



Redefinición de la unidad de intensidad de corriente eléctrica y su diseminación

Yolanda A. Sanmamed

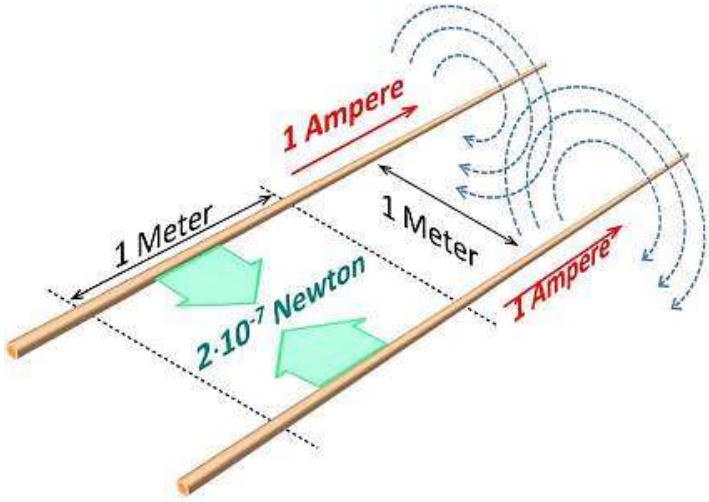
Índice

1. El amperio en el SI actual
 - 1.1. Definición
 - 1.2. Realización práctica
 - 1.2.1. Directa
 - 1.2.2. Indirecta
2. El amperio en el futuro SI
 - 2.1. Definición
 - 2.2. Realización práctica
3. Consecuencias de la redefinición del amperio



En la 9ª CGPM (1948) se adoptó la definición actual del amperio:

El amperio es la intensidad de una corriente constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno del otro, en el vacío, produciría entre esos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud.



$$\frac{F}{l} = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi r} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N / m}$$

De aquí resulta que la constante μ_0 (permeabilidad del vacío) es exactamente igual a $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{A}^{-2}$.

SI ACTUAL:
DEFINICIÓN

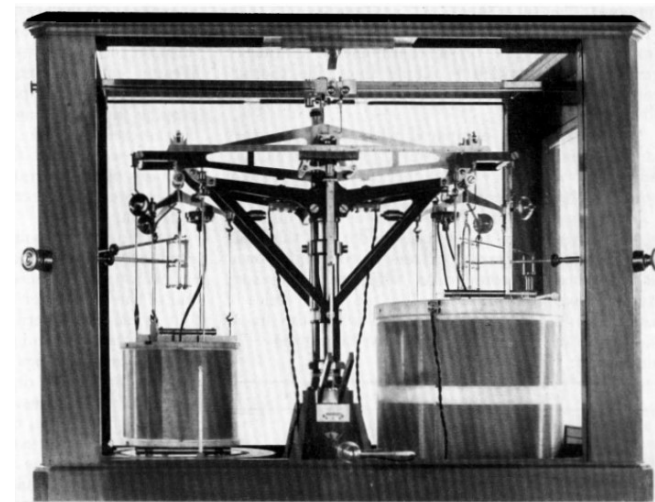
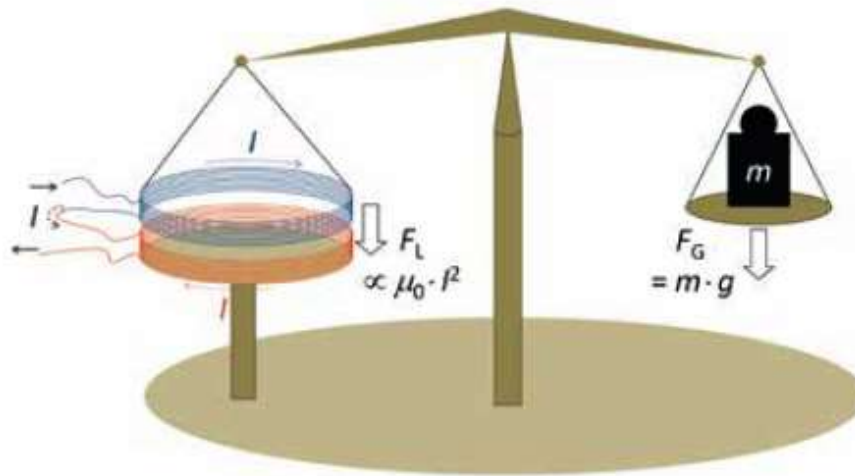
SI ACTUAL:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

FUTURO SI:
DEFINICIÓN

FUTURO SI:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

CONSECUENCIAS
DE LA
REDEFINICIÓN

Esta definición se realizó en la práctica, con dos bobinas en lugar de dos conductores rectilíneos (**balanza de corriente**).



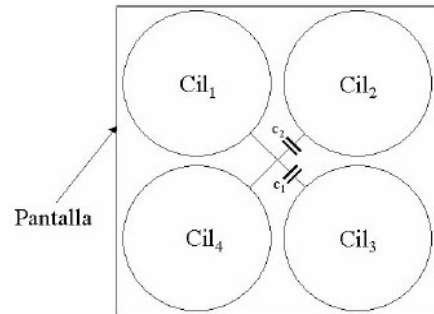
- Incertidumbres alcanzadas con la balanza de corriente eran de partes en 10^6
- Hasta mediados del siglo XX se usaron distintas variantes para la realización del amperio.



