

Un monopolo es un radiador cilíndrico, perpendicular al suelo, de altura física H_0 y radio “ a ” situado inmediatamente encima del suelo o conectado a él, que apoyándose en la teoría de las imágenes, actúa como un dipolo equivalente de longitud total, el doble de la altura del monopolo como indica la figura 1-

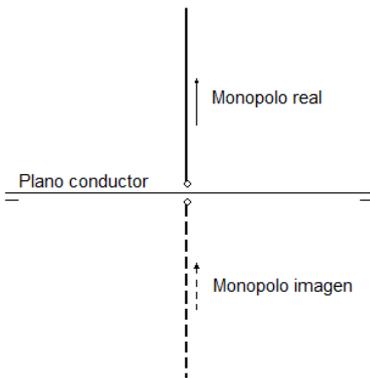


Fig. 1

La teoría de imágenes, dice que la presencia del suelo, ocasiona la aparición de otro radiador virtual, imagen del real, que hace al conjunto de los dos radiadores, comportarse como un dipolo vertical aislado y cuya longitud es el doble de la del radiador real, con la diferencia de que la radiación sólo se produce en la parte real o superior de dicho dipolo.

En general, la alimentación del monopolo se realiza entre su extremo inferior (base) y el suelo, como indica la figura, aunque existen otros métodos de alimentación como la alimentación en paralelo o en el tope que no contemplaremos en este libro..

En este punto, debemos asignar al suelo al que nos referimos, un carácter eléctrico, considerándolo un plano perfectamente conductor, infinitamente delgado y de superficie infinita, obviando su carácter físico verdadero que estudiaremos posteriormente

El radiador físico sobre un plano de tierra, recibe el nombre de “monopolo”, en alusión a que es la mitad del “dipolo” equivalente, al considerar la imagen del mismo.

En un monopolo distinguiremos tres partes: la base, el radiador y el tope (extremo superior), como se ve en la figura 2

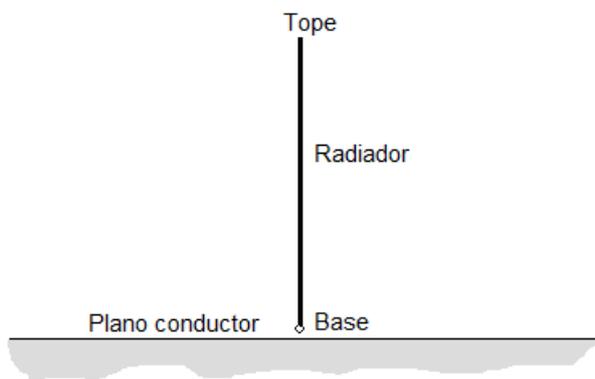


Fig. 2

En este punto, y habiendo descrito sucintamente la naturaleza de este tipo de radiador, vamos a proceder a su análisis en los siguientes capítulos.

3.2 Longitudes del monopolo

Al estudiar las características de un radiador vertical, uno de los parámetros más importantes a considerar es su longitud, la cual se contempla bajo los siguientes puntos de vista.

Su longitud física, su longitud eléctrica, su longitud angular y su relación con la longitud de onda de la frecuencia de funcionamiento. Vamos a ver cuales son estos conceptos.

3.2.1 Longitud física.-

Poca explicación requiere este concepto ya que se refiere a la medida en cualquiera de las unidades existentes al respecto de su longitud entre sus extremos. En la formulación se representa por “ H_0 ”.

3.2.2 Longitud eléctrica.-

Al alimentar un monopolo o cualquier radiador de carácter lineal, se establece una distribución de cargas eléctricas a lo largo del conductor, en el que la acumulación de las mismas es máxima en su extremo y se produce un alargamiento virtual del radiador a efectos eléctricos, que varía en función de la relación longitud/diámetro ya que la existencia de cargas va más allá de la longitud física del radiador. Este fenómeno se explica gráficamente en la figura 3.3 por lo que hay que distinguir una altura eléctrica teórica que es algo mayor que la física.

