

## INTRODUÇÃO AO CURSO

•**Objetivo** : Capacitar o aluno a realizar medições das principais grandezas mecânicas e a projetar experimentos.

•**Ementa** : Introdução: definições, padrões, unidades. Análise de incertezas experimentais. Medidas dinâmicas e processamento básico de sinais. Revisão dos mecanismos de interferência em transmissão de sinais. Conceitos de condicionadores analógicos de sinais. Redução de ruído em medições. Medidas elétricas e aquisição de dados. Medida de temperatura e fluxo de calor. Medida de deformação e força. Medida de pressão. Visualização de escoamentos. Medida de vazão e velocidade de fluidos.

## INTRODUÇÃO AO CURSO

### •Livros recomendados:

- Figliola, R. S, Beasley, D. E. Teoria e projeto para medições mecânicas. 4a. Ed. TLC Editora.
- Holman, Experimental Methods for Engineers, 6th ed. McGraw Hill, 1993.
- Dally; Riley; McConnel, Instrumentation for Engineering Measurements, John Wiley, 1994.
- Tropea; Yarin; Foss, Handbook of Experimental Fluid Mechanics, 2007.

•**Critério de Aprovação** : Relatórios e trabalhos ao longo do curso.

## INTRODUÇÃO AO CURSO

### •Dinâmica das aulas :

- Ao longo do curso serão realizados experimentos sobre os seguintes tópicos: medidas de sinais elétricos, redução de ruído em medições de sinais elétricos, incerteza experimental, medida de temperatura, fluxo de calor, deslocamento, força, vazão e velocidade de fluido. Os horários das práticas de laboratório serão informados com antecedência nas aulas teóricas.

### Contato

Igor Braga de Paula

•Sala 131L

•Telefone: 3527-1168

•[igordepaula@puc-rio.br](mailto:igordepaula@puc-rio.br)

### Modelo de Relatório

## INTRODUÇÃO AO CURSO

### Conceitos iniciais :

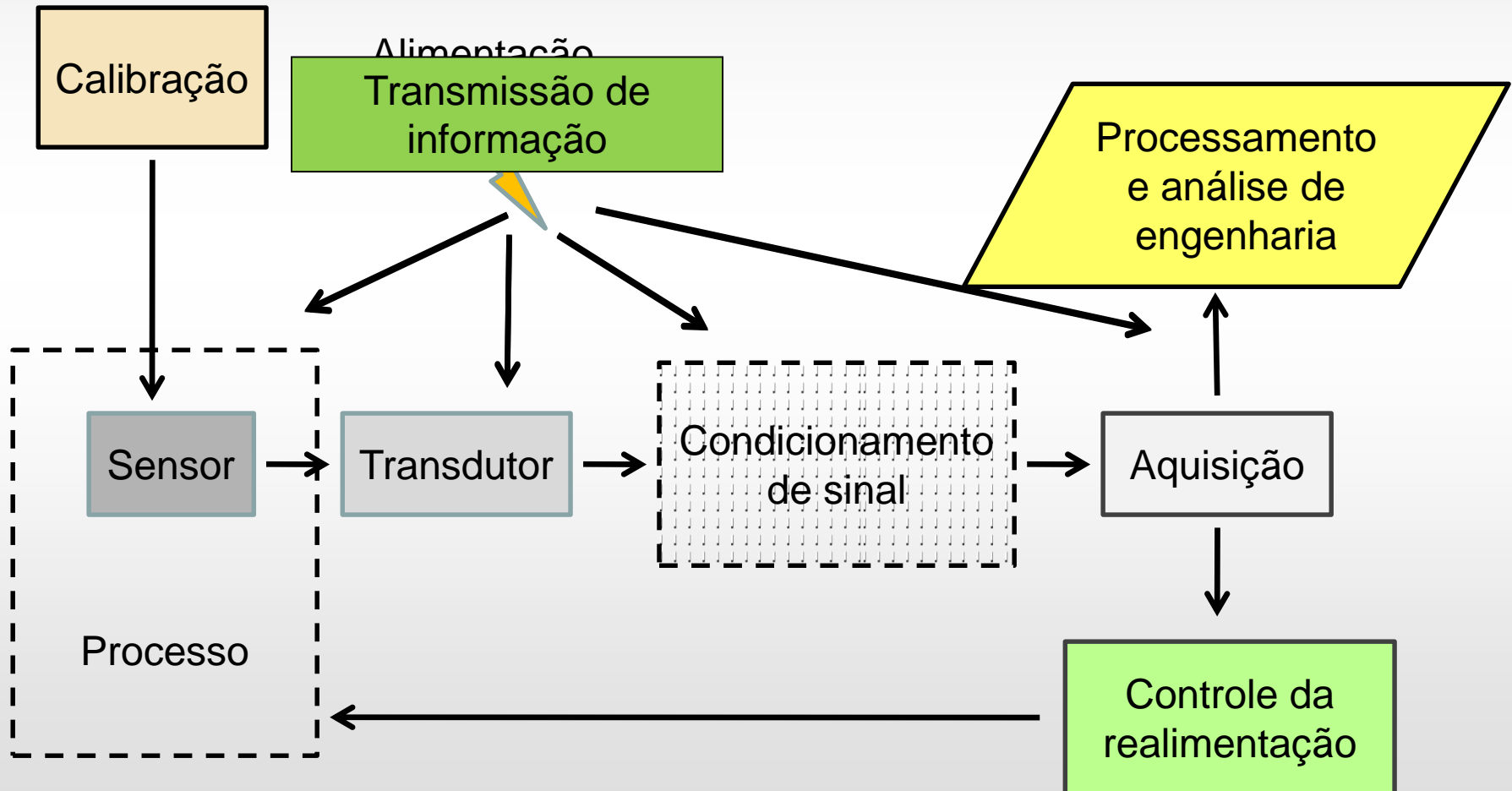
- Medição é uma atividade que fazemos no dia a dia sem muita atenção aos instrumentos utilizados (ex.: peso, temperatura ambiente, etc.).
- Para o engenheiro essa atividade deve ser realizada com extremo cuidado e critério na seleção dos instrumentos. Medições podem ser utilizadas no controle de processos, na validação de projetos, etc.
- O projeto e a execução de um experimento requer conhecimentos multidisciplinares e análise crítica por parte do engenheiro. Durante o curso vários conceitos já vistos em física, eletrônica, mecânica, estatística, etc serão revistos.

