

Caracterización de Atenuadores de Potencia en condiciones de Alta y de Baja Señal aplicada

Manuel Rodríguez Higuero, Delia Velasco Montero

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial – Centro de Metrología y Calibración
Ctra. a Ajalvor, p.k. 4,5 – 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)
Teléfono: 91 520 1859 – E-mail: rodriguez@inta.es

RESUMEN: La caracterización de atenuadores de potencia suele efectuarse en condiciones de baja señal aplicada. Con el fin de caracterizar su comportamiento en condiciones de alta señal haremos uso de un sistema de caracterización de vatímetros, que por definición son sensores capaces de manejar niveles de señal mucho más acordes con el margen de funcionamiento de los atenuadores de potencia. Asimismo es posible efectuar pruebas adicionales en baja señal pero en condiciones de trabajo que puedan asemejarse a las que se dan cuando por el dispositivo circulan altos niveles de señal: bien por calentamiento interno, inmediatamente después de su uso en el sistema de medida de vatímetros, o bien mediante calentamiento externo. Todas estas variaciones en el comportamiento observado del dispositivo es lo que nos proponemos analizar en la presente contribución, sin olvidar el problema de trazabilidad que se plantea en la medida en alta señal por el hecho de que la caracterización previa del acoplador direccional se ha efectuado en condiciones de baja señal.

1. INTRODUCCIÓN

El motivo por el que este tipo de atenuadores suele caracterizarse en baja señal es la conveniencia y la facilidad de manejo de sistemas de medida como los modernos analizadores vectoriales de redes (VNA). Con ellos es posible caracterizar en magnitud y fase los parámetros [S] de estos dispositivos, con trazabilidad al Kit de Calibración. Sin embargo, los niveles de señal aplicados al DUT raramente exceden de 1 mW (0 dBm). Esto nos lleva a la duda razonable de si realmente estamos caracterizando correctamente dispositivos diseñados para soportar unos niveles de señal de entrada muchísimo mayores, en torno a en las decenas o a los centenares de vatios en muchas aplicaciones.

Con el sistema de medida de vatímetros, haciendo uso de un acoplador direccional (caracterizado previamente en términos de factor de acoplo y pérdidas de inserción) y de un sensor de potencia, también calibrado, a la salida del brazo acoplado, es posible calcular el nivel de señal a la salida del acoplador, que será la señal incidente en el vatímetro, o en el caso que nos ocupa, en el atenuador bajo prueba. Bastará detectar la señal a la salida del atenuador con otro sensor de potencia calibrado para conocer las pérdidas de inserción del dispositivo.

Otras pruebas en condiciones de baja señal consisten en efectuar diversas calibraciones con el analizador de redes, para distintos niveles de señal de la fuente de radiofrecuencia. Con ello trataremos de determinar la posible variación de los parámetros [S] del atenuador al variar el nivel de señal incidente, comparándolo con las medidas efectuadas en condiciones de alta señal.

Otro enfoque consiste en medir en baja señal pero en condiciones que puedan asemejarse a las que se dan cuando por el dispositivo circulan altos niveles de señal: inmediatamente después de su uso en el sistema de medida de vatímetros, se medirán en el VNA los parámetros [S] del atenuador, observando la influencia que pueda tener en la medida el calentamiento previo del dispositivo, y comprobando su deriva con el tiempo, según se vaya enfriando.

Otra posible comprobación consiste en aplicar calor externo al atenuador, con el fin de mantener durante más tiempo las condiciones de temperatura en el interior del dispositivo al tiempo que se mide en baja señal: aunque hay que tener en cuenta que la naturaleza del calentamiento no es la misma si el calor procede de una fuente externa o del propio funcionamiento del atenuador en condiciones de alta señal circulando por su interior.

2. CARACTERIZACIÓN EN BAJA SEÑAL

Las medidas efectuadas con analizadores vectoriales de redes nos permiten conocer los parámetros [S] en magnitud y fase, de forma simultánea y con trazabilidad. Las medidas son trazables al kit de calibración empleado o, alternativamente, a los términos de error residuales, caracterizados con la ayuda de elementos conocidos como una línea de aire o un atenuador por pasos calibrado (enfoque tradicional según la guía cg-12 de Euramet).

