2.3 POLARIZACIÓN DE UNA ANTENA Y FACTOR DE PÉRDIDAS POR POLARIZACIÓN

POLARIZACION

De acuerdo a la definición estándar de la IEEE para antenas, la polarización de una onda radiada se define como aquella propiedad de una onda electromagnética que describe en la dirección variante con el tiempo y la magnitud relativa del vector campo eléctrico; específicamente, la figura trazada como una función del tiempo por la extremidad del vector en una localización fija en el espacio y el sentido en el cual se traza, cuando se observa a lo largo de la dirección de propagación.

En otras palabras, la polarización es la curva trazada externamente por la punta de una flecha la cual representa el campo eléctrico instantáneo. El campo se puede observar a lo largo de la dirección de propagación, un trazo típico se muestra en la siguiente figura 2.9

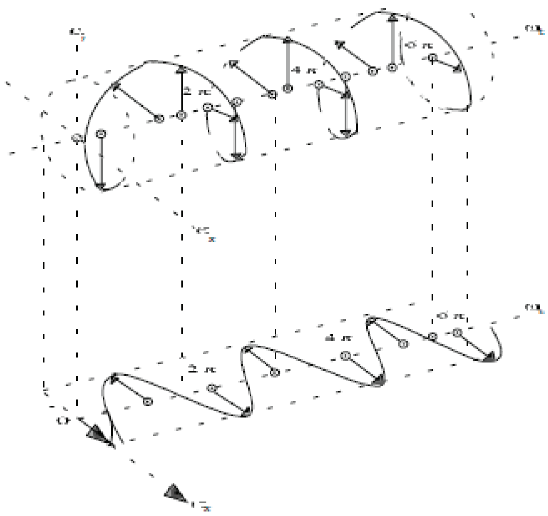


Figura 2.9 Polarización de la onda

Nota: cuando la dirección no se establece, la polarización que se forma es la polarización en dirección de máxima ganancia. En la práctica la polarización de la energía radiada varía con la dirección del centro de la antena, así diferentes partes del patrón pueden tener diferentes polarizaciones.

La polarización puede ser clasificada en tres categorías*, lineal, circular, y elíptica*. Si el vector que describe el campo eléctrico en un punto en el espacio como una función del tiempo está siempre dirigido a lo largo de una línea la cual es normal a la dirección de propagación, se dice entonces que el campo está linealmente polarizado, en general; sin embargo, si la figura que el campo eléctrico traza es una elipse, se dice que al campo esta elípticamente polarizado; las polarización lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica y pueden obtenerse cuando la elipse llega a ser una línea recta ó un círculo, respectivamente; la figura del campo eléctrico cuando se traza está en dirección de la rotación de las manecillas del reloj (cw) ó en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj (ccw).

Cuando el giro del vector es en sentido de giro de las manecillas del reloj se dice que la polarización es a derechas, mientras que si el vector gira en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj, se dice entonces que la polarización es a izquierdas.

En la figura 2.10 se muestran los esquemas representativos de las polarizaciones lineal y circular, a izquierdas y a derechas.

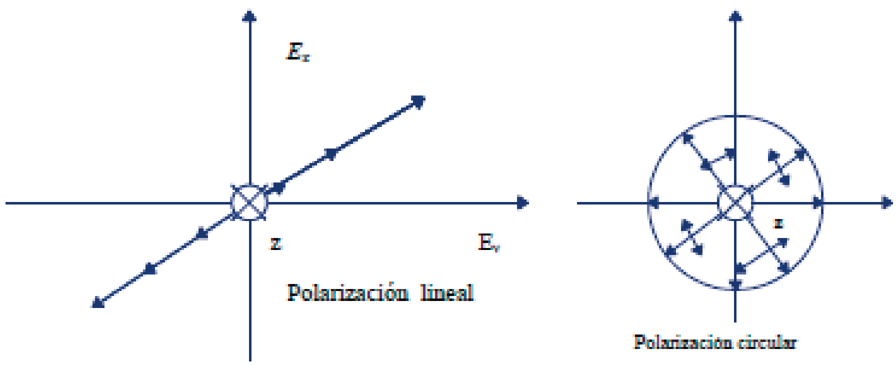


Figura 2.10 Polarización lineal y circular

POLARIZACION LINEAL

Consideremos una onda armónica plana, con las componentes de campo eléctrico viajando en la dirección z positiva (hacia la pagina) tal y como se muestra en la figura xx . los campos eléctricos y magnéticos instantáneos están dados como:

$$E = a_x E_x + a_y E_y = R_e\left[\hat{a}_x E_x^+ e^{j(\omega t-\beta z)} + \hat{a}_y E_y e^{j(\omega t-\beta z)}\right] \quad (2.41)$$

$$= \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) + \hat{a}_y E_{y0}^+ \cos(\omega t - \beta_z + \phi_y)$$

$$H = a_y H_y + a_x H_x = R_e\left[\hat{a}_y \frac{E_x^+}{\eta} e^{j(\omega t-\beta z)} - \hat{a}_x \frac{E_y^+}{\eta} e^{j(\omega t-\beta z)}\right] \quad (2.42)$$

$$= \hat{a}_y \frac{E_{x0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) - \hat{a}_x \frac{E_{y0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \phi_y) \quad (2.43)$$

Donde E_x^+, E_y^+ son complejas y E_{x0}^+, E_{y0}^+ son reales.

Examinemos ahora la variación del campo eléctrico instantáneo del vector eléctrico E tal y como se dio en la ecuación anterior en el plano Z = 0. Se pueden considerar otros planos, pero el plano Z = 0 se escoge por simplicidad y conveniencia. Como ejemplo supongamos.

$$E_{y0}^+ = 0 \quad (2.44)$$

$$E_x = E_{x0}^+ \cos(\omega t + \phi_x) \quad (2.45)$$

$$E_y = 0$$

El locus del campo eléctrico instantáneo esta dado por

$$E = \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t + \phi_x) \quad (2.46)$$

La cual es una línea recta y siempre estará dirigida a lo largo del eje X en cualquier momento, tal y como se muestra en la figura. 2.9 se dice entonces que el campo esta linealmente polarizado en la dirección X.

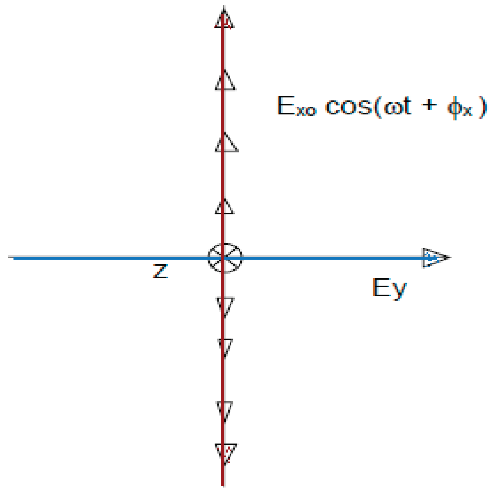


Figura 2.9 campo linealmente polarizado en la dirección X

Ejemplo: Determine la polarización de la onda dada para la onda,

$E_{x0}^{+} = 0$

Puesto que $E_{x0}^{+} = 0$ tenemos $E_x = 0$

$$E_y = E_{x0}^{2} \cos(\omega t + \phi_y) \qquad (2.47)$$

El locus del vector campo campo eléctrico instantáneo esta dado como:

$$E = \hat{a}_y E_{y0}^{+} \cos(\omega t + \phi_y) \qquad (2.48)$$

La representación es la línea recta la cual está siempre dirigida a lo largo del eje y siempre, tal y como se muestra en la figura 2.10 en este caso se dice que el campo esta linealmente polarizado en la dirección Y.

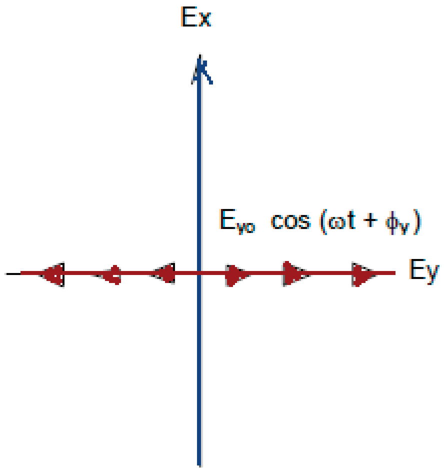


Figura 2.10 campo linealmente polarizado en la dirección Y

POLARIZACION CIRCULAR

Se dice que una onda esta circularmente polarizada si la punta del vector eléctrico trata un locus circular cuando se desplaza la onda; si el sentido de giro es en dirección de la rotación de las manecillas del reloj cuando se ve a lo largo del eje de propagación se dice que la polarización es a derechas, como se muestra en la figura 2.11.

