

CENAM. Derechos Reservados 2007

- Definición de una antena

26/06/2007

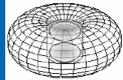
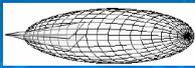
ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Clasificación de las antenas

Por la dirección en la que radian o reciben ondas electromagnéticas, las antenas se pueden clasificar en los tipos siguientes:

CENAM. Derechos Reservados 2007.

Tipo de antena	Características de radiación	Ejemplo	Forma de la radiación
Isotrópica	Antena que radia uniformemente en todas direcciones.	No existe tal radiador	
Omnidireccional	Antena que radia uniformemente en un plano.	Monopolos, dipolos y bicónicas	
Direccional	Antena que concentra la mayor parte de su radiación en una dirección particular.	Cornetas, reflectores, log-periódicas y Yagis	

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Isotrópica: Esta es una antena hipotética y sin pérdidas que radia uniformemente en todas direcciones, de manera que el campo eléctrico en cualquier punto sobre una esfera, con la antena en su centro, tiene la misma intensidad. Esta antena no puede realizarse en la práctica, ya que para poder radiar uniformemente en todas direcciones la antena tendría que ser una fuente puntual, pero es adecuada como modelo de referencia para la comparación de antenas.

Omnidireccional: Esta es una antena que radia uniformemente en un plano. Ejemplos de estas antenas son los monopolos, dipolos, y bicónicas.

Direccional: Esta es una antena que concentra la mayor parte de su radiación en una dirección particular. Ejemplos de estas antenas son las cornetas, los reflectores, las logarítmico-periódicas y las Yagui.

CENAM. Derechos Reservados 2007

- Principales características de una antena

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Principales características de una antena

Existen varias características físicas y eléctricas que nos permiten evaluar el desempeño de una antena. Algunas de las más importantes son las siguientes:

- Diagrama de radiación
- Impedancia de entrada
- Coefficiente de reflexión
- Directividad
- Ganancia
- Ancho de banda
- Polarización de la antena
- Factor de antena

No todas las características aplican a todos los tipos de antenas.

Las mediciones de las características se hacen en dos planos principales, el azimutal u horizontal y el de elevación o vertical.

CENAM. Derechos Reservados 2007

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

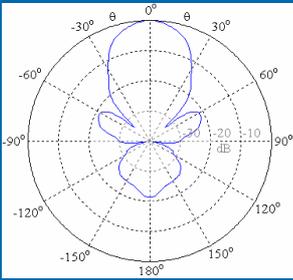


No todas las características aplican a todos los tipos de antenas. De hecho, la aplicación particular es la que establece cuales de estas características deben considerarse como importantes. Más aún, la antena se diseña para comportarse de cierta manera en un sistema de medición particular.

Las características de radiación de una antena se miden en dos planos principalmente. Estos planos son conocidos como el plano azimutal y el plano de elevación y pueden considerarse como los planos horizontal y vertical, respectivamente, respecto al plano de referencia o de tierra. Los ángulos en el plano azimutal se denotan convencionalmente por la letra griega phi, ϕ , y en el plano de elevación por la letra griega theta, θ . Algunas características tales como ganancia en la dirección *boresight*, donde los planos azimutal y de elevación se interceptan, pueden tener sólo un valor.

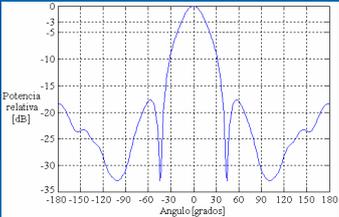
Diagrama de radiación

CENAM. Derechos Reservados 2007.



Gráfica en coordenadas polares

Representación grafica en dos o tres dimensiones de la manera como se distribuye la energía radiada por una antena, en función de la posición angular θ , ϕ .



Gráfica en coordenadas rectangulares

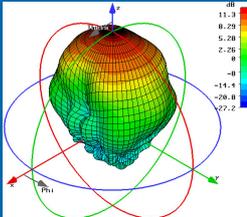


Diagrama de radiación en 3D

- ✓ Se asocia a una antena transmisora, pero aplica de la misma forma en una antena receptora.
- ✓ Es peculiar al tipo de antena.
- ✓ Se mide en la región de campo lejano y en los dos planos principales.
- ✓ Se gráfica en términos de potencia relativa.
- ✓ Se gráfica usando coordenadas rectangulares o polares.

26/06/2007 ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007 

Aunque el diagrama de radiación se identifica con una antena que transmite, las mismas propiedades aplican a una antena en el modo de recepción. Esto se debe a que las antenas son dispositivos recíprocos, esto es, que radian o captan energía electromagnética de la misma manera.

El diagrama de radiación es peculiar al tipo de antena, a sus características eléctricas y a sus dimensiones físicas. Se mide a una distancia constante en la región de campo lejano de la antena en los dos planos principales. Se gráfica en términos de potencia relativa, es decir la potencia radiada se gráfica como un valor normalizado con respecto a la potencia en la dirección de intensidad máxima. La potencia en la posición de radiación más intensa se refiere como 0 dB, de ahí que la potencia en todas las demás direcciones resulte en un valor negativo.

Se pueden graficar usando coordenadas rectangulares o polares. Las gráficas rectangulares se pueden leer con mayor facilidad, puesto que la escala angular se puede extender, pero las gráficas polares dan una representación pictórica.

Impedancia de entrada (Z_a)

Es la que se mide en las terminales del puerto de entrada de la antena y usualmente es compleja.

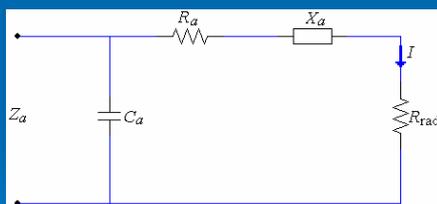
$$Z_a = R_T + jX_T$$

Parte real
(resistiva)

Parte imaginaria
(reactiva)

Componentes de la impedancia

- ✓ Auto-impedancia
- ✓ Impedancia mutua



Modelo eléctrico equivalente de una antena

- R_a - pérdidas en forma de calor (efecto Joule)
- X_a - inductancia o capacitancia de la estructura y otros efectos como impedancia mutua entre elementos
- C_a - capacitancia parásita en las terminales de entrada
- R_{rad} - no es una componente física pero sirve para calcular la potencia total radiada (P_{rad})

$$P_{rad} = I^2 R_{rad}$$

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



La impedancia de entrada usualmente es compleja y sólo en el caso ideal es puramente resistiva, esto es, no tendría ningún componente reactivo tal como inductancia o capacitancia. En la práctica, la impedancia total de la antena, Z_a , se compone de una auto-impedancia y de una impedancia mutua. La auto-impedancia es la impedancia que sería medida en las terminales de la antena cuando está en un espacio libre de interacciones, es decir que no haya otras antenas u objetos reflejantes en la vecindad. La impedancia mutua considera el acoplamiento entre la antena y cualquier otra fuente incluyendo un plano de tierra. Cuando la antena esta lo suficientemente aislada de otros objetos, esta impedancia mutua tiende a cero.

