

## Avances en la calibración de fuentes de referencia de potencia de radiofrecuencia

**Mojica, Luis**

CENAMEP AIP

Ciudad de Panamá, Panamá

ORCID 0000-0001-5594-9166

**Solís, Raúl**

CENAMEP AIP

Ciudad de Panamá, Panamá

ORCID 0000-0003-1043-4294

**Sánchez, Cristy**

CENAMEP AIP

Ciudad de Panamá, Panamá

ORCID 0000-0001-8329-2536

### Abstract

This paper presents the progress achieved in developing an automated radio-frequency power measurement system based on a “Reference Thermistor Standard” (bolometric sensor). The work has been carried out at the Secondary High-Frequency Laboratory of CENAMEP AIP. The development includes the formulation of the mathematical measurement model, the estimation of measurement uncertainty, and the implementation of a Python-based application to automate data acquisition and logging.

**Keywords:** Bolometer, Sensor, Power, Radio frequencies, Metrology.

### Resumen

Este artículo presenta los avances en el desarrollo del sistema de medición automatizado de potencia de radiofrecuencia, implementando un “Reference Thermistor Standard” (sensor bolométrico). El desarrollo se realiza en la Laboratorio Secundario de Alta Frecuencia, en el CENAMEP AIP. Contempla el modelo matemático de medición, la estimación de la incertidumbre de la medición y creación de aplicación en Python para automatizar el registro de datos.

**Palabras claves:** Bolómetro, Sensor, Potencia, Radiofrecuencias, Metrología.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las señales de radiofrecuencias hacen parte del conjunto de vehículos que nos permiten alcanzar objetivos en la sociedad actual, son de mucha importancia en diferentes actividades que realizamos todos los días y muchas veces no estamos consciente de ello. Podemos agrupar la implementación de señales de radiofrecuencia (RF) en áreas como: alimentación, telecomunicaciones, salud, transporte y defensa, solo por mencionar algunas. Estas señales están presentes en nuestro día a día, por ejemplo: en el horno de microondas para calentar los alimentos, en el smartphone para realizar llamadas telefónicas o navegar por internet, sistema de pago del transporte usando tarjetas sin contacto (RFID/NFC), radar para detección de drones y aves, y semáforos inteligentes.

Para asegurar el adecuado funcionamiento de las aplicaciones tecnológicas que utilizan señales de RF, es necesario que los instrumentos involucrados en la medición y generación de las señales tengan un seguimiento periódico mediante calibración o verificación metrológica. En la Metrología es muy importante tener instrumentos de referencia, trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI), que nos ayuden a obtener la exactitud de los instrumentos que realizan mediciones.

En el caso de la Metrología de Radiofrecuencia, es común que los medidores de potencia de señales de radiofrecuencia cuenten con una señal de referencia de 50 MHz y 1 mW, la cual se utiliza para ajustar las mediciones realizadas y también funciona como el punto de trazabilidad metrológica hacia Sistema Internacional de Unidades [1]. Esta señal de referencia de 1 mW tiene niveles de exactitud mejores a 10 mW/W, lo cual imposibilita que sea calibrada o verificada con sensores potencia de RF comunes a base de diodos o termocuplas. Para este tipo de señales de referencia se requiere utilizar un sensor bolométrico, teniendo los cuidados necesarios para mantener el nivel de exactitud.

Se presentan los avances obtenidos en el desarrollo de sistema de calibración automatizada de fuentes de referencia de potencia de RF. Este sistema opera en frecuencias desde 50 MHz hasta 18 GHz y potencia de 1 mW. El desarrollo contempla el modelo matemático de medición, la estimación de la incertidumbre de la medición [2] y creación de aplicación en Python para automatizar el registro de datos. Se presentan los resultados de un ejercicio de comparación metrológica como primer paso para validar la funcionalidad del sistema desarrollado. También se tiene en cuenta una evaluación del efecto de la temperatura del laboratorio sobre las mediciones de potencia de la señal de radiofrecuencia bajo evaluación.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

### A. Método

El sistema de calibración es para medir la potencia eléctrica de señales de radiofrecuencia. Se utiliza el principio de sustitución DC para la medición de potencia de señales de RF [2], el cual está implementado en el medidor de potencia. En este principio de medición se utiliza un puente balanceador que permite sustituir la señal de RF que se desea medir por una cantidad de señal DC que causa el mismo efecto térmico en el bolómetro. Dado que el valor de la señal DC es conocido, entonces se puede determinar el nivel de la señal de radiofrecuencia aplicada en el puerto de entrada del sensor de potencia. El desarrollo se puede dividir en tres grandes pasos:

- Creación de programa en lenguaje Python para la adquisición y registro de datos de potencia.
- Evaluación de la estabilidad de las lecturas de potencia de RF debido a los cambios de temperatura del laboratorio.
- Realización de ejercicio de comparación con una fuente de potencia calibrada, de 1 mW a 50 MHz.