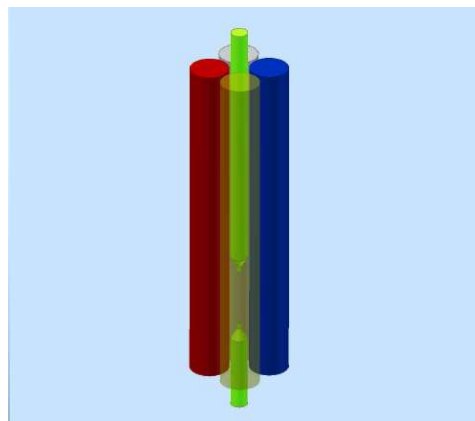
- Se lograron mejores resultados con las realizaciones indirectas del amperio.
- Una de las posibles realizaciones es mediante una **balanza de potencia o de Kibble** y un **condensador calculable**, realizando el amperio a través de la potencia y la resistencia eléctrica.
- Otra de las posibles realizaciones es mediante una **balanza de tensión** y un **condensador calculable**, realizando el amperio a través de la tensión y la resistencia eléctrica, empleando la ley de Ohm.



❖ Realización del faradio mediante un condensador calculable y del ohmio empleando un puente de cuadratura



$$\exp\left(\frac{-C_1 \cdot \pi}{\varepsilon}\right) + \exp\left(\frac{-C_2 \cdot \pi}{\varepsilon}\right) = 1$$



La variación de capacidad depende sólo de la variación de longitud y de ε_0 :

$$\Delta C_0 = \frac{\varepsilon_0}{\pi} \cdot \ln 2 \cdot \Delta l$$

ε_0 tiene un valor exacto según las actuales definiciones del metro y del amperio.