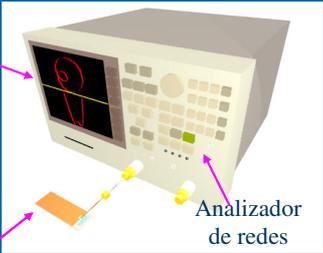
La impedancia de entrada puede representarse con un modelo eléctrico equivalente. Donde la resistencia R_a considera las pérdidas por efecto Joule en la estructura de la antena, la reactancia X_a modela la inductancia o capacitancia de la antena y otros efectos en la estructura tales como la impedancia mutua entre elementos de la estructura y C_a , representa la capacitancia parásita entre las terminales de entrada de la antena. Para modelar el mecanismo de radiación (la cantidad de potencia radiada), se usa la resistencia de radiación, R_{rad} , que aunque no es una componente física, en la mayoría de las situaciones resulta muy útil para calcular la potencia radiada P_{rad} .

La impedancia Z_a incluye todos los componentes mencionados y es la que se acopla a la línea de transmisión para lograr la máxima transferencia de potencia; debido a la parte reactiva, puede ser que esto sólo sea posible para un intervalo de frecuencias muy pequeño caracterizado por el ancho de banda de la antena. Así, la impedancia Z_a determina la eficiencia con la cual la antena actúa como transductor entre el medio de propagación y la línea de transmisión.

Coeficiente de reflexión (Γ)

Medida del grado de acoplamiento entre la impedancia de la antena, Z_a , y la impedancia característica de la línea de transmisión Z_0 .

CENAM. Derechos Reservados 2007



$\Gamma = 0 \rightarrow Z_a = Z_0$

$\Gamma \neq 0 \rightarrow P_{ref} = P_i (|\Gamma|^2)$

P_{ref} - potencia reflejada
 P_i - potencia aplicada al puerto de entrada de la antena
 $|\Gamma|$ - modulo del coeficiente de reflexión

$VSWR = 1 \rightarrow Z_a = Z_0$

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$

26/06/2007
ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007


Se dice que una antena se acopla a una línea de transmisión cuando su impedancia (Z_a) es igual a la impedancia característica de la línea (Z_0), de manera que:

$$Z_a = Z_0 \text{ y } \Gamma = 0$$

Si Z_a es puramente real, entonces se tiene un acoplamiento de tipo no reflectivo, o acoplamiento a impedancia característica, el cual resulta en una potencia absorbida máxima en la antena sin reflexión de energía de vuelta hacia el generador. Pero en la práctica la impedancia de la antena es cercana a Z_0 por lo que se produce reflexión de potencia. La cantidad de potencia reflejada, P_{ref} , se puede determinar con la relación siguiente:

$$P_{ref} = P_i (|\Gamma|^2)$$

donde P_i es la potencia aplicada en el puerto de entrada de la antena y P_{ref} es la potencia reflejada. Generalmente, los fabricantes de equipos y componentes sólo especifican un valor máximo de VSWR (razón de onda estacionaria de tensión), el cual está relacionado con el módulo del coeficiente de reflexión de la forma mostrada en la ecuación siguiente:

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$

CENAM. Derechos Reservados 2007

Ganancia (G)

La ganancia se define como la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada $U(\theta, \phi)$, a la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena, P_a , fuese radiada de manera isotrópica U_a .

$$D = \frac{U(\theta, \phi)}{U_a} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_a}$$

$$P_a = P_i (1 - |\Gamma|^2)$$

Diferencia principal entre directividad y ganancia: La directividad se basa en la potencia radiada, mientras que la ganancia se basa en la potencia aceptada. Puesto que no toda la potencia aceptada es radiada, por las pérdidas en la antena, las dos se relacionan por:

$$P_{\text{rad}} = e_{\text{cd}} P_a \quad \longrightarrow \quad G = e_{\text{cd}} \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{rad}}} = e_{\text{cd}} D$$

✓ En una antena sin pérdidas la ganancia es igual con la directividad

26/06/2007 ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Los términos directividad y ganancia se usan frecuentemente como sinónimos pero no son lo mismo. La ganancia tiene que ver con la eficiencia de la antena, mientras que la directividad no. La ganancia es aquella citada en las especificaciones, de manera que nos podemos referir a esta característica en lugar de la directividad.

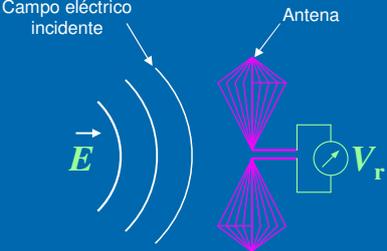
Generalmente la ganancia se cuantifica en decibeles referidos a una fuente isotrópica (dBi, i por isotrópico). La ganancia G_{dBi} expresada en decibeles está definida como:

$$G_{\text{dBi}} = 10 \log_{10} (G)$$

Las ganancias de antenas varían entre 2 dBi para un dipolo a alrededor de 70 dBi para una antena de una estación terrestre de satélite. Estos representan razones de ganancia de 1.5 y 10,000,000 respectivamente, comparados con los de una antena isotrópica.

CENAM. Derechos Reservados 2007.

Factor de antena (FA)



$$FA_{(1/m)} = \left| E_{(V/m)} / V_r(V) \right|$$

Donde:

- FA – Factor de antena (1/m)
- E – Campo eléctrico incidente (V/m)
- V_r – Tensión en las terminales de entrada de la antena (V)

El FA permite determinar la intensidad del campo eléctrico presente en un punto del espacio a partir de lecturas de tensión en las terminales de la antena.

Para determinar el factor de antena debe considerarse lo siguiente:

- ✓ Las pérdidas en la red de acoplamiento del balún.
- ✓ Las pérdidas debidas al desacoplamiento entre el balún y la línea de transmisión que conecta el balún al receptor.
- ✓ Las pérdidas debidas a la línea de transmisión entre el receptor y la antena.
- ✓ La cercanía de la antena con el plano de tierra.
- ✓ La frecuencia de medición.

