

ESTADO DEL ARTE EN MEDIDAS ELÉCTRICAS DE ALTA PRECISIÓN

Daniel Slomovitz

d.slomovitz@iecee.org

Laboratorio de UTE, Montevideo, Uruguay

Resumen: Se detallan los últimos desarrollos en sistemas de unidades y patrones eléctricos, así como los sistemas de medida de mayor precisión empleados en los laboratorios nacionales. Se analizan las magnitudes básicas como tensión y resistencia, y las derivadas tales como potencia y factor de potencia; ejemplificadas con sistemas patrones recientemente propuestos. Se discuten los últimos avances en la tecnología asociada a transformadores de medida, importantes eslabones en la cadena de medición.

Palabras clave: patrón, medida, precisión, tensión, resistencia, potencia, transformadores de medida, unidades.

I. INTRODUCCIÓN

El actual Sistema Internacional de Unidades [1] tiene, entre sus unidades básicas, el metro, kilogramo masa, segundo y amperio. A partir de estas 4 unidades se definen todas las restantes del área eléctrica, denominadas unidades derivadas. Otras unidades básicas, tal como la de temperatura, sólo influyen indirectamente.

Por definición, el metro es la longitud recorrida por la luz en el vacío durante un determinado tiempo ($1/299\,792\,458$ s), y el segundo un múltiplo ($9\,192\,631\,770$) del tiempo asociado a una de las transiciones del átomo de Cesio. La masa es la única unidad que aún sigue estando basada en un artefacto. Ésta es una masa patrón que se conserva en la Oficina de Pesas y Medidas (BIPM) en Sèvres, Francia. Por último, el amperio se define como la corriente que circulando por dos conductores rectilíneos paralelos distanciados un metro, produce una fuerza entre ellos de $2 \cdot 10^{-7}$ N por metro de longitud.

Las unidades derivadas están definidas en función de las básicas. En este sentido, la unidad de potencia, el vatio, basa su definición exclusivamente en las magnitudes mecánicas ($1\text{ W}=1\text{ N.m/s}$). El voltio está definido como la

tensión necesaria para producir un vatio sobre un elemento por el que circula un amperio en corriente continua ($1\text{ V}=1\text{ W/A}$) y el ohmio como la resistencia necesaria para producir una caída de un voltio al circular un amperio ($1\ \Omega=1\text{ V/A}$).

II. PATRONES EN CORRIENTE CONTINUA

En lo concerniente a los patrones, éstos son dispositivos que representan a la unidad. Están los así llamados patrones que realizan la unidad. Estos son artefactos que reproducen el mecanismo de la propia definición y por tanto los más precisos, por principio. Por ejemplo, en el caso del voltio se trata de un dispositivo electromecánico [2] en el cual intervienen balances de fuerza y potencia mecánica; así como fuerzas magnéticas que representan al amperio. Estos dispositivos son complejos, tanto en su construcción como en su operación y sólo unos pocos laboratorios en el mundo los han desarrollado. Por otra parte, la exactitud lograda hasta el momento no supera las 0.4 ppm, mientras que la tecnología actual en esta magnitud demanda mayor precisión.

Una estrategia totalmente diferente para el logro de un patrón de tensión continua se ha desarrollado basada en otros principios. En el campo de la física de bajas temperaturas, que en principio no tenía conexión alguna con la metrología eléctrica, en 1962 Josephson [3] descubrió una relación que vincula la tensión con la frecuencia y determinadas constantes universales. Estas constantes son la carga del electrón y la constante de Plank, las que influyen a través de la relación $2e/h$, llamada constante de Josephson. El dispositivo está basado en una juntura formada por dos superconductores aislados por una fina barrera aislante. La aplicación de una tensión continua U provoca una cierta corriente continua por efecto túnel, pero al mismo tiempo aparece una corriente alterna de muy alta frecuencia relacionada con dicha tensión según

$$f_J = (2e/h) U \quad (1)$$

siendo f_J la frecuencia de la referida corriente. En sí misma, la juntura trabaja como un transductor frecuencia-tensión. Lo interesante es que las frecuencias se pueden medir con muy pequeña incertidumbre (10^{-13}), lo cual per-

mitiría disponer de una fuente patrón con una estabilidad 6 ordenes mejor que las pilas patrones saturadas (anterior patrón primario). El otro hecho importante es que el valor de salida depende sólo de constantes universales, por lo que no es necesario ninguna rutina de mantenimiento. Se elimina el engorroso trabajo de intercomparación periódica de pilas.

