

Intercomparación multilateral de potencia eléctrica, entre los Laboratorios Nacionales de Alemania, Argentina, Brasil y Uruguay

D. Izquierdo¹, C. Faverio¹, D. Slomovitz¹, W. G. Kürten Ihlenfeld²

¹UTE, ²PTB

labute@ute.com.uy, Guilherme.Ihlenfeld@ptb.de

Resumen: Se presentan en este trabajo los resultados de la intercomparación en Potencia Eléctrica, entre los Laboratorios Nacionales de Alemania: Physikalisch – Technischen Bundesanstalt (PTB), Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Brasil: Instituto Nacional de Metrología, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) y Uruguay: Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), llevada a cabo durante 2004. El elemento utilizado como instrumento viajero fue un patrón de potencia perteneciente al PTB. Los resultados muestran valores compatibles para todos los laboratorios participantes, teniendo en cuenta los valores de desvío como las incertidumbres declaradas.

Palabras clave: Instituto Nacional de Metrología, Intercomparación multilateral, Potencia Eléctrica.

I. INTRODUCCIÓN

Los cuatro países participantes son firmantes del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA) de Patrones Nacionales de Medida y de Certificados de Calibración y Medición, en el marco del BIPM (Bureau International des Poids et Mesures). Dicho acuerdo permite a los Institutos Metrológicos Nacionales (NMI) publicar sus capacidades de Medidas en una base de datos mantenida por el CIPM (Comité Internacional des Poids et Mesures). Dichas capacidades son acreditadas como válidas por la estructura mundial del BIPM que agrupa a los NMI en diferentes regiones, para lo cual es necesario cumplir con diferentes requisitos. Los más resaltables refieren al respaldo técnico con que cuentan las capacidades declaradas, y para ello existen dos posibilidades: que el Instituto esté acreditado ante un Organismo Internacional de Acreditación reconocido o que sus procedimientos sean revisados por representantes de Laboratorios Nacionales de otros países y que sean presentados resultados satisfactorios de Intercomparaciones Internacionales, que finalmente muestren fehacientemente que las capacidades declaradas son el reflejo de los resultados obtenidos.

En este marco, las intercomparaciones adquieren una primordial importancia ya que en definitiva son garantía de las capacidades de medida declaradas por un país integrante del BIPM. En los meses de setiembre y octubre de 2004 se llevó a cabo una Intercomparación Multilateral con NMIs de Alemania (PTB), Argentina

(INTI), Brasil (INMETRO) y Uruguay (UTE) en la magnitud de Potencia Eléctrica.

II. LABORATORIOS PARTICIPANTES

1. Physikalisch – Technischen Bundesanstalt (PTB), Alemania.
2. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Argentina.
3. Instituto Nacional de Metrología, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Brasil.
4. Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), Uruguay.

En la presentación de los resultados, cada laboratorio figura identificado con su sigla.

III. PATRÓN VIAJERO

El patrón viajero consiste en un Convertidor de Potencia, cuya salida es un valor de tensión continua proporcional al valor de potencia activa de entrada. Dicho instrumento es un prototipo desarrollado en forma conjunta entre el PTB y el Instituto MIHAILO PUPIN de Yugoslavia que presenta como característica relevante la estabilidad en el tiempo, lo que lo hace apropiado para este tipo de medidas. Sus características básicas son: Fabricante MIHAILO PUPIN, Modelo MSB – 001, Número de serie 85002. El instrumento posee los siguientes rangos de entrada: Tensión: 120 V, Corriente 5 A, Frecuencia 50 Hz a 60 Hz.

La tensión de salida es de 10 V DC para valores nominales de entrada y $\cos \phi = 1$.

IV. PUNTOS DE CALIBRACIÓN

Se acordó efectuar la calibración en los siguientes puntos:

Tensión = 120 V

Corriente = 5 A

Frecuencia = 53 Hz

$\cos \phi = 1, 0.5 \text{ i}, 0.5 \text{ c}, 0.25 \text{ i}, 0.25 \text{ c}, 0 \text{ i}, 0 \text{ c}$.

V. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Los procedimientos de medida son particulares de cada laboratorio, así como los patrones de referencia y su trazabilidad. En lo que sigue se describen los detalles para los procedimientos de PTB y UTE.

A. PTB

El sistema de PTB se basa en la generación sincrónica y la técnica de muestreo sincrónica [1], [2]. El sistema posee una fuente de dos canales de voltaje AC que genera, con una señal común de reloj, dos voltajes sinusoidales a la frecuencia fundamental f , donde la síntesis digital permite el ajuste del ángulo de la fase entre estos dos voltajes. Amplificadores de transconductancia y de voltaje se utilizan para aplicar una corriente I y un voltaje U al circuito de medida del dispositivo bajo prueba DUT (en este caso el patrón viajero usado en la intercomparación), amplificando las dos señales digitales sintetizadas de tensión.

Un sistema de medida de verdadero valor eficaz, que utiliza un conversor térmico primario, determina el valor rms U_{rms} de la tensión aplicada al circuito de tensión del DUT y asegura la trazabilidad a la unidad de voltaje del Sistema Internacional (SI). Un transformador de tensión y uno de corriente conectado con un shunt (Z), de bien conocidas relaciones (K_u y K_i) y errores de fase, permiten reducir las magnitudes aplicadas al DUT para procesarlas electrónicamente y muestrearlas usando un voltímetro de muestreo digital (DSV). El DSV constituye el centro del sistema de medida. Tanto el proceso de muestreo como la síntesis de la señal están sincronizados con la base de tiempo interna del DSV. Esta condición es de suma importancia para alcanzar la alta precisión en las medidas. Luego de aplicar la transformada discreta de Fourier (DFT) a los datos muestreados (en el secundario de los transformadores), las potencias alternas (aparente S , activa P , y reactiva Q) son determinadas solamente mediante mediciones de relación (de la DFT del voltaje sobre el shunt respecto al voltaje secundario del transformador de potencial, esto es $A + jB$ a la frecuencia fundamental), y el valor eficaz U_{rms} en el primario del transformador de potencial (o en el DUT).

Así, las ecuaciones para el sistema primario de PTB son:

$$\underline{I} = \underline{U} \frac{K_i}{K_u} \cdot \frac{(A + jB)}{Z} = \underline{U} \cdot \underline{Y}, \quad (1)$$

$$S = \underline{U} \cdot \underline{I} = (U_{rms})^2 \cdot \underline{Y}, \quad (2)$$

$$P = (U_{rms})^2 \cdot \text{Re}\{\underline{Y}\}, \quad (3)$$

$$Q = (U_{rms})^2 \cdot \text{Im}\{\underline{Y}\}, \quad (4)$$

donde \underline{I} indica la corriente (subrayada para indicar una cantidad compleja con $j = (-1)^{1/2}$), S la potencia aparente, P la potencia activa y Q la potencia reactiva respectivamente.

Investigaciones teóricas y experimentales extensas [2], [3] sugieren que la incertidumbre alcanzable de la medida para el sistema de PTB es tan baja como $2,5 \mu\text{W}/\text{VA}$ a frecuencia industrial (en un rango de 16 Hz

a 120 Hz), para cualquier ángulo de fase en los cuatro cuadrantes.

B. UTE

El patrón de medida utilizado por UTE es un desarrollo propio [4], directamente trazable a tensión y resistencia, el cual se basa en el siguiente principio de funcionamiento.

El sistema de medida comprende un elemento sumador que opera con las señales de tensión de sus dos entradas. A una de las entradas se le aplica la tensión de ensayo y a la otra, la tensión de salida de un transformador de transconductancia el que es alimentado con la corriente de ensayo. La salida del dispositivo es conectada a un voltímetro de alterna de alta precisión controlado por una PC a través de un bus GPIB. La potencia se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = (AB/4R)(S^2 - D^2) \quad (5)$$

donde P es el valor de potencia, A y B las constantes del sumador, R la relación del transformador de transconductancia ($0.5 \text{ V}/5 \text{ A}$), S y D son los valores medidos de la suma (S) y la resta (D) de los valores de entrada. Estas tensiones de salida son medidas por un multímetro AC de $8\frac{1}{2}$ dígitos, utilizando en este caso un algoritmo de medida [5] que permite medir los valores de tensión AC con incertidumbres menores que $10 \mu\text{V}/\text{V}$.

