

Interpretación de parámetros y especificaciones de antenas para Compatibilidad Electromagnética (EMC)

Mariano Botello Pérez, Israel García Ruiz
Centro Nacional de Metrología, CENAM
km 4.5 carretera a los Cués, El Marqués, Qro. CP 76246
Tel: 01 442 21105 00 x 3450, 3451
E-mail: mbotello@cenam.mx; igarcia@cenam.mx

NOTA 1. Este trabajo ha sido desarrollado con recursos del gobierno federal de México. Sólo se permite su reproducción sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente.

NOTA 2. En este documento pueden aparecer marcas comerciales únicamente con fines didácticos y a fin de lograr un entendimiento claro de las técnicas y procesos descritos. En ningún caso esta identificación implica recomendación o aval del CENAM o de alguna otra institución del gobierno federal de México, ni tampoco implica que los equipos o materiales identificados sean necesariamente los mejores para el propósito para el que son usados. El CENAM y las demás instituciones no tienen compromisos con ninguna marca comercial en particular.



Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2009
18-20 de noviembre

→ Electromagnetismo
→ Temperatura y Propiedades Termofísicas
→ Tiempo y Frecuencia

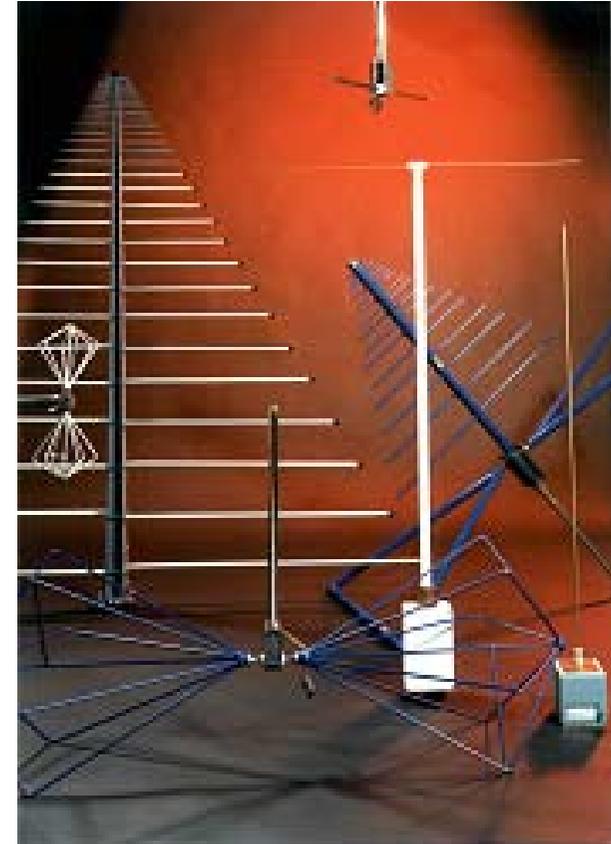


Contenido

1. Objetivo de la presentación
2. Definición de una antena
3. Antenas para EMC
4. Eficiencia de radiación ($\eta_{\text{radiación}}$)
5. Acoplamiento de impedancia de entrada
6. Diagrama de radiación
7. Polarización
8. Ganancia (G)
9. Factor de antena (AF)
10. Conclusiones
11. Referencias

Objetivo de la presentación

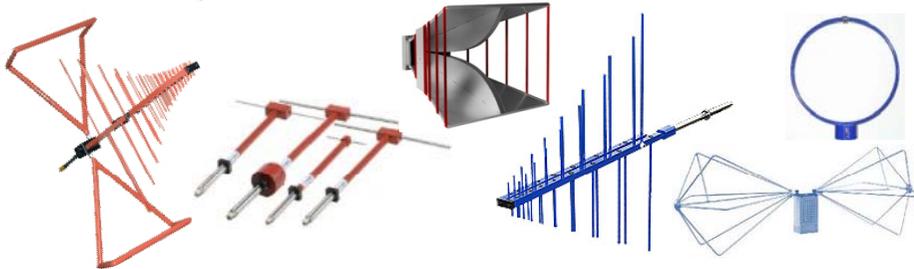
➤ Proveer una guía de cómo interpretar y aplicar la terminología básica de las antenas utilizadas para medición y generación de campos electromagnéticos radiados en el área de EMC. Esta información está dirigida a usuarios de antenas para medición de emisiones radiadas, pruebas de inmunidad y validación de sitios de pruebas, quienes son responsables de seleccionar y usar las antenas más adecuadas para efectuar las pruebas de EMC aplicables a sus necesidades.



Conjunto de antenas de EMC

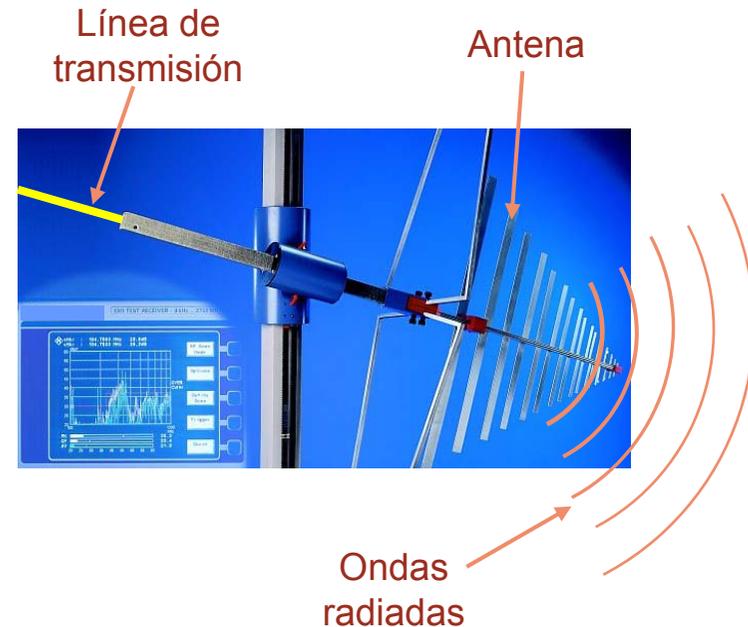
Definición de una antena

Antena: dispositivo diseñado para **radiar** o recibir ondas electromagnéticas dentro de un intervalo de frecuencias dado.

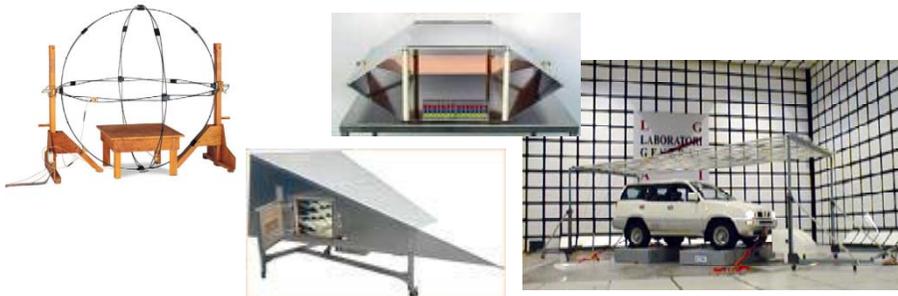


Ejemplos de antenas para EMC

Siendo estrictos, una antena es un transductor electromagnético.



