

El Sistema Internacional de Unidades y las Mediciones Eléctricas

The International System of Units and the Electrical Measurements

Marcos E. Bierzychudek[†] y Héctor Laiz*

[†]Instituto Nacional de Tecnología Industrial y Universidad Nacional de Moreno

Av. General Paz 5445, San Martín, Bs. As. Argentina

marcosb@inti.gob.ar

*Instituto Nacional de Tecnología Industrial y Universidad Nacional de San Martín

Av. General Paz 5445, San Martín, Bs. As. Argentina

laiz@inti.gob.ar

Recibido: 12/05/19; Aceptado: 18/06/19

Abstract—We constantly use the results of measurements to trade, to take decisions, to reach compatibility between elements or to evaluate risks. The International System of Units (SI) is essential to express these results in a clear and comparable way. The SI is part of a diplomatic convention whose objective is to achieve international compatibility for trade, science, and sustainable development. Recently, a new definition of the SI has been approved, in which the system is defined in terms of seven reference constants whose numerical values are established by convention. In this way, the kilogram is disconnected from an artifact, the ampere from a theoretical experiment, and the kelvin and mole leave the definitions based on the property of a substance. Now, all the units of the system can be derived from the reference constants. The aim of this redefinition is to reach long-term stability, consistency, and coherence of the system, and to create a formal framework that fosters the growth of science and technology.

This article focuses on the effects of redefinition in electrical units.

Keywords: base units; International System of Units; measurements; metrology; reference constants.

Resumen—Constantemente utilizamos los resultados de medidas para comercializar, tomar decisiones, compatibilizar elementos o valorar riesgos. El Sistema Internacional de Unidades (SI) es imprescindible para expresar los resultados de manera clara y comparable. El SI es el resultado de una convención diplomática cuyo objetivo es lograr la compatibilidad internacional de las mediciones para el comercio, la ciencia y el desarrollo sustentable. Recientemente, se aprobó una nueva definición del SI, en la cual el sistema es definido en términos de siete constantes de referencia cuyo valor numérico es establecido por convención. De esta manera, se dejó de lado la definición del kilogramo basada en un artefacto, la definición del ampere basada en un experimento teórico, y la definición del kelvin y del mol basadas en propiedades de sustancias. Ahora, cualquier unidad del sistema puede ser derivada a partir de las constantes de referencia. Esta redefinición tiene como objetivo la estabilidad a largo plazo, la consistencia y la coherencia del sistema, adecuándose a las necesidades de los usuarios y brindado un marco formal para potenciar el crecimiento de la ciencia y la tecnología.

En este artículo, se dará especial atención a los efectos de la redefinición en las unidades eléctricas.

Palabras claves: constantes de referencia; mediciones; metrología; Sistema Internacional de Unidades; unidades de base.

I. INTRODUCCIÓN

A partir del 20 de mayo del 2019, el sistema Internacional de Unidades (SI) es definido con siete constantes de referencia, cuyos valores numéricos son fijos por convención. Ellas son: la frecuencia de la transición entre los niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133 ($\Delta\nu_{\text{Cs}}$), la velocidad de la luz en el vacío (c), la constante de Planck (h), la carga elemental (e), la constante de Boltzmann (k), la constante de Avogadro (N_{A}) y la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz (K_{cd}).

El SI basado en constantes de referencia permite que las definiciones de las unidades sean independientes de artefactos, sustancias o experimentos particulares. Además, las constantes son inherentemente estables, no dependen de parámetros externos, como la temperatura ambiental, y no tienen variación temporal. Por esta razón, las definiciones basadas en constantes de referencia no introducen un límite en la exactitud de la unidad, sino la tecnología disponible. Nuevos y alternativos métodos prácticos para mejorar la trazabilidad a cualquier unidad, múltiplo o submúltiplo podrán ser utilizados, en cualquier parte del mundo y sin la necesidad de modificar el SI.

La trazabilidad se garantiza estableciendo un enlace entre las definiciones y la implementación práctica. Dicho proceso se denomina realizar la unidad y permite establecer el valor de una magnitud de la misma naturaleza que la unidad de manera consistente con su definición. Pueden existir distintos métodos para la realización de las unidades, aquellos que lo logran independientemente de una magnitud de la misma naturaleza y con la menor incertidumbre son denominados patrones primarios [1].

La gran mayoría de los usuarios no notarán la discontinuidad en los valores de las magnitudes originada por el cambio de definición, y en aquellos casos que se afecta el valor de las unidades los efectos serán observables por los institutos que cuenten con los patrones de mayor jerarquía, por ejemplo los Institutos Nacionales de Metrología (INM).

II. UN SISTEMA BASADO EN CONSTANTES DE REFERENCIA

Las propiedades de los materiales, fenómenos o sustancias que pueden ser expresadas cuantitativamente son denominadas magnitudes y se expresan como el producto de un número y una referencia, la cual puede ser una unidad de medida, un material de referencia o un procedimiento de medida. En todos los casos, el número representa una relación entre la magnitud y la referencia, siendo ambas de la misma naturaleza. Entonces, se puede interpretar a la unidad como un caso particular de la magnitud, definida y adoptada por convenio [1].

Para definir una unidad se debe establecer un valor numérico fijo para la relación entre una magnitud, que se debe considerar invariante, y la unidad. Como ejemplo se puede analizar la definición previa del kilogramo, “El kilogramo es la masa del prototipo internacional del kilogramo” [2]. En la misma se estableció un valor numérico fijo de la relación igual a 1 y por convención se aceptó que la masa del prototipo internacional del kilogramo era “constante”. Esta es una consideración sin fundamentos científicos, y con carácter particular, local y temporal, ya que solo puede existir un kilogramo patrón disponible durante algunas campañas de medición, ver Fig. 1. Además, la definición previa involucra que toda la trazabilidad a unidades de masa o derivadas debía empezar en el valor de 1 kg, generando largas cadenas de trazabilidad. En cambio, con la definiciones basadas en constantes es posible lograr la trazabilidad directamente al valor de interés, en cualquier instituto del mundo y en cualquier momento.

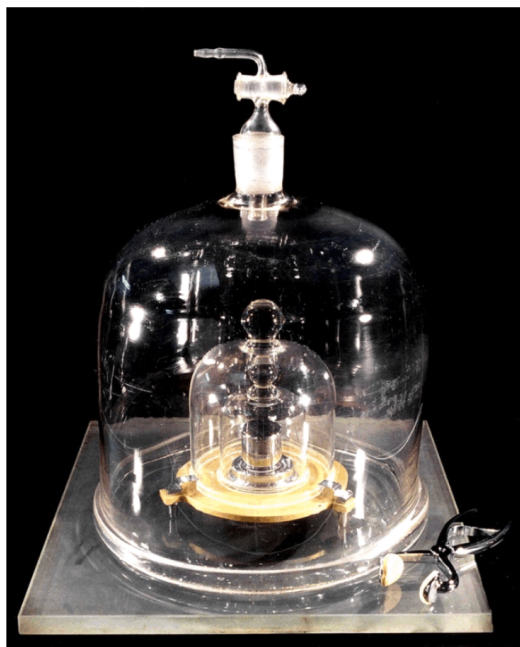


Fig. 1. Prototipo internacional del kilogramo que se conserva desde el año 1889 en el *Bureau International des Poids et Mesures* - BIPM. Es un cilindro con diámetro y altura de aproximadamente 39 mm, y de una aleación de 90% platino y 10% iridio. Foto cortesía del BIPM.

En el Sistema Internacional de Unidades aprobado en 2018 se especifica el valor numérico exacto de siete constantes de referencia cuando están expresadas en las correspondientes unidades del SI. Entonces, fijando el valor

numérico de cada constante queda definida la unidad ya que el producto de ambos es igual a la magnitud de la constante, que se considera invariante. Por ejemplo, al fijar el valor numérico de la constante h se fija la unidad J s, que es equivalente a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$.

Los valores numéricos de las constantes de referencia fueron determinados por el *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA), el cual recomienda cada cuatro años los valores numéricos para las constantes de la Física y la Química a partir de realizar un ajuste de cuadrados mínimos basado en los resultados de los experimentos con mejor incertidumbre. En el año 2017 se realizó un ajuste no periódico para determinar los valores numéricos de las constantes de referencia h , e , k y N_A a partir de los resultados publicados antes de julio de 2017, ver tabla I [3]. Los valores de las constantes c , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ y K_{cd} no fueron calculados porque se fijaron previamente. A partir de la redefinición, los valores de las constantes de referencia son parámetros fijos del ajuste realizado por CODATA y en consecuencia, otras constantes son calculadas.

