

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

---

#### 1.3. Medición del Diagrama de Radiación.

Uno de los parámetros de salida más importante que caracterizan el desempeño de una antena es el patrón o diagrama de radiación. El mismo está definido de acuerdo [4]: “Como una función matemática o representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena como una función de las coordenadas espaciales”. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la zona lejana (Far Field) y verifica como es la distribución angular del campo en dicha zona.

El diagrama de radiación de una antena es una magnitud vectorial compleja, definida como [2]:

$$\mathbf{F}(\theta, \phi) = \frac{\mathbf{E}_{zL}(r, \theta, \phi) \cdot e^{j(kr - \psi_a)}}{\|\mathbf{E}_{zL}(r, \theta_o, \phi_o)\|_{Máx}} \quad (1.20)$$

dónde:

$\mathbf{F}(\theta, \phi)$  es el diagrama de radiación normalizado con respecto a la dirección donde el mismo alcanza su máxima amplitud.

$\mathbf{E}_{zL}(r, \theta, \phi)$  es el vector de campo eléctrico en zona lejana.

$\|\mathbf{E}_{zL}(r, \theta_o, \phi_o)\|_{Máx}$ , es el módulo del campo eléctrico en la dirección  $(\theta_o, \phi_o)$  donde alcanza su máximo valor.

$\psi_a$  es el ángulo de fase en radianes de la corriente de excitación de la antena.

El diagrama de radiación complejo se descompone en una magnitud, dirección y fase, representado de la siguiente manera:

$$\mathbf{F}(\theta, \phi) = F(\theta, \phi) \cdot \mathbf{p}(\theta, \phi) \cdot e^{j\psi(\theta, \phi)} \quad (1.21)$$

donde

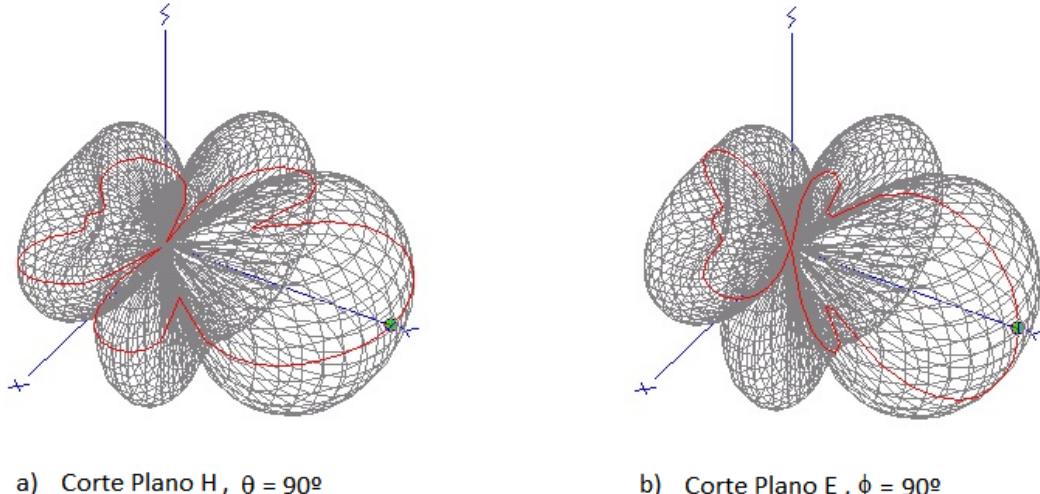
$F(\theta, \phi)$  es la magnitud del diagrama de radiación,

$\mathbf{p}(\theta, \phi)$  es el vector polarización y

$\psi(\theta, \phi)$  es la fase del vector polarización.

La magnitud del diagrama de radiación complejo suele llamársele diagrama de radiación de amplitud normalizado del campo, es decir  $F(\theta, \phi) = \|\mathbf{F}(\theta, \phi)\|$ .

La representación de la magnitud del diagrama de radiación complejo puede obtenerse analíticamente o gráficamente [2] y dentro de su representación gráfica suele utilizarse el polar tridimensional, el polar plano, el cartesiano, entre otros [2]. Ver Figura. 1.5 y Figura. 1.6. Todos estos medios de representación gráficos, permiten determinar la variación espacial de la magnitud del campo eléctrico (magnético) para una distancia  $r=cte$ , es decir, la magnitud normalizada del campo eléctrico (magnético) para una determinada coordenada  $(\theta, \phi)$ .



**Figura 1.5:** Diagrama de radiación polar tridimensional para una antena con polarización lineal vertical.(Realizado en EZNEC). Fuente: El Autor.

Un diagrama de radiación de amplitud tridimensional puede aportar una visualización general de las características de radiación de la antena en todo el espacio, sin embargo, suele ser de interés y en muchos casos suficiente representar cortes del diagrama, resultando diagramas de radiación bidimensionales. A pesar de que existen infinitos cortes que pueden aportar información del diagrama de radiación en forma de dos dimensiones, los más comunes son los que se realizan en los meridianos de una hipotética esfera, cortes para  $\phi = \text{constante}$  (planos verticales) o los paralelos que son los cortes para  $\theta = \text{constante}$  (planos horizontales)

Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas [3]. Ver Figura. 1.6.

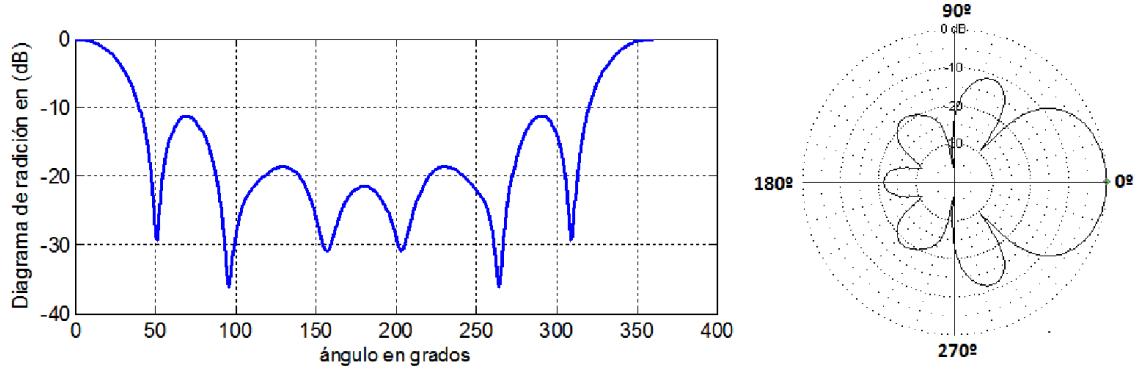
En el diagrama de radiación polar el ángulo representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. Normalmente los gráficos polares vienen en escala en decibelios, normalizados al máximo valor del campo.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles de antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información más clara de la distribución de campo o densidad de potencia en las diferentes direcciones del espacio. La escala en decibelios se obtiene como:

$$F(\theta, \phi)_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \|F(\theta, \phi)\| \quad (1.22)$$