Existen varios generadores de campos eléctricos o magnéticos **no radiantes**, que estrictamente no se consideran antenas:



Ejemplos de generadores de campos no radiantes

Antenas para EMC

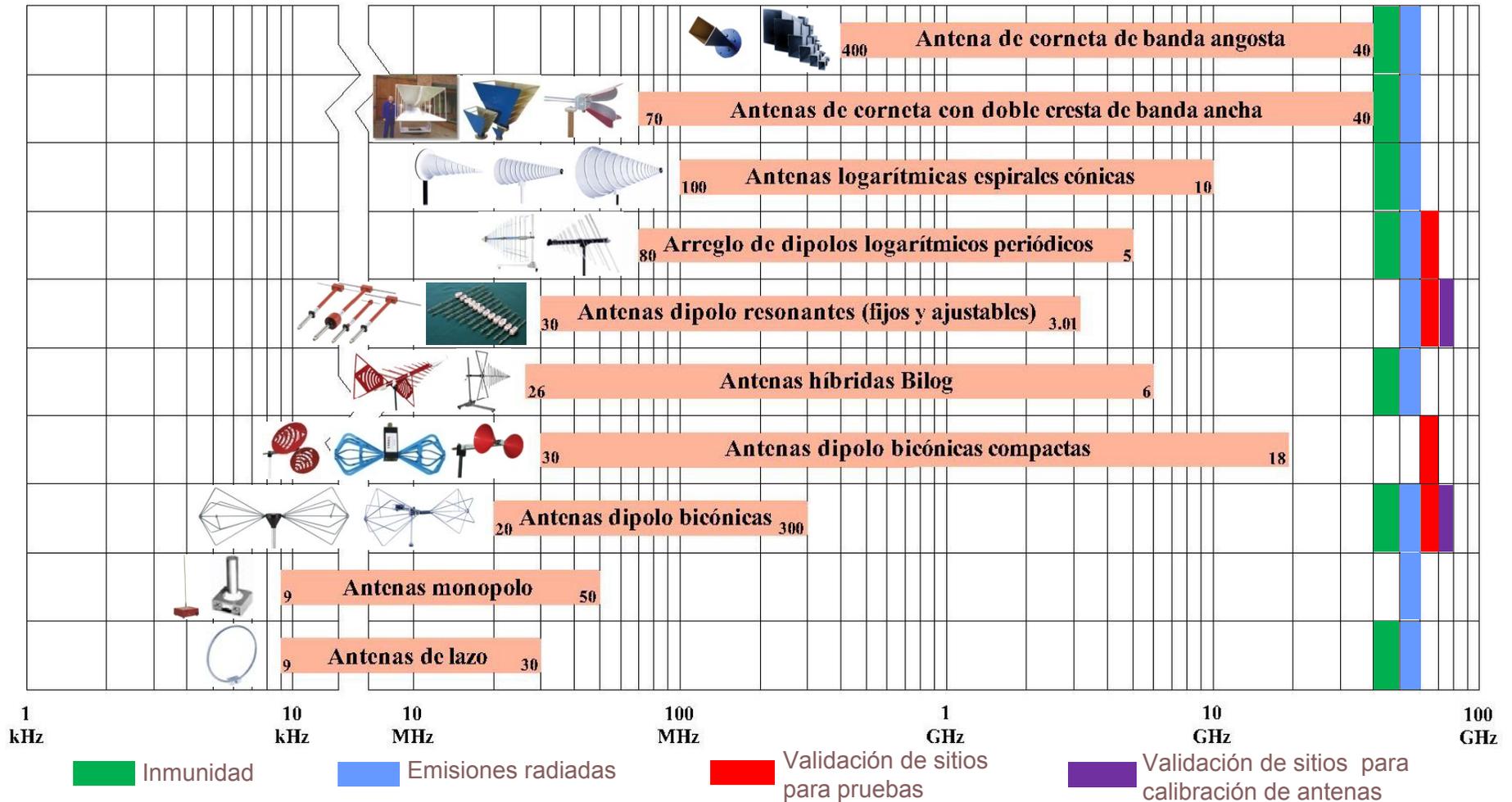
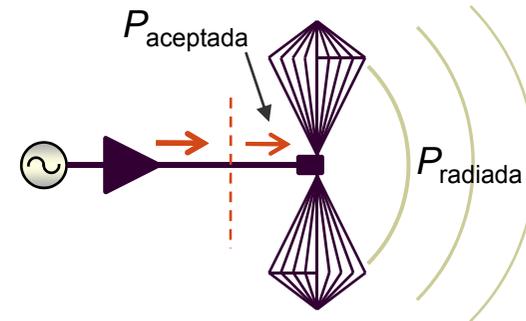


Tabla que resume el intervalo de frecuencias y aplicaciones de las antenas utilizadas para EMC

Eficiencia de radiación ($\eta_{\text{radiación}}$)

$$\eta_{\text{radiación}} = \frac{\text{potencia total radiada al espacio}}{\text{potencia aceptada de la fuente}} = \frac{P_{\text{radiada}}}{P_{\text{aceptada}}}$$

$$P_{\text{radiada}} = P_{\text{aceptada}} \eta_{\text{radiación}}$$



La P_{aceptada} potencia aceptada por la antena y que no es radiada se disipa en forma de calor

La $\eta_{\text{radiación}}$ es raramente publicada en las especificaciones de los fabricantes de antenas:

- Es muy difícil de medir con alta exactitud
- Está implícita en la especificación de *Ganancia* (G) de la antena

La $\eta_{\text{radiación}}$ de cualquier generador de campos no radiantes es cero



No confundir eficiencia de radiación con desacoplamiento de impedancia

Acoplamiento de impedancia de entrada

Impedancia de entrada (Z_{ant}): es una cantidad compleja que depende básicamente de la frecuencia

$$Z_{ant} = R_T + jX_T \quad [\Omega]$$

Parte real (resistiva) Parte imaginaria (reactiva)

Caso ideal: impedancia puramente resistiva

La capacidad de una antena para aceptar la potencia de una fuente (e.j. amplificador) está determinada por la impedancia que presente la antena en su puerto de entrada



¿Cuál es la condición para lograr la máxima transferencia de potencia entre una antena y una fuente de potencia?



Tenga presente que la impedancia de salida de la gran mayoría de amplificadores y fuentes de RF es de 50 Ω

Acoplamiento de impedancia de entrada

Coeficiente de reflexión (Γ):

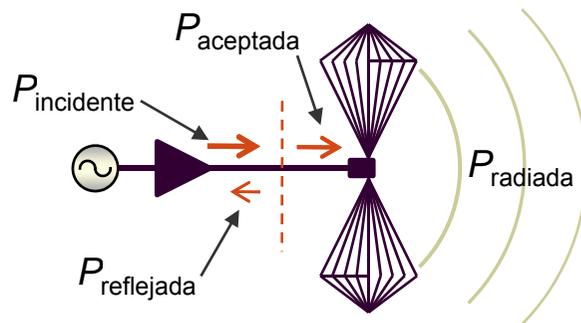
Medida del grado de acoplamiento entre la impedancia de la antena, Z_{ant} , y la impedancia característica de la línea de transmisión o del generador, Z_0 .