# Métodos Experimentais em Termociências

I.B De Paula

## Conceitos iniciais :

- Diagrama esquemático de um Sistema Geral de Medição



## Conceitos iniciais :

- Quando pretendemos realizar uma medição, qual o objetivo? Qual pergunta queremos responder?
- A resposta obtida está baseada no valor real da quantidade medida ou em alguma tendência do medidor?
- Como estabelecer a relação entre o valor real de uma variável e o valor medido?
- Existem procedimentos que nos ajudam a planejar e projetar um experimento de modo a responder essas perguntas.

# Métodos Experimentais em Termociências

I.B De Paula

---

Um resumo dos passos necessários para a realização de uma experiência bem controlada é apresentado a seguir. Baseado no livro Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw Hill 1993.

1. Cetrifique-se da necessidade da realização do experimento. Verifique a literatura cuidadosamente. Considere a possibilidade de utilizar métodos analíticos ou numéricos.
2. Determine os recursos disponíveis para a realização dos experimentos: financeiros, tempo e pessoal.
3. Faça um projeto detalhado do experimento. Utilize a experiência de outros profissionais e da literatura. Procure realizar estimativas fornecidas por soluções numéricas ou analíticas.

# Métodos Experimentais em Termociências

---

I.B De Paula

4. Determine as grandezas que devem ser medidas e os parâmetros e variáveis que podem afetar os resultados. Determine também a exatidão com que as grandezas devem ser medidas. Selecione os instrumentos de medição e variáveis que devem ser controladas.
5. Prepare o procedimento de redução de dados a ser utilizado ANTES de montar a seção de testes.
6. Analise as incertezas experimentais esperadas para os resultados ANTES de montar a seção de testes. Se necessário, modifique o projeto ou use instrumentos com características diferentes.
7. Selecione os instrumentos que irão produzir as incertezas desejadas dentro do orçamento disponível.



# Métodos Experimentais em Termociências

---

I.B De Paula

8. Faça algumas corridas preliminares. Critique fisicamente os resultados obtidos. Compare-os com resultados conhecidos que estejam disponíveis.
  - Verifique se o nível das incertezas experimentais é compatível com aquele previsto no item 6.
9. Realize os experimentos programados e analise os resultados.
10. Discuta e explique os resultados obtidos.
11. Publique os resultados.

