

O novo kelvin no SI

Klaus Natorf Quelhas

Laboratório de Termometria

Divisão de Metrologia Química e Térmica

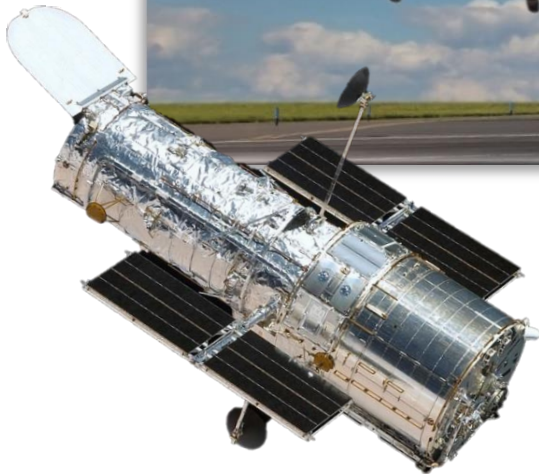
Diretoria de Metrologia Científica e Tecnologia



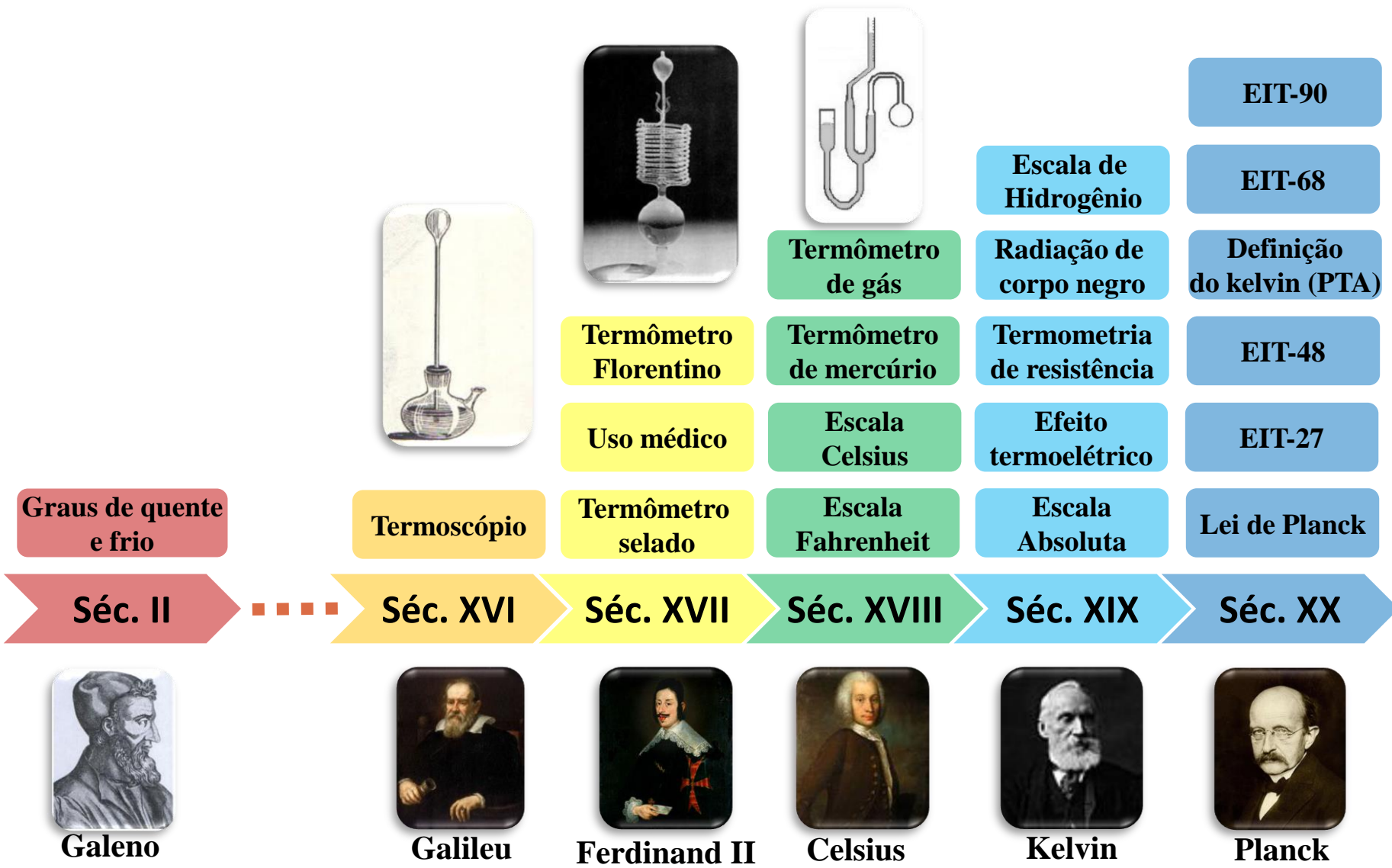
MINISTÉRIO DA
ECONOMIA



A temperatura está em todo lugar!



Um breve histórico da medição de temperatura





TERMOMETRIA TERMODINÂMICA

(primária)

Baseada em relações físicas

- Pressão de um gás
- Velocidade do som
- Permissividade elétrica
- Radiação de corpo negro

Independente de padrão

- Não requer calibração

Desvantagens

- Custo elevado
- Demorada (até 100 dias!)
- Extremamente complexa
- Pouco reprodutível

X

TERMOMETRIA PRÁTICA

Baseada em relações empíricas

- Resistividade elétrica
- Potência termoelétrica

Escalas de temperatura

- Requer calibração
- Padrões e métodos definidos
- Realização rápida e prática
- Custo reduzido
- Alta reprodutibilidade

Desvantagens

- Escalas contém erros ($T - T_{90}$)
- Apenas aproxima T

A Escala Internacional de Temperatura de 1990: EIT-90



DEFINIÇÃO

17 Pontos fixos

Transições de fase (F, S, PT)
Definidos termodinamicamente

Instrumentos de interpolação

Termômetro de gás
Termômetro de resistência
Termômetro de radiação

Equações de interpolação

$$T_{90} > 0,65 \text{ K}$$

Erro $T - T_{90}$

Não-unicidade

Referência: Ponto Triplo da Água

$$T_{PTA} = 273,16 \text{ K}$$

$$t_{90} (^{\circ}\text{C}) = T_{90} (\text{K}) - 273,15$$

PLTS-2000: $T < 1 \text{ K}$



The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)

H. Preston-Thomas

President of the Comité Consultatif de Thermométrie and Vice-President of the Comité International des Poids et Mesures
Division of Physics, National Research Council of Canada, Ottawa, K1A 0S1 Canada

Received: October 24, 1989

Introductory Note

The official French text of the ITS-90 is published by the BIPM as part of the Procès-verbaux of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM). However, the English version of the text reproduced here has been authorized by the Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) and approved by the CIPM.

The unit of Celsius temperature is the degree Celsius, symbol $^{\circ}\text{C}$, which is by definition equal in magnitude to the kelvin. A difference of temperature may be expressed in kelvins or degrees Celsius.

The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) defines both International Kelvin Temperatures, symbol T_{90} , and International Celsius Temperatures, symbol t_{90} . The relation between T_{90} and t_{90} is the same as that between T and t , i.e.:

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273,15. \quad (2)$$

Fonte: Metrologia 27, 3 (1990)

Definição do kelvin (até ontem...)



SI, 8ª Edição, 2006:

“O kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água”

Ponto Triplo da Água (PTA):

