

E S T U D I O Y E X P E R I M E N T A C I O N

C O N A N T E N A S E N E L R A N G O

D E U . H . F .

Tesis previa a la obtención del título
de Ingeniero en la especialización de
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Escuela Politécnica Nacional.

MARCO A. BARRAGAN B.

QUITO

Diciembre de 1972

Certifico que este trabajo ha
sido realizado en su totalidad
por el Sr. Marco A. Barragán B.

A handwritten signature in blue ink that reads "Kanti Hore". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Dr. Kanti Hore
CONSULTOR DE TESIS

Quito, Diciembre de 1972

A LA MEMORIA DE MI MADRE.
A MI PADRE Y A MIS HERMA-
NAS INES Y PILAR.

P R O L O G O

La culminación de este trabajo ha sido posible, no solamente debido a un esfuerzo personal, sino también gracias al empuje que he recibido siempre de mi familia, así como de mis compañeros del Departamento de Electrónica, quienes a más de su sincera camaradería, ayudaron a despejar mis dudas sin la menor sombra de egoísmo.

A todos ellos mi eterna gratitud, en especial al Dr. Kanti Hore, mi Consultor de Tesis, a la Escuela Politécnica Nacional, en cuyo centro he adquirido la formación necesaria para desempeñarme en el futuro como un buen profesional y a mi hermana Inés.

Marco A. Barragán Bedoya

Quito, Diciembre de 1972

I N D I C E G E N E R A L

	Página
PROLOGO	IV
I.- <u>Capítulo Primero.</u> - Introducción	1
II.- <u>Capítulo Segundo.</u> - Teoría	7
2.1 Consideraciones Generales	8
2.2 Estudio del Dipolo	10
2.2.1 La Antena Elemental	10
2.2.2 El Dipolo	19
2.2.3 El Dipolo Doblado	23
2.3 Sistemas de dipolos con 3 elementos o más. Forma de alimentación.	26
III.- <u>Capítulo Tercero.</u> - Diseño de un dipolo doblado y de un sistema Yagi de cuatro elementos	35
3.1 Consideraciones Generales	36
3.2 Diseño de un Dipolo Doblado	37
3.3 Discusión de los resultados ex-	

	perimentales obtenidos en el diseño del dipolo	44
3.4	Diseño de un sistema Yagi de cuatro elementos	47
3.4.1	Justificación del diseño en ba- se a experimentación	47
3.4.2	Datos	48
3.4.3	Objetivo	49
3.4.4	Procedimiento a seguirse	51
3.4.5	Primera aproximación del diseño	53
3.4.6	Segunda aproximación del diseño	59
3.4.7	Tercera aproximación del diseño	62
3.4.8	El diseño definitivo	65
3.4.9	Discusión de los resultados ob- tenidos en el diseño del siste- ma Yagi	68
IV.-	<u>Capítulo Cuarto.</u> - Medición de los lóbu- los horizontales de radiación de la ante na Yagi diseñada.	75
4.1	Consideraciones generales	76
4.2	Métodos de medición	77
4.3	Condiciones que se deben cumplir	

	en la medida de características de radiación.	80
4.4	Disposición experimental	82
4.5	Resultados experimentales	85
4.6	Discusión de los resultados ob- tenidos en la medición de los lóbulos de radiación	87
V.-	BIBLIOGRAFIA	90

I N D I C E D E T A B L A S

		Página
Tabla 2-1	Característica del elemento radiante	14
Tabla 3-1	Impedancia del arreglo reflector-dipolo en función de d_R para la primera aproximación	53
Tabla 3-2	Impedancia del arreglo dipolo-directores, para la primera aproximación en función de d	56
Tabla 4-1	Característica de radiación horizontal de la Yagi diseñada	85

I N D I C E D E G R A F I C O S

	Página	
Fig. 2-1	Antena elemental.	
	a) Su ubicación con respecto a los sistemas de coordenadas	
	b) Detalle del elemento filamento-rio	11
Fig. 2-2	Lóbulo de radiación como función de θ , de la antena elemental	15
Fig. 2-3	Posición del dipolo y del punto de observación P con respecto al eje z. Distribución de corriente en el dipolo	20
Fig. 2-4	Aproximaciones para cuando el punto P está muy lejano al dipolo	22
Fig. 2-5	a) El dipolo doblado. Corrientes que circulan en cada elemento.	
	b) Corte transversal	25
Fig. 2-6	Arreglo lineal	28
Fig. 2-7	Antena Yagi-Uda	31
Fig. 3-1	Dimensiones definitivas del dipolo doblado	40

Fig. 3-2	Variación de la impedancia del dipolo ($n = 4$) en función de l	44
Fig. 3-3	Resistencia del arreglo reflector-dipolo en función de d_R . Primera aproximación	54
Fig. 3-4	Reactancia del arreglo reflector-dipolo en función de d_R . Primera aproximación	55
Fig. 3-5	Resistencia del arreglo dipolo-directores en función de d . Primera aproximación	57
Fig. 3-6	Reactancia del arreglo dipolo-directores en función de d . Primera aproximación	58
Fig. 3-7	Dimensiones del dipolo doblado con un factor de transformación teórico de 10,9	60
Fig. 3-8	Impedancia del arreglo reflector-dipolo en función de d_R . Segunda aproximación	61
Fig. 3-9	Impedancia del arreglo dipolo-directores en función de d . Segunda aproximación	62

Fig. 3-10	Dimensiones del dipolo doblado con un factor de transformación de impedancia teórico de 5,5	63
Fig. 3-11	Impedancia del arreglo reflector-dipolo en función de d_R . Tercera aproximación	64
Fig. 3-12	Impedancia del arreglo dipolo-directores en función de d . Tercera aproximación	65
Fig. 3-13	Dimensiones del dipolo doblado con un $n = 4,5$ teórico	66
Fig. 3-14	La Yagi definitiva	68
Fig. 4-1	Sistemas de coordenadas para medición de lóbulos. La antena se localiza en el origen	76
Fig. 4-2	Medición de los lóbulos sobre una circunferencia de observación	78
Fig. 4-3	Distancias desde la antena transmisora hasta el centro y el extremo del arreglo bajo prueba	81
Fig. 4-4	Sistema transmisor-receptor para la medición de lóbulos de radiación	84

Fig. 4-5 Característica de radiación horizontal
tal de la Yagi diseñada

86

CAPITULO PRIMERO

INTRODUCCION

En los comienzos de las telecomunicaciones, cuando se hablaba de la propagación de ondas electromagnéticas en el éter, se buscó la manera de lograr transmitir a grandes distancias. El ingenio humano, o la casualidad, hallaron la solución.

De ahí hasta la presente fecha, el papel de la antena es de suma importancia, más cuando hoy en buena parte gracias a ella, el hombre puede comunicarse con el espacio extraterrestre.

A la par con su estudio, se investigó cada vez en frecuencias más altas; así, en el rango de U.H.F., se tiene hoy la transmisión de programas de T.V., radionavegación aeronáutica, etc.

En este rango de frecuencias, se nota la posibilidad de trabajar no solamente con dipolos, sino con arreglos de ellos, pero para incrementar su ganancia existen problemas de defasaje de corrientes, así como de alimentación. Yagi y Uda, introdujeron simultáneamente la idea de evitar estos problemas, estudiando lo que ocurre cuan-

do un elemento metálico sin alimentación propia, se localiza en el campo de inducción de un dipolo.

De ahí surge el ordenamiento denominado Yagi-Uda, - que resuelve los problemas anteriores. Por ello se lo ha usado, especialmente como antena en receptores de televisión.

Su estudio es pues de importancia, y gran parte de lo que se conoce acerca de la Yagi es en base a experimentación. Es decir, analizarla abarca tanto la parte teórica como la experimental, como se hace en el presente trabajo de Tesis, pues enfoca como tema el análisis y diseño de este tipo de antena, a la frecuencia de 800 MHz.

En el título se habla de antenas, en plural, pues hay que considerar que el único elemento con alimentación propia en la Yagi, es un dipolo. Se lo estudia como elemento aislado de otros, para que el tema tratado sea más completo. De todas maneras, estudiarlo no es tratar un tema aparte, sino un complemento, o un punto de partida para el análisis de un arreglo.

Como ya se anotó, mucho del estudio de la Yagi, - por su complejidad, sugiere usar métodos experimentales de diseño, que es lo aplicado en este trabajo.

Cabe agregar que, la discusión de los resultados - experimentales, por la abundancia de ellos, se hace al finalizar cada uno de los tres campos de experimentación en que se incursiona.

En breve descripción, lo que se trata en cada capítulo de la tesis es:

En el segundo, partiendo de la antena elemental, - se estudia al dipolo como constituido por un sinnúmero de ellas, a la vez que se enfocan temas de interés general como ganancia, resistencia de radiación, etc., y poniendo - cierto énfasis en la determinación de diagramas de radiación, pues el cuarto capítulo se refiere a la obtención - práctica de ellos. Luego se estudian en forma breve, arreglos de dipolos, y la Yagi como un caso particular de ellos, consignándose los datos que ha sido posible obtener en la bibliografía incluída al final.

El tercer capítulo trata primero de las condiciones que debe cumplir cualquier diseño de antenas. Luego se obtiene un dipolo doblado de 300 ohmios en base a lo consignado en el capítulo segundo. A continuación se hace la discusión de los resultados obtenidos. Como punto culminante, y partiendo de los datos consignados en la teoría, se diseña una antena Yagi de cuatro elementos, usando un método de aproximaciones; en cada aproximación se sigue un orden determinado con observaciones y medidas previas al trabajo mismo, así como se consignan las mediciones en tablas y gráficos. Luego de obtenido el objetivo, se hace una discusión de los valores medidos.

Las imposiciones para los diseños en el capítulo tres, son con el objeto de poder realizar mediciones de los lóbulos horizontales de radiación de la antena Yagi; ésta es la finalidad del capítulo cuarto. Se tratan los métodos de medición en forma breve, así como las condiciones que deben cumplirse para que dichas mediciones sean correctas. Después, consignando la disposición experimental usada para hacer las medidas, se dan los resultados de ellas, y su discusión.

Por último se agregará, que mucho se ha escrito en lo referente a estos temas, por consiguiente, no se preten de haber hecho nada nuevo, sino más bien haber logrado un trabajo, en lo posible ordenado y claro.

CAPITULO SEGUNDO

TEORIA

2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Si bien en la práctica el diseño de una antena puede parecer simple, ya que los factores más importantes son aparentemente sus dimensiones y estabilidad mecánica, en cambio su estudio teórico es bastante complicado, pues abarca el análisis de los siguientes puntos: frecuencia de trabajo, impedancia de entrada, ganancia máxima y lóbulos, ancho de banda y eficiencia; además, cada uno de estos parámetros puede variar de acuerdo a determinadas condiciones que deba cumplir la antena objeto del estudio.

También hay que tomar en cuenta que, si por el teorema de la reciprocidad, una antena transmisora y una receptora (con las mismas características físicas) tienen iguales tanto su direccionalidad, como su impedancia y longitud efectiva, no tienen igual distribución de corriente de conducción; luego también, en antenas receptoras, es conveniente poner énfasis en lo que se conoce con el nombre de área efectiva de una antena.

Todo este conjunto vendría a constituir una labor -

muy extensa, por lo que se ha seleccionado un t3pico para - su desarrollo, que se considera importante; es el de l3bulos de radiaci3n; ellos dan una idea de lo que es directividad y ganancia, de importancia en Telecomunicaciones para que en general un arreglo radie en toda una regi3n previamente determinada y solamente en ella.

Cuando se estudian los l3bulos de una antena, dichos l3bulos dependen de la cercan3a del elemento con respecto a la superficie de un cuerpo conductor, por ejemplo, de la tierra, pero tomando en cuenta que para la frecuencia escogida (800 MHz.), la onda terrestre se atenúa muy r3pidamente,* las antenas estar3n en la pr3ctica algo separadas de ella (10 veces la longitud de onda es m3s que suficiente), 3sto obvia en cierto modo el estudio de su posici3n relativa (por tanto para fines de medici3n se especifica la posici3n solamente cuando es indispensable).

Otro punto que merece observaci3n es la frecuencia escogida; se debe a las siguientes razones:

- 1.- La utilidad de la antena
- 2.- Hacer posible la construcci3n de los elementos sin -

* Hore, K., Notas de Propagaci3n, 1.970

mayor costo a causa de su tamaño.

3.- Se deben hacer mediciones en el campo de radiación de la antena, y por tanto en distancias que siendo mucho mayores que la longitud de onda (aproximadamente 10λ), en realidad no correspondan a una excesiva longitud física.

4.- Disponibilidad de equipos.

Por último cabe anotar que para la determinación de las ecuaciones de campo remoto, se usa el método del Potencial Vectorial, tomando en cuenta el retardo de tiempo, es decir el tiempo en que el efecto de una excitación en la antena, demora en llegar a determinado punto en el espacio; - merced a este retardo, existe el campo anotado. Si bien la intensidad de campo eléctrico depende además del Potencial Escalar Eléctrico, este último no contribuye sino solamente al campo de inducción, por lo que en adelante no se lo considerará.

2.2 ESTUDIO DEL DIPOLO

2.2.1 LA ANTENA ELEMENTAL

Toda antena, puede considerarse constituida por una

sucesión de pequeños elementos radiantes por los que circula la determinada corriente, es entonces interesante principiar estudiando un elemento conductor infinitesimal de longitud dl , y con un área transversal tan pequeña que permita que su densidad de corriente \vec{J} sea constante en todos los puntos de ella; localizado para facilitar el cálculo, en el centro de un sistema de coordenadas como en la figura 2-1

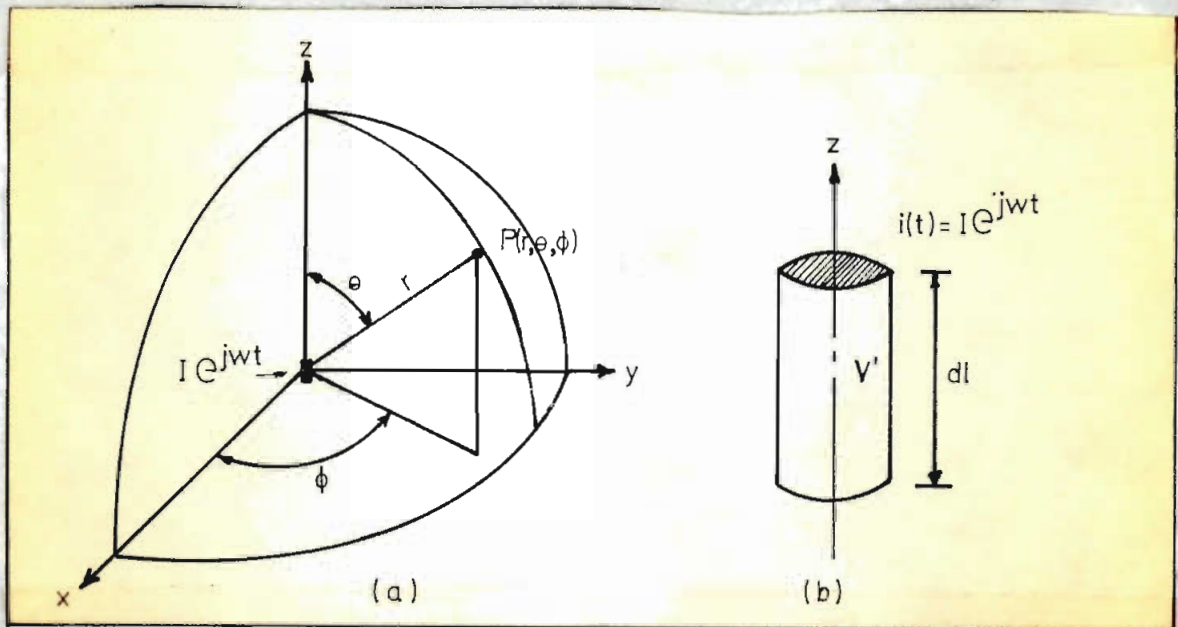


Fig. 2-1

Antena elemental. (a) Su ubicación con respecto a los sistemas de coordenadas. (b) Detalle del elemento filamento.

Se asume que la corriente varía con respecto al tiempo en la forma $e^{j\omega t}$ (pudiendo tomarse luego en la respuesta su parte real o imaginaria), y se considera la fórmula del potencial vectorial:*

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{\vec{J}(\vec{r}', t - \frac{|\vec{r}' - \vec{r}|}{c})}{|\vec{r}' - \vec{r}|} dv' \quad (2-1)$$

En donde:

\vec{A} = potencial vectorial (volt. x seg./m.)

μ_0 = permeabilidad del espacio libre = $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m.)

