

MEDICIONES DE EMISIONES E INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS

8. COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC) PARA LOS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES

8.1 Fuentes de interferencias

8.1.1 Consideraciones generales

La compatibilidad EM es la habilidad de los radiosistemas para operar tal y como fueron diseñados en un ambiente radioeléctrico dado, sin que su funcionamiento se vea alterado, ni que degrade el desempeño de otros sistemas. La compatibilidad de los sistemas de radiocomunicaciones nos permite hacer un uso eficiente del espectro EM y asegurar la calidad de la recepción y transmisión de los mensajes.

Al analizar la EMC de los sistemas de los sistemas de radiocomunicaciones, es importante considerar las fuentes potenciales de interferencias electromagnéticas (EMI), los mecanismos probables de acoplamiento y la susceptibilidad de los receptores de radio.

Cualquier dispositivo, aparato o sistema electromagnético, eléctrico o electrónico puede ser una fuente potencial de interferencias, así como también susceptible a ser interferido. Las fuentes pueden ser clasificadas de distintas formas:

- Por el origen, generados por la actividad humana o naturales.
- Por el tipo de disturbios, coherente o incoherente, de banda ancha o angosta.
- Por la función de la fuente, transmisor o fuente intencional o no intencional.

Las fuentes más significativas se muestran en la Fig.8.1.

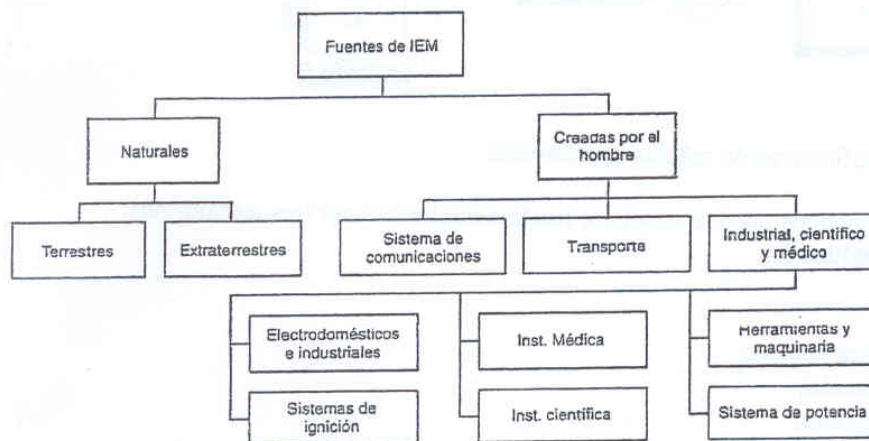


Fig. 8.1. Fuentes de interferencias

El ambiente electromagnético en áreas urbanas está compuesto por los disturbios provenientes de diferentes fuentes enumeradas en la Fig. 8.2, Los niveles de disturbios de fuentes incidentales varía geográfica y temporalmente en periodos cortos, esto hace difícil sugerir niveles de interferencias para lugares y tiempos diferentes.

La práctica normal da la posibilidad de establecer niveles típicos de los disturbios no intencionales y a partir de estos se puede analizar la probabilidad de que los sistemas de radiotelefonía, de radiocomunicación, de navegación aérea, radiodifusión de Amplitud Modulada (AM), Frecuencia Modulada (FM), y Televisión (TV), de microondas, por satélite, sean afectados.

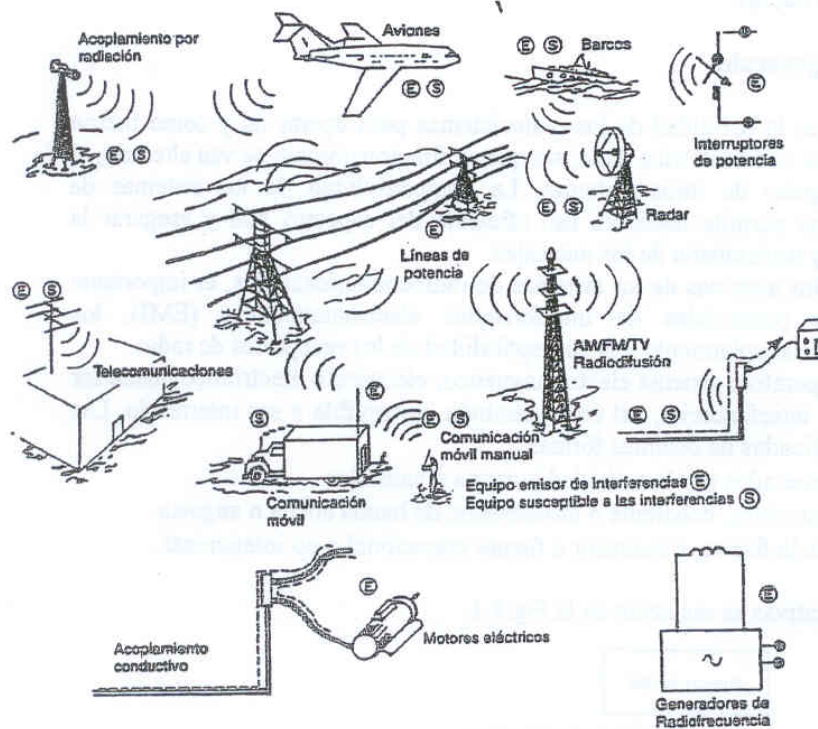


Fig. 8.2 Fuentes más significativas de señales interferentes

Los disturbios electromagnéticos pueden acoplarse fundamentalmente por tres mecanismos: conducción, radiación e inducción

Conducción:

- Impedancia de tierra común;
- Líneas de alimentación;
- Cables de interconexión

Radiación;

(Campos lejanos)

- Antena-antena;
- Radiación e inducción a través del chasis.

Inducción**(Campos cercanos)**

- Campo a conductor;
- Conductor a conductor.

La radiación e inducción tienen lugar a través del espacio libre y la diferencia consiste en que cuando se tienen campos lejanos se dice que está presente la radiación, e inducción cuando se tienen campos cercanos.

8.1.2 Equipos susceptibles a las interferencias E.M.

Cualquier dispositivo, aparato o sistema eléctrico o electrónico es susceptible a ser interferido, ya sea de banda ancha o banda angosta. Los de banda angosta son todos los radioreceptores y radiotransmisores. Los de banda ancha son los circuitos lógicos, interruptores a control remoto, medidores, etc.

Aunque los seres vivos no son susceptibles a las interferencias, sus organismos también absorben y reflejan energía EM, la cual en este caso debe considerarse una contaminación ambiental, como cualquier otra contaminación si esta sobrepasa un cierto nivel puede ser dañina para los seres humanos. Algunos ejemplos de las manifestaciones de la contaminación EM no ionizante son la elevación de la temperatura, cáncer, abortos, alteraciones del sistema inmunológico, depresión, cataratas y esterilidad.

Las EMI pueden presentarse entre sistemas o entre las diferentes partes y bloques que constituyen un sistema. En el primer caso se los considera como cajas negras en donde es de interés la salida de las posibles fuentes de EMI y la susceptibilidad de los receptores. En el segundo, aquí es importante conocer las características de cada bloque y la forma en que están interconectados. Las EMI intrasistemas tienen interés en las etapas de desarrollo de los equipos de telecomunicaciones, en cambio las EMI entre sistemas son de fundamental interés al planear, instalar y operar sistemas de radiocomunicación. En la fase de operación es importante considerar la EMC desde diferentes aspectos operacionales, los principales son la frecuencia de operación, límites de la potencia radiada, características de la antena y localización.

8.1.3 Aplicaciones para la EMC

El análisis de la EMC de los sistemas de comunicaciones es una herramienta de ingeniería, que se emplea desde la fase de especificación y diseño hasta la evaluación de los sistemas en un medio particular de operación.