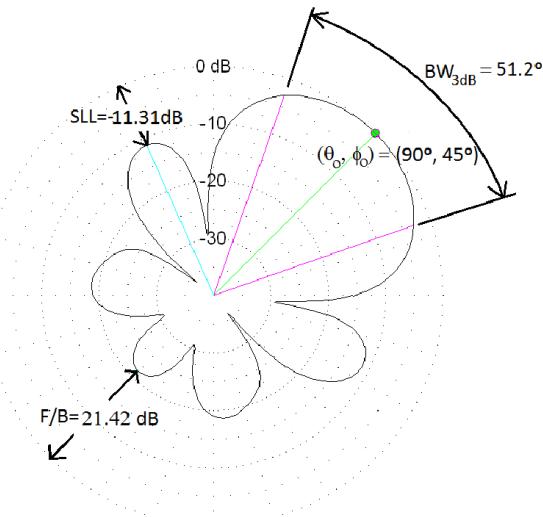
En un diagrama de radiación polar bidimensional suelen definirse unos parámetros que nos permiten describir su comportamiento y permiten especificar su funcionamiento con un número reducido de los mismos. Estos parámetros pueden identificarse en la

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.



**Figura 1.6:** Diagrama de radiación bidimensional en coordenadas Cartesianas y Polares. Fuente: El Autor.

Figura. 1.7 y descritos a continuación[14]:



**Figura 1.7:** Parámetros de un diagrama de radiación. Fuente: El Autor.

- *Dirección de apuntamiento  $(\theta_o, \phi_o)$ . Dirección que corresponde al máximo de radiación de la antena.*
- *Haz principal o lóbulo principal. Margen angular correspondiente a la zona próxima al máximo y comprendido entre éste y los mínimos relativos que lo rodean.*
- *Apertura del haz principal entre puntos de  $-3\text{dB}$  ( $\theta_{3\text{dB}}$ ) o ( $BW_{3\text{dB}}$ ). Margen angular entre la dos direcciones próximas al máximo principal cuya amplitud está  $3\text{dB}$*

*por debajo del máximo.*

- *Nivel de lóbulos secundarios(SLL, Secondary Level Lobule). El mayor de los máximos secundarios medido respecto al máximo principal, en dB.*
- *Relación delante - atrás ( F/B, Front to back ratio ). Relación en dB de la radiación principal a la obtenida en la dirección opuesta.*

### 1.3.1. Medición del Diagrama de Radiación de amplitud.

La medición del diagrama de radiación de una antena pasa con tener en cuenta las siguientes consideraciones, las cuales serán explicadas a continuación.

#### 1.3.1.1. Conocimiento de los vectores de polarización de una antena.

De acuerdo a lo expresado por [2], es importante el conocimiento de las componentes de polarización del campo eléctrico radiado en zona lejana el cual se puede expresar de la siguiente forma general[3]:

$$\mathbf{E}_{zl}(r, \theta, \phi) = -j.Z_c.k. \frac{e^{-j.k.r}}{4\pi r} \cdot \mathbf{N}_{zl}(\theta, \phi) \quad (1.23)$$

donde  $\mathbf{N}_{zl}(\theta, \phi)$  es el vector de radiación de la antena. La ecuación (1.23) se puede expresar en forma vectorial compleja [2]:

$$\mathbf{E}_{zl}(r, \theta, \phi) = V_o.e^{j.\psi_a} \cdot \frac{e^{-j.k.r}}{r} \cdot \mathbf{F}(\theta, \phi) \cdot \mathbf{p}(\theta, \phi) \cdot e^{j.\psi(\theta, \phi)} \quad (1.24)$$

donde

$$V_o = \frac{Z_c.k. \|\mathbf{N}_{zl}(\theta_o, \phi_o)_{Máx}\|}{4\pi}$$

de tal modo que 1.24 se puede expresar como:

$$\mathbf{E}_{zl}(r, \theta, \phi) = V_o.e^{j.\psi_a} \cdot \frac{e^{-j.k.r}}{r} \cdot \mathbf{F}(\theta, \phi) \quad (1.25)$$

La ecuación (1.25) del campo eléctrico en zona lejana se puede descomponer en sus componentes  $E_\theta$  y  $E_\phi$ , expresándose de la siguiente manera:

$$\mathbf{E} = E_\theta.a_\theta + E_\phi.a_\phi = V_o.e^{j.\psi_a} [F_\theta(\theta, \phi) \cdot \mathbf{a}_\theta + F_\phi(\theta, \phi) \cdot \mathbf{a}_\phi] \frac{e^{(-j.k.r)}}{r} \quad (1.26)$$

donde las funciones  $F_\theta(\theta, \phi)$  y  $F_\phi(\theta, \phi)$ , también se le designan con los nombres de diagramas de radiación de amplitud de las componentes  $a_\theta$  y  $a_\phi$  del campo, las cuales se determinan como:

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

---

$$\begin{cases} F_\theta(\theta, \phi) = \frac{E_\theta}{E_{\theta M\acute{a}x}} \\ F_\phi(\theta, \phi) = \frac{E_\phi}{E_{\phi M\acute{a}x}} \end{cases} \quad (1.27)$$

Estos diagramas son los que se investigan principalmente, por lo que hay que conocer la polarización que posee la antena antes de hacer la medición.

#### 1.3.1.2. Reciprocidad de los Diagramas de Radiación.

Por el principio de reciprocidad de las antenas, sus características de radiación se mantienen, es decir, son invariantes ya sea si la antena opera en régimen de transmisión(Tx) o recepción (Rx).[2, 3, 4, 10] Esto significa que el diagrama de radiación de una antena puede ser medido ya sea en régimen de transmisión o recepción. Como lo describe [2] la medición del patrón de radiación se puede realizar de la siguiente forma:

1. La antena en modo Rx. En este modo se necesita de otra antena que produzca una onda electromagnética sectorialmente plana y uniforme en el lugar donde se sitúa la antena bajo prueba, y que convenientemente tenga la misma polarización que la antena bajo prueba.
2. La antena en modo Tx. En este modo es necesario utilizar un medidor de campo para detectar el campo radiado por la antena, el cual estará formado por una antena patrón ( dipolo lineal), que de igual manera que en el caso de modo recepción es conveniente que tenga la misma polarización que la antena bajo prueba.