Como ventajas, la popularidad y facilidad de uso de este tipo de sistemas de medida. Además de la medida simultánea de parámetros complejos (magnitud y fase) de transmisión y reflexión: como veremos en el apartado 4, en medida de alta señal con el set-up de caracterización de vatímetros, el sistema es por definición escalar, y no haremos consideración alguna acerca de la medida de coeficiente de reflexión.

Sin embargo, el nivel de salida del analizador que incide sobre el atenuador bajo prueba raramente excede 1 mW (0 dBm), muy inferior a los niveles de señal que normalmente soportan este tipo de dispositivos de potencia (decenas e incluso centenares de vatios en muchas aplicaciones). Todo esto nos lleva a preguntarnos si realmente estamos caracterizando correctamente este tipo de dispositivos.

Una primera prueba que es posible efectuar es la repetición de la caracterización del dispositivo con diversas calibraciones del analizador, efectuadas para distintos niveles de señal aplicada. Por ejemplo para +20 dBm, +10 dBm y 0 dBm de nivel de señal de la fuente, lo que supone unos niveles de +7 dBm, -3 dBm y -13 dBm respectivamente de entrada al dispositivo bajo prueba.

3. CÓMO SIMULAR EL CALENTAMIENTO DEL ATENUADOR Y MEDIR EN BAJA SEÑAL

Cuando una señal de alto nivel circula a través de un atenuador de potencia, un efecto inmediato es el incremento en la temperatura del dispositivo. Si efectuamos pruebas en baja señal tratando de reproducir estas condiciones de funcionamiento del atenuador, los resultados podrían conducir a alguna conclusión. Es posible comprobar la influencia que el mencionado calentamiento presenta en los parámetros [S] medidos del dispositivo, así como su variación con el tiempo, según el atenuador se va enfriando.

El calentamiento en el atenuador se puede conseguir de dos formas. En primer lugar, dejando que a través del dispositivo circule una señal de alto nivel y a continuación moviéndolo al sistema de medida del VNA. Alternativamente, se puede pensar en aplicar calor externo, por ejemplo con un secador, al tiempo que se monitoriza la temperatura mediante un termómetro. En este último caso, el calentamiento no procede del uso del atenuador en las condiciones para las que ha sido diseñado, sino de una fuente externa. Por lo tanto no tiene por qué reproducir necesariamente las condiciones en las que se encuentra el dispositivo cuando se usa en régimen de alta señal. Tampoco hay que perder de vista que el método propuesto es en esencia un enfoque de baja señal, a pesar de la simulación del calentamiento del dispositivo.

A continuación se muestra una gráfica con un ejemplo de medida de pérdidas de inserción de un atenuador de potencia de 30 dB. Previamente se insertó en un sistema de caracterización de vatímetros con una señal de aproximadamente 100 W circulando a su través durante cinco minutos. La lectura del sensor de potencia a la salida del atenuador ha sido monitorizada durante este período de calentamiento, y ha variado entre 100.4 mW y 103.2 mW para la primera tanda de medidas, y entre 100.3 mW y 102.2 mW en la segunda tanda. En la segunda medida se hizo uso de un cable a la salida del atenuador, con el fin de aislarlo térmicamente del sensor de potencia del sistema de medida de vatímetros. En la medida en analizador de redes se quitó dicho cable.

