

Diseño e Implementación de Antena de Cuadro para Radio Onda Media

Victor Cruz Ornetta, Christian Cobeñas, James Arellano, Eduardo Rodríguez, Paul Medina

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
 Instituto Nacional de Investigación y Capacitación en Telecomunicaciones, Lima, Perú
 Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú

RESUMEN: El presente artículo es fruto del trabajo teórico- experimental realizado en el INICTEL, para el desarrollo de antenas de cuadro. En este trabajo se presentan la base teórica, el diseño, la fabricación, y las pruebas realizadas para implementar una antena de lazo con funcionamiento comprobado en la banda de frecuencias de 430 kHz a 2000 kHz. con especificaciones comparables a las antenas de tipo comercial cuyos costos están en el orden de US \$ 2000.

I. INTRODUCCION

Dentro de los sistemas de telecomunicaciones las antenas ocupan un lugar muy importante, pues sin ellas las estaciones radioeléctricas no podrían funcionar. Es por eso que el INICTEL desde el año 2001 viene realizando el diseño de antenas para varios rangos de frecuencia entre ellas antenas yagi para VHF y UHF, log-periódicas para VHF y UHF las cuales en las pruebas de funcionamiento han demostrado cumplir con requisitos exigidos a los parámetros básicos de una antena de alta calidad, siendo su funcionamiento muy parecido a modelos comerciales y finalmente las antenas en el año 2005 se inicia la fabricación de antenas tipo cuadro para la banda de frecuencias de Onda Media (MW). Actualmente dichas antenas son utilizadas para las labores de capacitación, investigación, mediciones y consultoría.

II. TEORIA

Una Antena de Lazo es un circuito LC sintonizado para una frecuencia en particular. Cuando la impedancia inductiva (X_L) es igual a la impedancia capacitiva (X_C), la antena entrara en resonancia. La frecuencia de resonancia es expresada en la siguiente formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots Ec(1)$$

Un diagrama de una antena de lazo es mostrado en la figura 1, consistiendo de un enrollado o bobina inductiva, el cual es soportado sobre un cuadro, y un capacitor variable con el cual se logra la sintonización a diferentes frecuencias, también se emplea una bobina secundaria de sensado que puede ser conectada al receptor. En muchos casos esta bobina secundaria no seria necesaria si se coloca el receptor cerca de la antena debido a que ocurrirá un acoplamiento mutuo entre la antena de lazo y la antena interna del receptor.

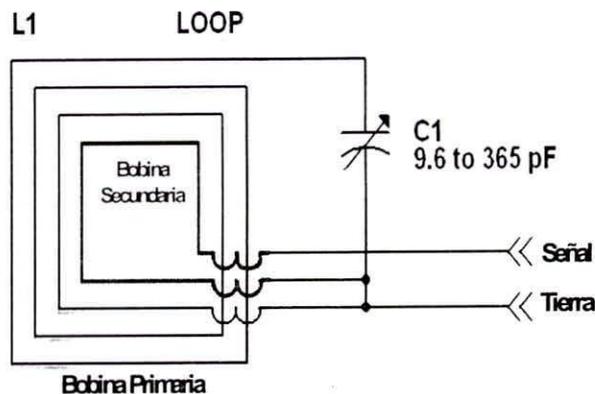


Fig. 1. Diagrama de una antena de lazo

Dentro de las antenas de de lazo la geometría de la antena puede ser de distintas formas, p. ej. circular, rectangular, cuadrada, hexagonal, octagonal. Con lo cual se puede determinar la apertura efectiva de la antena, teniendo en cuenta que la máxima sensibilidad, se da para máxima apertura, donde la apertura efectiva para la antena de lazo es igual al área del lazo por el numero de vueltas $A_e = A \cdot N$

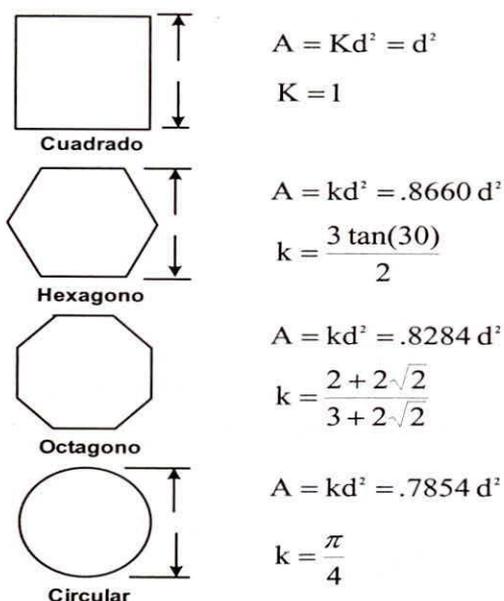


Fig. 2. Tipos de secciones de de una antena de lazo

Se puede observar que en antenas de diferente geometría pero con la misma altura (d) y un mismo numero de vuelta (N), el lazo en forma cuadrangular presenta la mayor área y por lo tanto la mayor apertura efectiva.