Técnicamente, el equipo es relativamente complejo. La primer dificultad radica en que la corriente es de frecuencia muy alta, de valor bajo, difícil de medir, y la tensión generada es muy pequeña. Por esto, se agrega una excitación externa de frecuencia f , la cual produce un batido con la frecuencia natural apareciendo componentes de Fourier: $2eU/h \pm nf$ donde n es un número entero. Si para algún valor particular de n se cumple: $2eU/h = nf$, la corriente tendrá una componente continua. La juntura pasa a tener una curva en el plano $U_{dc}-I_{dc}$ (continua) parecida a una escalera. Cada escalón representa una zona en la cual la tensión permanece constante al variar la corriente en un cierto rango. Por esto, la resistencia dinámica es nula sobre cada escalón. Este procedimiento permite obtener tensiones continuas según la ecuación

$$U_n = nfh/(2e) \quad (2)$$

La máxima frecuencia f de uso es de alrededor de 70 GHz, lo cual produce pasos de $145 \mu\text{V}$. Este valor es muy pequeño para poderlo medir con precisión, lo cual ha impulsado a varios laboratorios a diseñar dispositivos multijuntura, en los cuales se instalan en serie unas 2000 junturas individuales [4]. Con éstas, es posible obtener tensiones de salida del orden de 1 V. Últimamente, incluso se han desarrollado multijunturas de 10 V.

La Fig. 1 muestra el aspecto general de un patrón de este tipo. El sistema consta de un oscilador controlado que genera la alta frecuencia, un frecuencímetro ligado a referencias de frecuencias externas (GPS), un sistema de helio líquido a 4.2 K, un osciloscopio en el cual se registra la curva $U-I$, fuentes de corriente y un voltímetro digital de al menos $6 \frac{1}{2}$ dígitos. Este último es necesario para detectar la cantidad de escalones que se están sumando. Las 2000 junturas trabajan usualmente, en los escalones 2, 3 o 4. Sin embargo, distintas junturas pueden estar en distintos escalones. Lo que interesa es la suma total, para lo cual es necesario medir la tensión total (1V aproximadamente) con una precisión tal que permita discernir cómodamente los $145 \mu\text{V}$ de cada escalón. Esto es posible lograrlo con un voltímetro cuyo error sea menor a $10 \mu\text{V}$, valor usual en instrumentos de $6 \frac{1}{2}$ dígitos. A partir de la medida del voltímetro se calcula el número n efectivo total.

Todo el sistema debe estar instalado en un recinto con temperatura controlada y libre de interferencias electromagnéticas. Ante pequeños ruidos, las junturas pueden saltar espontáneamente de un escalón a otro y perderse el efecto. Tanto el voltímetro digital como todo accesorio o

instrumento que se conecte a la salida de la multijuntura, debe poseer muy bajo ruido.

Se han intercomparado patrones Josephson entre sí [5] a efectos de determinar la estabilidad real propia del patrón. Los resultados son mejores a $0.0001 \mu\text{V/V}$ y este límite está fijado fundamentalmente por el ruido del nanovoltímetro necesario para la comparación.

Estos equipos no son portátiles ni demasiado económicos, sin embargo, la practicidad en su operación y su costo los tornan viables para muchos laboratorios. Por otro lado, su estabilidad es mayor que la incertidumbre de los patrones que realizan la unidad. En la medida que se conozca la constante de Josephson, tendremos un patrón de tensión más estable que los que realizan la unidad. De esto no debe concluirse que la exactitud es mayor. El problema radica en saber cuánto vale dicha constante. Ésta debe determinarse dentro del mismo sistema de unidades; y es allí donde se introducen valores altos de incertidumbre.

Las medidas absolutas no han llegado al grado de exactitud que podría alcanzarse con el efecto Josephson. La gran estabilidad de estas fuentes de tensión y su bajo nivel de ruido, son mejores a las actuales realizaciones de la unidad. Se construyó un instrumento cuya performance es mejor que el patrón que implementa la definición del Sistema Internacional. Esto implica que no sería posible calibrarlo con incertidumbres tan bajas como la dada por la estabilidad del aparato.

