ENGENHARIA CLÍNICA CONECTA

E-BOOK

COMO CALCULAR A INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO

Guia prático para profissionais de Engenharia Clínica e Metrologia

- Conceitos essenciais
- Passo a passo dos cálculos
- Exemplos práticos e orçamento de incerteza
- Estudo de caso em equipamentos da área da saúde
- Checklist final e principais erros



Orçamento de Incerteza

Fonte de incerteza	Valor	Distribuição	Divisor	Incerteza padrão (u)
Repetibilidade	0,20	Normal	–	0,20
Certificado do padrão	0,80	Normal	2	0,40
Resolução	0,10	Retangular	$2\sqrt{3}$	0,03
Estabilidade	0,20	Retangular	$\sqrt{3}$	0,12

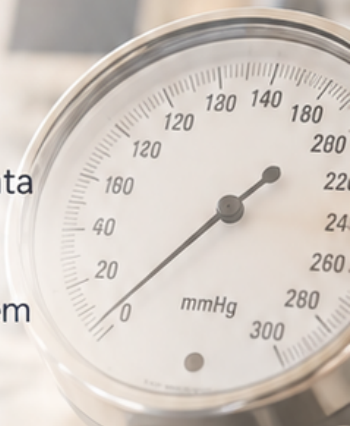
$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2} = 0{,}46$$

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0{,}46 = 0{,}92$$

MVS ENGENHARIA CLÍNICA
MELHORIAS VISANDO A SAÚDE
(85) 3051-1510

SELO DE QUALIFICAÇÃO ONA

1. Apresentação



Quando realizamos uma medição, o resultado obtido nunca representa um valor absolutamente exato.

Mesmo utilizando instrumentos calibrados, existem fatores que podem influenciar o resultado, como:

- resolução do instrumento;
- repetibilidade das medições;
- incerteza do padrão utilizado;
- condições ambientais;
- método de medição;
- estabilidade do equipamento;
- influência do operador.

Por isso, um resultado de calibração não deve ser interpretado apenas pelo valor medido.

A **incerteza de medição** representa a faixa dentro da qual se considera que o valor verdadeiro provavelmente se encontra, de acordo com as condições e informações disponíveis.

Exemplo:

Valor medido: 100,0 mmHg

Incerteza expandida: ± 1,2 mmHg

Resultado:

100,0 ± 1,2 mmHg

Isso significa que a medição deve ser interpretada considerando essa faixa de incerteza.

2. Antes de calcular: entenda o mensurando



O primeiro passo é definir exatamente o que está sendo medido.

O **mensurando** é a grandeza que desejamos determinar.

Exemplos:

- pressão em mmHg;
- temperatura em °C;
- tensão elétrica em V;
- corrente em mA;
- potência em W;
- volume em µL;
- frequência cardíaca em bpm;
- energia em joules;
- vazão em mL/h.

Antes de calcular qualquer incerteza, precisamos saber:

1. **Qual grandeza** estou medindo?
2. **Qual equipamento** está sendo utilizado como padrão?
3. **Quais fatores** podem alterar esse resultado?

3 O QUE É UM ORÇAMENTO DE INCERTEZA?



O orçamento de incerteza é uma tabela utilizada para **organizar todas as fontes** que contribuem para a incerteza final da medição.

Exemplo:

Fonte de incerteza	Valor	Distribuição	Divisor	Incerteza padrão (u)
Repetibilidade	—	Normal	—	calculada
Certificado do padrão	0,60	Normal	2	0,30
Resolução	0,10	Retangular	$\sqrt{3}$	0,0289
Estabilidade	0,20	Retangular	$\sqrt{3}$	0,1155

Σ

Ao final, todas essas contribuições serão combinadas para obtenção da **incerteza padrão combinada** e, posteriormente, da **incerteza expandida**.