A. PATRÓN DE RECEPCIÓN DE LA ANTENA DE LAZO

La radiación azimutal o patrón de recepción para una antena de lazo ideal tiene un patrón como el de figura 8, donde el lado más sensible del patrón esta orientado hacia los extremos de la antena, mientras los lados de menor recepción son los perpendiculares al plano formado por la antena.

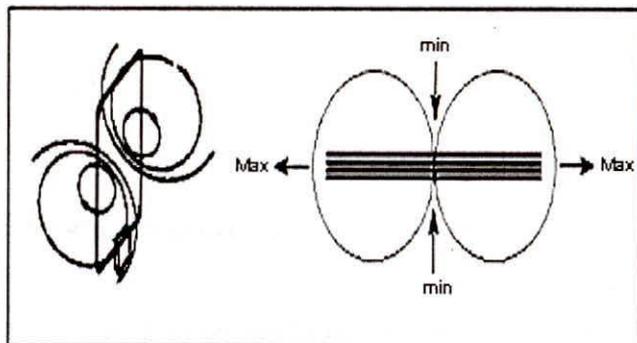


Fig. 3. Diagrama de radiación de una antena de lazo

B. CÁLCULOS DE LA INDUCTANCIA DEL LAZO

La inductancia de la bobina empleada en la antena puede ser determinada mediante el uso de formulas de manera que antes de implementar la bobina podemos saber cual será el valor esperado de inductancia, a continuación presentamos 2 formulas para un enrollado o bobina de geometría cuadrada, que luego podrá ser comparado con el valor obtenido en un medidor LCR.

Formula (Joe Carr):

$$L (\mu H) = 0.008 \times N^2 \times A \times \left[\ln \left(\frac{1.4142 \times A \times N}{(N+1) \times B} \right) + 0.3794 \times 2 \left(\frac{0.333 \times (N+1) \times B}{A \times N} \right) \right] \dots \dots \dots Ec(2)$$

Donde:

- L Inductancia en μH .
- A longitud de uno de los lados del lazo cuadrado en cm.
- B Profundidad del lazo
- N Número de vueltas

Formula 2

(Laboratorio de compatibilidad electromagnética Universidad de Missouri-Rolla):

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \left[-2(w+h) + 2\sqrt{h^2 + w^2} - hx \ln \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + w^2}}{w} \right) \dots - wx \ln \left(\frac{w + \sqrt{h^2 + w^2}}{h} \right) + hx \ln \left(\frac{2h}{a} \right) + wx \ln \left(\frac{2w}{a} \right) \right] \dots \dots Ec(3)$$

Donde:

L Inductancia del Lazo en H

N Número de vueltas

w Longitud del lazo en cm.

h Altura del lazo

a Radio de espaciamiento ente alambres (distancia entre cable / 2)

μ_r Permeabilidad relativa del medio.

μ_0 Permeabilidad de vacuuum,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}^2 \text{ m}^3 / \text{J} = 12.566370614 \cdot 10^{-7}$

C. RELACIÓN ENTRE LA SENSIBILIDAD Y EL TAMAÑO DEL LAZO

La siguiente grafica muestra los valores obtenidos para mediciones con antenas rectangulares de enrollado de borde, que varían desde una vuelta hasta 5 vueltas, pero que mantienen la misma inductancia y por lo tanto el mismo valor de capacitancia para resonar, las áreas de las antenas varían en un gran rango lo que implica que en este caso el área de apertura efectiva se va reduciendo según se aumenta el numero de vueltas, la intensidad de la señal recibida decrece en aproximadamente en 5 dB por vuelta.