Los problemas típicos que pueden ser considerados son:

1. Análisis de la EMC para un conjunto de equipos y sistemas e identificar zonas de problemas.
2. Análisis del impacto del cambio de la frecuencia de operación de uno o varios equipos de un conjunto.
3. Análisis del impacto de la inclusión de uno o varios transmisores a un sistema dado o a un conjunto de equipos.

4. Análisis de la interferencia producida a un receptor cuando se anexa a un sistema dado o a un conjunto de equipos.
5. Determinación de uno o varios sitios posibles de localización de un receptor o transmisor que proporcione la menor probabilidad de interferencia.
6. Determinación de las fuentes y causas de un problema determinado de interferencia.
7. Determinación del grado de supresión necesario para eliminar una situación específica de interferencia.
8. Obtención de información sobre la EMC para un lugar dado.
9. Obtención de la información de susceptibilidad de los receptores de radio.
10. Determinación de las pérdidas de acoplamiento de una trayectoria dada.
11. Asesoramiento en la selección de los parámetros de los sistemas: potencia del transmisor, tipo de antena, sensibilidad, selectividad.
12. Obtención sobre la mejor banda de frecuencias para usarse en un sistema dado.
13. Obtención de información en los requerimientos de separación de frecuencias para equipos colocados en áreas pequeñas.
14. Asignación de frecuencias para una operación compatible.
15. Evaluación de la efectividad en la operación de un sistema.
16. Colaboración en las políticas para una mejor administración del espectro EM.
17. Determinación de las influencias de las líneas de alta tensión sobre el funcionamiento de sistemas que operan en su cercanía.
18. Determinación de los niveles de contaminación EM, susceptible de afectar la salud de los habitantes.

Existen diferentes tipos de análisis EMC y cada uno de ellos está en función del problema particular a resolver, de la profundidad y extensión requeridas de la información disponible, de los resultados deseados, y de las consideraciones del costo y tiempo.

8.2 PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LAS ANTENAS

8.2.1 Introducción

Para describir el comportamiento de una antena, es necesario definir varios parámetros. Algunos de los parámetros están inter-relacionados y no todos ellos necesitan ser especificados para una descripción completa del comportamiento de una antena. Muchos de ellos son tomados de la IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas, [1] (IEEE Std 145-1983) y de la bibliografía indicada al final del capítulo.

8.2.2 Diagrama de radiación

El patrón de radiación de una antena se define como; "la representación gráfica o matemática de las propiedades de radiación de una antena como función de las coordenadas del espacio. En muchos casos, el diagrama de radiación es determinado en la región campo-lejano y es representado como función de las coordenadas direccionales. Las propiedades de radiación incluyen, la densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo y polarización". La propiedad de radiación que más interesa es la distribución bi-o tri-dimensional de la energía radiada en función de la posición del observador a lo largo de una superficie de radio constante. Un conjunto de coordenadas convenientes se muestra en la Fig. 8.3. El diagrama de la potencia recibida en un radio constante se denomina *diagrama de potencia*. Por otro lado un gráfico con la variación espacial del campo eléctrico o magnético a lo largo de un radio constante, se llama *diagrama de campo*.

8.2.1 Diagramas isotrópico, direccional, y omnidireccional

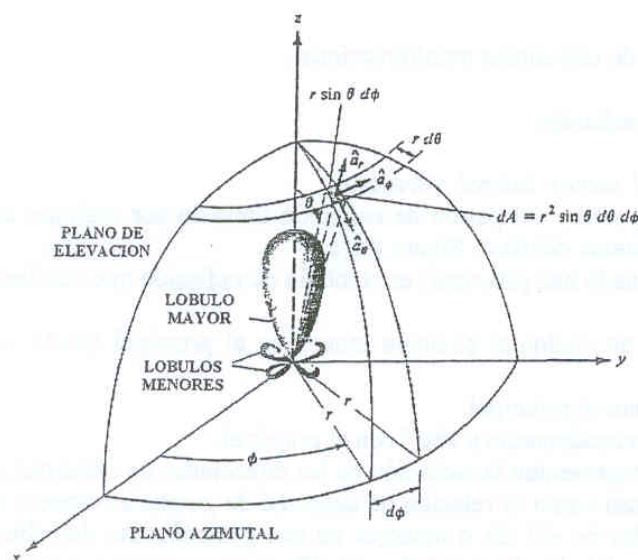


Fig. 8.3. Sistema de coordenadas para el análisis de antenas

Se define al radiador *isotrópico* como "una antena hipotética sin pérdidas que tiene igual radiación en todas direcciones". A pesar de que es ideal y no físicamente realizable, se usa a menudo como referencia para expresar las propiedades direccionales de una antena.

Una antena *direccional* tiene la propiedad de radiar o recibir ondas electromagnéticas más efectivamente en algunas direcciones que otras. Este término se usa generalmente para aquellas antenas cuya directividad es significativamente mayor que la de un medio dipolo.

Una antena *omnidireccional* se define como una que "tiene esencialmente un diagrama no direccional en un plano determinado (puede ser el de azimut) y un diagrama direccional en cualquier plano ortogonal (en este caso de elevación). Se trata de un tipo especial de direccional". Un ejemplo se ve en la Figura 8.4 Un diagrama *omnidireccional* es entonces

un tipo especial de diagrama *direccional*.

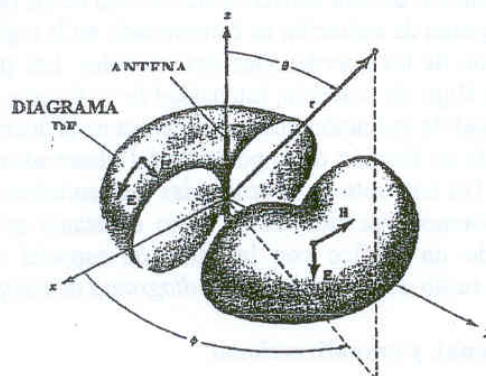


Figura 8.4 Diagrama de radiación de una antena omnidireccional.

8.2.3 Lóbulos del diagrama de radiación

Se clasifican en *mayor o principal, menor, lateral, y trasero*.

Un *lóculo de radiación* es "una porción del patrón de radiación limitado por regiones de intensidades de radiación relativamente débiles". Figura 8.5(a)

El *lóculo mayor* (también denominado haz principal) es el lóculo de radiación que contiene la dirección de máxima radiación.

El *lóculo lateral* es el que está en cualquier posición menos en el principal (suele ser adyacente al principal).

El *lóculo menor* es cualquiera menos el principal.

El *lóculo trasero* tiene su eje aproximadamente a 180° con el principal.

Los lóculos menores usualmente representan la radiación en las direcciones no deseadas, y deben ser minimizadas. Se expresan como la relación de densidad de potencia respecto al lóculo mayor. Los lóculos laterales de -20 dB o menores no son generalmente deseables para muchas aplicaciones. Lograr lóculos laterales de -30 dB requiere generalmente un diseño cuidadoso y una construcción esmerada.