4 INCERTEZA TIPO A

A **incerteza Tipo A** é determinada utilizando análise estatística das medições realizadas. Normalmente está relacionada à **repetibilidade.**

1 Medições realizadas

Imagine que durante uma calibração foram realizadas cinco medições:

Nº da medição	Valor (mmHg)
1	100,1
2	100,3
3	100,2
4	100,4
5	100,0



2 Cálculo da média

A média é a soma das medições dividida pela quantidade de medições.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n}$$

Neste exemplo:

$$\bar{x} = \frac{100,1 + 100,3 + 100,2 + 100,4 + 100,0}{5}$$

$$\bar{x} = 100,2\ mmHg$$

3 Cálculo do desvio padrão (s)

O desvio padrão mostra a variação entre as medições.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Neste exemplo:

$$s \approx 0,158\ mmHg$$

4 Incerteza padrão Tipo A (desvio padrão da média)

Para o orçamento de incerteza, normalmente utilizamos o desvio padrão da média:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Neste exemplo:

$$u_A = \frac{0,158}{\sqrt{5}}$$

$$u_A = 0,071\ mmHg$$

Onde:

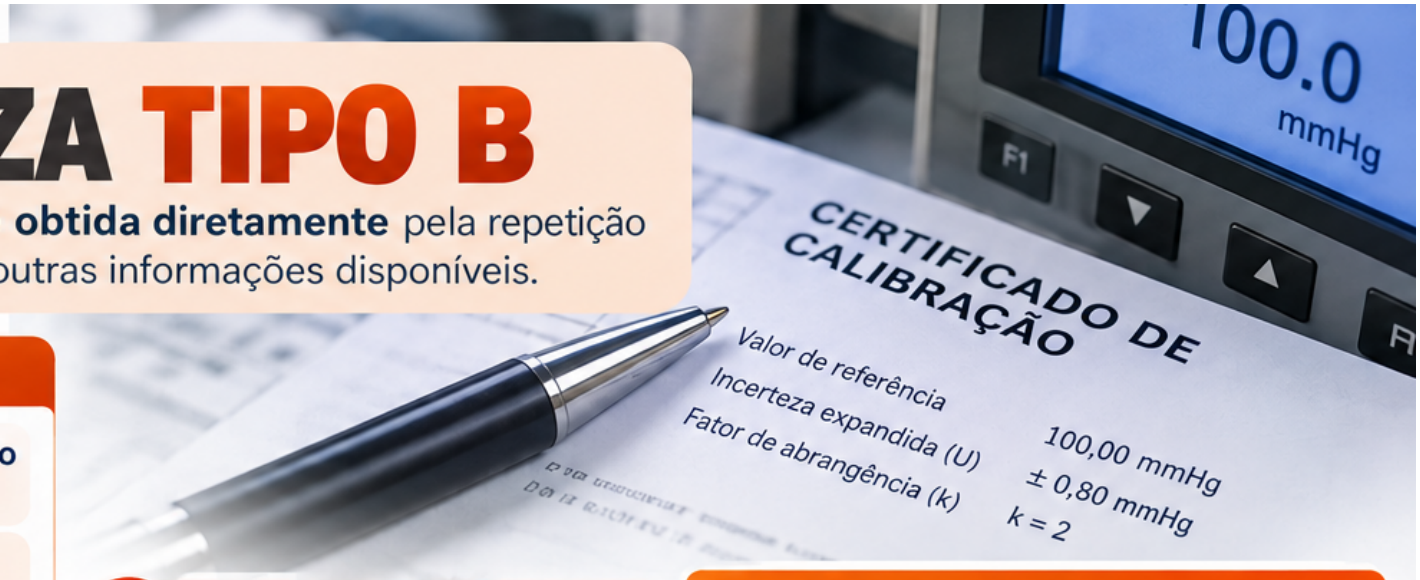
u_A = incerteza padrão Tipo A
s = desvio padrão das medições
n = número de medições

! Importante

A incerteza Tipo A está relacionada à **repetibilidade** das medições e representa a variação observada nos resultados obtidos.

5 INCERTEZA TIPO B

A **incerteza Tipo B não é obtida diretamente** pela repetição das medições. Ela vem de outras informações disponíveis.



Principais fontes da incerteza Tipo B

- **Certificado de calibração do padrão**
  Incerteza informada no certificado
- **Resolução do instrumento**
  Menor divisão indicada
- **Especificação do fabricante**
  Tolerâncias e limites informados
- **Estabilidade**
  Variação ao longo do tempo
- **Deriva**
  Alteração gradual do valor medido
- **Temperatura ambiente**
  Influência das condições ambientais
- **Experiência ou dados históricos**
  Informações de medições anteriores
- **Certificados anteriores**
  Resultados de calibrações anteriores

Ponto importante

Nem todo valor informado pode entrar diretamente no orçamento.