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$$

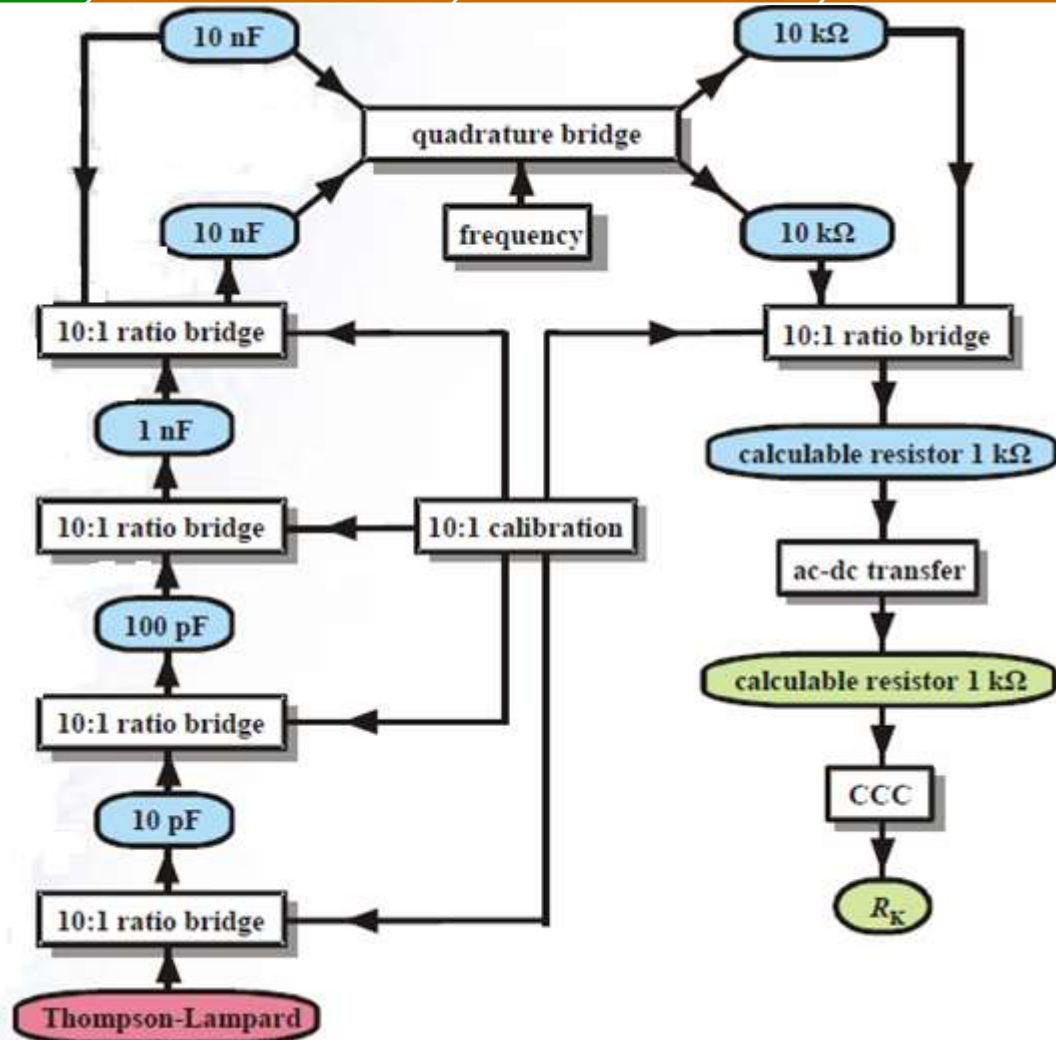
SI ACTUAL: DEFINICIÓN

SI ACTUAL: REALIZACIÓN PRÁCTICA

FUTURO SI: DEFINICIÓN

FUTURO SI: REALIZACIÓN PRÁCTICA

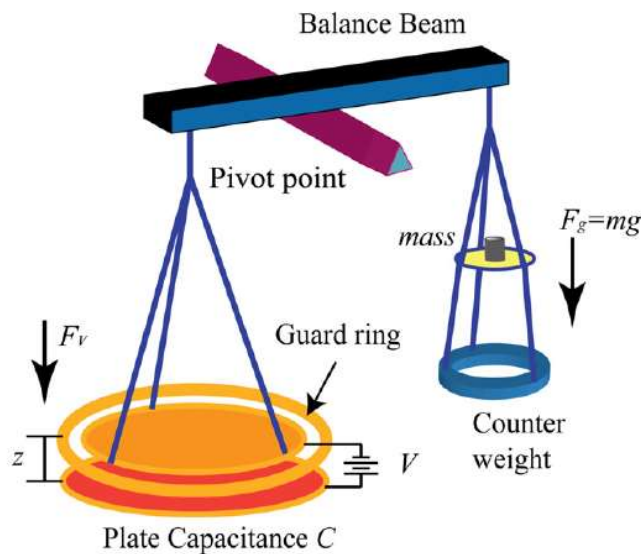
CONSECUENCIAS DE LA REDEFINICIÓN





❖ Realización del voltio mediante una balanza de tensión

La fuerza mecánica (mg) se compensa con una fuerza electrostática en un condensador con una distancia entre placas z y cargado a una tensión U .



$$F = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{dz}$$

$$U = \left(2mg \frac{dC}{dz} \right)^{1/2}$$

La realización del **amperio** combinando estas dos realizaciones del ohmio y el voltio se obtiene con una **incertidumbre** relativa de unas pocas partes en **10⁷**

SI ACTUAL:
DEFINICIÓN

SI ACTUAL:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

FUTURO SI:
DEFINICIÓN

FUTURO SI:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

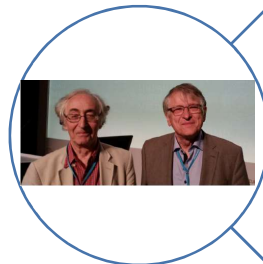
CONSECUENCIAS
DE LA
REDEFINICIÓN



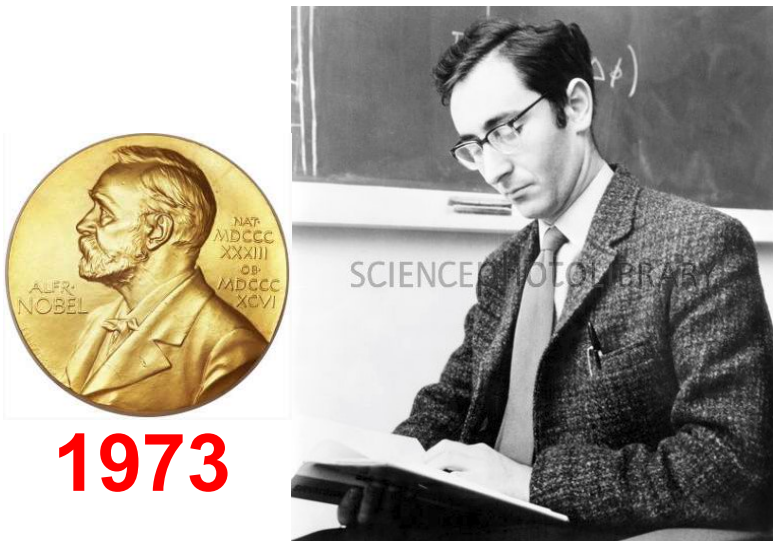
Las técnicas conocidas hasta ese momento para la realización de la unidad eléctrica de acuerdo a su definición en el actual SI pasan a un segundo plano con la aparición de los efectos cuánticos Hall y Josephson



La realización precisa del amperio, el ohmio y el voltio directamente en términos de sus actuales definiciones es compleja y costosa.