Este "alargamiento" del conductor físico, como ya hemos señalado antes, lo determina un factor que depende de la relación longitud/diámetro; así para radiadores de hilo en los que esa relación es grande, ese alargamiento se puede estimar en un 5% de la longitud física y cuando esos radiadores, por cuestiones de resistencia mecánica, consisten en torres en los que la relación altura/diámetro es relativamente pequeña, el radiador eléctrico, puede llegar a ser un 15% más largo que la altura física. De todas maneras, estimar un alargamiento del 5% para hilos y un 10% para torres, es una buena aproximación, aunque en general, se generaliza asumiendo el 5% en todos los casos. La altura eléctrica del monopolo se representa en la formulación, por “ H ”, y así, $H = H_0 \times 1.05$

3.2.3 Longitud angular.-

Es otra forma de representar la longitud eléctrica, considerando que una longitud de onda entera, corresponde con 360° ó 2π radianes.

Así, por ejemplo, a una longitud de $\frac{1}{4}$ de onda, corresponden 90° ó $\pi/2$ radianes; a $\frac{1}{2}$ de onda, corresponden 180° ó π radianes.

A cualquier otra longitud intermedia, la longitud del radiador expresada con un ángulo, viene determinada por:

$H = \beta H_0$ radianes, siendo $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ el ángulo en radianes que corresponde a una unidad de longitud de onda (H y λ , expresados en las mismas unidades, normalmente, en metros).

Cuando expresamos H en grados sexagesimales, $\beta = \frac{360}{\lambda}$ que son los grados que mide cada unidad de longitud de onda.

Veamos un ejemplo, para mayor claridad de lo expuesto:

Disponemos un hilo vertical de 10 metros de longitud física y 3 m/m de diámetro, para funcionar en 3 MHz

Veamos sus longitudes.

Su longitud física, $H_0 = 10 \text{ mts}$

Su longitud eléctrica, $H = H_0 \times 1.05 = 10.5 \text{ mts}$

La longitud de onda, $\lambda = \frac{300}{3\text{MHz}} = 100 \text{ mts}$

Su relación con λ , es

Física = $\frac{H_0}{\lambda} = \frac{10}{100} = 0.1\lambda$

Eléctrica = $\frac{H}{\lambda} = \frac{10.5}{100} = 0.105\lambda$

La longitud angular

Llamando

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{100} = 0'0628 \text{ rad/metro}$$

ó

$$\beta = \frac{360}{\lambda} = \frac{360}{100} = 3'6 \text{ grados/metro}$$

La longitud angular del radiador será

$$\beta H = 0'0628 \times 10'5 = 0'66 \text{ radianes}$$

ó

$$\beta H = 3'6 \times 10'5 = 37'8 \text{ grados.}$$

El operador β denominado constante de fase o de onda, se representa también por el símbolo k .

3.3 Impedancia característica.-

La impedancia característica en una antena, considerada como una línea de transmisión abierta es una característica importante en la formulación.

Teóricamente, se define como la relación entre el voltaje y la intensidad en cualquier punto de una línea de transmisión de conductores paralelos, abierta y de longitud infinita.

Ya veremos más adelante, que considerar a una antena, ya sea monopolo o dipolo, como una línea de transmisión abierta, es una de las opciones utilizadas para determinar las características de una antena.

No deseamos entrar en profundas consideraciones sobre este concepto. Nos basta conocer dos aspectos del mismo.

Una línea de transmisión de conductores paralelos, abierta en su extremo, prácticamente no radia mientras que la antena, resultado de separar los conductores, abriéndolos, sí radia

Así mismo, la impedancia característica de una antena, difiere de la de una línea de transmisión en que la teoría trata a la línea, como uniforme, considerando que sus parámetros L, C y Z_0 son constantes mientras que en la antena, esos parámetros varían a lo largo de la misma, desde el punto de alimentación hasta su extremo lejano, ya que es función de la capacidad estática del conductor que a su vez, varía con la posición de cada punto de uno de los conductores. Debido a esto, siempre se trata el valor medio de este parámetro.

La impedancia característica es función de la relación de la altura o longitud física y el radio del conductor.

Se mide en ohmios por unidad de longitud y se representa por el signo " Z_0 "

De aquí, y en función de sus dimensiones físicas,

$$Z_0 = 60 \left[\ln \left(\frac{2H_0}{a} \right) - 1 \right] \Omega$$

Recordemos que H_0 es la altura física y " a " es el radio del conductor (cilíndrico) en las mismas unidades que H_0 .