Muitos valores são apresentados como **incerteza expandida (U)** ou como limites de **tolerância.** Antes de utilizar, é necessário transformá-los em **incerteza padrão.**

Transformando em incerteza padrão

Exemplo 1 – Valor do certificado
O certificado informa a incerteza expandida (U) e o fator de abrangência (k).

$$u = \frac{U}{k}$$

Exemplo:
$U = 0{,}80$ mmHg
$k = 2$
$u = 0{,}80/2 = 0{,}40$ mmHg

Exemplo 2 – Resolução (distribuição retangular)
Quando temos apenas a resolução do instrumento.

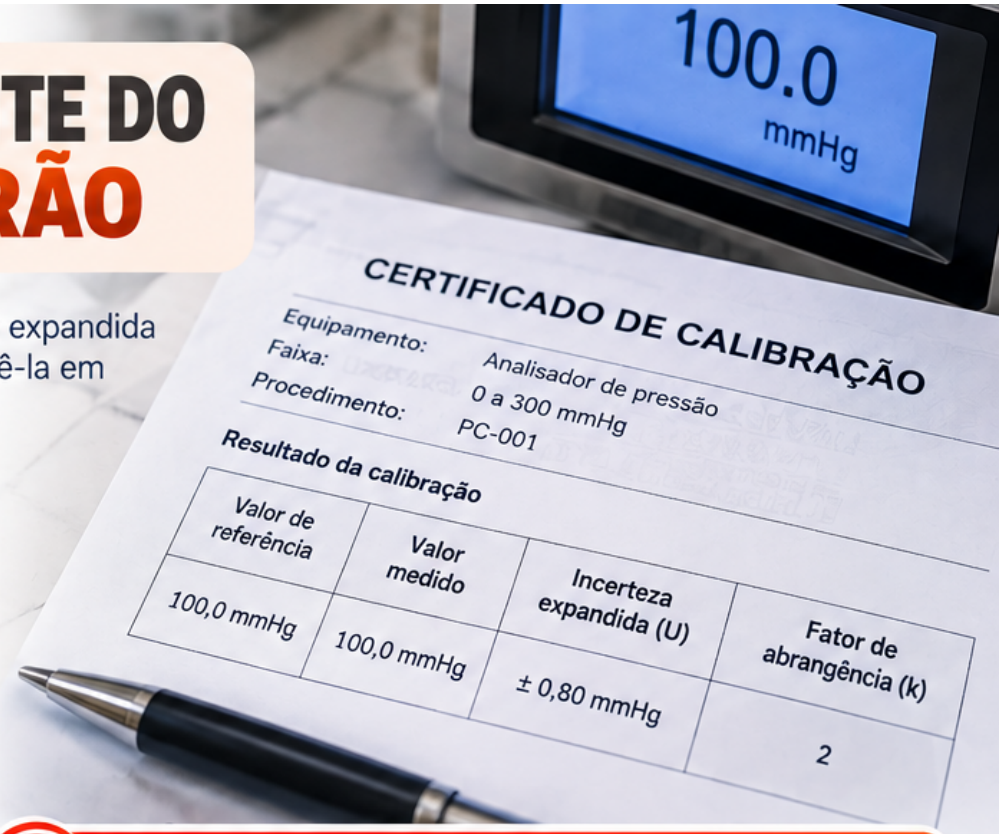
$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Exemplo:
Resolução = 0,10 mmHg
$u = 0{,}10/\sqrt{3} = 0{,}0289$ mmHg

A ***incerteza Tipo B*** permite incluir no cálculo todas as contribuições que **não podem ser avaliadas apenas pela *repetição das medições***, garantindo que o orçamento de incerteza seja mais completo e representativo da realidade da medição.

