

Plan de pruebas de dispositivos de radiofrecuencia

Francesc Daura, Ingeniero Industrial, experto en compatibilidad electromagnética. Director de LEEDEO / CEMDAL
 Enrique Martínez, Ingeniero de Telecomunicaciones, experto radio y directiva RED en LEEDEO / CEMDAL



Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría Leedeo Engineering



Autor: Enrique Martínez, Ingeniero de Telecomunicaciones - LEEDEO / CEMDAL

El diseño de un dispositivo de radiofrecuencia es todo un reto. La elección de los componentes del sistema como antenas, receptores, microprocesadores, líneas de transmisión y situación de los componentes es complejo, pero no menos importante su validación. Un buen plan de pruebas sobre nuestro dispositivo nos permitirá poder cuantificar mejor las prestaciones del diseño realizado y así poder certificar nuestro módulo según las directivas de CEM y RED.

En el presente artículo se presentará un resumen de medidas a realizar para asegurar que el producto pase con éxito las pruebas del laboratorio y tener una caracterización completa y rigurosa del producto. Todos estos resultados de laboratorio no tan sólo nos van a permitir obtener la certificación necesaria, sino que también nos permitirán poder tener una hoja de especificaciones y una caracterización completa del producto.

Todo el conjunto de pruebas a realizar sobre el dispositivo Wireless se suele agrupar en dos grandes tipos:

- medidas pasivas, pruebas de ensayo donde no necesitamos realizarlas con el dispositivo en situación de comunicación.
- medidas activas, pruebas de ensayo donde sí que necesitamos realizarlas con el enlace de comunicación activo en el dispositivo.

Medidas pasivas

Dentro del dispositivo Wireless los principales elementos pasivos con mayor influencia en la funcionalidad del sistema son las antenas, filtros y líneas de transmisión hasta llegar al receptor. Para poder caracterizar los elementos pasivos tendremos que hacer uso de los parámetros [S], cámaras anecoicas y sistemas tridimensionales de medida de antenas. A partir de la medida de los pará-



Figura 1. Imagen medida [S11] en analizador vectorial (VNA).

metros [S] podremos conocer la impedancia de entrada de las antenas en el dispositivo, las pérdidas que introducen las líneas de transmisión diseñadas y el aislamiento entre los diferentes servicios de radio dentro del dispositivo. En las cámaras anecoicas con sistemas tridimensionales de medida podremos evaluar las prestaciones a nivel de radiación del dispositivo diseñado y su eficiencia.

Medida pasiva - Impedancia de antena (S11)

La figura 1 muestra una imagen del equipo necesario para poder medir la impedancia en frecuencia de una antena mediante parámetros [S] (medida de S11). El equipo que nos permite hacer esta medida es

un analizador vectorial, o también es más conocido con sus siglas en inglés "VNA" (Vector network analyzer).

La medida de S11 nos permite hacer un balance entre la potencia directa y la reflejada en el puerto de antena y así conocer si la antena que instalamos en nuestro dispositivo está bien centrada en frecuencia.

La figura 2 nos muestra una imagen típica de medida del parámetro S11 para una antena de telefonía integrada dentro de un módulo de comunicaciones. Los valores de S11 se presentan en dB en todo el rango frecuencial. En aquellos puntos donde la impedancia de antena es óptima, el valor de S11 es menor de -10dB. Aunque el valor de -10 dB es el óptimo, el valor máximo

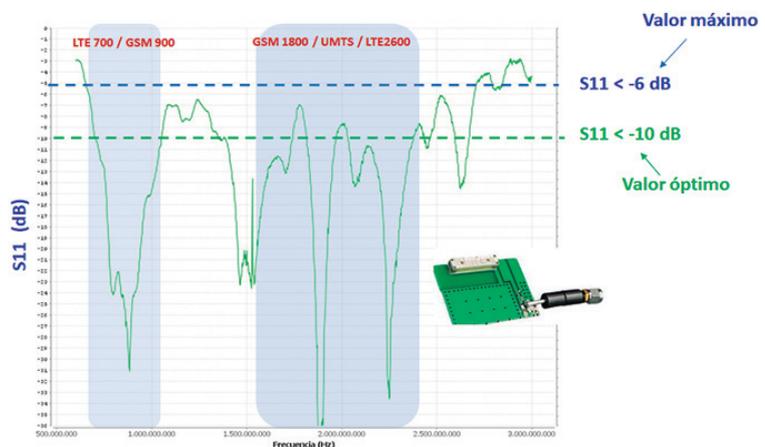


Figura 2. Medida de S11 (dB) para antena de telefonía integrada.