\vec{J} = densidad de corriente de conducción (A/m²)

c = velocidad de la luz en el espacio libre =
 3×10^8 (m/seg.)

\vec{r}' = distancia del origen de coordenadas a la fuente puntual (m)

\vec{r} = distancia del origen de coordenadas al punto de observación (m)

dv' = elemento de volumen (m³)

Se llega entonces al siguiente resultado:

$$A_z = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r} e^{j\omega(t - \frac{r}{c})} \quad (2-2)$$

* Jordan, E. C. y Balmain, K. G., Electromagnetic Waves - and Radiating Systems, Segunda Edición, Prentice-Hall - Inc., Englewood Cliffs, N.J., Pag. 313.

Usando la relación que indica que el vector densidad de flujo magnético \vec{B} (weber/m²) es igual al rotacional del potencial vectorial, y trabajando en coordenadas esféricas se llega a determinar la componente de radiación de la intensidad de campo magnético H_{ϕ} , dada por la siguiente fórmula:

$$H_{\phi} = \frac{I \cdot dl \cdot \sin \theta}{2 \lambda r} e^{j(\omega t - \beta r + \frac{\pi}{2})} \left(\frac{A}{m} \right) \quad (2-3)$$

$\lambda =$ longitud de onda
 $\beta = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$
 $\omega =$ velocidad angular (rad./seg.)

Todas las demás componentes valen cero.

Seguidamente, usando las ecuaciones de Maxwell, se puede encontrar la intensidad de campo eléctrico E_{θ} (volt/m.):

$$E_{\theta} = \eta \frac{I \cdot dl \cdot \sin \theta}{2 \lambda r} e^{j(\omega t - \beta r + \frac{\pi}{2})} \quad (2-4)$$

Cumpléndose la relación:

$$\frac{E_{\theta}}{H_{\phi}} = \eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2-5)$$

$\epsilon_0 =$ permitividad del espacio libre $= \frac{1}{36 \pi \times 10^9}$ (Fard./m.)

En estas ecuaciones η representa la impedancia del espacio libre que tiene un valor aproximado de 120 π ohmios, igual a 377 ohmios.

Para grafizar la característica de radiación de este elemento, se puede trabajar tanto con la intensidad de campo como con la potencia, pero por razones prácticas (facilidad de las mediciones) se prefiere la primera; es usual también identificar al valor máximo del mismo gráfico con la unidad

Si localizamos al elemento de modo que su eje de simetría sea vertical, entonces se verá que su característica en un plano horizontal es omnidireccional y que en el plano vertical dicha característica variará según varíe θ , como en la tabla (2-1)

TABLA 2-1

CARACTERISTICA DEL ELEMENTO RADIANTE

θ (grados)	sen θ
0	0.000
10	0.174
20	0.342
30	0.500
40	0.643
50	0.765
60	0.866
70	0.940
80	0.985
90	1.000

El lóbulo se encuentra dibujado en la Fig. 2-2 -
extendido hasta 180 grados.

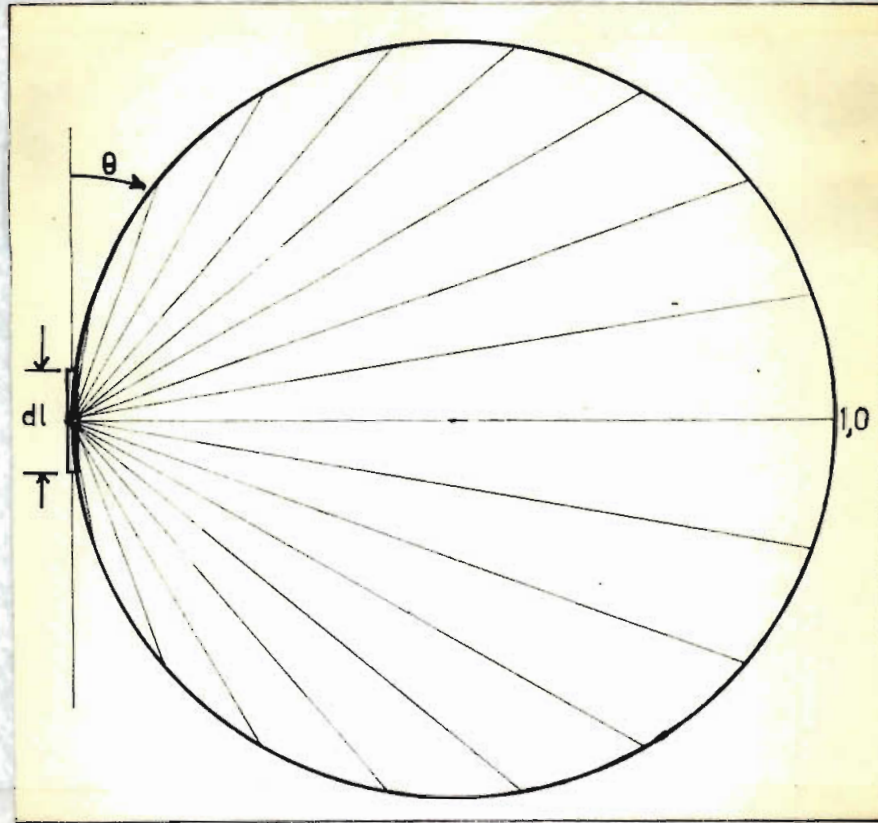


Fig. 2-2

Lóbulo de radiación como función de θ , de la antena elemental.

El siguiente paso constituye el cálculo de la potencia radiada por unidad de superficie. Para el efecto se sabe que la componente radial del vector de Poynting -

viene dada por la fórmula:*

$$S_r = 1/2 \operatorname{Re} [E_\theta(H_\phi \text{ conjug.}) - E_\phi(H_\theta \text{ conjug.})] \text{ (vatios/m}^2\text{)} \quad (2-6)$$

Integrando este valor sobre una superficie cerrada que rodee al elemento que está radiando, por ejemplo, una esfera, se puede obtener la siguiente expresión:

$$P = 395 \left(\frac{dl}{\lambda} \right)^2 I^2 \text{ (vatios)} \quad (2-7)$$

Y puesto que la corriente tiene una variación sinusoidal, entonces:

$$I = \sqrt{2} I_{ef} \quad (2-8)$$

$$\Rightarrow P = 790 \left(\frac{dl}{\lambda} \right)^2 I_{ef}^2 \text{ (vatios)} \quad (2-9)$$

Si se define como la resistencia de radiación a la relación (2-10)

$$R_{rad.} = \frac{P}{I_{ef}^2} \quad (2-10)$$

$$\Rightarrow R_{rad.} = 790 \left(\frac{dl}{\lambda} \right)^2 \text{ (ohmios)} \quad (2-11)$$

Ahora se ha llegado a un punto en donde es posible calcular la ganancia, o la directividad del elemento, o lo que es lo mismo, la capacidad de concentrar (o absorber) la potencia radiada en determinada dirección (en el caso de la ganancia, se refiere a la dirección de máxima radiación).

* Jordan, E. C. y Balmain, K. G., Electromagnetic Waves and Radiating Systems, Segunda Edición, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J. 1968, pág. 172

Si la letra K representa la intensidad de potencia radiada por unidad de ángulo sólido, entonces se define la ganancia (con respecto al radiador isotrópico), como:

$$G_a = \frac{K_{\text{máx}}}{K_{\text{promed.}}} \quad (2-12)$$

$K_{\text{máx}}$ es la densidad en la dirección de máxima radiación, y $K_{\text{promed.}}$, como su nombre lo indica es la densidad de potencia media hallada sobre la superficie de una esfera de radio unidad. Por lo tanto la potencia radiada sería:

$$P = 4\pi K_{\text{promed.}} \quad (2-13)$$

Y por tanto:

$$G_a = \frac{4\pi K_{\text{máx.}}}{P} \quad (2-14)$$

Si se toma en cuenta la potencia que la fuente de alimentación entrega a una antena transmisora, suponiendo que existe una pérdida ohmica en la antena igual a P_o , se puede hablar de una nueva ganancia " G_a' " en función de esta potencia de entrada:

$$G_a' = \frac{4\pi K_{\text{máx.}}}{P + P_o} \quad (2-15)$$

De la relación de las ecuaciones (2-14) y (2-15) - surge la definición de la eficiencia del elemento:

$$\text{Eficiencia} = \frac{G_a'}{G_a} = \frac{P}{P+P_0} \quad (2-16)$$

Un proceso práctico de calcular la ganancia de una antena, en este caso el elemento radiante, es el siguiente: se asume una potencia P por ejemplo 2 vatios, y se halla - la corriente eficaz necesaria para radiar esta potencia; - se calcula la intensidad máxima de campo eléctrico, y de - ella $K_{\text{máx}}$. Como se conoce la fórmula de P en este caso da - da por la ecuación (2-9), se reemplazan los valores halla - dos en la fórmula de G_a . (Ec. (2-14)), y se obtiene un valor numérico; así, la ganancia de la antena elemental es 1,5 - (1,76 d B)[‡] (referida a la antena isotrópica, es decir, la antena omnidireccional sin pérdidas).

Es interesante anotar que cuando se usan corrien - tes efectivas, K viene dada por:[‡]

$$K = r^2 \frac{E^2}{\eta} \quad (\text{vatios / ángulo sólido}) \quad (2-17)$$

‡ Hore, K., Notas de Antenas, 1.970, Pag. 19

‡ Jordan, E. C. y Balmain, K. G., Electromagnetic Waves - and Radiating Systems, Segunda Edición, Prentice-Hall - Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1.968, Pag. 375.

Por último, si se desean hallar las pérdidas óhmicas del elemento considerado, el único problema radica en la determinación de la profundidad de penetración (efecto pelicular).

Estos procesos de determinar los parámetros de una antena son básicos, y por tanto servirán de referencia para el resto del presente capítulo.

2.2.2 EL DIPOLO

✱

Se supone un dipolo de semilongitud L metros, orientado de modo que coincida con un eje "z" de coordenadas, y sus puntos de alimentación aproximada y simétrica en el origen del mismo sistema, como se muestra en la figura 2-3.

✱ Del Pino, E., Notas de Antenas, 1.969

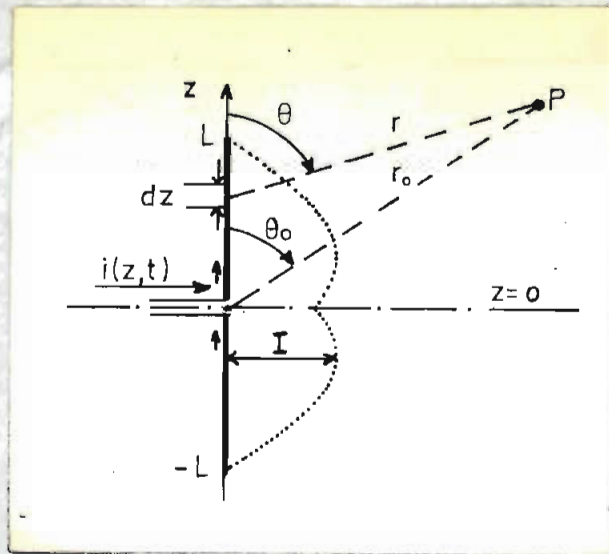


Fig. 2-3

Posición del dipolo y del punto de observación P con respecto al eje z. Distribución de corriente en el dipolo.

Al seguir el procedimiento estudiado para la antena elemental (o de Hertz), el primer problema consiste en determinar la distribución de corriente en el dipolo. - Primero, se asume como antes que su dependencia respecto del tiempo es de la forma $\exp. (j\omega t)$. Queda por determinar su dependencia con respecto al espacio (es decir en este caso, al eje z); este asunto es arduo; sin embargo, considerando a la antena como un caso particular de una línea de transmisión terminada en circuito abierto, se puede asumir^{*} una distribución sinusoidal, debiendo recor

* King, R. W. P., The Theory of Linear Antenas, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts. 1.956, Pag.88

dar que el valor de la corriente debe ser cero en los extremos del dipolo. De esta manera, $i(z,t)$ viene dada por la expresión (2-18)*

$$i(z,t) = I \sin \beta(L-|z|) e^{j\omega t}; |z| \leq L \quad (2-18)$$

En la misma figura 2-3 se ha grafizado un caso de este tipo de distribución de corriente con respecto a z .

Teóricamente, un dipolo es filamentario, y por tanto, considérase como una sucesión de radiadores hertzianos, cada uno contribuyendo con elementos diferenciales de intensidades de campo. Si se suman todas las contribuciones, se determinará el campo total del dipolo en un punto P del espacio.

Se trata del estudio del campo lejano, entonces en este caso θ y θ_0 serían aproximadamente del mismo valor, así como r y r_0 (Fig. 2-3). Sin embargo, para funciones exponenciales, es necesaria una mejor aproximación; se la da en la figura 2-4

* Jordan, E. C. y Balmain, K. G., Electromagnetic Waves and Radiating Systems, Segunda Edición, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1.968, Pag. 327.

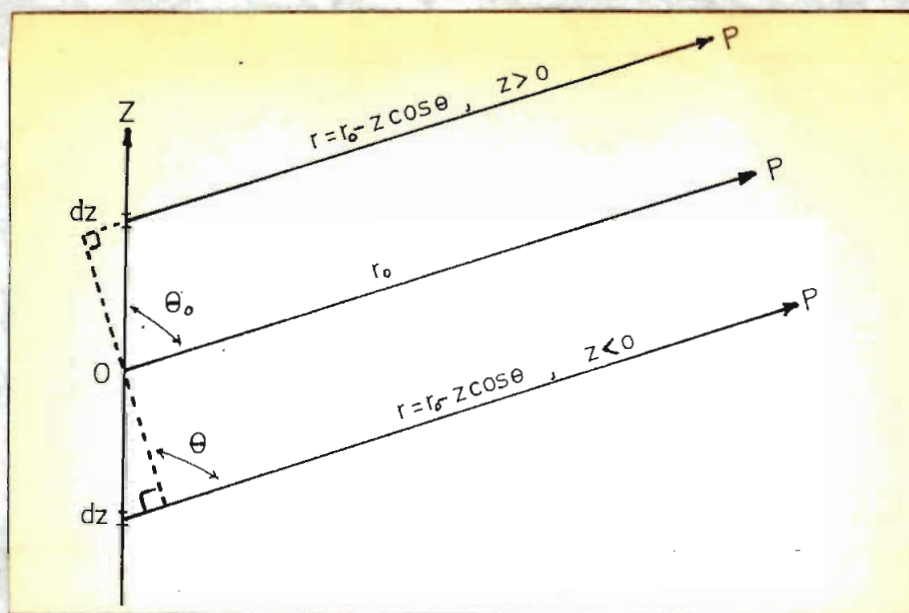


Fig. 2-4

Aproximaciones para cuando el punto P está muy lejano al dipolo.

Como resultado de lo anterior, se obtiene la Intensidad de Campo Eléctrico:

$$E_{\theta} = \frac{60I}{r_0} \left[\frac{\cos(\beta L \cos \theta) - \cos \beta L}{\sin \theta} \right] e^{j(\omega t - \beta r_0 + \pi/2)} \quad (\text{V/m.}) \quad (2-19)$$

La relación (2-5) sirve para determinar H_{ϕ} . Y Si se obtiene con la ecuación (2-6)

La resistencia de radiación en este caso se expresa a base de un integral:

$$R_{rad} = 120 \int_0^{\pi/2} \frac{[\cos(\beta L \cos \theta) - \cos \beta L]^2}{\sin \theta} d\theta \quad (\Omega) \quad (2-20)$$

A partir de la fórmula (2-20) se llega a integra -

les que se encuentran tabuladas.

Por ejemplo, para un dipolo de media longitud de onda ($L = \frac{\lambda}{2}$), su resistencia de radiación vale aproximadamente $72,4 \Omega$.

2.2.3 EL DIPOLO DOBLADO

Un dipolo doblado se forma uniendo en sus finales dos dipolos de sección transversal por lo general circular y localizados paralelamente. Se lo alimenta por medio de una línea de transmisión al centro de un brazo, como en la figura 2-5 (a).

Es usado como transformador elevador de impedancia, cuando se trata de acoplar un dipolo a una línea de mayor impedancia intrínseca que 73Ω .

Asumiendo que la radiación de un dipolo doblado, no difiere mucho de la de un simple dipolo, en el mismo sitio, es posible computar la relación de transformación de impedancia, en el punto en que se alimenta a la antena, si se conoce la relación de corrientes en los elementos -

constitutivos del dipolo doblado (I_1 e I_2 en la figura 2-5-a, con valores RMS de I_1 e I_2 respectivamente).