## Conceitos iniciais :

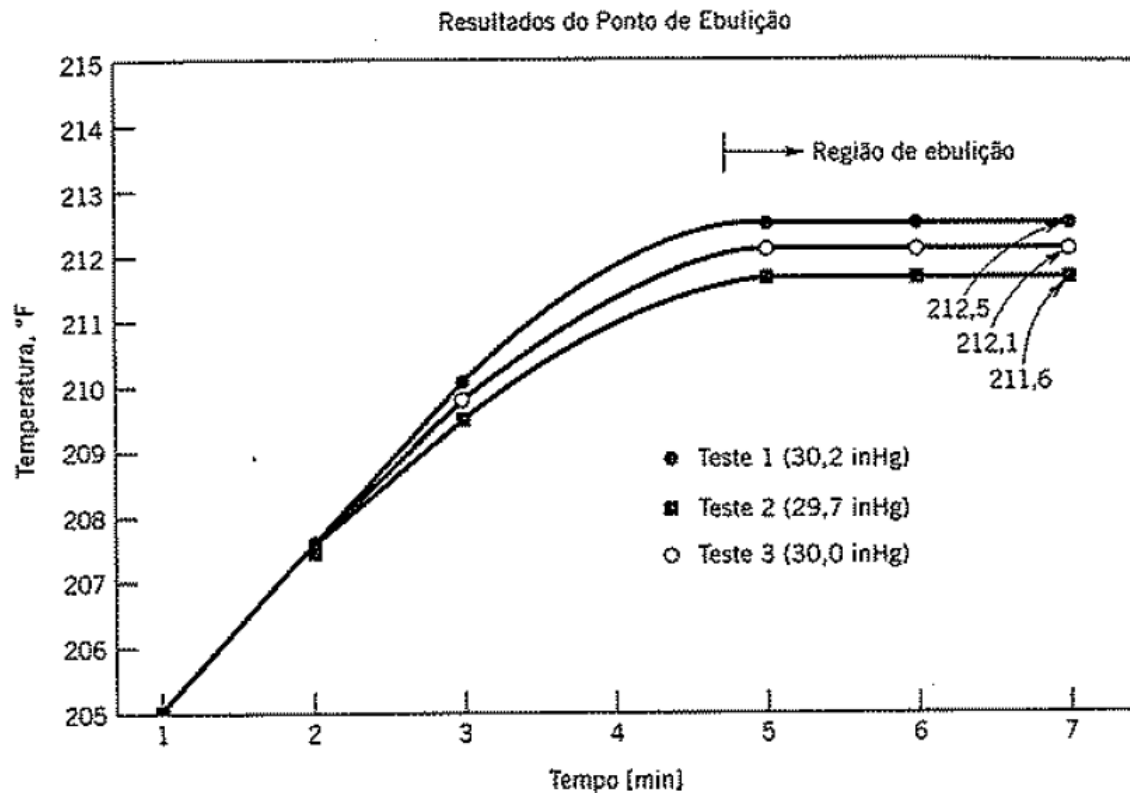
- Uma ferramenta importante em todas as etapas do procedimento descrito é a **Análise de Incertezas Experimentais**. Ela vai nos ajudar:
  - no projeto da seção de testes
  - na determinação das variáveis mais relevantes ( e também as menos relevantes)
  - na seleção dos equipamentos: exatidão x custo
  - na apresentação dos resultados obtidos

## Conceitos iniciais : Variáveis

- Variáveis são entidades que influenciam os testes
- É importante conhecer todas as variáveis que afetam a medição e realizar ensaios sob condições controladas dessas variáveis.
- Variáveis que não são, ou não podem ser, controladas são chamadas de *extrínsecas*.  
Ex.: Influência da forma de dirigir na medição do consumo de combustível
- Efeito de variáveis extrínsecas nas medições exigem maior esforço na interpretação dos dados (quebra cabeças).

## Conceitos iniciais : Variáveis

- Influência de variável extrínseca (pressão atmosférica) na medição do ponto de ebulição da água



## Conceitos iniciais : Parâmetros

- Parâmetros são um grupo funcional de variáveis.  
Ex.: Número de Reynolds= $VL/\nu$ . Depende da velocidade ( $V$ ), da dimensão característica  $L$  e da viscosidade cinemática  $\nu$
- Frequentemente o importante durante uma medição é manter um parâmetro de controle constante (ex.: número de Reynolds, Froude, dentre outros).
- Relações de similaridade são úteis para se determinar os parâmetros relevantes do problema.