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



En pocas palabras el FA es la función de transferencia de la antena.

Resulta que cuando se hacen mediciones de intensidad de campo eléctrico, E , el campo eléctrico incidente en los elementos de una antena induce una corriente y bajo esas circunstancias se puede medir una tensión en las terminales de la antena; de manera que si se quiere conocer la intensidad del campo eléctrico en ese punto del espacio es necesario saber como se relaciona el campo eléctrico incidente con la tensión registrada en las terminales de entrada de la antena. A la función que nos dice cómo es esta relación se le conoce como factor de antena y se define como el cociente del campo eléctrico incidente a la tensión en las terminales de entrada de la antena.

Las unidades del FA son 1/m o en dBs son dB/m.

El factor de antena se puede evaluar en condiciones de espacio libre de reflexiones, pero como las mediciones de EMC se realizan sobre un plano de tierra (o superficie reflectora) es necesario conocer el FA a cierta altura sobre el plano de tierra

CENAM. Derechos Reservados 2007

- Teoría de antenas: regiones de emisión de las antenas

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



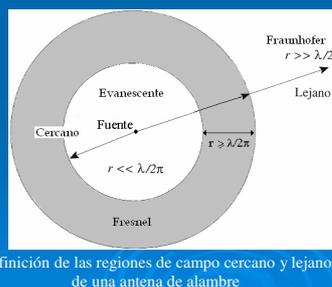
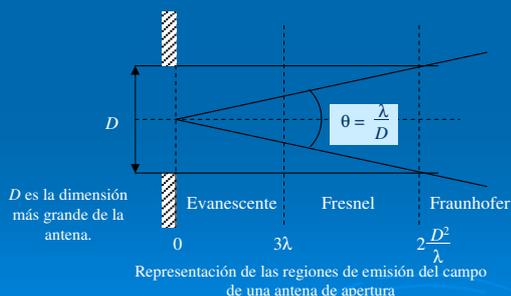
Teoría de antenas

Regiones de emisión de las antenas

El campo electromagnético asociado con una antena tiene propiedades que cambian gradualmente con la distancia a la antena (r).

- ✓ Región de campo cercano reactiva (región del campo evanescente)
- ✓ Región de campo cercano radiante (región de Fresnel)
- ✓ Región de campo lejano (región de Fraunhofer)

Las transiciones entre las regiones son graduales, lo mismo que sus fronteras.



26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Región de campo evanescente: Esta es la región más cercana a la antena. En esta zona, la componente reactiva de la energía electromagnética es dominante y decae muy rápidamente con la distancia. La región evanescente incluye tanto energía que no se propaga (reactiva) como energía en propagación (radiante). Esta región se extiende desde la superficie o abertura de la antena hasta una distancia de unas cuantas longitudes de onda, donde se supone que los campos reactivos son iguales a cero.

Región de Fresnel: Esta es la región comprendida entre la región del campo evanescente y la región del campo lejano. En esta zona la componente radiante de la energía electromagnética es la predominante y las densidades promedio de energía permanecen constantes a diferentes distancias de la antena, aun cuando pueden existir fluctuaciones de energía muy localizadas. En la región de campo cercano, pues, se considera que el flujo de energía casi no tiene dispersión.

Región de campo lejano o de Fraunhofer: La región de campo lejano es la zona del espacio donde las ondas esféricas radiadas por una antena pueden aproximarse como ondas planas, sin variación en el plano transversal a la dirección de propagación. La distribución angular relativa no varía con la distancia, en tanto que la potencia radiada por la antena decae conforme al inverso del cuadrado de la distancia. La región de campo lejano se extiende hasta el infinito.

CENAM. Derechos Reservados 2007

- Antenas para frecuencias menores a 1 MHz

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

Antenas para frecuencias menores a 1 MHz

- ✓ En frecuencias <1 MHz, Las antenas son fracciones de longitud de onda para que sean manejables físicamente ya que la longitud de onda es mayor a 300 m.
- ✓ Cómo las distancias de medición son de pocos metros, entonces se opera en la región de campo cercano.
- ✓ En la zona de campo cercano, la impedancia intrínseca de la onda emitida puede ser mayor o menor que en la región de campo lejano (377Ω) según el tipo de radiador.

CENAM. Derechos Reservados 2007

Tipos de Antenas

- Campo magnético
 - ✓ Lazos
- Campo eléctrico
 - ✓ Dipolos cortos
 - ✓ Monopolos cortos

Las antenas pueden ser:

- ✓ Pasivas
- ✓ Activas

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

En la región de campo cercano de fuentes de campo magnético, como los lazos, las ondas radiadas presentan impedancia baja e inducen corrientes altas. Por el contrario, en el campo cercano de fuentes de campo eléctrico, como los monopolos y dipolos, las ondas radiadas tienen impedancias altas e inducen corrientes bajas.

Las antenas que se utilizan en estas frecuencias son antenas como los dipolos cortos, los monopolos cortos y los lazos. Los dipolos se emplean para recepción principalmente, mientras que los monopolos y los lazos se aprovechan tanto para transmisión como para recepción.

Las antenas pueden ser pasivas o activas. En las antenas activas se combinan las características del detector de campo eléctrico con uno o varios elementos activos de manera tal que es posible tener mayor ganancia, incrementar el ancho de banda y transformar su impedancia. Otras características de las antenas activas es que son más pequeñas que su contraparte pasivo, pero no pueden utilizarse para transmisión.

Dipolo y monopolo cortos

Dipolo corto:

- ✓ Su longitud eléctrica es menor a $\lambda/4$
- ✓ Se emplean para medición de campo eléctrico y como patrones para calibrar antenas
- ✓ Comúnmente, requieren de un balún para acoplarse a la línea de alimentación



Monopolo corto:

- ✓ Su longitud eléctrica es menor a $\lambda/8$
- ✓ Se emplean para medición y generación de campo eléctrico
- ✓ Los monopolos delgados son independientes del diámetro del plano de tierra
- ✓ Son de ganancia pequeña por lo que se convierten en antenas activas



Los monopolos se alimentan mediante una línea coaxial con el conductor central conectado a la antena y el conductor exterior a un plano de tierra. A los monopolos delgados, es decir aquellos con radio mucho menor que su longitud, se les considera como independientes del plano de tierra, pero para dipolos muy gruesos como los rodillos la distribución de corriente en la antena depende del radio del plano de tierra.