6 INCERTEZA PROVENIENTE DO CERTIFICADO DO PADRÃO

O certificado de calibração do padrão utilizado na medição informa a incerteza expandida e o fator de abrangência (k). Para utilizá-la no orçamento, é necessário convertê-la em **incerteza padrão.**



1 Informação do certificado

Imagine que o certificado do analisador utilizado na calibração informe:

- **Incerteza expandida: ± 0,80 mmHg**
- **Fator de abrangência: k = 2**

2 Conversão para incerteza padrão

Para utilizar esse valor no orçamento, devemos converter a **incerteza expandida** (U) em **incerteza padrão (u):**

$$u = \frac{U}{k}$$

Aplicando os valores:

$$u = \frac{0{,}80}{2}$$

$$u = 0{,}40\ mmHg$$

3 Resultado

Incerteza padrão do certificado = 0,40 mmHg

Erro comum

Um erro comum é **colocar diretamente os 0,80 mmHg no cálculo.**

Isso estaria errado porque o certificado já apresenta uma **incerteza expandida**, enquanto precisamos inicialmente trabalhar com a **incerteza padrão.**

Lembre-se

Sempre verifique no certificado se o valor informado é a **incerteza expandida (U)** e qual é o **fator de abrangência (k)** para converter corretamente em **incerteza padrão (u).**

7 INCERTEZA DEVIDO À RESOLUÇÃO



A resolução é a menor divisão que o instrumento consegue indicar no visor e também contribui para a incerteza da medição.

1 Resolução do equipamento

Imagine **um equipamento** com resolução de:

0,1 mmHg



2 Fórmula da incerteza

Para uma **distribuição retangular**, uma forma comum de considerar a contribuição da resolução é:

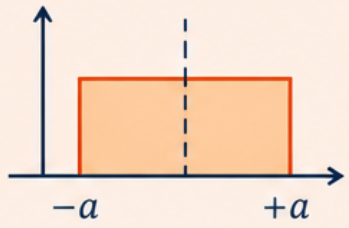
$$u_{res} = \frac{Resolução}{2\sqrt{3}}$$

3 Aplicando os valores

$$u_{res} = \frac{0{,}1}{2\sqrt{3}} \longrightarrow u_{res} \approx \mathbf{0{,}0289}\ mmHg$$

4 Por que aparece o número $\sqrt{3}$?

Estamos considerando uma **distribuição retangular**, na qual os valores dentro do intervalo são considerados igualmente prováveis.



Para uma distribuição retangular, o desvio padrão (u) é dado por:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Importante

- O valor "a" corresponde à metade da resolução (Resolução ÷ 2).
- A divisão por $\sqrt{3}$ vem da teoria estatística de distribuição retangular.
- Esse método é amplamente utilizado em calibrações e segue recomendações da ISO/IEC 98-3 (GUM).

8. Distribuições de probabilidade

Durante o cálculo da incerteza, precisamos definir qual distribuição representa melhor cada contribuição.

1 Distribuição normal

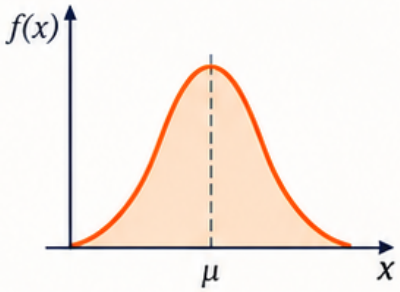
É frequentemente utilizada quando temos:

- certificado de calibração;
- dados estatísticos;
- repetibilidade;
- informações acompanhadas de fator de abrangência.

Quando o certificado informa:
U = 1,0 e k = 2

$$u = \frac{1,0}{2}$$

$$u = 0,5$$



Distribuição normal

2 Distribuição retangular

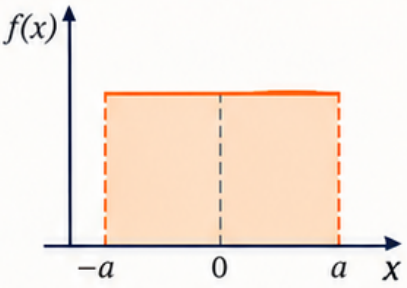
É muito utilizada quando sabemos apenas que o valor pode estar dentro de determinado intervalo.

Exemplos:

- resolução;
- tolerância;
- estabilidade;
- especificações ± fornecidas pelo fabricante.