Como **ejemplo** examinemos el caso en el cual la propagación se desarrolla únicamente en el plano XY.

El locus para el vector campo eléctrico E en el plano Z = 0 siempre es:

$$\phi_x = 0$$

$$\phi_y = -\frac{\pi}{2}$$

$$E^+_{x0} = E^+_{y0} = E_R \qquad (2.49)$$

Entonces:

$$E_x = E_R \cos(\omega t)$$

$$E_y = E_R \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_R sen(\omega t) \qquad (2.50)$$

El locus de la amplitud del vector campo eléctrico esta dado por:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_R^2 (\cos^2 \omega t + sen^2 \omega t)} = E_R$$

y está dirigida a lo largo de una línea que hace un ángulo ψ con el eje X el cual está dado como

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{E_R sen\omega t}{E_R \cos\omega t}\right) = \tan^{-1}(\tan\omega t) = \omega t \qquad (2.51)$$

Si el graficamos el locus del campo eléctrico para varios tiempos en el plano Z = 0 se generan las formas de un circulo de radio ER y gira en sentido de rotación del giro de las manecillas del reloj con una frecuencia angular ω tal y como se muestra en la figura 2.11. Se dice que la onda esta polarizada a derechas. Es importante señalar que la polarización se observa desde la parte posterior del sentido de propagación de la onda, en este caso la observación es hacia adentro de la pagina y perpendicular a ella.

La expresión para el vector para el campo eléctrico instantáneo es de la forma:

$$E = R_e\left[\hat{a}_x E_R e^{j(\omega t-\beta z)} + \hat{a}_y E_R e^{j\left(\omega t-\beta-\frac{\pi}{2}z\right)}\right] = E_R R_e\left[(\hat{a}_x - j\hat{a}_y)\, e^{j(\omega t-\beta z)}\right] \qquad (2.52)$$

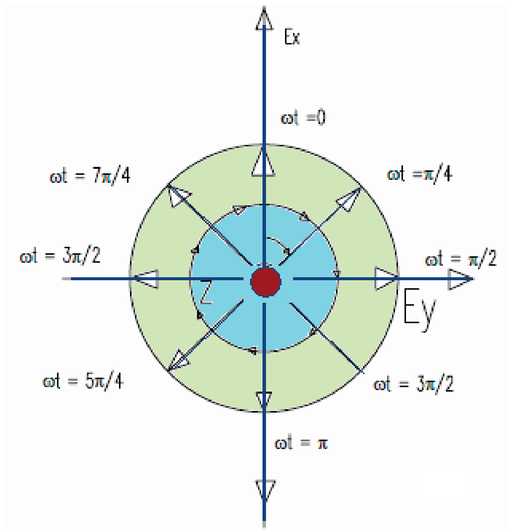


Fig. 2.11 Onda circularmente polarizada a derechas

POLARIZACION CIRCULAR A IZQUIERDAS

Si el vector campo eléctrico tiene un sentido de rotación en contra del giro de las manecillas del reloj se dice que la polarización es a izquierdas.

Un **ejemplo** de este tipo de polarización se muestra a continuación:

$$\phi_x = 0$$

$$\phi_y = \frac{\pi}{2}$$

$$E_{x0}^{+} = E_{y0}^{+} = E_L \qquad (2.53)$$

Entonces:

$$E_x = E_L \cos(\omega t)$$

$$E_y = E_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -E_L sen(\omega t) \qquad (2.54)$$

Y el locus de la amplitud es

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_L^2 (\cos^2 \omega t + sen^2 \omega t)} = E_L$$

Y el ángulo ψ está dado como:

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{E_L sen\omega t}{E_L \cos\omega t}\right) = \tan^{-1}(\tan \omega t) = -\omega t \qquad (2.55)$$

El locus del vector de campo eléctrico es un circulo de radio EL y gira en sentido contrario de las manecillas del reloj, con una frecuencia angular ω tal y como se muestra en la figura 2.12

El vector de campo eléctrico instantáneo esta dado como:

$$E = R_e\left[\hat{a}_x E_L e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_L e^{j\left(\omega t - \beta + \frac{\pi}{2} z\right)}\right] = R_e \left[(\hat{a}_x + j\hat{a}_y) e^{j(\omega t - \beta z)}\right] \qquad (2.56)$$

En la expresión anterior se pude notar que existe un avance en la fase de 90° de la componente de Ey relativa a la componente en Ex .