#### 1.3.1.3. Zona de Medidas

La medición del diagrama de radiación de amplitud de una antena pasa por conocer el sistema de referencia el cual se realizaran las mediciones. El mismo es el sistema de coordenadas esféricas, tal como lo establece [7], el cuál se muestra en la Figura. 1.8

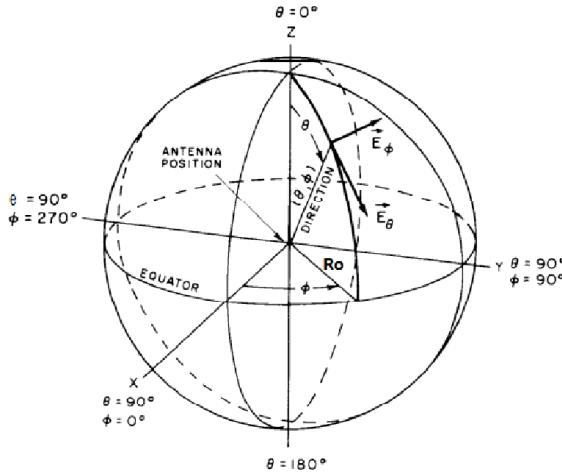
En éste sistema de referencia, la antena bajo prueba se centra en el origen del sistema de coordenadas. La distancia radial “Ro” desde el centro de la misma se fija para que cumpla con los criterios de zona lejana de la antena. Estos criterios son muy importantes al momento de realizar las mediciones ya que al no cumplirse pueden producirse errores en la medición del diagrama de radiación, errores denominados de amplitud y fase.

Para disminuir los errores de amplitud y fase se utilizan los criterios de zona lejana para obtener un campo de radiación que produzca una onda sectorialmente plana en esa posición. Estos criterios son descritos a continuación:

##### Criterio de zona lejana por fase.

Este criterio se basa en la aproximación realizada en la fase del campo eléctrico en zona lejana.

El campo eléctrico de una antena puede ser determinado con la siguiente expresión



**Figura 1.8:** Sistema de coordenadas esféricas. Fuente:IEEE Standard test procedures for Antennas, IEEE Std 149-1979

$$\mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{A} + \frac{1}{j\omega\varepsilon}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}) \quad (1.28)$$

donde  $\mathbf{A}$  es el vector potencial magnético el cual viene determinado por la siguiente expresión:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_v \mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot \frac{e^{-jk\|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\|}}{\|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\|} dv' \quad (1.29)$$

la longitud  $\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|$ , viene dada por

$$\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\| = \sqrt{r^2 + r'^2 - 2.r.r'.\cos(\xi)} \quad (1.30)$$

donde  $\xi$  es el ángulo formado entre los vectores  $r$  y  $r'$   
el término  $\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|$  se puede aproximar utilizando la serie de potencia :

$$(1+x)^m = 1 + m.x + \frac{m.(m-1)}{2!}.x^2 + \frac{m.(m-1).(m-2)}{3!}.x^3 + \dots \quad (1.31)$$

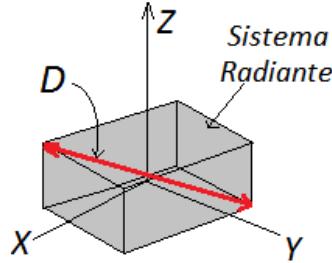
de tal modo que el factor  $\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|$  puede escribirse de acuerdo a la ecuación (1.31) como:

$$\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\| \approx r \cdot \left\{ 1 - \frac{r'}{r} \cdot \cos(\xi) + \frac{1}{2} \cdot \frac{r'^2}{r^2} \cdot \sin^2(\xi) + \frac{1}{2} \cdot \frac{r'^3}{r^3} \cdot \cos(\xi) + \dots \right\} \quad (1.32)$$

En el cálculo de la zona lejana se suele utilizar como  $r'$  la máxima longitud geométrica del sistema radiante, denotándola con la letra "D". Ver Figura. 1.9.

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

---



**Figura 1.9:** Máxima longitud del sistema radiante o antena. Fuente: El Autor.

Para antenas grandes, donde  $D > \lambda$ , el criterio predominante para estimar la distancia es el error por fase.

Éste error proviene de aproximar la fase de la onda con los dos primeros términos del desarrollo de potencia de  $\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|$ , el cual viene dado por:

$$k \cdot \|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\| \approx kr - kr' \cdot \cos(\xi) \quad (1.33)$$

y el error que se cometería sería:

$$e_f \approx \frac{k}{2} \cdot \frac{r'^2}{r^2} \cdot \operatorname{sen}^2(\xi) \quad (1.34)$$

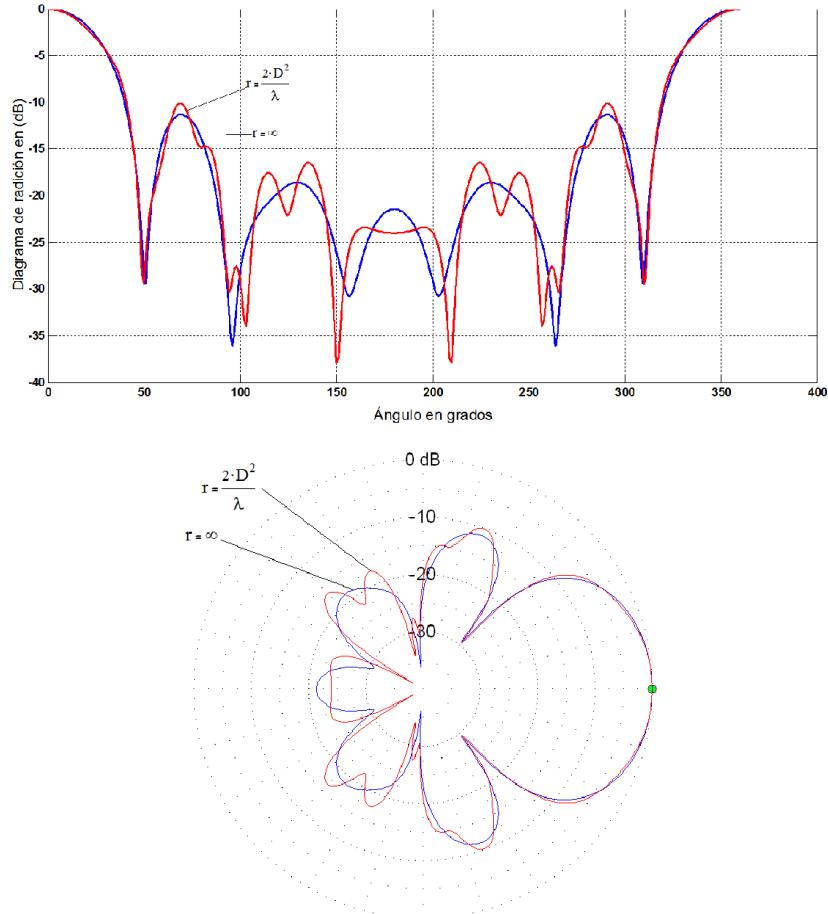
éste error será máximo cuando  $\xi = \pi/2$ , y si consideramos que  $r' = r'_{max}$  e igual a  $D/2$ , resultando un valor de:

$$e_{f \text{ MÁX}} = \frac{k \cdot D^2}{8r} \quad (1.35)$$

Se ha demostrado por una cantidad de investigadores y en numerosos ejemplos [7], que para longitudes de la antena  $D > \lambda$ , un error de fase máximo de  $\frac{\pi}{8} = 22.5^\circ$ , no es muy perjudicial en el análisis. Con éste error de fase máximo la distancia de zona lejana sería:

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.36)$$

Ésta distancia sería el límite inferior de la zona lejana por criterio de fase. A continuación en la Figura. 1.10 se muestra el diagrama de radiación de una antena Yagi con polarización vertical operando a 210Mhz, visualizando su diagrama de radiación en  $F(\theta = \pi/2, \phi)$ , para el límite de la zona de lejana por criterio de fase. En la Figura. 1.10 se visualiza que en el límite de la zona lejana por criterio de fase, la ubicación de los mínimos no es la correcta, cuando se compara con el patrón de radiación obtenido en una distancia de zona lejana infinita ( $r = \infty$ ).



**Figura 1.10:** Diagrama de radiación lineal y polar de una antena Yagi medidas para distancias  $r = 2D^2/\lambda$  y  $r = \infty$ . Fuente: El Autor.

#### Criterio de zona lejana por amplitud

Para antenas pequeñas donde  $D < \lambda$ , el criterio predominante para determinar la zona lejana viene impuesto por un error de primer orden, donde la amplitud de  $\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|$  se toma igual que "r" y el error de amplitud que se comete viene dado por la siguiente expresión:

$$e_a \approx \frac{r'}{r} \cdot \cos(\xi) \quad (1.37)$$

el cual será máximo si se considera que  $\xi = 0$ , por lo que el error máximo será  $e_{a \text{Máx}} = \frac{r'}{r}$ . Si se elige que  $r'$  es igual a  $D/2$ , este error máximo será de  $e_{a \text{Máx}} = \frac{D}{2r}$ , donde un criterio elegido es que el error sea menor  $e_{a \text{Máx}} < 0,01$ .

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

---

La distancia para garantizar este error será de:

$$r \geq 50.D \quad (1.38)$$

Para antenas muy pequeñas  $D/\lambda < 0,4$  de acuerdo a [2], la zona lejana se toma para

$$r \geq 20.\lambda \quad (1.39)$$

de tal modo que los criterios a utilizar para tomar mediciones del patrón de radiación, polarización y ganancia de una antena estarán dados por:

$$r \geq \text{Máx} \left\{ \frac{2D^2}{\lambda}, 50D, 20\lambda \right\} \quad (1.40)$$

Una deducción de los criterios para calcular el rango de zona intermedia de una antena se encuentra en la siguiente literatura [2, 4]. A continuación se presentan la distancia “r” en la cual se considera como la zona intermedia de dicha antena:

$$0,62.D \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{\lambda}\right)} < r < 2 \cdot \frac{D^2}{\lambda} \quad (1.41)$$

Por otro lado se considera zona cercana cuando la distancia de observación r es:

$$r < 0,62.D \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{\lambda}\right)} \quad (1.42)$$

#### 1.3.1.4. Cortes de los patrones.

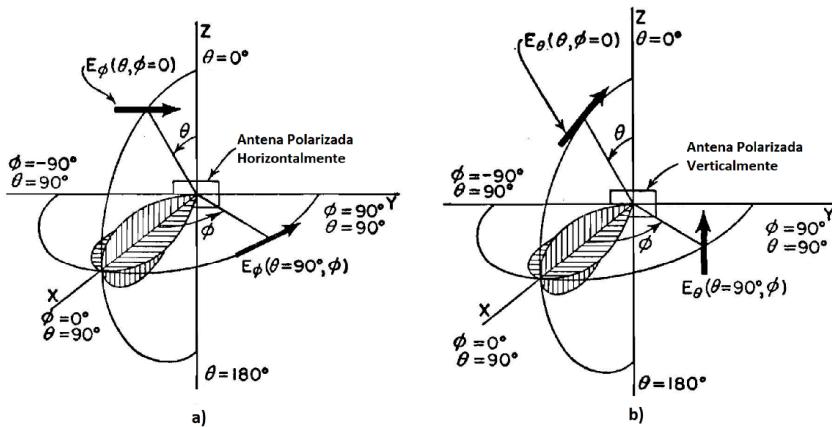
Usualmente los patrones de radiación son medidos sobre ciertos planos que cortan el sistema de referencia donde se posiciona la antena. Un método directo de medición del patrón de radiación de una antena bajo prueba (ABP) es emplear una antena receptora tipo sonda ( dipolo de  $\lambda/2$  ), la cual puede ser posicionada de tal manera que ésta se mueva en movimiento relativo a la antena bajo prueba a lo largo de líneas  $\theta = \text{constante}$  y  $\phi = \text{constante}$ . Existen cuatro planos típicos en los cuales las características del campo ( magnitud y fase) son medidos. Estos patrones son conocidos como cortes de planos principales (Principal Plane Cuts), estos cortes son los siguientes:

1. Componente  $E_\theta$  en el plano E .  $E_\theta(r = Ro, \theta, \phi = 0)$ .  $E_\theta$  como una función de  $\theta$  en el plano XZ.
2. Componente  $E_\theta$  en el plano H .  $E_\theta(r = Ro, \theta = 90^\circ, \phi)$ .  $E_\theta$  como una función de  $\phi$  en el plano XY.
3. Componente  $E_\phi$  en el plano E .  $E_\phi(r = Ro, \theta = 90^\circ, \phi)$ .  $E_\phi$  como una función de  $\theta$  en el plano XZ.