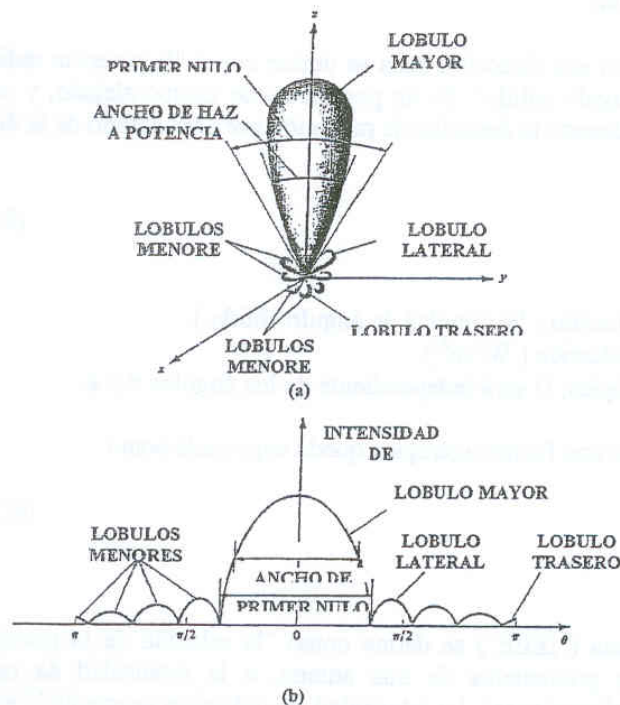


Fig. 8.5.(a) Lóbulos de radiación y anchos del haz de un diagrama de radiación. (b) Diagrama lineal de un patrón de potencia y sus lóbulos y anchos de haz asociados.

8.2.4 Densidad de potencia de radiación

Las ondas electromagnéticas son usadas para transportar información a través de medios inalámbricos o alguna estructura que las guía, de un punto a otro. Es entonces natural asociar la potencia o la energía a las ondas electromagnéticas. La cantidad utilizada para describir la potencia asociada con una onda electromagnética es el vector de POYTING instantáneo, definido como

$$W = E \times H \quad (8.1)$$

W = vector instantáneo de Poynting (W/m^2) *Densidad*

E = intensidad de campo eléctrico instantáneo (V/m)

H = intensidad de campo magnético instantáneo (A/m)

Para aplicaciones de campos variables en el tiempo, muy a menudo es deseable determinar la densidad de potencia media, la que se obtiene mediante la integración del vector de Poynting instantáneo en un periodo y dividiendo por el periodo, cuyo resultado se expresa en W/m^2 .

8.2.5 Intensidad de radiación

La *intensidad de radiación* en una dirección dada se define como "la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido". Es un parámetro de campo-alejado, y se puede obtener simplemente multiplicando la densidad de radiación por el cuadrado de la distancia. Matemáticamente

$$U = r^2 W_{\text{rad}} \quad (8.2)$$

donde

U = intensidad de radiación (W / unidad de ángulo sólido)

W_{rad} = densidad de radiación (W/ m²)

Para una fuente isotrópica, U será independiente de los ángulos θ y ϕ .

La intensidad de radiación de una fuente isotrópica queda expresada como

$$U_o = P_{\text{rad}} / 4\pi \quad (8.3)$$

2.6 Directividad

La directividad de una antena (IEEE) se define como "la relación de la intensidad de radiación en una dirección proveniente de una antena, a la intensidad de radiación, promediada sobre todas las direcciones". La intensidad de radiación promediada es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π . Si la dirección no está especificada, implica que se trata de la dirección de máxima radiación". De una forma más sencilla, la directividad de una fuente no isotrópica es igual a la relación de su intensidad de radiación en una dirección dada, sobre la de una fuente isotrópica. Matemáticamente se puede escribir como

$$D = U/U_o = 4\pi U/P_{\text{rad}} \quad (8.4)$$

Si la dirección no está especificada, implica que la intensidad es la de máxima radiación (máxima directividad) expresada como

$$D_{\text{max}} = D_o = U_{\text{max}}/U_o = U_{\text{max}}/U_o = 4\pi U_{\text{max}}/P_{\text{rad}} \quad (8.5)$$

D = directividad (adimensional)

D_o = máxima directividad (adimensional)

U = intensidad de radiación (W/por unidad de ángulo sólido)

U_o = intensidad de radiación de una fuente isotrópica (W/unidad de ángulo sólido)

P_{rad} = potencia radiada total (W)

Para un fuente isotrópica, es obvio, a partir de la (8.5) que la directividad es la unidad, ya que, U , U_{max} y U_o son todas iguales entre sí

8.2.7 Ganancia

Otra medición útil para describir la conducta de una antena es la *ganancia*. A pesar de que la ganancia está íntimamente relacionada a la directividad, es una medición que tiene en cuenta la eficiencia de la antena, como así también sus posibilidades directivas.

Recordemos que la directividad es una medida que describe solo las propiedades direccionales de la antena, y por lo tanto solo es controlada por el diagrama de radiación.

La *ganancia absoluta* de una antena en una dirección dada se define como "la relación entre la intensidad, en una dirección dada, a la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena fuese radiada isotrópicamente. La intensidad de radiación correspondiente a la potencia radiada isotrópicamente es igual a la potencia aceptada (entrada) por la antena, dividida por 4π . Se puede expresar como

$$\text{ganancia} = \frac{4\pi \text{ intensidad de radiación}}{\text{potencia total de entrada}} = 4\pi U(\theta, \phi) / P_{in} \text{ (adimensional)} \quad (8.6)$$

En la mayoría de los casos se trata con la *potencia relativa*, la que se define como "la relación entre la ganancia de potencia en una dirección, a la ganancia de potencia de una antena de referencia en la dirección de referencia". La potencia de entrada debe ser igual para ambas antenas. La antena de referencia es generalmente un dipolo, bocina, o cualquier otra antena cuya ganancia pueda ser calculada o que se conozca.

En la mayoría de los casos. Sin embargo, la antena de referencia es una fuente isotrópica sin pérdidas. Entonces

$$G = 4\pi U(\theta, \phi) / P_{in} \text{ (fuente isotrópica sin pérdidas) (adimensional)} \quad (8.7)$$

Cuando la dirección no queda establecida, generalmente, la ganancia de potencia es tomada en la dirección de máxima radiación. Refiriéndonos a la Figura 8. 4(a), se puede escribir que la potencia total radiada (P_{rad}) está relacionada con la potencia de entrada total (P_{in}) por

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (8.8)$$

donde e_{cd} es la eficiencia de radiación de la antena. De acuerdo a las normas IEEE la ganancia no incluye las pérdidas provenientes de la desadaptación de impedancias (pérdidas por reflexión) y desadaptación de polarización (pérdidas).

Aún cuando no incluiremos aquí ambas pérdidas en la definición de ganancia, las que serán definidas posteriormente, ambas pérdidas son importantes, y ellas necesitan ser incluidas cuando se trata en el cálculo del eslabón del sistema de comunicaciones, en la determinación de la potencia radiada o recibida, aún cuando no estén incluidas en la presente definición de ganancia.

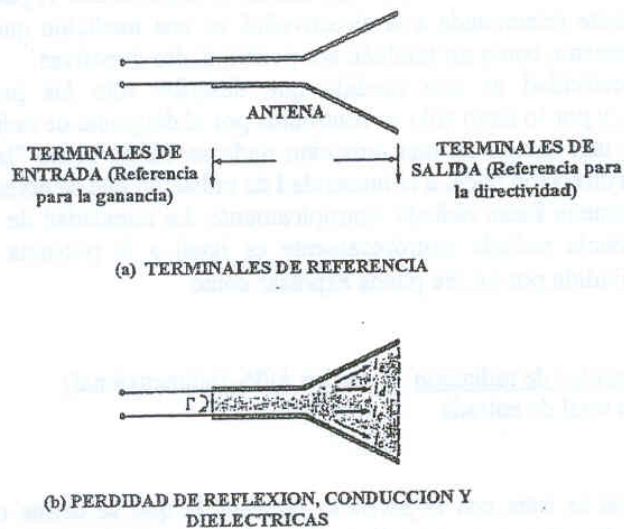


Fig. 8.6. Terminales de referencia y pérdidas de una antena.