Supóngase entonces que la resistencia de radiación de un dipolo simple es R_0 ; la potencia total radiada del dipolo doblado sería:

$$P_T = (I_1 + I_2)^2 R_0 \quad (\text{valores}) \quad (2-21)$$

Y si se considera que R_1 es la resistencia equivalente en el punto de alimentación:

$$P_T = I_1^2 R_1 \quad (\text{valores}) \quad (2-22)$$

Igualando las ecuaciones (2-21) y (2-22), se obtiene:

$$\frac{R_1}{R_0} = \left[\left(\frac{I_2}{I_1} \right) + 1 \right]^2 \quad (2-23)$$

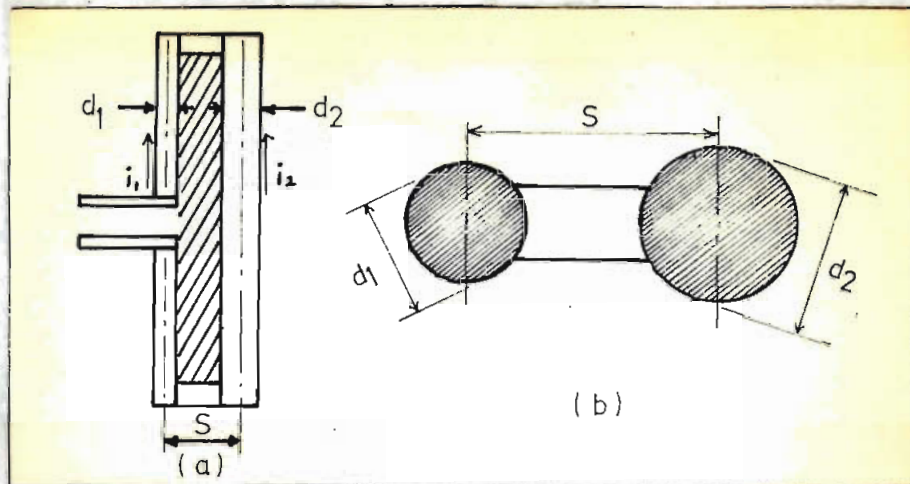


Fig. 2-5

(a) El dipolo doblado. Corrientes que circulan en cada elemento. (b) Corte Transversal.

Físicamente, la relación de transformación depende de d_1 , d_2 y S ; dichas dimensiones deben ser mucho menores que la longitud total del dipolo[†]. Hay que anotar que para la longitud física del dipolo, se considerará el llamado efecto terminal[†]; también se deberá tomar en cuenta el efecto de la velocidad de fase, si es que la parte sombreada de la figura 2-5 (a), está formada por algún material dieléctrico diferente del aire[†].

* Jasik, H., Antenna Engineering Handbook, Primera Edición Mc Graw-Hill, Inc., U.S.A., 1.961, Pag. 3-14

+ Jordan, E. C. y Balmain, K. G., Electromagnetic Waves - and Radiating Systems, Segunda Edición, Prentice-Hall - Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1.968, Pags. 402, 394, 404.

En la mayoría de los casos se usan dipolos resonantes de igual sección, con lo que se logra una impedancia 4 veces mayor que la de un dipolo simple.[‡]

2.3 SISTEMAS DE DIPOLOS CON TRES ELEMENTOS O MAS.

FORMA DE ALIMENTACION.

Un método de que la señal incidente en una antena predomine sobre el ruido que también arriba a ésta, es el de mejorar la relación señal-ruido, haciendo que la antena posea cierta directividad; de manera que como transmisora proyecte la energía hacia una región dada en forma de un haz (en este caso, también ayuda en el problema de la limitada potencia existente para la transmisión)[†], o como receptora intercepte un máximo de energía radiada.

Esto se puede aplicar en dos casos que son: cuando el ruido proviene igualmente de todas las direcciones hacia la antena receptora, o cuando proviene de diferente dirección que la onda cuya energía se desea captar.

[‡] Guertler, R., Impedance Transformation in Folded Dipoles, Proceedings of the I.R.E., Septiembre, 1.950 Pag. 1042.

[†] Jasik, H., Antenna Engineering Handbook, Primera Edición Mc Graw-Hill, Inc., U.S.A., 1.961, Pag. 22-1.

*El método corriente de obtener ganancia directiva es usar un arreglo de antenas, es decir, un ordenamiento de varios elementos radiantes, espaciados y alimentados de manera que las contribuciones de cada uno se sumen en determinada dirección cancelándose en otras.

Tal técnica se hace realizable especialmente en los rangos de VHF y UHF, en los que las dimensiones físicas de dichos arreglos no son ni tan grandes, que la adquisición de los materiales pueda resultar excesivamente costosa, ni tan pequeñas, que los errores de construcción (normales) afecten decisivamente a su funcionamiento.

Hechas estas consideraciones, conviene hablar sobre clases de arreglos.

Como es lógico pensar, desde el punto de vista de su geometría, puede existir un número infinito de clases, según las antenas constitutivas se reúnan formando líneas, rectángulos, círculos y posibles configuraciones de 3 dimensiones.*

* Jasik, H., Antenna Engineering Handbook, Primera Edición Mc Graw-Hill, Inc., U.S.A., 1.961, Pag. 5-2.

Hacer un estudio completo está fuera del alcance - de este trabajo. Por la práctica, se han llegado a determinar ciertas configuraciones que son las más importantes.

Una de éstas se consigue cuando los elementos van paralelos, espaciados a lo largo de una línea recta perpendicular a sus respectivos ejes de simetría[‡] (si van espaciados igualmente, son arreglos lineales (Fig. 2-6)). Y su importancia en el presente trabajo radica en que a la antena Yagi (a tratarse más adelante) se la puede considerar como una aplicación práctica de esta configuración

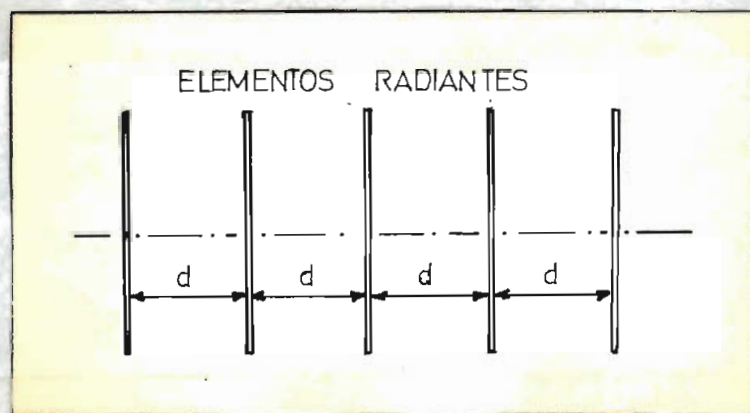


Fig. 2-6
Arreglo lineal

[‡] Jordan, E. C. y Balmain, K. G., *Electromagnetic Waves - and Radiating Systems*, Segunda Edición, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1.968, Pag. 362.

Dentro de los arreglos lineales, puede existir un tipo en el que los elementos se alimentan con corrientes de igual magnitud y teniendo un cambio de fase uniforme y progresivo a lo largo de él. Se lo conoce con el nombre de arreglo lineal uniforme.

Pero en forma más general, puede ocurrir lo siguiente:

A.- Las corrientes individuales son iguales en magnitud y fase. En este caso existe radiación en dos direcciones, en forma perpendicular al plano que determina el arreglo y simétricamente con respecto a éste. A tal tipo se lo llama "Broadside".[‡]

B.- Las corrientes individuales son iguales en magnitud, pero su fase varía en forma progresiva, de manera que se obtiene un arreglo unidireccional; la dirección de máxima radiación está en la línea que constituye el eje del arreglo, y hacia donde va el retardo de fase. Esta configuración toma el nombre de "Endfire".[‡]

[‡] Hore, Kanti, Notas de Antenas, 1.969.

C.- Hasta aquí se ha hecho referencia sobre arreglos - en los que las corrientes individuales son de igual magnitud; pero también se puede obtener características de direccionalidad, haciendo que las amplitudes de dichas corrientes vayan disminuyendo hacia los extremos del arreglo. Entonces se presentan problemas prácticos (por ejemplo, de conexión de numerosas líneas de transmisión en la construcción del ordenamiento[¶]). Una solución consiste en aprovechar el hecho de que la magnitud de la corriente inducida en un elemento sin alimentación propia (elemento parásito), disminuye a medida que éste se aleja de la fuente radiante que produce la inducción.[¶]

Por consiguiente, en tales arreglos se alimenta sólo a un elemento. La antena de este tipo más conocida en la práctica dentro del rango de frecuencias que interesa, es la llamada YAGI-UDA, o simplemente YAGI, cuya forma general es como en la figura 2-7, en la que los elementos van paralelamente dispuestos.

¶ Jasik, H., Antenna Engineering Handbook, Primera Edición, Inc., Mc Graw-Hill, Inc., U.S.A., 1.961 Pag. 5-6

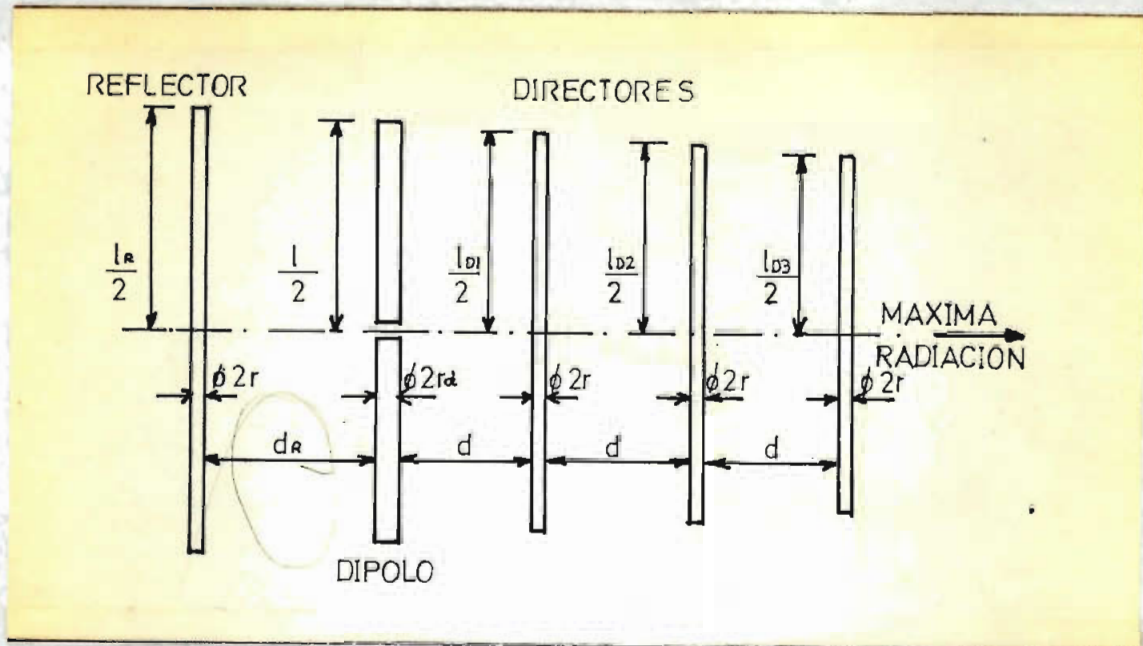


Fig. 2-7
Antena Yagi-Uda

La razón de que al primer elemento se le denomine reflector, es que su efecto radica en producir sólo un lóbulo principal, cuya dirección de máxima radiación es, sobre el eje de la antena y en sentido del reflector hacia los directores. Para el otro sentido, la radiación es casi nula, y disminuye muy poco aumentando otros reflectores, por lo que se usa uno sólo de ellos.

Su longitud se la hace por lo general mayor que la del dipolo (en la práctica es en el orden de un 5 % mayor),

se produce entonces un efecto inductivo, a semejanza con las líneas de transmisión de longitud (en este caso $\frac{l_R}{2}$) ligeramente mayor que $\lambda/4$. La distancia dR (Fig. 2-7) va aproximadamente desde $0,1\lambda$ a $0,45\lambda$; estos límites están fijados, por un lado, debido al muy alto factor de mérito que pueden producir distancias muy cortas, lo que da muchos problemas de acoplamiento; por el otro, la magnitud de la corriente inducida (ésto hace que a distancias mayores el reflector no tenga gran efecto sobre el dipolo, pues se puede decir que estaría en el campo de radiación de éste).

Las longitudes l_R y dR (Fig. 2-7) están relacionadas de manera que producen un determinado factor de máxima relación de radiación adelante-atrás.*

Los elementos que en la Fig. 2-7 van hacia la derecha del dipolo reciben el nombre de directores, debido a que la máxima radiación se produce en el sentido del dipolo, hacia ellos.

* Jasik, H., Antenna Engineering Handbook, Primera Edición, Mc Graw-Hill, Inc., U.S.A., 1.961, Pag. 5-9.

Su longitud es generalmente menor que la del elemento no-parásito (efecto capacitivo); y se usan varios de ellos en razón de que al aumentar su número, aumenta la directividad, aunque, la ganancia que proporciona cada nuevo director, se reduce considerablemente.

Cabe anotar además, que la distancia entre directores contiguos, y entre el dipolo y el primer director, son iguales y con límites iguales a los de dR ; y también que la longitud física de los directores va disminuyendo hacia el fin del arreglo (aproximadamente en un 5 % de la longitud del dipolo cada vez), en razón de que el elemento anterior puede considerarse como el reflector del siguiente.

Los diámetros $2r$ y $2r_d$ (Fig. 2-7) se escogerán de manera que cada dipolo (incluyendo los parásitos), pueda considerarse como un filamento.

Es de anotarse que en vez de un dipolo simple puede usarse uno doblado como el elemento al que va conectada la línea de transmisión, con la finalidad de obtener un mayor ancho de banda, además de poder ajustar la impe-

dancia de la antena para un buen acoplamiento con la línea.

En razón de los muchos parámetros existentes, que en cada filamento serían longitud, espaciamiento, y diámetro del conductor, no se pueden hacer mayores anotaciones, ni existe un estudio general para Yagis de más de tres elementos, por lo que arreglos multielementos de este tipo son invariablemente diseñados en forma empírica^{*}

Siguiendo con el estudio de arreglos de dipolos, también son comunes los arreglos colineales, que son omnidireccionales en planos perpendiculares al eje del ordenamiento.

Por último, considerando a un arreglo como una antena, se pueden hacer arreglos de estas antenas, con lo que se llegaría al caso más general de "arreglos de arreglos", que en la práctica deben cumplir un fin específico, como por ejemplo, un incremento de ganancia.

* Jasik, H., Antena Engineering Handbook, Primera edición
Mc Graw Hill, Inc., U.S.A., 1.961, Pág. 24-17

CAPITULO TERCERO

DISEÑO DE UN DIPOLO DOBLADO Y DE UN SISTEMA
YAGI DE CUATRO ELEMENTOS

3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En el campo de la Electricidad y de la Electrónica, se enfatiza mucho en el estudio de circuitos de acoplamiento entre un generador y una carga, con el objeto de tener máxima transferencia de potencia.

Este concepto es importante especialmente en sistemas de comunicaciones, en donde los niveles de potencia son por lo general bastante bajos; [‡] y es así que las consideraciones de eficiencia en los mismos, viene a ser un asunto de segundo orden.

En verdad, y particularizando hacia lo que tiene interés para el presente trabajo, mucho del estudio de una línea de transmisión por medio de la cual se alimenta a una antena, tiende a asegurar un bajo valor de SWR (Relación de Voltaje de Ondas Estacionarias dado en dB).

Para lograr lo propuesto, cuando se trata de un dipolo, o de una antena Yagi, diseñados para trabajar a -

[‡] Scott, E, Linear Circuits, Part-1, time Domain Analysis, Addison-Wesley World Student Series, Tokyo, Japan, 1960 Pág. 210.

una sola frecuencia, se deben cumplir los siguientes reque
rimientos: *
*

a) El dipolo, o arreglo, debe ser resonante a la fre
cuencia de trabajo. Esto es, presentar en sus terminales
de alimentación, y a esa frecuencia, una impedancia pura-
mente resistiva.

b) Por otro lado, deben presentar, directamente (o -
por medio de un circuito de acoplamiento), una carga ter-
minal, igual en ohmios a la impedancia característica de
la línea de transmisión por la que son alimentados, o a -
la que alimentan. En el último caso, que es el de una an
tena receptora, ella se comporta entonces, como un generador
con una resistencia interna igual a la impedancia in-
trínseca de la misma línea.

Aún más, se puede añadir que todo diseño debe cum
plir como mínimo las dos condiciones anteriores.