La fuente y los multímetros son controlados por una PC, lo que permite, además de automatizar la medida, obtener un gran número de registros para cada punto. La Fig. 1 muestra un esquema del sistema.

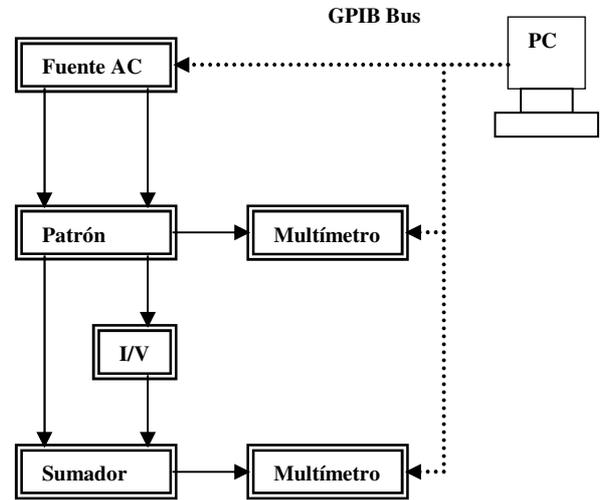


Fig. 1. Diagrama de bloques del circuito de calibración.

La tensión de salida del patrón viajero es medida por un multímetro DC de $8\frac{1}{2}$ dígitos, cuya incertidumbre característica, para los valores medidos, es menor que $5 \mu\text{V}/\text{V}$.

La tensión y la corriente son suministradas por una fuente comercial de alta estabilidad, con posibilidad de ajuste de la fase.

VI. RESULTADOS

Se presentan los resultados proporcionados por cada laboratorio con el valor de desvío y su correspondiente incertidumbre. A los efectos de visualizar dichos resultados se incluyen los gráficos que facilitan la interpretación de los mismos, para ello se expresan los desvíos respecto al valor promedio de los resultados informados para cada punto, por los cuatro laboratorios.

Cálculo de incertidumbres

La incertidumbre estándar combinada ($k=2$) se calculó para cada punto medido basándose en la Guía para la Expresión de Incertidumbre en las Medidas [6]. Se realizaron un conjunto de medidas independientes para cada punto de calibración a fin de tener una base estadística para el cálculo de incertidumbres. Las Tablas I a VII y las Fig. 2 a 8 muestran los resultados para diferentes factores de potencia.

Compatibilidad de los resultados

Para realizar un análisis de los resultados se calcula el índice de mérito [7] de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_i = \frac{|X_{lab} - X_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (6)$$

Donde:

- E_i índice de mérito
- X_{lab} resultado del laboratorio participante
- X_{ref} desvío de referencia
- U_{lab} incertidumbre estándar del laboratorio participante
- U_{ref} incertidumbre estándar de referencia.

Un índice de mérito menor que 1 indica que el valor es compatible con el valor de referencia. Índices de mérito mayores o iguales a 1 implican una incompatibilidad de los resultados.

En el caso de este trabajo se calculó el índice de mérito tomando como desvío de referencia el promedio ponderado de los valores informados por todos los laboratorios participantes.

Los valores de X_{ref} y U_{ref} se calculan a partir de las siguientes ecuaciones [8]:

$$X_{ref} = U_{ref}^2 \sum_{j=1}^n \frac{X_{lab}}{U_{lab}^2} \quad (7)$$

$$U_{ref} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{1}{U_{lab}^2}}} \quad (8)$$

Tabla I
COS $\phi = 1$

Laboratorio	Desvío ($\mu W/VA$)	Incertidumbre ($\mu W/VA$)	Índice de mérito
PTB	-228	20	0.6
INTI	-191	60	0.4
INMETRO	-209	18	0.2
UTE	-202	30	0.4

Tabla II
COS $\phi = 0.5$ IND.