3.5 Altura efectiva.-

Otro parámetro importante utilizado en la formulación, es la altura efectiva del radiador, " H_e "

Cuando se estudia la radiación de una antena en transmisión, se considera el campo generado por un dipolo elemental, o elemento de corriente en el que por la pequeña dimensión del dipolo (tiende a cero), la distribución de la corriente es de un valor constante. Un radiador físico consta de una gran cantidad de dipolos elementales, conectados en serie.

La altura efectiva de un radiador es aquella en la que añadiendo los elementos adecuados al radiador, se consigue una distribución de corriente constante a lo largo del mismo como si se tratara de un dipolo elemental, radiando la misma potencia que radiaría el radiador real con toda su longitud y distribución de corriente senoidal.

De esta manera podremos aplicar la formulación de un dipolo elemental dado que dicha formulación contempla la distribución de corriente, siempre constante, a un radiador normal, si consideramos su altura efectiva en vez de su altura actual

Se explica gráficamente en la figura 3

En ella, tratamos de representar, que la altura H_e del radiador b) es la altura efectiva del radiador a) de altura H , si los dos radiadores radian la misma potencia

La distribución constante de la corriente en el radiador b) la hemos conseguido en este caso añadiendo la capacidad adecuada proporcionada por la esfera del tope del monopolo b).

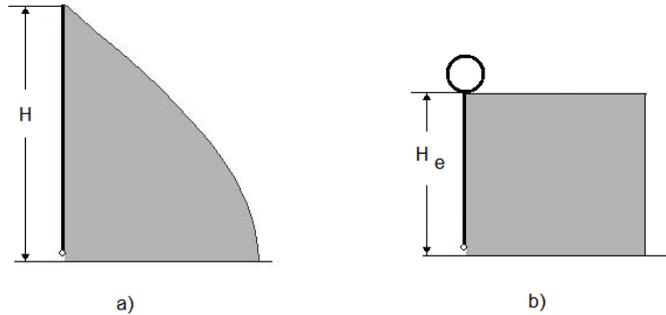


Fig. 3

La altura efectiva de un monopolo en transmisión, se determina por

$$H_e = \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta H}{2}}{\beta}$$

Cuando el radiador es muy corto, se puede considerar que la altura efectiva es la mitad de H .

Un monopolo con una altura de $\lambda/4$ (patrón), tiene una

$$H_e = \frac{\lambda}{2\pi} \approx 0.16\lambda$$

En monopolos cortos, cargados en el tope, la carga equivale eléctricamente a un porción de radiador virtual que alarga al radiador físico de altura H , una longitud H' y entonces, la altura efectiva se calcula por:

$$H_e = \frac{\cos(\beta H') - \cos[\beta(H + H')]}{\beta \times \operatorname{sen}[\beta(H + H')]}$$

3.6 Resistencia de radiación.-

Este es un parámetro que viene determinado por la capacidad que tiene la antena de disipar la energía que recibe del generador convirtiéndola en energía electromagnética, radiándola al espacio.

Su valor en ohmios es el equivalente al de una resistencia “física “ que disipara la misma energía que radia la antena cuando por las dos, circulara una corriente de igual intensidad.

Matemáticamente, es el factor que al multiplicar a la intensidad presente en un punto del radiador y que determina la potencia radiada en el campo lejano por ella, adquiere, la dimensión de una resistencia.

En este estudio, se determina que la potencia radiada por un dipolo elemental (en el que la longitud y el radio tienden a cero y la corriente es constante), viene dada por

$$P = I^2 \times 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \text{ siendo } I \text{ el valor eficaz de la corriente elemental.}$$

Recordando la Ley de Ohm, sabemos que $P = R \times I^2$ por lo que el factor $\left[80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2\right]$ adquiere la dimensión de una resistencia ya que multiplica a I^2 y se denomina "resistencia de radiación". Como se ve, no es un concepto físico, si no matemático.