3.2 DISEÑO DE UN DIPOLO DOBLADO

* ORR, W I, Beam antenna handbook, segunda edición, Radio
Publications, Inc., Wilton, Conn, 1955. Pág. 87

Con el equipo existente en el Laboratorio de Líneas de Transmisión de la Escuela Politécnica Nacional, se puede obtener un generador que proporcione la frecuencia deseada de 800 MHz., y con una impedancia interna de 300 ohmios, adecuado para alimentar un sistema balanceado, como el dipolo que se trata de diseñar.

Luego, en el mercado es posible obtener línea balanceada de 300 ohmios de impedancia característica, con dieléctrico sólido y flexible. Aunque, a frecuencias suficientemente elevadas, es de esperarse que dicho valor varíe, considerando especialmente el problema de la radiación.

El generador, la línea, y un dipolo como antena, van a constituir el sistema de transmisión que servirá para medir la característica (lóbulos) de radiación de la Yagi.

Como se anotó, surge el problema de acoplamiento con el elemento radiante, pues, teóricamente, la resistencia de radiación de un dipolo resonante simple, es de aproximadamente 73 ohmios. Por ello, se usa la propiedad

de elevación de impedancia de un dipolo doblado.

El nuevo elemento debe tener pues una resistencia de radiación de aproximadamente 300 ohmios, y cumplir la condición restante impuesta para su diseño. Por tanto, - la relación de transformación de impedancias n que debe - cumplir es de:

$$n = \frac{300}{73} = 4,1 \quad (3-1)$$

Por facilidad de construcción, es conveniente, como se anotó al estudiar este tipo de dipolos, aproximar - esta relación a 4, con lo que teóricamente la resistencia de radiación obtenida valdría 292 ohmios.

Esta impedancia, al acoplarse a un sistema de 300 ohmios de impedancia intrínseca, producirá un VSWR (relación de voltaje de ondas estacionarias) menor que 1,05. Valor bastante aceptable, ya que en la realidad, aún los defectos de construcción, o tolerancias de las líneas a - usarse, hacen que sea sumamente difícil obtener valores - tan cercanos a la unidad.

Se puede construir pues, todo el dipolo doblado -

con alambre de igual sección transversal.

En este punto se considera conveniente primero hacer un gráfico del diseño, para luego justificar en debida forma el porqué de cada dimensión. (Fig. 3-1)

Las limitaciones impuestas para escoger la sección del alambre, son:

Por un lado, lograr que la consideración de que la antena es filamentaria, sea en buen grado correcta. Por el otro, tener una estabilidad mecánica adecuada.

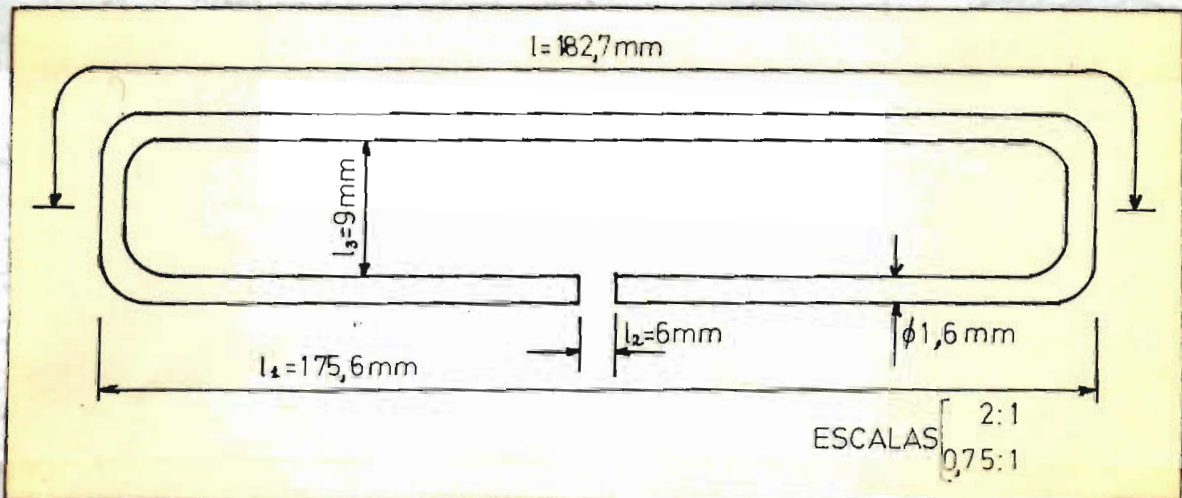


Fig. 3-1

Dimensiones definitivas del dipolo doblado.

Si el alambre tiene un diámetro igual a 1,6 mm. -
(alambre SWG Número 16), y la media longitud de onda -
($\lambda / 2$) es:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m seg}^{-1}}{16,10^8 \text{ seg}^{-1}} = 187,5 \text{ mm. (3-2)}$$

en donde:

c = velocidad de la luz en el aire

f = frecuencia de trabajo (800 MHz)

se puede determinar que el diámetro del alambre corresponde
de a menos de una centésima de $\lambda/2$, y además se ha comprobado
en forma experimental, que el dipolo tiene la sufici
ciente rigidez como para que su estructura no varíe acciden
talmente durante las mediciones.

La longitud l_2 (Fig. 3-1) influye en cierta manera
en las características del dipolo, pues en este intervalo
el comportamiento del campo electromagnético es diferen
te; además, cuando se estudian antenas filamentarias,
se suponen alimentadas desde 2 puntos muy cercanos el uno
del otro. Partiendo de estos dos aspectos, es conveniente
hacer la distancia l_2 lo más pequeña posible; o, más
prácticamente lo más pequeña comparada con la longitud -
del elemento que irradia (caso de la antena transmisora),

y así, aproximarse en lo posible al caso ideal.

Es conveniente, así mismo, considerar lo siguiente: a los extremos de l_2 va conectada una línea de transmisión balanceada.

Partiendo de las razones antes anotadas, se hace l_2 igual a 6 mm. y así la relación l_2 a l_1 equivale aproximadamente a un sesentavo; y, como la distancia entre conductores de la línea balanceada es de 7,4 mm., se tiende a disminuir el efecto de terminación (end-effect), ya que mientras éste hace que la impedancia característica tienda a aumentar, al disminuir el espaciamento entre conductores, la misma impedancia tiende a disminuir según la fórmula*

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{D}{a} \quad (\Omega) \quad (3-3)$$

en donde:

ϵ_r = permitividad relativa del medio que separa a los conductores.

D = distancia entre los conductores (de centro a centro)

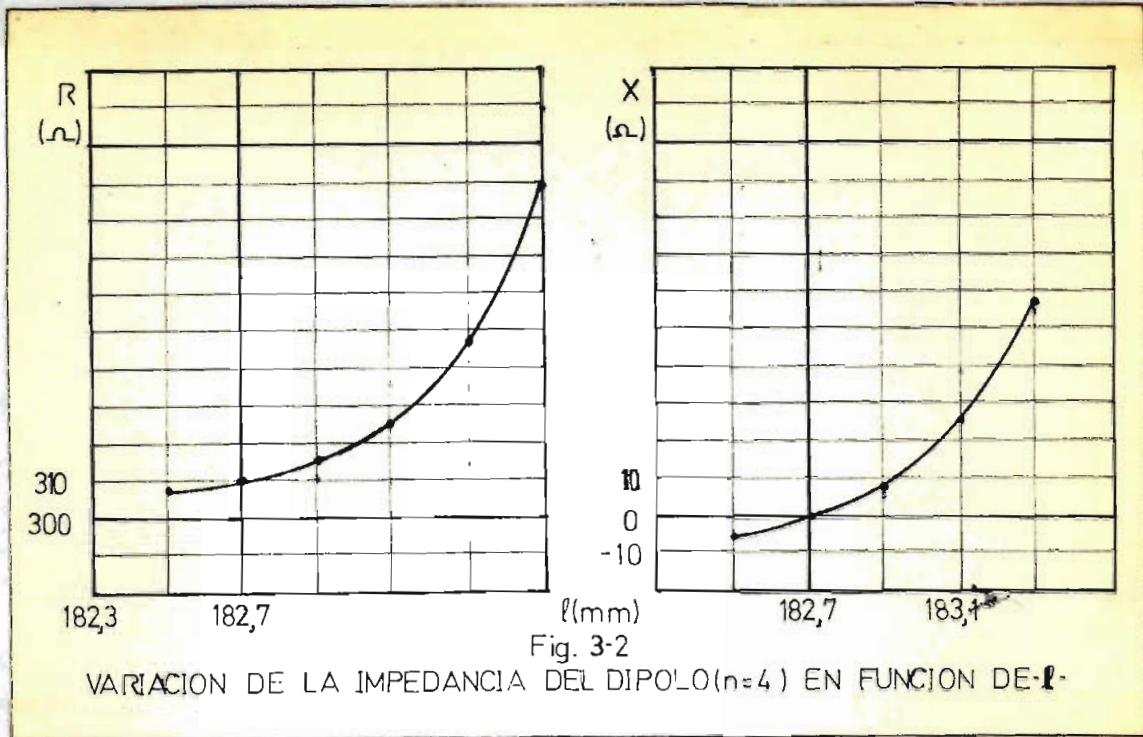
a = radio del conductor.

* Kraus, J. D., Electromagnetismo, Primera Edición, El Ateneo, Buenos Aires, 1.960, Pag. 429.

En cuanto a la distancia l_3 se refiere, se han im puesto las mismas restricciones existentes para la distanc cia entre dos elementos de un arreglo; a las que se aña de la restricción de que l_3 debe ser convenientemente me nor que la longitud l del dipolo para que no constituya u na antena de cuadro (en el presente caso aproximadamente es un veinteavo).

La longitud l (Fig. 3-1) corresponde a la de un - dipolo resonante y se la determinó experimentalmente. La variación de la impedancia en función de l se da en la - Fig. 3-2.

Es digno de observarse también que la dimensión - l_1 , corresponde a la longitud de un dipolo simple de for ma cilíndrica de revolución, resonante, de radio igual a 0,8 mm. En esto hay una buena coincidencia con la teoría.



3.3 DISCUSION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL DISEÑO DEL DIPOLO

Como anteriormente se explicó, la longitud a la que resuena el dipolo, se la determinó experimentalmente, observando como varía la reactancia con un primer elemento construido para prueba.

Como era de esperarse, cuando el elemento tiene una longitud física mayor que la de resonancia, su reactancia es inductiva, disminuyendo a medida que la diferencia entre las dos magnitudes antes nombradas, se reduce.

Después de resonancia, es decir, para menores longitudes, se va incrementando una reactancia de valor negativo (capacitiva). En base a estas mediciones, se construye el elemento resonante definitivo.

Medida su impedancia, se obtiene un valor de 310 ohmios, valor bastante aceptable, pues acoplado a una línea de 300 ohmios, da un VSWR de 1,03, que está dentro del rango que se esperaba.

Sin embargo, como también se anotó con anterioridad es menester considerar que la línea de transmisión - radia, así como cierta tolerancia en su construcción. Como ejemplo, aquella con que se trabajó, resulta tener una Z_0 media de 280 $\angle 2,5^\circ$ ohmios.

Con este nuevo valor se consigue una relación de voltaje de ondas estacionarias de 1,11, que es todavía bastante aceptable.

Así mismo, se nota con claridad la diferencia - existente entre 310 ohmios, que es el valor hallado para la resistencia de radiación del diseño y el valor espera-

do de 292 ohmios. Se estima que se debe a los siguientes factores:

1.- Para las dimensiones de las antenas, el orden de las décimas de milímetro es solamente una aproximación, - en vista del material disponible para su construcción; y, por la falta de una rectitud total en el alambre de cobre utilizado, aún después de ser enderezado, así como ligeras variaciones en su diámetro, que afectan al factor de transformación en este caso.

2.- El valor de 292 ohmios resulta de asumir, entre otras cosas, que la antena no tiene espesor (valor teórico).

3.- Como se puede notar en la práctica, la introducción de soldadura para las uniones de la antena con la línea, afecta apreciablemente en los valores medidos.

4.- El local en donde se han realizado las mediciones de impedancia no es totalmente adecuado (por ejemplo: falta de recubrimiento de material que absorba energía y evite así reflexiones).

3.4 DISEÑO DE UN SISTEMA YAGI DE CUATRO ELEMENTOS

3.4.1 JUSTIFICACION DEL DISEÑO EN BASE A EXPERIMENTACION.

En el Capítulo Segundo, ya se consignó la necesidad del diseño esencialmente a base de experimentación, - en un sistema Yagi de más de tres elementos.

Conviene añadir, que en caso de tratarse de un - sistema de apenas dos elementos, se puede hasta cierto - punto hacer un estudio teórico, en base a Cuadripolos y Líneas de Transmisión. Al mencionar "hasta cierto punto", implica que hay que hacer particularizaciones en el diseño; concretamente, por ejemplo, imponerse conocida la - distancia entre el dipolo y el parásito, y la diferencia de sus longitudes.

Hay también aproximaciones, como suponer que la - resistencia de radiación del parásito es igual a la del - dipolo;^{*} pero no debe perderse de vista que su valor de -

* Ricaurte, J., Estudio de antenas con un elemento parásito, 1.971.

pende de la longitud del elemento.

De todas maneras, con un número de elementos mayor a dos, este camino es impracticable por la cantidad de variables que se introducen.

Aún más, no ha sido posible encontrar más datos que los consignados.

Considérase entonces justificado el diseño en base a experimentación partiendo de la información obtenida. -- Es decir, no se trata en este caso de una simple comprobación, sino más bien de una continuación de lo consignado en teoría.

3.4.2 DATOS

Los datos que se consideran conocidos son:

1.- Numero de elementos, cuatro. Un reflector, un dipolo y dos directores. Ya se anotó que el efecto de introducir más de un reflector no tiene ventaja; y, la ganancia no aumenta linealmente con el número de directores, --

por eso se han tomado solamente dos.

2.- Longitud del reflector (l_R en la Fig. 2-7), un cinco por ciento mayor que la longitud del dipolo, considerándose el ya diseñado, es decir:

$$l_R = 1,05 \times 182,7 \text{ mm} = 191,8 \text{ mm}$$

3.- Longitud del primer director (l_{D1} en la Fig. 2-7), un cinco por ciento menor que la longitud del mismo dipolo, o sea:

$$l_{D1} = 0,95 \times 182,7 \text{ mm} = 173,6 \text{ mm}.$$

4.- Longitud del segundo director (l_{D2} en la Fig. 2-7), un 10 % menor que la longitud del mismo dipolo:

$$l_{D2} = 0,9 \times 182,7 \text{ mm} = 164,4 \text{ mm}.$$

3.4.3 OBJETIVO

En tratándose de medir los lóbulos de radiación horizontal de la antena Yagi objeto del diseño (elementos paralelos al plano de tierra), irá como receptora (pues ya se asumió que el dipolo diseñado antes iría como antena

transmisora), de un sistema detector cuya impedancia de entrada puede considerarse de 50 ohmios. Al aparato medidor mismo, también se llega por medio de un sistema desbalanceado de líneas de transmisión de 50 ohmios. Considerando que la antena es balanceada se necesita un balún, cuya construcción siendo para una sola frecuencia, no presenta mayor dificultad.

El balún va a proporcionar un buen acoplamiento entre el detector y la antena cuando:

1.- Esté construido con cable coaxial de impedancia característica igual a 50 ohmios.

2.- En su salida balanceada, tenga conectada una carga puramente resistiva, balanceada e igual a 200 ohmios. En la práctica, entre la carga y el balún debe ir una pequeña longitud de línea balanceada de 200 ohmios, para evitar que la impedancia de la carga sea afectada por el bloque del balún conectado a tierra.

Por ende, a más de ser resonante, el diseño óptimo debe poseer una resistencia de radiación de 200 Ω .

3.4.4 PROCEDIMIENTO A SEGUIRSE

El procedimiento seguido para el diseño es el siguiente:

- 1.- Se obtiene un dipolo resonante.

- 2.- Se forma un arreglo con el reflector y el dipolo y se varía la distancia entre los dos elementos (d_R en la Fig. 2-7), aproximadamente entre $0,1\lambda$ y $0,45\lambda$, en pasos de $0,0250\lambda$, hasta obtener resonancia o minimizar el valor de reactancia.

- 3.- Se forma un arreglo con el dipolo y los dos directores, manteniendo iguales las distancias entre cada elemento y el siguiente (d en la Fig. 2-7); d varía en la misma forma que d_R , buscando resonancia en el nuevo sistema.

- 4.- Las longitudes a las que los arreglos anteriores se comportan puramente resistivos, sirven para formar la Yagi. Ajustanse nuevamente d y d_R , en caso de que la in

teracción entre reflector y directores haga que la reactancia varíe notablemente del valor esperado (cero).

5.- Se mide la resistencia de radiación de la antena así obtenida. Si ésta difiere del valor de 200 ohmios - (un VSWR de 1,3 sería aceptable), se repite el proceso - cambiando de dipolo resonante.

