Evolución de la Metrología Eléctrica en Uruguay
Parte I: Desde sus inicios hasta la primera mitad del siglo XX

Evolution of electrical metrology in Uruguay
Part I: Beginnings up to the first half of the 20th century

Evolução da metrologia elétrica no Uruguai
Parte I: Dos primórdios à primeira metade do século XX

Daniel Slomovitz [1(*)]

Recibido: 02/06/2025 Aceptado: 22/06/2025

Resumen. - Las mediciones eléctricas experimentaron un desarrollo significativo desde el inicio de las aplicaciones eléctricas, tanto en el campo de la energía como en el de las comunicaciones. Los primeros cables telegráficos submarinos impulsaron el desarrollo de galvanómetros y puentes de medición de resistencia. A su vez, la expansión de la energía eléctrica estimuló avances en las mediciones de tensión, corriente y potencia.
En Uruguay, los primeros pasos se dieron con la implementación de cursos universitarios sobre estos temas, la creación de laboratorios y el inicio de la investigación y el desarrollo. Esto fue impulsado principalmente por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República y la empresa eléctrica estatal UTE.
Este trabajo, dividido en dos partes, presenta en esta primera parte los desarrollos entre los comienzos hasta la década de 1960. Fue durante este período que se consolidó la estructura de los laboratorios nacionales y se definieron las normas básicas para las magnitudes más relevantes para el país. En una segunda parte se analizará el desarrollo de las mediciones eléctricas desde esa época hasta la actualidad.

Palabras clave: Patrón, galvanómetro, voltímetro, calibración, historia.

(*) Autor de correspondencia
[1] Profesor, Instituto de Ingeniería Eléctrica, UDELAR (Uruguay), dslomo@gmail.com,
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-0909-6443

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 28 (2025). pp. 311-329
https://doi.org/10.36561/ING.28.19
ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay
Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

Summary. - *Electrical measurements have undergone significant development since the beginning of electrical applications, both in the fields of energy and communications. The first submarine telegraph cables prompted the development of galvanometers and resistance measurement bridges. In turn, the expansion of electrical power systems stimulated advances in voltage, current, and power measurements.*

In Uruguay, the first steps were taken with the implementation of university courses on these topics, the creation of laboratories, and the initiation of research and development activities. This was driven primarily by the Faculty of Engineering of the University of the Republic and the public electric utility UTE.

This work, divided into two parts, presents in this first part the developments between the beginning until the 1960s. It was during this period that the structure of national laboratories was consolidated and basic standards for the most relevant quantities for the country were defined. In a second part we will analyze the development of electrical measurements from that time to the present.

Keywords: *Standard, galvanometer, voltmeter, calibration, history.*

Resumo. ***-*** *As medições elétricas passaram por um desenvolvimento significativo desde o início das aplicações elétricas, tanto na área de energia quanto na de comunicações. Os primeiros cabos telegráficos submarinos impulsionaram o desenvolvimento de galvanômetros e pontes de medição de resistência. Por sua vez, a expansão da energia elétrica impulsionou avanços nas medições de tensão, corrente e potência.*

No Uruguai, os primeiros passos foram dados com a implementação de cursos universitários sobre essas disciplinas, a criação de laboratórios e o início da pesquisa e desenvolvimento. Isso foi impulsionado principalmente pela Faculdade de Engenharia da Universidade da República e pela empresa elétrica estatal UTE.

Esta primeira parte abrange o período até a década de 1960. Foi durante esse período que a estrutura dos laboratórios nacionais foi consolidada e os padrões básicos para as grandezas mais relevantes para o país foram definidos. A segunda parte analisará o desenvolvimento das medições elétricas desde então até o presente.

Palavras-chave: *Padrão, galvanômetro, voltímetro, calibração, histórico.*

1. Introducción. - Uno de los primeros instrumentos de medición eléctrica fue el galvanómetro. Este permitió medir corrientes y tensiones con muy alta sensibilidad. Estaba basado en los trabajos de Oersted y Ampère, que demostraron la íntima relación entre la electricidad y el magnetismo. Su desarrollo comenzó con el descubrimiento del desvío de la aguja de una brújula por efecto de la corriente circulante en un conductor adyacente (Figura I).

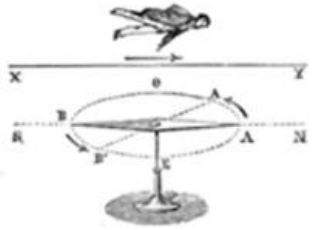

Figura I. Relación entre corrientes y magnetismo [1].

Un invento clave fue realizado por Johann Schweigger en 1820 [2], arrollando el alambre en una bobina que multiplicaba la acción de un solo conductor. Nombró a este instrumento Galvanómetro, en honor a Galvani quien realizó los primeros experimentos de los efectos de la electricidad. Siguientes avances fueron hechos por Johann Christian Poggendorff en 1821, James Cumming en 1821 [3], Leopoldo Nobili en 1828 y William Sturgeon en 1836. La figura II muestra la propuesta de Cumming. Consta de una bobina rectangular, magnificadora del efecto producido por un solo conductor, y una brújula, como elemento sensible al campo magnético.

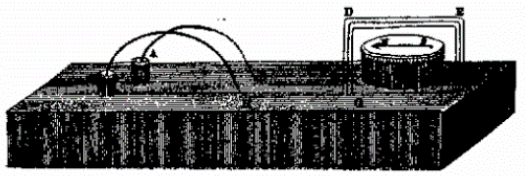

Figura II. Primeros galvanómetros. Propuesta de Cumming [3].

En el año 1856, William Thomson (posteriormente Lord Kelvin) inventa el galvanómetro marino [4], de muy alta sensibilidad, con un haz de luz como indicador y un blindaje magnético que independiza su funcionamiento de condiciones externas (figura III). Su denominación se debió a su aplicación, relacionada con la telegrafía intercontinental mediante los recientes tendidos de cables submarinos. La gran longitud de los mismos y los efectos de sus impedancias atenuaban significativamente las señales lo cual requería gran sensibilidad de los detectores.