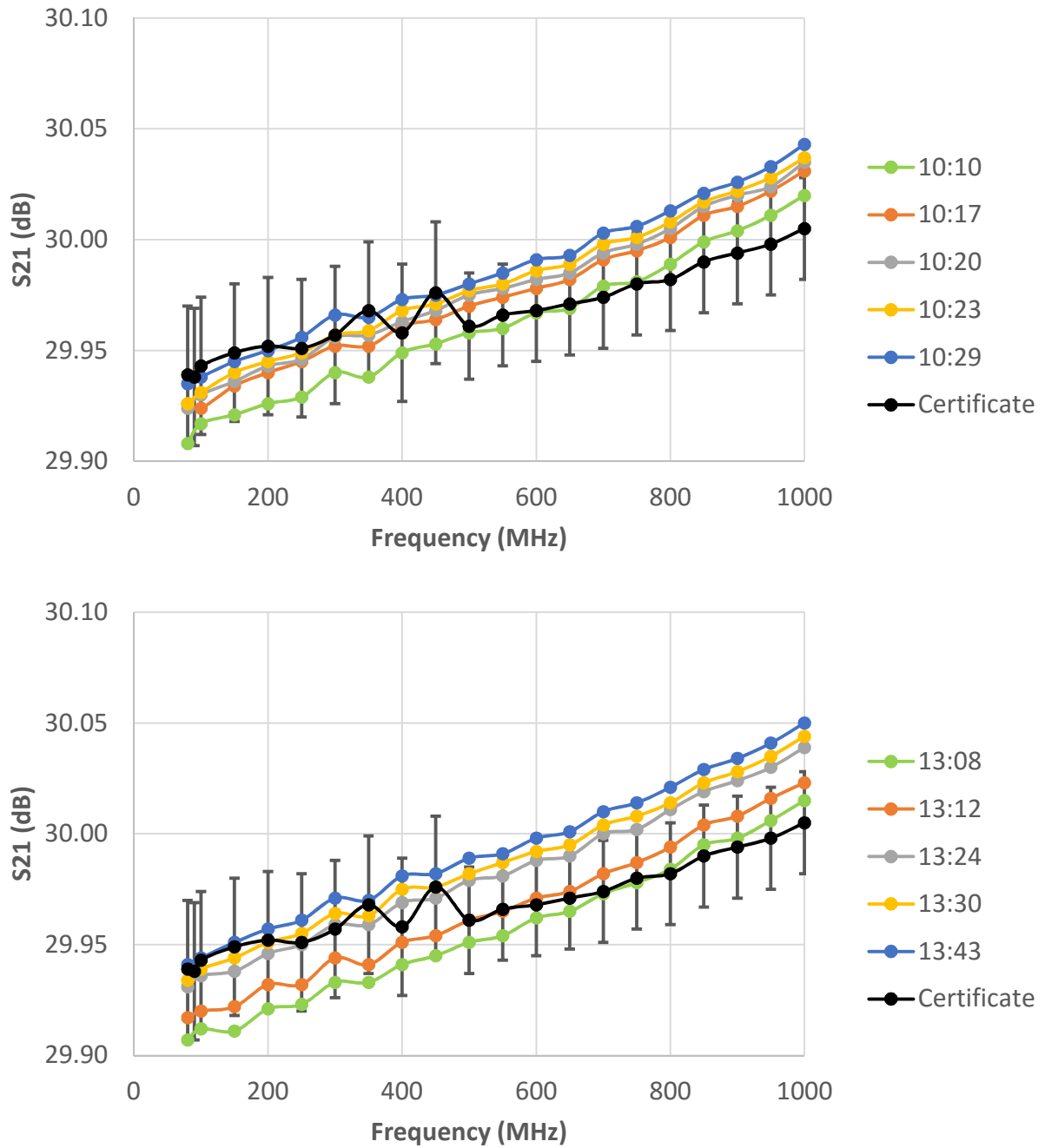


Figura 1: Deriva temporal después del calentamiento interno del dispositivo (baja señal)

4. MEDIDA EN ALTA SEÑAL

Una alternativa propuesta para la caracterización de este tipo de dispositivos en alta señal es el uso de un sistema de medida para la calibración de vatímetros. Este método permite la medida de las pérdidas de inserción del atenuador cuando a su través está circulando un nivel de señal apreciable (típicamente en torno a 100 W para los atenuadores del laboratorio).

Una cuestión que plantea alguna dificultad es la trazabilidad: aun cuando estemos midiendo en régimen de alta señal, la calibración está basada en la caracterización previa de un acoplador direccional de potencia utilizado en el set-up, caracterización que se ha efectuado en condiciones de baja señal mediante el uso del analizador de redes. No es un problema fácil de resolver, ya que normalmente no se dispone en el laboratorio de equipos calibrados en alta señal con trazabilidad externa.