8.2.8 Factor de antena

Este es un parámetro de las antenas para el ensayo de EMC que se utiliza para el cálculo de la intensidad de campo en las mediciones de emisiones radiadas. Relaciona la tensión de salida de una antena que se ensaya al valor del campo incidente que genera dicha tensión. Las unidades son voltios de salida por voltios metro del campo incidente o la recíproca de metros (Fig. 8.5). Como se puede ver, la expresión analítica del Factor de Antena (AF) tiene la equivalencia de frecuencia en el numerador, de manera tal que el AF aumenta típicamente con el incremento de la frecuencia. Las antenas que se utilizan para estos ensayos de emisiones radiadas deben ser calibradas individualmente, es decir, que se mide directamente su AF a todas las distancias apropiadas. La calibración produce valores que se definen como "factor de antena en el espacio libre". Generalmente es medido utilizando el método de las tres antenas sobre un plano de tierra. En el procedimiento de calibración se hacen las correcciones producto de las reflexiones de la antena en el plano de tierra, dando así el valor que sería medido si la antena estuviese en el "espacio libre". Las antenas que típicamente se utilizan para las mediciones son las antenas de banda ancha tal como la Bicónica y la antena periódica logarítmica. En el caso que hubiese desacuerdo, una "antena de referencia" – un dipolo resonante – es el aconsejable para el arbitraje.

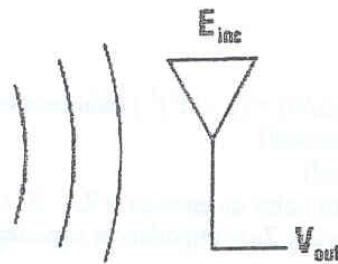


Fig. 8.7. Factor de antena

8.2.8 Factor de antena de transmisión

El Factor de Antena de Transmisión (TAF) es similar al AF ya que describe el comportamiento de la antena en EMC sobre su rango de frecuencia de operación (Fig.8.6). Este parámetro relaciona el campo E producido por una antena, a una distancia dada, a la tensión de entrada en los terminales de entrada de la antena. Las unidades son Voltios/metro producidos por voltio de entrada, de manera que las unidades finales son la recíproca de metros de igual que para el AF. El AF y el TAF no son lo mismo y no son recíprocos, a pesar de ello puede calcularse uno del otro. El TAF **no** es función directa de la frecuencia, pero es una función de la distancia.

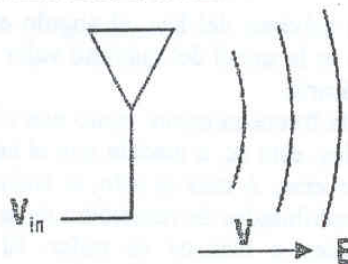


Fig. 8.8. Factor de antena de transmisión

8.2.9 Eficiencia de antena

La eficiencia total de una antena ϵ_t es utilizada para tomar en cuenta las pérdidas en los terminales de entrada y los producidos por la estructura de la antena. Estas pérdidas se pueden deber a, refiriéndonos a la Fig. 8.(a)

1. Reflexiones debido a la desadaptación entre la línea de transmisión y la antena.
2. Pérdidas de I^2R (dieléctricas y de conducción).

En general, la eficiencia total puede ser explicitada como

$$\epsilon_o = \epsilon_r \epsilon_c \epsilon_d$$

(8.9)

donde

e_o = eficiencia total (adimensional)

e_r = eficiencia de reflexión (desadaptación) = $(1 - |\Gamma|^2)$ (adimensional)

e_c = eficiencia de conducción (adimensional)

e_d = eficiencia dieléctrica (adimensional)

Γ = coeficiente de reflexión en los terminales de entrada = $Z_{in} - Z_o / Z_{in} + Z_o$, donde

Z_{in} = impedancia de entrada de la antena y Z_o = impedancia característica de la línea de transmisión.

Usualmente e_c y e_d son difíciles de computar, pero pueden ser determinados experimentalmente, aún que son muy difíciles de separar y es más conveniente escribir la (8.9) como

$$e_o = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (8.10)$$

donde

$e_{cd} = e_c e_d$ = eficiencia de radiación, la que se utiliza para relacionar la ganancia y la directividad.

8.2.10 Ancho del haz de potencia media

Se define como: "en un plano que contenga el máximo del haz, el ángulo entre las dos direcciones en el cual la intensidad de radiación es la mitad del máximo valor del haz". Si no se trata de los puntos de 3 dB hay que especificarlo.

Es una figura de mérito importante, y es utilizada frecuentemente como una relación entre el ancho del haz y el nivel de los lóbulos laterales; esto es, a medida que el ancho del haz disminuye, los lóbulos laterales aumentan y viceversa. A más de esto, el ancho del haz de antena es también utilizado para describir las posibilidades de resolución de la antena para distinguir entre dos fuentes radiantes adyacentes o blancos de radar. El criterio de resolución más común establece que "la capacidad de resolución de una antena para distinguir entre dos fuentes es igual a la mitad del primer nulo del ancho del haz (FNBW/2), el cual es a menudo utilizado para aproximar el ancho del haz de potencia-media. Esto es, dos fuentes separadas por una distancia angular igual o mayor que FNBW/2 \cong HPBW de una antena con una distribución uniforme puede ser resuelta. Si la separación es menor, entonces la antena tenderá a suavizar la distancia angular de separación.

Donde

FNBW = Primer nulo del ancho del haz.

HPBW = Ancho del haz de potencia media.

8.2.11 Ancho de banda

El *ancho de banda* de una antena se define como "el rango de frecuencias dentro el cual, el comportamiento de la antena, con respecto a algunas características, se ajusta a especificaciones típicas". El ancho de banda puede ser considerado como el rango de frecuencias, a cada lado de la frecuencia central (generalmente la frecuencia de resonancia para un dipolo) donde las características de la antena, (tal como impedancia de entrada, diagrama, ancho del haz, polarización, nivel de los lóbulos laterales, ganancia, dirección del haz, eficiencia de radiación, ROE) están dentro de un valor aceptable respecto de la

frecuencia central. Para antenas de banda ancha, el ancho de banda es usualmente expresado como la relación de la frecuencia superior-a-inferior de operación aceptable. Por ejemplo un ancho de banda de 10:1 indica que la frecuencia superior es 10 veces mayor que la menor. Para antenas de banda angosta, el ancho de banda se expresa como un porcentual de la diferencia de frecuencia (superior menos la menor) sobre la frecuencia central del ancho de banda. Por ejemplo, el ancho de banda del 5% indica que la diferencia de frecuencia de operación aceptable es 5% de la frecuencia central del ancho de banda.

Debido a que las características (impedancia de entrada, diagrama, ganancia, etc.) de una antena no varían necesariamente de la misma manera, o mejor aún, pueden ser afectadas críticamente por la frecuencia, no existe una única caracterización del ancho de banda. Las especificaciones se establecen en cada caso para encontrar las necesidades de cada aplicación. Generalmente hay una distinción hecha entre las variaciones del diagrama de radiación y de la impedancia de entrada.

El ancho de banda del diagrama de radiación y el ancho de banda de la impedancia son utilizadas para enfatizar esta distinción. Asociada con el ancho de banda del diagrama se encuentran la ganancia, nivel de los lóbulos laterales, ancho del haz, pureza de polarización, mientras que la impedancia de entrada y la eficiencia de radiación y el ROE, están relacionados por el ancho de banda de impedancia. Por ejemplo, el diagramas de un dipolo lineal con una longitud total menor que media longitud de onda ($l < \lambda/2$) es insensible a la frecuencia. El factor limitativo para esta antena es la impedancia y su ancho de banda. Por lo tanto el ancho de banda está generalmente formulado en términos del ancho del haz, nivel de los lóbulos laterales, y características de radiación. Para una longitud intermedia, el ancho de banda puede estar limitado por las variaciones del diagrama o impedancia, dependiendo de la aplicación particular. Para estas antenas, un ancho de banda de 2:1 indica un buen diseño. Para otras, se necesitan anchos de banda grandes.

Las antenas con elevado ancho de banda (por ejemplo 40:1 o mayor) que se han diseñado en años recientes, se las conoce como antenas *independientes de la frecuencia*.