Es muy común que los monopolos cortos, al ser antenas con ganancia muy baja, sean transformados en antenas activas para aumentar su ganancia y aprovechar el hecho de que la impedancia de entrada del equipo de medición es de 50Ω . En las antenas activas se combinan las características del detector de campo eléctrico con uno o varios elementos activos de manera tal que es posible tener mayor ganancia, incrementar el ancho de banda y transformar su impedancia.

CENAM. Derechos Reservados 2007

- Antenas para frecuencias mayores a 1 MHz

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Antenas para frecuencias mayores a 1 MHz

- ✓ En este intervalo de frecuencias es común utilizar antenas de alambre y de apertura.
- ✓ Como las longitudes de onda a 1 GHz son de 30 cm, entonces es factible emplear dipolos y monopolos sintonizables.

CENAM. Derechos Reservados 2007

Tipos de Antenas

- Alambre
 - ✓ Dipolos
 - ✓ Sintonizados fijos/ajustables
 - ✓ Variantes (bicónica)
 - ✓ Arreglo logarítmico periódico
 - ✓ Monopolos
 - ✓ Sintonizables
 - ✓ Lazos
 - ✓ Logarítmica espiral cónica
- Apertura
 - ✓ Cornetas piramidales
 - ✓ Cornetas piramidales con crestas

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

Los dipolos pueden ser sintonizados o de banda ancha y aquellos con elementos en forma de cono (antena bicónica). Estas antenas emplean baluns de banda ancha o de banda angosta según sea el caso para lograr el acoplamiento con los sistemas de medición.

Por encima de los 100 MHz es más común utilizar arreglos de dipolos y antenas de abertura, como las cornetas con y sin crestas, debido a que tienen mayor ganancia que el dipolo simple, pero como tienen diagrama de radiación angosto no pueden usarse para medición de EMI a distancias cortas del dispositivo bajo inspección (DUT). También se utilizan antenas independientes de la frecuencia como el arreglo de dipolos logarítmico periódico (LPDA) y la antena logarítmica espiral cónica.

Dipolo sintonizado o resonante

Un dipolo entra en resonancia cuando su longitud es de aproximadamente $\frac{1}{2} \lambda$, en este caso se tiene transferencia máxima de potencia, ya que la impedancia es puramente resistiva ($73,2 \Omega$).

CENAM. Derechos Reservados 2007



- ✓ Se utilizan como antenas de referencia para mediciones de campo eléctrico.
- ✓ Sus aplicaciones son en mediciones de IEM, para monitoreo del espectro radioeléctrico, para mediciones de atenuación de sitio y para calibración del factor de antena.
- ✓ La longitud de brazos del dipolo pueden ser fijos o ajustables a $\lambda/2$ de la frecuencia de operación, y se diseñan para operar en algún intervalo de frecuencias comprendido entre 30 MHz y 1 GHz
- ✓ En las versiones de banda ancha, la respuesta del balún es más amplia lo que produce menor resintonización alrededor de la frecuencia central.
- ✓ La cercanía con el plano de tierra altera su impedancia de entrada.
- ✓ No son muy utilizadas en mediciones a 1 m ni en espacios cerrados.

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



En la práctica, la condición de reactancia cero ocurre cuando la longitud de onda es de 0.49λ para alambres delgados, y de 0.5λ para alambres gruesos que son los que se utilizan para ampliar el ancho de banda.

La intensidad y forma del diagrama de radiación de estos dipolos se pueden calcular con mucha exactitud bajo condiciones controladas, por ejemplo que estén alejados del plano de tierra.

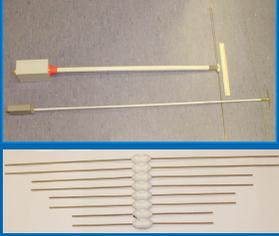
La cercanía de la antena con el plano de tierra, hace que el acoplamiento con el plano modifique su impedancia de entrada y estas variaciones pueden causar variaciones sensibles al factor de antena. La impedancia varía cíclicamente alrededor del valor esperado de 73Ω a medida que aumenta la distancia de separación.

Para frecuencias menores a 35 MHz y para mediciones en espacios cerrados se producen errores de medición debido a la longitud del dipolo ($> 5m$). Por es razón las antenas no son muy usadas en mediciones a 1 m ni en espacios cerrados, ya que los brazos quedan muy cerca de las paredes del lugar de medición y el dipolo se desintoniza.

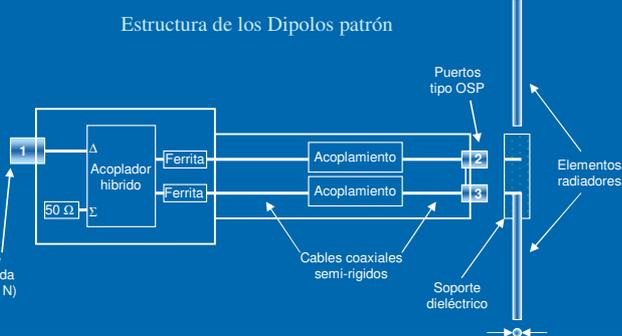
En las versiones de banda ancha y en el intervalo de interés, cada longitud fija de la antena se utiliza para cubrir de 2 a 3 octavas.

Dipolos patrón de $\frac{1}{2} \lambda$ del CENAM

Dipolos patrón del CENAM



Estructura de los Dipolos patrón



CENAM. Derechos Reservados 2007

La antena opera en el intervalo de 30 MHz a 1 GHz con un total de 24 dipolos resonantes

Aplicaciones

- ✓ 1.- Calibración de patrones de transferencia (antenas bicónicas y logarítmicas) para proveer servicios de calibración del FA en antenas para mediciones de EMC
- ✓ 2.- Validación de sitios de pruebas como CALTS (CISPR 16-1-5)
- ✓ 3.- Validación de sitios de pruebas como COMTS (CISPR 16-1-4)
- ✓ 4.- Comparaciones con otros sitios de referencia nacionales

26/06/2007 ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Las características eléctricas de las antenas del tipo dipolo resonantes de media longitud de onda son calculables a partir de sus dimensiones físicas, ya sea en un espacio libre de reflexiones o sobre un plano de tierra. Está la razón por lo cual estas antenas se utilizan como patrones para la calibración del FA y como antenas de referencia para evaluar el desempeño de sitios de prueba.