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{ant}} - Z_0}{Z_{\text{ant}} + Z_0} \quad [\text{V/V}]$$

$$0 \leq |\Gamma| \leq 1$$

$$|\Gamma| = 0 \rightarrow Z_{\text{ant}} = Z_0 \quad [\Omega]$$

$$|\Gamma| \neq 0 \rightarrow P_{\text{reflejada}} = P_{\text{incidente}} (|\Gamma|^2) \quad [\text{W}]$$

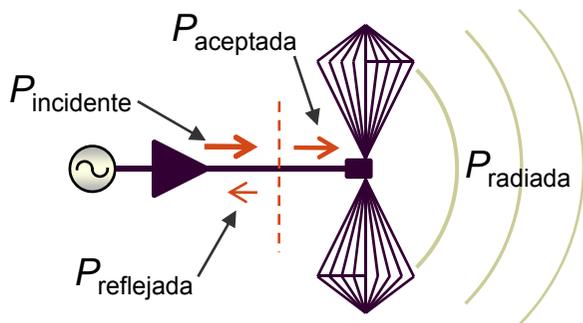


$$P_{\text{aceptada}} = P_{\text{incidente}} - P_{\text{reflejada}} \quad [\text{W}]$$

$$P_{\text{aceptada}} = P_{\text{incidente}} (1 - |\Gamma|^2) \quad [\text{W}]$$

Acoplamiento de impedancia de entrada

Eficiencia de desacoplamiento ($\eta_{\text{desacoplamiento}}$):



$$\eta_{\text{desacoplamiento}} = (1 - |\Gamma|^2)$$

$$\eta_{\text{desacoplamiento}} = 1 \rightarrow Z_{\text{ant}} = Z_0$$

$$\eta_{\text{desacoplamiento}} = 0 \rightarrow Z_{\text{ant}} \neq Z_0$$

$$P_{\text{radiada}} = P_{\text{incidente}} \eta_{\text{desacoplamiento}} \eta_{\text{radiación}}$$

La calidad del acoplamiento de impedancia de entrada para una antena se especifica en términos de:

- Pérdidas por retorno (R.L.)
- Relación de onda estacionaria (VSWR)

$$\text{R.L.} = 10 \log_{10} (|\Gamma|^2) = 20 \log_{10} (|\Gamma|)$$

$$\text{R.L.} = -3.0103 \text{ dB} \rightarrow P_{\text{reflejada}} = \left(\frac{1}{2}\right) P_{\text{incidente}}$$

Acoplamiento de impedancia de entrada

VSWR:

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad |\Gamma| = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \quad \text{VSWR} = 1 \rightarrow Z_{\text{ant}} = Z_0 \quad [\Omega]$$

Útil para describir el acoplamiento de entrada cuando el desacoplamiento es grande.

$$\text{VSWR} = 5.83 \rightarrow \text{R.L} = 3.01 \text{ dB} \rightarrow |\Gamma| = 1/\sqrt{2}$$

VSWR	$ \Gamma $	R.L.	$P_{\text{reflejada}} = \% P_{\text{incidente}}$
1.0	0.00	-	0.0
1.5	0.20	-13.98	4.0
2.0	0.33	-9.54	11.1
2.5	0.43	-7.36	18.4
3.0	0.5	-6.02	25.0
4.0	0.6	-4.44	36.0
5.0	0.67	-3.52	44.4
5.83	0.71	-3.01	50.0
10.0	0.82	-1.74	66.9
20.0	0.91	-0.87	81.9
50.0	0.96	-0.35	92.3

Acoplamiento de impedancia de entrada

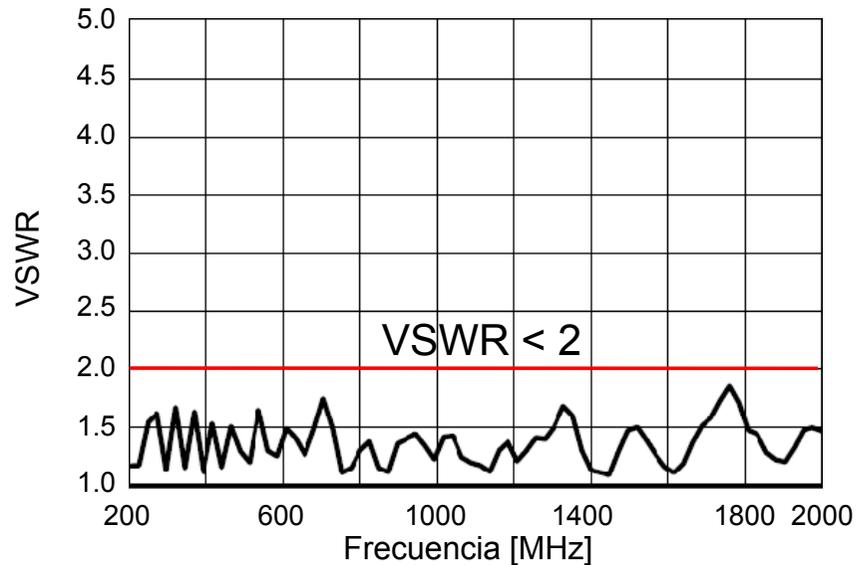
VSWR:

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad |\Gamma| = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \quad \text{VSWR} = 1 \rightarrow Z_{\text{ant}} = Z_0 \quad [\Omega]$$

Útil para describir el acoplamiento de entrada cuando el desacoplamiento es grande.

$$\text{VSWR} = 5.83 \rightarrow \text{R.L.} = 3.01 \text{ dB} \rightarrow |\Gamma| = 1/\sqrt{2}$$

Ejemplo 1: Antena logarítmica periódica

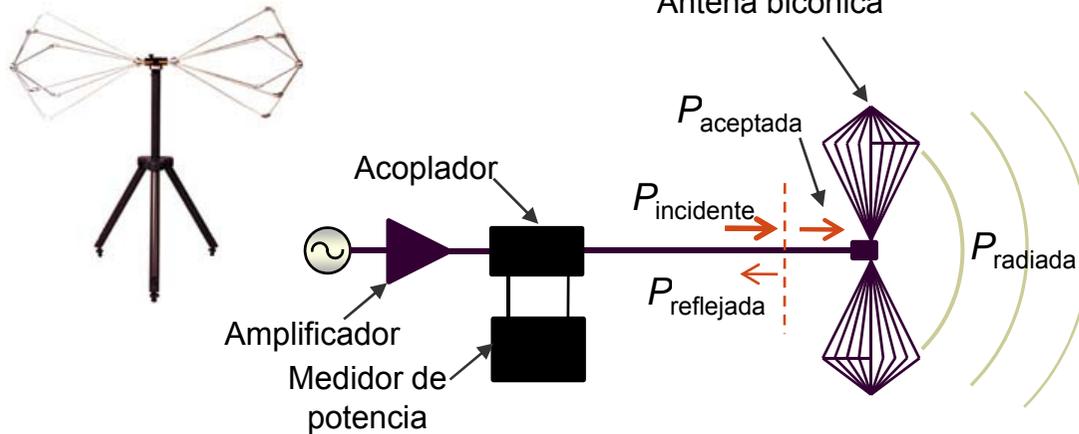
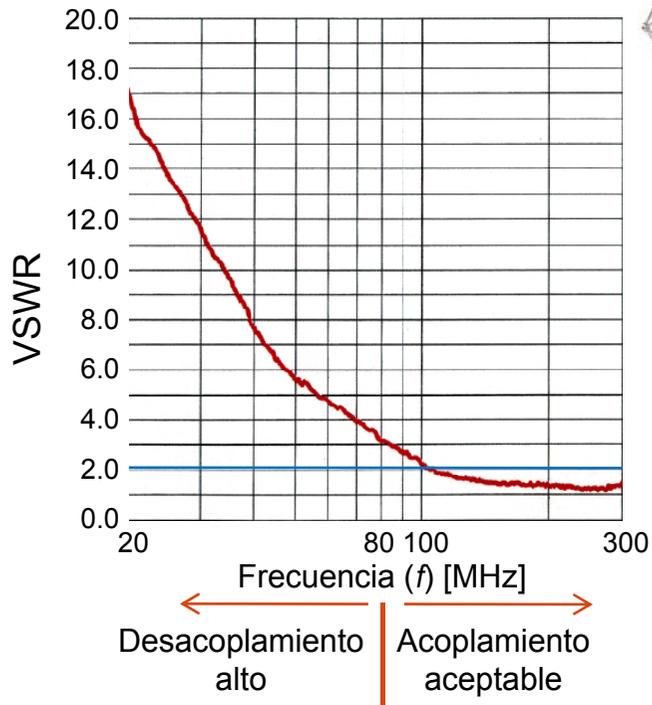


VSWR típico de una antena Logarítmica-Periódica para mediciones de emisiones e inmunidad

Acoplamiento de impedancia de entrada

VSWR:

Ejemplo 2: Antena bicónica de 1,37 metros para pruebas de susceptibilidad radiada a 1 metro de distancia (norma MIL-STD 461).