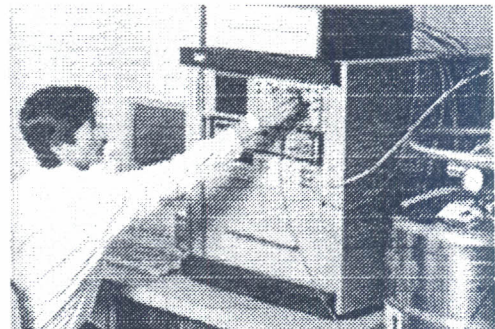


Fig. 1. Aspecto general de un patrón Josephson (foto cortesía de FLUKE).

La solución que se adoptó internacionalmente consiste en decretar un valor para $2e/h$. De esa forma queda definido una nueva unidad del voltio. No se trata de un simple cambio de escala (como el existente entre la pulgada y el metro). Es realmente una nueva unidad, la cual no corresponde a la estructura del Sistema Internacional. En lo concerniente a magnitudes, sólo depende de la unidad del tiempo (a través de la frecuencia). Esto implica que el valor decretado puede entrar en conflicto con el resto del sistema, tornándolo incompatible. Para que esto no ocurra, debe asignarse a esta nueva unidad del voltio una incertidumbre al menos igual a la de los patrones que realizan la unidad.

Este procedimiento ya ha sido empleado con otros patrones en el pasado. La principal ventaja radica en el alto

grado de coincidencia de medidas realizadas en distintos laboratorios. Por otra parte, se corre el riesgo que en el futuro se detecten diferencias significativas (incluso mayores a las incertidumbres aceptadas) entre este patrón y los patrones que realizan la unidad, y sea necesario cambiar el valor actual de la constante y por tanto del voltio basado en el efecto Josephson. Esto implica corregir muchas mediciones ya efectuadas, y reajustar muchos instrumentos de medida. De hecho, esto ya pasó varias veces; habiendo ocurrido el último gran cambio en 1990 [6].

En la década de 1980, la mejor determinación de la constante de Josephson en diferentes países difería en valores tan altos como 5 ppm [7]. Esas discrepancias equivalen a unos 5 órdenes de magnitud mayor a la estabilidad del dispositivo. En 1990 se toma la decisión de unificar las constantes [6], adoptando por convención el valor 483 597.9 GHz/V. Ese cambio significó que prácticamente todos los países debieran cambiar el valor de su voltio patrón. Uno de los menos afectados fue URSS (4.5 ppm) y uno de los mayores ajustes lo debió hacer USA (9.2 ppm). Si bien esta estrategia eliminó la discrepancia entre diferentes países; aún subsiste una diferencia entre el voltio definido a partir del efecto Josephson y el voltio del Sistema Internacional. Esta diferencia se traduce actualmente una estimación de incertidumbre de alrededor de 0.4 ppm.

Para el ohmio existe una situación similar. Un efecto cuántico permite definir el ohmio en base a constantes universales [8]. El dispositivo también usa técnicas de muy bajas temperaturas y es el actual patrón primario en el cual se basan los laboratorios metrológicos nacionales. La resistencia que presenta el dispositivo está dada por la ecuación

$$R_H = (h/e^2)/n \quad (3)$$

La constante $R_k = h/e^2$ es llamada constante de von Klitzing en honor a su descubridor, y su valor es de 25812.807 Ω , de acuerdo al decreto de la convención de 1990. El número entero n usualmente está en el valor 4. La reproducción de ohmio mediante este patrón alcanza niveles de precisión de 10^{-9} , pero la incertidumbre es del orden de 0.2 ppm.

En resumen, los efectos cuánticos introducen una herramienta de muy alta estabilidad y baja dispersión para determinar el voltio y el ohmio; pero el problema consiste en que no sabemos qué valor atribuirles. La situación actual es que todos los países mantienen sus patrones primarios del voltio y el ohmio basados en última instancia en efectos cuánticos, a sabiendas que puede ser posible que se deba corregir su valor en el futuro.

Otra alternativa sería cambiar la unidad de masa, única para la cual se mantiene un artefacto como patrón, eligiendo una nueva unidad basada en efectos cuánticos. Esto derivaría, en última instancia, en el cambio de la unidad de

masa, para permitir mantener los valores de las unidades cuánticas eléctricas.