Básicamente se componen de dos grandes partes, el balún y los elementos radiadores. El balún es el dispositivo que nos permite conectar el cable que viene del generador con los elementos radiadores, se le considera un dispositivo de tres puertos, en el puerto uno se conecta la señal del generador a través de un conector tipo N, en los puertos 2 y 3 se conectan los elementos radiadores a través de conectores tipo OSP, y este dispositivo se caracteriza a través de sus parámetros de dispersión medidos como una red de 3 puertos. Este balún se compone de un acoplador híbrido de 180°, de líneas de transmisión rígidas y de elementos de acoplamiento para mantener la diferencia de fases en los puertos OSP lo más cercanas a 180°.

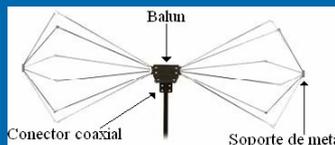
Los elementos radiadores son del tipo dipolo resonante de media longitud de onda cuyas dimensiones dependen de la frecuencia a la cual se quiera entonar la antena, y cuentan con soportes de material dieléctrico que sirven para sujetarlos y mantener su alineación.

Bicónica

Es una variante de los dipolos con elementos radiadores en forma de un cono.

CENAM. Derechos Reservados 2007

- ✓ Se emplea para medir campo eléctrico en el intervalo de 20 MHz a 300 MHz.
- ✓ Puede utilizarse en distancias tan cercanas como 1 m.
- ✓ Puede manejar potencias altas (adecuadas para mediciones de inmunidad).
- ✓ El modelo más común tiene elementos en forma de rejilla de longitud $\approx 1.4\text{m}$ (MIL-STD-461). Su principal problema es la resonancia a 287 MHz lo que puede incrementar el FA hasta en 8 dB.
- ✓ Schwarzbeck introdujo el modelo de una sola varilla lateral, la cual suprime la resonancia en 287 MHz.



Antena bicónica calculable



Antena bicónica Schwarzbeck

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Esta antena es una variante de los dipolos pues sus elementos radiadores tienen la forma de un cono, esto hecho permite ampliar el ancho de banda del dipolo.

Las antenas bicónicas se emplea como patrones de medición de campo eléctrico en el intervalo de 20 MHz a 300 MHz y tienen la ventaja de que pueden utilizarse a distancias de medición tan cercanas como 1 m entre su centro y la fuente de radiación o de medición. Además de que pueden manejar potencia altas lo que las hace apropiadas para mediciones de inmunidad.

CENAM. Derechos Reservados 2007

- Servicios de calibración para antenas de EMC

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

Calibración de antenas para EMC



¿Qué es lo que se les calibra a las antenas para compatibilidad electromagnética?

- El factor de antena y la ganancia de una antena se pueden medir y en algunos casos se pueden calcular.

Las antenas que se utilizan como patrones de factor de antena son los dipolos resonantes de media longitud de onda, las bicónicas y las logarítmico periódicas.

Las antenas que se utilizan como patrones de ganancia son las cornetas piramidales sin crestas y las antenas DRGH.

CENAM. Derechos Reservados 2007.

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



En esta sección se aborda la calibración de antenas para EMC a través de la medición de su factor de antena, de su ganancia y de la medición de su diagrama de radiación.

El factor de antena y la ganancia de una antena se pueden medir y en algunos casos se pueden calcular. La medición puede vincular la comparación del factor de antena (de la ganancia) con aquel (aquella) de una antena patrón o de referencia, de la cual se conoce con mucha exactitud los valores de la magnitud bajo calibración.

Las antenas utilizadas como patrones de factor de antena y de las que es posible calcular su FA con muy alta exactitud son los dipolo sintonizables de media longitud de onda. Estos dipolos a su vez se emplean para calibrar patrones de banda ancha como son las antenas bicónicas y las logarítmico periódicas.

Las antenas utilizadas como de ganancia patrón y de las que es posible calcular su ganancia con muy alta exactitud son las cornetas piramidales sin crestas. Estas cornetas a su vez se emplean para calibrar patrones de banda ancha como son las antenas DRGH.

Calibración del Factor de Antena

✓ La medición del FA puede hacerse con dos métodos diferentes, de los cuales se desprenden varias técnicas:

CENAM. Derechos Reservados 2007

Métodos para la medición del factor de antena

- Métodos absolutos
 - De las tres antenas
 - De las dos antenas (con antenas similares)
- Métodos por comparación
 - De las dos antenas (con antenas no necesariamente similares)
 - De la antena patrón

✓ Dadas las frecuencias de operación de las antenas de alambre, el principio de medición requiere de un plano de tierra reflector y de mediciones de atenuación de sitio para poder obtener el FA.

26/06/2007
ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Existen dos métodos básicos para medir el factor de antena. Uno de ellos se basa en mediciones absolutas del FA y el otro se basa en comparar el valor medido con el que se obtendría con una antena de referencia.

Los métodos derivados de mediciones absolutas se emplean para calibrar antenas que se utilizan como antenas patrón o de referencia principalmente. Estos métodos no requieren conocimiento previo de los valores del FA para poder determinar este parámetro.

Los métodos por comparación requieren utilizar antenas de referencia con valores de FA conocidos con mucha exactitud, para poder determinar el FA de la antena bajo calibración.

Las antenas patrón más ampliamente utilizadas para calibrar el FA, de antenas utilizadas en aplicaciones de EMC, son los dipolos resonantes de media longitud de onda. Recientemente, se comienza a utilizar antenas bicónicas calculables como las antenas de referencia para la determinación del FA.

Calibración del Factor de Antena: Principio de medición

Arreglo para la medición de atenuación de sitio

- ✓ El objetivo del principio de medición es determinar la atenuación de sitio (A_S) y con esa información calcular el factor de antena
- ✓ La exactitud con que se obtenga el factor de antena depende de la calidad del sitio de medición,
- ✓ El método requiere instalaciones especiales, pero no requiere instrumentación especial a excepción de un analizador de espectros y un generador de señal, o de un analizador vectorial de redes.