Quando o valor informado representa um limite **±a**:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$



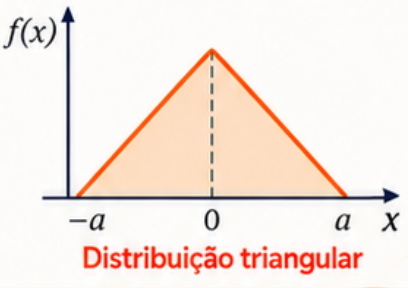
Distribuição retangular

3 Distribuição triangular

Pode ser utilizada quando os valores próximos do centro são considerados mais prováveis do que os extremos.

Nesse caso:

$$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$$



Distribuição triangular

A **escolha da distribuição** depende da forma como a informação é apresentada e do comportamento esperado daquela contribuição.

9 COEFICIENTE DE SENSIBILIDADE



Nem sempre uma mudança de uma unidade na grandeza de entrada produz uma mudança igual no resultado. Por isso, em alguns casos é necessário utilizar um **coeficiente de sensibilidade**.

O que é?

O coeficiente de sensibilidade (c_i) representa **quanto o resultado da medição varia em relação a uma variação na grandeza de entrada**.

Quando $c_i = 1$?

Em vários modelos simples de calibração, o coeficiente de sensibilidade será:

$$c_i = 1$$

Nesse caso, o valor da contribuição para a incerteza **permanece igual** ao valor da incerteza padrão da grandeza de entrada.

Como é utilizado?

A contribuição para a incerteza de cada grandeza de entrada é calculada por:

$$u_i = c_i \times u(x_i)$$

u_i = incerteza padrão da contribuição
c_i = coeficiente de sensibilidade
$u(x_i)$ = incerteza padrão da grandeza de entrada

Exemplos

1 Modelo simples ($c_i = 1$)

Em uma calibração de pressão, o resultado é diretamente afetado pela medição do padrão.

$u(x_i) = 0{,}40\ mmHg$ (incerteza padrão do certificado)
$c_i = 1$

$$u_i = c_i \times u(x_i)$$
$$u_i = 1 \times 0{,}40$$
$$u_i = 0{,}40\ mmHg$$

2 Modelo com coeficiente diferente de 1

Suponha que o resultado final seja calculado por:

$$R = 2 \times x$$

Nesse caso, uma variação de 1 unidade em x provoca uma variação de 2 unidades no resultado. Assim, o coeficiente de sensibilidade será:

$$c_i = 2$$

$$u_i = c_i \times u(x_i)$$
$$u_i = 2 \times 0{,}30$$
$$u_i = 0{,}60$$

Como obter o coeficiente de sensibilidade?

O coeficiente de sensibilidade é obtido pela derivada parcial do modelo de medição em relação à grandeza de entrada:

$$c_i = \frac{\partial R}{\partial x_i}$$

Exemplo:
Se $R = 2x$, então:

$$c_i = \frac{\partial(2x)}{\partial x} = 2$$

10 CALCULANDO A INCERTEZA COMBINADA



Depois de determinar todas as incertezas padrão, precisamos combiná-las.
Não devemos simplesmente **somar** os valores.

1 Incertezas padrão obtidas

Após identificar e calcular todas as contribuições, temos as seguintes incertezas padrão:

Fonte de incerteza	Símbolo	Valor (mmHg)
Repetibilidade	u_1	0,20
Certificado do padrão	u_2	0,40
Resolução	u_3	0,03
Estabilidade	u_4	0,10

2 Fórmula da incerteza combinada

As incertezas padrão são combinadas utilizando a raiz quadrada da soma dos quadrados:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \cdots + u_n^2}$$

Onde:
u_c = incerteza padrão combinada
$u_1, u_2, \ldots, u_n$ = incertezas padrão de cada contribuição.

3 Aplicando os valores do exemplo

Substituindo os valores obtidos:

$$u_c = \sqrt{0{,}20^2 + 0{,}40^2 + 0{,}03^2 + 0{,}10^2}$$

$$u_c = \sqrt{0{,}04 + 0{,}16 + 0{,}0009 + 0{,}01}$$

$$u_c = \sqrt{0{,}2109}$$

Importante

Não devemos somar diretamente as incertezas padrão, pois isso superestimaria o resultado. A combinação pela raiz da soma dos quadrados considera que as contribuições são **independentes.**

4 Resultado

Incerteza padrão combinada:

$$u_c \approx 0{,}459 \approx \mathbf{0{,}46}\ mmHg$$

11 CALCULANDO A INCERTEZA EXPANDIDA



A incerteza combinada ainda não é, normalmente, o valor apresentado como resultado final. Precisamos calcular a **incerteza expandida.**