Figura III. Galvanómetro marino de Thomson (The Science Museum Group).

Posteriores avances se debieron a Jacques-Arsène d´Arsonval y Marcel Deprez en 1882. Los galvanómetros se siguieron usando como los instrumentos de medida de mayor sensibilidad hasta mediados del siglo XX (figura IV). Una relevante línea de investigación, respecto a estos instrumentos, se desarrolló en Uruguay, tal como se analiza en próximas secciones.

Figura IV. Galvanómetros modernos (Laboratorio de UTE).

A comienzos del siglo XIX se desarrolla el primer elemento tecnológico eléctrico de alto impacto social: la telegrafía. Samuel Morse, en 1836 presentó el primer telégrafo con un código simple, digital, binario, que sólo requería de un hilo para su trasmisión, pues para el retorno se usaba la tierra. En esa época estaban disponibles los elementos básicos, una fuente de corriente continua (pila eléctrica, Volta, 1800) y como detectores, los galvanómetros. El desarrollo de ambos dispositivos posibilitó conectar América con Europa mediante cables submarinos (Cyrus Field, 1854).

Uno de los grandes problemas en estos cables fue las fallas producidas por deterioro de la aislación. Las reparaciones de cables sumergidos en el fondo marino requerían detectar el punto de falla. Para esta tarea, se designó una comisión en Gran Bretaña, que entre otros la integraba el físico e inventor Charles Wheatstone. Su análisis derivó en el desarrollo de puentes de medida de resistencia, con los cuales se podía determinar el largo del cable desde su inicio hasta el punto de falla. Esto fue clave para el desarrollo de los puentes de medida, en particular el que lleva su nombre. La figura V muestra un puente Wheatstone de 1907.

Figura V. Puente Wheatstone (Leeds and Northrup).

El impacto en Uruguay de estos avances en metrología eléctrica, así como desarrollos locales en formación académica, creación de laboratorios e investigación, se vería recién entrado el siglo XX. Significativos esfuerzos, tanto de instituciones académicas como de empresas industriales, condujeron a adelantos que tuvieron repercusión internacional, lo cual se discute en las siguientes secciones.

2. Inicio de planes de formación académica. - Los primeros registros de enseñanza relacionados con medidas eléctricas datan de fines del siglo XVIII, en la recién creada Facultad de Matemáticas de la Universidad del Uruguay, y en la Facultad de Medicina por las aplicaciones de la electricidad en esta rama [5]. En particular se menciona la existencia de un gabinete de física industrial que contaba con una mesa de medidas eléctricas, dos galvanómetros, una brújula de senos y diversas pilas, entre otros elementos. La enseñanza formal de la electrotecnia, con capítulos específicos de metrología eléctrica, comenzó con el plan de estudios de 1906. Un detallado análisis histórico de los distintos planes de estudios, hasta la década de 1940, fue elaborado por Segismundo Gerszonowicz [6], quien citaremos numerosas veces en las siguientes secciones. El plan de 1906, por primera vez incluía un curso especifico de "Nociones de Electrotécnica", en el quinto año. 1910 fue el primer año en que se dictó este curso. Este contenía un capítulo de Unidades de Medida y otro sobre Aparatos de Medida, el que incluía patrones y los medidores básicos de corriente, tensión, potencia y resistencia, así como contadores de energía. En 1914 se agregan al programa clases de laboratorio. Desde la perspectiva actual, resulta raro cómo no se incluyeron, desde el inicio, clases prácticas en una asignatura que está centrada en la experimentación. Como elemento curioso, a visitas actuales, incluía una práctica de calibración de amperímetros por el método electrolítico. Textualmente, "*Este experimento consiste en medir una corriente eléctrica por la cantidad de cobre depositado por ella durante un tiempo determinado*."

En 1927, ya en la existente Facultad de Ingeniería (de aquí en adelante FING), se amplía la temática, abarcando: patrones, galvanómetros, amperímetros electrodinámicos, balanzas, amperímetros térmicos, voltímetros electrodinámicos, voltímetros electrostáticos, medidas de resistencia, puente Wheatstone, resistencia de

galvanómetros, resistencia interna de pilas, medidas de potenciales, medidas de capacidad, medidas de energía eléctrica, de rendimientos y medidas fotométricas.

Un programa más completo aún se estableció en 1931, elaborado por el Ing. Clemente Vercesi. En particular, el curso de Medidas eléctricas se amplió según el programa siguiente (textual).

1. Aparatos de medida. Clasificación, dispositivos de lectura, suspensiones, sensibilidad, amortiguación, galvanómetros, aproximación de los métodos, errores.
2. Medidas de resistencia. Distintos métodos, pequeñas resistencias, grandísimas resistencias, aislación, resistencias líquidas.
3. Medidas de cantidad e intensidad. Galvanómetro, galvanómetro balístico, voltámetros, balanzas, amperímetros, transformadores de intensidad.
4. Medidas de f.e.m. Electrómetros, potenciómetros, vólmetros, transformadores de tensión.
5. Medidas de capacidad e inductancia. Métodos directos, por comparación, patrones.
6. Medidas magnéticas. Intensidad de campos, curva de magnetización, pérdidas.
7. Medidas de potencia. Wáttmetros, circuitos de corriente continua y alterna, potencia, factor de potencia.
8. Circuitos trifásicos. Definiciones, sistemas simétricos y disimétricos, equilibrados y desequilibrados, componentes simétricas, métodos de los 2 wáttmetros y de las 4 lecturas, magnitudes monofásicas equivalentes.
9. Ensayos de sobrecalentamiento. Objeto y duración, medida de las temperaturas, método de circulación, ensayos equivalentes.

Con pequeñas variaciones, este programa siguió vigente hasta la década de 1940, años en que Segismundo Gerszonowicz introduce complementos, y sobre todo una filosofía de enseñanza diferente. Según sus propias palabras [6] *"...con el fin de escapar a la rutina y poder guiar a los estudiantes más íntimamente en el estudio, pensamos dedicar parte o la totalidad del semestre del 6° año (electrotécnica III) al estudio a fondo, con ayuda de artículos originales, trabajos especiales de laboratorio y taller, proyectos, etc. de un solo tema, que variará por completo de un año a otro.*" El programa propuesto (textual), en la temática de medidas eléctricas, fue el siguiente.