En general las condiciones necesarias y suficientes para que exista la polarización circular son:

1.-Las componentes de campo deberán tener dos componentes ortogonales linealmente polarizadas

2.- Las dos componentes deberán tener la misma magnitud.

3.-Las dos componentes deberán tener una diferencia de fase de múltiplos impares de 90°

El sentido de rotación estará siempre determinado por la rotación de la componente adelantada en fase a la componente retrasada en fase y observando la rotación del campo cuando la onda viaja alejándose del observador. La rotación de la componente adelantada en fase hacia la componente retrasada en fase deberá hacerse a lo largo de una separación angular entre las dos componentes la cual es menor de 180°; Fases iguales o mayores de 0° y menores que 180° pueden considerarse de ***adelanto****, mientras que aquellas iguales o mayores de 180° y menores que 360° se podrán considerar de* ***atraso***.

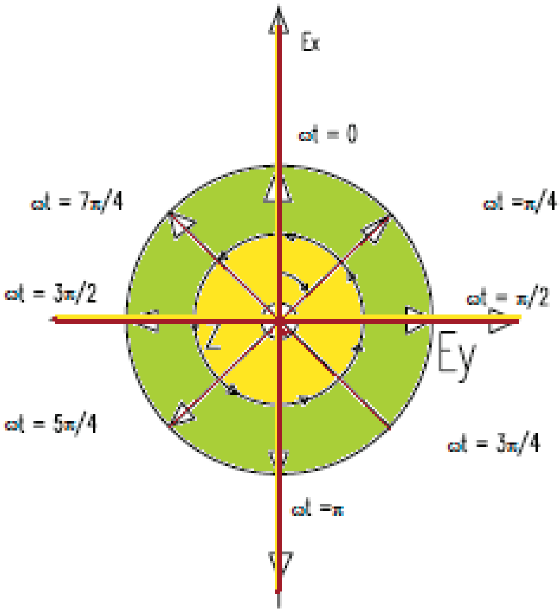


Figura 2.12 Onda circularmente polarizada a izquierdas

POLARIZACION ELIPTICA

Se dice que una onda esta elípticamente polarizada si la punta que el vector eléctrico traza un locus elipse en el espacio. La polarización como en el caso de la polarización circular se clasifica a derechas y a izquierdas, se dice que la onda esta elípticamente polarizada a derechas se el vector campo eléctrico gira en sentido de rotación del giro de las manecillas del reloj y es a izquierdas si el sentido de rotación del vector es en contra del giro de rotación de las manecillas del reloj.

Para que se presente la polarización elíptica el vector campo eléctrico E deberá escribirse por medio de una expresión de la forma:

$$\phi_x = \frac{\pi}{2}$$

$$\phi_y = 0$$

$$E_{x0}^{+} = (E_R + E_L)$$

$$E_{y0}^{+} = (E_R - E_L) \qquad (2.57)$$

Entonces:

$$E_x = (E_R + E_L)\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -(E_R + E_L)\, sen\omega t$$

$$E_y = (E_R + E_L)\cos(\omega t) \qquad (2.58)$$

Podemos escribir el locus para el vector campo eléctrico de la forma:

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 = (E_R + E_L)^2 sen^2 \omega t + (E_R - E_L)^2 \cos^2 \omega t$$

$$= E_R^2 sen^2 \omega t + E_L^2 sen^2 \omega t + 2E_R E_L sen^2 \omega t + E_R^2 \cos^2 \omega t + E_L^2 \cos^2 \omega t - 2E_R E_L \cos^2 \omega t$$

$$E_x^2 + E_y^2 = E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L \left[sen^2 \omega t - \cos^2 \omega t \right]$$