1 Fórmula da incerteza expandida

A **incerteza expandida** (U) é calculada multiplicando a incerteza padrão combinada (u_c) por um **fator de abrangência** (k).

$$U = k \times u_c$$

Onde:

U = incerteza expandida
k = fator de abrangência
u_c = incerteza padrão combinada

2 Valores do exemplo

Do cálculo da etapa anterior, obtivemos:

$$u_c = 0{,}459$$

Utilizaremos o fator **de abrangência:**

$$k = 2$$

3 Aplicando na fórmula

Substituindo os valores na fórmula:

$$U = k \times u_c$$
$$U = 2 \times 0{,}459$$
$$U = 0{,}918$$

4 Resultado

Após arredondamento **apropriado:**

Incerteza expandida:

$$U \approx \mathbf{0{,}92}$$

Sobre o fator de abrangência (k)

O fator de abrangência está relacionado ao nível de confiança desejado para o resultado.

- $k = 2$ → aproximadamente 95% de confiança (distribuição normal)
- Outros valores de k podem ser utilizados de acordo com o nível de confiança e o documento de referência aplicável.

Importante

- A incerteza expandida é o valor geralmente apresentado no certificado de calibração.
- O fator de abrangência deve ser informado no resultado (ex.: U = 0,92 *mmHg*, k = 2).
- O arredondamento deve seguir as recomendações do documento de referência (ex.: ISO/IEC 98-3 – GUM) e a prática do laboratório.

12 COMO APRESENTAR O RESULTADO



Após calcular a incerteza expandida, o resultado da calibração deve ser apresentado de forma clara e padronizada, informando o valor medido e a incerteza associada.

1 Resultado da medição

Se o valor médio medido foi:

100,20 mmHg

e a incerteza expandida calculada foi:

0,92 mmHg

2 Apresentação do resultado

O resultado pode ser apresentado como:

$$100{,}20 \pm 0{,}92\ mmHg$$

para o fator de abrangência correspondente (ex.: $k = 2$, aproximadamente 95% de confiança).

Importante

- O resultado deve apresentar o valor medido e a incerteza expandida.
- Deve ser informado o fator de abrangência (k) e o nível de confiança correspondente.
- A incerteza deve ser apresentada com o mesmo número de casas decimais do valor medido.
- Também devem ser informadas as condições e o método utilizados para obtenção da incerteza.

3 Exemplo de apresentação em certificado

Ponto de calibração (mmHg)	Valor medido (mmHg)	Incerteza expandida (mmHg)	Fator de abrangência (k)
0	0,02	0,92	2
50	50,01	0,92	2
100	100,20	0,92	2
200	200,15	0,92	2

4 Informações adicionais no certificado

Em um certificado de calibração, além do resultado, devem ser informadas adequadamente:

- o método de calibração utilizado;
- as condições ambientais (temperatura, umidade, etc:);
- os padrões e rastreabilidade;
- o fator de abrangência e o nível de confiança;
- uma declaração sobre a incerteza de medição;
- outras informações relevantes conforme o procedimento e a norma aplicável.

13 EXEMPLO COMPLETO DE ORÇAMENTO DE INCERTEZA

Considere uma calibração de pressão. A seguir, é apresentado um exemplo completo de cálculo da incerteza, desde a identificação das contribuições até o resultado final.



1 Dados da calibração

Grandeza	Pressão
Valor de referência	100 mmHg
Média encontrada	100,20 mmHg
Unidade	mmHg

2 Contribuições para a incerteza

Fonte	Valor original	Distribuição	Divisor	Incerteza padrão (mmHg)
Repetibilidade	0,20	Normal	—	0,20
Certificado padrão	0,80	Normal	2	0,40
Resolução	0,10	Retangular	$2\sqrt{3}$	0,0289
Estabilidade	±0,20	Retangular	$\sqrt{3}$	0,1155

Observações sobre as contribuições

- A repetibilidade foi obtida pela análise estatística das medições.
- A incerteza do certificado do padrão foi convertida de expandida para padrão (U/k), conforme $k = 2$.
- A resolução e a estabilidade foram consideradas com distribuição retangular, utilizando os divisores $2\sqrt{3}$ e $\sqrt{3}$, respectivamente.