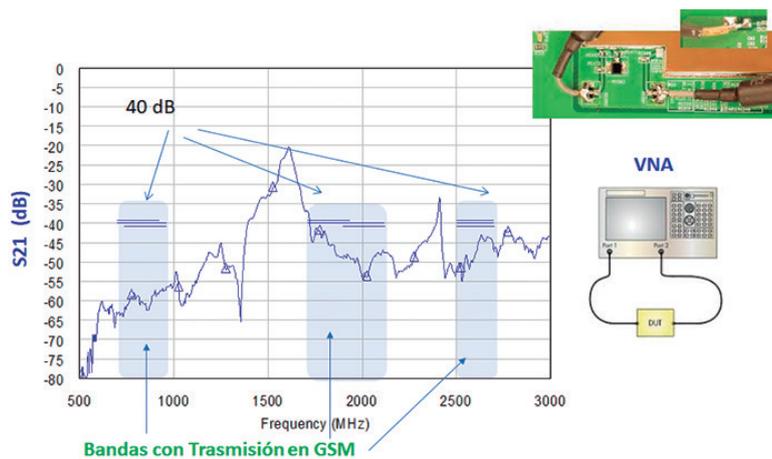


Figura 3. Medida de S₂₁ (dB) entre antenas integradas (Aislamiento GSM vs GPS).

permisible en el puerto de antena es de -6 dB.

Medida pasiva - Aislamiento entre antenas (S₂₁)

Cuando el dispositivo diseñado incorpora más de un sistema de radio, como puede ser el uso simultáneo de telefonía (GSM) y posicionamiento (GPS), se ha de medir y validar el aislamiento entre las antenas de ambos sistemas. Se ha de considerar de diferente forma el nivel de aislamiento necesario entre antenas receptoras, respecto al aislamiento entre antenas receptoras y transmisoras dentro de la misma tarjeta de circuito impreso (TCI).

En el caso de medir el aislamiento entre dos antenas receptoras, con un nivel de aislamiento comprendido entre 10 y 20 dB es suficiente. Sin embargo, cuando se aproxima una antena transmisora a una antena receptora, como es el caso de las aplicaciones con GPS y GSM, el nivel de aislamiento necesario debe ser mayor. Los valores de aislamiento necesarios deben ser mayores a 40 dB.

Esto es así ya que el balance de potencia entre ambas antenas es muy alto, de tal forma que la potencia emitida por la antena transmisora puede saturar el sistema receptor y perder sensibilidad. La figura 3 muestra una gráfica de medida de aislamiento entre antenas de telefonía y GPS donde se consiguen los 40 dB necesarios para que ambos sistemas puedan funcionar simultáneamente.

Igual que la medida de S₁₁, la medida de aislamiento se debe realizar con un analizador vectorial que disponga de 2 puertos de medida, tal y como se muestra en la figura 3.

Medida pasiva - Eficiencia de antena y ganancia

La eficiencia de antena es un factor de mérito de su funcionalidad, que mide la capacidad de la antena a radiar energía al espacio sin perder esta energía por calentamiento (pérdidas óhmicas).

Idealmente, el valor de eficiencia de antena que nos interesará tener es de un 100%. Esto significa que toda la potencia que se entrega a la antena se radia sin ningún tipo de pérdidas. Pero no existe ninguna implementación real de una antena sin pérdidas, y los valores típicos de antenas de muy altas prestaciones pueden tener valores de eficiencia

entre el 70% y el 85%. Como valor mínimo deseable de funcionalidad, un valor del 50% sería un rendimiento mínimo aceptable para una antena integrada dentro de un dispositivo radio.

Aunque el concepto de eficiencia es muy fácil de cuantificar desde un punto de vista numérico, ya que simplemente es el cociente entre la potencia que se le entrega a la antena y la potencia que finalmente radia hacia el espacio, su medida es muy complicada porque requiere de un sistema de medida tridimensional (3D).