Laboratorio	Desvío ($\mu W/VA$)	Incertidumbre ($\mu W/VA$)	Índice de mérito
PTB	-114	20	0.2
INTI	-112	60	0.0
INMETRO	-107	22	0.1
UTE	-108	30	0.1

Tabla III
COS $\phi = 0.5$ cap.

Laboratorio	Desvío ($\mu W/VA$)	Incertidumbre ($\mu W/VA$)	Índice de mérito
PTB	-120	20	0.1
INTI	-132	60	0.2
INMETRO	-106	22	0.5
UTE	-133	30	0.5

Tabla IV
COS $\phi = 0.25$ ind.

Laboratorio	Desvío ($\mu W/VA$)	Incertidumbre ($\mu W/VA$)	Índice de mérito
PTB	-56	20	0.0
INTI	xxx	xxx	xxx
INMETRO	-54	23	0.1
UTE	-59	30	0.1

Tabla V
COS $\phi = 0.25$ cap.

Laboratorio	Desvío ($\mu W/VA$)	Incertidumbre ($\mu W/VA$)	Índice de mérito
PTB	-58	20	0.1
INTI	xxx	xxx	xxx
INMETRO	-52	23	0.4
UTE	-85	30	0.7

Tabla VI
COS $\phi = 0$ ind.

Laboratorio	Desvío ($\mu W/VA$)	Incertidumbre ($\mu W/VA$)	Índice de mérito
PTB	3	20	0.0
INTI	xxx	xxx	xxx
INMETRO	7	24	0.1
UTE	-3	30	0.2

Tabla VII
COS $\phi = 0$ cap.

Laboratorio	Desvío ($\mu W/VA$)	Incertidumbre ($\mu W/VA$)	Índice de mérito
PTB	1	20	0.2
INTI	xxx	xxx	xxx
INMETRO	9	24	0.5
UTE	-34	30	0.9