En el radiador real, este valor puede estar referido normalmente, o bien al punto en el que existe en la antena, un valor máximo o "vientre" de corriente, o al punto de alimentación, donde este valor se convierte en la "resistencia de entrada" y es la componente activa del valor complejo de la impedancia de entrada.

La resistencia de radiación depende principalmente de la longitud del radiador y de la frecuencia de trabajo.

Desde la fórmula general podemos determinar que para un monopolo normal que tenga una distribución de corriente constante y eso ocurre cuando contemplamos la altura eficaz del monopolo, la resistencia de radiación es:

$$R_r = 160\pi^2 \left(\frac{H_e}{\lambda}\right)^2 \Omega$$

Ahora bien. En un radiador corto $\leq 0.1\lambda$, hemos visto que la distribución de la corriente es lineal y el área que encierra es triangular que será la mitad de la encerrada si la corriente fuese constante. Eso significa que la potencia radiada sería la cuarta parte del radiador normal

La altura eficaz es la mitad de la altura física y así

$$R_r = 160\pi^2 \left(\frac{H}{2\lambda}\right)^2 = 40\pi^2 \left(\frac{H}{\lambda}\right)^2$$

Esta resistencia corresponde al punto de alimentación del monopolo y es la parte resistiva de la impedancia de entrada.

Esta fórmula es válida para longitudes en las que se considere que la distribución de corriente es lineal, como vimos en la figura 3.5. Eso significa que hemos admitido un porcentaje de desviación de los valores reales, para simplificar cálculos. Si convenimos que el margen de error puede alcanzar hasta el 2%, podemos considerar que la distribución de la corriente en un radiador de altura igual a 31.3° es lineal. Prácticamente, se puede redondear hasta $36^\circ = 0.1\lambda$. Otros autores son más "permisivos" y consideran que la distribución de la corriente es lineal hasta longitudes de $45^\circ = 0.125\lambda$. Eso significa una tolerancia de casi el 5%

Existen otros métodos más generales para calcular la resistencia de radiación pero el razonamiento es algo complicado por lo que lo obviaremos.

3.9 Ganancia.-

Denominamos "ganancia" (en general) de una antena, a su facultad de concentrar su radiación hacia determinados sectores de su espacio circundante.

Este concepto se entiende mejor con el siguiente ejemplo:

Una antena radia una potencia P_r y en un punto P situado en el campo lejano, se mide un campo eléctrico E.

Si en el lugar de la antena, situamos un radiador isotrópico, éste tendrá que radiar una potencia $P_{r_{iso}}$ para conseguir el mismo campo en P.

La ganancia de la antena será la relación $P_r/P_{r_{iso}}$.

Existen varias denominaciones de la ganancia, en función de determinados conceptos que ahora analizamos.

La *ganancia directiva*, **gd**, es la ganancia observada en una dirección determinada.

La *directividad* es la ganancia directiva cuando esa dirección es la de máxima radiación por lo que también se define como *ganancia directiva máxima* **gd(máx.)** ó **D**

Ganancia en potencia. Con los mismos conceptos expuestos, pero considerando la potencia suministrada a la antena en lugar de la radiada, términos que son diferentes al tener en cuenta la potencia de pérdidas en la antena

La ganancia de una antena en cualquiera de sus expresiones, se pueden expresar tanto en unidades absolutas, como logarítmicas (en decibelios) y además, referida a la potencia radiada por un patrón.

Recordemos que los decibelios respecto a la relación de potencias valen:

$$n^{\circ} \text{ dB} = 10 \log G$$

siendo G la ganancia de la antena, en unidades absolutas.

En el lenguaje común, la ganancia en dB es la que se emplea normalmente para referirse a la ganancia de una antena.

El patrón por excelencia es el radiador isotrópico con ganancia absoluta igual a la unidad.

Existen otras referencias “secundarias” tales como el dipolo de media onda y el monopolo de 1/4 de onda que sirven como patrones para otras antenas de su misma geometría.

Cuando estudiamos un dipolo, aunque podemos referirnos al radiador isotrópico como patrón para definir su ganancia, lo hacemos normalmente referida al dipolo de media onda, y en unidades logarítmicas, nombraríamos la ganancia como dBd.