### B. Equipos de medición

- Patrón de potencia RF – Sensor basado en termistor (Bolómetro)

Para calibrar patrones de transferencia de RF y medir la potencia de señales de RF (Fig.1). Sensor de tipo Termistor, con conector tipo N (macho), impedancia nominal de 50  $\Omega$ , alcance de frecuencia desde 6 kHz hasta 18 GHz, alcance de potencia desde 10  $\mu$ W hasta 10 mW, factor de calibración desde  $\pm$  (0.9 hasta 1.2) % y coeficiente de reflexión desde 0.03 hasta 0.25.

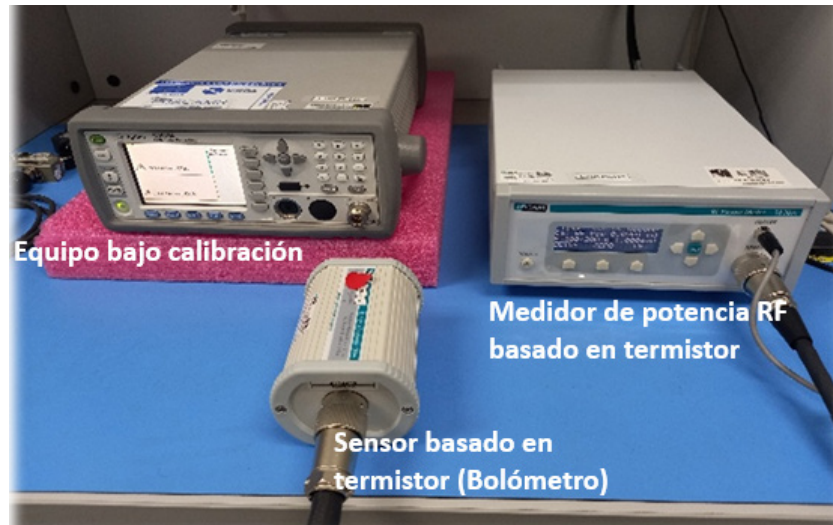
- Medidor de potencia RF basado en Termistor

Combina un puente de sustitución de corriente continua (DC) con un sistema de medición de 6,5 dígitos (Fig.1).

En un solo instrumento combina el puente balanceador y medidor de potencia RF. Soporta sensores de potencia de RF a base de termistores NTC, de 100  $\Omega$  y 200  $\Omega$ , posee control de calentador para sensores con horno. Alcance de frecuencia desde 6 kHz hasta 50 GHz (depende del sensor). Alcance de potencia desde 0.001 mW hasta 30 mW. Exactitud especificada por el fabricante de  $\pm$  (0.05% de la lectura,  $\pm$ 0.5  $\mu$ W) y es completamente programable vía puerto USB.

- Accesorios

Para la interconexión de los equipos de medición y su control automatizado. Cable para el sensor de potencia. Cable USB para conectar el medidor de potencia a la computadora. Computadora para el control remoto de los instrumentos.



**Figura 1. Equipos de medición utilizados**

### C. Modelo Matemático de medición

En la figura 2 se muestra el diagrama de conexión general para realizar la calibración de una fuente de potencia de RF. Se puede observar la conexión de generador, atenuador, el bolómetro y el medidor de potencia. El generador (GEN) representa la fuente de potencia RF a calibrar. El atenuador puede tener dos propósitos, atenuar la señal de la fuente de potencia para llevarla a un nivel adecuado para el sensor de potencia, pero también el atenuador puede ser reemplazado por un adaptador de sacrificio para evitar desgaste en el conector de entrada del sensor de potencia. A continuación, se muestra el modelo matemático de la medición y demás ecuaciones para lograr la calibración del generador de potencia RF.