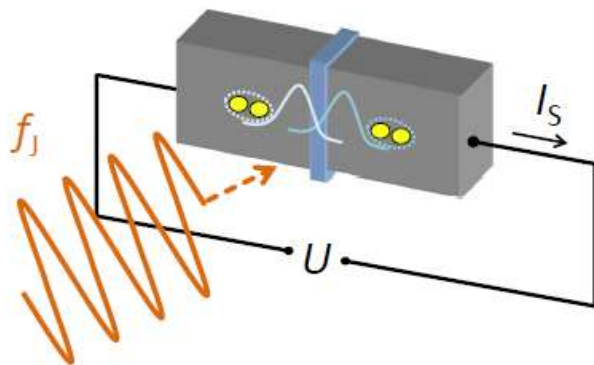
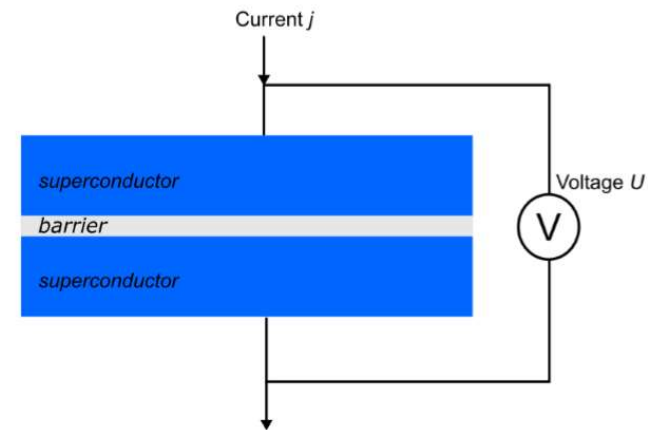


Realización sólo accesible a unos pocos INM, lo que lleva a la mayoría a obtener el amperio de forma indirecta basándose en los efectos cuánticos Hall y Josephson.



1973

1962: Brian D. Josephson predijo un efecto entre superconductores débilmente acoplados (**efecto Josephson**)



Si se irradia una unión Josephson con una señal de muy alta frecuencia se produce una diferencia de tensión entre los dos superconductores (escalones de tensión):

$$U_n = \frac{h}{2e} n f_J = \frac{n f_J}{K_J}, \quad n = (1, 2, \dots)$$

SI ACTUAL:
DEFINICIÓN

SI ACTUAL:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

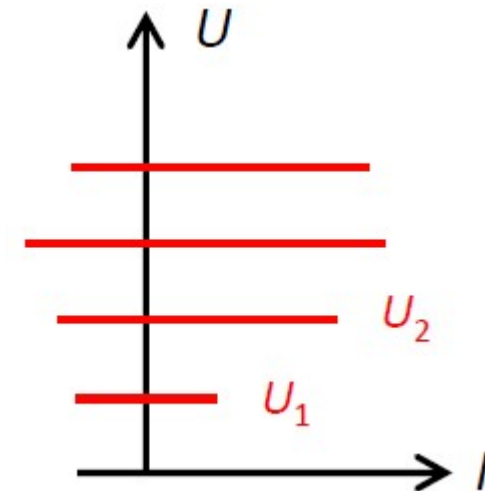
FUTURO SI:
DEFINICIÓN

FUTURO SI:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

CONSECUENCIAS
DE LA
REDEFINICIÓN

$$U_n = \frac{h}{2e} n f_J = \frac{n f_J}{K_J}, \quad n = (1, 2, \dots)$$

f_J es la frecuencia de la radiación de microondas y K_J es la constante de Josephson



Efecto Josephson permite obtener valores de tensión U que dependen sólo de la carga elemental e , de la constante de Planck h y de la medida de la frecuencia f_J .

SI ACTUAL:
DEFINICIÓN

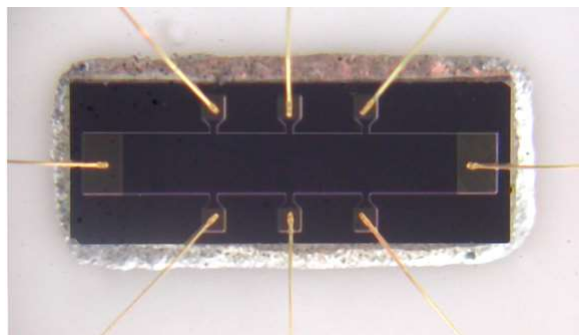
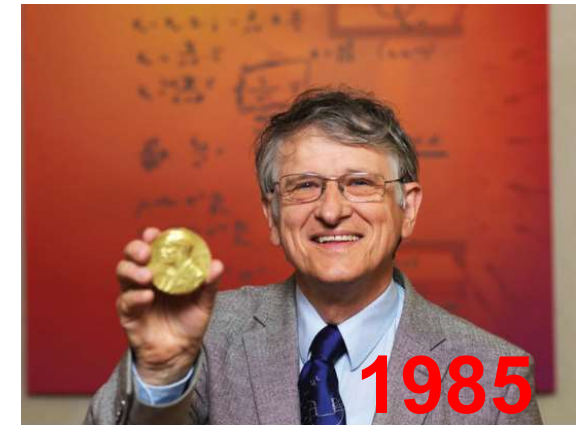
SI ACTUAL:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