4. Componente  $E_\phi$  en el plano H .  $E_\phi(r = Ro, \theta, \phi = 0)$ .  $E_\phi$  como una función de  $\phi$  en el plano XY.

El plano conocido como E, es el plano donde se localiza la componente principal del campo eléctrico de una antena polarizada linealmente, y el plano H, es el plano donde se encuentra o existe el campo magnético de dicha antena. En la Figura. 1.11 se visualizan los planos de radiación principales.

Si la antena está polarizada horizontalmente los patrones en los planos XZ y XY de la componente  $E_\phi$  se muestran en la Figura. 1.11.a) . Si la antena está polarizada verticalmente los patrones en los planos XZ y XY de la componente  $E_\theta$  se muestran en la Figura. 1.11.b). Si la antena está polarizada circularmente o elípticamente se necesitan el conjunto de los cuatro planos más la razón axial para obtener el diagrama de radiación en los planos: horizontal XY, es decir,  $\|F(\theta = 90^\circ, \phi)\|$  y el plano vertical XZ, es decir,  $\|F(\theta, \phi = 0)\|$  que serían los diagramas de radiación bidimensionales de la antena polarizada circularmente o elípticamente.



**Figura 1.11:** Planos de radiación principales. Fuente: Antennas. Autor: Jhon D. Krauss[10]

### 1.3.1.5. Técnica de Medición del Patrón de radiación

La medición del diagrama de radiación de una antena se realiza estableciendo lo que se conoce como Configuraciones Básicas de Rango de Antenas [7]. Existen dos configuraciones para cumplir con el acoplamiento de encontrar los cortes para planos  $\theta = \text{constante}$  y  $\phi = \text{constante}$ . Estos son:

1. *Configuración de línea de vista fija (The fixed line of sight)* [7]. Aquí la antena bajo prueba y su sistema de coordenadas asociado es rotado alrededor de un eje

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

---

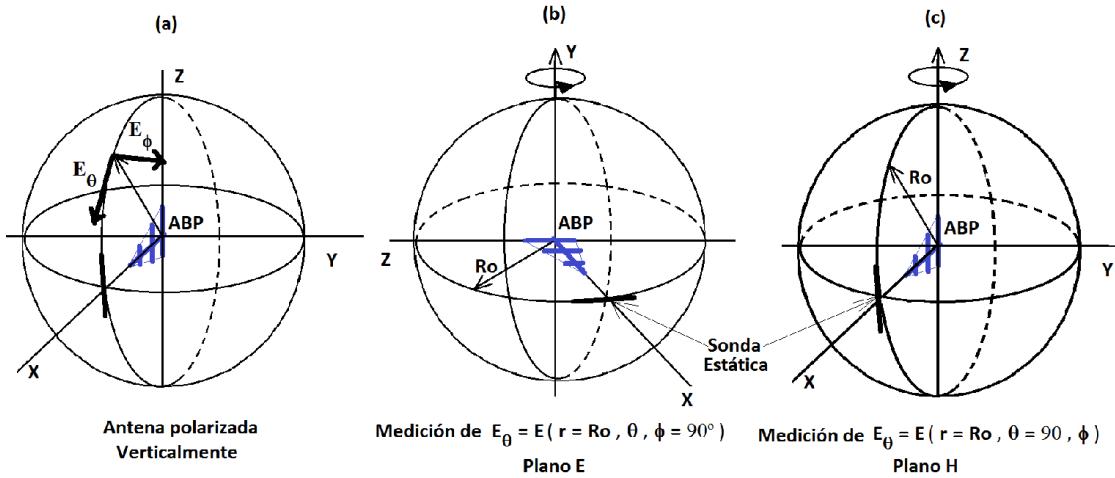
disponible de rotación, este eje pasa a través del centro de fase de la antena bajo prueba. Si la antena opera en su modo de recepción la señal que ésta reciba de una antena fuente localizada en un punto fijo es registrada. La antena fuente es una antena que proporciona una onda electromagnética sectorialmente plana y uniforme sobre la antena bajo prueba. Si la antena ABP opera en su modo trasmisión es necesario contar con una antena sonda receptora que tenga una polarización adecuada para registrar o medir la señal trasmitida por la ABP a medida que ésta rota. Para ésta configuración es prioritario contar con un sistema de posicionamiento de la ABP, que le permita rotar ya sea en forma acimutal para un  $\theta = \text{constante}$ , o en forma polar para un  $\phi = \text{constante}$ .

2. *Configuración de línea de vista móvil ( movable line- of sight )* [7]. Aquí la antena fuente se mueve incrementalmente o continuamente a lo largo de la circunferencia de un círculo centrado aproximadamente en el centro de fase de la antena bajo prueba. Al mover incrementalmente la antena fuente, para cada posición de ésta, la antena de prueba se gira y la señal recibida por ésta se registra.

Si la medición se realiza utilizando la opción *Configuración de línea de vista fija*, ésta medición se realiza de acuerdo a la Ref.[2], colocando la antena bajo prueba en el centro del origen del sistema de coordenadas, tal como lo indica la Sección 1.3.1.3 y haciendo coincidir el máximo de radiación en la dirección del eje "x". Posteriormente se necesita un sistema de posicionamiento para la ABP que le permita rotar en forma acimutal y polar para realizar el resto del procedimiento. Si el dispositivo de posicionamiento solo permite la rotación de la ABP en pociones angulares de acimut, la antena sonda (fuente) para obtener los diferentes cortes, por ejemplo, para el diagrama de radiación  $F_\theta$  se debe posicionar de tal manera como se muestra en la Figura 1.12. Por ejemplo para una ABP con polarización vertical la misma debe rotarse  $90^\circ$  alrededor del eje "x" de tal forma que a medida que el sistema de posicionamiento rote en posiciones acimutales se obtendrá el plano vertical o plano E " $F_\theta(\theta, \phi = 90^\circ)$ " y si la ABP permanece en su posición original de polarización, al realizar rotaciones en acimut se obtendrá el plano horizontal o plano H " $F_\theta(\theta, \phi = \phi_0)$ " de la misma. A medida que la antena bajo prueba rota bajo el sistema de posicionamiento, la señal trasmitida por la ABP se va registrando en la antena sonda receptora colocada a la distancia "Ro" de zona lejana de la ABP con una polarización adecuada para poder medir los diagramas de radiación pertinentes dado el caso deseado, ya sea el plano E o el plano H. Ver también Ref. [2] páginas 222-230.