## Conceitos básicos: Medição

- *É o conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza.*
- Medições, mesmo que bem controladas, estão sujeitas a variações causadas por inúmeras fontes.
- Cabe ao experimentalista identificar as fontes de desvio que podem afetar o processo de medição, quantificá-los e atuar de modo a trazê-los para níveis aceitáveis.
- A falta de repetibilidade de uma medida está relacionada com a **incerteza**. Já o termo **erro** é mais utilizado para designar o afastamento entre o valor medido e o valor verdadeiro.

# Métodos Experimentais em Termociências

---

I.B De Paula

## Conceitos básicos:

- **Exatidão (*accuracy*)** :Indica o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando.

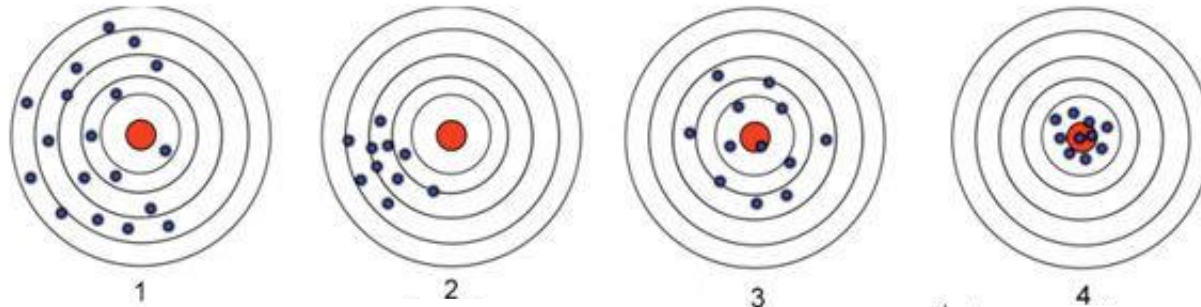
## Conceitos básicos:

- **Repetibilidade ou Precisão:** Indica o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sob as mesmas condições de medição. Estas condições incluem:
  - mesmo procedimento de medição
  - mesmo observador
  - mesmo instrumento de medição
  - mesmo local
  - repetição em curto período de tempo



## Conceitos básicos: Exatidão e Precisão

- Fazendo uma analogia com o disparo de um projétil contra um alvo, podemos dizer que a exatidão corresponde a acertar na média o centro do alvo e repetibilidade está relacionada ao nível de dispersão dos disparos.



## Conceitos básicos:

- **Reprodutibilidade dos Resultados da Medição:**  
Indica o grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição. As condições alteradas de medição podem incluir:
  - princípios de medição distintos
  - métodos de medição
  - observador
  - instrumento de medição
  - local
  - padrão de referência

## Conceitos básicos:

- **Sensibilidade de um Instrumento:**

Indica a variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo, de acordo com a equação abaixo:

$$S = \frac{\partial z}{\partial x}$$

onde  $x$  é a variável que está sendo medida e  $z$  é a saída do instrumento.

- **Resolução:** É a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida.

## Conceitos básicos:

- **Calibração:** É o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre valores indicados por um instrumento de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. De acordo com o VIM/INMETRO-2005, o termo aferição pode ser usado como sinônimo de calibração
- **Rastreabilidade:** É a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão de estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas

## Conceitos básicos:

- **Padrões:** Definição dada pelo INMETRO: *“Medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência”*.
- Os padrões foram criados para que profissionais em diferentes partes do mundo possam comparar os resultados de suas experiências em uma base consistente.

## Conceitos básicos:

- **Unidades Base (Sistema Internacional):**As definições das unidades do Sistema Internacional de unidades – SI podem ser encontradas na página do BIPM no endereço:  
*<https://www.bipm.org/en/measurement-units/>*
- A seguir apresentamos as unidades de base deste sistema.

# Métodos Experimentais em Termociências

I.B De Paula

## Conceitos básicos:

- **Unidades Base (Sistema Internacional):** BIPM

*<https://www.bipm.org/en/measurement-units/>*



# Métodos Experimentais em Termociências

---

I.B De Paula

## Conceitos básicos:

- **Unidades Base (Sistema Internacional):**

A partir de maio de 2019, todas as unidades do sistema internacional de medição foram redefinidas em termos de constantes que descrevem a natureza. O objetivo foi criar referências estáveis.