1. Errores y correcciones-Unidades, medidas absolutas de resistencia e intensidad, patrones, aparatos de medida, galvanómetros de corriente continua y alterna, aparatos de cero, oscilógrafos, reógrafo, aparatos industriales, registradores.
2. Medidas de resistencias- Medida de grandes resistencias.
3. Medidas de f.e.m-Electrómetros-métodos diversos de medida de la ddp-Potenciómetros de corriente continua y alterna, aplicación a 1a calibración de aparatos de medida.
4. Medidas de capacidades-Coeficientes de inducción mutua y de self inducción, diversos métodos de medida. con estudio particular de puentes en corriente alterna.
5. Medidas de frecuencia-Distintos métodos, frecuencímetro.
6. Medidas del factor de potencia, fasímetro.
7. Medidas de potencia-Medidas en corriente continua y alterna monofásica, diversos métodos, wáttmetros, corrientes parásitas. Análisis de forma de onda.
8. Medida del factor de forma.
9. Medidas de cantidad de electricidad y de energía-Corriente continua: contadores de cantidad de energía, calibrado, ensayos diversos. Corriente alterna: contadores de energía, monofásicos y polifásicos, distintos tipos, calibrado, otros ensayos, contadores de energía reactiva, de energía aparente. Contadores especiales, instalaciones de alta tensión.
10. Medidas magnéticas-Campos débiles, campos fuertes, histéresis, curva de imantación. Permeámetros, pérdidas, aparato Epstein, otros métodos.
11. Medidas en alta tensión-Materiales, estudio de los aisladores y de los cables.

Este programa se complementaba con la realización de proyectos que los estudiantes realizarían parcialmente en el Instituto y parte en sus casas, trabajando en grupos.

En cuanto a facilidades de laboratorio, estas eran muy escasas y según relato de esa época: "*Tan solo en la década de 1930 el instrumental fue incrementado con la adquisición de algunos aparatos, calificados de interesantes como un oscilador 10 a 17000 p/s, un oscilógrafo catódico incompleto, etc. pero con todo, el Laboratorio era extremadamente pobre*". En años siguientes, este laboratorio mejoró, lo cual se discute en la siguiente sección.

Hacia la década de 1950, el programa fue ampliado incluyendo varios ítems sobre determinación de características de

instrumentos y calibración de los mismos. Esto incluía: métodos de determinación de la resistencia y sensibilidad de galvanómetros, diversos métodos de medición de resistencias, calibración de óhmetros, voltímetros, vatímetros y contadores de energía, mediciones de inductancia y capacidad con puentes de alterna, entre otros.

3. Investigación y desarrollo. - En las décadas de 1940 y 1950, impulsado por Segismundo Gerszonowicz, se realizaron múltiples desarrollos sobre aparatos de medida en FING, publicando múltiples artículos. Entre los años 1946 y 1948 dictó conferencias en universidades norteamericanas y viajó frecuentemente a Francia. En esa época fue nombrado "Fellow" del IEEE, el mayor grado que dicha institución otorga. Su destacada actuación merece la inclusión de una breve biografía [7]. Nació en 1909 en Polonia y se graduó de Ingeniero en 1930 en el Instituto Politécnico de Grenoble, Francia. A partir de ese año trabajó en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos y Físicos de Materiales de ese Instituto. En 1936 viajó a Uruguay contratado por FING para desempeñarse como Director del recién creado Instituto de Electrotecnia. Se casó, en 1938, con Delia Maggiolo, con quien tuvo un hijo, Jorge, a quien le debo gran parte de la información sobre sus actuaciones. Según su relato, *"…la situación de pre-guerra fue determinante en su decisión de dejar Europa.*" El resto de su familia murió en la guerra. Segismundo Gerszonowicz murió el 10 de julio de 1953 a la temprana edad de 44 años. Aun así, dio un gran impulso a la tecnología de las mediciones eléctricas en Uruguay.

3.1 Galvanómetros. - En los laboratorios de corrientes débiles, tal como se los denominaba en las primeras épocas, los galvanómetros eran un elemento clave para múltiples sistemas de medida. La figura VI muestra uno de tales equipos. El sistema motor, integrado por un cuadro bobinado móvil y un imán fijo, estaba unido a un pequeño espejo que reflejaba la luz de una linterna y proyectaba el haz en una escala ubicada a una distancia del orden del metro. Este sistema amplificaba las pequeñas desviaciones del espejo.

Figura VI. Sistema móvil de galvanómetro de alta sensibilidad (Laboratorio de UTE).

Sus principales problemas se centraban en lograr alta sensibilidad con cortos tiempos de respuesta transitoria. Al ser un sistema oscilatorio electo-mecánico, existe una relación entre sus parámetros eléctricos y mecánicos. Aspectos generales fueron estudiados y documentados en varios trabajos. Uno de sus parámetros fundamentales era el punto de pasaje de respuesta oscilatoria a exponencial-amortiguada, lo cual depende, entre otros parámetros, de su resistencia. En [8] se muestran métodos para la determinación de dicha resistencia critica. Otros estudios abarcaron el retorno a cero de la indicación [9].

Una aplicación diferente corresponde al galvanómetro balístico. En este caso, el instrumento cumple una función de integración, relacionada con la máxima indicación del movimiento transitorio. Cubría campos específicos, como la determinación de propiedades ferromagnéticas [10-12].

En mediciones de alterna, se usaban los llamados galvanómetros de resonancia y de cuerda (figura VII) [13-16]. El sistema móvil resonaba a una frecuencia similar a la de la red, igual a la frecuencia de la señal, logrando así una gran sensibilidad. Mediante una perilla, se podía ajustar ligeramente la frecuencia de resonancia para ajustarla a la frecuencia específica de la señal. Otros tipos de galvanómetros fueron analizados en [17].