En cuanto al vatio, está definido dentro del sistema SI como una unidad derivada, basada exclusivamente en unidades básicas mecánicas. Pero dentro de la situación descrita, los patrones primarios del vatio usados en el área eléctrica son diferentes. A partir del voltio y del ohmio definidos por efectos cuánticos, se define el vatio como la potencia que disipa un resistor de 1 Ω , a través del cual existe una caída de tensión de 1 V. Obviamente esto conduce a discrepancias entre el vatio del sistema SI y el vatio eléctrico. En el caso del voltio y del ohmio, esas diferencias afectan fundamentalmente al área eléctrica, pero en el caso del vatio existe una fuerte interacción con las áreas mecánica y térmica. De todos modos, la tecnología actual soporta esas discrepancias, lo cual se traduce en la curiosa situación que dentro del área eléctrica es posible medir mejor que con los límites impuestos por los patrones que materializan las unidades. Este sistema, totalmente diferente al SI, atribuye al voltio y al ohmio las características de unidades básicas y al amperio la de unidad derivada. El amperio queda definido como la corriente que atravesando un resistor de 1 ohmio, produce una caída de tensión de 1 voltio. Por lo tanto, los sistemas de medida de potencia eléctrica basan su trazabilidad a patrones cuánticos del voltio y el ohmio.

III. CONVERSIÓN ALTERNA-CONTINUA

El análisis anterior comprende a magnitudes sólo de corriente continua. En lo relativo a magnitudes de corriente alterna, las definiciones están basadas en efectos térmicos. Se define el valor eficaz (rms) de una corriente periódica, como el valor de una corriente continua que produce la misma disipación de calor sobre un resistor que la primera. En este caso, las mayores dificultades para implementar la definición están relacionadas con el comportamiento del resistor y la medida de potencia calorífica disipada. Los patrones primarios, actualmente, están basados en transferidores térmicos. El resistor es en algunos casos un fino hilo metálico y en otros un resistor plano depositado sobre superficies cerámicas [9]. Como sensor de temperatura se utiliza tradicionalmente una termocupla, aunque en los últimos años han surgido conversores con sensores activos basados en dispositivos semiconductores del tipo transistor [10]. La Fig. 2 muestra el aspecto de un transferidor desarrollado en el Laboratorio de UTE. Existen conversores AC/DC diseñados tanto para entrada de corriente como de tensión. Varios trabajos estudian las fuentes de errores de estos dispositivos, llegando los mejores a valores de unas pocas partes por millón en el rango de audiofrecuencias. En este campo no existe ningún patrón homologado internacionalmente ni basado en constantes universales. Esto conduce a la existencia de diferentes patrones nacionales

con la problemática asociada a las diferencias entre ellos. A su vez, es necesario mantener un amplio rango de corriente (10 mA a 10 A), tensión (10 mV a 1000 V) y frecuencia (10 Hz a 1 MHz); lo cual torna más difícil el problema del mantenimiento de patrones. Los valores de incertidumbre surgen de intercomparaciones internacionales. Las últimas muestran consistencia del orden de 10 ppm a bajas frecuencias [11], aunque en ciertos puntos en particular se llega al orden de 1 ppm. Estos acuerdos, resultado de intercomparaciones, es lo más que se puede lograr internacionalmente.

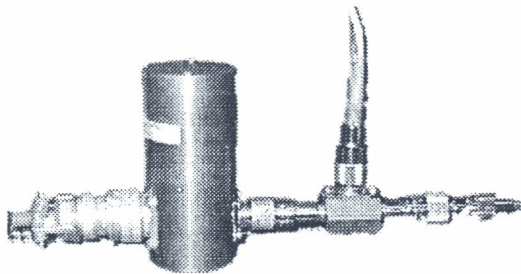


Fig. 2. Foto de un transferidor AC/DC patrón, desarrollado en el Laboratorio de UTE.

IV. TRAZABILIDAD DEL OHMIO EN ALTERNA

El ohmio basado en efectos cuánticos posee una incertidumbre de 0.01 ppm (sin tener en cuenta la incertidumbre de los valores de las constantes universales) [12]. Sin embargo, para uso en corriente alterna, es necesario caracterizar el comportamiento en corriente alterna de los resistores. Estos presentan efectos parásitos tales como capacidades e inductancias; así como efectos no lineales vinculados con pérdidas dieléctricas y dependencias con la temperatura. Normalmente la trazabilidad se realiza comparando resistores en sistemas de puente [13] contra resistores de alterna patrones. A su vez, estos últimos se comparan contra resistores calculables. Estos son resistores en los cuales es posible calcular, en función de su geometría, los elementos parásitos. En última instancia los patrones primarios de resistores de alterna, se basan en resistores donde el campo electromagnético puede ser determinado a partir de las dimensiones geométricas y del conocimiento del comportamiento eléctrico y magnético de los materiales usados en su construcción.