La figura 4 muestra un sistema tridimensional de medida de antenas de la empresa Satimo (MVG). El principio de medida consiste en escanear la potencia radiada en toda una esfera de puntos alrededor de la antena bajo prueba, de tal forma que se puede conocer la potencia total radiada en esta esfera y compararla con la potencia entregada a la antena. Así, con el cociente entre potencia radiada y potencia entregada, se puede extraer la eficiencia del elemento radiante. Los sistemas de medida 3D también nos permiten conocer el diagrama de radiación que obtenemos una vez que la antena se integra dentro del dispositivo de radio y su respuesta de ganancia en frecuencia.

Disponer de uno de estos sistemas en nuestro laboratorio es bastante imposible, tanto por coste como por espacio. Pero no es un problema, ya que existen laboratorios cercanos en Europa que por un bajo coste nos permiten realizar este tipo de medida y saber si el diseño realizado es correcto.

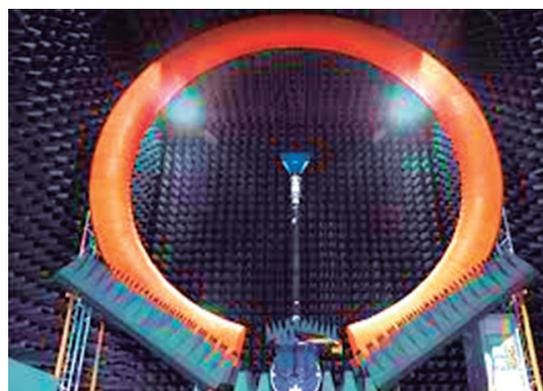
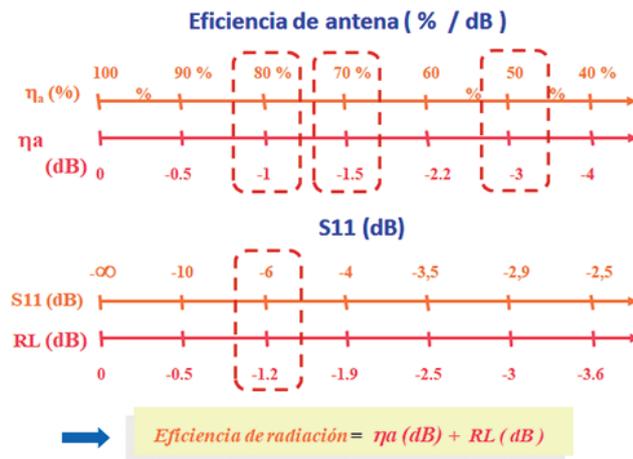


Figura 4. Medida Tridimensional para eficiencia y ganancia de antena.



S11: Medida en analizador vectorial de impedancia de entrada.
 η_a (%) : Eficiencia de antena , porcentaje potencia radiada vs potencia perdida
 η_a (dB) = $10 \cdot \log(\eta_a (\%)/100)$
RL (dB) = $10 \cdot \log(1 - \text{abs}(S11)^2)$

Figura 5. Rango de pérdidas según eficiencia de antena y S11 (dB).

La figura 5 muestra un eje de valores entre porcentaje de eficiencia y su valor en dB. Como se puede observar, una antena de una eficiencia de radiación del 80% supone una eficiencia de -1 dB y una antena con una eficiencia de radiación del 50% supone una eficiencia de -3dB.

Como balance global se define la "eficiencia de radiación", donde se superpone la eficiencia de antena con la medida de S11 en dB y sus equivalentes pérdidas de retorno (RL [dB]). Así, por ejemplo, para una antena de eficiencia del 70% y S11 = -6dB (RL = -1.2 dB) se obtendrá una eficiencia de radiación de -3 dB:

$$\begin{aligned} \eta_a &= 70 \% \rightarrow \\ \text{Pérdidas por radiación} &= 1,5 \text{ dB} \\ S11 &= -6\text{dB} \rightarrow \\ \text{Pérdidas por desadaptación} &= 1,2 \text{ dB} \\ \text{Eficiencia de radiación} &= \\ &= -1.5 \text{ dB} - 1.2 \text{ dB} \sim -3 \text{ dB} \end{aligned}$$

Medida pasiva - Sistemas MIMO: factor de correlación

Dada la alta tendencia que actualmente tienen los dispositivos de radio a necesitar de elevadas tasas de transmisión en Mbps, nos encontramos, especialmente en aplicaciones de telefonía 4G/5G y Wifi de alta velocidad la necesidad de tener que instalar de 2 a 4 antenas por Circuito integrado (CI) transmisor/receptor.