Figura VII. Galvanómetro de resonancia para corriente alterna (Laboratorio de UTE)

Como compendio de estos múltiples trabajos, Segismundo Gerszonowicz publicó un tratado de unas 400 páginas sobre galvanómetros en 1943 [18], el más amplio que se haya escrito sobre el tema (figura VIII), una de las pocas referencias latinoamericanas, y quizás la única en español, que figuraba en esas épocas en la bibliografía de países altamente desarrollados. Un detalle que muestra la relevancia internacional que tuvieron sus trabajos en este tema, son las notas de agradecimiento a Segismundo Gerszonowicz, realizadas por varios autores que citaron sus publicaciones, tales como Forest Harris del Laboratorio Nacional de Estados Unidos (NBS) [19], y Charles Dawes [20].

Figura VIII. Tratado sobre galvanómetros, escrito por Segismundo Gerszonowicz [18].

Todavía, hasta la década de 1970, existían en Uruguay galvanómetros en operación tanto en FING como en el Laboratorio de UTE (empresa de energía eléctrica estatal del Uruguay). Pero, su obsolescencia ya fue evidente a partir de la aparición de los primeros instrumentos digitales.

3.2 Laboratorios. - El primer elemento patrón del que se obtuvo referencia, es un resistor de 1 Ω, marca Siemens and Halske, fechado en 1907, propiedad del laboratorio de UTE (figura IX).

Figura IX. Patrón de resistencia fechado en 1907 (Laboratorio de UTE).

Esto muestra que ya existían laboratorios de calibraciones y mediciones de alta precisión en esos años, probablemente ligados a la incipiente expansión de la energía eléctrica en el país. En forma simultánea, se disponía de variados instrumentos de medida. Existen referencias de la existencia en el país de amperímetros de esa época, pero las referencias más antiguas en otras magnitudes, que se han podido ubicar, datan de 1930. La figura X muestra un miliamperímetro fechado en 1906 y un vatímetro, en 1930.

Figura X. Izquierda: Miliamperímetro d´Arsonval - 1906 (izquierda, colección personal). Vatímetro - 1930 (derecha, Laboratorio de UTE).

Los primeros laboratorios, de los que se tiene registro, se crearon en UTE en 1938 y en FING en 1939. Las figuras XI y XII muestran una vista parcial de los laboratorios de FING [21]. Estos inicialmente incluían un área de corrientes continuas y otra de corrientes alternas. En la figura XI se aprecia un galvanómetro de espejo y su escala remota (a la derecha). En la foto de la figura XII se reproduce la instalación de medidas de corriente alterna, con un oscilador a válvulas, patrones de inductancia, y un galvanómetro de vibración tipo Campbell.

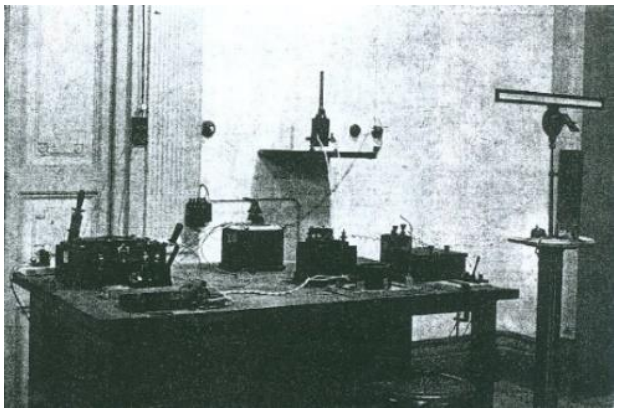

Figura XI. Vista parcial del Laboratorio de Medidas de FING (1939) [21].

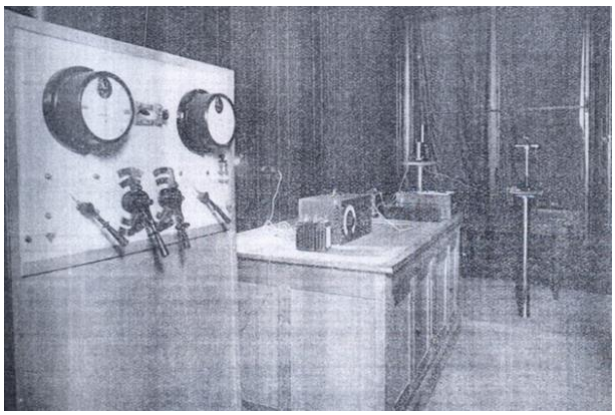

Figura XII. Laboratorio de corriente alterna de FING, incluyendo oscilador a válvulas, patrones de inductancia, y galvanómetro de vibración (1939) [21].

Un reporte posterior muestra el desarrollo de este laboratorio en el año 1953 [22] (Figura XIII).

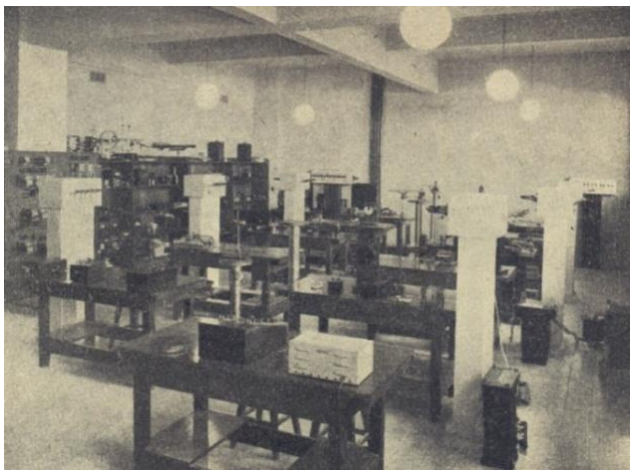

Figura XIII. Laboratorio de medidas eléctricas de FING, año 1953 [22].