El criterio seguido para cambiar el dipolo resonante se explicará con un ejemplo:

Supóngase que el factor de transformación del di polo usado en el intento anterior es de 4 y que la resis tencia que se obtiene con el arreglo es de 50 Ω ; sabien- do que la impedancia a obtenerse es de 200 ohmios, se ha ce una regla de tres como sigue:

4	50 ohm.
x	200 ohm.

$$\text{Entonces: } x = \frac{200 \times 4}{50} = 16$$

El nuevo dipolo resonante deberá tener un factor de transformación de 16.

3.4.5 PRIMERA APROXIMACION DEL DISEÑO

- 1.- Se toma el dipolo diseñado.
- 2.- Los resultados del arreglo formado con el reflector y el dipolo se dan en la Tabla 3-1 y en las Figuras - 3-3 y 3-4.

Tabla 3-1

Impedancia del arreglo reflector-dipolo en función de d_R para la primera aproximación.		
d_R (λ)	Zarr.	
	R (Ω)	X (Ω)
0,100	153	144,7
0,125	202	161,0
0,150	243	164,0
0,175	284,0	158,4
0,200	319,5	147,5
0,225	340	136,5
0,250	369	123
0,275	365	90,1
0,300	377	73,7
0,325	374	51,9

$d_R (\lambda)$	$R (\Omega)$	$X (\Omega)$
0,350	366	27,3
0,375	360	16,4
0,400	347	- 5,46
0,425	333	- 8,19
0,450	328	-13,65

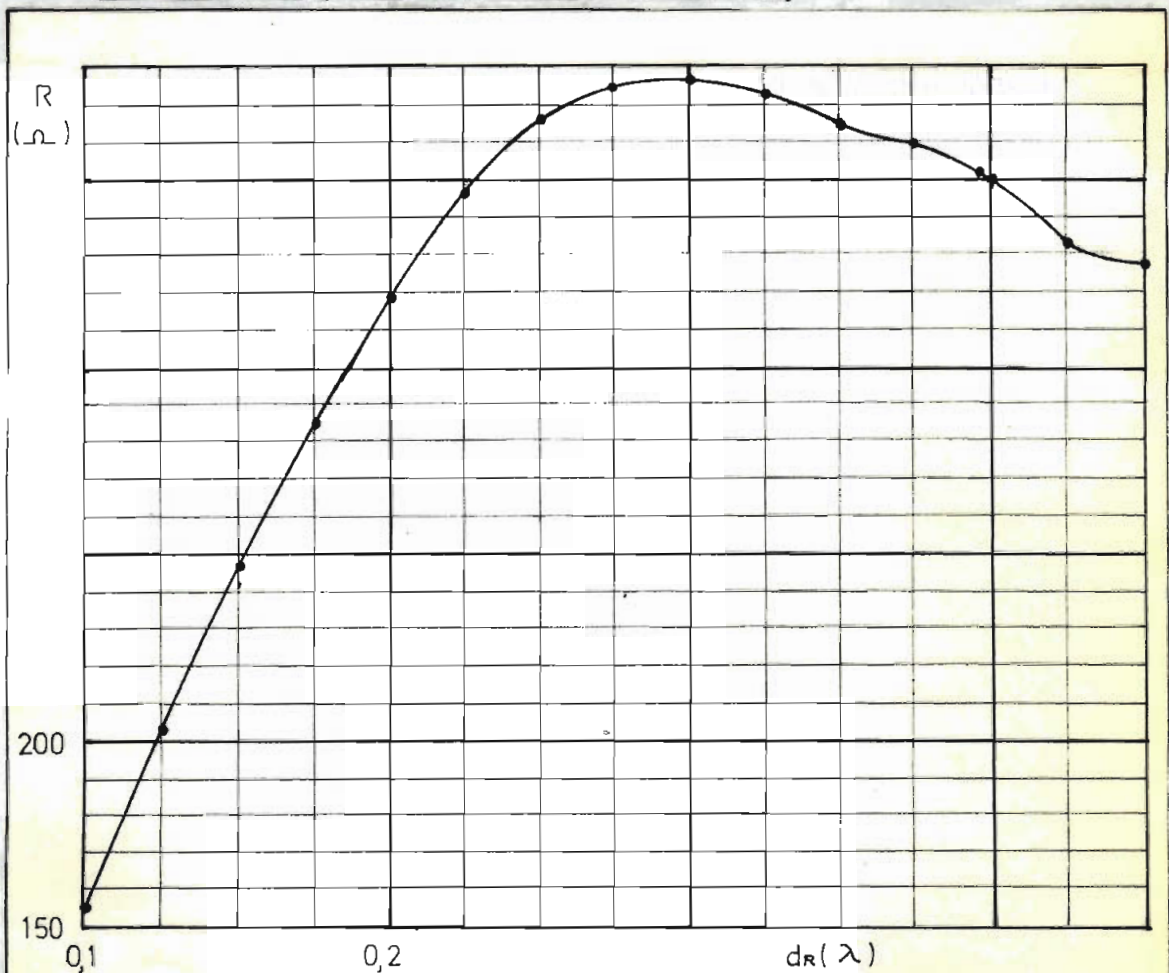
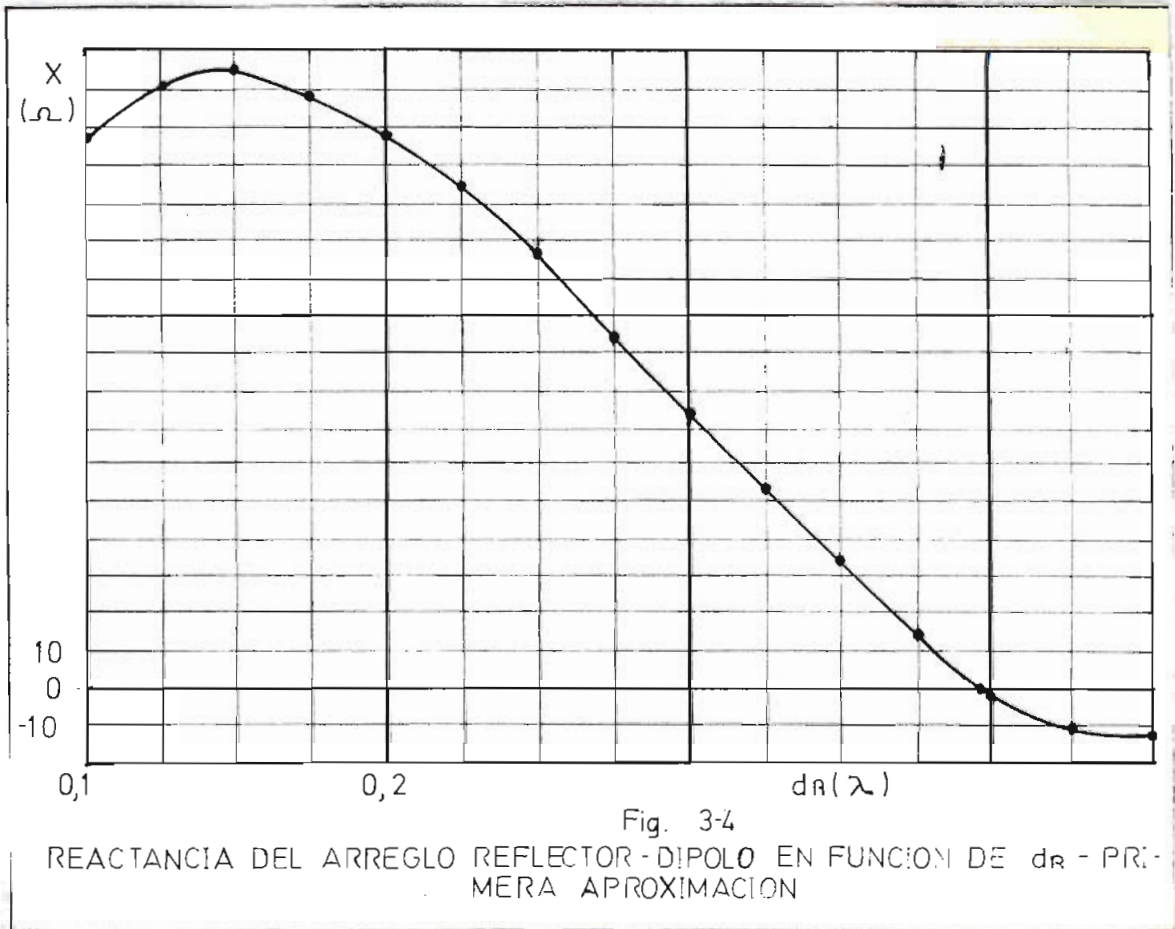


Fig.3-3
RESISTENCIA DEL ARREGLO REFLECTOR-DIPOLO EN FUNCION DE d_R - PRIMERA APROXIMACION



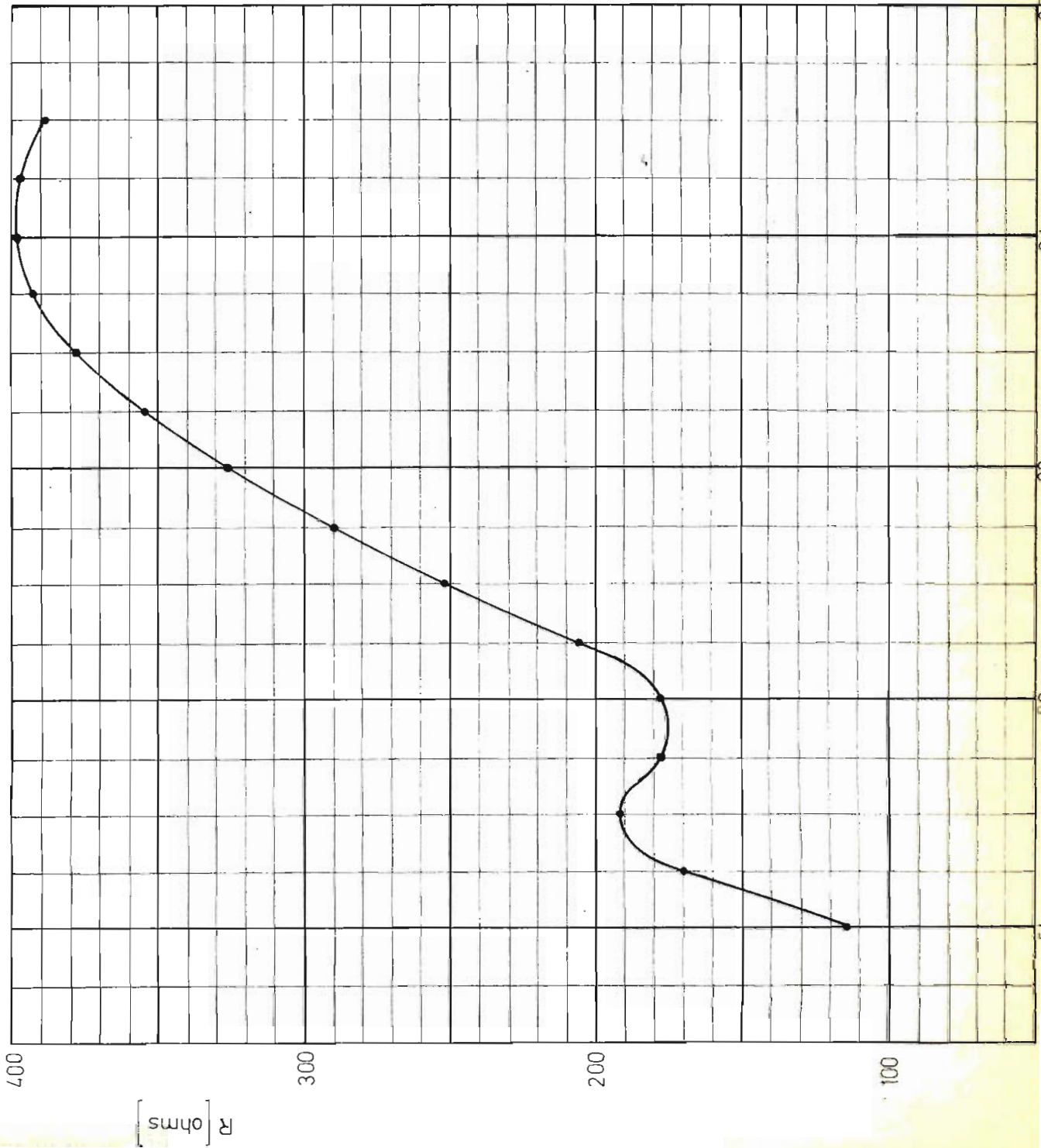
La distancia d_R a la que resuena el arreglo es a -
proximadamente $0,395\lambda$

3.- Los resultados de Impedancia del arreglo formado -
por el dipolo y los dos directores, se consignan en la Ta-
bla 3-2 y en las Figuras 3-5 y 3-6.

Tabla 3-2

Impedancia del arreglo dipolo-directores, para la primera aproximación en función de d.		
d (λ)	Zarr.	
	R (Ω)	X (Ω)
0,075	68,2	- 8,2
0,100	114,5	41
0,125	163,9	57,3
0,150	191,0	54,6
0,175	177,4	51,9
0,200	176	87,4
0,225	205	136,5
0,250	246	161
0,275	289,5	163,9
0,300	333	155,7
0,325	371	123
0,350	377	103,8
0,375	390,5	82,0
0,400	398,5	54,6
0,425	396	27,3
0,450	390,5	5,45

FIG. 3-5
RESISTENCIA DEL ARREGLO DIPOLO-DIRECTORES EN FUNCION DE
d - PRIMERA APROXIMACION



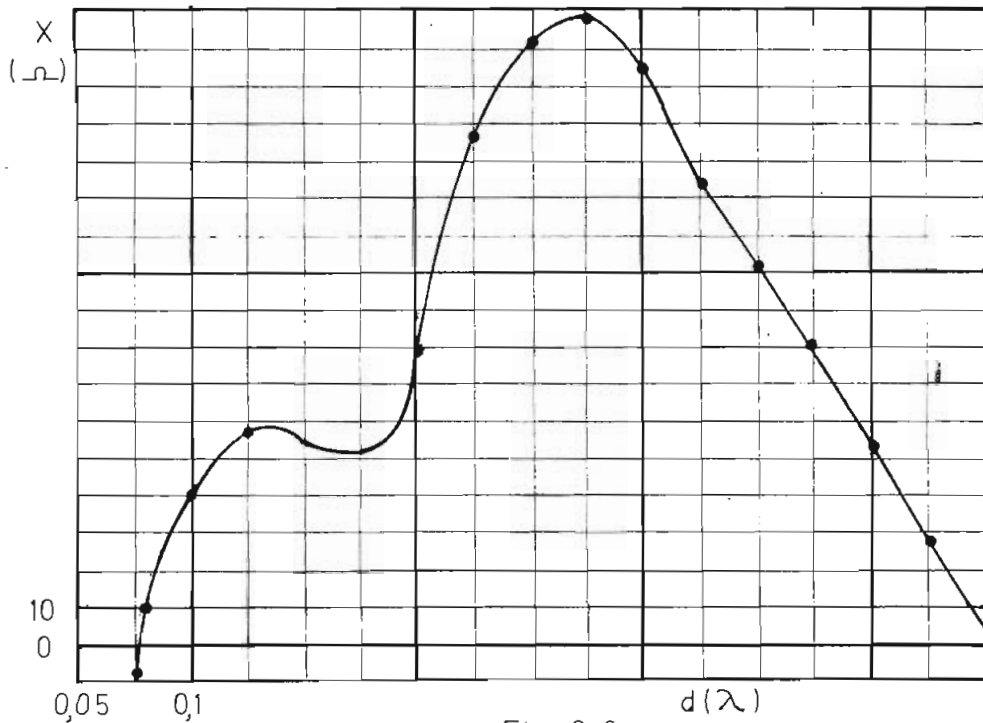


Fig. 3-6

REACTANCIA DEL ARREGLO DIPOLO-DIRECTORES EN FUNCION DE d
PRIMERA APROXIMACION

Hay entonces dos longitudes de resonancia; se escoge la distancia mas corta, considerando que el reflector irá muy alejado del dipolo y por tanto, si todos los elementos parásitos están bastante distanciados, como se puede concluir de las curvas, la influencia en directividad e impedancia para el sistema Yagi, será reducida.

4.- La Yagi:

Se toma d_R igual a $0,4\lambda$ y d igual a $0,075\lambda$. Pues es de esperar que el punto de resonancia aparezca aproxima

damente en las mismas distancias que para los arreglos - con que se las determinó; la razón es: la interacción en tre reflector y dipolos va a ser reducida, como se deduce de las figuras 3-2 y 3-3, suponiendo a cada director como un dipolo separado algo más que $0,45\lambda$ del elemento re flector.