En $f < 80$ MHz

- Las pruebas se hacen en la región de campo cercano
- Gran parte de la potencia regresa al amplificador

$$VSWR = 5.83, V_{LTmax} = 1.707 * V_{incidente}$$

$$I_{LTmax} = 1.707 * I_{incidente}$$

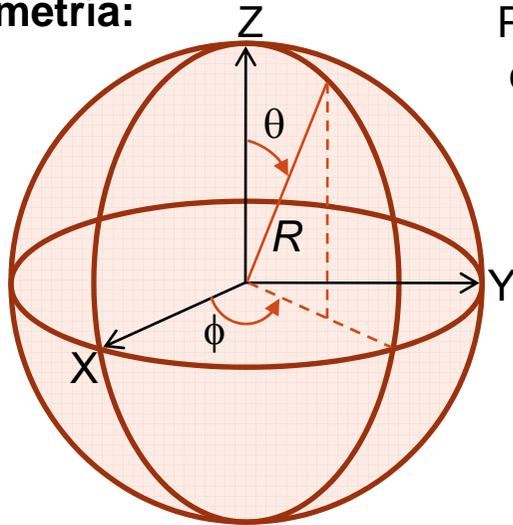
Un atenuador en la antena mejoraría el Γ y el VSWR

VSWR típico de una antena Bicónica para EMC

Configuración típica para pruebas de susceptibilidad

Diagrama de radiación

Geometría:



Para analizar la radiación de una antena es necesario especificar un sistema de coordenadas que permita describir sus campos electromagnéticos.

Distancia radial (R)

Ángulo de elevación (θ)

Ángulo azimut (ϕ)

Sistema de coordenadas esféricas

Diagrama de antena:

Representación de la distribución angular de una cantidad que caracteriza al campo electromagnético generado por una antena en función de la posición angular θ y ϕ , para un valor fijo de R .

- Densidad de flujo de potencia
- Intensidad de radiación
- Directividad
- Ganancia
- Polarización

Diagrama de radiación

Representación gráfica de la manera como se distribuye la energía radiada por una antena (densidad de potencia) en la **región de campo lejano** en función de la posición angular θ y ϕ , para un valor fijo de R

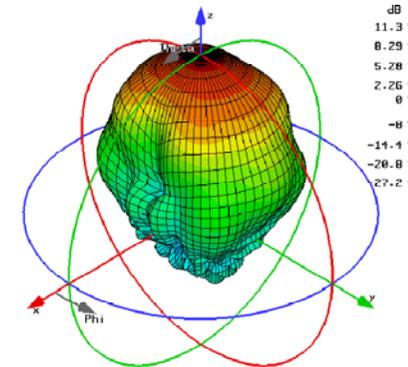


Diagrama de radiación de una antena de corneta

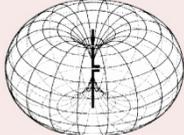
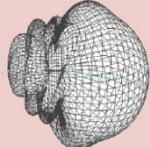
Tipo de antena	Característica de radiación	Ejemplos	Forma de la radiación
Isotrópica	Antena que radia uniformemente en todas direcciones.	No existe tal radiador	
Omnidireccional	Antena que radia uniformemente en un plano.	Monopolos, dipolos, bicónicas y antenas de lazo	
Direccional	Antena que concentra la mayor parte de su radiación en una dirección particular.	Cornetas, log-periódicas, y log-espinales cónicas.	

Diagrama de radiación

- La interpretación de un diagrama de radiación puede no ser sencilla
- Los fabricantes de antenas para EMC suelen presentar cortes bidimensionales del diagrama de radiación, en particular en los planos llamados E y H

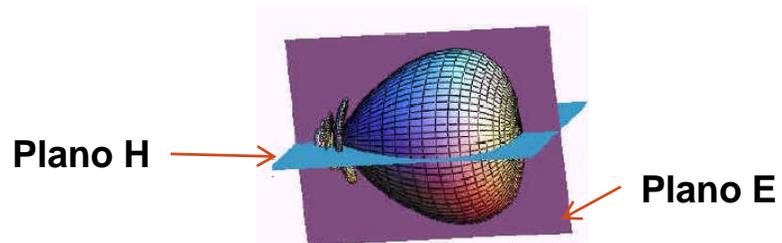


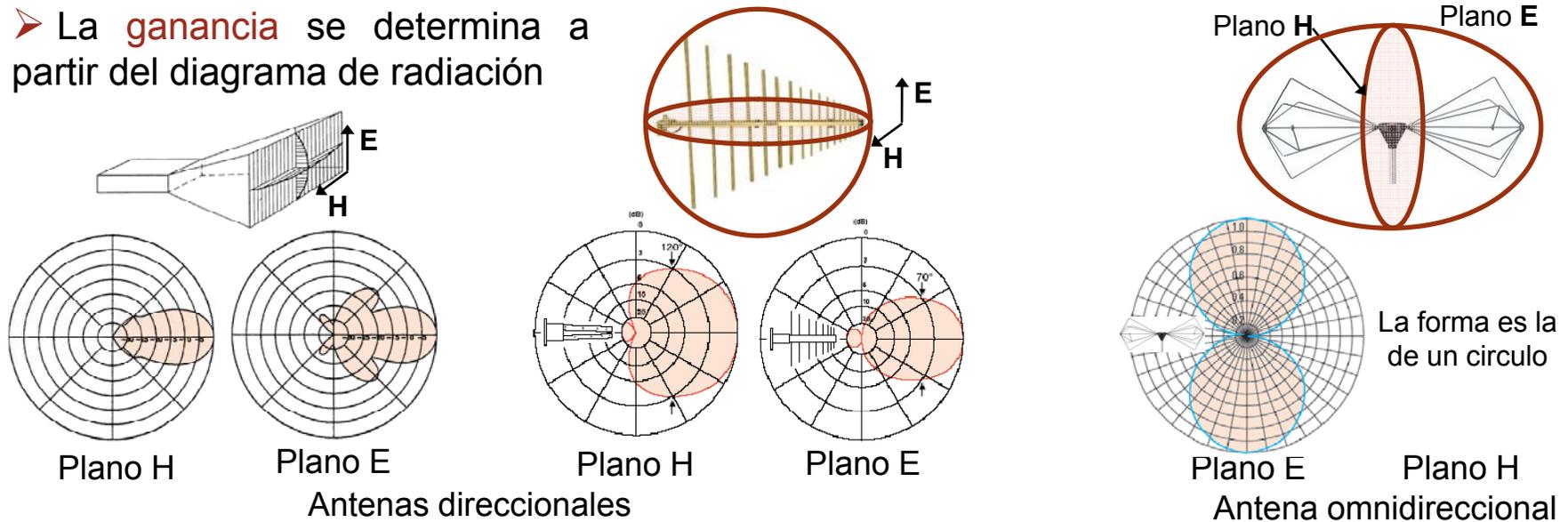
Ilustración de los planos E y H en un diagrama de radiación direccional