La discusión anteriormente realizada presupone que las mallas de acoplamiento (transformadores, balunes, etc.) y/o las dimensiones de la antena no están alteradas de ninguna manera a medida que la frecuencia varía.

Es posible aumentar el rango de frecuencias aceptable de una antena de banda angosta si se pueden hacer ajustes apropiados en las dimensiones críticas de la antena y/o en las mallas de acoplamiento a medida que la frecuencia es variada. Los ejemplos más comunes, son la antena de una radio de automóvil y las de "orejas de conejo" de TV. Ambas tienen generalmente longitudes ajustables que pueden ser utilizadas para sintonizar las antenas para una nueva frecuencia de recepción.

8.2.12 Polarización

La *polarización de una antena* en una dirección dada es definida como "la polarización de la onda transmitida (radiada) por una antena". NOTA: Cuando la dirección no está establecida, la polarización se toma como la polarización en la dirección de máxima ganancia. En la práctica, la polarización de una energía radiada varía en dirección desde el centro, de manera que las diferentes partes del diagrama pueden tener diferentes polarizaciones.

Campo eléctrico E.

La polarización puede ser clasificada en lineal, circular o elíptica. Si el vector que describe el campo eléctrico en un punto en el espacio como función del tiempo es siempre descrito a lo largo de una línea, se dice que el campo está polarizado *linealmente*. En general, sin embargo, la figura que traza el campo eléctrico es una elipse, y se dice que el campo está polarizado *elípticamente*.

Las polarizaciones lineal y circular son casos especiales de las elípticas, y ellas pueden ser obtenidas cuando la elipse se convierte en una línea o un círculo respectivamente.

La figura del campo eléctrico es trazada en sentido horario (CW) o anti-horario (CCW) La rotación horaria del vector del campo eléctrico se lo designa como *polarización mano derecha* y al anti-horario como *polarización mano izquierda*.

La radiación de una antena en una polarización especificada se la denomina polarización de referencia o copular, mientras que la polarización ortogonal se la conoce como polarización cruzada. El cociente de las potencias contenidas en ambas polarizaciones es una medida de la pureza de polarización y se conoce como la discriminación de polarización cruzada y se expresa en dB.

8.2.13 Impedancia de entrada

La antena ha de conectarse a un transmisor y radiar el máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas en ella. La antena y el transmisor han de adaptarse para una máxima transferencia de potencia en el sentido clásico de circuitos. Habitualmente el transmisor se encuentra alejado de la antena y la conexión se hace mediante una línea de transmisión o guía de ondas, que participa también en esa adaptación. debiéndose considerar su impedancia característica, su atenuación y su longitud.

El transmisor produce corrientes y campos que pueden ser medidos en puntos característicos de la antena.

A la entrada de la antena puede definirse la impedancia de entrada Z_A mediante relaciones tensión-corriente en ese punto. Poseerá una parte real $R_A(\omega)$ y una imaginaria $X_A(\omega)$, ambas dependientes en general de la frecuencia. Si Z_A no presenta una parte reactiva a una frecuencia, se dice que es una antena resonante. Dado que la antena radia energía, hay una pérdida neta de potencia hacia el espacio debida a radiación, que puede ser asignada a una *resistencia de radiación* R_r , definida como el valor de resistencia que disiparía óhmicamente la misma potencia que la radiada por la antena.

Superpuestas a la radiación tendremos las pérdidas que pueden producirse en la antena habitualmente óhmicas. Todas las pérdidas pueden globalizarse en una resistencia de pérdida R_L . La resistencia de entrada es la suma de las de radiación y pérdidas..

La impedancia de entrada es un parámetro de gran trascendencia ya que condiciona las tensiones de los generadores que se deben aplicar para obtener determinados valores de corriente en la antena y, en consecuencia una determinada potencia radiada. Si la parte reactiva es grande, hay que aplicar tensiones elevadas para obtener corrientes apreciables; si la resistencia de radiación es baja, se requieren elevadas corrientes para obtener una potencia radiada importante.

Un ejemplo real puede ser un sistema radiante de radiodifusión de frecuencia media. Para radiar una potencia de 200 KW con una impedancia de entrada de $20 - j100 \Omega$, se requiere una corriente de 100 A y un generador de $|V| = 10.200 \text{ V}$. Si se compensara la parte reactiva con una inductancia, la tensión del generador sería solo de 2000 V, si bien en ambas reactancias (antena e inductancia) estarían presentes 10.000 V reactivos. Altos valores de corriente producen pérdidas óhmicas importantes y elevados valores de tensión

$Z_A \neq R_r$
se necesita
P.V.M. //
Tm. Apreciable
Rr + se
necesita
P.Tm. P//
Pot. real
Apreciable

pueden producir fugas y descargas entre diversas partes de la antena o con tierra, planteando problemas de forma y de aislamiento.

La *impedancia de entrada* de una antena se define como "la impedancia presentada por una antena en sus terminales de entrada, o por la relación entre la tensión y la corriente en un par de terminales, o la relación de los componentes apropiados del campo eléctrico al campo magnético en un punto". Estamos principalmente interesados en la impedancia de entrada en un par de terminales, los que son los terminales de entrada de la antena. En la Fig. 8.9(a) estos terminales son designados como a-b. La relación de la tensión a la corriente en esos terminales, sin carga adjunta, define la impedancia de entrada

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (8.11)$$

donde

Z_A = impedancia de entrada en los terminales a-b (Ω)

R_A = resistencia de entrada en los terminales a b (Ω)

X_A = reactancia de entrada en los terminales a-b (Ω)

En general la parte resistiva de la (8.11) consiste en dos componentes, esto es

R_r = resistencia de radiación de la antena

R_L = resistencia de pérdida de la antena

Si consideramos que la antena está acoplada a un generador con resistencia interna

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (8.12)$$

donde

R_g = resistencia de la impedancia del generador

X_g = reactancia de la impedancia del generador

y la antena es usada en el modo transmisión, podemos representar la antena y el generador mediante un circuito equivalente visto en la Figura 8.9(b). Para encontrar la potencia suministrada a R_r por radiación y la disipada en R_L por calor ($I^2 R_L / 2$) se debe calcular previamente I_g , P_r , P_l , y P_g . La potencia máxima suministrada a la antena se presenta cuando tenemos adaptación conjugada y está dada por

$$R_r + R_L = R_g$$

$$X_A = -X_g$$

En este caso, de la potencia suministrada por el generador, la mitad es disipada como calor en la resistencia interna (R_g) del generador y la otra mitad es suministrada a la antena. Esto solo sucede cuando se tiene adaptación conjugada. De la potencia que es suministrada a la antena, parte es irradiada a través del mecanismo provisto por la resistencia de radiación y la otra es disipada como calor que es parte de la influencia de la eficiencia total de la antena. Si la antena no tiene pérdidas, entonces la mitad de la potencia total suministrada por el generador es radiada por la antena durante la adaptación conjugada, y la otra mitad es disipada en forma de calor en el generador. De tal manera, para radiar la mitad de la

potencia disponible a través de R_r se debe disipar la otra mitad como calor en el generador a través de R_g .

Estas dos potencias son análogas, respectivamente, a la potencia transferida a la carga y la potencia esparcida por la antena en el modo recepción. En la Figura 8.7 se asume que el generador está directamente conectado a la antena. Si hay una línea de transmisión entre los dos, lo que usualmente es el caso, entonces la Z_g representa la impedancia equivalente del generador transferido a los terminales de entrada de la antena usando la ecuación de transferencia de impedancia. Si, a más de ello, la línea de transmisión tiene pérdidas, entonces la potencia disponible a ser radiada por la antena será reducida por las pérdidas de la línea de transmisión. La Fig. 8.9(c) ilustra el equivalente de Norton de la antena y sus fuente en el modo transmisión.