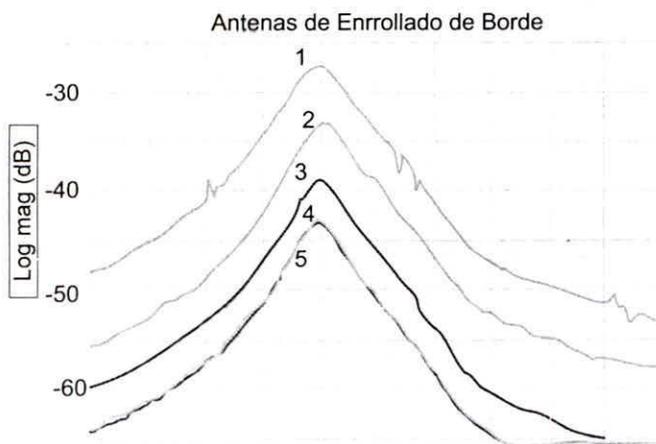


Gráfico 1. Mediciones en antenas rectangulares de enrollado de borde

D. VOLTAJE EN LOS EXTREMOS DE LA ESPIRA

La formula para cálculo del voltaje es la siguiente:

$$V = 2\pi \mu_0 N A^2 H_0 f \text{Cos}\theta \dots \text{Ec}(4)$$

$2\pi \mu_0$ es una constante

N es el número de vueltas.

A es la longitud de lado del lazo, en metros

H₀ es el campo magnético aplicado, en Ampere por metros

f es la frecuencia, en Hertz

Cosθ es el Coseno entre el eje del lazo y el campo

III. DISEÑO

La antena se debe diseñar para la banda de radiodifusión AM estándar de 525 kHz a 1715 kHz. Así que tomaremos tomamos un rango que sobrepase nuestra banda de interés 430 kHz a 2000 kHz.

Sabiendo que la capacitancia variable comercial que se tiene es 9.6 pF a 365 pF y retomando la formula de resonancia se observa que para un valor fijo de inductancia correspondiente a la bobina, la frecuencia de resonancia más alta se da cuando el valor de la capacitancia variable es el menor y la frecuencia de resonancia menor para el valor de capacitancia mayor.

Para una frecuencia de 430 kHz y el mayor valor de capacitancia 365 pF de la formula se obtiene se obtiene

$$430 \cdot 10^3 = 1 / (2\pi \sqrt{L \cdot 365 \cdot 10^{-12}});$$

$$\Rightarrow L = 375.3 \mu\text{H}$$

Tomamos el valor de L y calculamos la frecuencia máxima de resonancia con el valor mínimo del capacitor.

$$F = 1 / (2\pi \sqrt{(375.3 \cdot 10^{-6} \cdot 9.6 \cdot 10^{-12})}) \\ = 2651 \text{ kHz.}$$

Con lo que necesitamos obtener un valor de inductancia de 375 μH para cubrir aproximadamente un rango de 430 kHz hasta 2651 kHz.

Utilizando la *formula 2* de diseño para una antena de lazo cuadrada mencionadas anteriormente y eligiendo la longitud de la antena de modo que no sea muy pequeña provocando que tenga poca sensibilidad, ni muy grande con un mayor numero de vueltas para que sea fácil de transportar durante trabajo de campo, se tomo como base para los cálculos una longitud de 60cm, de lado, formando una espira de 15 vueltas, que de acuerdo al cable de audio estéreo utilizado nos da una profundidad de 3.9cm de lado.

$$L(\mu H) = 0.008 \times N^2 \times A \times \left[\ln \left(\frac{1.4142 \times N}{(N+1) \times B} \right) + 0.37942 \left(\frac{0.333 \times (N+1) \times B}{A \times N} \right) \right] \dots Ec(5)$$

$$A = 60 \text{ cm}, B = 3.9 \text{ cm}, N = 15$$

De la ecuación se obtiene $L = 369 \mu H$; un valor muy próximo al valor requerido en principio.

Usando un medidor LCR, se observa que la inductancia de la espira construida con las características usadas en la fórmula tiene un valor de $404 \mu H$ cercano al valor calculado, con lo que las frecuencias de resonancia usando el capacitor variable van desde 413 kHz hasta 2552 kHz.

A. CALCULO DEL VOLTAJE EN LOS EXTREMOS DE LA ESPIRA

De acuerdo a la fórmula presentada para cálculo del voltaje se observa que para una espira con una geometría determinada, el voltaje en sus terminales dependerá de la frecuencia de resonancia y de la intensidad del campo magnético, así como de la orientación de la antena la cual tomaremos como la de máxima recepción

$$\begin{aligned} 2\pi \mu_0 &= 7,89E-06 \\ A^2 &= 0,36 \\ N &= 15 \\ \text{Cos}\theta_{\max} &= 1 \end{aligned}$$

$$V = 4,26 \times 10^{-5} H_0 f \dots Ec(6)$$

Sin embargo este voltaje no sería el reflejado a la salida del conector N, debido a que la espira es balanceada, por lo que al utilizar un balun de 1:1 su voltaje en principio sería reducido debido a las pérdidas propias del balun además de la pérdidas de transferencia por acoplamiento con la impedancia del medidor de intensidad de campo.