Ya contaba con amperímetros, voltímetros y vatímetros de alta precisión para la época (exactitud 0.25 %) y patrones de resistencia entre 0.1 mΩ y 10 kΩ, inductancia entre 1 mH y 1 H, así como pilas patrones Weston de 1.018 V. Entre los galvanómetros se desatacaba un galvanómetro Siemens-Halske con sensibilidades de 0.25 nA y 1.6 μV. Entre los puentes de medición se contaba con un puente Thompson para medidas de pequeñas resistencias y un puente Heaviside-Campbell para las medidas de inductancias. En esa época estaban en uso los oscilógrafos de bucle, que registraban las ondas en papel, permitiendo el registro simultáneo de varios fenómenos. Poseía un equipo de este tipo, marca Westinghouse de 7 bucles, dos de ellos vatimétricos. Los servicios prestados incluían la calibración de contadores de energía, así como de diversos instrumentos de medida.

En la década de 1950, en FING, se desarrolló un laboratorio de alta tensión [22]. Este comprendía un equipo de impulso Westinghouse de tipo Marx, de 1 MV, con sistema de registro formado por un divisor de tensión capacitivo y un oscilógrafo electrónico que permitía registrar fenómenos desde tiempos de 1 μs (figura XIV), y un equipo de alterna de la misma marca, de dos transformadores en cascada, que llegaba hasta 500 kV, con posibilidad de variar la frecuencia entre 40 Hz y 100 Hz (figura XV). Un explosor de esferas completaba la instalación. Este equipamiento estuvo en funcionamiento hasta la década de 1980, cuando fue parcialmente desmantelado.

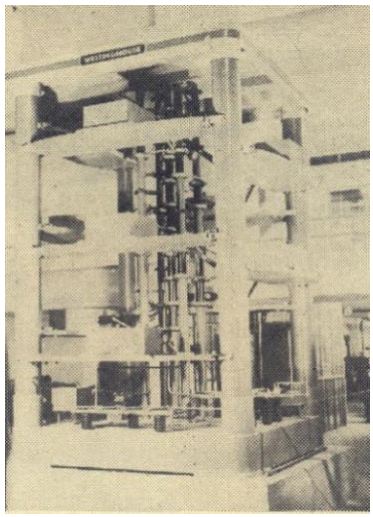

Figura XIV. Generador de impulso sistema Marx, laboratorio de alta tensión de FING, año 1953 [22].

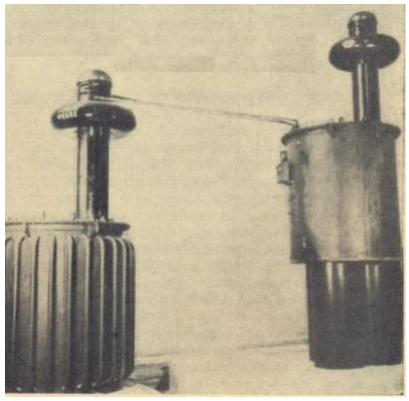

Figura XV. Transformadores del equipo de 500 kV. Laboratorio de alta tensión de FING, año 1953 [22].

Por su lado, la empresa eléctrica, antes de la década de 1930 ya poseía un laboratorio. Esta empresa fue creada por ley el 21 de octubre de 1912, denominándose entonces "Administración General de Usinas Eléctricas del Estado" (UEE), estableciéndose el monopolio estatal de la generación, trasmisión y distribución de electricidad [23]. Sobre este laboratorio la única referencia que se pudo rescatar es que su área era de unos 900 m^2. Registros documentados comienzan recién en 1938, cuando se inauguró el nuevo edificio para los laboratorios, cito en la calle Paraguay 2385, donde aun actualmente se encuentra con más de 2000 m^2 [24]. La figura XVI muestra la inauguración del mismo, con su personal, más aquellos relacionados con su construcción. En la figura XVII aparece una vista panorámica del mismo desde la calle Paraguay, en el año de su inauguración.

Figura XVI. Inauguración del Laboratorio de UTE - 1938.

Figura XVII. Edificio del Laboratorio de UTE - 1938.

Este laboratorio comprendía las áreas de mecánica, química y eléctrica. En lo referente a metrología eléctrica, contaba con un área de calibración de instrumentos, con una mesa marca AEG que incluía fuentes, patrones de resistencia y tensión, y puentes de medida (Figura XVIII).

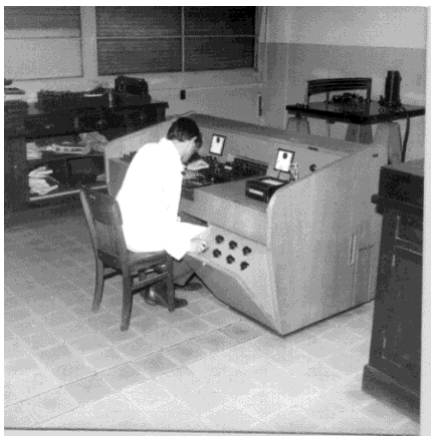

Figura XVIII. Mesa de calibración de instrumentos de medida del Laboratorio de UTE, en operación hasta la década del 1970.

Permitía la calibración de voltímetros, amperímetros y vatímetros, hasta clase 0.2. La limitación era que los instrumentos debían ser aptos para alterna y continua, dado que la mesa solo admitía calibración en corriente continua. Este equipo estuvo en funcionamiento hasta finales de la década de 1970, cuando se desarrollaron sistemas de calibración específicos para corriente alterna. La sala contenía diversos galvanómetros y puentes, así como un instrumento universal Cambridge (al fondo, a la derecha, de la foto) que podía medir tensión, corriente y potencia, con muy alta precisión. El elemento móvil estaba adosado a un espejo, y su escala luminosa medía 3 metros efectivos. Estaba construida en tres niveles. Cuando el haz luminoso llegaba a un extremo de uno de los niveles, aparecía en el siguiente, al comienzo, debido a que tenía tres linternas desplazadas sobre su mesa. Para evitar el efecto de vibraciones del piso, toda la estructura se apoyaba en tres grandes patas de hormigón. Su caja de control, con los ajustes de tensión y corriente, se muestra en la figura XIX.

Figura XIX. Caja de control del instrumento universal Cambridge (Laboratorio de UTE).