26/06/2007 ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

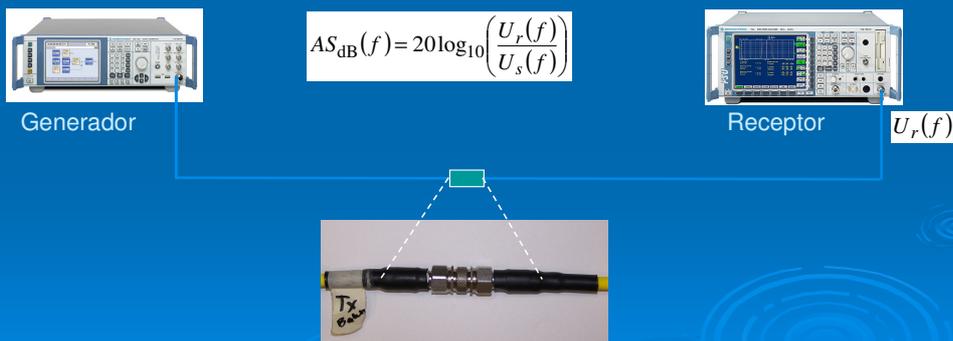
En este método las antenas son separadas una distancia R y colocadas sobre una superficie plana con conductividad ρ y constante dieléctrica σ . Un generador de señal con tensión de salida V_I alimenta la antena transmisora, que está localizada a una altura h_1 sobre el plano de tierra. La altura h_2 de la antena receptora en algunos casos se varía y en otros se mantiene fija, y la tensión de salida máxima (V_R) se mide con un receptor o analizador de espectros. El propósito de variar la altura de la antena receptora es evitar nulos en el campo tierra-onda y hacer las mediciones donde el campo eléctrico es más intenso.

Las mediciones de atenuación de sitio son fundamentales para la determinación del FA, y lo más adecuado es que la calibración se haga en un sitio validado de acuerdo a los requerimientos establecidos en normas internacionales (como la CISPR 16-1-5). El ideal para un sitio de calibración de antenas se define cómo un plano conductor (tierra o metal) de extensión infinita, sin pérdidas y perfectamente plano.

Calibración del Factor de Antena: Principio de medición (cont.)

- ✓ **Atenuación de Sitio (AS):** Pérdidas por inserción resultantes cuando la conexión directa entre la salida del generador y receptor es sustituida por una antena transmisora y una antena receptora localizadas entre dos posiciones específicas en un sitio de pruebas.

CENAM. Derechos Reservados 2007



26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



La norma CISPR 16-1-5 define la *AS* entre dos posiciones específicas en un sitio de pruebas como las pérdidas por inserción resultantes cuando la conexión directa entre la salida del generador y receptor es sustituida por una antena transmisora y una antena receptora localizadas en las posiciones especificadas por la norma.

donde:

$U_r(f)$ es la tensión medida por el receptor cuando hay conexión directa entre la salida del generador y el receptor.

$U_s(f)$ es la tensión medida por el receptor cuando las antenas se colocan en posiciones específicas.

Calibración del Factor de Antena: Métodos absolutos (cont.)

✓ Método de las tres antenas (TAM)

h₂ permanece fija

Medición No. 1

Antena 1 Antena 2

Plano de tierra

$$AS_1 = \left(\frac{5Z_0}{2\pi}\right) \frac{FA_{T1}FA_{R2}}{f_M E_{D1}}$$

Medición No. 2

Antena 1 Antena 3

Plano de tierra

$$AS_2 = \left(\frac{5Z_0}{2\pi}\right) \frac{FA_{T1}FA_{R3}}{f_M E_{D2}}$$

Medición No. 3

Antena 2 Antena 3

Plano de tierra

$$AS_3 = \left(\frac{5Z_0}{2\pi}\right) \frac{FA_{T2}FA_{R3}}{f_M E_{D3}}$$

Resolviendo las ecuaciones simultáneas y expresando los resultados en decibels:

$$FA_{T1}(\text{dB/m}) = \frac{1}{2} \left\{ AS_{1\text{dB}} + AS_{2\text{dB}} - AS_{3\text{dB}} + E_{D1\text{dB}} + E_{D2\text{dB}} - E_{D3\text{dB}} + f_{M\text{dB}} + 20 \log \left(\frac{2\pi}{5Z_0} \right) \right\}$$

$$FA_{T2}(\text{dB/m}) = \frac{1}{2} \left\{ AS_{1\text{dB}} + AS_{3\text{dB}} - AS_{2\text{dB}} + E_{D1\text{dB}} + E_{D3\text{dB}} - E_{D2\text{dB}} + f_{M\text{dB}} + 20 \log \left(\frac{2\pi}{5Z_0} \right) \right\}$$

$$FA_{R3}(\text{dB/m}) = \frac{1}{2} \left\{ AS_{2\text{dB}} + AS_{3\text{dB}} - AS_{1\text{dB}} + E_{D2\text{dB}} + E_{D3\text{dB}} - E_{D1\text{dB}} + f_{M\text{dB}} + 20 \log \left(\frac{2\pi}{5Z_0} \right) \right\}$$

26/06/2007 ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Este método al igual que el anterior es absoluto porque no se requieren antenas con *FA* de antenas conocidos, o en otras palabras no se requieren antenas de referencia. El método requiere de tres antenas con las cuales se hacen tres conjuntos de mediciones de *AS* para cubrir todas las combinaciones, esto debido a que la medición se realiza usando cada vez un par de antenas.

Las mediciones se van a hacer a una altura *h₁* y *h₂* sobre el plano de tierra con una distancia *R* de separación entre pares de antenas. De estas mediciones se forma un sistema de tres ecuaciones simultáneas, de las cuales se obtienen los factores de antena para cada una de las tres antenas. Los factores de antena resultantes son para una altura determinada sobre el plano de tierra.

Es importante que cuando se intercambien las antenas se conserve la alineación y posición de las mismas, además de que la potencia transmitida permanezca constante. Los métodos de las dos y tres antenas están sujetos a errores, por lo cual es importante tener presente los cuidados siguientes:

- 1.- Que la estabilidad en frecuencia del sistema sea la apropiada.
- 2.- Que la separación entre antenas sea la adecuada para cumplir el criterio de campo lejano.
- 3.- Que las antenas se encuentren bien alineadas en la dirección de interés.
- 4.- Que los componentes del sistema presenten acoplamientos de impedancia adecuados.
- 5.- Que los efectos de interferencia por trayectorias múltiples sean mínimos.