#### 1.3.1.6. Técnica de medición del patrón de radiación de antenas polarizadas elípticamente o circularmente.

A continuación se describe un procedimiento para medir el diagrama de radiación de amplitud para los planos  $\phi = \text{constante}$  (plano horizontal) y  $\theta = \text{constante}$  (plano vertical) de una antena con polarización elíptica o circular. Para aplicar éste procedimiento es necesario conocer la característica de polarización de la antena bajo prueba,



**Figura 1.12:** Medición de  $E_\theta$  para los planos E y H para una antena polarizada verticalmente soportada sobre un sistema de rotación acimutal. Fuente: El Autor.

es decir, con exactitud debe conocerse la razón axial (AR), el ángulo de inclinación ( $\tau$ ) y como dato suplementario la elipse de polarización de la antena bajo estudio.

En una antena con polarización elíptica o circular puede hablarse que el campo eléctrico puede descomponerse en un campo eléctrico debido a la componente principal de polarización  $\mathbf{E}_{pr}(r, \theta, \phi)$  y un campo eléctrico debido a la componente cruzada o parásita  $\mathbf{E}_{par}(r, \theta, \phi)$  ver Sección. 1.5. Estos campos en zona lejana se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\mathbf{E}_{pr}(r, \theta, \phi) = \frac{j.Zc.e^{-j.k.r}}{2.\pi.r} \cdot I_{pr} \cdot [F_{p\theta}(\theta, \phi) \cdot a_\theta + F_{p\phi}(\theta, \phi) \cdot a_\phi] \quad (1.43)$$

$$\mathbf{E}_{par}(r, \theta, \phi) = \frac{j.Zc.e^{-j.k.r}}{2.\pi.r} \cdot I_{par} \cdot [F_{c\theta}(\theta, \phi) \cdot a_\theta + F_{c\phi}(\theta, \phi) \cdot a_\phi] \quad (1.44)$$

donde  $I_{pr}$  e  $I_{par}$  representan las corrientes de la componentes principal y parásita (cruzada) de polarización respectivamente, donde  $\|I_{pr}\| > \|I_{par}\|$  y

$F_{p\theta}(\theta, \phi)$  es el diagrama de radiación de amplitud de la componente principal de polarización en la dirección  $a_\theta$ .

$F_{p\phi}(\theta, \phi)$  es el diagrama de radiación de amplitud de la componente principal de polarización en la dirección  $a_\phi$ .

$F_{c\theta}(\theta, \phi)$  es el diagrama de radiación de amplitud de la componente cruzada o parásita de polarización en la dirección  $a_\theta$ .

$F_{c\phi}(\theta, \phi)$  es el diagrama de radiación de amplitud la componente cruzada de polarización en la dirección  $a_\phi$ .

La medición de cada uno de estos diagramas se realiza con la técnica de medición

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

Configuración de línea de vista fija explicada en el Sección 1.3.1.5. La estimación de estos diagramas de radiación son imprescindibles para la determinación del diagrama de radiación total  $F(\theta, \phi)$ .

Por ejemplo, para la medición de planos bisectrices del diagrama de radiación total  $F(\theta, \phi)$  del sistema radiante o antena bajo prueba en los planos  $\phi = \text{constante}$  y  $\theta = \text{constante}$ , es decir,  $F(\theta = 90^\circ, \phi)$  y  $F(\theta, \phi = 0)$  deben medirse los diagramas de las componentes principal y parásita mencionados anteriormente. Para llevar acabo lo anterior, debe seguirse el siguiente procedimiento:

#### 1.3.1.7. Procedimiento para medir los diagramas de radiación totales bidimensionales $F(\theta = 90^\circ, \phi)$ y $F(\theta, \phi = 0)$ para antenas con polarización elíptica o circular.

##### a) Posicionamiento de la antena bajo prueba en forma adecuada.

1. Se posiciona el sistema radiante de tal modo que su máximo de radiación apunte en la dirección  $a_x$
2. Con la información del ángulo de inclinación ( $\tau$ ) de la elipse de polarización del sistema radiante se rota el mismo de tal manera que el eje principal de la elipse de polarización quede colocado sobre el eje Y y su contra parte, el eje menor, quede en el eje Z. Ver Figura 1.13

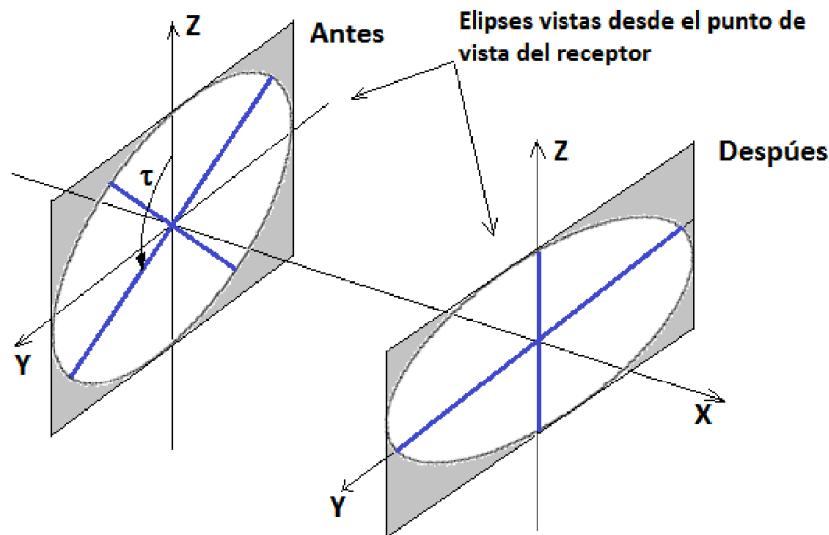


Figura 1.13: Rotación de Elipse de Polarización. Fuente: El Autor.