Otra área estaba dedicada a la calibración de medidores de energía (figura XX). Varias mesas de instrumentos permitían calibrar una gran cantidad de contadores simultáneamente, necesario por la alta demanda de la empresa.

Figura XX. Sala de calibración de medidores de energía del laboratorio de UTE.

También contaba de una sala para la calibración de transformadores de medida, con patrones y un puente que todavía continúa funcionando (figura XXI).

Figura XXI. Sala de calibración de transformadores de medida del Laboratorio de UTE. Década de 1940.

En el área de la alta tensión, desde su inauguración, UTE ya poseía un pequeño laboratorio con equipamiento de alterna hasta 100 kV (figura XXII). Prácticamente se mantuvo igual hasta fines de la década de 1970, cuando fue ampliada y equipada con nuevos aparatos.

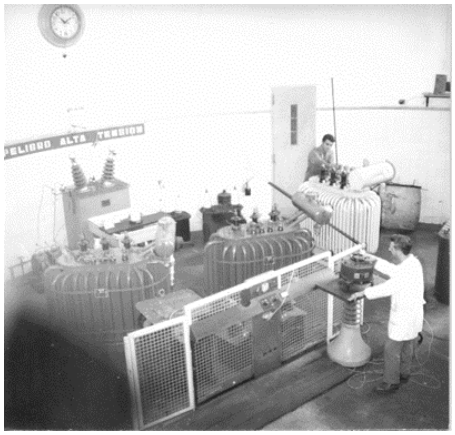

Figura XXII. Sala de alta tensión del Laboratorio de UTE. Década de 1940.

Un tercer laboratorio eléctrico se creó por la Ley N° 13 318 en 1964, con el nombre de Laboratorio de Análisis y Ensayos (LAE), cambiándose a LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay) en 1975. El propósito inicial fue de control de la calidad de los productos de exportación. Recién en 1982 se crea un área de metrología, debido a la aprobación de la Ley Nacional de Metrología (15298/82). Esta le asignó al LATU la responsabilidad del mantenimiento, custodia y diseminación de los patrones nacionales de medida. Es así que el LATU, hasta hoy, mantiene la trazabilidad a patrones primarios de medición con niveles de incertidumbre acordes con los requerimientos del país. En ese entonces, el área de metrología eléctrica contaba con patrones de resistencia, puentes de medida de resistencia y fuentes de tensión patrones basadas en pilas Weston. Mediante un convenio con UTE, en 1999 concede a esta empresa la custodia de los Patrones Eléctricos Nacionales, convirtiéndose el laboratorio de UTE en Laboratorio Designado Nacional.

3.3 Patrones. - Como se describió anteriormente, desde principios del siglo XX hay registro de la existencia de patrones de unidades eléctricas en UTE. También en FING existían patrones fechados en la primera mitad del siglo XX. En esos tiempos, las principales magnitudes necesarias para el mantenimiento de patrones fueron resistencia y tensión. A partir de ellas, se derivaban otras, como corriente y potencia.

3.3.1 Resistencia. - Los resistores patrones, basados en la resistencia de aleaciones, como la manganina, constituyeron los patrones primarios de resistencia. Los modelos del tipo Thomas de 1 ohm (figura XXIII) son los más estables. A partir de ellos se establecen los valores de toda la escala de resistencia. Ya hacia la mitad del siglo XX, tanto UTE como LATU poseían varias unidades de estos resistores, los cuales constituían el Patrón Nacional de Resistencia. Aun actualmente, siguen en operación.

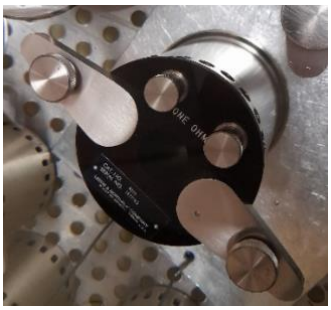

Figura XXIII. Resistor patrón tipo Thomas (Laboratorio de UTE).

3.3.2. Tensión continua. - En 1893, Edward Weston presentó una patente por una pila patrón electroquímica que generaba un voltaje muy estable de 1.0183 V a 20 °C (figura XXIV). Su diseño incluía un ánodo y un cátodo formado por amalgamas de cadmio y mercurio. La estructura de la pila consistía en una ampolla de vidrio con forma de H, con contactos eléctricos de platino ubicados en la base.

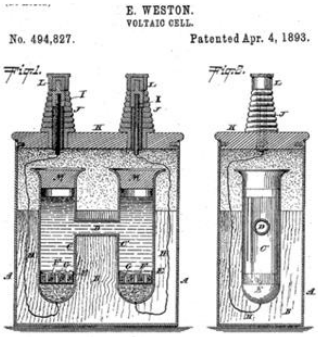

Figura XXIV. Pila patrón propuesta por Weston en 1893.

Estas pilas, si bien eran muy estables en el tiempo, tenían muy alta dependencia con la temperatura, eran muy afectadas por golpes o sacudidas, así como por el consumo de corriente. Aun así, los tres laboratorios antes mencionados poseían varios ejemplares, que estuvieron en uso hasta la década de 1980 (figura XXV).

Figura XXV. Pila patrón tipo Weston (Laboratorio de UTE).

3.3.3 Otras magnitudes. - Complementaban el equipamiento de medida, patrones de capacidad e inductancia (figura XXVI), así como diversos puentes de medida [25].

Figura XXVI. Patrón de capacidad de 1 μF (Laboratorio de UTE).

La Figura XXVII muestra un puente Schering de la marca Trüb-Täuber, todavía en servicio hacia fines del siglo XX. Fue diseñado para medidas de capacidad en alta tensión, a la frecuencia de la red, con un capacitor patrón, aislado en aire, de 100 kV (foto a la derecha).

Figura XXVII. Puente Schering de la marca Trüb-Täuber y capacitor patrón de alta tensión (Laboratorio de UTE).