La ganancia de un monopolo, aunque se puede comparar con el de 1/4 de onda, lo más común es referirse también al dipolo de 1/2 onda como patrón.

Cualquier ganancia en dB, referida al radiador isotrópico se nombra en dBi.

Otros conceptos en los que interviene la ganancia de una antena, son.

PRA (potencia radiada aparente) que es el producto de la potencia radiada (disipada por la resistencia de radiación) por la ganancia de la antena respecto al dipolo de 1/2 onda, en unidades absolutas

PIRE (potencia isotrópica radiada equivalente) que con el mismo concepto que la PRA, se refiere al radiador isotrópico.

Así, como ejemplo, un sistema de antenas que tiene una ganancia de 7 dBd y tiene una potencia de radiación de 3 vatios, tendrá una PRA de:

Convertiremos los dBd en unidades absolutas:

$$\text{Si } 7 = 10 \log G, \quad 0,7 = \log G \text{ y } G = 10^{0,7} = 5,012$$

La PRA, será igual a $3w \times 5,012 = 15$ vatios.

Teniendo en cuenta que el dipolo patrón tiene a su vez una ganancia de 2,15 dBi, hallaríamos la PIRE repitiendo los cálculos para una ganancia de $7+2,15=9,15$ dBi lo que equivale a 24,67 vatios.

La Administración española, suele fijar la máxima PRA o PIRE, cuando otorga licencia para la instalación de una Estación de Radio por lo que habrá que calcular una u otra, en función de la referencia de la Administración.

La tabla siguiente resume las ganancias de los diferentes radiadores considerados “patrones”.

Radiador	Ganancia absoluta	dBi	dBd	
Isotrópico	1	0	----	
Elemental	1,5	1,76	----	
Dipolo 1/2 onda	1,643	2,15	0	

La ganancia directiva máxima o directividad de cualquier antena se puede determinar fácilmente si se conocen su resistencia de radiación y su altura o longitud efectivas, ya que los tres conceptos están relacionados por:

$$D = \frac{120\pi^2}{R_{\text{radiación}}} \left(\frac{H_e}{\lambda} \right)^2$$

3.10 Diagrama de radiación.-

Hemos dicho que cualquier radiador no isotrópico, no radia por igual en el espacio que le rodea por lo que es preciso determinar cuál es su forma de radiar. Para ello, deberemos dibujar su “diagrama de radiación” determinando para cada punto en el espacio y a la distancia requerida por el estudio, cuál es la intensidad de campo producida por la potencia radiada. Si el punto está suficientemente alejado del radiador, podemos asumir que dicho campo forma un frente de onda plano y paralelo al radiador.

Dado que este tema es bastante extenso y en este libro sólo pretendemos ceñirnos al estudio de monopolos, obviaremos determinadas generalidades y simplificaremos conceptos. Por ello, daremos algunos supuestos por ciertos.

Solamente consideraremos dos planos de radiación en el espacio

Un radiador vertical, radia uniformemente en el plano horizontal (perpendicular a su eje)

La intensidad de radiación en el plano vertical depende del ángulo cenital considerado “ θ ”, de la potencia radiada y de la distancia a P, “ r ”.

En la figura 4 se muestra un esquema de estos conceptos.

El diagrama de radiación en todo el campo lejano, es el mismo, variando únicamente el valor de la intensidad del campo que disminuye, según aumenta “ r ”.

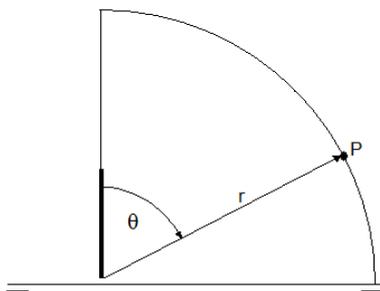


Fig. 4

La fórmula a la cual llamaremos factor de campo $F(\theta)$, que determina el diagrama, varía el valor en función de θ como veremos a continuación.

$$F(\theta) = \left[\frac{\cos(\beta H \cos \theta) - \cos(\beta H)}{\text{sen}(\beta H)} \right]^2$$

Y dando valores a θ cada 5° podemos construir por ejemplo, el diagrama de radiación para un monopolo de 1/4 de onda como indica la figura 5