Estas configuraciones con antenas redundantes sobre el mismo servicio radio, se conoce como sistemas MIMO.

Un ejemplo claro de esta tendencia la observamos en la telefonía móvil. Inicialmente, las versiones de telefonía 2G conseguían tasas no superiores a los 300 Kbps, consecuencia básica de que los sistemas de 2G se diseñaron para la transmisión de voz y no de datos. Posteriormente, con la aparición de UMTS (Universal Mobile Telecommunications system) aparece la tercera generación móvil (3G) con velocidades de hasta los 800kbps. Si bien la tecnología 3G mejoró mucho en los últimos años para mejorar sus prestaciones con los sistemas HSDPA y HSDPA+ (High

speed downling packet acces), la velocidad máxima que alcanzan es de unos 20 Mbps en las mejores condiciones.

Con el estándar 4G (LTE) apareció el nuevo reto de poder subir las tasas de transmisión hasta los 100Mbps, lo que era inalcanzable con el uso de una sola antena en el terminal y requiere el uso de como mínimo 2 antenas simultáneas. Como ya sabemos, la tendencia del mercado es cada vez más subir estas tasas de transmisión. Con la aparición del 5G nos podremos encontrar con dispositivos que necesiten de 4 o más antenas simultáneas para alcanzar velocidades entre los 300Mbps y 1Gbps.

Cuando en el dispositivo de radio tenemos que integrar más de una antena para el mismo servicio debemos hacer una medida de correlación entre grupos de 2 antenas (Factor ρ o Factor de correlación). Esta medida parte de la medida tridimensional completa del diagrama de radiación de ambas antenas en el dispositivo de radio y aplica la fórmula descrita en la figura 6.

Con esta fórmula se está cuantificando la similitud de las señales recibidas en el sistema MIMO cuando las 2 antenas estén funcionando simultáneamente. Lo que nos interesa, para maximizar las prestaciones, es que ambas antenas estén lo menos correladas posible, y esto se consigue cuando el valor de ρ es muy pequeño. Actualmente, como valores de especificación para diseño MIMO entre 2 antenas, se ha de conseguir que el factor de correlación (ρ) no sobrepase el valor de 0,5 en ningún punto.

(Diagrama de radiación 3D Antena 1)

(Diagrama de radiación 3D Antena 2)

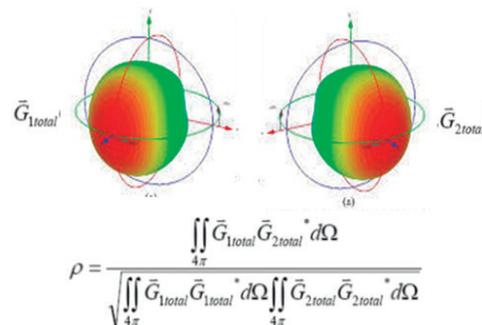


Figura 6. Factor de correlación entre antenas (Sistemas MIMO).



Figura 7. Imagen medida activa conducida con "radiocomunicador".

Medidas activas

Con las medidas pasivas podemos identificar componentes pasivos dentro del dispositivo de radio con un mal funcionamiento, pero siempre tendremos que acabar haciendo una prueba completa de todo el sistema de comunicación en condiciones reales de funcionamiento.

Todas las pruebas que realicemos con el módulo alimentado y estableciendo una comunicación real con otro dispositivo, las clasificaremos como medidas activas. Dentro de las medidas activas también haremos una subclasificación: Medidas conducidas y radiadas.