Referência da unidade

$$T_{PTA} = 273,16 \text{ K}$$

Altíssima reprodutibilidade

Disponível com alta pureza

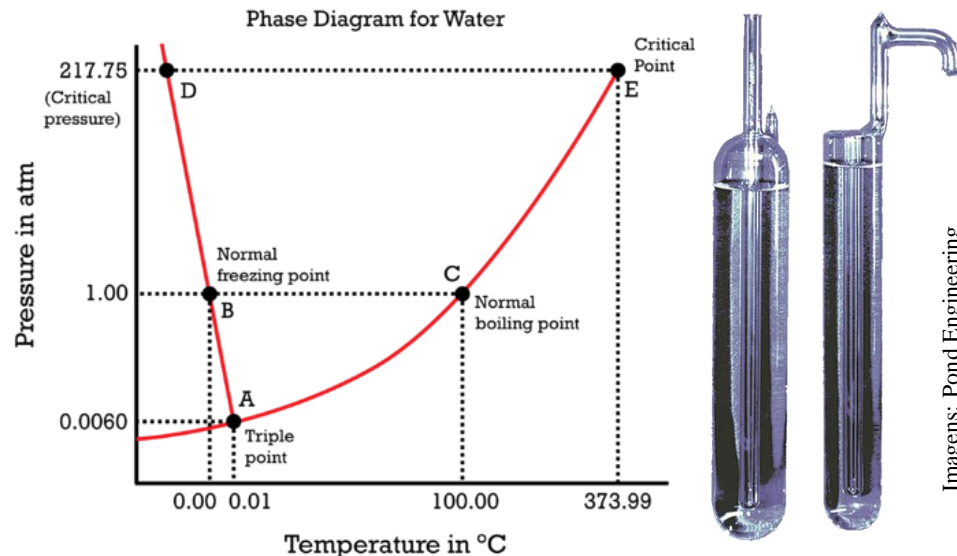
$$t (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,15$$

K depende da realização do PTA

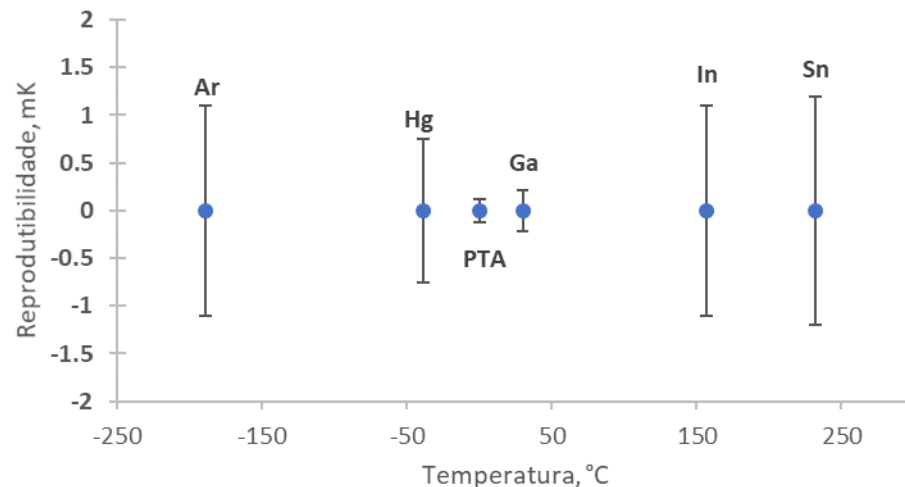
Impurezas/contaminação

Composição isotópica

Deriva a longo prazo



Reprodutibilidade dos pontos fixos da EIT-90



O desafio de redefinir o kelvin



Constante de Boltzmann k

Relaciona temperatura e energia
Unidade: J/K

Requisitos para a definição

$T_{PTA} = 273,16$ K (continuidade)

Incerteza menor que 1 ppm

Ao menos 2 métodos

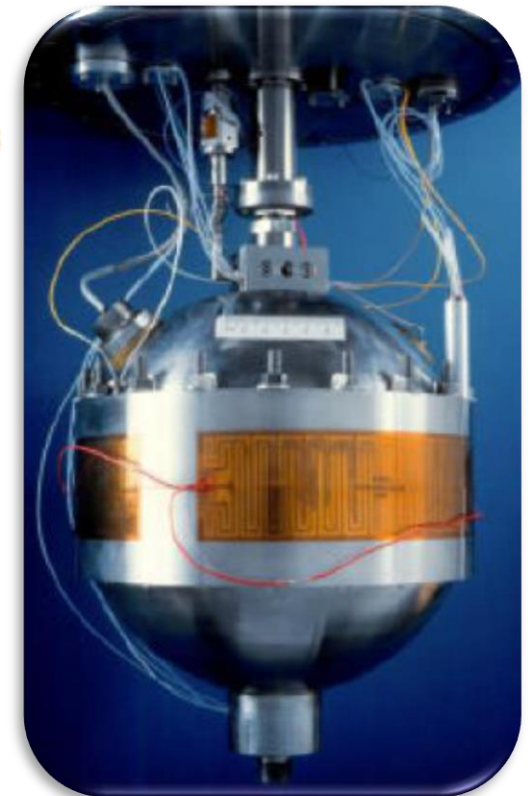
Ao menos 1 com $u < 3$ ppm

Métodos empregados:

Termometria Acústica de Gás

Termometria de Constante Dielétrica

Termometria de Ruído Johnson



IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures

Metrologia 55 (2018) R1–R20

<https://doi.org/10.1088/1361-6595/55/1/R1>

Review

The Boltzmann project

J Fischer¹, B Fellmuth¹, C Gaiser^{1,13}, T Zandt¹, L Pitre², F Sparasci²,
M D Plimmer², M de Podesta³, R Underwood³, G Sutton³, G Machin³,
R M Gavioso⁴, D Madonna Ripa⁴, P P M Steur⁴, J Qu⁵, X J Feng⁵, J Zhang⁵,
M R Moldover⁶, S P Benz⁶, D R White⁷, L Gianfrani⁸, A Castrillo⁸,
L Moretti⁸, B Darquié⁹, E Moufarej⁹, C Daussey⁹, S Briaudeau¹⁰, O Kozlova¹⁰,
L Risegari¹⁰, J J Segovia¹¹, M C Martín¹¹ and D del Campo¹²

Fonte: Metrologia 55 (2018)

O desafio de redefinir o kelvin



Execução:

6 INMs

11 realizações

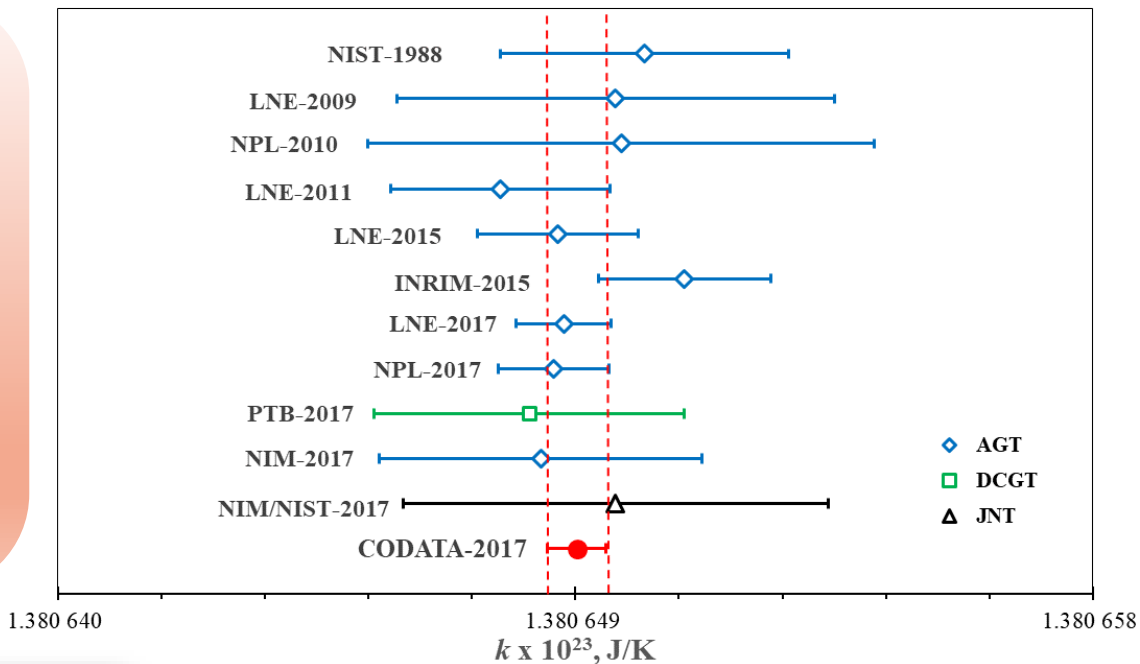
3 métodos

Resultados (2017):

$$k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$u_r(k) = 0,37 \text{ ppm}$$

$$u(T_{PTA}) = 0,1 \text{ mK}$$



OPEN ACCESS

IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures

Metrologia 55 (2018) L13–L16

<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa995f>

Short Communication

The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI

D B Newell¹, F Cabiati, J Fischer, K Fujii, S G Karshenboim, H S Margolis², E de Mirandés, P J Mohr, F Nez, K Pachucki, T J Quinn, B N Taylor, M Wang, B M Wood and Z Zhang