El método tradicional de calibración está basado en puentes de alterna y requiere que los resistores a comparar sean estables, en todas sus características. De lo contrario los puentes no pueden mantener el punto de equilibrio. Otros métodos han sido propuestos, basados en la respuesta al escalón [14]. Aplicado a divisores resistivos, este método tiene la ventaja de no necesitar ningún elemento patrón.

V. PATRONES PRIMARIOS DE POTENCIA

De los capítulos anteriores se concluye que, desde el punto de vista técnico, la trazabilidad de los vatímetros patrones primarios de corriente alterna deberá estar basada en el voltio de continua y el ohmio.

Con señales de entrada $i(t)$, $v(t)$ periódicas, de período T , la potencia está definida por

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (4)$$

Existen varios sistemas que proponen distintos métodos para el computo del producto y la integral [15 a 20]. Eso conduce a diferentes influencias de las magnitudes tomadas como básicas, y distintas incertidumbres totales. Es necesario analizar cada sistema patrón propuesto para determinar sus performances. Las menores incertidumbres están, actualmente, en el orden de 20 ppm, a frecuencia industrial. La Fig. 3 muestra el sistema Patrón de Potencia Nacional del Uruguay, desarrollado en el Laboratorio de UTE.

Para otras magnitudes relacionadas, tales como la potencia reactiva y la potencia aparente, la situación es más compleja. Sólo hay acuerdo en sus definiciones, actualmente, bajo régimen sinusoidal en sistemas monofásicos. Bajo estas condiciones, la potencia reactiva Q se define como $Q = VI \sin \varphi$. V e I son los valores eficaces de las ondas de tensión y corriente y φ el ángulo de desfase entre las mismas. Obviamente, si las ondas poseen distorsión armónica, el ángulo φ no queda definido. La potencia aparente S , en sistemas monofásicos, se define como $S = VI$. En sistemas trifásicos no equilibrados, tampoco hay acuerdo sobre su definición. Con ondas distorsionadas, existen varias propuestas de definición de estas magnitudes [21]. Cada una de ellas tiene ventajas en campos específicos de aplicación, pero inconvenientes en otros.

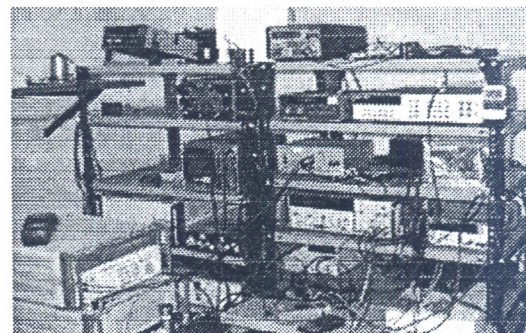


Fig. 3. Sistema Patrón de Potencia Nacional del Uruguay, desarrollado en el Laboratorio de UTE.

Desde el punto de vista de la trazabilidad, la potencia reactiva y aparente deben referirse a la tensión continua y

resistencia. El factor de potencia, por ser una variable adimensional, no requiere referencia a ningún patrón. Efectivamente, existen medidores de muy alta exactitud del factor de potencia, que no requieren trazabilidad a ninguna otra magnitud [20].

V. TRANSFORMADORES DE MEDIDA

El uso de divisores inductivos de corriente alterna y transformadores de medida de tensión de alta precisión es necesario como elemento de ajuste de escala de las tensiones de entrada, a las bajas tensiones usadas por los dispositivos electrónicos. También su uso se requiere para convertir altas tensiones en valores adecuados para las mediciones.

En [22] y [23] se presentan sistemas originales de compensación electrónica para disminuir los errores de transformadores de medida de tensión. Los métodos están basados en la reducción de la corriente magnetizante (en el primero) y la compensación del error mediante el uso de una fuente de tensión auxiliar (en el segundo). Ambos métodos logran reducciones de más de 100 veces en el error original del transformador.