La intersección del perfil del lóbulo, con la línea de división que marca el valor 0'7 del máximo, indica el valor del ángulo que delimita la parte del “lóbulo aprovechable” (0'7 veces del máximo valor, equivale a la marca de 3 dB) que comprende desde el plano de tierra hasta unos 23° aproximadamente

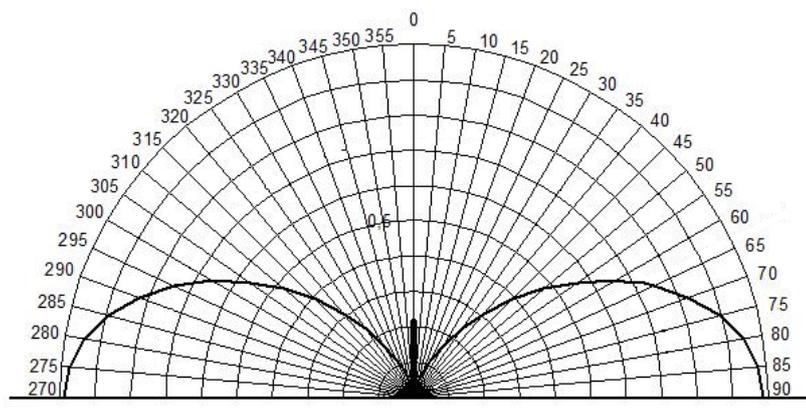


Fig. 5

Podemos mostrar una recreación de esta radiación en forma tridimensional como se ve en la figura 6

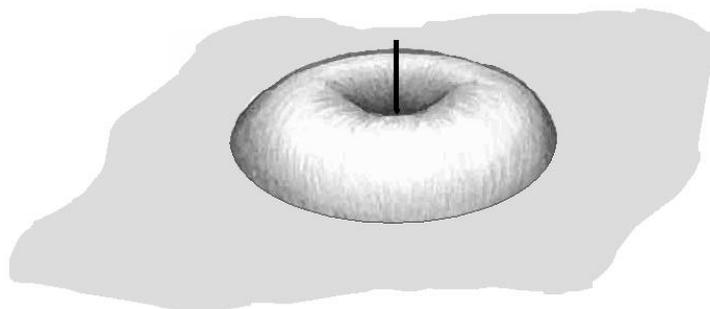


Fig. 6

También, dando valores a H/λ podemos determinar el valor de la ganancia directiva máxima para diversas alturas del radiador.

La ganancia directiva máxima de un radiador en función de su resistencia de radiación en el vientre de corriente y su altura o longitud eléctrica H es, en el supuesto de que la potencia radiada sea 1 vatio y medida la intensidad de campo a una distancia unidad,

$$G_{d\text{máx}} = \frac{120}{R_{rv}} [1 - \cos(\beta H)]^2$$

Esta fórmula es válida también para el dipolo

Se puede construir una tabla como la figura 3.14 en la que se muestran los valores de la $G_{d\text{máx}}$ para monopolos de diferentes alturas relacionadas con la longitud de onda (H/λ)

La gráfica de la figura 7 se ha construido con los valores obtenidos en la tabla

H/λ	R_{rv}	D	H/λ	R_{rv}	D	H/λ	R_{rv}	D
0,025	0,25	0,07	0,35	77,83	3,89	0,675	44,56	5,69
0,05	1,00	0,29	0,375	87,38	4,00	0,7	43,71	4,70
0,075	2,25	0,63	0,4	95,11	4,13	0,725	46,45	3,45
0,1	4,00	1,09	0,425	100,39	4,27	0,75	52,70	2,28
0,125	6,25	1,65	0,45	102,76	4,45	0,775	62,06	1,38
0,15	10,13	2,01	0,475	102,03	4,65	0,8	73,80	0,78
0,175	15,31	2,34	0,5	98,28	4,88	0,825	86,94	0,41
0,2	21,33	2,69	0,525	91,89	5,16	0,85	100,34	0,20
0,225	28,04	3,05	0,55	83,51	5,47	0,875	112,80	0,09
0,25	36,50	3,29	0,575	74,00	5,80	0,9	123,20	0,04