Efectivamente, es en estas condiciones cuando se obtiene una menor reactancia para el arreglo completo.

5.- La impedancia del diseño en la primera aproximación resulta ser $73,7 + j5,47$ ohmios. Es necesaria una - segunda aproximación.

3.4.6 SEGUNDA APROXIMACION DEL DISEÑO

1.- El dipolo debe tener un factor de transformación de 10,9. Se construye[‡] entonces el dipolo según la Fig. 3-7.

‡ Jasik, H., Antenna Engineering Handbook, Primera Edición, Mc Graw-Hill, Inc., U.S.A., 1.961, Pag. 3-14.

La longitud de resonancia del elemento se la ajusta experimentalmente. Medida su impedancia resulta ser $747-j75$ ohmios, lo que da un factor de transformación de 10,25.

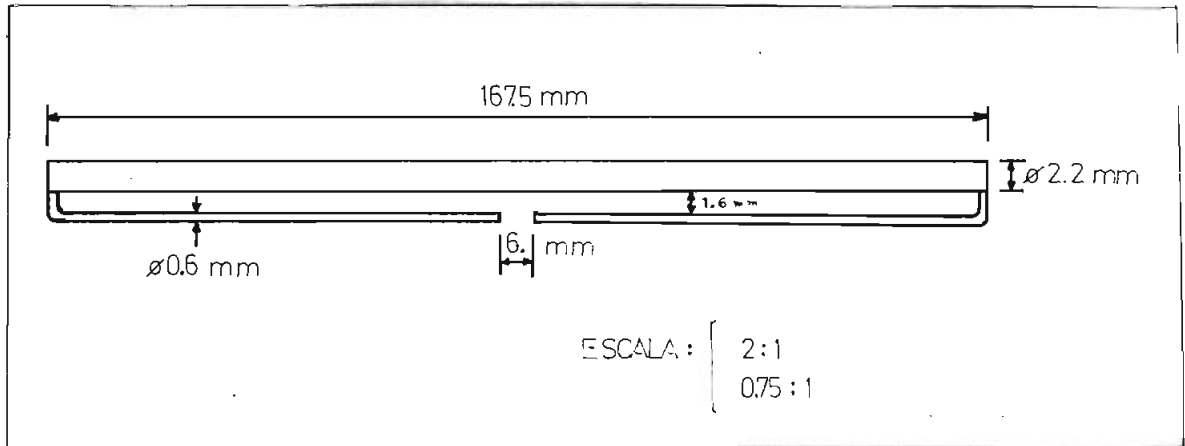
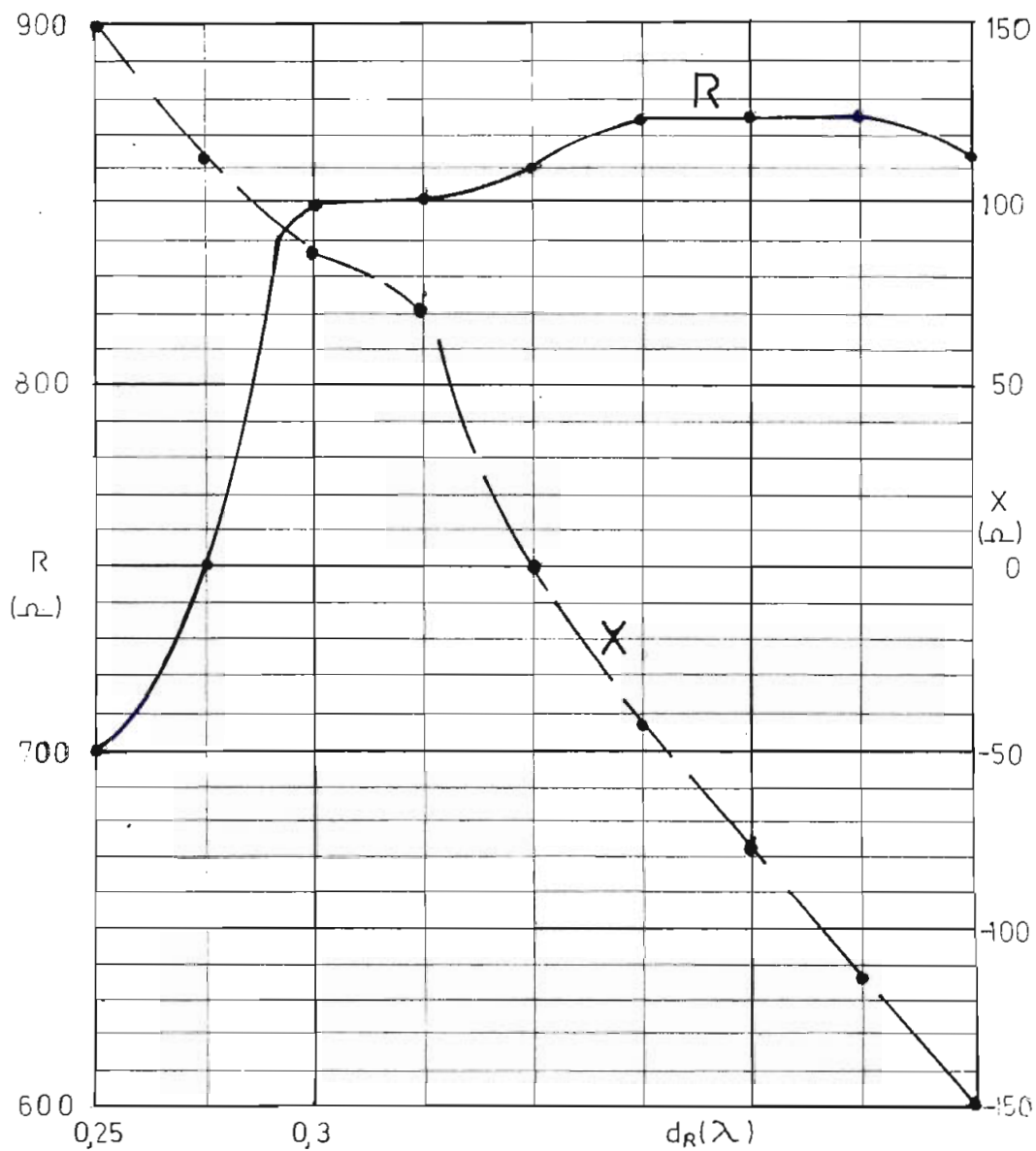


Fig. 3-7
Dimensiones del dipolo doblado con un factor de transformación teórico de 10,9.

2.- Para el caso actual, es probable que varíe d_R de resonancia, pues la longitud física del dipolo ha variado.

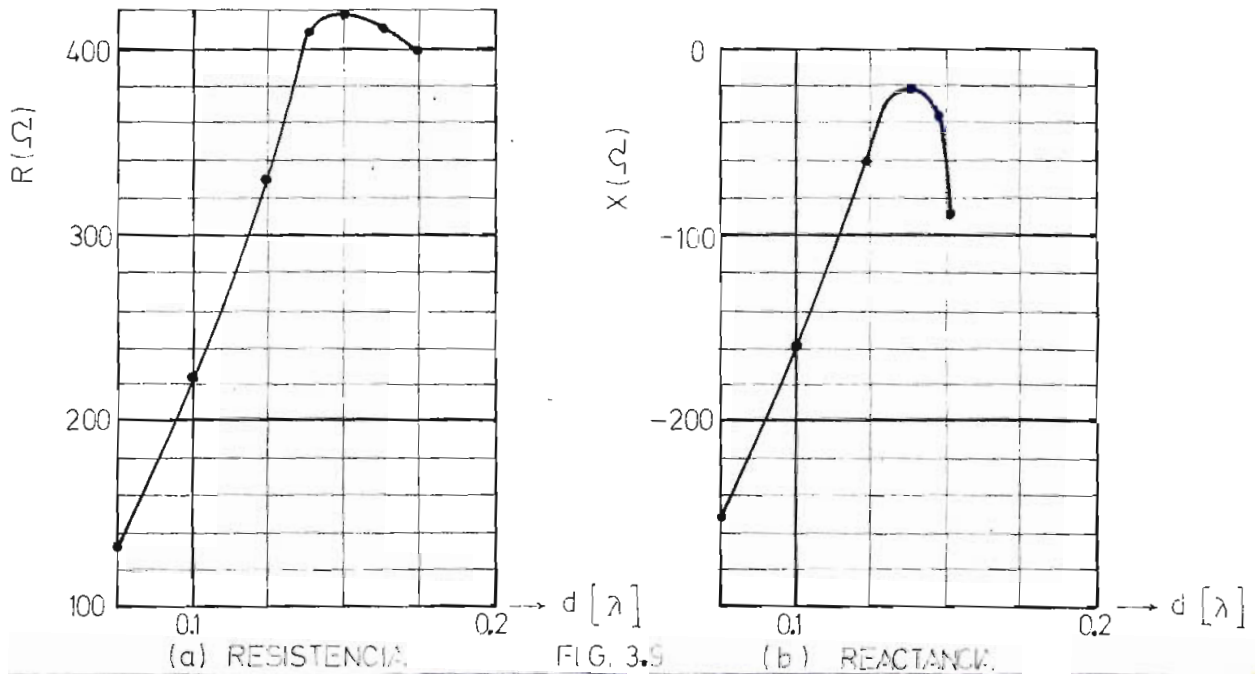
Las partes real e imaginaria de la impedancia del arreglo en función de d_R , se dan en la Fig. 3-8. Se toman medidas solamente alrededor del punto de resonancia anterior.

Fig. 3-8
IMPEDANCIA DEL ARREGLO REFLECTOR-DIPOLO EN FUNCION
DE d_R -SEGUNDA APROXIMACION



3.- Los resultados del sistema que se forma con el dipolo y los dos directores se dan en la Fig. 3-9.

IMPEDANCIA DEL ARREGLO DIPOLO-DIRECTORES EN FUNCION DE d - SEGUNDA APROXIMACION



4.- Se escoge d_R igual a $0,35\lambda$ y d igual a $0,1375\lambda$.

5.- La impedancia de la Yagi así obtenida es de $405-j22,5$ ohmios; es decir que el valor del VSWR ha disminuido aproximadamente a 2. Es necesaria una nueva aproximación.

3.4.7 TERCERA APROXIMACION DEL DISEÑO

1.- Se escoge un factor de transformación de 5,5, en vista de que el diseño de dipolos doblados se lo hace en

base a curvas que en este caso hacen difícil una mejor interpolación.

Las dimensiones del dipolo son dadas en el esquema 3-10.

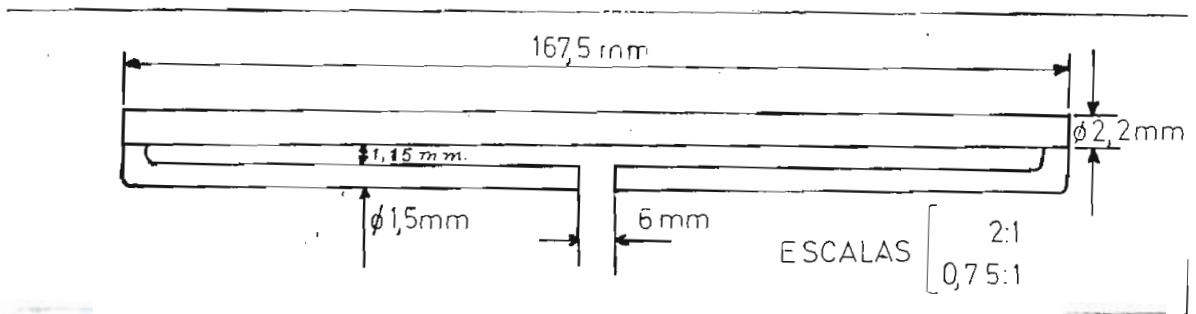
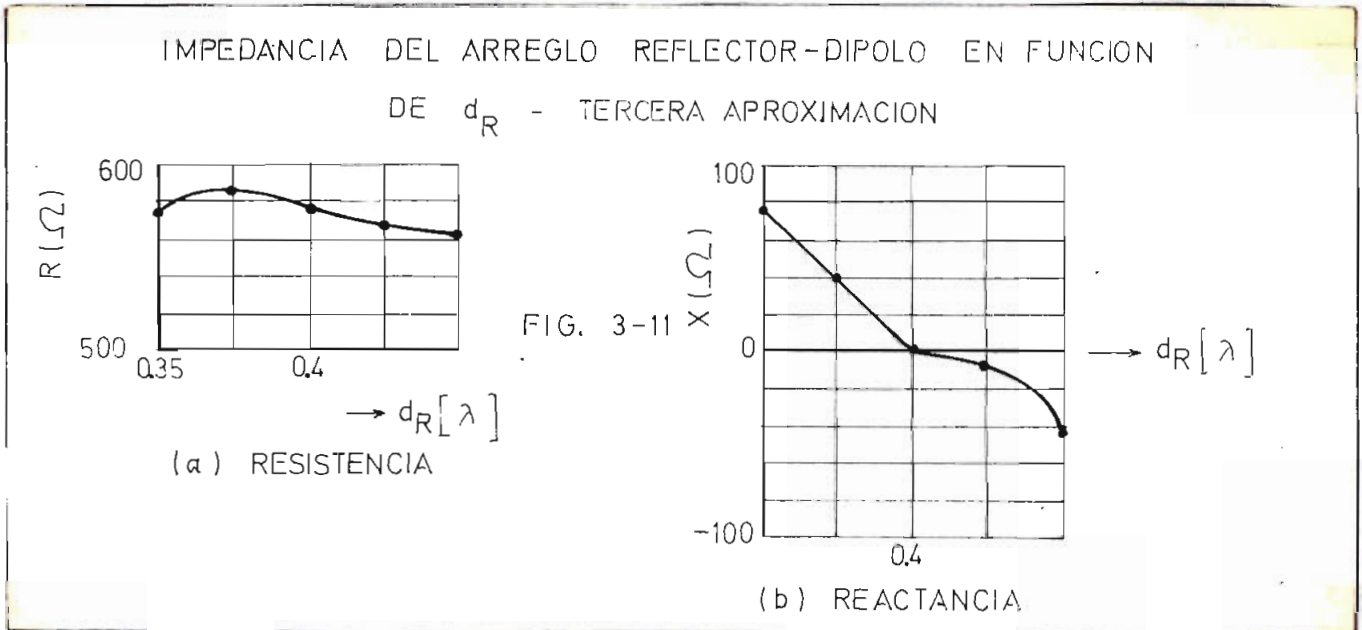


Fig. 3-10

Dimensiones del dipolo doblado con un factor de transformación de impedancia teórico de 5,5.

La impedancia medida es de 489 ohmios.

2.- Los resultados están en el diagrama 3-11.



3.- Las curvas (3-12), representan la variación de la impedancia en función de d , para el arreglo formado por el dipolo y los dos directores. Se observa que no es posible compensar totalmente la reactancia capacitiva, solamente minimizarla.

4.- Para la nueva antena Yagi-Uda, d_R en el punto más cercano a resonancia, no permanece en el valor $0,4\lambda$, sino que varía a $0,375\lambda$, mientras que d se mantiene igual en el valor $0,1375\lambda$. La variación de d_R es lógica, pues debe compensar la reactancia de -41 ohmios del sistema formado por los dos directores y el dipolo.

5.- La impedancia del diseño en esta aproximación es - de $309-j2,74$ ohmios. El nuevo VSWR tiene un valor correspondiente a 1,56, pero todavía no se llega al valor impuesto.