Medidas activas - Conducidas

Un primer nivel de validación del dispositivo de radio es el conocido

como "medida a pie de radio" o "medida activa conducida". En esta medida desconectaremos todas las antenas integradas dentro del dispositivo y conectaremos el equipo de medida mediante un cable coaxial directamente a la entrada del CI emisor/receptor (Figura 7).

El equipo que necesitamos para poder realizar las medidas activas es bastante más complejo que el usado en las pasivas (VNA). Este equipo se conoce con el nombre de "radiocomunicador" o "radio tester". Es un equipo que nos permite generar y recibir la señal de radio del estándar a probar (GSM, Wifi, Bluetooth, etc.) e inyectárselo directamente al dispositivo de radio. Con el "radiocomunicador" podemos controlar parámetros del enlace como el nivel de potencia, la longitud de tramas enviadas y la calidad de la señal recibida.

Al igual que nos sucede con los sistemas de medidas 3D de antenas, este equipo suele ser de un elevado coste de compra, sin embargo, su alquiler durante un periodo limitado de tiempo para poder hacer la validación del producto es asequible y es una opción viable.

Con la medida conducida, los 2 principales parámetros a obtener son: Potencia máxima transmitida y sensibilidad conducida.

La potencia máxima transmitida nos permite evaluar que el CI transmisor seleccionado entrega los valores especificados en el estándar de comunicación y que su máscara de transmisión está dentro de los valores normativos.

La sensibilidad conducida nos permite evaluar que el chip receptor seleccionado obtiene los valores de sensibilidad especificados por el estándar de comunicación.

La figura 8 muestra un resumen de resultados obtenidos en las medidas conducidas en un modem de telefonía que soporta los estándares 2G/3G/4G. La potencia máxima transmitida es de 33 dBm para el standard 2G y 24 dBm para los estándares 3G y 4G. La sensibilidad conducida es de -110 dBm para los estándares 2G,3G y de -95 dBm para el estándar 4G.

Medidas activas - radiadas

Un buen rendimiento radiado es crítico para el funcionamiento efectivo de un dispositivo radio en las redes actuales. A medida que los dispositivos se hacen más pequeños, el rendimiento irradiado a menudo puede verse comprometido. Por ejemplo, lograr una antena eficiente en un tamaño pequeño y en múltiples bandas de frecuencia es una tarea difícil. La caracterización completa y precisa del rendimiento irradiado permite a los fabricantes de dispositivos y operadoras de telecomunicaciones asegurar el buen funcionamiento de los dispositivos de radio dentro de las limitaciones de un determinado diseño de red celular.

En general, la PIRE de pico (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) no es una buena indicación de la calidad obtenida en la conexión inalámbrica. Por ejemplo, si el patrón de