FUTURO SI:
DEFINICIÓN

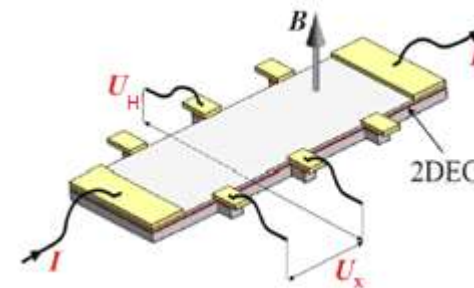
FUTURO SI:
REALIZACIÓN
PRÁCTICA

CONSECUENCIAS
DE LA
REDEFINICIÓN

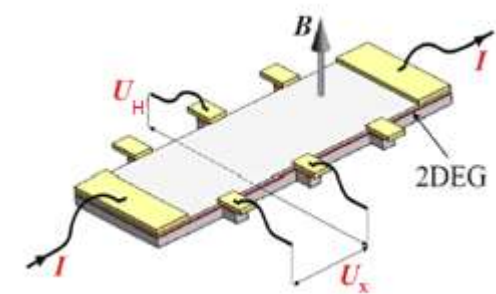
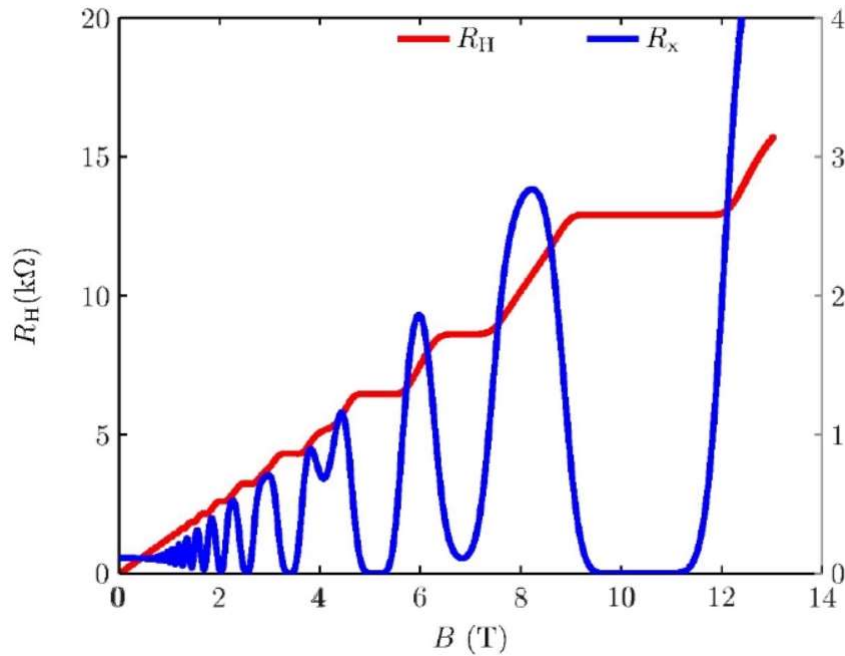
El **efecto Hall cuántico** fue observado experimentalmente por Klaus von Klitzing en 1980 en estructuras semiconductoras bidimensionales (2DEG), como las heteroestructuras de GaAs y grafeno.



1 mm x 0,4 mm



Con campos magnéticos elevados y a bajas temperaturas aparecen mesetas en los valores de resistencia Hall en función del campo magnético (“resistencia Hall cuantizada”)



$$R_H = \frac{1}{i} \frac{h}{e^2} = \frac{R_K}{i}, \quad i = (1, 2, \dots)$$

R_K es la constante de von Klitzing

La resistencia deriva de dos constantes fundamentales, carga elemental e y la constante de Planck h .

- $R_H = U_H / I$ resistencia Hall
- $R_X = U_X / I$ resistencia longitudinal



CODATA (1989):

$$K_J = 483\,597\,9(2) \text{ GHz/V} \quad [4 \times 10^{-7}]$$

$$R_K = 25\,812\,807(5) \, \Omega \quad [2 \times 10^{-7}]$$

❖ Pero la reproducibilidad de las realizaciones de los patrones basados en los efectos Josephson y Hall es varios órdenes de magnitud mejor que el valor con el que se conocen las constantes en el SI.

❖ Para aprovechar la estabilidad de los patrones basados en estos efectos, la CIPM en 1988 decidió asignar valores exactos para las constantes de Josephson y de von Klitzing, en uso desde **1990**, K_{J-90} y R_{K-90} , para obtener las magnitudes convencionales U_{90} y R_{90} .

