEEE anterior):



As duas antenas devem ter o mesmo sentido de polarização

Para quienes gustan de las matemáticas, tenga en cuenta la posición de $\text{Pi} / 2$ (= 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:

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

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

Equação de ondas RHCP e LHCP

Ventajas de la polarización circular :

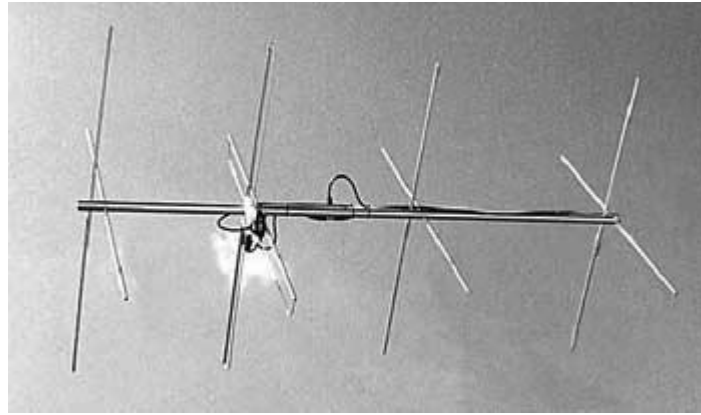
Una ventaja de la polarización circular es que no se ve afectada por la [rotación de Faraday](#) en las ondas que atraviesan la atmósfera o la ionosfera, especialmente en las comunicaciones por satélite. Otra ventaja es que no es necesario ajustar la polarización de la antena (posición alrededor del eje de propagación) como con las antenas polarizadas linealmente.

Características de la polarización circular :

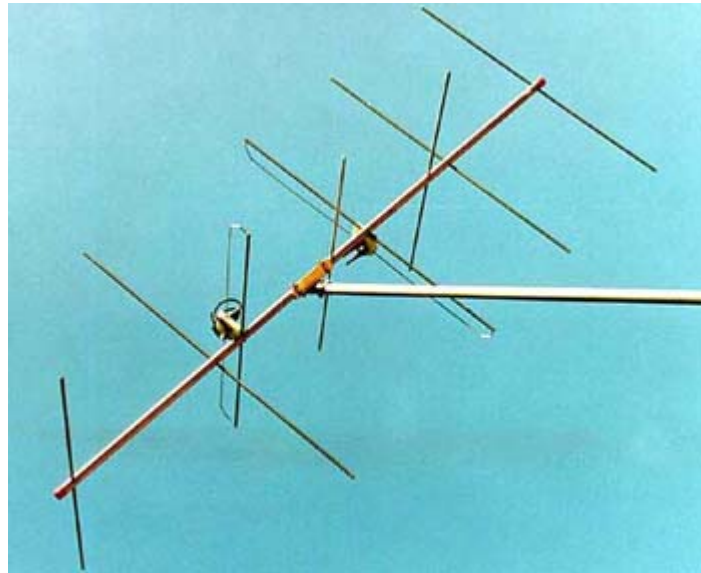
Una característica de la polarización circular es que **cambia la dirección de rotación** cuando se **refleja** en un plano conductor, como reflectores planos o parabólicos, reflexión lunar, etc. En la onda polarizada linealmente, solo cambia la fase (inversión o 180 grados). , cuando se refleja. Otra característica de la polarización y circular **relación axial** , que es la relación de las amplitudes de los vectores en el plano **X** en avión **Y** . En un círculo perfecto, esta relación es **1** o **0 dB** . La relación axial distinta de 0 dB 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 de **90 grados** , sin desplazamiento longitudinal, y **alimentarlas** con **90 grados de desplazamiento de fase** placas (con un [cable con un cuarto - onda](#) más larga en su longitud en una de las antenas, por ejemplo):

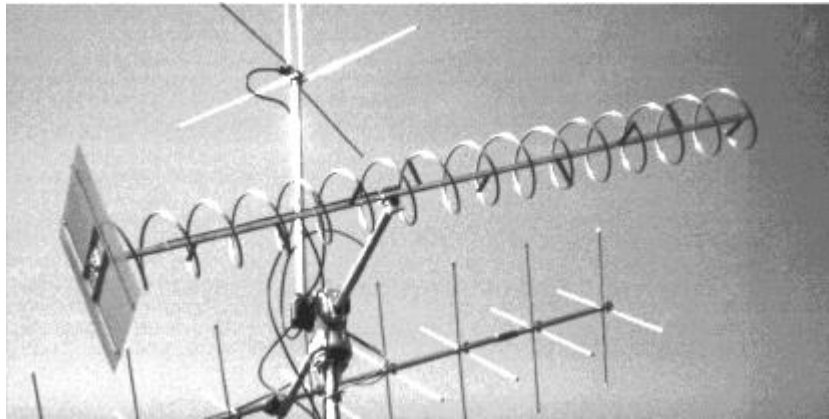


Método 2 : otra forma de obtener este retraso es alimentar los **dos dipolos en fase** , pero **moviendo** uno de los dipolos de **cuarto de onda a lo** largo del otro, longitudinalmente en la dirección de propagación, como en la foto a continuación:



Nota: Los dos métodos anteriores solo generan una onda polarizada circularmente en la dirección de mayor ganancia, perpendicular al plano 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 un 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 uno helicoidal en modo axial o longitudinal, o la asociación correcta de dos antenas lineales, da polarización circular. Y dos helicoidales, uno RHCP y otro LHCP, alimentados por fase y colocados uno al lado del otro en la misma dirección, ¡generan una onda polarizada linealmente!

"Rechazo de X-pol" o "XPD" rechazo de polarización cruzada

Una **característica de cualquier antena** (además de ganancia, relación frontal / posterior, impedancia, ancho de banda, etc.) es su capacidad de **rechazar el rechazo o discriminación "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 (20 dB 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 3 dB** ! (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.

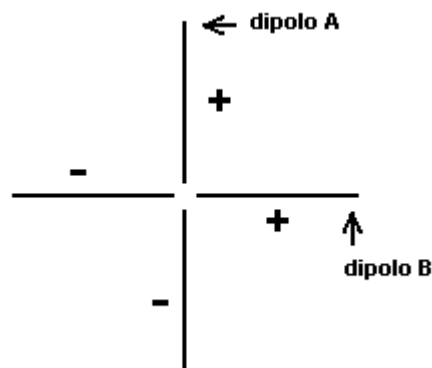
A frecuencias **por debajo de VHF** , como ondas cortas y medias, la polarización de onda no mantiene su plano original debido a los fenómenos de propagación, y las antenas tienen un bajo rechazo de X-pol, lo que permite una polarización diferente en la transmisión y recepción. , sin mucha pérdida, es decir, usar antenas indiscriminadamente verticales y horizontales para TX y RX, sin mucho perjuicio.

Cómo obtener RHCP o LHCP con dipolos cruzados.

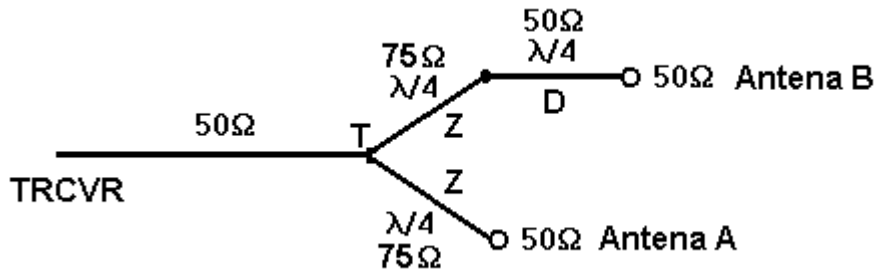
Mostraré a continuación cómo practicar los formularios 1 y 2 mencionados anteriormente. Por supuesto, además de los dipolos cruzados, se pueden cruzar las antenas más diversas con polarización lineal, como Yagis y otras. Pero siempre tendremos solo dos puntos de potencia, uno en cada elemento del radiador,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

Método 1:

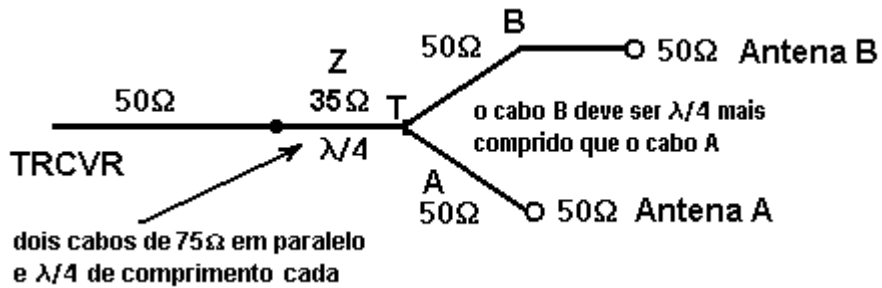
Los dos dipolos están en la **misma posición longitudinal** (en el mismo plano). Por lo tanto, deben ser **alimentados** con un **retraso relativo de 90 grados**. La siguiente figura muestra los dipolos **vistos desde atrás**, por lo que mirando en la **dirección** de propagación (si son dos Yagis, se ven desde el lado del reflector). En el instante indicado polaridades corresponden por ejemplo al conductor **interior** coaxial = +, siendo - el escudo 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 o 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 ohmios** y obtiene **RHCP, respetando las polaridades de la figura anterior**. El paso de cable **D** de 50 ohmios 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 ohmios de cada antena en 112 ohmios, que están conectados en paralelo en la T, volver a 50 ohmios (en realidad 56 ohmios ...), y ambos introducen 90 grados de retraso. Pero lo que importa es que la fase de la antena B es 90 posterior de la antena, que se realiza mediante el cable **D**.