| Main - TX Power | | | | | | Main - Sensitivity | | | |
|----------------------|----------------|---------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|------------------|-----------|--|
| Band | Measured value | Specifications (AR7 data sheet - 2dB) | Nominal value | High Boundary | Measured - Nominal | Value | Parameter | Unit | |
| GSM850 | 31.9 | 29 | 33 | 35 | -1.1dBm | -111.8 | -106.2,44% BER | -5.8 dBm | |
| GSM900 | 32.24 | 29 | 33 | 35 | -0.76dBm | -110.75 | -106.2,44% BER | -4.75 dBm | |
| GSM1900 | 28.65 | 26 | 30 | 32 | -1.35dBm | -110.73 | -106.2,44% BER | -4.73 dBm | |
| GSM1800 | 28.74 | 26 | 30 | 32 | -1.26dBm | -108.94 | -106.2,44% BER | -2.94 dBm | |
| UMTS B1 | 21.73 | 18.3 | 24 | 25.7 | -2.27dBm | -109.8 | -104.1% ±0.2 BER | -5.8 dBm | |
| UMTS B2 | 22.58 | 18.3 | 24 | 25.7 | -1.43dBm | -112.22 | -104.1% ±0.2 BER | -8.22 dBm | |
| UMTS B2 add channels | 22.69 | 18.3 | 24 | 25.7 | -1.33dBm | -112.37 | -104.1% ±0.2 BER | -8.37 dBm | |
| UMTS B5 | 22.62 | 18.3 | 24 | 25.7 | -1.38dBm | -113.71 | -104.1% ±0.2 BER | -9.71 dBm | |
| UMTS B5 add channels | 22.55 | 18.3 | 24 | 25.7 | -1.45dBm | -113.92 | -104.1% ±0.2 BER | -9.92 dBm | |
| UMTS B8 | 23.61 | 18.3 | 24 | 25.7 | -0.29dBm | -113.8 | -104.1% ±0.2 BER | -9.8 dBm | |
| LTE B3 | 21.51 | 18.3 | 23 | 25.7 | -1.49dBm | -96 | -99.5% BLER | 3 dBm | |
| LTE B2 | 19.4 | 18.3 | 23 | 25.7 | -3.54dBm | -96.93 | -99.5% BLER | 2.07 dBm | |
| LTE B3 | 21.72 | 18.3 | 23 | 25.7 | -1.28dBm | -97.51 | -99.5% BLER | 0.49 dBm | |
| LTE B4 | 19.59 | 18.3 | 23 | 25.7 | -3.43dBm | -97.15 | -99.5% BLER | 2.35 dBm | |
| LTE B5 | 21.85 | 18.3 | 23 | 25.7 | -1.15dBm | -98.55 | -100.5% BLER | 1.95 dBm | |
| LTE B7 | 21.19 | 18.3 | 23 | 25.7 | -3.83dBm | -94.3 | -98.5% BLER | 3.7 dBm | |
| LTE B8 | 22.89 | 18.3 | 23 | 25.7 | -0.11dBm | -100.19 | -100.5% BLER | 0.31 dBm | |
| LTE B17 | 21.7 | 18.3 | 23 | 25.7 | -1.3dBm | -98.8 | -100.5% BLER | 1.2 dBm | |
| LTE B19 | 22.8 | 18.3 | 23 | 25.7 | -0.2dBm | -99.3 | 5% BLER | dBm | |
| LTE B20 | 22.94 | 18.3 | 23 | 25.7 | -0.06dBm | -97.5 | -96.5% BLER | -1 dBm | |
| LTE B21 | 22.49 | 18.3 | 23 | 25.7 | -0.53dBm | -97.3 | 5% BLER | dBm | |

Figura 8. Potencia transmitida y sensibilidad conducida medida en un modem de telefonía 2G/3G/4G.

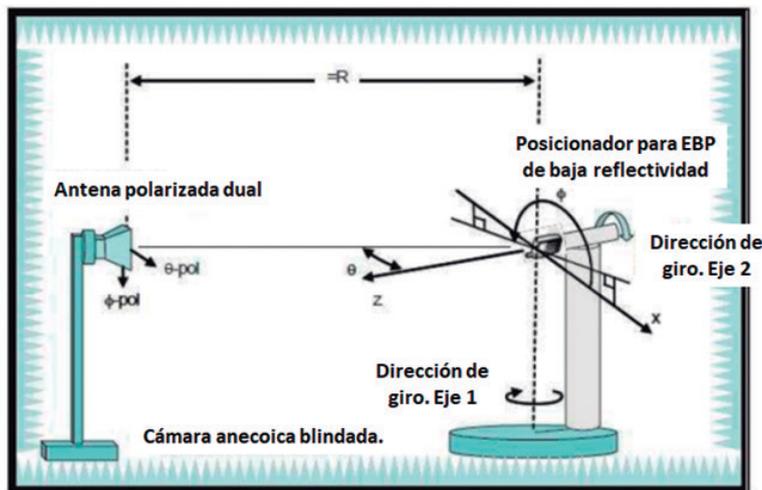


Figura 9. "Set-up" para medidas activas radiadas.

radiación del sistema de antena del dispositivo de radio es altamente directivo, la PIRE máxima sería alta (ya que la ganancia de la antena es alta en una dirección), pero la cobertura sería pobre en otras direcciones.

Para el dispositivo de radio, el mejor diseño será aquel que maximiza la cobertura espacial del sistema de antena en todas las direcciones del espacio. Así, el usuario no tendrá que apuntar la antena en una dirección particular para obtener un buen rendimiento del enlace radio.