OPEN ACCESS

IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures

Metrologia 55 (2018) 125–146

<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa99bc>

Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment*

Peter J Mohr, David B Newell, Barry N Taylor and Eite Tiesinga

Definição do kelvin (a partir de hoje)

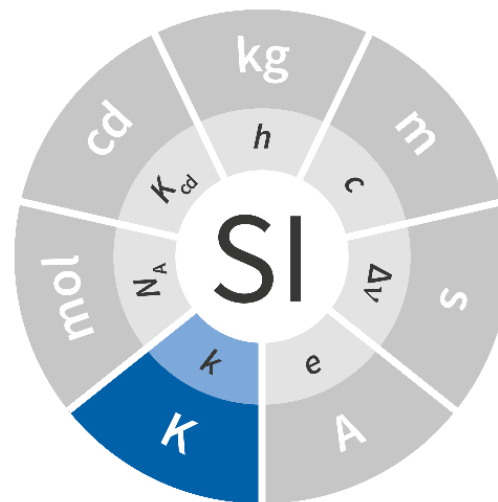


SI, 9ª Edição, 2019:

“O kelvin, símbolo K, é a unidade do SI de temperatura termodinâmica. Ela é definida tomando-se o valor numérico fixo da constante de Boltzmann como sendo $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ quando expressa na unidade $J\ K^{-1}$, que é igual a $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$, onde o quilograma, metro e segundo são definidos em termos de h , c e $\Delta\nu_{Cs}$.”

Consequência imediata:

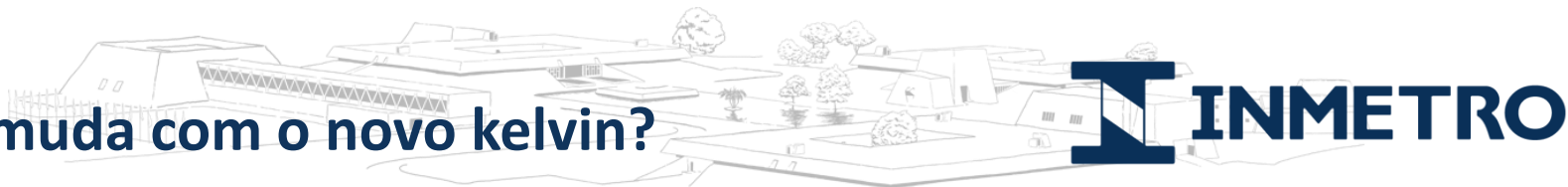
“Um kelvin é igual à mudança na temperatura termodinâmica que resulta em uma mudança na energia térmica kT de $1,380\ 649 \times 10^{-23}\ J$ ”



The kelvin

The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit $J\ K^{-1}$, which is equal to $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{Cs}$.

O que muda com o novo kelvin?



PONTO TRIPLO DA ÁGUA

Perde o status de referência no SI

$T_{PTA} = 273,16 \text{ K}$ (pode mudar)

$u(T_{PTA}) = 0,1 \text{ mK}$ (0,37 ppm)

Continua referência da EIT-90

RASTREABILIDADE AO KELVIN

- 1) Realizar medições primárias (absolutas ou relativas), ou
- 2) Aplicar as correções $T-T_{90}$ e incertezas, ou
- 3) Declarar no certificado de calibração que as medidas são rastreáveis à EIT-90, sendo esta uma aproximação da temperatura termodinâmica mundialmente aceita (não é rastreável ao K).