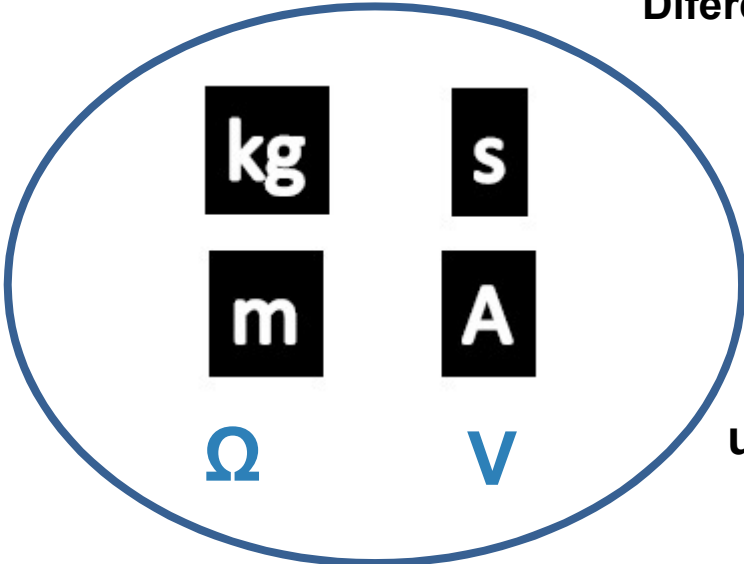
No son realizaciones del voltio y el ohmio en sentido estricto, porque no están basadas en el valor de la permeabilidad del vacío μ_0 que aparece en la definición del amperio.



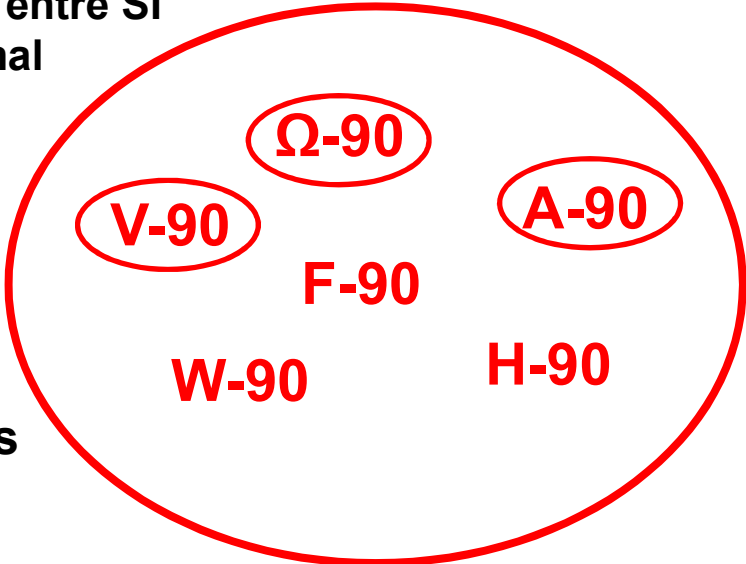
Unidades SI
(unidades **básicas** y **derivadas**)

Unidades Sistema Eléctrico “Convencional”
(unidades convencionales fuera del SI)

Diferencias medibles entre SI y SI convencional



El futuro SI unificará ambos sistemas





❖ Debido a las mejoras en las medidas de las constantes fundamentales:

CODATA:

$$K_J = 483\,597\,8525(30) \text{ GHz/V} \quad [6,1 \times 10^{-9}]$$

$$R_K = 25\,812\,807\,455(59) \, \Omega \quad [2,3 \times 10^{-10}]$$

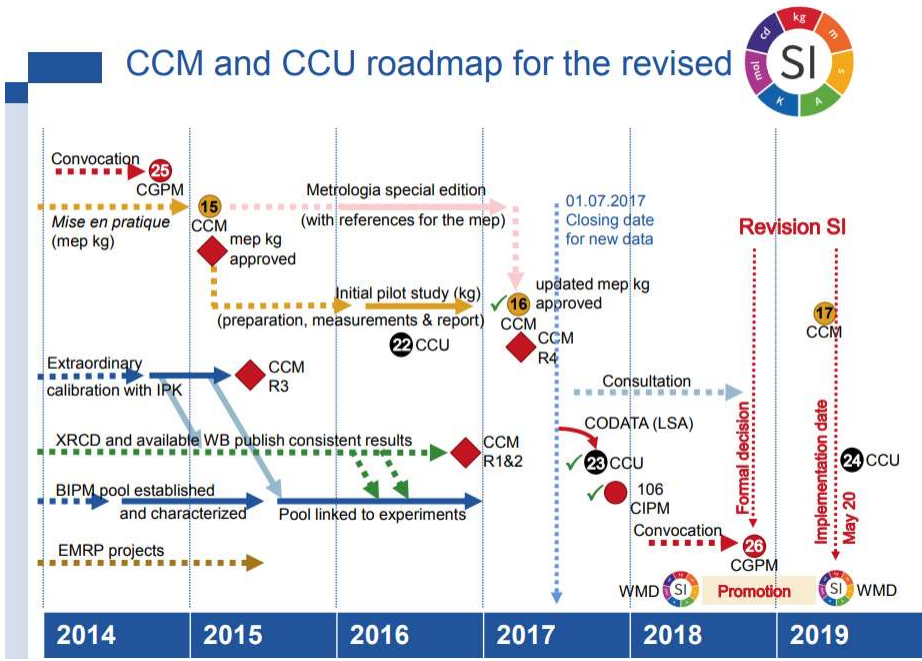
$$V_{90} = (1 + 9,8(6) \times 10^{-8}) \text{ V}$$

$$\Omega_{90} = (1 - 1,764(2) \times 10^{-8}) \, \Omega$$

Existen diferencias entre las unidades convencionales y las del SI, que se eliminarán con la entrada en vigor del futuro SI



El amperio, símbolo A, es la unidad SI de intensidad de corriente eléctrica. Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental, e , en $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, cuando se expresa en la unidad C, igual a $A \cdot s$, donde el segundo se define en función de $\Delta\nu_{Cs}$.





Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI”

8/12/2017
Version 1.0

Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI

Consultative Committee for Electricity and Magnetism

1. Introduction

The purpose of this *Mise en pratique*, prepared by the Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM) of the International Committee for Weights and Measures (CIPM), is to indicate how the SI base unit, the ampere, symbol A, and the derived electric SI units with names and symbols, the volt V, ohm Ω , siemens S, coulomb C, farad F, henry H, watt W, tesla T, and weber Wb, may be realized in practice.

In general, the term “to realize a unit” is interpreted to mean the establishment of the value and associated uncertainty of a quantity of the same kind as the unit that is consistent with the definition of the unit. The definition of the ampere does not imply any particular experiment for its practical realization. Any method capable of deriving an electric current value traceable to the set of seven reference constants could, in principle, be used. Thus, the list of methods given is not meant to be an exhaustive list of all possibilities, but rather a list of those primary methods that are easiest to implement and/or that provide the smallest uncertainties.

A primary method is a method having the highest metrological properties; whose operation can be completely described and understood; for which a complete uncertainty statement can be written down in terms of SI units; and which does not require a reference standard of the same quantity.

2. Definition of the ampere

3. Practical realization of the ampere

As already noted in Sec. 1, to realize a unit generally means to establish the value and associated uncertainty of a quantity of the same kind as the unit that is consistent with the definition of the unit. In practice, the ampere A can be realized:

Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI”

8/12/2017
Version 1.0

- (a) by using Ohm’s law, the unit relation $A = V/\Omega$, and using practical realizations of the SI derived units the volt V and the ohm Ω , based on the Josephson and quantum Hall effects, respectively, as discussed in Secs. 4 and 5 below; or
- (b) by using a single electron transport (SET) or similar device, the unit relation $A = C/s$, the value of e given in the definition of the ampere and a practical realization of the SI base unit the second s; or
- (c) by using the relation $I = C \cdot dU/dt$, the unit relation $A = F \cdot V/s$, and practical realizations of the SI derived units the volt V and the farad F and of the SI base unit second s.

At the time of the preparation of this *Mise en pratique*, single electron transport (SET) implementations still have technical limitations and often larger relative uncertainties than some other competitive techniques. However, SET implementations are included in this *Mise en pratique* because they offer unique and elegant approaches to realizing SI units, and their uncertainties have been improving in recent years, and they promise to improve further in the future.



1. Basándose en la ley de Ohm $U = R \cdot I$ y las realizaciones prácticas de las unidades de tensión y resistencia basadas en el efecto Josephson y Hall, respectivamente.

En el nuevo SI las constantes K_J y R_K tendrán valores exactos una vez fijadas las constantes h y e .

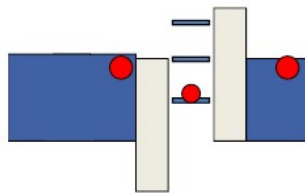
$$K_J = \frac{2e}{h}$$

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$



2. Mediante el recuento de cargas individuales que fluyen por unidad de tiempo.

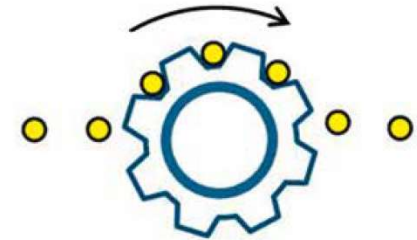
➤ Permite realizar el amperio en el futuro SI de forma directa.



$$I = ef$$



❖ Se necesita un circuito eléctrico que permita el transporte individual y controlado de electrones, *Single Electron Transport (SET)*.



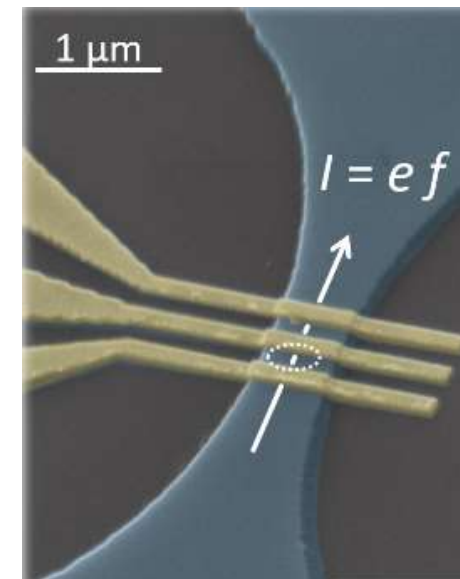
❖ Las **bombas SET** permiten el transporte individual y controlado de electrones y la generación de corrientes cuantizadas.

❖ **Desafíos en el uso de las bombas SET:**

➤ Aumento de la intensidad de corriente generada (corrientes muy pequeñas).

i.e. para $f = 1 \text{ GHz}$, $I = 160 \text{ pA}$

➤ Mejora de la realización, evitando eventos de error estadísticos y mejorando así la incertidumbre.