- Los planos E y H son ortogonales

- Plano **E (H)**: Para una antena polarizada linealmente es el plano que contiene el vector de campo eléctrico (magnético) en la dirección de radiación máxima
- Ventaja: los planos E y H son referenciados a la antena bajo discusión y no a un sistema de coordenadas particular

Diagrama de radiación

➤ La **ganancia** se determina a partir del diagrama de radiación



Ejemplos de donde se definen los planos E y H en antenas para EMC

La norma CISPR 16-1-4 (NMX-I-175/01-NYCE-2003), referente a equipos para pruebas de perturbaciones radiadas, recomienda que para validar sitios de pruebas completamente anecoicos (de 30 MHz a 18 GHz) se utilice una antena transmisora de banda ancha con diagrama de radiación omnidireccional en el plano H y longitud menor a 40 cm (véase la sección 5 de dicha norma).

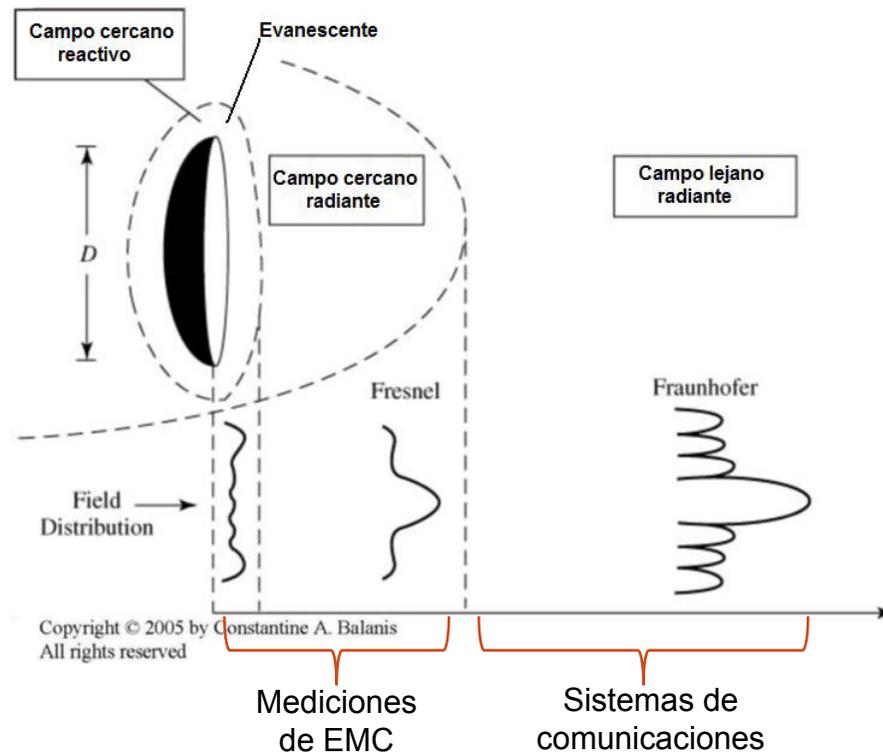


Ejemplos de antenas bicónicas comerciales que cumplen los requerimientos de la norma CISPR-16-1-4

Diagrama de radiación

Regiones de campo:

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



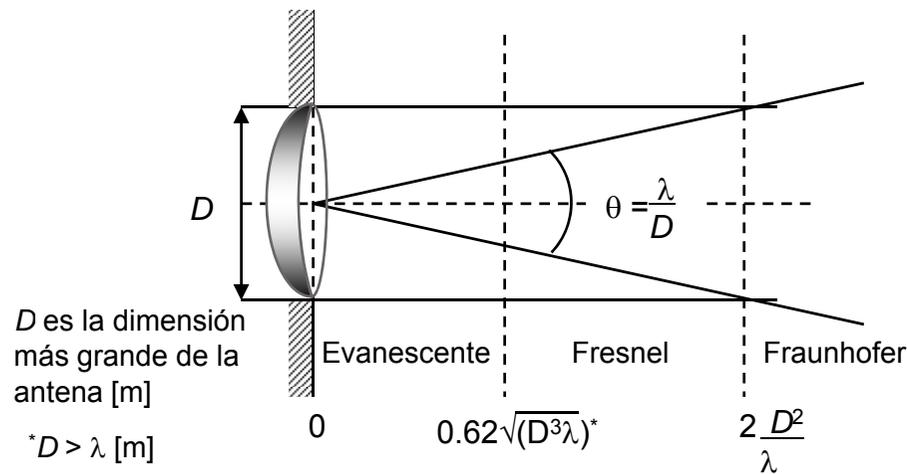
Las frecuencias y las distancias normativas para muchas de las pruebas de EMC implican que los dispositivos bajo prueba se coloquen en la región de campo cercano de las antenas de prueba.

Evolución del diagrama de radiación a lo largo de las zonas de emisión

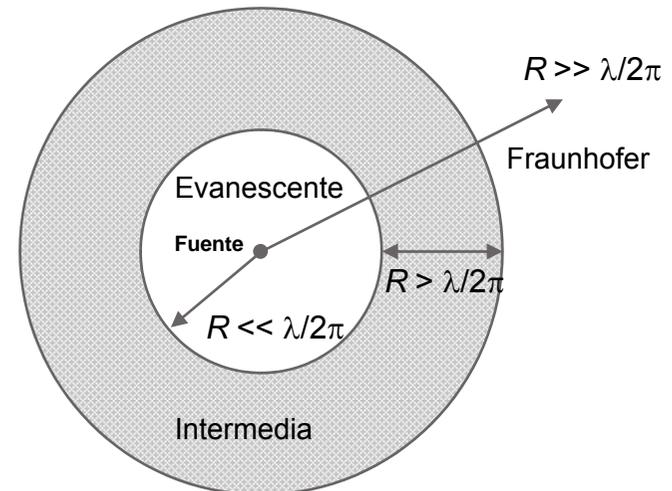
Diagrama de radiación

Regiones de campo:

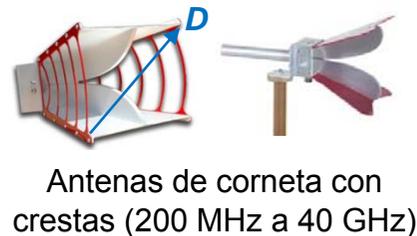
Las transiciones entre las regiones son graduales, lo mismo que sus fronteras.