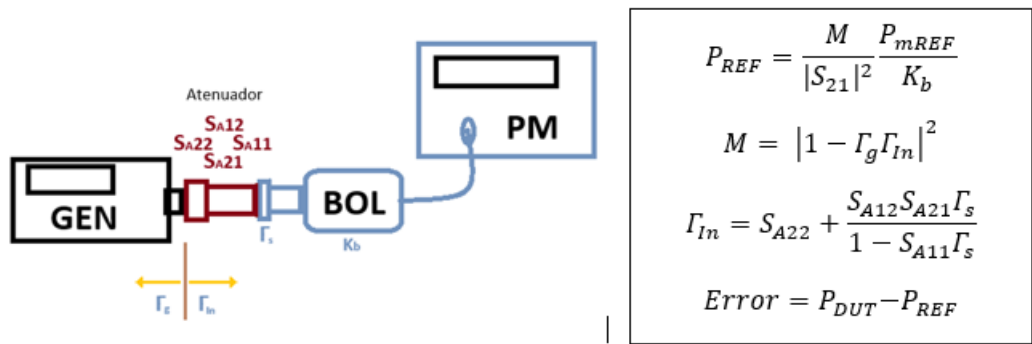


Figura 2. Diagrama de conexión general y modelo matemático de medición

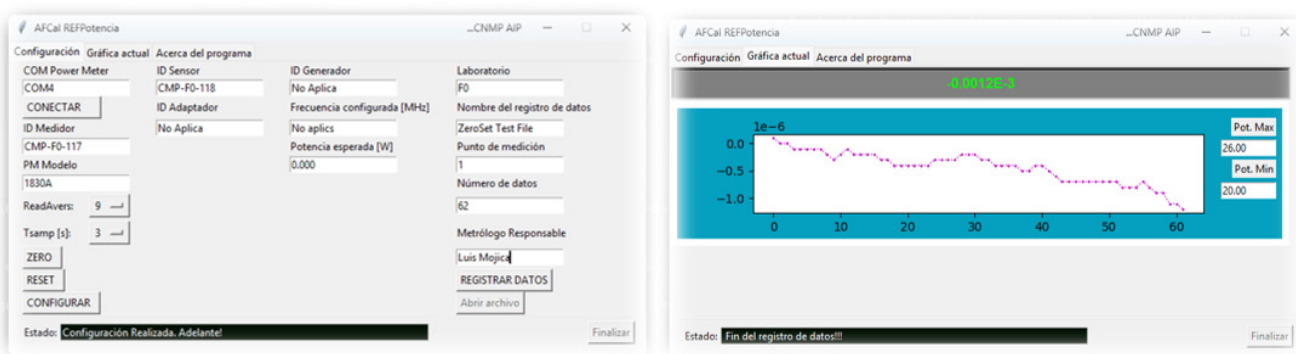
Error: error en el valor de potencia del generador.  $P_{mREF}$ : es la potencia medida con el sistema de referencia.  $P_{DUT}$ : potencia de salida del generador RF.  $P_{mREF}$ : potencia adquirida con el medidor de potencia, sin aplicar alguna corrección.  $\Gamma_g$ : coeficiente de reflexión del puerto de entrada del sensor de potencia (bolómetro).  $\Gamma_b$ : coeficiente de reflexión del puerto de salida del generador.  $\Gamma_s$ : coeficiente de reflexión equivalente desde la entrada del atenuador, cuando se utiliza para realizar una medición.  $S_{A11}, S_{A12}, S_{A21}, S_{A22}$ : parámetros de dispersión del atenuador, cuando se utiliza para realizar una medición.  $K_b$ : es el factor de desadaptación de impedancia entre el DUT y el sistema de referencia.  $K_b$ : es el factor de calibración del sensor de potencia (bolómetro)

En el desarrollo de este trabajo no fue necesario la utilización del atenuador, por lo que los parámetros de dispersión  $S_{A21}=S_{A12} =1$  y  $S_{A11}=S_{A22} =0$ .