Presentamos una tabla con los valores de voltaje calculados a la salida de la espira resonando a diferentes frecuencias y expuesta a diferentes intensidades de campo magnético.

f (kHz)	H (A/m)						
	0.26	0.24	0.22	0.18	0.14	0.1	0.06
580	6.4	5.9	5.4	4.5	3.5	2.5	1.5
620	6.9	6.3	5.8	4.8	3.7	2.6	1.6
660	7.3	6.8	6.2	5.1	3.9	2.8	1.7
700	7.8	7.2	6.6	5.4	4.2	3.0	1.8
740	8.2	7.6	6.9	5.7	4.4	3.2	1.9
780	8.6	8.0	7.3	6.0	4.7	3.3	2.0
820	9.1	8.4	7.7	6.3	4.9	3.5	2.1
860	9.5	8.8	8.1	6.6	5.1	3.7	2.2
900	10.0	9.2	8.4	6.9	5.4	3.8	2.3
940	10.4	9.6	8.8	7.2	5.6	4.0	2.4
980	10.9	10.0	9.2	7.5	5.9	4.2	2.5
1020	11.3	10.4	9.6	7.8	6.1	4.4	2.6
1060	11.7	10.8	9.9	8.1	6.3	4.5	2.7
1100	12.2	11.3	10.3	8.4	6.6	4.7	2.8
1140	12.6	11.7	10.7	8.7	6.8	4.9	2.9
1180	13.1	12.1	11.1	9.1	7.0	5.0	3.0
1220	13.5	12.5	11.4	9.4	7.3	5.2	3.1
1260	14.0	12.9	11.8	9.7	7.5	5.4	3.2
1300	14.4	13.3	12.2	10.0	7.8	5.5	3.3
1340	14.8	13.7	12.6	10.3	8.0	5.7	3.4
1380	15.3	14.1	12.9	10.6	8.2	5.9	3.5
1420	15.7	14.5	13.3	10.9	8.5	6.1	3.6
1460	16.2	14.9	13.7	11.2	8.7	6.2	3.7
1500	16.6	15.3	14.1	11.5	9.0	6.4	3.8

IV. FABRICACIÓN

A. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESPIRA.

Se utilizó un cable de audio-video estéreo estándar, se aprecia que este consta de 3 conductores cada uno con su respectiva malla de tierra, se tomó 5 tramos de dicho cable con una longitud de 241 cm. por tramo, colocando los extremos de cada tramo uno frente a otro, tal como se muestra en la figura.

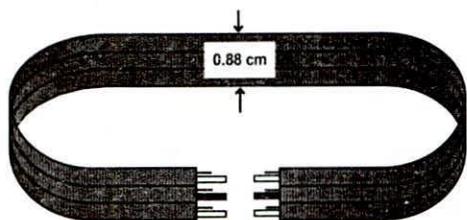


Fig. 4. Espira realizada en cable de audio- estándar

Luego se soldaron los extremos de los cables de acuerdo a la siguiente configuración de modo que se forme una espira de 15 vueltas, también se unieron los conductores correspondientes a las tierras por cada extremo con la finalidad de conectarla al blindaje externo de la antena. Se debe tener cuidado de conectar solo un extremo de modo que este blindaje interno no forme una espira cerrada.