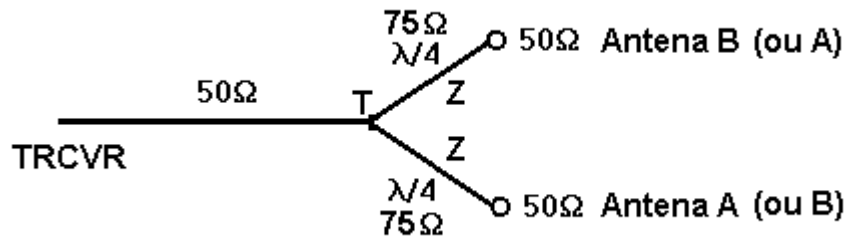
Es evidente que los cables Z también (y solo ellos) pueden tener longitudes iguales a **1/4 de** longitud de onda **impar** , lo que a veces facilita su instalación, pero siempre que los dos cables también tengan la **misma** longitud . Nunca es demasiado recordar que la longitud de un cable coaxial 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 ohmios 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 ohmios, lo que da como resultado 25 ohmios en la T, y luego convertir estos 25 ohmios a 50 ohmios, con un cable de 1/4 de onda de 35 ohmios. , que se puede hacer con dos cables de 75 ohmios en paralelo, como se muestra en la siguiente figura:



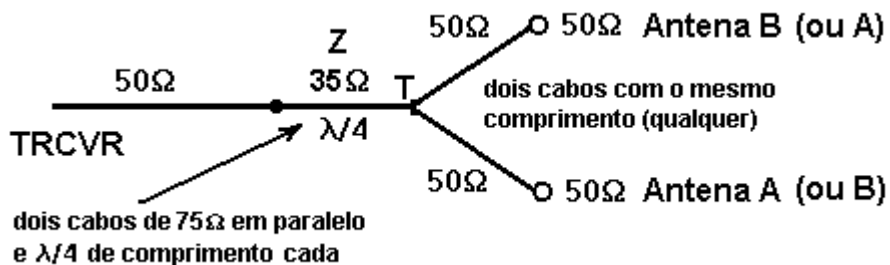
Método 2:

Ahora los dos dipolos (o ambos Yagis) se **desplazan longitudinalmente por 1/4 de onda** (en el aire).

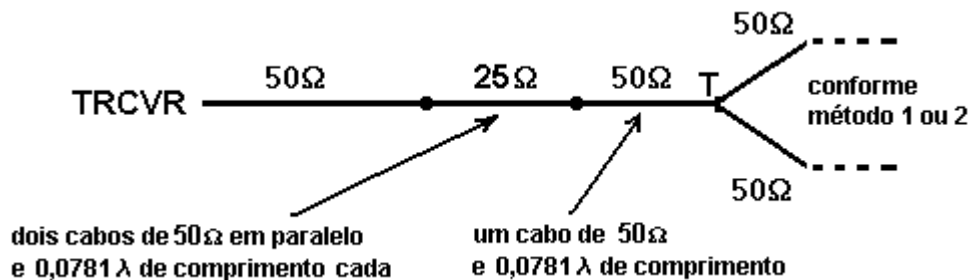
Por lo tanto, las dos antenas ahora deberían estar en **fase** . Usando la figura del dipolo anterior nuevamente, y suponiendo que el dipolo **B está más cerca del observador detrás de** la antena (es decir, más atrás de **A** en la dirección de propagación) tendremos **RHCP** . La pequeña desventaja 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 fasero **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. Ver un ejemplo [OZ2OE](#). Vea otro ejemplo de este método por [PY2BBS](#). También se puede utilizar la siguiente configuración de cable **alternativa** :