Sin embargo

$$sen\omega t = -\frac{E_x}{E_R + E_L}$$

$$\cos\omega t = \frac{E_x}{E_R - E_L}$$

Substituyendo la expresión general se reduce a:

$$\left\{\frac{E_x}{E_R + E_L}\right\}^2 + \left\{\frac{E_y}{E_R - E_L}\right\}^2 = 1$$

La cual es la ecuación para una elipse con el eje mayor interceptado $|E|_{\max} = |E_R + E_L|$ y la intercepción del eje menor $|E|_{\min imo} = |E_R - E_L|$. Conforme transcurre el tiempo el vector campo eléctrico gira y su longitud varia y traza una elipse de acuerdo a la fig. 2.13 .

Las longitudes máximas y mínimas del vector eléctrico son los ejes mayor y menor interceptados por:

$|E|_{\max} = |E_R + E_L|$ Cuando ω t = (2n + 1) $\frac{\pi}{2}$, n = 0,1,2, . . .

$|E|_{\min imo} = |E_R - E_L|$ Cuando ω t = $n\pi$, n = 0, 1,2, . . . (2.59)

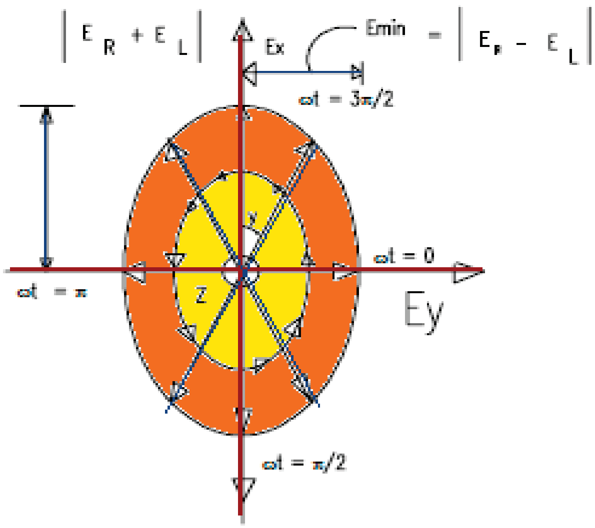


Figura 2.13 Onda elípticamente polarizada

La razón axial (AR) se define como la razón del eje mayor (incluyendo su signo) de la elipse de polarización al eje menor, o.

$$AR = -\frac{E_{max}}{E_{min}} = -\frac{E_R + E_L}{E_R - E_L}$$

Donde E_R y E_L son cantidades reales positivas. Tal y como se define en la expresión anterior la razón axial AR se puede tomar como positiva (para polarización a izquierdas) o negativa (para polarización a derechas) los valores están en el rango de $1 \leq AR \leq \infty$. El vector campo eléctrico instantáneo se puede escribir como:

$$E = \text{Re}\left\{\hat{a}_x [E_R + E_L] e^{j(\omega t - \beta z + \pi/2)} + \hat{a}_y [E_R - E_L] e^{j(\omega t - \beta z)}\right\}$$

$$E = \text{Re}\left\{\left[\hat{a}_x\, j(E_R + E_L) + \hat{a}_y (E_R - E_L)\right] e^{j(\omega t - \beta z)}\right\}$$

$$E = \text{Re}\left\{\left[E_R\left(j\hat{a}_x + \hat{a}_y\right) + E_L\left(j\hat{a}_x - \hat{a}_y\right)\right] e^{j(\omega t - \beta z)}\right\} \qquad (2.60)$$

Esta expresión nos permite representar las amplitudes de una onda circularmente polarizada, el primer termino representa una polarización a derechas, mientras que el segundo termino representa una polarización a izquierdas, dependiendo de la magnitud de las componentes la polarización elíptica estará orientada a izquierdas o a derechas.