TABLA I
VALORES DE LA CONSTANTE DE PLANCK, LA CARGA DEL ELECTRÓN, LA CONSTANTE DE BOLTZMAN Y DEL NÚMERO DE AVOGADRO INFORMADOS EN EL AJUSTE REALIZADO POR CODATA EN EL AÑO 2017.

Magnitud	Valor ajustado	Incertidumbre relativa del ajuste
h	$6,626\ 070\ 150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$1,0 \times 10^{-8}$
e	$1,602\ 176\ 634\ 1(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	$5,2 \times 10^{-9}$
k	$1,380\ 649\ 03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$3,7 \times 10^{-7}$
N_A	$6,022\ 140\ 758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$1,0 \times 10^{-8}$

A. El sistema Internacional de Unidades

A partir del 20 de mayo de 2019 el Sistema Internacional de Unidades se define como el sistema de unidades para el cual:

- la frecuencia de la transición entre los niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, es $9\ 192\ 631\ 770 \text{ Hz}$,
- la velocidad de la luz en el vacío, c , es $299\ 792\ 458 \text{ m/s}$,
- la constante de Planck, h , es $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ J s}$,
- la carga elemental, e , es $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ C}$,
- la constante de Boltzmann, k , es $1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,
- la constante de Avogadro, N_A , es $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$,
- la eficacia luminosa de una radiación monocromática de frecuencia $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$, K_{cd} , es 683 lm/W ,

donde, el hertz (Hz), joule (J), coulomb (C), lumen (lm) y watt (W) son definidos en términos de las unidades segundo (s), metro (m), kilogramo (kg), ampere (A), kelvin (K), mol (mol) y candela (cd), de acuerdo con $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, y $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$.

Notar que las incertidumbres presentadas en la tabla I no son consideradas ya que los valores numéricos se consideran exactos.

B. Las unidades de base

Las definición del SI basada en constantes de referencia permite que cualquier unidad del sistema pueda ser obtenida como el producto de potencias de las constantes de referencia y un factor adimensional. Esta es una gran ventaja del sistema actual que se obtuvo al desconectar las definiciones de las unidades de su realización. Por lo tanto, no es necesario establecer un conjunto de unidades de base, sin embargo se mantienen con el objetivo de facilitar la comprensión y la transición entre sistemas. La Fig. 2 representa esta ventaja ubicando a las constantes cerca del centro y a las unidades de base en el exterior.



Fig. 2. Logotipo representativo del SI aprobado en 2018, se pueden observar en el círculo interior las constantes de referencia que sirven como pilares para las unidades de base indicadas en el exterior.

Las definiciones de las siete unidades de base son expresadas uniformemente utilizando una formulación en la cual se refiere directamente al valor numérico de la constante de la cual depende.

- El segundo, cuyo símbolo es s, es la unidad de tiempo del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la frecuencia del cesio, $\Delta\nu_{Cs}$, la frecuencia de la transición entre niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, igual a 9 192 631 770 cuando es expresada en unidad de Hz, que es igual a s^{-1} .
- El metro, cuyo símbolo es m, es la unidad de longitud del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la velocidad de la luz en el vacío, c , igual a 299 792 458 cuando es expresada en unidades de $m s^{-1}$, donde el segundo es definido en términos de $\Delta\nu_{Cs}$.
- El kilogramo, cuyo símbolo es kg, es la unidad de masa del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la constante de Planck, h , igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ cuando es expresada en unidades de J s, que es igual a $kg m^2 s^{-1}$, donde el metro y el segundo son definidos en términos de c y $\Delta\nu_{Cs}$.
- El ampere, cuyo símbolo es A, es la unidad de corriente eléctrica del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la carga elemental, e , igual

a $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ cuando es expresada en unidades de A s, donde el segundo es definido en términos de $\Delta\nu_{Cs}$.

- El kelvin, cuyo símbolo es K, es la unidad de temperatura termodinámica del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la constante de Boltzmann, k , igual a $1,380\,649 \times 10^{-23}$ cuando es expresada en unidades de $J K^{-1}$, que es igual a $kg m^2 s^{-2} K^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo son definidos en términos de h , c y $\Delta\nu_{Cs}$.
- El mol, cuyo símbolo es mol, es la unidad de cantidad de sustancia (o materia) del SI. Un mol contiene exactamente $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entidades elementales. Este número es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro, N_A , cuando es expresada en unidades de mol^{-1} y es llamado el número de Avogadro. La cantidad de sustancia, símbolo n, de un sistema es una medida del número de entidades elementales especificadas. Una entidad elemental puede ser un átomo, una molécula, un ion, un electrón, o cualquier otra partícula o grupo específico de partículas.
- La candela, cuyo símbolo es cd, es la unidad de intensidad luminosa del SI en una dada dirección. Se la define estableciendo el valor numérico fijo de la eficacia luminosa de una radiación monocromática con frecuencia 540×10^{12} Hz, K_{cd} , igual a 683, cuando es expresada en las unidades $lm W^{-1}$, que son equivalentes a $cd sr W^{-1}$, o $cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3$, donde el kilogramo, el metro y el segundo son definidos en términos de h , c y $\Delta\nu_{Cs}$.¹

III. RAZONES Y EFECTOS DE LA REDEFINICIÓN

La comunidad internacional científica dedicó muchos recursos y tiempo al establecimiento de las definiciones y al desarrollo de los métodos de realización. La redefinición se retrasó hasta poder garantizar niveles de incertidumbre comparables con los obtenidos mediante las realizaciones previas. Para la gran mayoría de las aplicaciones este cambio pasará inadvertido y en aquellos casos donde se deben aplicar correcciones en los valores o modificaciones en los métodos, será solo apreciable por los usuarios que demandan menores incertidumbres. Los efectos pueden analizarse por área de trabajo que depende de una unidad de base redefinida, primero se explicará los efectos de la redefinición del ampere y luego se presentan los casos del kelvin, el mol y el kilogramo.

A. El ampere

En el año 1948 se adoptó una definición del ampere basada en un experimento teórico cuyo objetivo fue relacionar las unidades eléctricas con las unidades mecánicas. La Fig. 3 presenta un esquema de dicho experimento que es explicado con la propia definición de 1948 de la unidad ampere.

El ampere es la corriente eléctrica constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular

¹El símbolo lm corresponde al lumen, que es la unidad de flujo luminoso del SI, y el símbolo sr corresponde al estereorradián, que es la unidad de ángulo sólido.

despreciable y ubicados a una distancia de 1 m entre si, en el vacío, produciría entre ellos, por unidad de longitud de conductor, una fuerza de 2×10^{-7} newton [2].

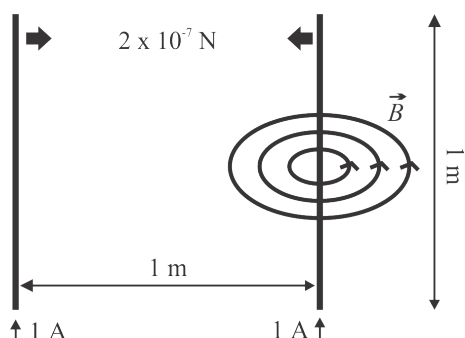


Fig. 3. Esquema del experimento teórico aprobado en 1948 para definir la unidad ampere. \vec{B} es el campo magnético generado por el cable.

El objetivo de esta definición fue establecer un valor para las unidades eléctricas e implicó que la constante magnética, también denominada permeabilidad magnética del vacío, tenga un valor numérico fijo [4], [5]. Sin embargo, la definición no especificaba una puesta en práctica dada para el ampere, sino que se podía realizar vinculando las unidades eléctricas y mecánicas mediante las leyes del electromagnetismo [6]. En aquellos tiempos, para poner en práctica las unidades eléctricas se necesitaba enlazar al menos dos de ellas a las unidades mecánicas, típicamente se utilizaban patrones de tensión y de resistencia para luego derivar cualquier otra unidad, por ejemplo el ampere se podía obtener a partir de la ley de Ohm. La unidad de tensión eléctrica se realizaba con la balanza del volt electrostática y se mantenía con pilas patrones de Weston, ver Fig. 4. Mediante estos métodos el acuerdo entre los distintos países estaba en el orden de $1 \mu\text{V}/\text{V}$ [7].