Desde una perspectiva de rendimiento del dispositivo en transmisión, la medición de la PIRE promedio es más significativa y es conocida como la medida de "TRP" (Total Radiated Power) del dispositivo de radio. El rendimiento del recep-

tor, o EIS (Sensibilidad isotrópica efectiva) es tan importante como el rendimiento del transmisor. El mal rendimiento en la recepción del dispositivo de radio hará que el usuario del dispositivo obtenga una baja calidad en la señal de voz o una baja velocidad de transmisión de datos digitales. Esto también puede hacer que la unidad del abonado pierda la señal de la estación base, resultando en la terminación abrupta de la llamada. Desde una perspectiva de rendimiento del dispositivo en la recepción, la medición de la EIS promedio es más significativa y es conocida como medida de "TIS" (Total Isotropic Sensitivity).

Una causa frecuente de pérdida de sensibilidad en un sólo canal, o una pequeña cantidad de canales,

se debe al ruido propio existente en la placa del receptor, o a las señales espurias del mismo transmisor, que se irradian de regreso al receptor. La sensibilidad del receptor se medirá con el transmisor ajustado en la salida a la máxima potencia permitida por el EBP (Equipo Bajo Prueba).

La figura 9 muestra el "set-up" para la realización de las medidas activas radiadas en cámara anecoica según el plan de pruebas de CTIA OTA y la figura 10 una implementación real de una cámara anecoica de medida activa 3D.

Emisiones radiadas (CEM armonizada con RED)

Hemos descrito toda la secuencia de pruebas a realizar para comprobar el buen funcionamiento de todos los elementos de la cadena de radio en el dispositivo de radio. Pero no hemos de olvidar que nuestro módulo de comunicación también debe ser conforme con las normas de compatibilidad electromagnética (CEM), sin ser susceptible a emisiones de otros equipos y no causar interferencias a otros equipos. La norma que mejor recoge todo el tipo de ensayos que deben ser aplicados a los dispositivos de radio desde el punto de vista de la CEM es la norma EN 301 489 -1.

En general, de todos los ensayos de CEM a realizar sobre el módulo de comunicaciones, la prueba más crítica es la medida de las emisiones radiadas del dispositivo. Todas las protecciones que se realicen en el dispositivo para mejorar el nivel de emisiones van a contribuir al mismo tiempo a mejorar los resultados del resto de los ensayos.

La figura 11 muestra el "set-up" utilizado para realizar la medida de emisiones radiadas de un dispositivo de radio. Los transmisores del dispositivo pueden generar armónicos fuera de la banda de trabajo del emisor. Si el diseño no es correcto, estos armónicos estarán por encima de los límites establecidos por la norma de CEM en emisiones radiadas (EN 301 489 -1).

Para conseguir que los armónicos fuera de banda no obtengan valores superiores a los especificados en la norma, es importante seguir todas

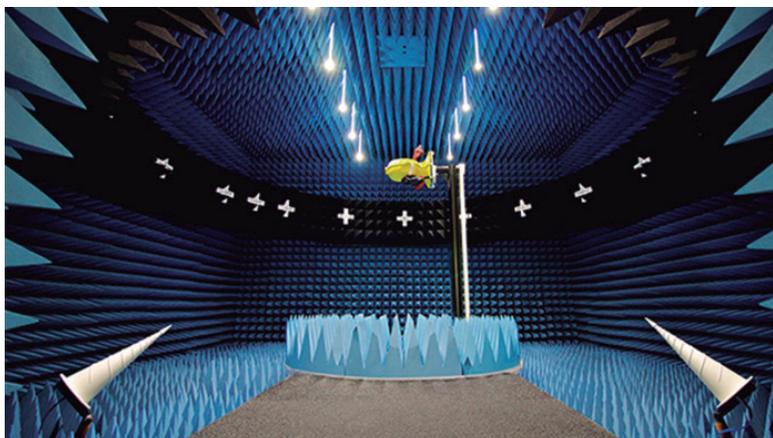


Figura 10. Imagen de cámara para medidas activas radiadas (TIS , TRP).