Representación de las regiones de emisión del campo de una antena de apertura



Regiones de campo cercano y lejano para antenas eléctricamente pequeñas y dipolos magnéticos

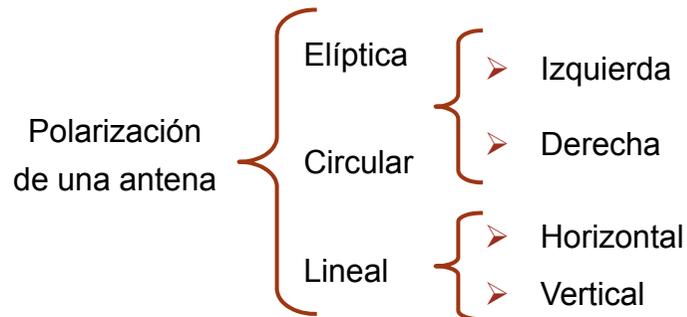


30 MHz $\rightarrow \lambda = 10$ m \therefore pruebas a 1 m con biconica de 1.37 m en región de campo cercano

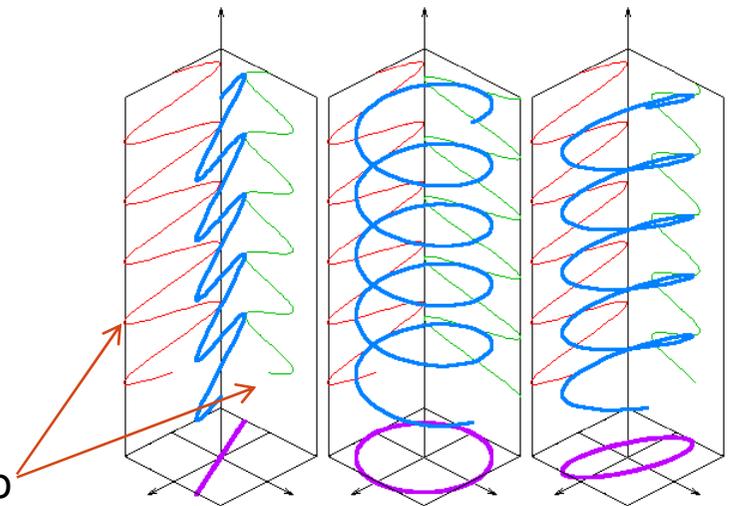


Polarización

Los campos electromagnéticos tienen naturaleza vectorial (son funciones del tiempo y del espacio). La polarización describe la variación en función del tiempo de la intensidad y orientación del movimiento del vector de campo eléctrico.



El estado de polarización de un campo electromagnético puede describirse completamente en cualquier instante por dos componentes ortogonales.



a) Polarización lineal b) Polarización circular c) Polarización elíptica

Variación del extremo del vector de campo eléctrico con el tiempo

Polarización

En el área de EMC:

- Casi todas las antenas presentan polarización lineal (monopolos, dipolos, lazos, bicónicas, logarítmicas periódicas y cornetas), por tanto radian en una sola dirección.

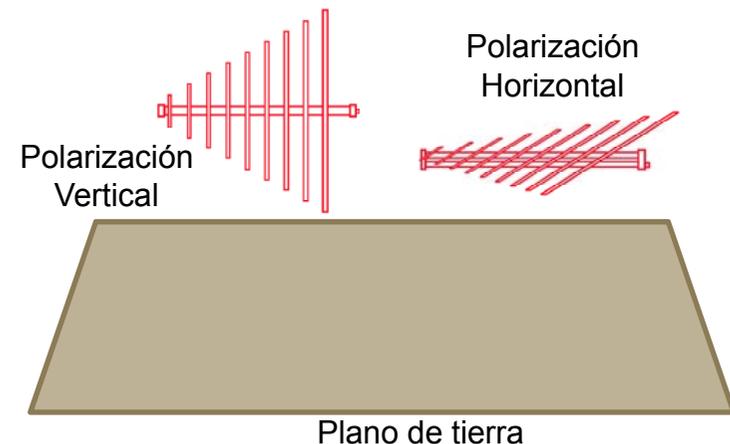
La norma IEC 61000-4-3 (NMX-J-550/4-3-ANCE-2008) referente a pruebas de inmunidad recomienda utilizar antenas polarizadas linealmente tal como las bicónicas, logarítmicas periódicas y cornetas c/s crestas (sección 6).

La norma CISPR 16-1-4 (NMX-I-175/01-NYCE-2003), referente a equipos para pruebas de perturbaciones radiadas, recomienda utilizar antenas polarizadas linealmente: tal como las de lazo (9 kHz a 150 kHz), rodillos (150 kHz a 30 MHz), dipolos (30 MHz a 300 MHz), biconicas y log-periódicas (300 MHz a 1 GHz) cornetas piramidales, rectangulares, con crestas y cornetas patrón (1 GHz a 18 GHz), véase la sección 4 de dicha norma.

- Las antenas logarítmicas espirales cónicas presentan polarización circular para satisfacer los requerimientos de la norma MIL-STD 461E referente a mediciones de emisiones y pruebas de inmunidad



¿Cómo orientar una antena para una prueba en polarización horizontal o vertical?



Polarización

En el área de EMC (continuación):

- La mayoría de las antenas presentan cierto grado de otras polarizaciones que se cuantifica mediante la **razón de polarización cruzada** (razón entre el nivel de campo en la dirección deseada con el de su dirección ortogonal)

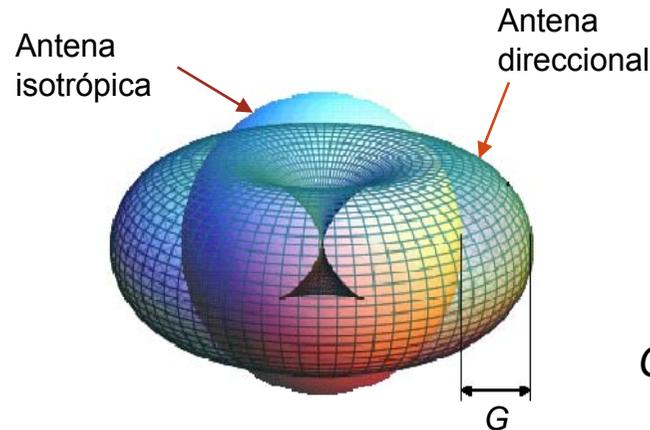
La norma CISPR 16-1-4 (NMX-I-175/01-NYCE-2003), referente a equipos para pruebas de perturbaciones radiadas, recomienda utilizar antenas logarítmicas periódicas con polarización cruzada de 20 dB (sección 4.4.3) para frecuencias < 200 MHz, el mismo requerimiento aplica para antenas de corneta pero en todo su intervalo de operación (véase sección 4.4.3).

- Polarización lineal perfecta se obtendría con una antena perfectamente simétrica \approx dipolos y bicónicas

La norma CISPR 16-1-4 (NMX-I-175/01-NYCE-2003) no especifica un nivel de polarización cruzada para dipolos y antenas bicónicas porque por su diseño simétrico dicho nivel es intrínsecamente superior a 20 dB (véase sección 4.4.3).

Ganancia (G)

Ganancia en una antena no necesariamente significa ganancia de potencia



Ganancia: razón de la intensidad de radiación en una dirección dada $U(\theta, \phi)$, a la intensidad de radiación que se obtendría si la P_{aceptada} por la antena, fuese radiada de manera isotrópica U_a .

$$G = \frac{U(\theta, \phi)}{U_a} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{aceptada}}} \left[\frac{\text{W/sr}}{\text{W/sr}} \right]$$

$$P_{\text{aceptada}} = P_{\text{incidente}} (1 - |\Gamma|^2) \quad [\text{W}]$$

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

La G de una antena isotrópica es de 0 dBi.



¿Cómo se interpretaría una G de 3 dBi?