El uso de la antena en el modo recepción se muestra en la Figura 8.8(a). la onda incidente sobre la antena induce una tensión V_T que es análoga a V_g en el modo transmisión.

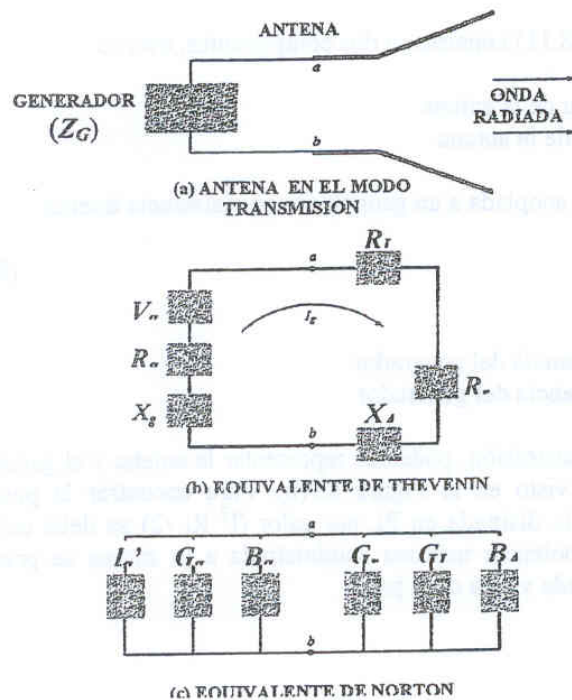


Fig.8.9 Antena transmisora y sus circuitos equivalentes

El circuito equivalente de Thevenin en el modo recepción para la antena y su carga se muestra en la Fig. 8.10(b) y el Norton equivalente en la 8.10(c). La potencia P_r suministrada a R_r se la refiere como potencia esparcida (scattered o re-radiada). Bajo ciertas condiciones de adaptación conjugada, de toda la potencia recogida o capturada, la mitad es suministrada a la carga R_r y la otra mitad es re-radiada a través de R_r y disipada como calor a través de R_L . Si las pérdidas son cero ($R_L = 0$), entonces la mitad de la potencia capturada es suministrada a la carga y la otra mitad es re-radiada. Esto significa que para entregar la mitad de la potencia a la carga se debe re-radiar la otra mitad. Esto se hace importante cuando se discute las áreas equivalentes efectivas y la eficiencia de las aperturas,

especialmente para antenas de apertura de elevada directividad, tal como guías de onda, bocinas, y reflectores con eficiencia de apertura muy elevados, del 80 al 90%.

La impedancia de entrada de una antena es generalmente función de la frecuencia. De esta manera la antena deberá ser adaptada a la línea de transmisión inter-conectada y al otro equipamiento asociado solamente dentro de su ancho de banda.

A más de ello, la impedancia de entrada de la antena depende de varios factores más, incluyendo sus geometrías, el método de excitación, y sus proximidades a los objetos circundantes. Debido a su compleja geometría, solo un limitado número de antenas prácticas han sido investigadas analíticamente, y de ahí la importancia de su determinación experimental

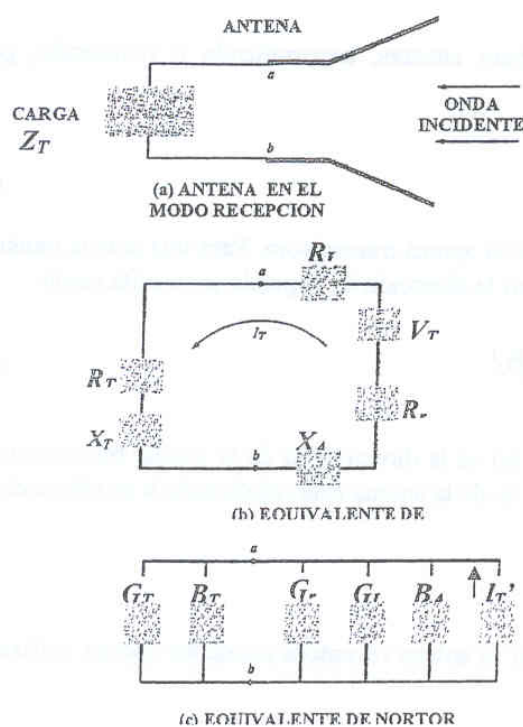


Figura 8.10 Antena y sus circuitos equivalentes en el modo recepción

8.214. Ecuación de Transmisión de Friis

La Ecuación de Transmisión de Friis relaciona la potencia recibida a la potencia transmitida entre ambas antenas, separadas por una distancia $R > 2D^2 / \lambda$, donde D es la máxima dimensión de cualquiera de las dos antenas. Refiriéndonos a la Figura 8.9 supongamos inicialmente que la antena transmisora es isotrópica. Si la potencia de entrada a los terminales de la antena transmisora es P_t , entonces su densidad de potencia isotrópica W_0 a una distancia R desde la antena es

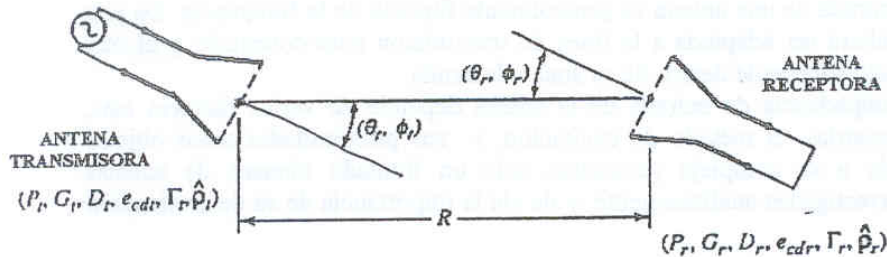


Figura 8.11 Orientación geométrica para antenas, transmitiendo o recibiendo, para la ecuación de Friis

$$W_o = e_t P_t / 4\pi R^2 \quad (8.13)$$

donde e_t es la eficiencia de radiación de la antena transmisora. Para una antena transmisora no isotrópica, la densidad de potencia en la dirección θ_t, ϕ_t puede ser escrita como

$$W_t = \frac{P_t G_t(\theta_t, \phi_t)}{4\pi R^2} = e_t \frac{P_t D_t(\theta_t, \phi_t)}{4\pi R^2} \quad (8.14)$$

donde $G_t(\theta_t, \phi_t)$ es la ganancia y $D_t(\theta_t, \phi_t)$ es la directividad de la antena transmisora en la dirección θ_t, ϕ_t . Como el área efectiva A_r de la antena está relacionada a su eficiencia e_r y a la directividad D_r por

$$A_r = e_r D_r(\theta_r, \phi_r) (\lambda^2 / 4\pi) \quad (8.15)$$

la magnitud de la potencia recogida por la antena receptora puede ser escrita, utilizando la 8.14 y la 8.15 como

$$P_r = e_r D_r(\theta_r, \phi_r) \frac{\lambda^2}{4\pi} W_t = e_r e_t \frac{\lambda^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) P_t}{(4\pi R)^2}$$

o la relación de la potencia recibida a la potencia de entrada como

$$\frac{P_r}{P_t} = e_t e_r \frac{\lambda^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r)}{(4\pi R)^2} \quad (8.16)$$

La potencia recibida basada en la 8.16 supone que las antenas transmisora y receptora están adaptadas a sus respectivas líneas y cargas (las eficiencias de reflexión son la unidad) y que la polarización de la antena receptora está adaptada a la onda incidente.