En relación a la magnitud tiempo-frecuencia, una detallada descripción del desarrollo de patrones de frecuencia en Uruguay puede verse en [26]. A modo de resumen, los principales hitos fueron los siguientes. El Laboratorio de UTE, en la década de 1960, poseía un reloj patrón de péndulo (figura XXVIII). Su estabilidad era de unos 3 segundos por año. Estaba encerrado en un recipiente hermético, y un ajuste muy fino de su frecuencia se realizaba variando la presión interior del aire.

Figura XXVIII. Reloj patrón de péndulo Clemenes Riefler (Laboratorio de UTE).

En esa misma década, en FING se desarrolló un patrón de frecuencia electrónico basado en un cristal de cuarzo y tubos de vacío [27]. Su circuito principal se reproduce en la Figura XXIX.

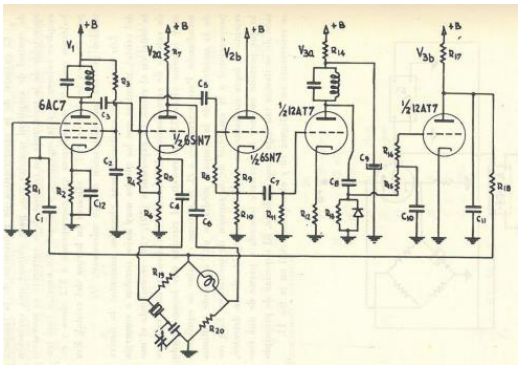

Figura XXIX. Patrón de frecuencia basado en un cristal de cuarzo y electrónica con tubos de vacío, desarrollado por FING en 1966 [27].

La estabilidad alcanzada fue del orden de 0.5 segundos por año. Este constituyó el inicio de desarrollos locales en esta área. Posteriores mejoras se lograron con desarrollos basados en relojes atómicos.

4. Sistemas de unidades. - Existen registros de unidades de medida ya en el antiguo Egipto. Sin embargo, el primer acuerdo internacional sobre este tema debió esperar hasta 1875. En ese año se firmó en Paris, por diecisiete estados,

la llamada Convención del Metro, con el fin de establecer una organización que garantizara la compatibilidad de las mediciones en todo el planeta. Así mismo, se definieron los patrones de masa y longitud, prototipos de los cuales fueron entregados a los países firmantes. Uruguay adhirió al tratado en 1908. Dentro de la estructura, se creó el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), con funciones de laboratorio en el cual se realizarían calibraciones, se mantendrían los patrones y se organizarían rondas de intercomparaciones. El gobierno francés donó el Pabellón de Breteuil para uso de esta organización (figura XXX), que se encontraba en situación ruinosa. Posteriormente fue remodelado y ampliado y es el actual lugar de funcionamiento de esta organización.

Figura XXX. Pabellón de Breteuil en 1875 (contribución de Luis Mussio, OIML)

Respecto a la incorporación de otras magnitudes, los sistemas de unidades incorporaron el tiempo, con lo cual se satisfacían los requerimientos de la mecánica. La discusión posterior se centró en cuál sería la magnitud a adicionar para contemplar el electromagnetismo. Había acuerdo en que alcanzaría una magnitud independiente adicional, pero siguieron complicadas discusiones sobre cuál debería ser la cuarta unidad. Ya en 1889, Sir Arthur William Rucker había propuesto incorporar, en lugar de una magnitud, una constante, la permeabilidad del vacío. Puede parecer raro que un sistema de unidades este basado en constantes universales, pero debe tenerse en cuenta que en conjunto con ecuaciones de leyes de la física es posible relacionar distintas magnitudes. Esta propuesta fue refrendada el Sub-Comité de Magnitudes y Unidades Eléctricas y Magnéticas de la Comisión Electrotécnica Internacional en 1930. Esto se derivó al Comité Consultivo de Electricidad del BIPM para que decidiera entre las unidades de coulomb, ampere, volt, ohm, farad, henry, weber. El Comité, en cambio, prefería la constante citada, pero dado que no figuraba en la lista, votó por el ohm.

Un detallado análisis de las distintas propuestas y resoluciones, así como su propia opinión, fueron publicados por Segismundo Gerszonowicz en 1939 y 1941 [28-29], dado que hasta esas fechas no se había decidido sobre este tema. Según cita textual decía: "*Esperamos que el Congreso Sudamericano de Ingeniería se unirá a nuestro punto de vista y pedirá a los organismos internacionales habilitados que se active la discusión del asunto en vista de su resolución definitiva*," lo que lamentablemente no ocurrió hasta 1960. En este año, la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas definió el sistema de unidades electromecánico formado por las magnitudes de longitud, masa, tiempo e intensidad, equivalente a las primeras propuestas de asignar un valor a la constante de permeabilidad magnética. Quedaban así también definido el volt, ohm y watt, como lo muestra la figura XXXI. Las unidades de capacidad e inductancia también quedaron definidas a partir de las cuatro básicas citadas.

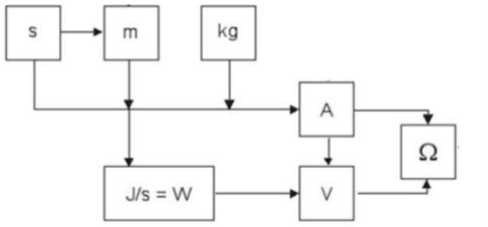

Figura XXXI. Sistema de unidades definido por el BIPM en 1960.

5. Conclusiones. - El desarrollo de la metrología eléctrica en Uruguay, desde comienzos del siglo XX hasta mediados del mismo muestra una evolución que acompañó al avance mundial. Comenzaron cursos universitarios sobre mediciones eléctricas, se crearon laboratorios, tanto en el ámbito universitarios como en el industrial. La Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República desempeñó un papel fundamental en la formación académica en esta disciplina, desde 1906. Figuras destacadas como el Ing. Segismundo Gerszonowicz lideraron investigaciones originales, publicando textos que alcanzaron reconocimiento internacional.

En paralelo, la empresa estatal UTE desarrolló un laboratorio que fue pionero en la implementación y uso de patrones eléctricos y aparatos de medida. Con la posterior creación del laboratorio LATU, se consolidó la estructura metrológica del Uruguay.