Fig. 4. Se presenta una pila de Weston y una referencia de tensión basada en un diodo zener. La primera era utilizada antiguamente para mantener la unidad de tensión eléctrica. Posee gran estabilidad a largo plazo pero son muy sensibles a la temperatura y su resistencia de salida es del orden de 500Ω . La referencia de tensión fotografiada es la LM399 de Linear Technology (ahora Analog Device). La misma posee un control de temperatura interno que resulta en un coeficiente de temperatura de $0,5 \mu\text{V}/\text{K}$. Son muy utilizadas para instrumentos de hasta 6,5 dígitos. En el fondo se muestra un patrón secundario de tensión basado en un diodo zener.

El ohm se solía obtener mediante un puente de cuadratura

[8], que permite comparar capacidad con resistencia, y a partir del farad realizado con un capacitor calculable. Este método se basa en el teorema de Thompson-Lampard por el cual es posible determinar la capacidad de una geometría determinada a partir de una medición de longitud [9]. La unidad de resistencia se mantenía con resistores bobinados de manganina, cuya exactitud era mejor a $1 \mu\Omega/\Omega$ cuando estaban térmicamente estabilizados.

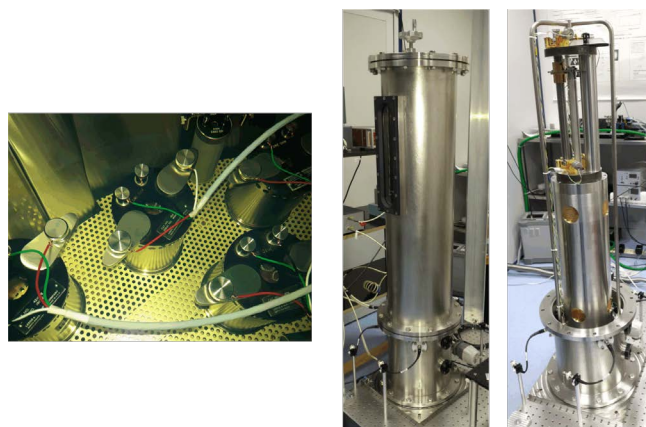


Fig. 5. (Izquierda) Resistores patrones del INTI de 1Ω tipo Thomas, modelo 4210 marca Leeds & Northrup, sumergido en un baño de aceite térmicamente controlado. En el INTI se posee 6 elementos de este tipo que con más de 30 años de historia y han demostrado una estabilidad en el orden de $0,1 \mu\Omega/\Omega$. (Derecha) Capacitor calculable del BIPM, se pueden observar las barras donde se aplica el teorema de Thompson-Lampard. Foto cortesía del BIPM.

Es interesante notar que la unidad de base ampere nunca fue en realidad el centro de las unidades eléctricas, ya que los patrones secundarios de tensión y resistencia siempre fueron superiores a sus equivalentes de corriente. Este esquema se observa también en la actualidad, por ejemplo las referencias de tensión de estado sólido poseen mejores características que las de corriente. Además, los métodos para materializar el volt y el ohm han evolucionado mucho y ofrecen insuperables características.

En el año 1962 Brian D. Josephson predijo un efecto que luego llevaría su nombre y por el cual se puede relacionar la tensión eléctrica con una frecuencia a través de la constante de Planck y de la carga del electrón [10]. Esto permitió reducir en tres ordenes de magnitud las diferencias entre las representaciones nacionales de tensión continua [7]. La física cuántica brindó un nuevo efecto fundamental en el año 1980, cuando Klaus von Klitzing logró observar por primera vez el efecto Hall cuántico, mediante el cual se establece un valor de resistencia que depende de las constantes h y e [11]. En aquellos años, estas constantes eran determinadas en relación al SI por CODATA con incertidumbres superiores a la repetibilidad de los efectos. Entonces, en el año 1990, el CIPM (*Comité International des Poids et Mesures*) adoptó valores numéricos fijos para las constantes de Josephson ($K_{J-90} = 2e_{90}/h_{90} = 483\,597,9 \text{ GHz}/\text{V}$) y de von Klitzing ($R_{K-90} = h_{90}/e_{90}^2 = 25\,812,807 \Omega$) [12]. De esta manera, las unidades eléctricas fueron referidas a estas constantes en lugar de utilizar las constantes h y e derivadas del SI.

Estos efectos han demostrado una excelente robustez y han sido utilizados para el mantenimiento de las unidades

eléctricas durante más de 20 años, logrando acuerdos entre los distintos INM con nueve dígitos de exactitud. Sin embargo, si se relacionan las unidades eléctricas con otras unidades del SI se debe tener en cuenta la incertidumbre de las constantes, que en el año 1990 era de $0,6 \times 10^{-6}$ para K_J y $0,045 \times 10^{-6}$ para R_K . En el último ajuste realizado por CODATA la incertidumbre en la determinación de ambas constantes se redujo a $6,1 \times 10^{-9}$ y a $2,3 \times 10^{-10}$, respectivamente [13]. Esta reducción de la incertidumbre se debe a las mejoras en las técnicas de medición, que también determinan una diferencia en sus valores respecto a los fijados en 1990, resultando en la pérdida de consistencia del sistema de unidades. La redefinición aprobada en 2018 fija el valor numérico de las constantes h y e , eliminando la inconsistencia entre las unidades eléctricas y mecánicas, y produciendo un corrimiento en las constantes, ver tabla II. Estas variaciones se propagan a los resultados de medición, siendo apreciable solo en los patrones de mayor exactitud. Dicho cambio será observado en la historia de vida del patrón como una discontinuidad, que en la mayoría de los casos se encuentra dentro de la incertidumbre de trabajo. La Fig. 6 presenta esquemáticamente la evolución temporal de la definición de la unidad ampere, primero se refería a μ_0 , luego se basó en R_{K-90} y K_{J-90} , y ahora se reunifica la práctica y la definición utilizando h y e . En esta nueva etapa, las constantes eléctricas y magnéticas serán determinadas mediante el ajuste, lo cual no debe inducir a interpretar que son propiedades físicas del vacío [14], [15].

TABLA II
COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE LA CONSTANTE DE JOSEPHSON Y DE VON KLITZING. LOS VALORES ADOPTADOS EN 1990 SON REPRESENTADOS CON EL AÑO EN EL SUBÍNDICE.

Constante de Josephson	
$K_{J-90} = 2e_{90}/h_{90} = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$	
$K_J = 2e/h = 483\,597,848 \text{ GHz/V}$	
Diferencia relativa $106,67 \times 10^{-9}$	
Constante de von Klitzing	
$R_{K-90} = h_{90}/e_{90}^2 = 25\,812,807 \Omega$	
$R_K = h/e^2 = 25\,812,8075 \Omega$	
Diferencia relativa $-17,79 \times 10^{-9}$	

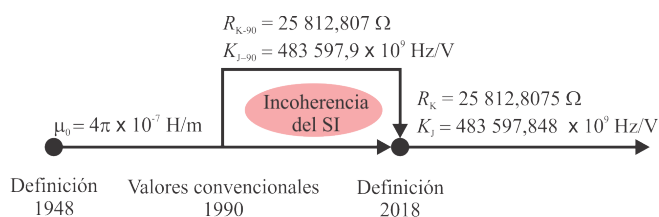


Fig. 6. Historia de la definición de la unidad ampere en el SI. En 1990 se habilitó el uso de una reproducción paralela, fuera del SI, con menor incertidumbre que la definición al introducir el uso del efecto Josephson y Hall cuántico. Al mismo tiempo, se generó una diferencia entre la forma de materializar el ampere y su definición del SI. En el año 2019 el ampere vuelve a ser integrado al sistema de unidades.

1) *Realización del ampere:* Con la nueva definición, el ampere puede ser realizado a partir de tres caminos [16], como representa la Fig. 7. El primero, y más representativo de la definición, es mediante un experimento que permite la manipulación de cargas elementales, como electrones, a través de una juntura en un determinado intervalo de

tiempo, expresado en segundos (s). Por lo tanto, se puede determinar la corriente como la cantidad de carga, expresada en coulomb (C), por unidad de tiempo, $A = C/s$. Este experimento se denomina *Single Electron Tunneling* (SET) y es una técnica por la cual es posible manipular electrones individualmente. Se basa en el bloqueo de Coulomb que se da en junturas túnel de pequeña capacidad. Aplicando una tensión de polarización se induce el paso de electrones a través de la juntura, cada electrón aumentará la tensión de la juntura hasta llegar al punto donde ésta sea lo suficientemente alta para suprimir futuras transiciones (transmisión cero). Hasta ahora, se han logrado valores de corriente máximos en el orden de 150 pA con incertidumbres de 1×10^{-6} , lo cual es un valor muy bajo de corriente y alejado de las necesidades prácticas [5].