Si se incluyen en los datos estos dos factores, la relación dada por 8.16 queda

$$\frac{P_r}{P_t} = \epsilon_{\text{odt}} \epsilon_{\text{odr}} (1 - |\Gamma_t|^2) (1 - |\Gamma_r|^2) (\lambda / 4\pi R)^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) |\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 \quad (8.17)$$

Para antenas adaptadas para reflexión y polarización alineadas para la recepción y radiación direccional máxima es

$$\frac{P_r}{P_t} = (\lambda / 4\pi R)^2 G_{ot} G_{or} \quad (8.18)$$

Las ecuaciones (8.16), (8.17) o (8.18) se conocen como *ecuaciones de transmisión de Friis*, y sus relaciones entre la potencia P_r (suministrada a la carga del receptor) y la potencia de entrada a la antena transmisora P_t . El término $(\lambda / 4\pi R)^2$ se denomina *factor de pérdida del espacio libre*, y tiene en cuenta las pérdidas debido a la dispersión esférica de la energía de la antena.

8.3. ENSAYOS

8.3.1. Ensayo de las Emisiones Radiadas

En un ensayo de las emisiones radiadas, se miden las emisiones electromagnéticas emanadas del equipo bajo prueba (EUT). El propósito del ensayo es el de verificar la habilidad del EUT para permanecer por debajo de emisiones electromagnéticas específicas durante su operación. Se coloca una antena ya sea a 3 o 10 metros del EUT. De acuerdo a las normas ANSI C63,4, la antena receptora debe explorar de 1 a 4 metros en altura. La exploración permite localizar el peor nivel de emisión del EUT.

La Fig. 1 muestra un diagrama en bloques del sistema de ensayo de emisiones, tal como lo especificado por las normas. El dispositivo de ensayo está compuesto por una antena de recepción, el primer cable de interconexión, un pre-amplificador, un segundo cable de interconexión, y un medidor de ruido de radio (receptor o analizador de espectro).

La función de cada componente del dispositivo de ensayo es:

La antena de recepción

La medida del comportamiento de esta antena, es el Factor de Antena, que relaciona el valor del campo incidente-E al valor de la tensión de salida de la antena. Esto es normalmente suministrado por el fabricante en unidades en dB de la inversa de metros.: Se puede utilizar una variedad de antenas para esta medición. Típicamente, se utiliza una combinación de dos antenas para cubrir el rango de que va de 30 MHz a 1000 MHz- una bicónica que va de 30 a 200 MHz y una periódica logarítmica para el rango de frecuencias de 200 MHz a 1000 Mhz. Este Factor de Antena se muestra en A.

El primer cable de interconexión

Este cable conecta la salida de la antena a la entrada del preamplificador. Se produce una reducción en la amplitud de la señal medida debido a las pérdidas del cable. Para mejorar la exactitud, es necesario que estas pérdidas sean sumadas al valor medido de la tensión de salida de la antena para compensar las pérdidas, lo que se indica en B:

El preamplificador

Se utiliza mayormente con los analizadores de espectro para compensar la elevada figura de ruido de entrada de estos instrumentos. Los receptores pueden no necesitar el pre. El amplificador incrementa el nivel de la señal medida, de manera que la respuesta debe ser corregida mediante la sustracción de la ganancia del preamplificador. Se indica en C.

El segundo cable de interconexión

Este cable conecta la salida del preamplificador al instrumento que mide el ruido y se debe proceder de igual manera que con el primer cable. Se ve en D.

El medidor de ruido de radio

Puede ser un receptor o un analizador de espectro. Cualquiera de ellos debe tener un ancho de banda de 120 KHz, sintonizable, con un medidor de radio frecuencia en micro voltio calibrado en dB μV . Figura E.

El cálculo de la señal de campo-E medido está dada por:

$$E(\text{dB } \mu V/m) = V(\text{dB } \mu V) + CL_1(\text{dB}) - PAG(\text{dB}) + CL_2(\text{dB}) + AF(\text{dB } 1/m)$$

Donde:

$$E(\text{dB } \mu V/m) = \text{Campo-E medido}$$

$$V(\text{dB } \mu V) = \text{Valor del medidor de ruido de radio}$$

$$CL_1(\text{dB}) = \text{Pérdidas del cable 1}$$

$$PAG(\text{dB}) = \text{Ganancia del preamplificador}$$

$$CL_2(\text{dB}) = \text{Pérdidas del cable 2}$$

$$AF(\text{dB } 1/m) = \text{Factor de antena}$$

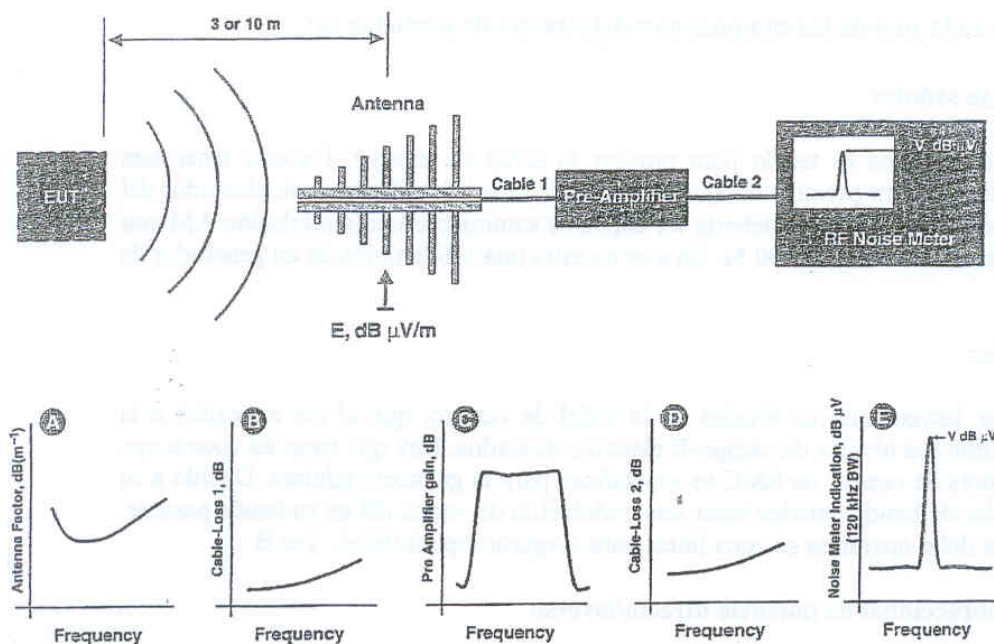


Figure 1. Radiated Emissions Test

$$E(\text{dB } \mu\text{V/m}) = V(\text{dB } \mu\text{V}) + CL_1(\text{dB}) - PAG(\text{dB}) + CL_2(\text{dB}) + AF(\text{dBm}^{-1})$$

8.3.2. Ensayo de Inmunidad a la Radiación

En los ensayos de inmunidad de radiación, se dirige al equipo bajo prueba (EUT) una señal de ensayo de energía de RF, típicamente de 3 ó 10 voltios por metro, y se analiza la reacción del EUT a estas señales. El propósito de este ensayo es el de demostrar la habilidad que tiene el EUT de soportar la excitación de la señal sin que se produzca falla o degradación de la señal. Cuanto mayor sea la inmunidad de un producto a esta señal de ensayo, mejor debería operar cuando otro equipo eléctrico o electrónico opere en sus inmediaciones.

La Fig. 1 muestra un diagrama en bloques de un sistema de ensayo de inmunidad como el que puede ser usado el ensayo IEC 61000-4-3. Está compuesto por un generador de señales, un amplificador, un acoplador direccional directo-inverso con su medidor de potencia asociado, una antena radiante, y un sistema de ensayo de campo-E omnidireccional.

La función de cada uno de los componentes del sistema de medición es:

El generador de señales

El generador de señales es usado para proveer la señal de ensayo. Debería tener una adecuada resolución para permitir un ajuste preciso del nivel de referencia de alrededor del 1 % del valor deseado. También debería ser capaz de suministrar una modulación AM con una onda senoidal de 1 KHz. del 80 %. En a se muestra una salida típica de un generador de señales.