CENAM. Derechos Reservados 2007

Calibración del Factor de Antena: Métodos por comparación

✓ **Método de las dos antenas (antenas no necesariamente iguales)**

Antena transmisora (patrón)

Antena 1

Medición No. 1

Antena 2

Antena receptora (bajo calibración)

Plano de tierra

h_2 permanece fija

$h_1 = h_2$

R

$$AS = \left(\frac{5Z_0}{2\pi} \right) \frac{FA_{T1} FA_{R2}}{f_M E_D}$$

$$FA_{R2}(\text{dB/m}) = 20 \log_{10} f_M + AS_{\text{dB}} + 20 \log_{10} E_D - FA_{T1\text{dB}} - 20 \log_{10} \left(\frac{5Z_0}{2\pi} \right)$$

$$E_D = \frac{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cos(k[d_2 - d_1])}}{d_1d_2}$$

$$d_1 = \sqrt{R^2 + (h_1 - h_2)^2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$d_2 = \sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2}$$

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Para este caso particular del método de las dos antenas se utiliza una antena patrón de la cual se conocen sus valores de FA , esto con el propósito de determinar con una única medición el FA de la antena bajo calibración.

Al igual que para el caso de dos antenas con antenas similares, aquí se hacen consideraciones similares como son: que no hay desacoplamiento de impedancia, que las antenas tienen la misma polarización y que la separación entre las antenas es tal que prevalecen las condiciones de campo lejano.

Los valores de FA que se obtienen con este método son para una altura determinada ($h = h_1 = h_2$) sobre el plano de tierra.

CENAM. Derechos Reservados 2007

Calibración del Factor de Antena: Métodos por comparación

✓ Método de la antena patrón

Medición No. 1

Antena 1 Antena 2, patrón

h₁ h₂

Plano de tierra

R

Medición No. 2

Antena 1 Antena 3, bajo calibración

h₁ h₂

R

h₂ permanece fija

Antena 1 transmite y Antena 2 recibe	La tensión registrada en el receptor es: V _{R1} o la potencia P _{R1}
Antena 1 transmite y Antena 3 recibe	La tensión registrada en el receptor es: V _{R2} o la potencia P _{R2}

FA de la antena bajo calibración

$$FA_{R2}(\text{dB/m}) = FA_{R1}(\text{dB/m}) + [V_{R1} - V_{R2}]$$

$$FA_{R2}(\text{dB/m}) = FA_{R1}(\text{dB/m}) + [P_{R1} - P_{R2}]$$

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Este método emplea una antena de referencia para derivar el FA de la antena bajo calibración, esto a través de la sustitución de la antena patrón por la bajo calibración.

La antena 1 puede ser cualquier antena, incluso podría ser una antena patrón, y su propósito es generar un campo para ser medido por las antenas 2 y 3. Las antenas deben colocarse a la distancia de prueba, R, la antena 1 se eleva a una altura h₁ y las antenas 2 y 3 deben elevarse a una misma altura h₂.

Para calibrar la antena desconocida contra la antena dipolo patrón, primero debe medirse la intensidad de señal con la antena de referencia como receptora. Una vez que se tiene la intensidad de señal con la antena dipolo patrón, ésta deberá sustituirse por la antena a calibrar y deberá colocarse exactamente a la misma altura y posición que la antena patrón.

CENAM. Derechos Reservados 2007

- Servicios de calibración para antenas de EMC y de telecomunicaciones

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



CENAM. Derechos Reservados 2007

Calibración de la Ganancia

✓ La medición de ganancia puede hacerse con dos métodos diferentes, de los cuales se desprenden varias técnicas:

Métodos para la medición de ganancia

- Métodos absolutos
 - De las tres antenas
 - De las dos antenas (con antenas similares)
- Métodos por comparación
 - De las dos antenas
 - De la antena patrón

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Existen dos métodos básicos para medir la ganancia de una antena. Uno de ellos se basa en mediciones absolutas de ganancia y el otro se basa en comparar el valor medido con el de una antena de referencia.

Los métodos derivados de mediciones absolutas se emplean principalmente para calibrar antenas que se utilizan como antenas patrón o de referencia. Estos métodos no requieren conocimiento previo de los valores de ganancia de las antenas para poder determinar su ganancia.

Los métodos por comparación requieren utilizar antenas de referencia con valores conocidos de ganancia para poder determinar la ganancia de la antena bajo calibración.

Las antenas patrón más ampliamente utilizadas son las antenas de corneta piramidales y los dipolos resonantes de media longitud de onda. Ambas antenas presentan polarización lineal. En condiciones de espacio libre de reflexiones los dipolos tienen alto grado de pureza en su polarización. Sin embargo, por tener diagramas de radiación muy ancho, su polarización se ve afectada en condiciones diferentes de espacio libre de reflexiones y no son muy utilizados para calibrar la ganancia de antenas de EMC y de telecomunicaciones. Las antenas de corneta a pesar de poseer cierto grado de polarización elíptica son muy directivas, por lo cual son menos afectadas por el medio circundante y ampliamente utilizadas para calibrar la ganancia de antenas de EMC y de telecomunicaciones.

Calibración de la Ganancia: medición en la región de campo lejano

El propósito de medir en la región de radiación de campo lejano es que la apertura de la AUT sea iluminada con ondas que tengan frente de onda plano.

CENAM. Derechos Reservados 2007

22.5°

Δr

Desviación de fase máxima

Apertura de la antena bajo calibración (AUT)

D

R

Antena fuente

$R + \Delta r$

$\Delta r \leq \frac{\lambda/2}{8} = \frac{\lambda}{16}$

$\frac{D^2}{8R} = \frac{\lambda}{16}$

$R = \frac{2D^2}{\lambda}$

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

En las mediciones de campo lejano, la antena fuente y la antena bajo calibración se colocan a una distancia (R) lo suficientemente grande como para que la apertura eléctrica de la antena bajo calibración sea iluminada con ondas con frente de onda casi plano.

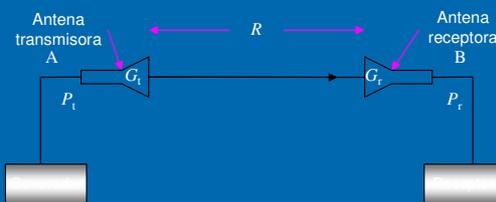
El criterio que comúnmente se utiliza para determinar la separación mínima entre antenas es que la desviación de fase de las ondas que arriban a la apertura de la antena, medida desde el centro de la apertura hasta el borde de la misma, sea menor a 22.5°.

Las ondas que emergen de la antena fuente son esféricas, el frente de onda a lo largo de la apertura de la antena receptora será plano sólo cuando la distancia entre las antenas sea infinita y para cualquier separación finita el frente de onda será curvo y la fase de las ondas en el extremo de la apertura serán diferentes de la fase en el centro de la apertura.