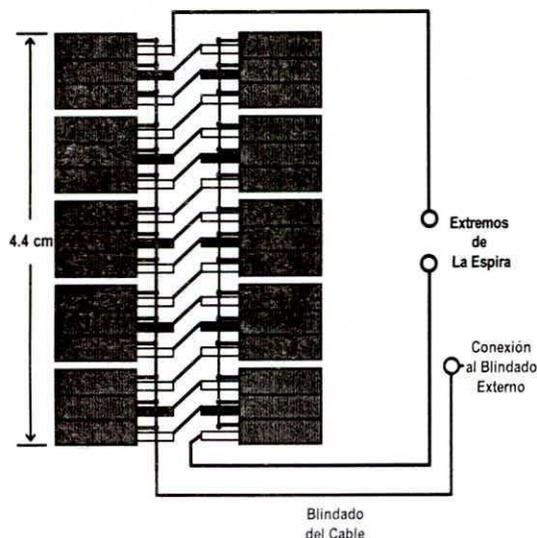


Fig. 5. Conexionado de una espira de una antena de lazo

B. BLINDAJE DE LA ANTENA

Las antenas de lazo responden primariamente a los componentes magnéticos y no a los componentes eléctricos además mejora sustancialmente la relación señal-ruido, dichas características son necesarias debido a que las antena requiere ser utilizada en distancias menores a 50 metros de una antena de radiodifusión AM, donde es común el acoplamiento de ruido eléctrico, con la finalidad de obtener tales características se blindo la antena implementada utilizando un rollo de papel aluminio de 28 cm. de ancho doblada por la mitad, de modo de obtener una

banda de 14 cm. de ancho con la cual se forro la espira. Se debe tener en cuenta que al igual que el blindaje interno formado por los conductores de tierra del cable de audio-video, el blindaje externo debe estar abierto en algún lado de modo que el blindaje por si mismo no forme una espira de una vuelta cortocircuitada.

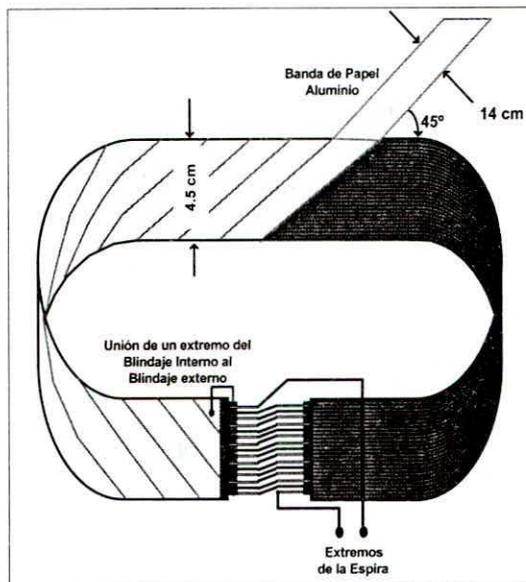


Fig. 6. Blindaje de la espira de una antena de lazo

C. CHASIS DE LA ANTENA

La estructura que soporta la espira blindada está formada por canaletas comúnmente utilizadas en el tendido de cable de redes de computadora en oficinas, para formar un marco cuadrado de 60 cm. de lado, por el cual interiormente pase la espira.

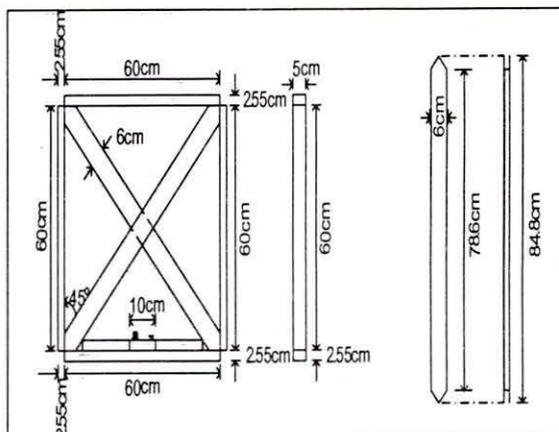


Fig. 7. Diagrama del chasis de la antena

D. IMPLEMENTACIÓN DEL BALUN

El uso de un balun es necesario debido a que los extremos de la espira en resonancia con el capacitor variable es una línea balanceada, la cual se quiere conectara un medidor de intensidad cuya entrada es una línea desbalanceada. El Balun implementado fue del tipo toroide como se muestra en el grafico, además del esquema de observa que el balun no transforma impedancia es decir, de relación 1:1.