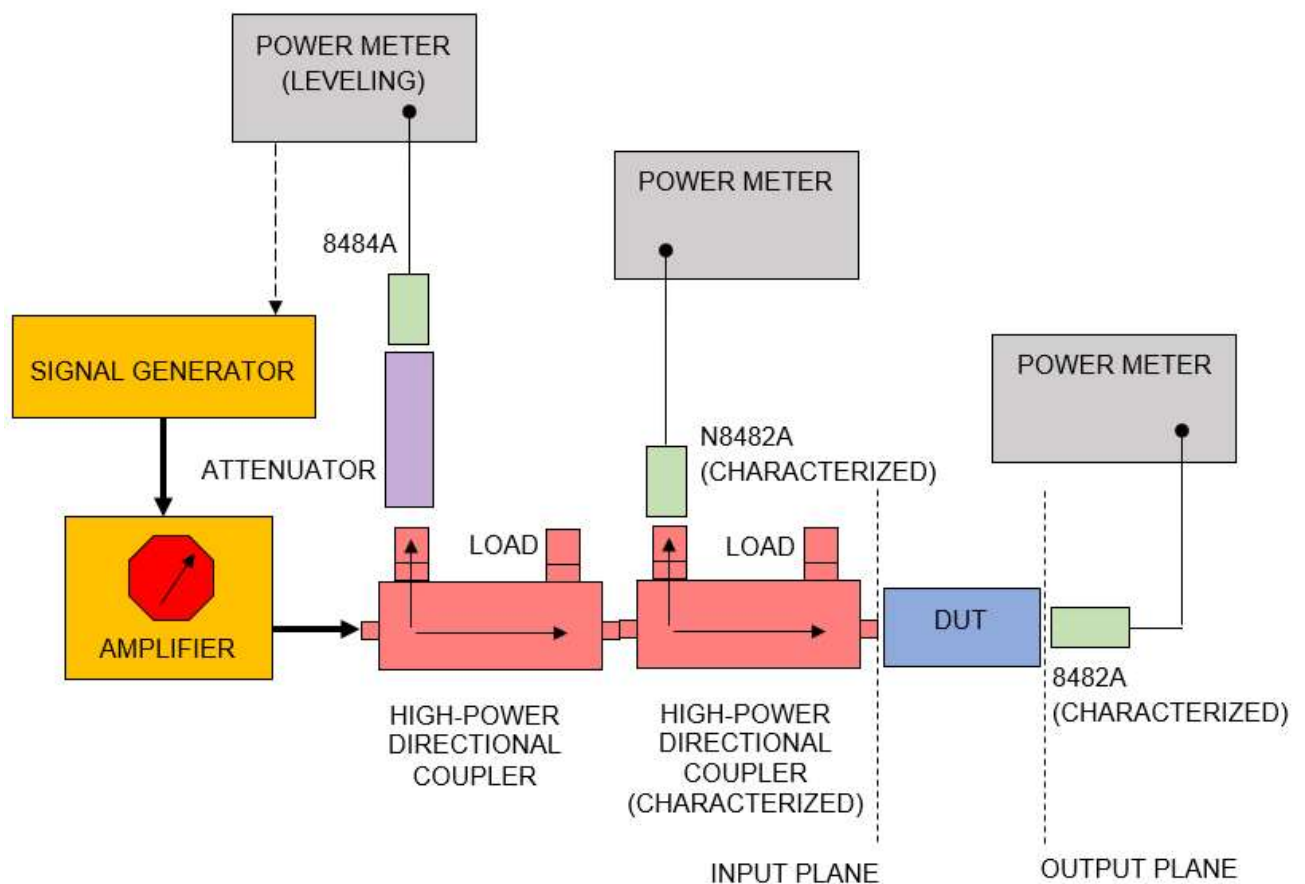


Figura 2: Configuración para caracterización de atenuadores de potencia en alta señal

La salida del amplificador de potencia se aplica a un acoplador direccional con el fin de nivelar la señal del generador de radiofrecuencia. La lectura del primer medidor de potencia se lleva pues al generador de manera que la salida de este sea más o menos constante durante la medida, independientemente del nivel de potencia seleccionado.

El segundo acoplador direccional (este caracterizado previamente en el analizador), así como el sensor conectado a su puerta acoplada, también calibrado, nos permiten medir con trazabilidad la señal a la salida del acoplador, simplemente sumando el acoplamiento y restando las pérdidas de inserción del acoplador a la lectura del sensor de potencia. De esta forma conocemos la potencia incidente en el dispositivo bajo prueba, bien sea un vatímetro o un atenuador como es el caso.

$$P_{INPUT} = \frac{P_{N8482A}(mW)}{FC_{N8482A}} \cdot 10^{\frac{C(dB)-IL(dB)}{10}}$$

Lo que nos permite caracterizar vatímetros (señal aplicada vs. señal leída en el dispositivo) o bien, como el caso que nos ocupa, medir las pérdidas de inserción del atenuador gracias a un tercer sensor de potencia calibrado que nos indica la señal a la salida del DUT:

$$IL_{DUT} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{INPUT}}{P_{OUTPUT}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{N8482A}(mW) \cdot FC_{8482A}}{FC_{N8482A} \cdot P_{8482A}(mW)}\right) + C(dB) - IL(dB)$$