## Conceitos básicos:

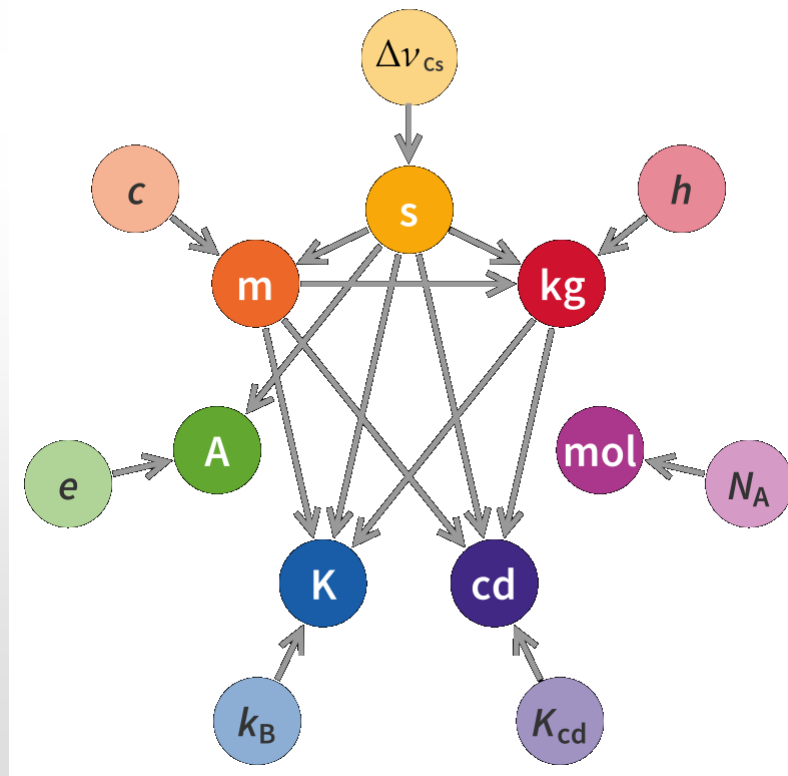
- **Unidades Base (Sistema Internacional):**  
Foram definidas 7 constantes e todas as unidades são derivadas dessas constantes
- A frequência hiperfina da transição de um átomo de cesio  $133 \Delta\nu_{Cs}$ ;
- A velocidade da luz no vácuo  $c$ ;
- A constante de Planck  $h$ ;
- A carga elementar  $e$ ;
- A constante de Boltzmann  $k$ ;
- A constante de Avogadro  $N_A$ ;
- A eficiência luminosa de uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ .

# Métodos Experimentais em Termociências

I.B De Paula

## Conceitos básicos:

- **Unidades Base (Sistema Internacional):**  
7 constantes e todas as unidades são derivadas dessas constantes



## Conceitos básicos: Unidades Base (SI)

- **Unidade de tempo (s):** Primitivamente, o segundo, unidade de tempo, era definido como a fração  $1/86\ 400$  do dia solar médio. Porém trabalhos demonstraram que o dia solar médio não apresentava as garantias de exatidão requeridas, por causa das irregularidades da rotação da Terra.
- Para conferir maior exatidão à definição da unidade de tempo, em 1967 decidiu-se substituir a definição do segundo pela seguinte:
- “O segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.”

## Conceitos básicos: Unidades Base (SI)

- **Unidade de tempo (s):**
- A partir de maio de 2019, a frequência hiperfina de transição de um átomo de césio 133, é definida como uma constante. Logo a definição de segundo fica:

$$1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

## Conceitos básicos:

- **Unidade de comprimento (m):** A definição do metro baseada inicialmente no protótipo internacional em platina, está em vigor desde 1889. Com a finalidade de aumentar a exatidão, em 1983 foi adotada a definição atual como sendo: “O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo.”
- Essa definição tem o efeito de fixar a velocidade da luz em  $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , exatamente.
- O antigo protótipo internacional do metro, é conservado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas

## Conceitos básicos:

- **Unidade de comprimento (m):** A partir de maio de 2019, o metro fica definido como:

$$1 \text{ m} = \left( \frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta \nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta \nu_{\text{Cs}}} .$$

## Conceitos básicos: Unidades Base (SI)

- **Unidade de massa (kg):** O protótipo internacional do quilograma foi sancionado em 1889 com base na massa de um protótipo feito em platina iridiada e que é conservado no Bureau Internacional (Sèvres, França), nas condições que foram fixadas pela convenção de 1889.
- A partir de 2019, a constante de Plank ( $h$  – unidade J.s ou  $\text{kgm}^2/\text{s}$ ) fica sendo utilizada para a definição do quilograma.