3. Al realizar el proceso de rotación del sistema radiante o de la ABP descrito en el punto anterior se busca simplificar la configuración matemática del campo eléctrico.

trico de la componente principal y cruzada, de tal modo que si se rota la ABP al alrededor del eje X, quedando el eje mayor de la elipse de polarización sobre el eje Y, las ecuaciones del campo eléctrico de la componte principal y cruzada quedarán de la siguiente forma:

$$\mathbf{E}_{pr}(r, \theta, \phi) = \frac{j.Zc.e^{-j.k.r}}{2.\pi.r} \cdot I_{pr} \cdot [F_{p\phi}(\theta, \phi) \cdot a_\phi] \quad (1.45)$$

$$\mathbf{E}_{par}(r, \theta, \phi) = \frac{j.Zc.e^{-j.k.r}}{2.\pi.r} \cdot I_{par} \cdot [F_{c\theta}(\theta, \phi) \cdot a_\theta] \quad (1.46)$$

**b) Medición del Patrón de Radiación en el plano Horizontal  $\|\mathbf{F}(\theta = 90^\circ, \phi)\|$**

1. Se mide el patrón de radiación  $F_{p\phi}(\theta = 90^\circ, \phi)$  con un dipolo con polarización horizontal posicionado en la zona lejana “Ro” y se sigue el procedimiento de medición *Configuración de línea de vista fija*.
2. Se mide el patrón de radiación  $F_{c\theta}(\theta = 90^\circ, \phi)$  con un dipolo con polarización vertical posicionado en la zona lejana “Ro” y se sigue el procedimiento de medición *Configuración de línea de vista fija*.
3. Ambos diagramas pueden ser medidos simultáneamente si los dipolos se colocan de forma cruzada a la distancia “Ro” y se mide la tensión en circuito abierto sobre ambos dipolos, cuando la ABP gira en forma acimutal.
4. Luego con la información numérica de ambos patrones y con el conocimiento de la razón axial (AR) se determina  $\|\mathbf{F}(\theta = 90^\circ, \phi)\|$  mediante la 1.47:

$$\|\mathbf{F}(\theta = 90^\circ, \phi)\| = \frac{\sqrt{\|\mathbf{F}_{c\theta}(\theta = 90^\circ, \phi)\|^2 + (AR)^2 \cdot \|\mathbf{F}_{p\phi}(\theta = 90^\circ, \phi)\|^2}}{\sqrt{1 + (AR)^2}} \quad (1.47)$$

**c) Medición del Patrón de Radiación en el plano vertical  $\|\mathbf{F}(\theta, \phi = 0)\|$**

1. Luego de medir el patrón  $\|\mathbf{F}(\theta = 90^\circ, \phi)\|$ , la antena bajo prueba es retirada de su sistema de rotación inicial para luego ser rotada  $90^\circ$  al rededor del eje “X”, de tal modo que ahora el eje principal de la elipse de polarización quede sobre el eje “Z”. Esto último debe realizarse si el sistema de rotación en el cual se posiciona la antena bajo prueba solo puede girar en ángulos de acimut. Al realizar esta rotación las componentes del campo se invierten de tal modo que las ecuaciones 1.45 y 1.46 se transforman en las siguientes :

$$\mathbf{E}_{pr}(r, \theta, \phi) = \frac{j.Zc.e^{-j.k.r}}{2.\pi.r} \cdot I_{pr} \cdot [F_{p\theta}(\theta, \phi) \cdot a_\theta] \quad (1.48)$$

$$\mathbf{E}_{par}(r, \theta, \phi) = \frac{j.Zc.e^{-j.k.r}}{2.\pi.r} \cdot I_{par} \cdot [F_{c\phi}(\theta, \phi) \cdot a_\phi] \quad (1.49)$$

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

---

al realizar esta rotación, la medición de  $F_{p\phi}(\theta, \phi = 0)$  que se realizaría con la antena rotando en forma polar, se transforma en medir  $F_{p\theta}(\theta = 90^\circ, \phi)$  y la medición de  $F_{c\theta}(\theta, \phi = 0)$  se transforma en medir  $F_{c\phi}(\theta = 90^\circ, \phi)$ .

2. Se mide el patrón de radiación  $F_{c\phi}(\theta = 90^\circ, \phi)$  con un dipolo con polarización horizontal posicionado en la zona lejana “Ro” y se sigue el procedimiento de medición *Configuración de línea de vista fija*.
3. Se mide el patrón de radiación  $F_{p\theta}(\theta = 90^\circ, \phi)$  con un dipolo con polarización vertical posicionado en la zona lejana “Ro” y se sigue el procedimiento de medición *Configuración de línea de vista fija*.
4. Ambos diagramas pueden ser medidos simultáneamente si los dipolos se colocan de forma cruzada a la distancia “Ro” y se mide la tensión en circuito abierto sobre ambos dipolos, cuando la ABP gira en forma acimutal.
5. Luego con la información numérica recopilada de ambos diagramas y con el conocimiento de la razón axial (AR) se determina  $\|\mathbf{F}(\theta, \phi = 0)\|$  mediante la 1.50:

$$\|\mathbf{F}(\theta, \phi = 0)\| = \frac{\sqrt{\|\mathbf{F}_{c\phi}(\theta = 90^\circ, \phi)\|^2 + (AR)^2 \cdot \|\mathbf{F}_{p\theta}(\theta = 90^\circ, \phi)\|^2}}{\sqrt{1 + (AR)^2}} \quad (1.50)$$

#### 1.3.2. Intensidad de radiación

De acuerdo a [1], ésta se define como “La densidad de potencia radiada por unidad de ángulo salido”. La intensidad de radiación es un parámetro de campo de zona lejana y puede ser obtenida al multiplicar el vector de densidad de potencia por el cuadrado de la distancia. En forma matemática ésta se expresa como[4]:

$$U(\theta, \phi) = r^2 \cdot S_{rad}(r, \theta, \phi) \quad [W/stereoradian] \quad (1.51)$$

donde

$U$ = intensidad de radiación ( W/unidad de ángulo sólido)

$S_{rad}$ = magnitud del vector densidad de potencia promedio de radiación, (módulo del Vector de Poynting)  $[W/m^2]$

La intensidad de radiación se relaciona con el campo eléctrico en zona lejana de una antena mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= r^2 \cdot S_{rad}(r, \theta, \phi) = r^2 \left\| \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{E}_{zL} \times \mathbf{H}_{zL}^*) \right\|^2 = r^2 \cdot \frac{\|\mathbf{E}_{zL}(r, \theta, \phi)\|^2}{2 \cdot Z_c} \\ &= \frac{r^2}{2 \cdot Z_c} \cdot \left\| V_o \cdot e^{j \cdot \psi_a} \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r}}{r} \cdot \mathbf{F}(\theta, \phi) \right\|^2 = \frac{V_o^2}{2 \cdot Z_c} \cdot [\|\mathbf{F}(\theta, \phi)\|^2] \end{aligned}$$

$$U(\theta, \phi) = \frac{V_o^2}{2.Z_c} \cdot \left[ \|F_\theta(\theta, \phi)\|^2 + \|F_\phi(\theta, \phi)\|^2 \right] \quad (1.52)$$

donde  $Z_c$  es la impedancia intrínseca del medio. De la ecuación (1.52) se muestra que la intensidad de radiación está relacionada con el diagrama de radiación de la antena.