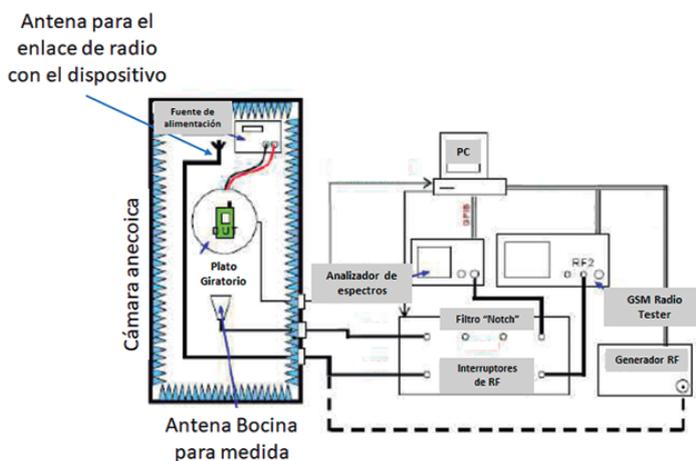


Figura 11. "Set-up" de medida de espurios radiados en una cámara anecoica.

las prácticas de buen diseño de CEM en el dispositivo, con el número adecuado de capas en la TCI, condensadores adecuados de desacoplo y un elevado aislamiento entre antenas de radio que operen simultáneamente en el dispositivo.

Para poder realizar la medida de emisiones necesitaremos situar 2 antenas dentro de la cámara. Una antena estará dedicada a generar el enlace de comunicación con el dispositivo radio y la segunda será para hacer la medida de las emisiones radiadas por el dispositivo radio.

Conclusiones

Planificar durante el desarrollo de nuestro dispositivo de radio toda la secuencia de pruebas necesarias para validar el diseño de todos los componentes radio incorporados, nos permitirá poder realizar con mayor seguridad las pruebas de la-

boratorio y conseguir certificar el dispositivo según las directivas de CEM y RED.

Como instrumentos básicos para poder hacer una evaluación previa de prestaciones del dispositivo, necesitaremos analizadores de red vectoriales (VNA) y emuladores de estándares de comunicación (Radiocomunicadores). Con los analizadores vectoriales podremos hacer todas las medidas pasivas de validación sin cámara anecoica. Con los radiocomunicadores, de igual forma, podremos realizar todas las medidas activas que no necesitan de cámara anecoica.

Siempre nos quedará una última parte de la validación donde deberemos recurrir a los laboratorios que disponen de cámaras anecoicas y sistemas de medida tridimensionales para medir la ganancia, la eficiencia de las antenas pasivas y las medidas activas de TIS (Total Isotropic Sensi-

tivity) y TRP (Total Radiated Power). Con el informe del laboratorio podremos comprobar si nuestro dispositivo tiene un buen rendimiento radiado y cumple con los valores especificados según la normativa CTIA OTA. Un buen rendimiento radiado es crítico para el funcionamiento efectivo de un dispositivo de radio en cualquier red de comunicación. Con ello podremos obtener la certificación RED.

El aislamiento entre las antenas de los diferentes servicios, el trazado de las líneas de transmisión en la placa, el número de capas y los condensadores de desacoplo son parámetros de diseño que deben estar bien dimensionados para que el dispositivo de radio también pase la Directiva CEM.

Desde el punto de vista de la CEM, el dispositivo de radio con los transmisores que incorpora, puede tener armónicos fuera de la banda de operación con un nivel radiado por encima de los límites de la norma EN 301 489 -1. No por el hecho de que integremos en nuestro producto uno o varios transmisores ya certificados (Marcado CE), podremos asegurar que el conjunto de transmisores dentro de nuestra placa también pasará la certificación para el marcado CE completo de nuestro producto. Estamos obligados a volver a comprobarlo realizando las medidas del producto completo en el laboratorio.

Después de obtener la certificación del laboratorio de CEM/RED estamos obligados por la Directiva RED a publicar que tenemos la certificación RED en nuestra web de empresa, como fabricantes del producto radio que deseamos vender.

REFERENCIAS

- CTIA – "Test plan for wireless device over-the-air performance". V 3.7.1. February 2018
- ETSI EN 301 489-1. "Electromagnetic compatibility (EMC) standard for radio equipment and services".
- www.satimo.com
- www.rohde-schwarz.com
- RED/EMC Directives and Certification guide. Dekra Testing and Certification, S.A.U.
- Measurement of mobile antenna systems. Hiroyuki Arai. Artech House 2013.