El ampere también podrá ser realizado aplicando la ley de Ohm, $A = V/\Omega$, y utilizando el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico. El tercer camino es a partir de la unidad de capacidad el farad (F) que se realiza utilizando un capacitor calculable. En este caso, se aplica una rampa de tensión a un capacitor generando una corriente constante durante un intervalo de tiempo, entonces $A = F \text{ V/s}$.

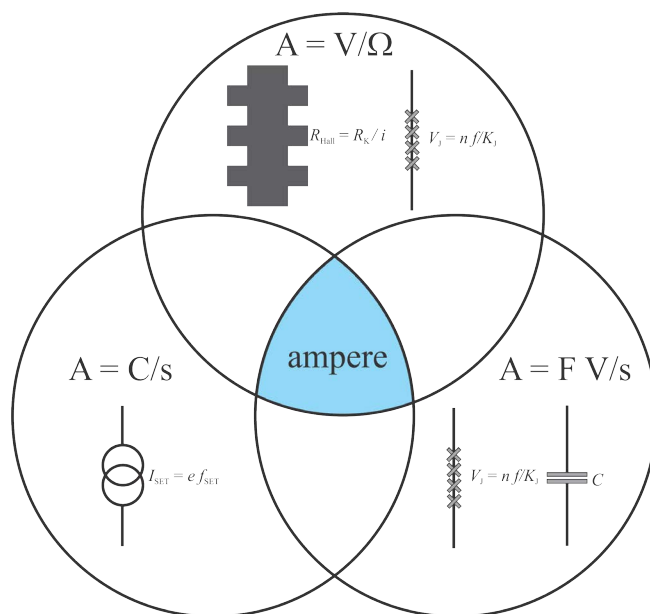


Fig. 7. Luego del 20 de mayo de 2019, el ampere puede ser realizado a través de tres principios. A partir de la manipulación de cargas individuales, con el efecto Hall cuántico y el efecto Josephson, y con el efecto Josephson y con un capacitor calculable.

2) *Los efectos de la redefinición en mediciones eléctricas:* Es interesante analizar los efectos de la redefinición en los servicios de calibración de patrones de tensión eléctrica basados en referencias de estado sólido. Los patrones de mayor exactitud se basan en elementos comerciales, por ejemplo el diodo LTZ1000 de Linear Technology (ahora Analog Device), que posee muy bajo ruido, buena estabilidad y muy baja deriva con la temperatura. Este elemento, o similares, son utilizados en multímetros o calibradores y por tal motivo se llega a una exactitud en mediciones directas mayor a $1 \mu\text{V}$ para tensiones entre 1 V y 10 V, y a un año desde la fecha de calibración. Un técnico especializado podría reducir esta incertidumbre con una correcta

caracterización del instrumento y condiciones ambientales estrictas. La Fig. 8 muestra como ejemplo la historia de un multímetro de alta exactitud. El efecto Josephson permite alcanzar incertidumbres en el orden de 1 nV/V [17]. Por lo tanto, la trazabilidad del volt se encuentra limitada por las referencias de estado sólido, con una incertidumbre en torno a $0,15 \text{ } \mu\text{V}$ [18] y entonces, los cambios producidos por la redefinición están contenidos en la incertidumbre de medición. Luego del 20 de mayo de 2019 este cambio deberá ser considerado al calibrar y usar los patrones basados en referencias de estado sólido, y deberá quedar registrado en su historia de vida.

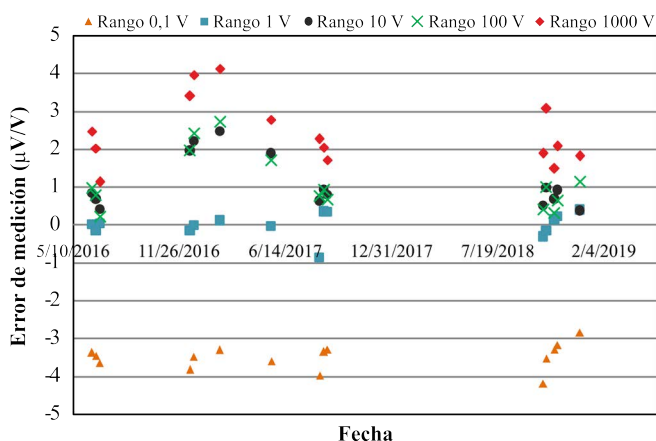


Fig. 8. Historia de la calibración de un multímetro Wavetek 1281 en puntos cercanos al fondo de rango e invirtiendo la polaridad para eliminar las tensiones termoeléctricas, la incertidumbre de calibración se encuentra entre 1 y $3,4 \text{ } \mu\text{V/V}$. La incertidumbre en la medición de tensión especificada por el fabricante en todos los rangos y a un año se encuentra entre 6 y $10 \text{ } \mu\text{V/V}$ para una lectura igual al fondo de rango. El multímetro mejora la especificación dada por el fabricante.

Por otro lado, los resistores patrones suelen tener una excelente estabilidad y bajo coeficiente de temperatura. Incluso los elementos comerciales especifican coeficiente de temperatura de $0,05 \text{ } \mu\Omega/\text{K}$ y estabilidad a largo plazo menor a $2 \text{ } \mu\Omega/\Omega$ en seis años [19]. Su calibración en INTI se logra en el mejor caso con una incertidumbre de 80×10^{-9} midiendo un resistor de $10 \text{ k}\Omega$ con el efecto Hall cuántico. Esta incertidumbre es mayor que la corrección en el valor de la constante de von Klitzing y por lo tanto la redefinición no provocará ninguna alteración en los servicios. Otros servicios que informan resultados con la unidad Ω no serán afectados debido a que su incertidumbre es mucho mayor, por ejemplo los multímetros de alta exactitud poseen para la medición de resistencia, en el mejor caso, una incertidumbre de $1 \text{ } \mu\Omega/\Omega$ a 24 horas. Si se considera un año desde la fecha de calibración la incertidumbre puede llegar a $10 \text{ } \mu\Omega/\Omega$.

Las incertidumbres de trabajo de otras unidades eléctricas, como el watt, el farad o el henry son mayores que las ya comentadas y por lo tanto la redefinición no generará un efecto apreciable.

B. Los efectos de la redefinición del kelvin, el mol y el kilogramo

La unidad de temperatura termodinámica, el kelvin, es definida a partir de la constante de Boltzmann, sustituyendo a la definición basada en la temperatura del punto triple del agua e independizando la definición de la propiedad de una

sustancia en particular. El método más exacto disponible hasta el momento es el termómetro acústico de gas, en el cual la temperatura se determina a partir de la velocidad del sonido en un gas. Sin embargo, la comunidad internacional mantiene la utilización de la escala internacional de temperatura implementada en 1990 (ITS-90) para la calibración de termómetros patrones, permitiendo una continuidad de las prácticas e incertidumbre. Los puntos fijos establecidos en la escala internacional fueron evaluados mediante distintos tipos de termómetros primarios y los resultados presentaron diferencias aceptables. A partir del cambio, la temperatura del punto triple del agua pasa a tener una incertidumbre de $0,37 \times 10^{-6}$ [20], [21] y deja de tener un lugar central en la cadena de trazabilidad. La nueva definición permite obtener trazabilidad directa en cualquier punto de la escala, beneficiando principalmente a las mediciones realizadas en sus extremos.

Una situación similar se produce en el área de la Metrología Química, en la cual se mantienen los métodos tradicionales para la realización del mol y por lo tanto las prácticas no serán afectadas [22]. En la definición anterior, el mol era derivado del kilogramo a partir de la masa del carbono 12. Esta dependencia se rompe con la definición basada en la constante de Avogadro, independizando la unidad de cantidad de sustancia (el mol) de la de masa (el kilogramo) y de una sustancia en particular. Se debe tener en cuenta que con la masa molar del carbono 12 deja de tener un valor fijo y pasa a ser $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$ ($4,5 \times 10^{-10}$).

Una de las áreas con mayor impacto es la metrología de masas. La nueva definición del kilogramo implica que la unidad ya no es materializada mediante el prototipo internacional del kilogramo [23]. En su lugar, el kilogramo es realizado con la máxima exactitud en términos de la constante de Planck mediante dos técnicas, la balanza de Kibble y el método XRCD (*X Ray Crystallography Diffraction*, Cristalografía por difracción de rayos X). Las incertidumbres que alcanzan estos métodos cumplen con los requerimientos de la clase E1 de patrones de masa, definida por la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) [24].