### 3. RESULTADOS

#### Programa para la adquisición y registro automatizado de datos de potencia

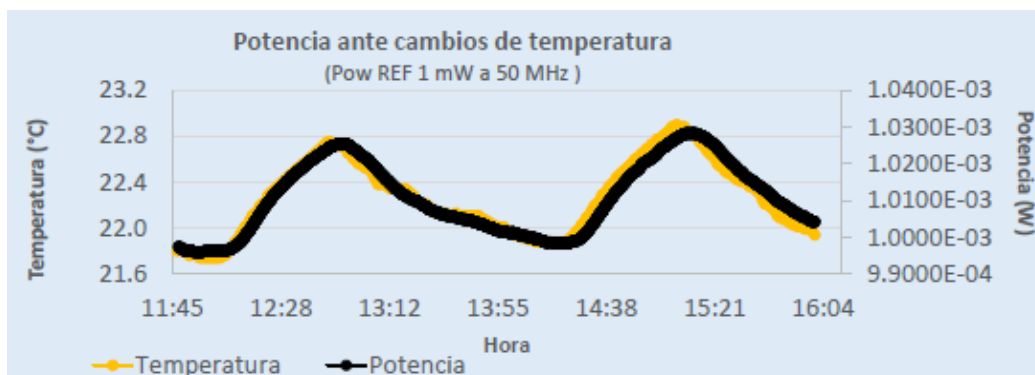
El desarrollo del programa en Python fue de mucha ayuda para la configuración del medidor de potencia y registrar los datos de medición en intervalos programados (3 s, 5 s, 10 s y 60 s) y evaluar la estabilidad de las mediciones respecto a los cambios de temperatura del laboratorio (Fig. 3).



**Figura 3. Interfaz gráfica del programa de adquisición de datos. Tab de configuración y tab de gráfica de datos en tiempo real.**

### Estabilidad de la lectura de potencia debido a cambios de temperatura

La figura 4 muestra la lectura del medidor de potencia después de realizar la función del ZERO y aplicada una señal de RF (1 mW, 50 MHz) al Termistor Patrón. En condiciones ideales, después del ZERO el medidor debería mostrar 1.0000 mW. Pero se puede observar que una variación 1 °C hace que la lectura del medidor de potencia tenga una variación de 30  $\mu$ W.



**Figura 4. Gráfica de mediciones realizadas de potencia ante los cambios de temperatura**

### Ejercicio de comparación con una fuente de potencia calibrada

Para la comparación se utilizó los datos de calibración del año 2024 y 2025 de la referencia de potencia de un medidor de potencia 53148A, del fabricante Agilent Technologies. En la Tabla 1, CalExterna2024 y CalExterna2025 son los resultados de las calibraciones a fuente de referencia realizadas en el año 2024 y 2025 respectivamente. CMP-1 hasta CMP-6 son los resultados de las mediciones realizadas con el sistema de medición en desarrollo. Se utilizó el criterio del error normalizado para evaluar la comparabilidad de las mediciones.

**Tabla 1. Resultados de medición del ejercicio de comparación.**

Fecha	ID de medición	Condición de medición mW	Potencia Medida mW	U (k=2) mW	Error normalizado
<b>2024-05-30</b>	<b>CalExterna2024</b>	<b>1</b>	<b>1.005</b>	<b>0.005</b>	--
2025-07-06	CMP-1	1	1.004	0.008	0.22
2025-07-06	CMP-2	1	1.004	0.008	0.22
2025-07-06	CMP-3	1	1.004	0.008	0.22
<b>2025-08-15</b>	<b>CalExterna2025</b>	<b>1</b>	<b>1.006</b>	<b>0.005</b>	--
2025-09-12	CMP-4	1	1.004	0.008	0.22
2025-09-12	CMP-5	1	1.004	0.008	0.22
2025-09-12	CMP-6	1	1.004	0.008	0.22

## 4.CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados son aceptables, hay repetibilidad en las mediciones y metrológicamente comparables. La máxima diferencia obtenida fue de 2  $\mu\text{W}$ , entre los resultados con el sistema de medición en desarrollo y los resultados del laboratorio acreditado, que realizó la calibración de la referencia de potencia RF. Respecto a las condiciones ambientales, hay una clara influencia de los cambios de temperatura sobre las lecturas de potencia, por lo que es importante mantener estable la temperatura del laboratorio para que las variaciones de potencia sean menores a 30  $\mu\text{W}$ . Los avances han sido satisfactorios, el siguiente paso será realizar mejoras para validar el sistema de medición en el alcance completo, mediante una comparación de los resultados de calibración con un Instituto Nacional de Metrología, utilizando una fuente de potencia de 1 mW, (50 MHz hasta 18 GHz).

## Referencias

- [1] Keysight Technologies, 1 mW 50 MHz Power Reference Measurement with the N432A Thermistor Power Meter.[En línea]. Disponible en: <https://www.keysight.com>. [Accedido: marzo 2025].
- [2] Keysight Technologies, Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 3) Power Measurement Uncertainty per International Guides, Application Note 1449-3. [En línea]. Disponible en: <https://www.keysight.com>. [Accedido: enero 2025].
- [3] TEGAM, Performance Testing and Calibration of a Power Meter's 50 MHz Reference, Application Note. [En línea]. Disponible en: <https://www.advancedenergy.com>. [Accedido: abril 2025].

## Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.