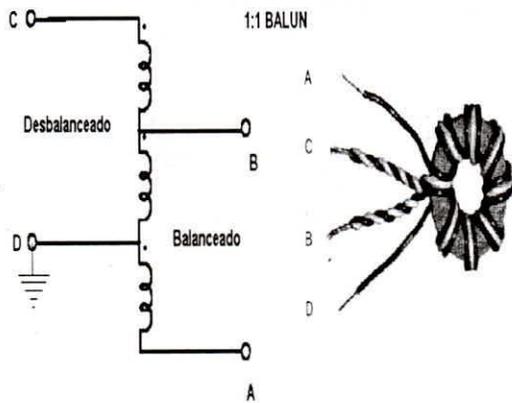


Fig. 8. Detalle del balun de la antena de lazo

E. ESQUEMA DE CONEXIONES

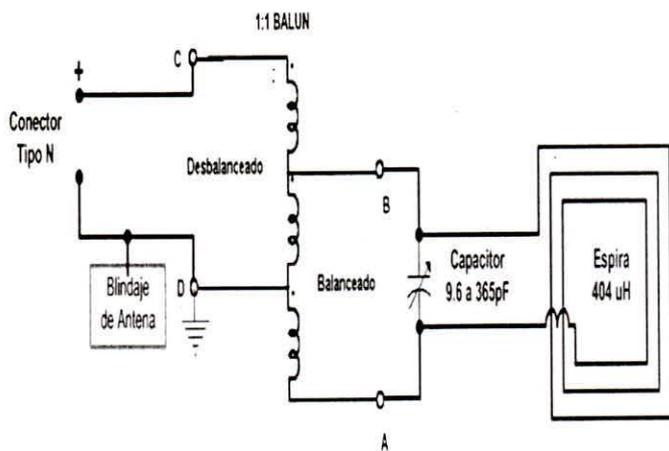


Fig. 9. Conexionado de una antena de lazo

ACABADO FINAL DE ANTENA

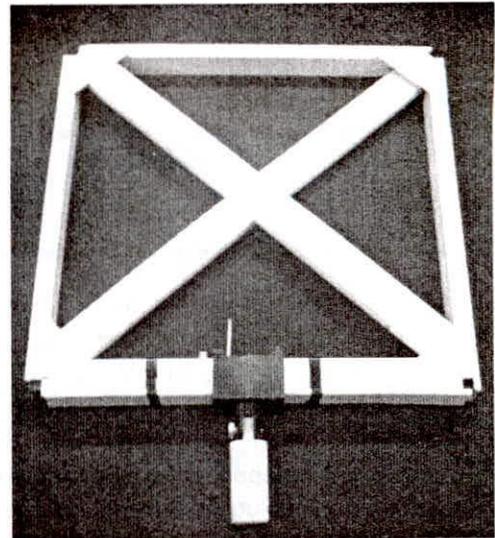


Foto 1. Vista Frontal de Antena

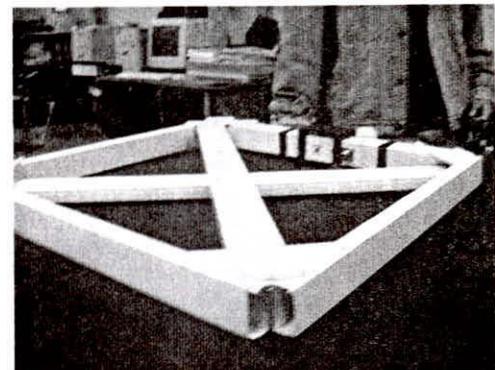


Foto 2. Vista Panorámica de Antena



Foto 3. Vista lateral de Antena

V. PRUEBAS Y AJUSTE

El objetivo de esta comparación es obtener un factor de conversión de la antena diseñada, el cual sea determinado de la medición voltaje a la salida de la antena evaluada a través de una impedancia específica

cuando es ubicada en un campo conocido, dicha impedancia es la del equipo con la que se esta midiendo el nivel de voltaje de salida (medidor de intensidad) y la intensidad de campo conocida a la que esta expuesta se obtiene utilizando el mismo medidor de intensidad pero trabajando con la antena integrada que posee dicho equipo y para la cual el medidor esta correctamente calibrado.

Debemos tener en cuenta que una antena puede ser calibrada por comparación con una antena estándar simple, sin embargo puede introducirse errores debido a la diferencia en la directividad de las antenas, no siendo este el caso debido a que la antena integrada al medidor de intensidad así como la antena implementada son antenas de cuadro con similar directividad.