El método XRCD busca relacionar la masa de una esfera de silicio 28, ver foto 9, muy bien pulida y caracterizada, con la cantidad de átomos que hay en ella y la masa del átomo de ^{28}Si . La cantidad de átomos se obtiene como

$$N = \frac{8V_S}{a^{(28}\text{Si})^3}, \quad (1)$$

donde V_S es el volumen de la esfera, $a^{(28}\text{Si})^3$ es el volumen de una celda unitaria del átomo de silicio 28 y $a^{(28}\text{Si})$ es el parámetro de red que se determina utilizando el método XRCD. El número 8 corresponde a la cantidad de átomos en cada celda.

La masa del átomo, m_a , expresada en kg se puede determinar a partir de la relación entre ella y la constante de Planck, h/m_a , que se conoce con gran exactitud.

En la balanza de Kibble, ver foto 10, se relaciona potencia virtual mecánica con potencia virtual electromagnética, por eso se la suele denominar balanza de watt. Entonces, la unidad de masa se determina a partir de la aceleración de la gravedad, la velocidad con la cual se mueve la masa y la



Fig. 9. Esfera de silicio producida por el instituto PTB - Alemania a partir de un cristal con pureza isotópica de 99,998 %. Foto cortesía del PTB.

potencia electromagnética virtual. Cada uno de estos valores son medidos, el primero mediante un gravímetro absoluto, el segundo por técnicas interferométricas y la potencia electromagnética se determina a partir de la constante de Planck mediante los efectos Josephson y Hall cuántico.



Fig. 10. Foto de la balanza de Kibble del National Research Council de Canadá (NRC) mediante la cual se logró determinar con gran exactitud el valor de h . Foto cortesía del NRC.

El experimento se realiza en dos etapas como muestra la Fig. 11, (a) la estática y (b) la dinámica. En la primera, el peso de la masa bajo medición mg se compara con una fuerza de Lorentz que actúa sobre una bobina de longitud L por donde circula una corriente I , se obtiene

$$mg = IBL, \quad (2)$$

donde B es el campo magnético concatenado por la bobina y g es el valor de la aceleración debido a la fuerza de gravedad en el lugar de la medición. En la segunda parte del experimento la masa es retirada y se desplaza la bobina a velocidad constante v en la dirección vertical y a través del campo magnético. De esta manera se induce una diferencia de potencial U en la bobina según la ley de Faraday. Entonces,

$$U = BLv \quad (3)$$

Se puede asumir que BL es constante entre las dos mediciones, entonces se puede eliminar y se obtiene

$$UI = mgv. \quad (4)$$

En ambos lados de la ecuación se obtiene una magnitud que se puede expresar en unidades de watt, desde unidades (izquierda) eléctricas y (derecha) mecánicas. Si se reemplaza la tensión y la corriente en términos del efecto Hall cuántico y del efecto Josephson, se obtiene una relación entre la masa y la constante de Planck,

$$m = C \frac{f_J f'_J}{gv} h, \quad (5)$$

donde C es una constante de calibración, y f_J y f'_J son las frecuencias de Josephson al medir la tensión y la corriente.

Con el tiempo, otros métodos podrán ser desarrollados para brindar la trazabilidad a la unidad de masa. Por ejemplo, las balanzas basadas en la fuerza electrostática podrían ser utilizadas para brindar trazabilidad a masas con valores menores a 1 kg, reduciendo la incertidumbre y la cadena de trazabilidad [25].

Por último, se debe considerar que los cambios detallados se propagan a las unidades derivadas, como puede ser flujo gaseoso, fuerza o presión sonora. Sin embargo, las incertidumbres típicas de trabajo en estas áreas son superiores y por lo tanto no se notarán los efectos.

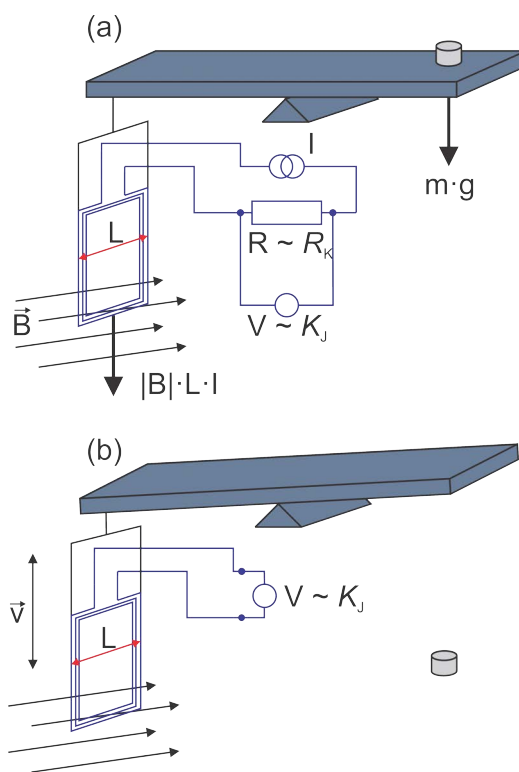


Fig. 11. Descripción gráfica del experimento de la balanza de Kibble. (a) Etapa estática. (b) Etapa dinámica.

IV. CONCLUSIÓN

El Sistema Internacional de Unidades se renueva periódicamente integrando las mejoras de la ciencia y la tecnología. Desde el 20 de mayo del año 2019, el SI es definido a partir de constantes de referencia, logrando una estabilidad a largo plazo sin precedentes y brindando el marco formal para el crecimiento de la ciencia y la tecnología. Con

el nuevo SI, la realización de las unidades no está limitada a determinadas sustancias, artefactos o valores. Esto permite el desarrollo de nuevos patrones para cualquier unidad, reduciendo la cadena de trazabilidad y obteniendo menores incertidumbres.

Para las mediciones eléctricas, esta redefinición significa un retorno a la coherencia con el resto de las unidades del SI y un reconocimiento a los avances realizados en la realización del volt y del ohm. Los cambios en el valor de las unidades serán observables solo por los laboratorios que poseen los sistema de medición más exactos.

APÉNDICE A
EL EFECTO JOSEPHSON

Una juntura Josephson esta conformada por dos materiales superconductores separados por una unión débil, por ejemplo un material aislante o un metal normal. El estado superconductor se logra enfriado al material a una temperatura menor a su temperatura crítica, que para el caso de junturas Josephson suele ser 9 K. Si además se la expone a radiación electromagnética de frecuencia f , su curva de corriente-tensión presenta escalones cuantizados denominados escalones de Shapiro en honor a quien los observó por primera vez [26], ver Fig. 12. El valor de estos escalones está dado por la ecuación

$$V_n = n \frac{h}{2e} f = n \frac{1}{K_J} f, \quad (6)$$

donde n es un número entero que representa al escalón. La separación entre los escalones es la frecuencia experimental dividida la constante de Josephson, por ejemplo para $f = 70$ GHz la diferencia es igual a $145 \mu\text{V}$.

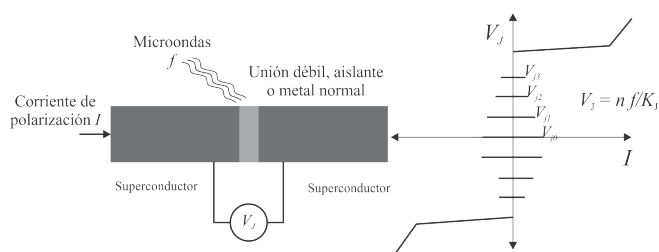


Fig. 12. (Izquierda) Se presenta un esquema de la juntura Josephson. (Derecha) Curva corriente-tensión de la juntura, se pueden observar que los escalones están solapados debido a su histéresis.

Una sola juntura puede brindar tensiones menores a 10 mV. Para lograr tensiones mayores (entre ± 10 V) los patrones de tensión Josephson utilizan un conjunto de junturas conectadas en serie. Este intervalo permite calibrar cualquier referencia de tensión del mercado, y multímetros y generadores en los rangos de tensión que presentan mejores exactitudes.