Y en los dos métodos **alternativos** anteriores, la transformación de **25 a 50 ohmios** 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 el gran ventaja de utilizar **sólo cables de 50 ohmios** :



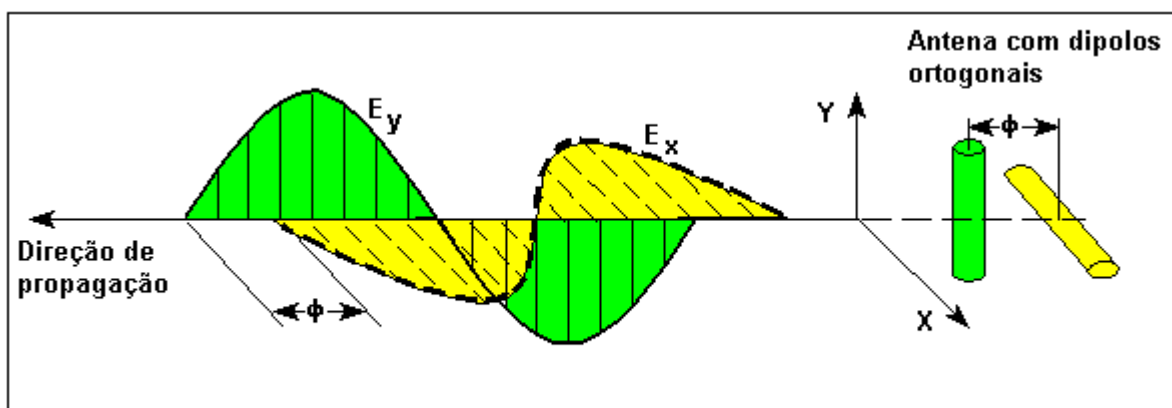
(Para líneas de 75 ohmios, el resultado es $75 \times 75 / 50 = 56.25$ ohmios o $(75/2) \times (75/2) / 25 = 56.25$ ohmios. El transformador anterior proporciona exactamente 50 ohmios de 25 ohmios)

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 10 dBi, dos de ellas cruzadas y eléctricamente 90 grados por el método 1 o 2, tendrán una ganancia total de 10 dBi, **c** indicando solo polarización circular.

Método intermedio 1 y 2 ...

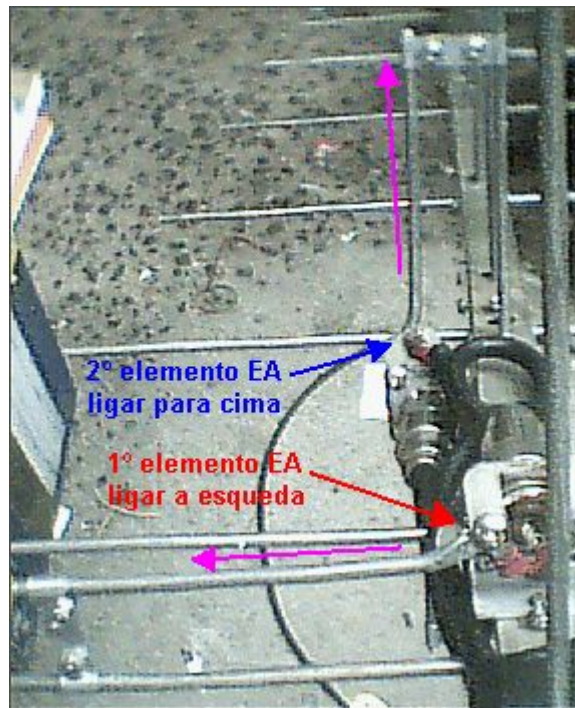
Podemos combinar los dos métodos anteriores (pero ¿por qué complicarnos?) Al hacer los 90 grados requeridos en parte eléctrica y en parte física. Por ejemplo, podemos desplazar longitudinalmente las dos antenas de $1/8$ de **onda** (en el aire) que equivale a 45 grados eléctricos. Todavía quedan 45 grados por hacer con un trozo de **cable de $1/8$ más de onda** en una de las antenas, ¡siempre que la antena correcta! Para obtener **RHCP**, por ejemplo, utilizamos el ejemplo del método 1 pero con el cable **$D1/8$** 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 uno de 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:



Combinação de duas ondas linearmente polarizadas

En otras palabras, vea este ejemplo del método 2:



En la imagen de arriba tenemos una antena hecha por [Luciano PY2BBS](#) . Ella 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 perno de la 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.