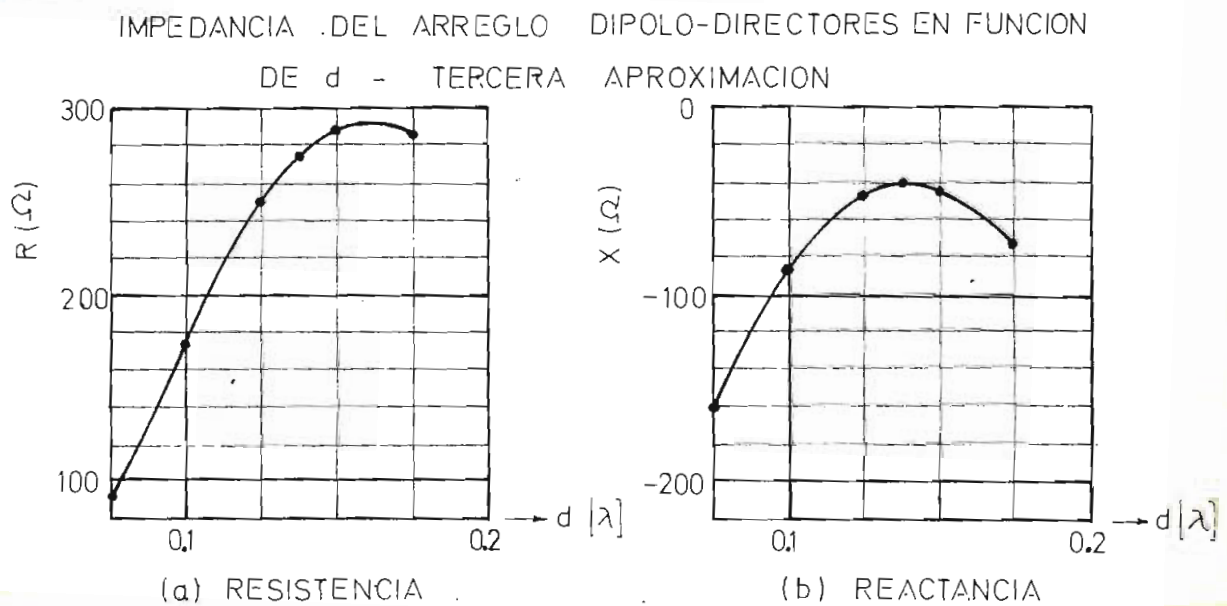


FIG. 3-12

3.4.8 EL DISEÑO DEFINITIVO

1.- Esta vez el dipolo doblado debe tener un factor de transformación de impedancias de 4,5; sus dimensiones para 800 Mhz, corresponden a las dadas en el diagrama 3-13 y su impedancia medida es de $418-j27,8$ ohmios.

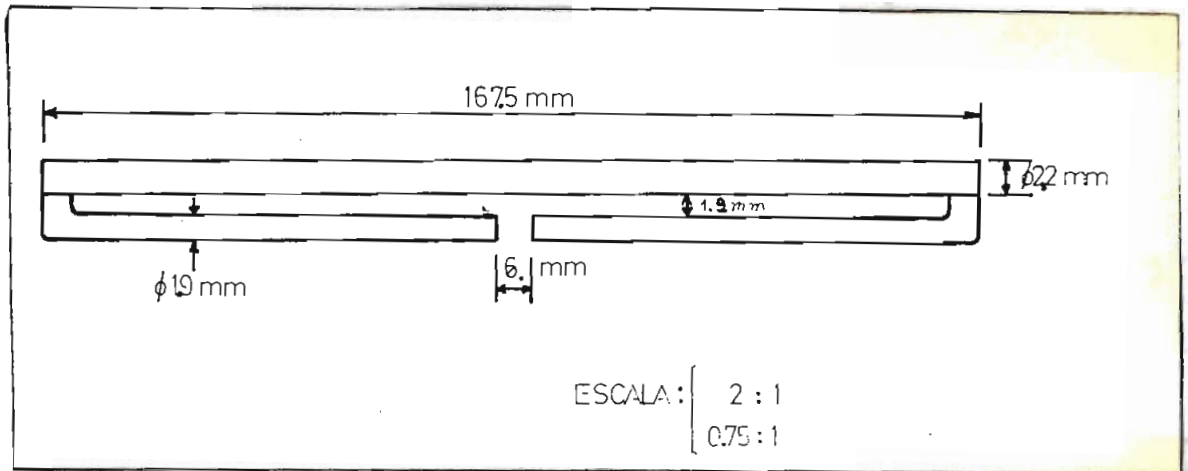


Fig. 3-13
Dimensiones del dipolo doblado con un $n = 4,5$ teórico.

2.- Con relación a la aproximación anterior no existen mayores variaciones; únicamente se acorta d_R a $0,325\lambda$, para compensar el efecto capacitivo que tiene el dipolo, pues debe notarse que el de la tercera aproximación presentó una impedancia puramente resistiva.

3.- La longitud d permanece constante en $0,1375\lambda$.

4.- El diseño definitivo está representado en la Fig. 3-14, construido con el dipolo doblado del gráfico 3-13.

Sus dimensiones según la notación de las Figuras 2-7 y 3-14 son:

$$\begin{aligned}l_R &= 191,8 \text{ mm. (longitud del reflector)} \\l &= 167,5 \text{ mm. (longitud del dipolo)} \\l_{D_1} &= 173,6 \text{ mm. (longitud del primer director)} \\l_{D_2} &= 164,4 \text{ mm. (longitud del segundo director)} \\d_R &= 0,325\lambda = 124 \text{ mm. (distancia entre el reflector y el} \\&\quad \text{dipolo)} \\d &= 0,1375\lambda = 51,5 \text{ mm. (distancia entre directores y en} \\&\quad \text{tre el dipolo y el primer direc} \\&\quad \text{tor).}\end{aligned}$$

Todos los elementos están hechos de alambre de cobre. El reflector y los directores tienen un diámetro de 1,6 mm. Los espesores están sujetos a las mismas limitaciones discutidas para el diseño del dipolo doblado en la sección 3-2.

Por último, todos los elementos van montados sobre un soporte de alambre del mismo material que ellos, de diámetro igual a 2,2 mm.

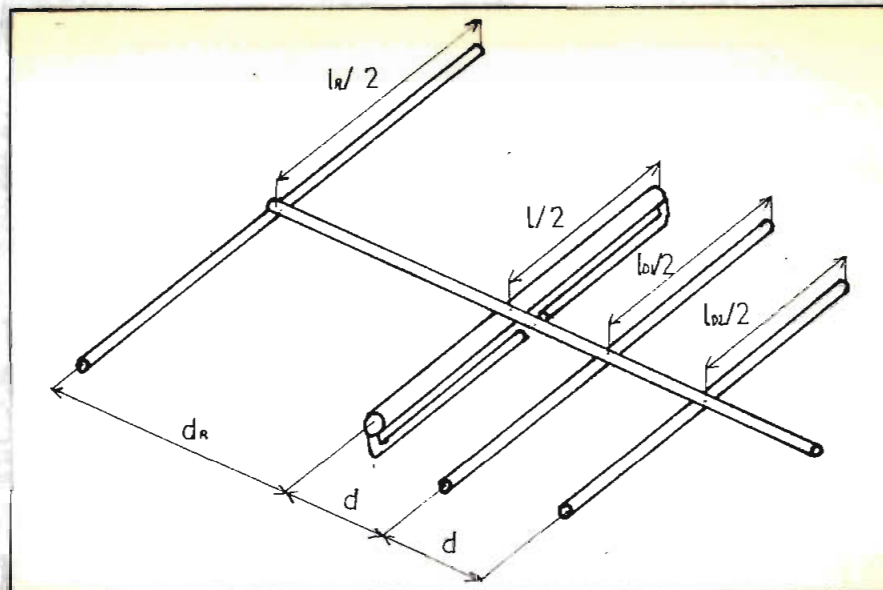


Fig. 3-14
La Yagi definitiva

5.- La Yagi definitiva tiene una impedancia de $207 - j17,9$ ohmios. Lo que equivale a un VSWR de 1,095 cuando va acoplada a un sistema balanceado ideal de 200 ohmios de impedancia intrínseca; pero, conectada al sistema físico del balún construido, resulta una relación de voltaje de ondas estacionarias de 1,2.

3.4.9 DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL DISEÑO DEL SISTEMA YAGI.

Se trata punto por punto el orden seguido en cada aproximación:

1.- Al hablar de los diferentes dipolos doblados que se han construido, es necesario hacer los mismos comentarios que en la sección 3.3, es decir en el diseño del di polo doblado resonante de 300 ohmios.

Cabe poner de relieve, que en el cálculo y diseño de los dipolos con un n diferente de 4, se observa lo siguiente:

A.- La exactitud del factor de transformación de im pedancias teórico es mayor cuando mayor es la relación de la distancia entre los dos elementos que constituyen el dipolo doblado, con respecto a su diámetro. Esto es mas claro si se nota que pequeñas variaciones de distancia no afectan mucho al mismo factor, cuando la relación es grande.

B.- En los datos teóricos para su diseño, no se especifica nada respecto a longitudes de los dipolos, ni tampoco con respecto a los elementos que unen los extremos del dipolo doblado y que también van a irradiar, afectando de esta manera el comportamiento real del diseño.

C.- La influencia de la introducción de suelda se hace más notoria en este caso, pues hay dos uniones adicionales que requieren de ella.

D.- Para separaciones pequeñas entre los dos dipolos simples que constituyen el doblado, el paralelismo de ellos tiene bastante influencia en el factor de transformación.

E.- Por todo ésto, la diferencia entre el valor esperado y el calculado para el factor de transformación de impedancias, varía hasta en un 25 %.

F.- La longitud resonante de los dipolos doblados con n diferente de 4, es menor que la de un dipolo simple e igual a 167,5 mm.; pues las uniones de los dipolos simples que los constituyen también radían.

G.- Para este tipo de diseño buscando resonancia o más bien expresado buscando mínima reactancia, en todas las antenas diseñadas se nota que dicha situación es muy crítica, pues una ligera variación de las condiciones de medición hace que la reactancia aumente en magnitud (por

ejemplo, afecta el hecho de desoldar y volver a soldar la antena a los terminales de medición de impedancia).

2.- En las Figuras 3-3 y 3-4 puede observarse que para separaciones del dipolo mayores que $0,45\lambda$, la influencia del reflector es muy reducida; así, como para separaciones pequeñas, la reactancia inductiva aumenta gradualmente y disminuye la resistencia de radiación, lo que corresponde a lo esperado antes de empezar el diseño.

En estas y las otras curvas similares de arreglos parciales se observan ciertas anomalías cuando las distancias con respecto al dipolo son reducidas. Se las atribuye a falta de un paralelismo exacto al efectuar mediciones.

3.- El aspecto principal que hay que anotar con respecto al sistema dipolo y directores es que su comportamiento varía totalmente, en cuanto a reactancia se refiere, entre el primer intento de diseño y los restantes. Se atribuye a que en el primer intento, el dipolo tiene una mayor longitud física que los directores, lo que no ocurre en el resto de aproximaciones, en las que el primer

director es ligeramente mayor que el dipolo, en razones de la longitud de resonancia de un dipolo doblado de un factor de transformación de impedancias diferente de cuatro.

Del primer intento puede también deducirse que el efecto de introducir directores después del dipolo, es aproximadamente el mismo que introducir un reflector antes del elemento con alimentación propia; por lo tanto los dos efectos se refuerzan, o lo que es lo mismo, producen un incremento en la direccionalidad de la antena.

4.- Con respecto a las mediciones de la Yagi total, hay que hacer dos anotaciones importantes que son:

A.- Basándose en que un director es también un elemento radiante y considerando que un sistema reflector-director sería lo mismo que un sistema reflector-dipolo, se busca disminuir este efecto, haciendo la separación entre el reflector y el primer director, mayor que $0,45\lambda$, de manera que se puedan aplicar las distancias de resonancia obtenidas de los arreglos parciales, en la Yagi

total. Esto en la práctica resulta ser bastante satisfactorio.

B.- Desde la segunda aproximación y por las razones ya dadas, es muy difícil compensar la reactancia capacitiva que aparece en el sistema formado por el dipolo y los directores, por lo que únicamente se la minimiza y después, en el diseño formado por el reflector, el dipolo y los directores se aumenta el efecto inductivo del reflector sobre el elemento no-parásito, disminuyendo la distancia que los separa. De esta manera se consigue una reactancia capacitiva sumamente baja en las diferentes Yagis construídas.

5.- Es conveniente en este parágrafo considerar que: el número de aproximaciones hechas es bastante adecuado, ya que un mejor VSWR final es muy difícil obtenerlo, en razón inclusive del material disponible, como por ejemplo alambres de todos los diámetros necesarios para la construcción de dipolos.

Además, no queda sino agregar que la reactancia que se consigna como la del diseño definitivo, aumentó

desde un valor anterior obtenido, cuando se procedió a -
instalar la Yagi en un soporte fijo, metálico para los -
elementos; ya que todas las mediciones previas se hicier
ron con los diversos elementos sostenidos por una delgaa
da regla de madera graduada en fracciones de longitud -
de onda para 800 MHz., y ya se explicó que el punto de
resonancia es muy crítico.

CAPITULO CUARTO

MEDICION DE LOS LOBULOS HORIZONTALES DE
RADIACION DE LA ANTENA YAGI DISEÑADA

4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Las características de radiación de una antena - son tridimensionales, y requieren medidas de intensidad de campo, en función de θ y de ϕ (Fig. 4-1), es decir, - en todos los ángulos del espacio; esto, siempre que se trate de describir lóbulos de antenas localizadas en objetos móviles, como por ejemplo un avión, o, que estén montadas en objetos de forma irregular.

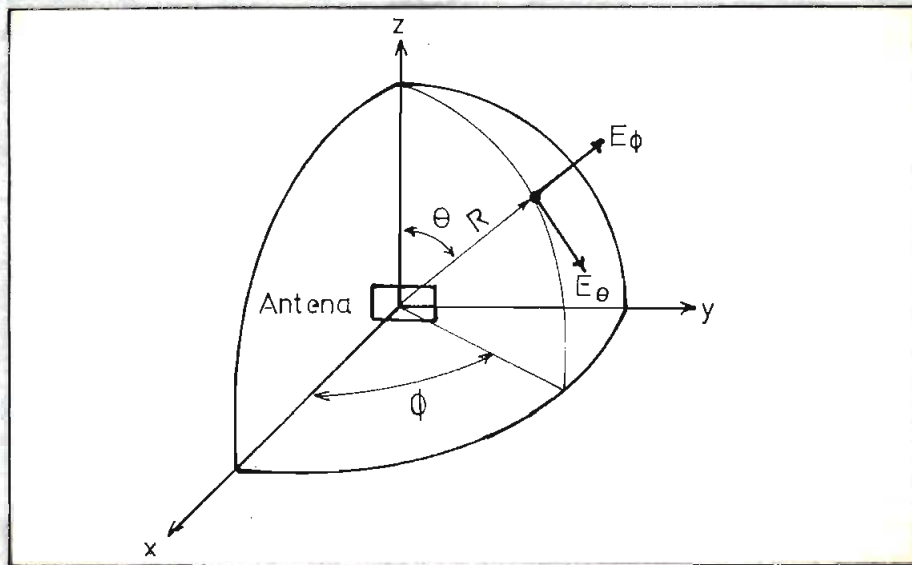


Fig. 4-1

Sistemas de coordenadas para medición de lóbulos. La antena se localiza en el origen.

Pero para la mayoría de los arreglos, o formas elementales de antenas, cuyas características de radia-

ción son simples, es necesario solamente medir los lóbulos en el plano xy, y en el xz (Fig. 4-1).

La medición de características en el plano vertical, implica problemas obvios de movilización que no son muy fáciles de superar con el equipo disponible en el presente caso, por tanto, las experiencias se refieren solamente a los lóbulos de radiación horizontal del ordenamiento Yagi determinado en el capítulo anterior, considerando todos los elementos que lo constituyen como horizontales; es decir, exclusivamente, se hacen mediciones en el plano horizontal del sistema.

Las medidas realizadas sirven para construir - los llamados diagramas de potencia, o diagramas de intensidad de campo que son los más usuales, como se indicó en el capítulo segundo.

4.2 METODOS DE MEDICION.

Supónganse dos antenas que se las denominará A y B, ubicadas en un medio lineal, pasivo e isotrópico; si se trata de hallar los lóbulos de radiación de la an

tena A, existen cuatro formas generales de medición, - que dependen de cómo se varíe la posición relativa de A con respecto a B y que son:

1.- En caso de que A actúe como transmisora, se observa su intensidad de campo por medio de una receptora B en los puntos situados sobre una circunferencia de observación que tiene como centro la radiadora A. La lectura del medidor en los terminales de la antena B es un valor proporcional a la intensidad de campo en el punto de observación (Fig. 4-2).

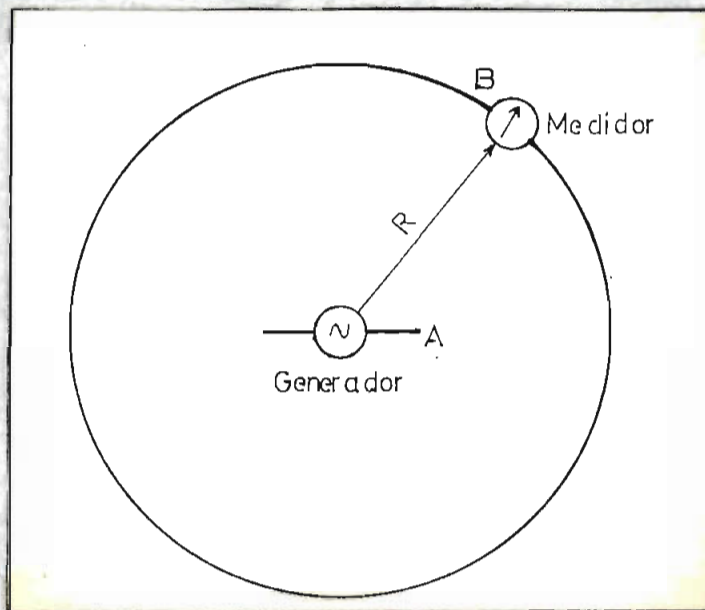


Fig. 4-2

Medición de los lóbulos sobre una circunferencia de observación.