El amplificador

El amplificador incrementa los niveles de la señal de ensayo, que al ser aplicados a la antena, producirán los niveles de campo-E eléctrico deseados. Hay que tener en cuenta que los amplificadores de ensayo de EMC se especifican para la ganancia mínima. Debido a su extremado ancho de banda, pueden tener una ondulación de varios dB en su banda pasante. El amplificador debe operar en su zona lineal para asegurar repetibilidad. Ver B

El acoplador direccional de potencia directo/inverso

El acoplador direccional de potencia directo/inverso es colocado en la línea entre la salida del amplificador y la entrada de la antena tan cercana a la antena como sea posible prácticamente. La diferencia entre la potencia directa y la inversa (potencia neta) es registrada para determinar el nivel de entrada de señal necesario para desarrollar la señal de ensayo deseada, y mostrar que esta entrada deseada a la antena es desarrollada durante el ensayo. Esto se muestra en C.

La antena

La antena genera el campo eléctrico-E deseado. Su comportamiento en la generación del campo está dado por el Factor de Antena de Transmisión (TAF), como se ve en D:

El sistema de exploración omnidireccional

El sistema de exploración es usado para la medición directa del valor del campo eléctrico-E.

La Fig.2 muestra una representación gráfica de las señales de un sistema de ensayo de inmunidad. La figura también incluye valores obtenidos de los niveles de señal a una frecuencia específica de 100 MHz.

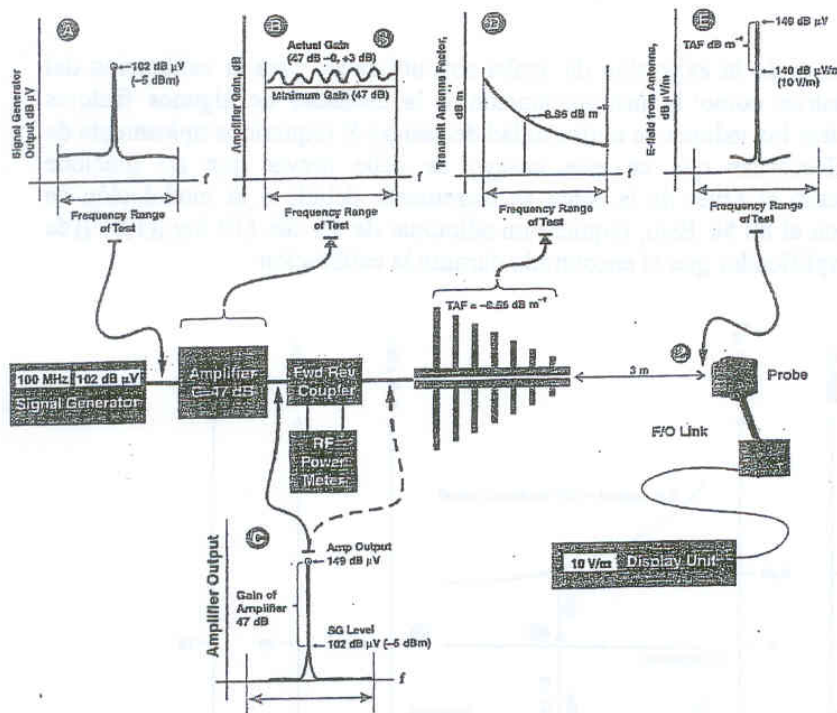


Figure 1. Block Diagram of Typical Immunity Test Setup with Signal Levels & Characteristics Added

Figure 1. Radiated Immunity Test

Notes on Figure 1

- ①
- A is signal generator output.
 - B is amplifier gain versus frequency.
 - C is signal generator output + amplifier gain (= input to antenna).
 - D is transmit antenna factor (TAF).
 - E is E-field level generated (= input to antenna + (TAF).

- ② For immunity testing, test distance is from tip of antenna.
- ③ Immunity amplifiers are typically specified at minimum gain. Pass band ripple is result of extra wide bandwidths.

El nivel de salida está dado por:

$$E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) = SG_{\text{out}}(\text{dB}\mu\text{V}) + AG(\text{dB}) + TAF(\text{dB})m^{-1}$$

donde:

$E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m})$ = nivel de ensayo del campo eléctrico - E

$SG_{\text{out}}(\text{dB}\mu\text{V})$ = salida del generador de señales

$AG(\text{dB})$ = ganancia del amplificador

$TAF(\text{dB})m^{-1}$ = factor de antena de transmisión

Las variables y términos de la expresión de arriba son utilizados para la calibración del ensayo. Ellos demuestran como la instrumentación y la facilidad de algunos factores contribuyen en encontrar los valores de uniformidad de campo-E requeridos típicamente de -0,0 dB, + 6 dB. Recordar que en este ensayo se debe prever que no funcione inadecuadamente cuando el nivel de la señal se incrementa debido a la modulación de amplitud de 1 KHz con el 80 %. Esto, requiere un adicional de 5,1 dB $\{10 \log [(1,8)^2]\}$ de ganancia lineal del amplificador que el encontrado durante la calibración

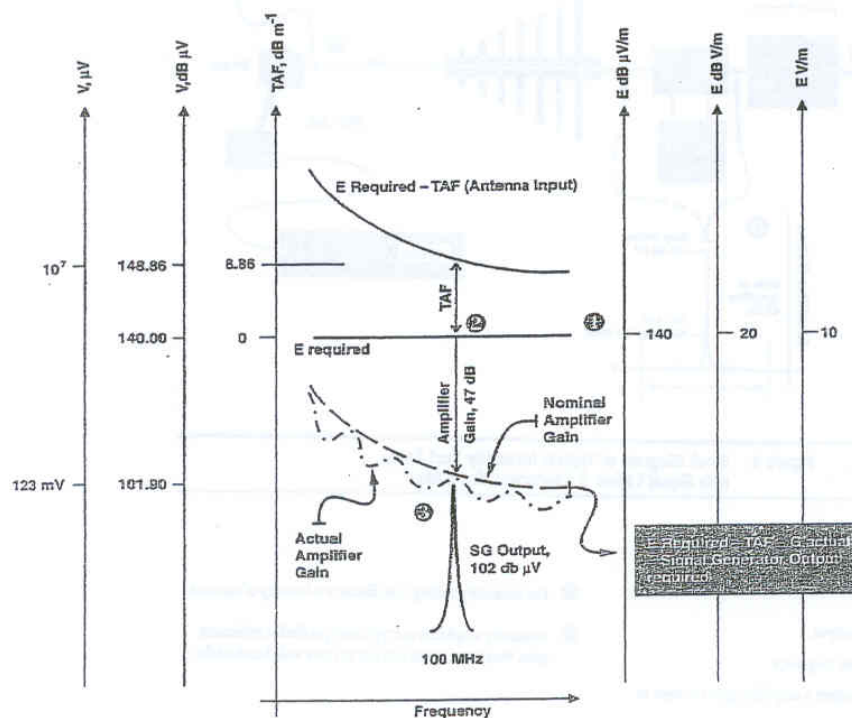


Figure 2. Graphical Representation of Immunity Test System Signal

Figure 2. Radiated Immunity Test

Notes on Figure 2

- ① Required test field is
10 V/m (= 20 dB V/m = 140 dB μ V/m).
- ② At 100 MHz TAF is - 8.86 dB \Rightarrow V_{in} to Antenna is
 $140 - (-8.86) = 148.86$ dB μ V.
- ③ At 100 MHz Signal Generator Output is
Antenna Input - Amplifier gain
(= $148.86 - 47 = 101.86$ dB μ V = 123 μ V).

Bibliografía

Essential Equipment for EMC Testing, ESCO Company
Antenna Theory; Constantine A. Balanis
Compatibilidad electromagnética, Hidelberto Jardón Aguilar