### 1.3.3. Directividad

La directividad es un parámetro muy ligado al diagrama de radiación de una antena  $F(\theta, \phi)$ , que se utiliza con la finalidad de medir las tendencias de éste último, así como también, los parámetros visualizados en la Figura. 1.7.

La directividad de una antena de acuerdo [1] en una dirección dada se define como “la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada de la antena a la intensidad de radiación promedio sobre todas las direcciones del espacio”. La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada por la antena dividida entre  $4\pi$  (que sería el caso del módulo del vector de Poynting de una radiador isotrópico). En otras palabras, es la relación de la densidad potencia radiada en una dirección  $(\theta, \phi)$  a una distancia dada a la densidad de potencia que radiaría en esa misma dirección una antena isotrópica. De acuerdo a [2], “es una medida de cómo se concentra la potencia radiada en las distintas regiones del espacio”. La directividad se determina como:

$$D_i(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_i} = \frac{r^2 \cdot S_{rad}(r, \theta, \phi)}{r^2 \cdot S_i(r, \theta, \phi)} = \frac{S_{rad}(r, \theta, \phi)}{S_i(r, \theta, \phi)} \Big|_{P_r=P_i} \quad (1.53)$$

$$D_i(\theta, \phi) = \frac{P_{ri}}{P_r} \Big|_{S_i=S_r(r, \theta, \phi)} \quad (1.54)$$

donde  $U_i$  es la intensidad de radiación para una antena isotrópica. De acuerdo a la Ref.[2] la ecuación (1.53) es la directividad de una antena con respecto a la del isotrópico y se obtiene al comparar en el punto  $(r, \theta, \phi)$  de zona lejana, la magnitud del vector densidad de potencia de la antena bajo prueba ( $S_{rad}$ ) con respecto a la magnitud del vector densidad de potencia del radiador isotrópico omnidireccional ( $S_i$ ), con la condición de que la potencia radiada por ambas fuentes sean iguales, es decir,  $P_{rad} = P_i$ . Igualmente se plantea utilizando la ecuación (1.54) que la directividad de una antena bajo prueba se puede obtener relacionando la potencia radiada por una antena isotrópica ( $P_{ri}$ ) a la potencia radiada por la antena bajo prueba ( $P_r$ ), con la condición de que en cada punto del espacio la magnitud de los vectores de Poynting de ambas antenas sean iguales.

Si no se especifica una dirección, ésta implica la dirección de máxima intensidad de radiación (máxima directividad) expresada como:

$$D_{Máx} = D_o = \frac{U|_{Máx}}{U_i} = \frac{S_{rad}(r, \theta_0, \phi_0)|_{Máx}}{S_i(r, \theta, \phi)} = \frac{4\pi}{\iint \|\mathbf{F}(\theta, \phi)\|^2 d\Omega} \quad (1.55)$$

donde  $d\Omega$  es el diferencial de ángulo sólido,  $d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta d\phi$

### 1.3 Medición del Diagrama de Radiación.

---

*Haz de ángulo sólido*  $\Omega_A$ : se define como el ángulo sólido a través del cual toda la potencia de la antena podría fluir si su intensidad de radiación es constante (e igual a máximo valor de  $U$ ) para todos los ángulos dentro de  $\Omega_A$ .

#### 1.3.4. Determinación aproximada de la Directividad de una antena.

La directividad de una antena puede calcularse aproximadamente sin utilizar la ecuación (1.55). Esto es posible para antenas altamente directivas (apertura de haz reducida) y amplitud de lóbulos secundarios despreciables, de tal modo que el haz del ángulo sólido es aproximadamente igual al producto de la apertura de haz en los puntos de media potencia en dos planos perpendiculares del diagrama de radiación[10]. Por lo tanto la ecuación (1.55) se puede aproximar de la siguiente manera [10]:

$$D_o = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_{HP} \cdot \phi_{HP}} \approx \frac{41000}{\theta_{HP}^o \cdot \phi_{HP}^o} \quad (1.56)$$

donde  $\theta_{HP}$  es el ancho de media potencia en el plano  $\theta$ , en radianes.

$\phi_{HP}$  es el ancho de media potencia en el plano  $\phi$ , en radianes.

$\theta_{HP}^o$  es el ancho de media potencia en el plano  $\theta$ , en grados.

$\phi_{HP}^o$  es el ancho de media potencia en el plano  $\phi$ , en grados.

en decibelios la directividad máxima será:

$$D_{o\ dB} = 10 \cdot \log_{10}(D_o) \quad [dB_i] \quad (1.57)$$

#### 1.3.5. Eficiencia de Radiación de una antena.

La eficiencia o rendimiento de radiación de una antena de acuerdo a [4] toma en cuenta las pérdidas por reflexión, conducción y dieléctricos en la misma. Las pérdidas por conducción y dieléctricos de la antena son muy complicadas de calcular y en la mayoría de las veces ellos son medidos. A pesar de realizar mediciones, estas pérdidas son difíciles de separar y ellas son usualmente agrupadas y colocadas de forma de la eficiencia de la antena. En la ecuación (1.1) se mostró que la resistencia de entrada contiene a una resistencia denominada  $R_L$ , esta resistencia es usada para representar las pérdidas por conducción y dieléctricos en la misma.

La eficiencia de radiación  $\eta$  se define como la razón de la potencia entregada a la resistencia de radiación  $R_r$  ( $P_r$ ) a la potencia entregada a la resistencia de entrada de la antena ( $P_e$ ).

$$\eta = \frac{P_r}{P_e} \quad (1.58)$$

donde  $P_e = P_r + P_p$ , siendo  $P_p$  la potencia de pérdidas en la antena.