Otro aspecto a tomar en cuenta es que cuando una antena de lazo blindada es usada para mediciones de intensidad de campo para frecuencias de onda media, la componente de intensidad de campo magnético (H) es la que esta siendo medida, sin embargo frecuentemente los medidores de intensidad expresan los resultados en V/m es decir en campo eléctrico (E), basándose en la siguiente expresión, la cual no necesariamente es aplicable, excepto para ondas planas polarizadas linealmente en espacio libre (Campo Lejano):

$$E = \eta_0 H \dots Ec(7)$$

donde η_0 = impedancia del vacío, 377Ω

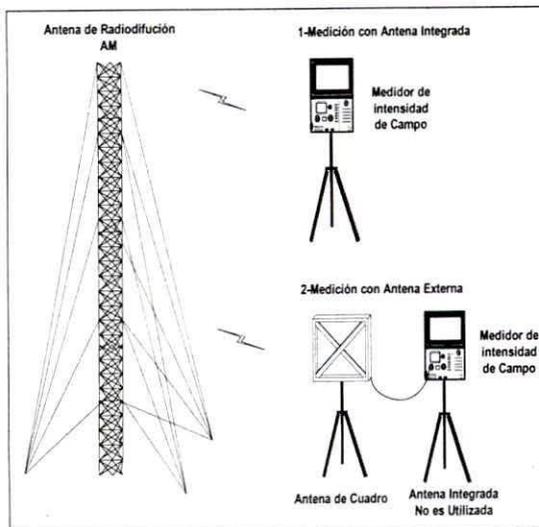


Fig. 10. Esquema de Mediciones Comparativas

A. TABLAS DE MEDICIONES

Las siguientes tablas presentan el Factor Promedio de Conversión de la antena calculado de las comparaciones en cada punto entre el valor obtenido con medidor de intensidad de campo usando su antena

integrada y usando la antena externa, pero expresado en campo magnético. Así mismo se presenta la desviación o variación del factor obtenido en cada punto con respecto al factor de conversión promedio.

Para algunos puntos de medición cercanos a la fuente radiante donde los campos presentes superaban la escala de medición del equipo cuando fue utilizada la antena integrada que posee dicho equipo, se hizo uso del medidor únicamente con la antena implementada, de modo que usando el valor de conversión de la antena se pudo estimar el valor de campo magnético en dichos puntos.

**TABLA II
RESUMEN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN**

Emisora (Radio)	Frec (kHz)	#de Mediciones	Factor de Conversión Promedio	Rango de Desviación (%)
Inca	540	6	989.4	-3.2 - 1.0
Cora	600	13	841.4	-8.3- 12.9
Pacifico	640	11	764.6	-7.5- 8.-1
R700	700	9	676.6	-2.9- 3.5
RPP	730	3	638.3	-4.0- 5.2
Radioma	760	13	633.6	-5.3- 5.7
Victoria	780	10	629.5	-13.3- 5.,
Naciona	850	9	544.6	-8.2- 7.6
Unión	880	6	511.7	-7.4- 9.9
Modern	930	4	449.3	-7.5- 7.8
Panamerica	960	6	395.6	-6.4- 9.6
Disco	990	14	371.6	28.2- 16.0
Miraflor	1250	11	236.1	-9.7- 11.2
La Cróni	1320	14	202.0	-9.1- 9.1
CPN	1470	8	161.3	-11.1- 12.7
Sta. Ros	1500	4	152.6	-4.9- 4,2

Se observa que se han realizado un total de 141 mediciones y que por cada estación se han realizado entre 4 a 14 mediciones las que se presentan en la tabla resumen obteniéndose para cada estación un factor distinto, cuyo valor va decreciendo a medida que la frecuencia de emisión aumenta.

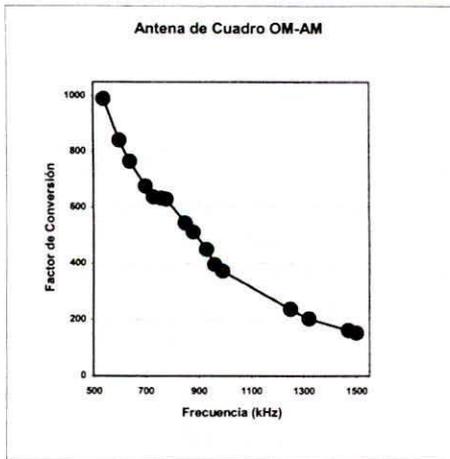


Gráfico 2 . Factor de conversión medido

B. CUADRO IMPLEMENTADA

Los factores de conversión obtenidos se pueden ajustar a la curva de color verde, la cual presenta un factor de determinación de 0.9951 lo que nos permite obtener con una buena estimación un factor de conversión para cualquier frecuencia entre 500 kHz y 1500 kHz, igual a la expresión:

$$y = 2710.5e^{-0.0019x} \dots Ec(8)$$

donde :

- y: Factor de Conversión
- x: Frecuencia (kHz)