En general para una polarización de este tipo la expresión para la razón axial esta dada como:

$$\mathbf{AR} = \pm\frac{eje\_mayor}{eje\_menor} = \pm\frac{0A}{0B} \qquad \mathbf{1 \le AR \le} \ \infty \tag{2.61}$$

Donde

$$0A = \left[\frac{1}{2}\left\{(E_{x0}^{+})^{2} + (E_{y0}^{+})^{2} + \left[(E_{x0}^{+})^{4} + (E_{y0}^{+})^{4} + 2(E_{x0}^{+})^{2}(E_{y0}^{+})^{2}\cos(2\Delta\phi)\right]^{\frac{1}{2}}\right\}\right]^{1/2} \tag{2.62}$$

$$0B = \left[\frac{1}{2}\left\{(E_{x0}^{+})^{2} + (E_{y0}^{+})^{2} - \left[(E_{x0}^{+})^{4} + (E_{y0}^{+})^{4} + 2(E_{x0}^{+})^{2}(E_{y0}^{+})^{2}\cos(2\Delta\phi)\right]^{\frac{1}{2}}\right\}\right]^{1/2} \tag{2.63}$$

Donde las expresiones para E_{x0}^{+} y E_{y0}^{+} son de la forma.

$$E_{x0}^{+} = (E_R + E_L)$$

$$E_{y0}^{+} = (E_R - E_L)$$

$\Delta\phi = \phi_x - \phi_y \neq n\pi/2$ n = 0,1,2,3,…..

Para CW si $E_R > E_L \geq 0$

Para CCW si $E_R < E_L$ (2.64)

Para CW si $E_R < E_L \leq 0$

Para CCW si $E_R > E_L$

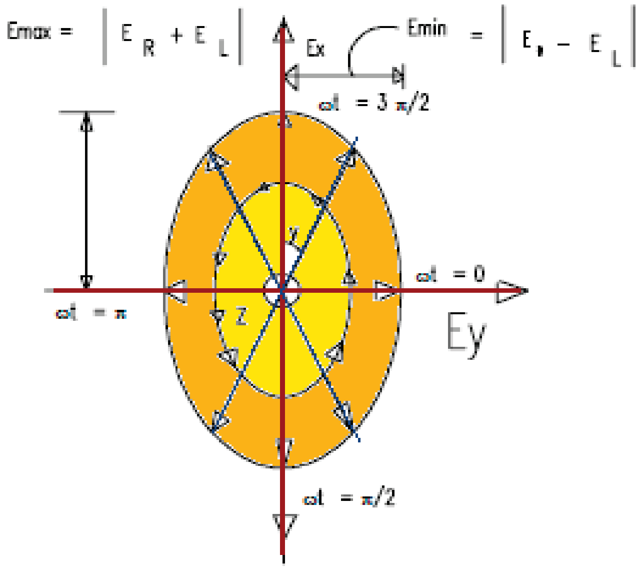


Figura 2.14 Onda electromagnética elípticamente polarizada a izquierdas

Este tipo de mediciones se pueden obtener con la asistencia de la esfera de Poincare,

FACTOR DE PÉRDIDA DE POLARIZACIÓN

En general, la polarización de la antena receptora no será la misma que la polarización de la onda entrante (o incidente). Esto se establece comúnmente como "desacoplo de polarización".

La cantidad de potencia extraída por la antena, de la señal que recibe no será máxima debido a la perdida de polarización.

Suponiendo que el campo eléctrico de la onda entrante se puede escribir como:

$$\overline{E_i} = \hat{\rho}_\omega Ei \qquad (2.65)$$

donde $\hat{\rho}_\omega$ es el vector unitario de la onda incidente y la polarización del campo eléctrico de la antena receptora se puede expresar como:

$$\overline{E_a} = \hat{\rho}_a Ea \qquad (2.66)$$

donde $\hat{\rho}_a$ es un vector unitario de la antena receptora.

La pérdida de polarización se puede tomar en cuenta introduciendo un factor de pérdida de polarización (PLF) definido como:

$$\text{PLF}=\left|\hat{\rho}_w \bullet \hat{\rho}_A^{\,*}\right|^2 = \left|\cos\Psi_p\right|^2 \quad \text{(sin dimensiones)} \qquad (2.67)$$

donde ψ_p es el ángulo entre 2 vectores unitarios.

Si la polarización de la antena y la onda se acoplan, la Polarización de un vector unitario de la onda incidente $\hat{\rho}_W$ y la antena $\hat{\rho}_A$ Su PLF será la unidad y la antena extraerá la máxima potencia de la onda que recibe.