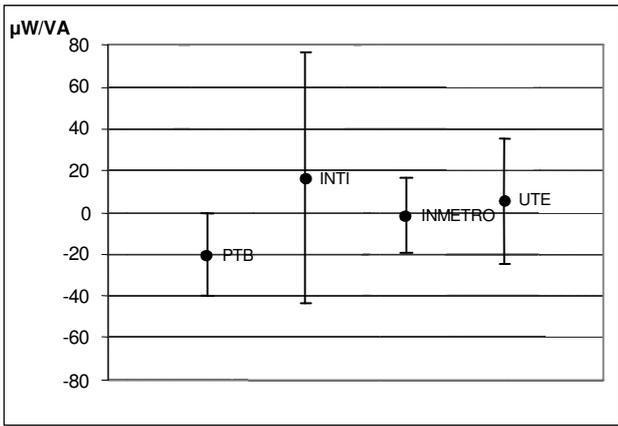


FIG. 2. $\cos \phi = 1$

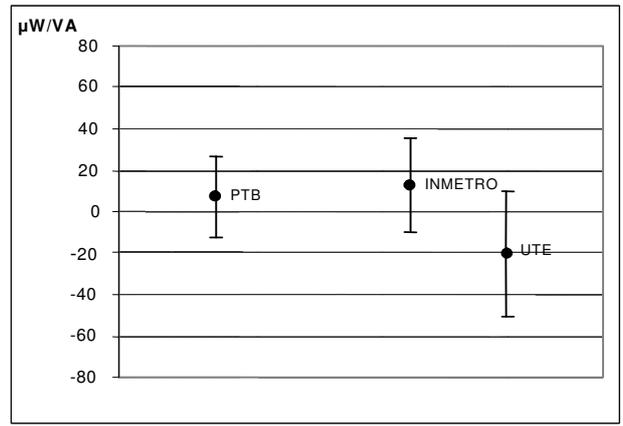


FIG. 6 $\cos \phi = 0.25 \text{ CAP.}$

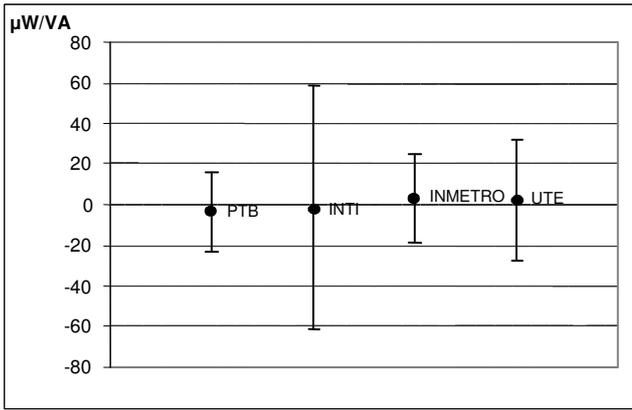


FIG. 3 . $\cos \phi = 0.5 \text{ IND.}$

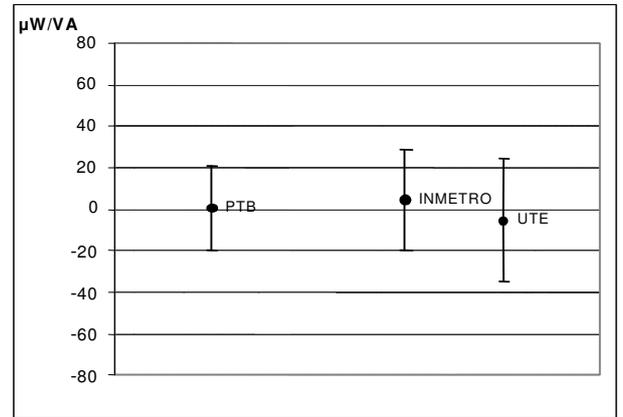


FIG. 7. $\cos \phi = 0 \text{ IND.}$

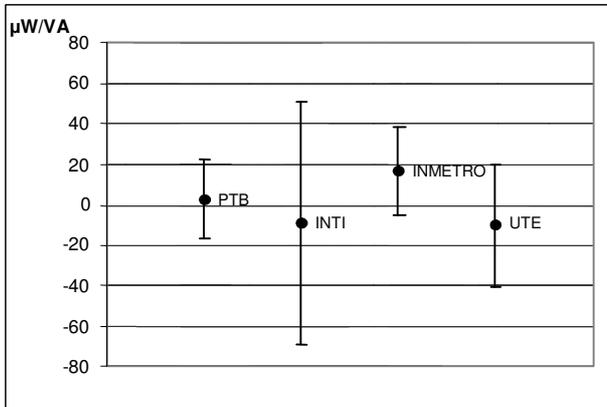


FIG. 4. $\cos \phi = 0.5 \text{ CAP.}$

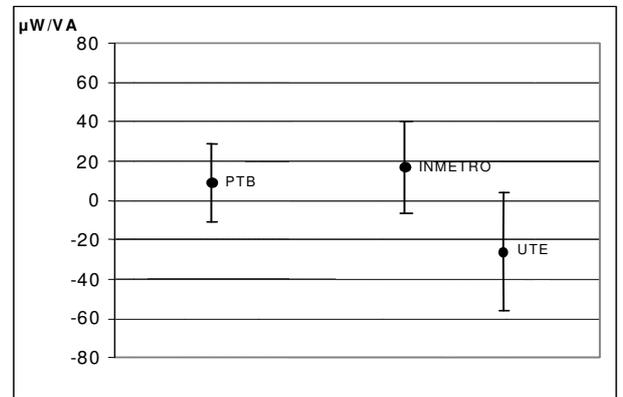


FIG. 8. $\cos \phi = 0 \text{ CAP.}$

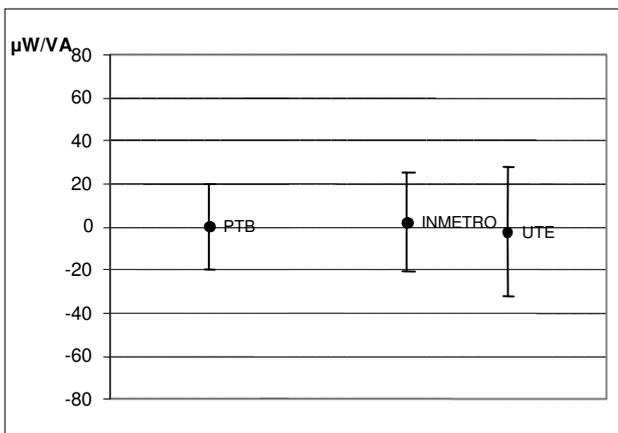


FIG. 5. $\cos \phi = 0.25 \text{ IND.}$

VIII. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que los valores declarados por todos los laboratorios, tomando en cuenta la incertidumbre, se solapan para todos los casos. Los valores de índice de mérito no alcanzaron el valor 1 en ningún caso, lo cual significa que los cuatro laboratorios poseen compatibilidad en sus resultados.