Esta desviación de fase afecta el valor de la ganancia. Para que el efecto sea mínimo se establece que la desviación de fase máxima sea $(\pi/8)$ 22.5°, ya que con este valor el error durante la medición de ganancia no será mayor a 0.1 dB.

Calibración de la Ganancia: Fórmula de transmisión de Friis

CENAM. Derechos Reservados 2007



$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

$$10 \log_{10} P_r = 10 \log_{10} P_t + 10 \log_{10} G_t + 10 \log_{10} G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)$$

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



Donde:

- P_t es la potencia radiada por la antena A
- G_t es la ganancia lineal de la antena transmisora
- G_r es la ganancia lineal de la antena receptora
- λ es la longitud de onda de la radiación

La potencia transmitida por la antena transmisora, P_t , no es la misma que la potencia proporcionada por el generador, P_g , que está alimentando la antena. Existe una pérdida de potencia entre la antena y el generador que depende del acoplamiento de impedancia entre ambos, y que se puede cuantificar al medir el coeficiente de reflexión complejo de cada uno individualmente.

La fórmula de Friis asume implícitamente que las antenas tienen la misma polarización por sus orientaciones prescritas y que la separación entre las antenas es tal que prevalecen las condiciones de campo lejano.

Calibración de la Ganancia: Métodos absolutos (cont.)

✓ Método de las tres antenas (TAM)

Medición No. 1

Antena 1 Antena 2

← R →

Medición No. 2

Antena 1 Antena 3

← R →

Medición No. 3

Antena 2 Antena 3

← R →

Antena 1 transmite y Antena 2 recibe	$G_{1dB} + G_{2dB} = 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log\left(\frac{P_{r2}}{P_{t1}}\right)$
Antena 1 transmite y Antena 3 recibe	$G_{1dB} + G_{3dB} = 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log\left(\frac{P_{r3}}{P_{t1}}\right)$
Antena 2 transmite y Antena 3 recibe	$G_{2dB} + G_{3dB} = 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log\left(\frac{P_{r3}}{P_{t2}}\right)$

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Este método requiere tres conjuntos de mediciones para cubrir las combinaciones posibles de medición. De las tres mediciones resulta un sistema de tres ecuaciones simultáneas cuyas incógnitas son las ganancias de las tres antenas.

En este caso G_1 , G_2 y G_3 son las ganancias en decibeles para la primera, segunda y tercera antenas respectivamente.

Es importante que cuando se intercambien las antenas se conserven la alineación y posición de las mismas, además de que la potencia transmitida permanezca constante.

Los métodos de las dos y tres antenas están sujetos a errores, por lo cual es importante tener presente los cuidados siguientes:

- 1.- Que la estabilidad en frecuencia del sistema sea la apropiada.
- 2.- Que la separación entre antenas sea la adecuada para cumplir el criterio de campo lejano.
- 3.- Que las antenas se encuentren bien alineadas en la dirección de interés.
- 4.- Que los componentes del sistema presenten acoplamiento de impedancia.
- 5.- Que los efectos de proximidad y de interferencia por trayectorias múltiples sean mínimos.

CENAM. Derechos Reservados 2007

Calibración de la Ganancia: Métodos por comparación (cont.)

✓ Método de la antena patrón

Medición No. 1

Medición No. 2

Antena 1 transmite y Antena 2 recibe

$$G_{1dB} + G_{2dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left(\frac{P_{r2}}{P_{t1}} \right)$$

Antena 1 transmite y Antena 3 recibe

$$G_{1dB} + G_{3dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log \left(\frac{P_{r3}}{P_{t1}} \right)$$

Ganancia de la antena bajo calibración

$$G_{3dB} = G_{2dB} - 10 \log \left(\frac{P_{r2}}{P_{r3}} \right)$$

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007

Este método se basa en el uso de una antena de referencia, donde la ganancia de cualquier antena puede derivarse por sustitución de la antena patrón.

La antena 1 puede ser cualquier antena, incluso podría ser una antena patrón, y su propósito es generar un campo para ser medido por las antenas 2 y 3. Las antenas deben colocarse a la distancia de prueba, R, y deben elevarse lo suficiente para evitar interacciones con el plano de tierra.

Para calibrar la antena desconocida contra la antena dipolo patrón, primero debe medirse la intensidad de señal con la antena de referencia como receptora. Una vez que se tiene la intensidad de señal con la antena dipolo patrón, ésta deberá sustituirse por la antena a calibrar y deberá colocarse exactamente a la misma altura y posición que la antena patrón.

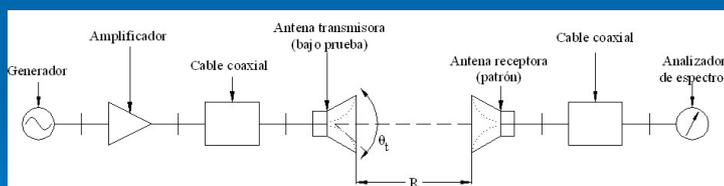
Como resultado de las dos mediciones se obtiene un sistema de dos ecuaciones que resulta sencillo de resolver para la ganancia de la antena bajo calibración.

Diagrama de radiación

En general, el diagrama de radiación es tridimensional, pero no siempre es práctico medirlo de esa manera, lo que se hace es medirlo en los dos planos principales.

Condiciones de medición más comunes:

- ✓ La separación de las antenas debe ser tal que la medición se haga en la región de campo lejano
- ✓ La antena bajo calibración debe estar lo suficientemente separada de objetos conductores que puedan dar pie a interacciones no deseadas, es decir en condiciones de espacio libre de reflexiones
- ✓ Los barridos angulares se hacen en los planos donde se desea conocer los diagramas y las lecturas se normalizan al valor máximo registrado en ese plano.



Sistema para medir diagramas de radiación

CENAM. Derechos Reservados 2007

26/06/2007

ENCUENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA ENME-2007



El diagrama de radiación puede medirse en el modo de transmisión o en el modo de recepción, de echo algunas antenas requieren la medición de éste parámetro tanto en transmisión como en recepción. Las mediciones del diagrama de radiación pueden ser relativas o absolutas según lo requiera la aplicación.

Para antenas con dimensiones grandes, el diagrama de radiación se mide comúnmente en los dos planos principales.

Para antenas de dimensiones pequeñas es más común hacer mediciones del diagrama de radiación en todos los planos.