En la figura 3 se representan los valores obtenidos para la caracterización en régimen de alta señal de un atenuador de 40 dB, junto con la caracterización previa efectuada con analizador de redes en baja señal:

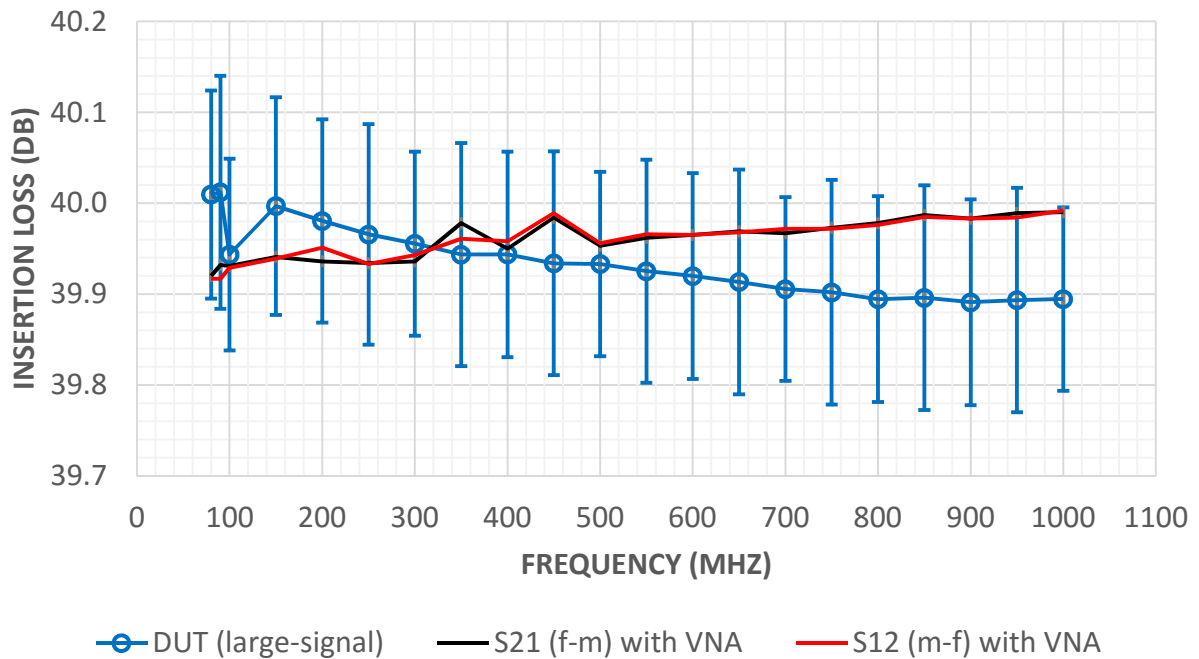


Figura 3: Resultados de la medida en alta señal vs. parámetros [S] en baja señal

5. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

Término de incertidumbre	FRECUENCIA (MHz)			
	80	100	500	1000
uFC del Sensor 8482A (U ₁) %	1.00	1.00	1.10	1.10
uFC del Sensor N8482A (U ₁) %	1.49	1.10	1.20	1.20
Deriva por año y medio del FC (U ₂) %	0.20	0.20	0.20	0.20
Instrumentación medidor 437B (U ₃) %	0.50	0.50	0.50	0.50
Fuente de referencia (U ₄) %	0.53	0.53	0.53	0.53
Γ Fuente de referencia	0.025	0.025	0.025	0.025
Γ sensor 8482A a 50 MHz	0.010	0.010	0.010	0.010
Mismatch referencia (U ₅) %	0.050	0.050	0.050	0.050
Γ acoplador AC	0.047	0.077	0.131	0.131
u Γ acoplador AC	0.011	0.011	0.011	0.011
Γc acoplador AC	0.048	0.078	0.131	0.131
Γ Sensor 8482A	0.008	0.008	0.008	0.006
u Γ Sensor 8482A	0.005	0.005	0.005	0.010
Γ Sensor comb	0.009	0.009	0.009	0.012
Mismatch frecuencia Acop / Sensor (U ₆₁)%	0.090	0.147	0.248	0.306
Γ acoplador OUT	0.005	0.007	0.014	0.024
u Γ acoplador OUT	0.018	0.018	0.018	0.017
Γc acoplador OUT	0.019	0.019	0.022	0.030
Γ Test (macho)	0.009	0.009	0.004	0.002
u Γ Test (macho)	0.005	0.005	0.010	0.010
Γc Test (macho)	0.010	0.010	0.011	0.010
Mismatch frecuencia Acop / Test (U ₆₂)%	0.039	0.040	0.047	0.060
Γ Sensor N8482A	0.010	0.010	0.011	0.012
u Γ Sensor N8482A	0.007	0.005	0.005	0.010
Γ Sensor comb	0.012	0.011	0.012	0.016
Γ Test (hembra)	0.016	0.017	0.017	0.018
u Γ Test (hembra)	0.005	0.005	0.010	0.010
Γc Test (hembra)	0.017	0.017	0.020	0.021
Mismatch frecuencia Test / Sensor (U ₆₃)%	0.042	0.038	0.048	0.064
Repetibilidad (U ₇) %	0.2	0.2	0.2	0.2
Deriva acoplador de potencia (U ₉) dB	0.02	0.02	0.02	0.02
Variación acoplador con la potencia (U ₁₀) dB	0.02	0.02	0.02	0.02
Incertidumbre AC-IL Acoplador M-H (U ₁₁) dB	0.060	0.058	0.039	0.036
P (W) leída a la salida del Test	0.010247	0.010078	0.009993	0.010148
P (mW) Power Meter 437B (P _m) con 8482A	9.985	10.009	9.927	10.172
FC sensor 8482A	0.988	0.987	0.982	0.979
FC sensor N8482A	0.999	1.000	0.995	0.989
AC-IL acoplador direccional	40.070	39.917	39.883	39.792
P (mW) Power Meter 437B (P _m) con N8482A	10.233	10.078	9.943	10.036
P (W) incidente al Test (P _i)	102.69	99.48	98.40	99.04
Pérdidas de Inserción DUT (alta señal)	40.010	39.943	39.933	39.895