VI. REFERENCIAS

- [1] PTB, "SI base units definition development realisation," 1994.
- [2] D. B. Newell, R. L. Steiner, E. R. Williams, A. Picard, "The next generation of the NIST Watt balance," CPEM 98, pp. 108-109, Washington D.C., USA, 1998.
- [3] B.D. Josephson, Phys. Lett., No 1, pp. 251-253, 1962.
- [4] R. Popel, "The Josephson effect and voltage standards," Metrologia, vol. 29, pp. 153-174, 1992.
- [5] D. Reymann, J. P. Lo-Hive, G. Genevès, "A comparison of one volt Josephson junction array voltage standard driven by a common microwave," Metrologia, vol. 31, pp. 35-37, 1994.
- [6] N. Belecki, R. Dziuba, B. Field, B. Taylor, "Guidelines for implementation the new representation of the volt and ohm effective January 1, 1990," NIST, Tech. Note 1263, 1998.
- [7] B. P. Kibble, "Present state of the electrical units," IEE Proc. A, vol. 138, pp. 187-197, 1991.
- [8] P. Bergalli, "Patrones resistivos de efecto cuántico Hall (QHE)," Disertación presentada a la Facultad de Ingeniería del Uruguay, curso: Laboratorios de calibraciones y medidas eléctricas, 1997.
- [9] M. Klonz, T. Weimann, "Novel multijunction thermal converter in planar technique for AC current, voltage, power and optical radiation," Physica Seri., vol. 41, pp. 718-721, 1990.
- [10] FLUKE, Application note: Design and evaluation of the 792A AC/DC transfer standard.
- [11] J. Vreede, "CCE intercomparison of ac-dc transfer standards," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. MI-42, pp. 99-108, 1993.
- [12] F. Delahaye, T. Witt, B. Jeckelmann, B. Jeanneret, "Comparison of quantum Hall effect resistance standards of the OFMET and the BIPM," Metrologia, vol. 32, pp. 385-388, 1996.
- [13] G. Ramm, "Calibración de resistencias de medición de corriente alterna," PTB-E41s, 1992.
- [14] D. Slomovitz, P. Bergalli, J. Fernández, "Evaluation of low-frequency voltage dividers, using the step response," CPEM 98, pp. 319-320, Washington 1998.
- [15] G. Schuster, "Thermal measurement of AC power in comparison with the electrodynamic method", IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM 25, pp. 529-533, 1976.
- [16] P. Braga, D. Slomovitz, "Rms voltmeter based power and power-factor measuring system," Int. J. Electronics, vol. 75, No 3, pp. 561-565, 1993.
- [17] W.J. Moore, E. So, "A current-comparator-based system for calibrating active/reactive power and energy meters," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol 32, pp. 147-149, 1983.
- [18] F.J. Clarke, J. Stockton, "Principles and theory of wattmeters operating on the basis of regulary spaced samples pairs," J. Phys. E., vol. 15, pp. 645-652, 1982.
- [19] A. Rondoni, A. Musetti, W. Schenck, "Voltímetro y Wattímetro de muestreo con AT-DSP2200," Proyecto de fin de carrera, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República del Uruguay, 1997.
- [20] D. Slomovitz, C. Faverio, "Power standard based on a high precision power-factor meter," CPEM 98, pp. 542-543, Washington 1998.
- [21] D. Slomovitz, "Análisis de definiciones de potencia reactiva y potencia aparente desde el punto de vista de una empresa eléctrica," Disertación presentada en la Universidad de la República del Uruguay, 1999.
- [22] D. Slomovitz, "Electronic compensation of voltage transformer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 37, pp.652-654, Dec. 1988.
- [23] D. Slomovitz, "Electronic compensation of inductive voltage dividers and standard voltage transformers," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 47, pp. 465-468, Abr. 1998.

VII. BIOGRAFÍA



Daniel Slomovitz (M'86-SM'89) nació en Montevideo, Uruguay, en 1952. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, en 1978.

Desde 1977 trabaja en el Laboratorio de UTE, desempeñando actualmente el cargo de Jefe del Laboratorio.

En el área de educación, ha conducido numerosos cursos y conferencias, siendo actualmente Profesor Catedrático de Medidas Eléctricas, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Ha desarrollado trabajos de investigación en las áreas de Metrología y mediciones en Alta Tensión, habiendo publicado más de 60 trabajos.