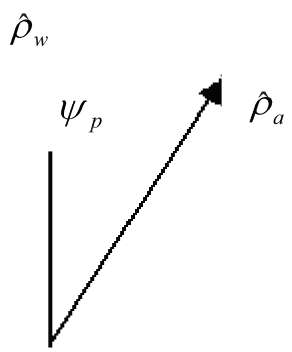
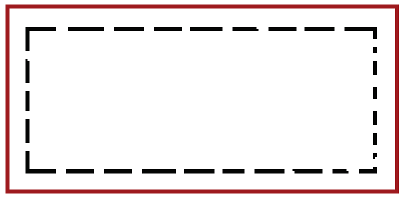


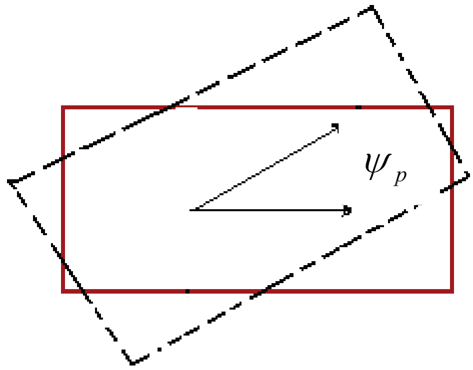
Figura 2.15 Vector unitario de polarización de la onda incidente y de la antena , además del factor de pérdida de polarización

En la figura 2.16 (a) y (b) siguientes, se ilustran los factores de pérdida de polarización de los dos tipos de antenas, alambre y abertura.



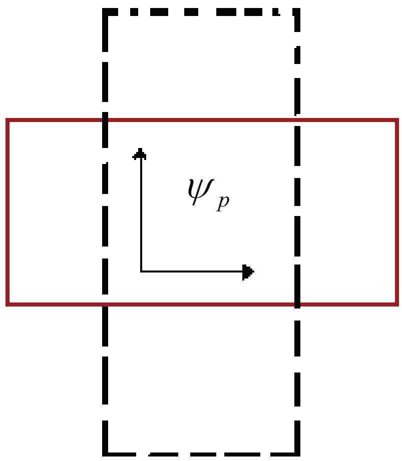
$$PLF = \left|\hat{\rho}_w \bullet \hat{\rho}_a^{\,*}\right|^2 = 1$$

Alineado



$$PLF = \left|\hat{\rho}_w \bullet \hat{\rho}_a^{\,*}\right|^2 = \cos^2(\psi_p)$$

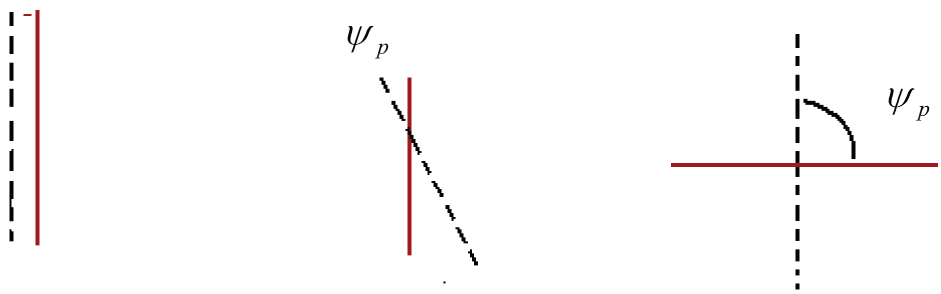
Desalineado o rotado



$$PLF = \left|\hat{\rho}_w \bullet \hat{\rho}_a^{\,*}\right|^2 = 0$$

Ortogonal

Figura 2.16 a Factores de pérdida de Polarización (PLF) para
Transmisión y recepción de antenas de abertura



$$PLF = \left|\hat{\rho}_w \bullet \hat{\rho}_a^{\,*}\right|^2 = 1 \qquad PLF = \left|\hat{\rho}_w \bullet \hat{\rho}_A^{\,*}\right|^2 = \cos^2(\psi_p) \qquad PLF = \left|\hat{\rho}_w \bullet \hat{\rho}_a^{\,*}\right|^2 = 0$$

Alineado Desalineado Ortogonal

Figura 2.16 b Factor de Perdida de Polarización (PLF) para transmisión y recepción de Antenas lineales