Ganancia (G)

Directividad ≠ ganancia: La directividad se basa en la P_{radiada} mientras que la ganancia se basa en la P_{aceptada} (no toda la potencia aceptada es radiada)

$$P_{\text{radiada}} = P_{\text{aceptada}} \eta_{\text{radiación}} \quad [\text{W}] \quad \longrightarrow \quad G = \eta_{\text{radiación}} \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{rad}}} = \eta_{\text{radiación}} D \quad \left[\frac{\text{W/sr}}{\text{W/sr}} \right]$$

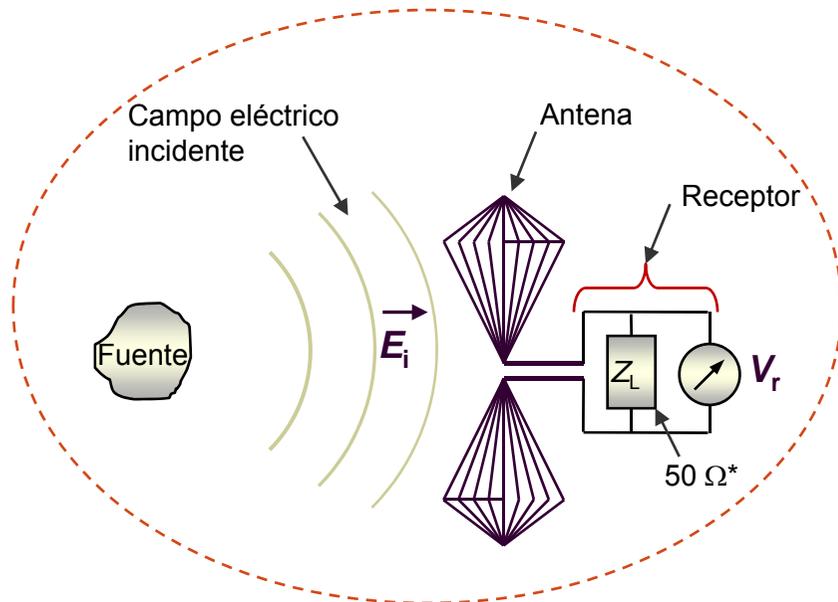
$$P_{\text{radiada}} = P_{\text{incidente}} \eta_{\text{acoplamiento}} \eta_{\text{radiación}} \quad \longrightarrow \quad G' = \eta_{\text{acoplamiento}} G = \eta_{\text{acoplamiento}} \eta_{\text{radiación}} D$$

Ganancia medida y publicada por los fabricantes de antenas para EMC (obtenida de mediciones de factor de antena según la norma ANSI C63.5)

Tipo de antena	Ganancia típica [dBi]
Dipolo eléctricamente corto (sin pérdidas)	1,73
Dipolo de media longitud de onda (sin pérdidas)	2,14
Logarítmica periódica para comunicaciones	8 – 10
Logarítmica periódica para pruebas de EMC	5 – 6
Cornetas	6 – 30

Ganancias típicas de antenas comunes en el área de EMC

Factor de antena (AF)



* especificación de la mayoría de los equipos de RF

El AF expresado en dB:

$$AF_e = 20 * \log_{10}(E_i/V_r) \quad \text{dB (1/m) o dB/m}$$

$$AF_m = 20 * \log_{10}(H_i/V_r) \quad \text{dB (S/m)}$$

** El AF incluye pérdidas y desacoplamientos de la antena y de su balún

Eléctrico

$$AF_e = \frac{E_i}{V_r} \quad (1/m)$$

Magnético

$$AF_m = \frac{H_i}{V_r} \quad (S/m)$$

AF – Factor de antena **

E_i – Campo eléctrico incidente (V/m)

H_i – Campo magnético incidente (A/m)

V_r – Tensión en las terminales de entrada de la antena (V)

Antenas con AF pequeños son más sensibles al E_i

AF [dB/m]	E_i [V/m]	V_r [V]
0	1	1,00
6	1	0,50
10	1	0,32
20	1	0,10

Factor de antena (AF)

Relación entre AF y otros parámetros fundamentales de antenas

Longitud efectiva

$$h_e = \frac{V_{oc}}{E_i} \quad (\text{m})$$

Apertura

$$A = \frac{P_L}{S_i} \quad (\text{m})^*$$

S_i – Densidad de potencia incidente

V_{oc} – Tensión a circuito abierto en la antena

η_0 – Impedancia intrínseca del espacio = 377 Ω

*Incluye pérdidas y desacoplamientos de la antena

$$AF = \sqrt{\frac{\eta_0}{Z_L A}} \quad (1/\text{m}) \quad \longrightarrow \quad A = \frac{\lambda^2}{4\pi} \underbrace{G \eta_{\text{acoplamiento}}}_{G'} \quad \downarrow$$

$$AF = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G'}} \quad (1/\text{m})$$

$$AF = 20 * \log_{10} \left(\frac{9.73}{\lambda \sqrt{G'}} \right) \quad \text{dB}(1/\text{m})$$

Expresión válida:



- Cuando prevalecen las condiciones de campo lejano
- Para sistemas con impedancia de 50 Ω
- Cuando la antena y el campo incidente tienen la misma polarización
- Los efectos por desacoplamientos de impedancia ya están incluidos

Factor de antena (AF)

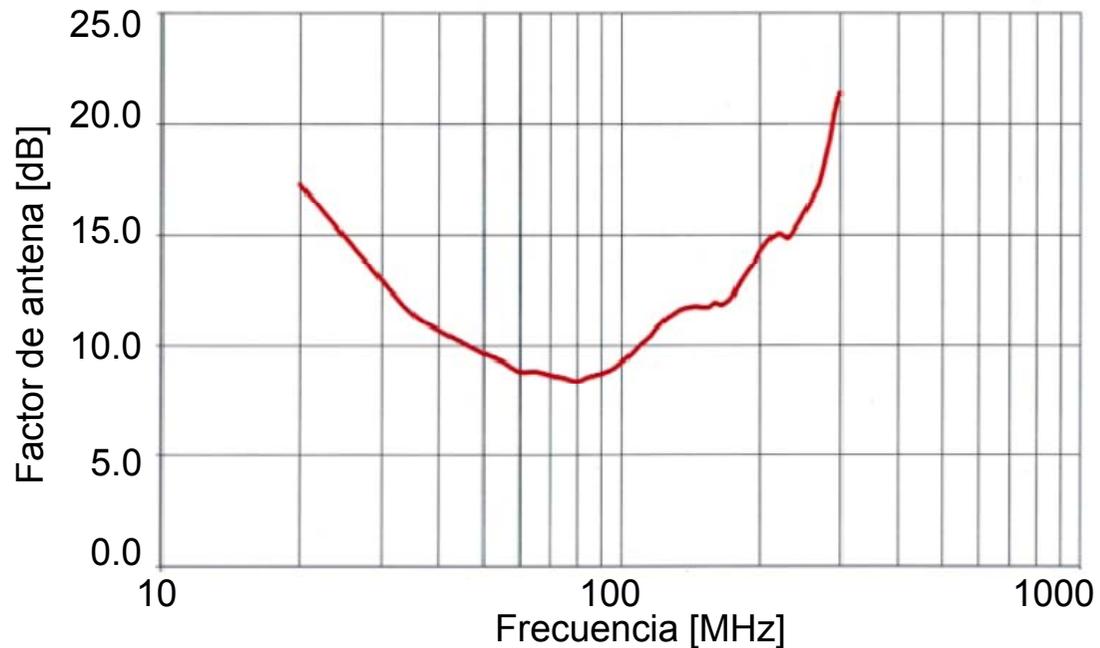
$$AF = \frac{9.73}{\lambda\sqrt{G'}} \quad (1/m) \quad \longrightarrow \quad AF = 20 * \log_{10}\left(\frac{9.73}{\lambda\sqrt{G'}}\right) \quad \text{dB}(1/m)$$

- Generalmente, el AF aumenta con la frecuencia, por lo cual para medir la misma intensidad de campo se requieren receptores con mayor sensibilidad.
- Antenas con G con la frecuencia tendrán un AF que crece con la frecuencia a una razón de 6 dB/octava.
- La dependencia del AF con la frecuencia se debe a que la apertura efectiva de la antena no permanece constante al aumentar la frecuencia.