MISE EN PRATIQUE (MeP-K)

Orientações para a realização do kelvin

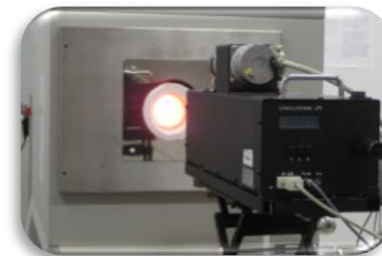
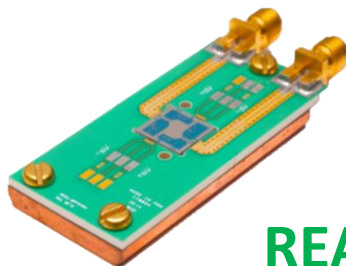
Métodos primários absolutos e relativos

Inclui textos das EITs vigentes (90 e 2000)

Inclui correções $T-T_{90}$ e incertezas

Ponto fixo	$T-T_{90}$ (mK)	$u(T-T_{90})$ (mK)
Ar	-4,38	1,3
Hg	-3,25	1,0
PTA*	0	0
Ga	4,38	0,4
In	10,1	0,8
Sn	11,5	1,3
Zn	13,8	6,9
Al	28,7	6,6
Ag	46,2	14

O que muda com o novo kelvin?



REALIZAÇÃO DA UNIDADE

Método	Princípio de Medição	Relação Termodinâmica	Incerteza
Termometria Acústica de Gás	Velocidade do som em um gás em função de T	$u^2 = \frac{\gamma kT}{m}$	~1 ppm a 273 K (0,27 mK)
Termometria de Radiação	Radiância espectral de uma cavidade de corpo negro em função de T	$L_{b,\lambda}(\lambda, T) = \left(\frac{2hc^2}{\lambda^5}\right) \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1}$	~35 ppm a 2800 K (0,1 K)
Termometria de Constante Dielétrica	Capacitância em função de T	$\epsilon_r = \frac{C(p)}{C(0)(1 + k_{eff}p)}$	~40 ppm a 2,5 K (0,1 mK)
Termometria de Índice de Refração	Índice de refração de um gás em função de T	$n^2 = \frac{f_m^2(0)}{f_m^2(p)(1 - k_{eff}p)}$	~10 ppm a 273 K (2,7 mK)
Termometria de Ruído Johnson	Densidade espectral de potência do ruído Johnson em função de T	$\langle V^2 \rangle = 4kTR\Delta f$	4 ppm a 273 K (1,1 mK)

O que NÃO muda com o novo kelvin?



ESCALAS DE TEMPERATURA

Permanecem válidas (por enquanto)

Guias ainda aplicáveis (CCT)

Correções $T-T_{90}$ opcionais

Pontos fixos permanecem fixos na EIT-90

PTA permanece referência na EIT-90

Sem revisões num futuro próximo

Escala Celsius permanece válida (SI):

$$t (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,15$$

$$t_{90} (^{\circ}\text{C}) = T_{90} (\text{K}) - 273,15$$

COMÉRCIO/INDÚSTRIA

Nada muda!

Rastreabilidade mantida (EIT-90)

Métodos permanecem

Nota do CCT:

“... para a maioria dos usuários ela passará despercebida”

What impact does the redefinition have on the realization of the kelvin?

The kelvin will be redefined with no immediate effect on temperature measurement practice or on the traceability of temperature measurements, and for most users, it will pass unnoticed. The redefinition lays the foundation for future improvements. A definition free of material and technological constraints enables the development of new and more accurate techniques for making temperature measurements traceable to the SI, especially at extremes of temperature.

O que NÃO muda com o novo kelvin?



ESCALAS DE TEMPERATURA

Permanecem válidas (por enquanto)

Guias ainda aplicáveis (CCT)

Correções $T-T_{90}$ opcionais

Pontos fixos permanecem fixos na EIT-90

PTA permanece referência na EIT-90

Sem revisões num futuro próximo

Escala Celsius permanece

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

+

COMÉRCIO/INDÚSTRIA

Nada muda!

Rastreabilidade

M...

A REDEFINIÇÃO ESTABELECE AS BASES PARA MELHORIAS FUTURAS

*...na dos usuários ela
...percebida”*

...ion have on the realization of the kelvin?

...ed with no immediate effect on temperature measurement practice or on

... of temperature measurements, and for most users, it will pass unnoticed. The

... definition lays the foundation for future improvements. A definition free of material and technological constraints enables the development of new and more accurate techniques for making temperature measurements traceable to the SI, especially at extremes of temperature.

MUITO OBRIGADO!

knquelhas@inmetro.gov.br
later@inmetro.gov.br

 **Ouvidoria:** 0800 285 1818

 inmetro.gov.br /  facebook.com/Inmetro

 youtube.com/tvinmetro /  twitter.com/Inmetro