u combinada (%)	1.34	1.23	1.18	1.17
u exp =k* u comb (%)	2.67	2.46	2.36	2.35
u exp (dB)	0.11	0.11	0.10	0.10

Tabla 1: Combinación de incertidumbres para algunas de las frecuencias de trabajo

Algunas de las contribuciones principales a la incertidumbre de medida son las siguientes (casi todas ellas están sacadas del procedimiento de medida de vatímetros, ya que ambos métodos de medida presentan características muy similares). Entre otras tenemos las siguientes influencias:

- ❑ Mismatch entre la puerta acoplada del acoplador direccional y el segundo sensor de potencia
- ❑ Mismatch entre la salida del acoplador direccional y la entrada del atenuador bajo prueba
- ❑ Mismatch entre la salida del atenuador bajo prueba y el tercer sensor de potencia
- ❑ Incertidumbre asociada a la calibración de ambos sensores de potencia (incluyendo deriva temporal)
- ❑ Incertidumbre asociada a la medida del factor de acoplo y de las pérdidas de inserción del acoplador direccional
- ❑ Términos habituales de influencia en medidas de potencia: instrumentación (medidor de potencia), fuente de referencia a 50 MHz, mismatch entre el sensor y la fuente de referencia a 50 MHz, etc.
- ❑ Repetibilidad

6. PROBLEMAS DE TRAZABILIDAD EN LA CARACTERIZACIÓN EN ALTA SEÑAL

De todas las pruebas propuestas aquí analizadas, la configuración en alta señal es la preferida por creer que es la más adecuada para caracterizar el comportamiento real del dispositivo en condiciones de alta señal. Sin embargo es necesario mencionar dos inconvenientes de este método, y que tienen que ver con la trazabilidad del método:

- ❑ El método únicamente es adecuado para la medida de pérdidas de inserción del dispositivo (en magnitud). Es un método escalar por definición, y la medida de coeficiente de reflexión implicaría una configuración diferente, además de requerir un conjunto de terminaciones de alta potencia, con trazabilidad, que puedan ser usadas como referencia (un corto, un abierto y una carga, caracterizados en régimen de alta señal).
- ❑ El método de medida está basado en la caracterización en baja señal del acoplador direccional (al menos en cuanto a acoplamiento y pérdidas de inserción). Cualquier diferencia entre la medida efectuada con el analizador de redes y el funcionamiento real del acoplador cuando circula a su través una señal de alto nivel, se transmitiría a la calibración del atenuador como un error sistemático.