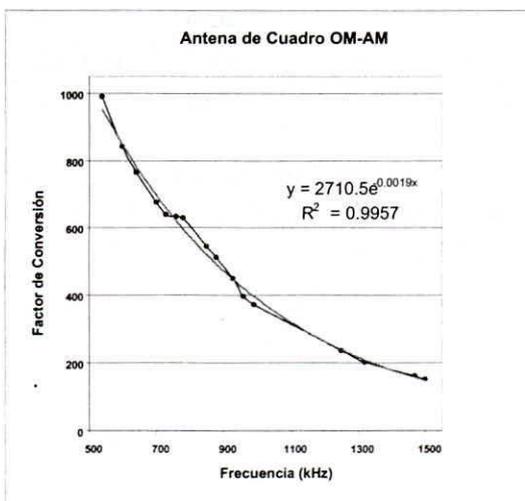


Gráfico 3. Curva de ajuste- factores de conversión

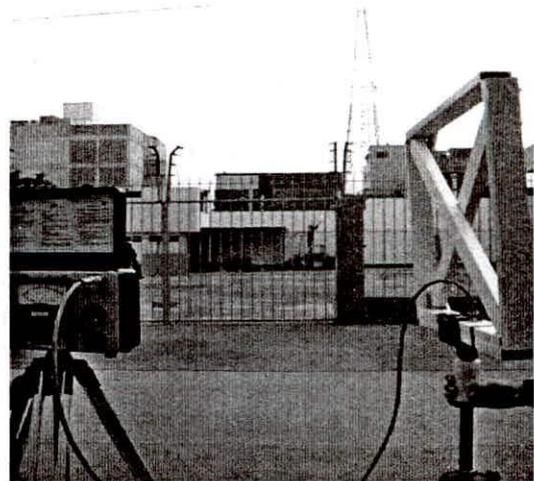


Foto 4. Medición Comparativa en Radio R700

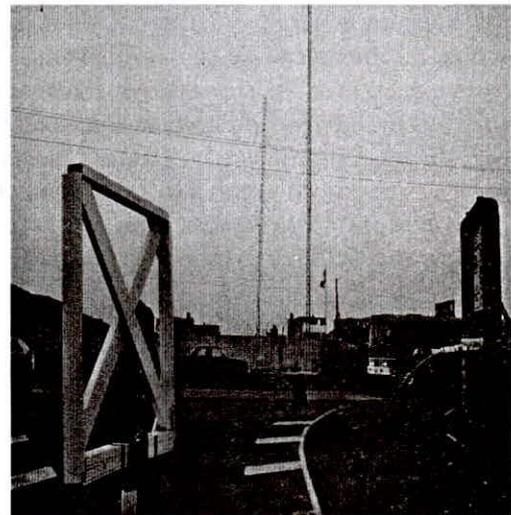


Foto 5. Medición Comparativa en Radio La Crónica

VI. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- La antena fabricada cumple con las especificaciones necesarias para una adecuada calidad de la operación
- Esta antena es de tipo pasivo por lo tanto permite realizar mediciones en puntos más cercanos a la fuente de radiaciones, lo que es muy útil para la evaluación de exposiciones de tipo ocupacional.
- El costo de la antena es mucho menor que el de una antena comercial pero es necesario tener los equipos de prueba para poder ajustar su operación.

- El conector que se utiliza la antena tiene que ser de buena calidad para poder resistir la operación en campo y evitar deterioro del mismo que implicaría un incremento de los costos de mantenimiento.
- El conector que se utiliza la antena tiene que ser de buena calidad para poder resistir la operación en campo de la antena significa un ahorro en la inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento

REFERENCIAS

- [1] Johnson R, *Antenna Engineering Handbook*, 3ª ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1997.
- [2] Kraus J, Marhefka R, *Antennas for all Applications*, 3ª ed., McGraw- Hill, Higher Education, Nueva York, 2002.
- [3] Mindspring Group. *Design AM Loop Antenna* [sitio de Internet]. Disponible en http://www.mindspring.com/~loop_antenna Fecha de acceso 20 de mayo de 2005.
- [4] W8JI Group. *Radation and Fields* [sitio de Internet]. Disponible en http://www.w8ji.com/radiation_and_fields.htm . Fecha de acceso 03 de junio de 2005
- [5] *HF Antenna Design Notes. Technical Application Report* [sitio de Internet]. Disponible en www.ti.com/rfid/docs/manuals/appNotes/HFAntennaDesignNotes.pdf. Fecha de acceso 06 de junio de 2005.