El sistema de medición está constituido por una sonda criogénica con una guía de onda y un blindaje magnético donde se coloca el arreglo de junturas. La sonda se sumerge en helio líquido a 4,2 K contenido en un crióstato. La radiación de microondas se genera con un diodo Gunn ubicado en el extremo “caliente” de la sonda. Este dispositivo puede generar radiación de microondas con frecuencia controlable con la tensión continua de alimentación. La frecuencia de microondas, típicamente 70 GHz, es medida por un contador

mediante un acoplador direccional y un sensor. Se configura al contador con una base de tiempo externa, por ejemplo un reloj atómico de cesio, para brindar trazabilidad a la medición. La lectura del contador se utiliza para cerrar un lazo de realimentación manejando la fuente de alimentación del diodo Gunn y controlando su estabilidad en el orden de 1 nHz/Hz. Luego del acoplador direccional se coloca un atenuador para regular la cantidad de energía que recibe el arreglo.

El patrón de tensión a calibrar es conectado en paralelo al arreglo Josephson mediante una caja de inversión de bajo potencial termoelectrico y la diferencia de potencial entre ellos se mide con un detector de cero. Entonces, conociendo el número de escalón, la frecuencia de radiación y la lectura del detector de cero se obtiene el valor de la incógnita [18]. Si bien la tensión generada por el efecto Josephson se considera sin incertidumbre, el sistema introduce una incertidumbre en el orden de 1 nV/V debido principalmente a las resistencias de aislación, a la frecuencia de radiación, y a los errores de offset y ganancia del detector. Si además se considera la estabilidad a corto plazo del patrón de tensión bajo calibración, la incertidumbre de su calibración puede aumentar hasta 100 veces.



Fig. 13. Sistema del efecto Josephson del INTI. A la izquierda de la foto se pueden observar los patrones de tensión de estado sólido. En la parte superior de los estantes se encuentra el nanovoltímetro y el frecuencímetro, luego se observa el instrumental de apoyo y más abajo la fuente de polarización y la caja de conexiones. En el crióstato se puede observar la sonda criogénica, empieza por el diodo Gunn, el acoplador direccional y el atenuador de microondas.

Otra aplicación muy importante de los sistemas Josephson es la caracterización de convertidores analógicos digitales y de multímetros de alta exactitud. En este caso, el medidor se conecta directamente a los bornes de tensión del sistema. Un ejemplo sobresaliente es la determinación de la linealidad del medidor, se mide una serie de puntos equidistantes que cubren todo el rango bajo estudio y se realiza un ajuste, el residuo obtenido indica la linealidad del dispositivo. Esta aplicación es clave para el desarrollo de los multímetros de alta exactitud modernos [27], [28].

El sistema descrito es utilizable solo en tensión continua ya que para una misma condición de uso se pueden obtener distintos escalones, los cuales se encuentra solapados en la curva de la Fig. 12. Por lo tanto, no es posible seleccionar unívocamente una tensión determinada controlando la corriente de la juntura. Esta limitación fue superada a partir

de las mejoras en las técnicas y materiales de fabricación que permitieron realizar dispositivos con juntas sin histéresis. Se logró mediante un elemento resistivo en paralelo a la junta que se realiza incluyendo material normal dentro de la misma, los casos más utilizados son Superconductor–Metal normal–Superconductor (SNS) o Superconductor–Aislante–Metal normal–Aislante–Superconductor (SINIS). Con estos dispositivos se desarrollaron dos tipos de sistemas que son utilizados para calibraciones en corriente alterna, el sistema Josephson programable (PJVS) y el sistema Josephson pulsado (ACJVS).

El PJVS es un convertidor digital-analógico que puede generar tensiones continuas o formas de ondas arbitrarias, ver Fig. 14. El valor de tensión de cada nivel del convertidor es definido a partir de la ecuación de Josephson, permitiendo caracterizar los parámetros dinámicos de los multímetros y convertidores analógicos-digitales, y mejorar la trazabilidad en las mediciones en corriente alterna. A diferencia de lo presentado en la Fig. 12, estas juntas no presentan escalones solapados, permitiendo una automatización completa mediante 'n' fuentes de corrientes. Cada una polariza un dado grupo binario de juntas conectadas en serie y selecciona el escalón 0, +1 o -1, entonces cada segmento puede tomar el valor de tensión $(-1, 0 \text{ o } 1)f/K_J$. Conectando todos los grupos en serie y controlando sus estados independientemente se obtiene un convertidor de n-bits. La Fig. 15 muestra un escalón de tensión medido con un multímetro de alta exactitud. Las transiciones entre cada escalón son realizadas en un tiempo finito y su valor de tensión no depende de las constantes universales, por lo tanto la aplicación de este sistema en AC se encuentra limitada [29]–[31].

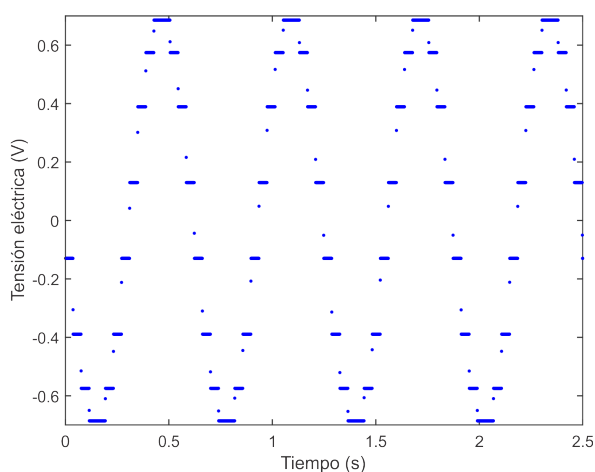


Fig. 14. Forma de onda de baja frecuencia generada con el efecto Josephson programable del INTI. El sistema de adquisición posee un filtro interno para mejorar su resolución y que genera un transitorio en la medición. La tensión generada por el PJVS posee un tiempo de crecimiento aproximado de 100 ns.

El sistema Josephson pulsado permite sintetizar con exactitud cuántica formas de onda arbitrarias hasta 1 MHz, incluyendo señales senoidales con alta pureza espectral. Estos sistemas pueden ser utilizados para brindar trazabilidad a tensión alterna, caracterizar componentes electrónicos o instrumentos y para construir puentes de impedancia de alta exactitud. Además, esta técnica permite generar una señal de

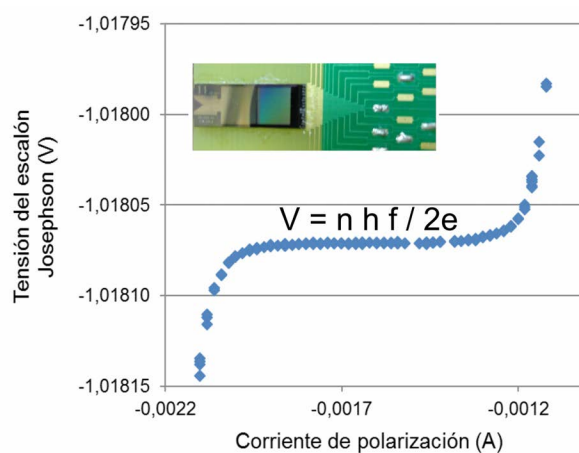


Fig. 15. Curva característica corriente-tensión para un arreglo programable de juntas Josephson del INTI, se incluye una foto del chip fabricado en el PTB. La junta sin histéresis permite obtener un único escalón para la corriente de polarización. Esta característica puede ser utilizada para generar formas de onda.

pseudo-ruido calculable para caracterizar los amplificadores de los termómetros primarios basados en el ruido de Johnson [31]. En estos sistemas, la junta Josephson es excitada con un tren de pulsos de corriente. Si cada pulso posee una amplitud, duración y tiempo de crecimiento dentro de ciertos rangos, la amplitud del pulso de tensión Josephson está perfectamente cuantizada y depende de la máxima frecuencia de pulso. Entonces, la integral en el tiempo de los pulsos está también cuantizada y depende solo de la constante de Josephson. Por lo tanto, la señal deseada debe ser codificada con un tren de pulsos de corriente, por ejemplo *Pulse Width Modulation* - PWM, que se inyectan al array Josephson. Los pulsos de tensión generados por el array son filtrados para obtener una reconstrucción exacta de la señal deseada, ver Fig. 16.

APÉNDICE B EL EFECTO HALL CUÁNTICO

El efecto Hall cuántico es observado en gases de electrones bidimensionales al aplicar un campo magnético perpendicular al plano del gas de electrones y a la dirección de la corriente. La Fig. 17 presenta una geometría típica, con una barra de conducción y contactos laterales. Se define la resistencia Hall $R_H = V_H/I$ y la resistencia longitudinal $R_{xx} = V_{xx}/I$. La Fig. 18 presenta las curvas de ellas en función de la inducción magnética aplicada, se pueden observar mesetas en la curva correspondientes a la resistencia Hall que concuerdan con los valles, de valor cercano a 0Ω , de la resistencia longitudinal. Klaus von Klitzing demostró que el valor de R_H en la meseta es $R_H = R_K/i$, donde i es un número entero que indica el escalón correspondiente, empezando desde el número 1.