Esta primera etapa sentó las bases para el desarrollo posterior de la metrología eléctrica en Uruguay, que continuaría su evolución con la aparición de nuevas tecnologías, instrumentos digitales y su inserción en redes internacionales tales como el Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), lo cual será desarrollado en una segunda parte de este trabajo.

Referencias

[1] A. Guillermin, El mundo físico Montaner y Simon Editores, Barcelona, 1893.

[2] J. S. C. Schweigger, Nachricht von der neuesten galvanischen Entdeckung, Journal für Chemie und Physik, 1820, vol. 29: p. 1–17.

[3] J. Cumming, On the Connexion of Galvanism and Magnetism, Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1821, vol. 1, p. 269–279,

[4] W. Thomson, On the Electromotive Force of Voltaic Combinations, Proceedings of the Royal Society of London, 1856, vol. 8, p. 546–550.

[5] Anales de la universidad, Tomo XI, 1901, p. 699.

[6] S. Gerszonowicz, Historia de la enseñanza de la electrotécnica en la Facultad
de Ingeniería de Montevideo, Boletín de la Facultad de Ingeniería, 1940, vol. 5, no 9, p. 513-525, Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/revistas/198217.pdf.

[7] D. Slomovitz, Mediciones eléctricas, IEEE, 2004, CD ROM, ISBN 07803-8395-8.

[8] S. Gerszonowicz, Sobre la determinación directa y semidirecta de la resistencia crítica de los galvanómetros, Boletín de la Facultad de Ingeniería, 1938, p.453-459.

[9] S. Gerszonowicz, Estudio del retorno al cero de los galvanómetros, Boletín de la Facultad de Ingeniería y Ramas Anexas, FIRA, 1939, vol. 4, no 8, p. 460-471.

[10] D. Maggiolo de Gerszonowicz y S. Gerszonowicz, Expresión analítica aproximada de la curva Sq(R) del balístico y su aplicación a algunas medidas rápidas, Boletín de la Facultad de Ingeniería FIRA, 1940, vol. 5, no 9, p. 496-502. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/revistas/198738.pdf

[11] S. Gerszonowicz, Sobre la corrección debida a los efectos termoeléctricos en las medidas balísticas, Revista Electrotécnica, 1941, Buenos Aires.

[12] S. Gerszonowicz, Galvanómetro balístico. Fluxímetro, Publicaciones. Series Textos y complementos, Laboratorios, 1941, p.56.

[13] S. Gerszonowicz, Galvanómetro de resonancia, Publicación del Instituto de Electrotécnica, 1942, no 5, p. 45. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/bibliografias/200554.pdf

[14] S. Gerszonowicz, El aparato de cuerda como galvanómetro de resonancia, Serie II: Trabajos del Instituto de Electrotécnica, 1941.

[15] S. Gerszonowicz, Galvanómetros de cuerda y de bucle, Publicación del Instituto de Electrotécnica, 1942, no 7, p.22. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/bibliografias/200373.pdf

[16] S. Gerszonowicz, El aparato de cuerda como galvanómetro de resonancia, Revista Electrotécnica, 1943, Buenos Aires.

[17] S. Gerszonowicz, Electrodinamómetros, galvanómetros de inducción, de hierro, térmicos, Publicación del Instituto de Electrotécnica, 1943, no 8, p. 34. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/bibliografias/560249.pdf

[18] S. Gerszonowicz, Galvanómetros y oscilógrafos, Lit. e Imp. del Comercio, Montevideo, 1943. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/bibliografias/200377.pdf

[19] F. Harris, Electrical Measurements, Wiley, p. ix, 1952.

[20] C. Dawes, A course in electrical engineering, vol. II, Alternating currents, McGraw-Hill Book Company, 1946.

[21] S. Gerszonowicz, Los nuevos laboratorios del Instituto de Electrotécnica, Boletín de la Facultad de Ingeniería, 1939, vol. 4, no 7, p. 417-427, Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/revistas/198222.pdf

[22] A. Cisa, Los laboratorios del Instituto de Electrotécnica de la Facultad de Ingeniería y Ramas Anexas, Boletín de la Asociación Uruguaya para el Progreso de la Ciencia, 1953, vol. 2, no 3, p. 18-26. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/revistas/424537.pdf

[23] A. Waiter, Trayectoria tecnológica, aspectos económicos e institucionales: inicios de la generación de energía eléctrica en Uruguay, Revista uruguaya de historia económica, 2020, no 18, p. 36-51. Disponible en https://www.audhe.org.uy/publicaciones/index.php/RUHE/article/view/20/24

[24] Se inauguró el nuevo laboratorio, La revista de la UTE, 1938, no 15, p. 6-8. Disponible en https://archive.org/details/35-la-revista-de-la-ute-uruguay-abril-1938-n-15/page/5/mode/2up

[25] D. Maggiolo de Gerszonowicz, Sensibilidad del puente de Wheatstone, Boletín de la Facultad de Ingeniería, 1943, vol. 2, no 4, p. 293-309. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/revistas/198741.pdf

[26] L. Trigo, A. García, y D. Slomovitz, Desarrollo de patrones de tiempo y frecuencia en Uruguay, Memoria investig. ing. (Facultad Ing., Univ. Montev.), 2023, no 25, p. 72–89.

[27] R. P. Iribarren, V. Herrero, Desarrollo de un patrón de un patrón de frecuencia con oscilador de Meacham a cristal, en cámara termostática de precisión, Boletín de la facultad de Ingeniería y Agrimensura, Montevideo, 1966, vol. IX, no 27, p. 821-854.

[28] S. Gerszonowicz, Sobre la cuarta unidad fundamental en electrotécnica, Boletín de la Facultad de Ingeniería, 1939, vol. 4, no 7, p. 428-434 y vol. 5, no 9, p. 428-492. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/revistas/198221.pdf

[29] S. Gerszonowicz, Unidades eléctricas y fotométricas, Lit. e Imp. del Comercio, Montevideo, 1941. Disponible en https://www.fing.edu.uy/biblioteca/bibliografias/198229.pdf

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

DS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Gobertti.