0,275	45,76	3,51	0,6	64,34	6,10	0,925	130,57	0,01
0,3	56,28	3,65	0,625	55,58	6,29	0,95	134,24	0,00
0,325	67,20	3,77	0,65	48,71	6,21	0,975	133,86	0,00
						1	129,47	0,00

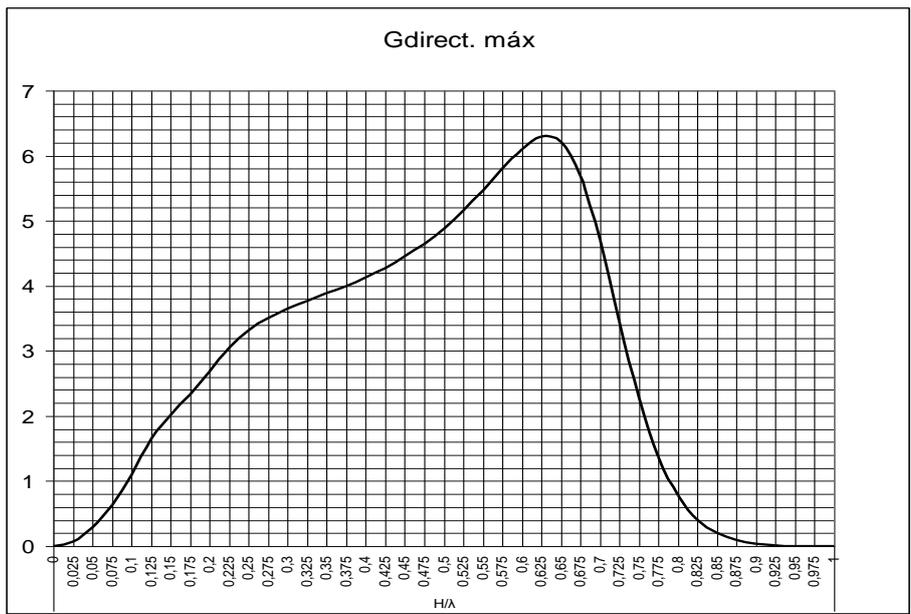


Fig. 7

Podemos observar que la altura con mayor ganancia, es la de $0,625 \lambda$ con un valor de $6,29$ y que corresponde a $5/8$ de λ .

A partir de este valor la directividad disminuye debido a la aparición de lóbulos secundarios que le restan potencia al principal, al mismo tiempo que éste se eleva del plano de tierra donde está situado el punto de observación que determina la directividad en el eje 90-270.

En la figura 8 se muestra el diagrama de la directividad de un monopolo de $H=1\lambda$ en el que la D vale cero porque en el plano/eje 90°/270 no existe radiación ya que el lóbulo se ha elevado 32° sobre el plano

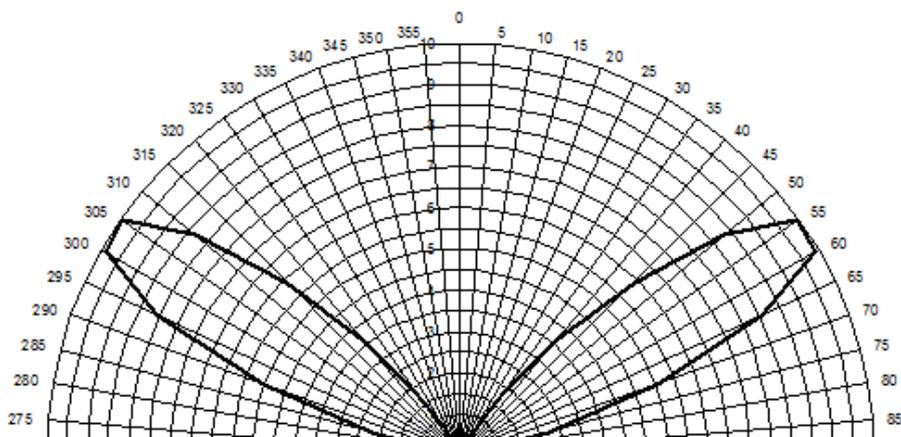


Fig. 8

EA5ND (ex EA5BWL)