En metrología, el gas bidimensional de electrones se obtiene en muestras de heteroestructuras de GaAs/AlGaAs, colocadas a temperatura menor a 1,5 K y campo magnético aproximado de 10 T. Estas condiciones de contorno pueden ser relajadas utilizando muestras de grafeno. La reproducibilidad de este efecto fue demostrada comparando geometrías y materiales, por ejemplo una muestra de grafeno

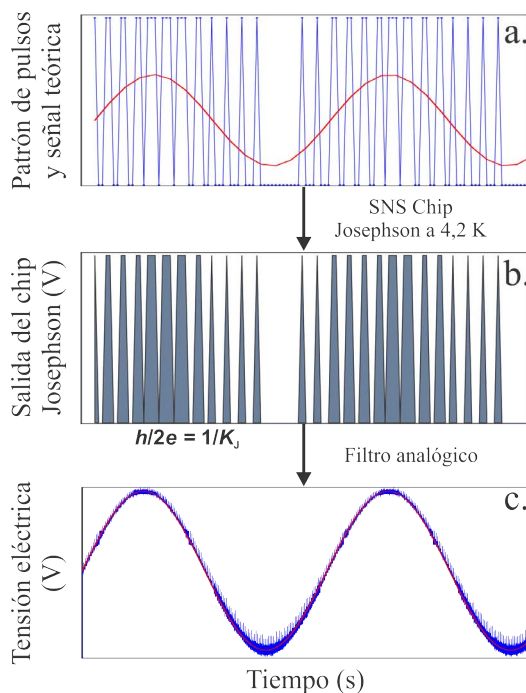


Fig. 16. (a) La señal deseada es codificada en un tren de pulsos, los mejores resultados se obtienen mediante modulación sigma-delta. Estos pulsos son generados en corriente e inyectados al chip Josephson. (b) Gracias al efecto Josephson, el área de los pulsos en tensión está cuantizada. (c) La tensión filtrada reconstruye la señal deseada con exactitud cuántica y gran pureza espectral.

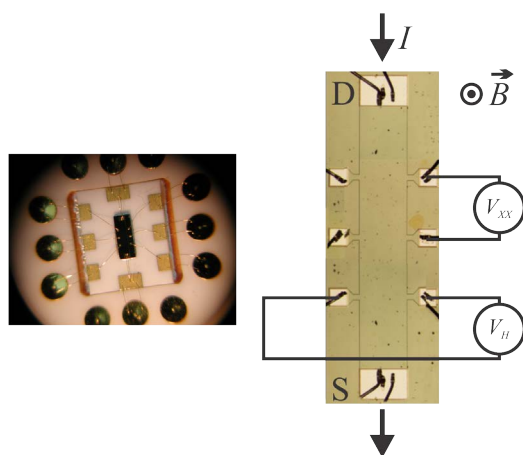


Fig. 17. (Izquierda) Foto de una muestra de GaAs/AlGaAs. (Derecha) Foto de la barra Hall donde se indica la dirección de circulación de la corriente, y los terminales que definen la tensión Hall y la longitudinal.

fue medida con otra de GaAs/AlGaAs y se obtuvo un acuerdo menor a su incertidumbre, en el orden de 10^{-10} [32], [33].

La calibración de los resistores patrones consiste en comparar al elemento con R_H por medio de comparadores de corriente o sistemas potenciométricos. El primer método es el más utilizado ya que permite utilizar corrientes distintas en cada elemento, mientras que en el sistema potenciométrico la misma corriente fluye por ambos elementos conectados en serie. Típicamente se utiliza la segunda meseta ($i=2$) para la cual el valor de la resistencia Hall es $12906,40375 \Omega$, ya que presenta la mejor relación entre ancho del escalón, campo magnético necesario y

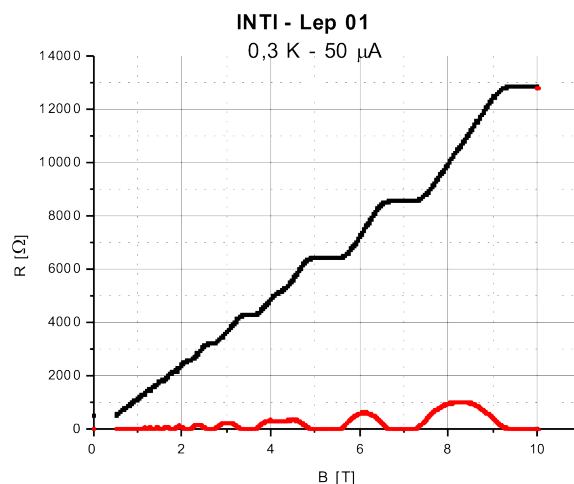


Fig. 18. Curva característica de la resistencia Hall y de la resistencia longitudinal con el campo magnético. Se puede observar las mesetas y los valles característicos que se forman para cada curva. La meseta superior corresponde a $n = 2$.

valor nominal. La incertidumbre de la calibración se debe principalmente al método de comparación y es interesante notar que debido al ancho de la meseta la inestabilidad del campo magnético es despreciable. Un método potenciométrico basado en un multímetro de alta exactitud puede lograr $80 \text{ n}\Omega/\Omega$ al medir un resistor patrón de $10 \text{ k}\Omega$ [34], ver Fig. 19. Un comparador de corriente directa puede alcanzar $40 \text{ n}\Omega/\Omega$ y un comparador criogénico de corriente puede lograr valores de incertidumbre en torno a $1 \text{ n}\Omega/\Omega$ para resistores desde 1Ω hasta $10 \text{ k}\Omega$ [35].

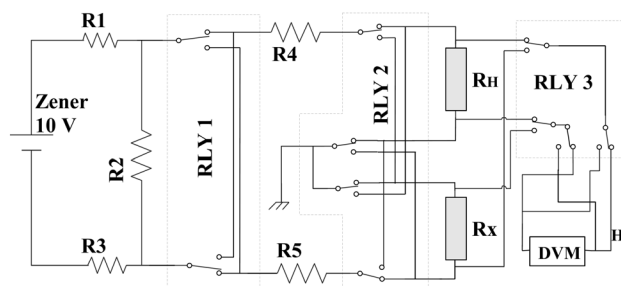


Fig. 19. Sistema potenciométrico del INTI basado en un multímetro de alta exactitud. Se utiliza una fuente patrón de tensión y un arreglo de resistores de alta estabilidad para para generar una corriente aproximada de $50 \mu\text{A}$ que fluye por el resistor incógnita y el chip Hall conectados en serie. Una matriz de conmutación, de relés con enclavamiento, permite invertir el sentido de corriente, posición de los resistores y del DVM. El multímetro mide alternadamente la tensión Hall y la tensión sobre la resistencia, su división es igual a la relación de las resistencias.

En los comparadores de corriente directa cada resistor se conecta en serie a una bobina y a una fuente de corriente, ver Fig. 20. Las bobinas generan flujo magnético en sentido contrario y en un mismo núcleo ferromagnético. Entonces, si se aplica la ley de Ampère en un camino cerrado sobre el núcleo y se acepta que el mismo es homogéneo se obtiene $I_1 N_1 - I_2 N_2 = \phi$, siendo I y N la corriente y cantidad de vueltas de las bobinas 1 y 2. El flujo magnético ϕ se determina mediante un detector de segunda armónica y su

lectura se utiliza para controlar una de las fuentes y cancelar el flujo magnético remanente. Un voltímetro mide la diferencia de tensión entre los resistores, $V = I_1 R_1 - I_2 R_2$. Se puede incluir una tercer bobina para realimentar y cancelar la diferencia de tensión, entonces la ecuación del flujo resulta $I_1 N_1 - I_2 N_2 - I_F N_F = \phi$. Cuando el puente está balanceado, $V = 0$ y $\phi = 0$, se puede obtener la relación entre los elementos trabajando con las ecuaciones previas:

$$R_2 = R_1 \frac{N_2}{N_1} \left(1 + \frac{I_F N_F}{I_2 N_2} \right). \quad (7)$$

La relación $\frac{I_F N_F}{I_2 N_2}$ se debe medir con exactitud pero debido a que su valor nominal es mucho menor a 1 su efecto en la incertidumbre de R_2 es pequeño.