IX. REFERENCIAS

- [1] G. Ramm, H. Moser, and A. Braun, "A New Scheme for Generating and Measuring Active, Reactive and Apparent Power at Power Frequencies with Uncertainties of 2.5 10⁻⁶," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, No. 2, Apr. 1999, pp 422-426.
- [2] W. G. Kürten Ihlenfeld, Maintenance and Traceability of AC Voltages by Synchronous Digital Synthesis and Sampling, PTB Report E-75, Braunschweig, August 2001.
- [3] W. G. Kürten Ihlenfeld, Maintenance and Traceability of AC Voltage Ratios and AC Power by Synchronous Digital Synthesis and Sampling, PTB Report E-76, Braunschweig, October 2001.
- [4] P. Braga, D. Slomovitz. "RMS Voltmeter based Power and Power Factor measuring system," Int. J. Electronics, vol. 75, N° 3, pp. 561-565, 1993
- [5] R. Swerlein. "A 10 ppm Accurate Digital AC Measurement Algorithm," Hewlett Packard Co., August 1991.
- [6] "Guide to the expression of Uncertainty in Measurement," 1st edition, BIMP/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML, 1995.
- [7] J. Bellis "Euromet Projeet Reference N° 345" NPL Report CEM 7, February 1999.
- [8] R. Dziuba, D. Jarrett. "CEM-K2 Key Comparison of Resistance Standards at 10 M Ω and 1 G Ω " Final report. NIST. July 2001.

X. BIOGRAFIAS



Daniel Izquierdo nació en Rocha, Uruguay, en 1963. Recibió el título de Perito en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República, Uruguay, en 1988. Desde 1991 trabaja en UTE, desempeñándose en el Departamento de Metrología Eléctrica del Laboratorio.



Carlos Favero nació en Montevideo, Uruguay, en 1961. Recibió el título de Bachiller en Electrónica de la Universidad del Trabajo del Uruguay, en 1980. Desde 1978 trabaja en UTE, desempeñándose en el Departamento de Metrología Eléctrica del Laboratorio.



Daniel Slomovitz (M'86-SM'89) nació en Montevideo, Uruguay, en 1952. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en 1977 y Doctor en Ingeniería en 2000, en la Universidad de la República, Uruguay. Actúa como Profesor Catedrático en la misma universidad. En 1977, se incorporó al Laboratorio de UTE como Ayudante de Ing., ocupando actualmente el cargo de Jefe del Laboratorio. Ha llevado a cabo investigación en mediciones de baja frecuencia y alto voltaje, habiendo publicado más de 80 trabajos y el libro "Mediciones Eléctricas" del IEEE.



Waldemar Guilherme Kürten Ihlenfeld nació en União da Vitória, Brazil, en 1960. Recibió el grado de B. Eng. de la universidad de Paraná, en 1983, el grado de M. Eng. y el Ph. D. en Ingeniería Eléctrica (Magna Cum Laude) en Braunschweig Technical University, en 1994 y 1997, respectivamente. Desde 1983 a 1999 trabajó en el Laboratorio Central (LAC), instituto de investigación de la Universidad Federal de Paraná y la compañía eléctrica de Paraná, sur del Brasil. En 1999 se incorporó al Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Alemania, donde ha desarrollado circuitos de electrónica de precisión y modelos matemáticos de sistemas de muestreo. Actualmente cursa un grado postdoctorado en la Universidad de Hannover. Sus estudios incluyen procesadores digitales, métodos numéricos, transferencia térmica y modelado de semiconductores.