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s}$$

- O protótipo de massa original é conservado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas.

## Conceitos básicos: Unidades Base (SI)

- **Unidade de Quantidade de Matéria, mol (mol):**
- Anteriormente era definida como quantidade de matéria de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos são os átomos contidos em 0,012 kg de Carbono 12 (1971).
- A partir de maio de 2019, fica definida com base na constante de Avogrado.

$$1 \text{ mol} = \left( \frac{6.022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$



## Conceitos básicos: Unidades Base (SI)

- **Unidade de corrente (A):** Em 1948 foi adotado para o ampère, unidade de corrente elétrica, a seguinte definição:
- *“O Ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situados à distância de 1 metro entre si, no vácuo, produz entre estes condutores uma força igual a  $2 \times 10^{-7}$  Newton por metro de comprimento.”*
- Esse conceito é difícil de reproduzir. Com a constante  $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  A.s, o Ampère fica:

$$1\text{ A} = \left( \frac{e}{1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1}$$

## Conceitos básicos: Unidades Base (SI)

- **Unidade de temperatura (K):** Até 2019, o ponto tríplice da água era definido como ponto fixo fundamental, como se segue a definição:
- “*O kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração 1/273,16 da temperatura termodinâmica no ponto tríplice da água.*”.
- A partir de 2019, a definição fica baseada na constante de Boltzmann  $k = 1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$

$$1 \text{ K} = \left( \frac{1.380\ 649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

## Conceitos básicos: Unidades Base (SI)

- **Unidade de Intensidade Luminosa, candela (cd):** intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade energética naquela direção é  $1/683$  Watt por esteroradiano (Ratificada pela 16a CGPM, 1979).
- Atualmente definiu-se como uma constante  $K_{cd} = 683$   $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ , e com isso a definição de candela fica:

$$1 \text{ cd} = \left( \frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

## Conceitos básicos: Unidades Derivadas (SI)

- Outras dimensões e suas unidades associadas podem ser definidas em termos das dimensões de base.

Ex: Força:  $1N = massa \times aceleração = \frac{kg \cdot m}{s^2}$

– Pressão:  $1Pa = \frac{Força}{Área} = \frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{N}{m^2}$

– Energia:  $1J = Força \times comprimento = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = N \cdot m$

– Potência:  $1W = \frac{energia}{tempo} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = \frac{J}{s}$

- Etc...

## Conceitos básicos: Hierarquia de Padrões

- O valor conhecido aplicado a um sistema de medição durante sua calibração torna-se o padrão em relação ao qual a calibração é feita.
- Não é conveniente utilizar o padrão original (França) para calibrar uma balança, por exemplo.
- Logo, por razões práticas existe uma hierarquia de padrões secundários e de referências para reproduzir o padrão primário.

# Métodos Experimentais em Termociências

I.B De Paula

## Conceitos básicos: Hierarquia de Padrões

Hierarquia	
Padrão Primário	Mantido como padrão absoluto de unidade
Padrão de Transferência	Usado para calibrar padrões locais
Padrão Local	Usado para calibrar padrões de trabalho
Padrão de Trabalho	Usado para calibrar instrumentos locais

**Obs:** Podem existir padrões intermediários suplementares entre os níveis de hierarquia.

- Cada nível subsequente da hierarquia é derivado por uma calibração contra o padrão no nível precedente. A rastreabilidade da calibração de um instrumento é obtida quando essa hierarquia é seguida e uma metodologia reconhecida é adotada na calibração.

# Métodos Experimentais em Termociências

I.B De Paula

## Conceitos básicos: Hierarquia de Padrões

Padrão		
Nível	Método	Incerteza (°C)
Padrão Primário	Pontos termodinâmicos fixos	$\pm 0,001$
Padrão de Transferência	Termômetro de resistência de platina	$\pm 0,005$
Padrão Local	Termômetro de resistência de platina	$\pm 0,05$
Padrão de Trabalho	Termopar	$\pm 0,5$

**Ex.:** Rastreabilidade da hierarquia de um padrão de temperatura.

**Obs:** Cada um dos padrões intermediários, deve ser periodicamente calibrados contra o padrão no nível imediatamente superior na hierarquia.

# Métodos Experimentais em Termociências

I.B De Paula

## Conceitos básicos: Hierarquia de Padrões