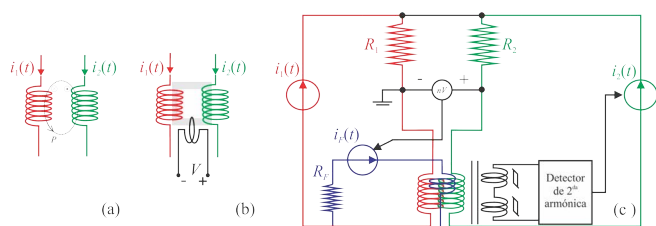


Fig. 20. (a) Aplicación de la ley de Ampère sobre dos bobinas. (b) Comparador de corriente alterna, se utiliza un núcleo ferromagnético para concatenar el flujo magnético y una bobina para detectar el flujo remanente mediante la ley de Faraday-Lenz. (c) Diagrama de un comparador de corriente directa automático.

Las menores incertidumbres se pueden obtener con un comparador criogénico de corriente, ver Fig 21, el cual mantiene el principio de funcionamiento del comparador de corriente directa pero lo mejora utilizando tecnología superconductor. El núcleo ferromagnético es reemplazado con un blindaje superconductor solapado, logrando disminuir drásticamente el error en la relación de corriente hasta 1×10^{-10} gracias al efecto Meissner. Además, la detección de flujo magnético se realiza mediante un SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), el cual posee una límite de sensibilidad de algunas partes por millón del cuanto de flujo magnético, en el orden de 2×10^{-21} Wb.

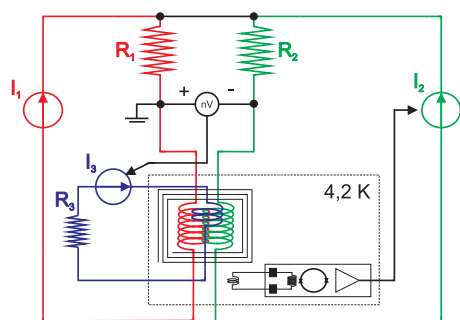


Fig. 21. Diagrama de un comparador criogénico de corriente. El núcleo ferromagnético fue reemplazado por un blindaje superconductor solapado y el flujo remanente es detectado con un sensor SQUID.

REFERENCES

[1] *Vocabulario Internacional de Metrología — Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*, Primera edición en Español, 2008.
 [2] *Ley 19.511 - Ley de Metrología*, marzo 1972.

[3] D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandés, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood, and Z. Zhang, "The CODATA 2017 values of h , e , k , and n_A for the revision of the SI," *Metrologia*, vol. 55, no. 1, pp. L13-L16, jan 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088%2F1681-7575%2Faa950a>
 [4] *9 Conférence Générale des Poids et Mesures*, BIPM, 1948. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM/CGPM9.pdf#page=64>
 [5] N.-H. Kaneko, S. Nakamura, and Y. Okazaki, "A review of the quantum current standard," *Measurement Science and Technology*, vol. 27, no. 3, p. 032001, feb 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088%2F0957-0233%2F27%2F3%2F032001>
 [6] *Resumen de sesión del Comité Internacional de Pesas y Medidas*, BIPM, 1947. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CIPM-PV-OCR/CIPM1945-1946.pdf>
 [7] S. P. Benz and C. A. Hamilton, "Application of the josephson effect to voltage metrology," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 10, pp. 1617-1629, Oct 2004.
 [8] *A guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz*, NPL, 1999.
 [9] A. M. Thompson and D. G. Lampard, "A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance," *Nature*, vol. 177, May 1956. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/177888a0>
 [10] B. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunnelling," *Physics Letters*, vol. 1, no. 7, pp. 251 - 253, 1962. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031916362913690>
 [11] K. v. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized hall resistance," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 45, pp. 494-497, Aug 1980. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.45.494>
 [12] T. J. Quinn, "News from the BIPM," *Metrologia*, vol. 26, no. 1, pp. 69-74, jan 1989. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088%2F0026-1394%2F26%2F1%2F006>
 [13] "The NIST reference on constants, units and uncertainty," https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?rk—search_for=elecmag—in!, accedido: 22-02-2019.
 [14] N. Fletcher, "The role of the magnetic constant, j_{10} , in the redefinition of the si," in *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, July 2018, pp. 1-2.
 [15] M. D. Early, "Conceptual consequences of the si," in *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, July 2018, pp. 1-2.
 [16] *Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI*, Consultative Committee for Electricity and Magnetism - BIPM, December 2017. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-a-2018.pdf>
 [17] B. M. Wood and S. Solve, "A review of josephson comparison results," *Metrologia*, vol. 46, no. 6, p. R13, 2009.
 [18] R. Iuzzolino, *Procedimiento específico: PEE60, calibración de patrones de tensión usando el efecto Josephson*, INTI, Julio 2012. [Online]. Available: <http://www.inti.gov.ar/fisicaymetrologia/pdf/pce/pee60.pdf>
 [19] *H series - Vishay foil resistors*, Vishay precision foil, 2010. [Online]. Available: <http://www.vishaypg.com/docs/63006/hmetlab.pdf>
 [20] *On the implications of changing the definition of the base unit kelvin - Report to the CIPM 2007*, The Consultative Committee for Thermometry - BIPM.
 [21] *Mise en pratique for the definition of the kelvin in the SI - DRAFT VERSION*, Consultative Committee for Thermometry - BIPM, June 2018. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018.pdf>
 [22] *Mise en pratique for the definition of the mole in the SI*, Consultative Committee for Amount of Substance - Metrology in Chemistry and Biology - BIPM, June 2018. [Online]. Available: https://www.bipm.org/cc/CCQM/Allowed/22/CCQM16-04_Mole_m_en_p_draft_2018.pdf
 [23] *Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI*, Consultative Committee for Mass and Related Quantities - BIPM, July 2018. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-kg-2018.pdf>
 [24] *Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements*, OIML, 2004. [Online]. Available: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf
 [25] G. A. Shaw, "Scaling of mass and force using electrical metrology,"

- in *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, July 2018, pp. 1–2.
- [26] S. Shapiro, “Josephson currents in superconducting tunneling: The effect of microwaves and other observations,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 11, pp. 80–82, Jul 1963. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.11.80>
- [27] W. C. Goeke, R. L. Swerlein, S. B. Venzke, and S. D. Stever, “Calibration of an 8 1/2-digit multimeter from only two external standards,” *Hewlett-Packard Journal*, vol. 40, no. 2, April 1989.
- [28] A. Belcher, J. Williams, J. Ireland, R. Iuzzolino, M. E. Bierzychudek, R. Dekker, J. Herick, R. Behr, and K. Schaapman, “Towards a metrology class adc based on josephson junction devices,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1065, no. 5, p. 052044, 2018. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1742-6596/1065/i=5/a=052044>
- [29] B. Jeanneret and S. Benz, “Application of the josephson effect in electrical metrology,” *Eur. Phys. J. Special Topics*, vol. 172, pp. 181–206, 2009.
- [30] H. E. van den Brom, E. Houtzager, G. Rietveld, R. van Bemmelen, and O. Chevtchenko, “Voltage linearity measurements using a binary josephson system,” *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 11, p. 3316, 2007. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0957-0233/18/i=11/a=008>
- [31] R. Behr, O. Kieler, J. Kohlmann, F. Muller, and L. Palafox, “Development and metrological applications of josephson arrays at ptb,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 32, pp. 124 002–124 021, 2012.
- [32] T. J. B. M. Janssen, J. M. Williams, N. E. Fletcher, R. Goebel, A. Tzalenchuk, R. Yakimova, S. Lara-Avila, S. Kubatkin, and V. I. Fal'ko, “Precision comparison of the quantum hall effect in graphene and gallium arsenide,” *Metrologia*, vol. 49, pp. 294–306, 2012.
- [33] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, “High-precision measurements of the quantized hall resistance: experimental conditions for universality,” *Phys. Rev. B*, vol. 55, pp. 13 124–34, 1997.
- [34] N. Fletcher, “First measurement of the qhe at inti using a potentiometric method,” in *2006 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2006)*, July 2006, pp. 1–2.
- [35] M. Gotz, D. Drung, E. Pesel, H. Barthelmess, C. Hinrichs, C. Abmann, M. Peters, H. Scherer, B. Schumacher, and T. Schurig, “Improved cryogenic current comparator setup with digital current sources,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 4, pp. 1176–1182, April 2009.