En ambos casos se trata de un problema de trazabilidad: cualquier caracterización de un dispositivo en régimen de alta señal se basa en el conocimiento previo de otro artefacto, normalmente obtenido en baja señal por medio de un analizador de redes. Lo que no asegura la trazabilidad de la medida a un patrón conocido verdaderamente en régimen de alta señal. La caracterización de vatímetros adolece de este mismo inconveniente.

Podemos simplificar el problema para darnos cuenta de este aparente callejón sin salida: supongamos que el acoplamiento y las pérdidas de inserción del atenuador son las mismas, tanto en alta como en baja señal. En estas condiciones, las pérdidas de inserción del atenuador serán medidas exactamente iguales a las del factor de acoplo del acoplador direccional, parámetro que ha sido medido con el analizador de redes en baja señal. No hay forma de evitar esta referencia circular, salvo que conozcamos el acoplador direccional en régimen de alta señal con trazabilidad.

7. OTROS MÉTODOS ALTERNATIVOS PROPUESTOS

Hemos dicho que la caracterización de un vatímetro está basada también en el conocimiento en baja señal del acoplador direccional. Sin embargo, podríamos efectuar medidas relativas con el vatímetro, confiando en que el error sistemático cometido se cancele al obtener el ratio entre dos medidas. En la primera medida el vatímetro lee la señal incidente en el atenuador, y en la

segunda medida la señal a la salida del atenuador, con este insertado. El único problema es el rango dinámico del vatímetro, que no permite medir en el mismo rango, por lo que es necesario cambiar el cristal detector entre una medida y otra.

La necesidad de cambiar el detector entre la medida con y sin atenuador, de alguna manera invalida la idea sencilla de una medida relativa, ya que la calibración de ambos cristales es diferente. Sin embargo, se puede asumir que la caracterización de ambos detectores se ve afectada de la misma manera por el error sistemático que supone el uso del acoplador direccional caracterizado en baja señal, y que ambos errores se cancelan con la obtención del ratio entre las dos medidas.

Una dificultad añadida es encontrar un cristal detector capaz de medir la señal más reducida que hay a la salida del atenuador bajo prueba: en la práctica, el margen dinámico del vatímetro limita el valor máximo de pérdidas de inserción que es posible medir con este método.

8. CONCLUSIONES

Hemos medido satisfactoriamente las pérdidas de inserción de atenuadores de potencia. La caracterización en régimen de baja señal en condiciones de calentamiento interno del dispositivo nos muestra un orden de magnitud de la deriva temporal esperable a medida que el atenuador se va enfriando. No hay que perder de vista sin embargo, que se trata de una prueba en baja señal, por lo que resulta difícil extraer conclusiones.

La caracterización en régimen de alta señal es posible haciendo uso de la configuración de medida de vatímetros. Las contribuciones a la incertidumbre son conocidas ya que en esencia se trata del mismo procedimiento de caracterización de vatímetros y los términos de influencia son similares.

La incertidumbre de medida resulta ser aproximadamente el doble que la asociada a la medida de parámetros [S] de transmisión. Sin embargo estamos limitados a medir en un único sentido y en magnitud únicamente. Tampoco es posible la medida de coeficiente de reflexión por la dificultad de encontrar terminaciones de potencia caracterizadas y con trazabilidad.

El método de medida en alta señal está basado en la caracterización previa de un dispositivo en baja señal. En el caso de medida de vatímetros se puede emplear o bien un acoplador bien o un atenuador calibrado. En el caso de medida de atenuadores de potencia es el acoplador direccional el que debe ser conocido en régimen de baja señal. Esto supone un problema ya que normalmente no disponemos de trazabilidad en alta señal.

Una forma de evitar este error sistemático consiste en hacer uso de un vatímetro calibrado: los errores sistemáticos se ven minimizados si se recurre a medidas relativas con y sin el atenuador bajo prueba insertado. El margen dinámico del vatímetro resulta determinante en este caso, y limita el valor de las pérdidas de inserción que es posible medir.

9. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto EMPIR 15RPT01 "RFMicrowave", en el que participan los laboratorios nacionales de Turquía, Suiza, República Checa, Eslovenia, Polonia, Grecia, Suecia, Egipto y España. El proyecto ha recibido financiación a través de EURAMET.