Factor de antena (AF)

Ejemplos de AF

Factor de antena típico de una antena Bicónica a 3 m

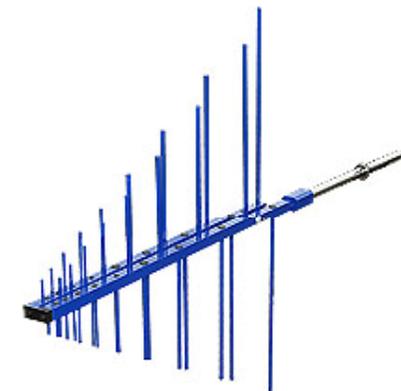
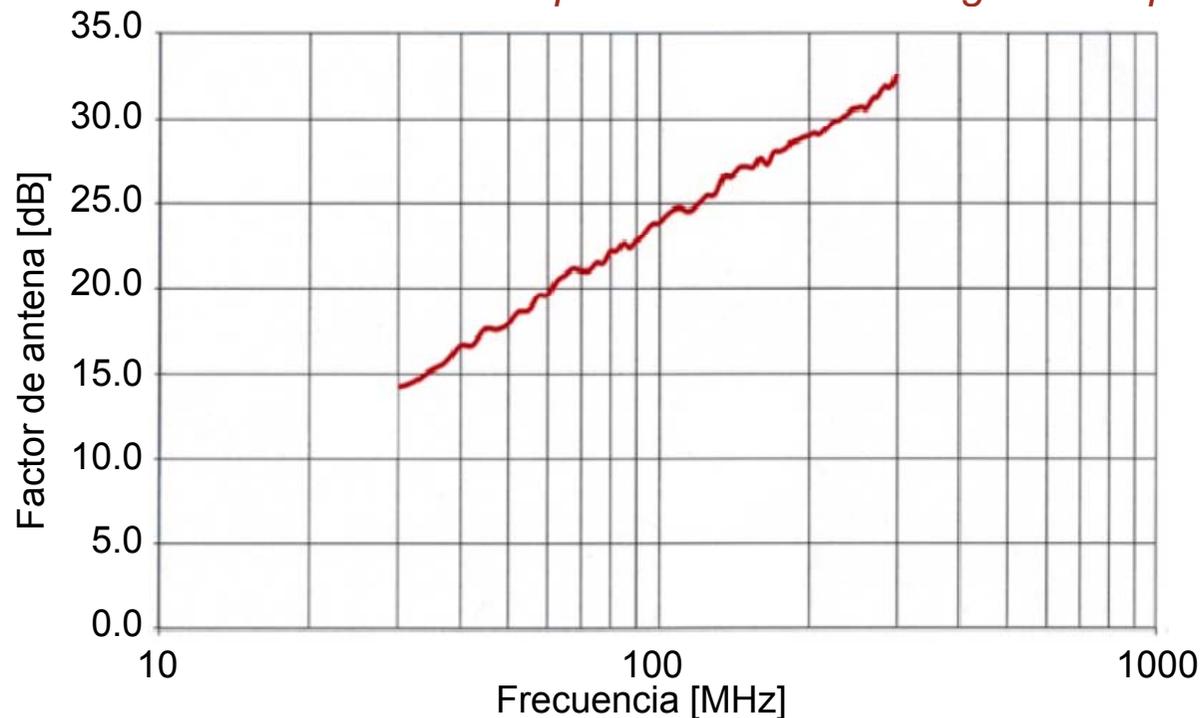


← desacoplamiento VSWR alto | Ganancia casi constante Buen acoplamiento | → Ganancia disminuye con la frecuencia

Factor de antena (AF)

Ejemplos de AF

Factor de antena típico de una antena logarítmica periódica a 3 m



← Ganancia casi constante
Buen acoplamiento →

Conclusiones

1. Tanto la $\eta_{\text{radiación}}$ como el acoplamiento de impedancia de entrada afectan la capacidad de una antena para generar radiación electromagnética en la región de campo lejano.
2. El acoplamiento de impedancia de entrada determina qué cantidad $P_{\text{incidente}}$ se refleja hacia el generador, mientras que la eficiencia de radiación determina qué cantidad de la $P_{\text{incidente}}$ se disipa como calor en la antena.
3. La intensidad de la radiación producida por una antena en la región de campo lejano depende también de la tendencia de la antena para radiar energía en una dirección particular, es decir, de su G .
4. Es crucial comprender la diferencia entre la definición formal de ganancia y la ganancia con desacoplamiento de impedancia, ya que esta última es la que universalmente se especifica por las compañías fabricantes de antenas.
5. Con frecuencia, la falta de acoplamiento de impedancia tiene un efecto mayor en el desempeño de una antena en su región de campo lejano que su propia naturaleza directiva.

Conclusiones

6. Comprender las regiones de campo que rodean una antena permite saber cuándo hacer estimaciones del desempeño de la antena con cantidades o ecuaciones propias de la región de radiación de campo lejano.
7. El término *AF* enfatiza el uso de una antena como detector de campo, ya que es un indicador de la habilidad de una antena para integrar un campo incidente y proveer una diferencia de tensión entre sus terminales.
8. Es importante comprender los alcances de aplicación de los *AF* que son publicados por los fabricantes de antenas para las diferentes pruebas de emisiones radiadas y de susceptibilidad.
9. Es muy valioso para **México** que las personas involucradas en el área de pruebas de EMC cuenten con amplio conocimiento técnico de los elementos que constituyen un sistema de pruebas de EMC, tal como las antenas, para que puedan desarrollar productos de la mejor calidad tanto para el mercado nacional como para el extranjero.

Referencias

- [1] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design," Third Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.
- [2] I. García Ruiz, V. Molina López, M. Botello Pérez, "Curso: Compatibilidad e interferencia electromagnética y antenas," CENAM, Querétaro 2007.
- [3] Z. Chen, and V. Rodriguez, "EMC Antenna Fundamentals," Conformity, p.p. 42 – 50, December 2007.
- [4] J. McLean, R. Sutton, and R. Hoffman, "Interpreting Antenna Performance Parameters for EMC Applications, Part 1: Radiation Efficiency and Input Impedance Match," *TDK RF Solutions Inc.*, 2004.
- [5] J. McLean, R. Sutton, and R. Hoffman, "Interpreting Antenna Performance Parameters for EMC Applications, Part 2: Radiation Pattern, Gain, and Directivity," *TDK RF Solutions Inc.*, 2004.
- [6] J. McLean, R. Sutton, and R. Hoffman, "Interpreting Antenna Performance Parameters for EMC Applications, Part 3: Antenna Factor," *TDK RF Solutions Inc.*, 2004.
- [8] IEC 61000-4-3: 2002-09. Edition 2.1. Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test.
- [9] CISPR 16-1-4: 2004-05. Edition 1.1. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment – Radiated disturbances.
- [10] Antenna Catalog, ETS-LINDGREN, 2002.

GRACIAS !

mbotello@cenam.mx, igarcia@cenam.mx



**Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009**
18-20 de noviembre

↪ Electromagnetismo
↪ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
↪ Tiempo y Frecuencia



CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, CENAM,
DERECHOS RESERVADOS 2009