2.- Si se invierte el procedimiento de medición, intercambiando el generador y el medidor (por ejemplo de corriente), de modo que la antena B situada sobre la circunferencia de observación transmita, y la antena A reciba, resulta, por el teorema de reciprocidad, que el diagrama obtenido es el mismo que se logra con el primer procedimiento.

3.- De la misma manera que en el segundo método, - con B transmitiendo, y A de receptora, B se mantiene esta vez fija, y A rota sobre un eje perpendicular al plano de medición, manteniéndose en el centro de la circunferencia sobre la que giraba B en los dos primeros casos.

4.- Se deduce de aplicar el teorema de reciprocidad a la forma número tres, o sea, se intercambian el generador y el medidor. La radiadora, en este caso B, se mantiene fija, y A hace el movimiento de rotación.

De todos los procesos indicados, los dos primeros son los que presentan más dificultades, pues se deben efectuar movilizaciones de equipo; se los usan sol

mente cuando el sistema a probarse es de grandes dimensiones y rígido, para lo que existen vehículos adecuados con todo el instrumental necesario, y desde los cuales pueden efectuarse todas las observaciones pertinentes.

En el presente trabajo de Tesis, y de las condiciones impuestas en los diseños, se escoge el método número cuatro.

4.3 CONDICIONES QUE SE DEBEN CUMPLIR EN LA MEDIDA DE CARACTERISTICAS DE RADIACION

- 1.- La distancia R (Fig. 4-2) debe permanecer constante.
- 2.- Para tener la seguridad de que las mediciones se hacen en la zona Fraunhofer (campo lejano), es necesario que R sea suficientemente grande, o lo que es lo mismo, que la antena bajo prueba esté iluminada con un frente de onda plano; como esto se logra solamente a una distancia infinita de la fuente radiante, se adopta un criterio; por ejemplo, que la diferencia de longitud

existente entre las distancias medidas desde la fuente, hasta el centro de la antena diseñada, y hasta uno de sus extremos, no sea mayor que $\lambda/16$ (Fig. 4-3), es decir que:

$$R \geq \frac{2l^2}{\lambda} \quad (4-1)$$

en donde l es de preferencia la longitud mayor del ordenamiento a probarse

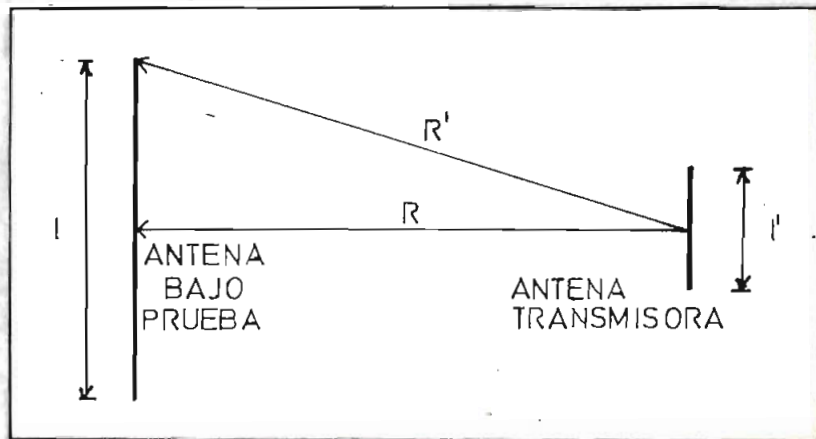


Fig. 4-3

Distancias desde la antena transmisora hasta el centro y el extremo del arreglo bajo prueba.

3.- Los arreglos deben ir suficientemente separados del plano de tierra con el objeto de evitar lecturas erróneas debidas a reflexiones. Es también conveniente que la superficie de tierra sea rugosa para que de to -

dos modos exista más bien dispersión.

4.- El haz o lóbulo de la antena de referencia debe ser lo suficientemente ancho y uniforme de manera que la magnitud de la intensidad de campo no varíe más de un cinco por ciento sobre el círculo de rotación de la antena bajo prueba (círculo determinado por sus dimensiones), pues se puede considerar siempre que ella es la que rota con respecto a la antena de referencia.

4.4 DISPOSICION EXPERIMENTAL

Básicamente, el equipo requerido para la medición de lóbulos de radiación consta de:

- 1.- Una fuente transmisora.
- 2.- La antena de prueba.
- 3.- Un sistema para rotar la antena.
- 4.- Un detector y un indicador de la magnitud relativa del campo recibido.

De acuerdo al equipo disponible, se usó:

- 1.- Para el transmisor:
 - A.- Fuente de poder, marca General Radio, tipo - 1269-A
 - B.- Un oscilador para UHF (220-920 MHz.) marca General Radio, tipo 1362.
 - C.- Un filtro pasa-bajos (0-1000 MHz.), marca - General Radio, tipo 874-F1000L.
 - D.- Un atenuador de 10 dB, marca General Radio, tipo G10L.
 - E.- Cable coaxial de 50 ohmios.
 - F.- Balun, marca General Radio, tipo 874 UBL.
 - G.- Un adaptador marca General Radio, tipo - 874-UB-P3.
 - H.- Línea balanceada de 300 ohmios.
 - I.- Dipolo resonante a 800 MHz., de 300 ohmios.

- 2.- La antena bajo prueba es la Yagi objeto de la - Tesis.

- 3.- El sistema de rotación de la antena es un eje cuyo giro se lo puede hacer manualmente.

- 4.- Como sistema detector e indicador:

A.- Balun.

B.- Mezclador-Rectificador, marca General Radio, tipo 874-MRL.

C.- Un oscilador (50-250 MHz.), marca General Radio, tipo 1215-C.

D.- Amplificador de frecuencia intermedia (30 - 300 MHz.), marca General Radio, tipo 1236.

La disposición experimental se da en diagramas bloques, en el gráfico 4-4.

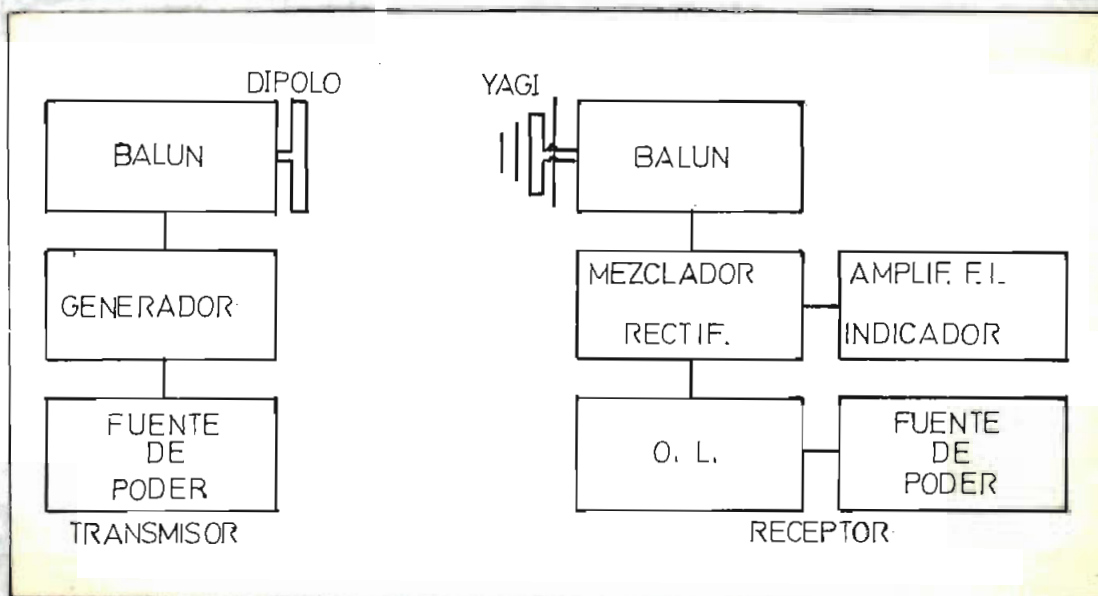


Fig. 4-4
Sistema transmisor-receptor para la medición de lóbulos de radiación.

4.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

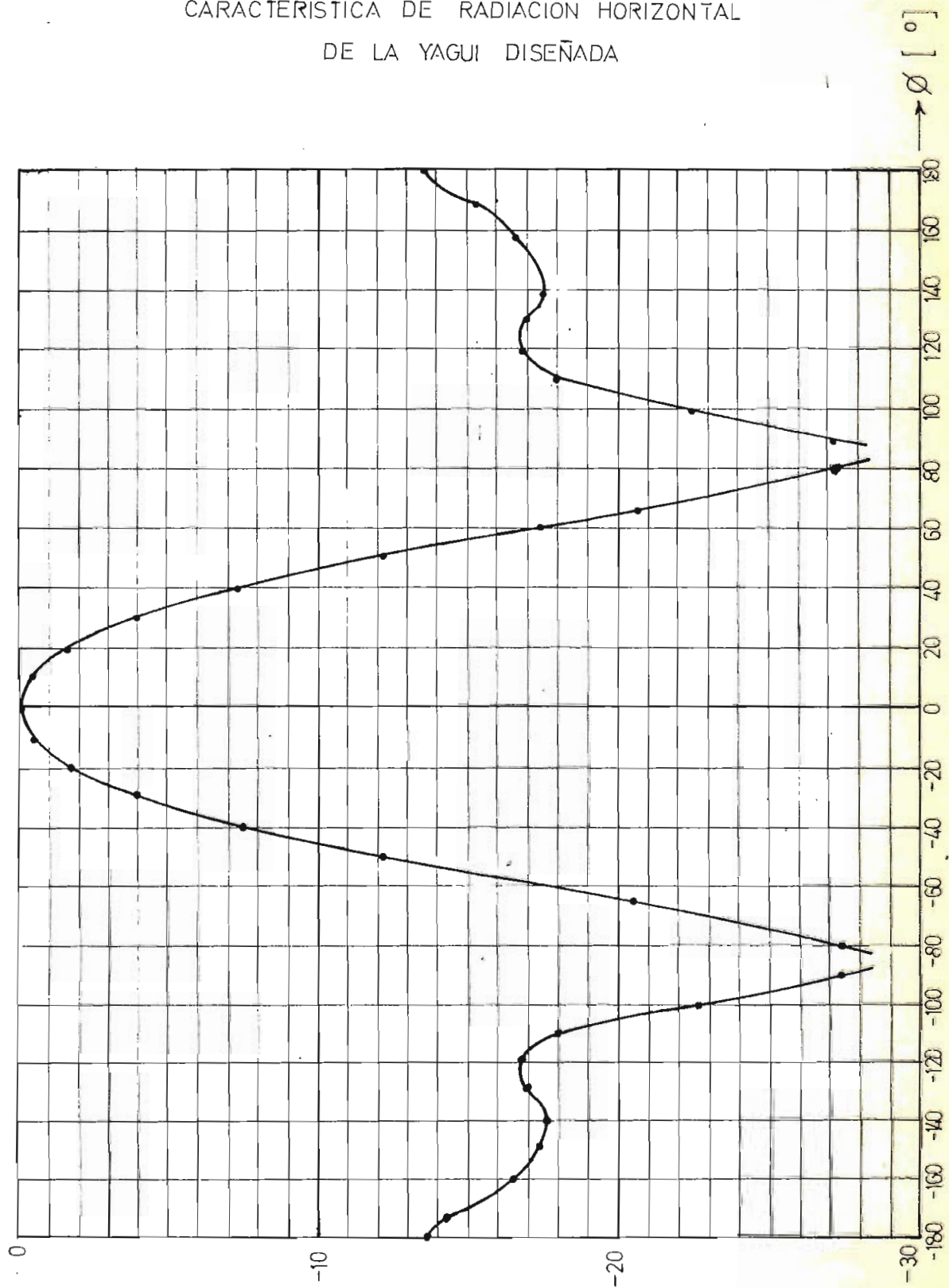
Los valores obtenidos se consignan en la tabla 4-1 y en la Fig. 4-5; en ellos se asume como cero grados la posición de la Yagi para máxima recepción y de ahí se nota en los dos sentidos, considerando ángulos negativos al rotar el sistema hacia la izquierda. También, al ángulo girado con respecto a la posición de máxima radiación se lo llama ϕ .

Tabla 4-1

Característica de radiación horizontal de la Yagi diseñada.	
ϕ (°)	Intensidad relativa de la señal recibida (dB)
± 180	- 13,7
± 170	- 15,2
± 160	- 16,8
± 150	- 17,2
± 140	- 17,7
± 130	- 17,0
± 120	- 16,8
± 110	- 18,0
± 100	- 22,6
± 90	- 27,2
± 80	- 27,2
± 70	- 20,7
± 60	- 17,3
± 50	- 12,1
± 40	- 7,4
± 30	- 4,1
± 20	- 1,8
± 10	- 0,5
0	0,0

FIG. 4-5

CARACTERISTICA DE RADIACION HORIZONTAL
DE LA YAGUI DISEÑADA



Cabe observarse que la relación adelante-atrás - (front to back) es de 13,7 dB; así como medida la ganancia del sistema en prueba, con respecto a un dipolo, es de 7,1 dB.

4.6 DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICION DE LOS LOBULOS DE RADIACION.

1.- Escoger la altura a la que deben ir las antenas con respecto al suelo, parte del compromiso existente - entre el evitar reflexión debido a esta superficie y el permitir que la antena esté lo más horizontal posible, debido al pandeo de un soporte vertical excesivamente largo para la antena.

En mediciones previas a la definitiva, se nota que una cierta inclinación del sistema en prueba incide en la simetría de las características de radiación.

2.- El viento dificulta las mediciones y es necesario esperar a que amaine para poder efectuar lecturas confiables con el indicador, ya que inclusive en la posición de referencia (0°), o de máxima recepción, a pe

sar de lo pronunciado de ella, la oscilación de la aguja del indicador es de notable magnitud.

3.- La falta de un buen potencial de referencia - (tierra) es un factor que afecta especialmente a los - cables coaxiales usados en las diferentes conexiones y el hecho de acercarse o alejarse de uno de ellos hace que las lecturas varíen, debiendo ponerse un cuidado - especial para evitar estos acercamientos accidentales a los cables.

4.- Existe cierta deformación en el lóbulo secundario. Se debe principalmente a la presencia de mástiles metálicos en las cercanías de los sitios de medición.

5.- A pesar de todo, se considera que tomando las de bidas precauciones, como en el presente caso, los resul tados obtenidos son satisfactorios, pues la ganancia de $7,1$ [¶] dB está dentro del rango esperado para un sistema Yagi de cuatro elementos; también, a pesar de no haber se seguido el criterio de máxima ganancia. Se conside ra que la relación adelante-atrás es bastante buena pa-

¶ Guilbert, Ch., La Práctica de Antenas, MARCOMBO S.A., Barcelona, 1.967, Pag. 105.

ra el tipo de reflector usado, pues ello es consecuencia directa de la ganancia obtenida sobre el dipolo.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- HORE, KANTI, Notas de Propagación, 1.970.
- 2.- JORDAN, E. C. y BALMAIN, K. G., Electromagnetic Waves and Radiating Systems, Segunda Edición, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., - 1.968.
- 3.- HORE, KANTI, Notas de Antenas, 1.970.
- 4.- DEL PINO, EFRAIN, Notas de Antenas, 1.969.
- 5.- KING, R. W. P., The Theory of Linear Antennas, - Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1.956.
- 6.- JASIK, H., Antenna Engineering Handbook, Primera Edición, Mc Graw-Hill, Inc., U.S.A., 1.961.
- 7.- Guertler, R., Impedance Transformation in Folded Dipoles, Proceedings of the I.R.E., Septiembre, 1.950.

- 8.- SCOTT, R. E., Linear Circuits, Part-1, Time - Domain Analysis, Addison-Wesley World Student Series, Tokyo, Japan, 1.960.
- 9.- ORR, W. I., Beam Antenna Handbook, Segunda Edición, Radio Publications, Inc., Wilton, Conn., 1.955.
- 10.- KRAUS, J. D., Electromagnetismo, Primera Edición, El Ateneo, Buenos Aires, 1.960.
- 11.- RICAURTE, J., Estudio de Antenas con un Elemento Parásito, 1.971.
- 12.- GUILBERT, CH., La Práctica de Antenas, MARCOMBO S.A., Barcelona, 1.967.