3. Usando la relación que se produce en el proceso de carga de un condensador, y las realizaciones prácticas del voltio, del faradio y del segundo.

- ❖ Aplicando una rampa de tensión a un condensador de capacidad C se genera una intensidad de corriente.
- ❖ La carga de un condensador es: $Q = CU$
- ❖ Derivando y suponiendo constante la capacidad del condensador:

$$I = C \frac{dU}{dt}$$



Consecuencias de la redefinición del amperio

- Cambios en los valores de los patrones actuales:

$$V_{90} = (1 + 9,8(6) \times 10^{-8}) \text{ V}$$

$$\Omega_{90} = (1 - 1,764(2) \times 10^{-8}) \Omega$$

- Desaparece la diferencia entre unidades eléctricas del SI y del sistema eléctrico “convencional”



Otros efectos de la redefinición del amperio



- El amperio se independizará del kilogramo
- La constante magnética μ_0 dejará de tener asignado un valor exacto

● e tendrá valor exacto →

El recuento de cargas individuales por unidad de tiempo permitirá realizar el amperio de forma directa.



A

e

● h tendrá asignado un valor exacto

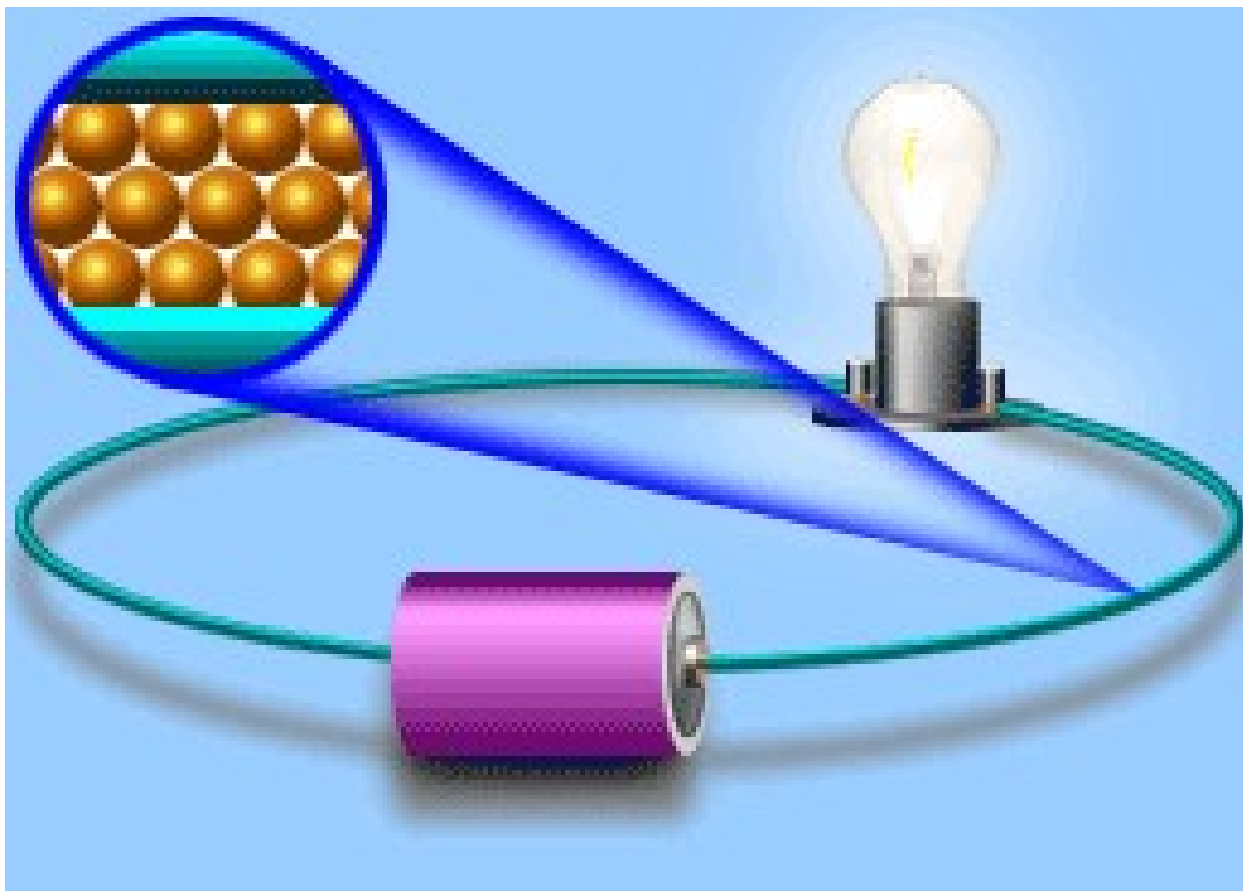
● $R_K = \frac{h}{e^2}$ tendrá valor exacto →

Efecto Hall cuántico será una realización del ohmio

● $K_J = \frac{2e}{h}$ tendrá valor exacto →

Efecto Josephson será una realización del voltio

Realización amperio



Gracias por su atención