3 Cálculo da incerteza combinada

A incerteza padrão combinada (u_c) é calculada pela raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas padrão:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}$$

Substituindo os valores:

$$u_c = \sqrt{0{,}20^2 + 0{,}40^2 + 0{,}0289^2 + 0{,}1155^2}$$

$$u_c = \sqrt{0{,}04 + 0{,}16 + 0{,}000835 + 0{,}013341}$$

$$u_c = \sqrt{0{,}214176}$$

$$u_c \approx 0{,}463\ mmHg$$

4 Cálculo da incerteza expandida

A incerteza expandida (U) é obtida multiplicando a incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência (k):

$$U = k \times u_c$$

Utilizando:

$u_c = 0{,}463\ mmHg$

$k = 2$ (aproximadamente 95% de confiança)

Então:

$$U = 2 \times 0{,}463$$

$$U = 0{,}926\ mmHg$$

5 Resultado final

O resultado da calibração de pressão pode ser apresentado como:

$$100{,}20 \pm 0{,}93\ mmHg$$

para o fator de abrangência correspondente ($k = 2$, aproximadamente 95% de confiança).

6 Informações que devem constar no certificado

- Valor medido e incerteza expandida;
- Fator de abrangência (k) e nível de confiança correspondente;
- Método de calibração utilizado;
- Condições ambientais (temperatura, umidade, etc.);
- Padrões utilizados e rastreabilidade;
- Declaração sobre a incerteza de medição;
- Demais informações relevantes conforme a norma aplicável.

14 E O ERRO DE MEDIÇÃO?

A incerteza não **deve ser confundida com o erro.**
São conceitos diferentes e fornecem informações distintas sobre o resultado.



1 O que é o erro?

O erro de medição é a diferença entre o valor indicado pelo equipamento e o valor de referência (valor verdadeiro ou convencionalmente verdadeiro).

$$Erro = Valor\ indicado - Valor\ de\ referência$$

Exemplo:

Valor de referência	100,00 $mmHg$
Valor indicado (média)	100,20 $mmHg$
Erro	100,20 – 100,00 **= +0,20 *mmHg***

Portanto:

$$Erro = +0{,}20\ mmHg$$

Principais diferenças

Erro de medição	Incerteza de medição
É a diferença entre o valor indicado e o valor de referência.	Representa a faixa de valores onde o valor verdadeiro é esperado.
Indica o quanto o resultado está deslocado.	Indica a qualidade e a confiabilidade do resultado.
Pode ser positivo, negativo ou zero.	Sempre é apresentada como um valor ±.
Não considera todas as fontes de variação.	Considera todas as fontes de incerteza e um nível de confiança.

2 O que é a incerteza?

A **incerteza de medição** representa uma faixa de valores dentro da qual o valor verdadeiro do mensurando é esperado, com um nível de confiança definido.

Incerteza expandida (U) calculada:

$$\pm 0{,}93\ mmHg$$

Esse valor é obtido a partir da combinação de todas as fontes de incerteza (repetibilidade, certificado do padrão, resolução, estabilidade, entre outras) e multiplicado pelo fator de abrangência (k).

3 Resultado da calibração

O resultado pode ser apresentado informando o valor medido, o erro e a incerteza expandida:

$$100{,}20 \pm 0{,}93\ mmHg$$

Erro de medição: $+0{,}20\ mmHg$
(para $k = 2$, aproximadamente 95% de confiança)

15 ERRO × INCERTEZA × TOLERÂNCIA

São conceitos **diferentes** e não devem ser utilizados como sinônimos.



1 Erro

Diferença entre a indicação do equipamento e o valor de referência (valor verdadeiro ou convencionalmente verdadeiro).

$$Erro = Valor\ indicado - Valor\ de\ referência$$

Exemplo:

Valor de referência	100,00 *mmHg*
Valor indicado	100,20 *mmHg*
Erro	100,20 – 100,00 = **+0,20 *mmHg***

O erro indica o quanto o resultado está deslocado do valor de referência. Ele pode ser positivo, negativo ou zero.

2 Incerteza

Expressa a dúvida associada ao resultado da medição, considerando todas as fontes de variação (repetibilidade, certificado do padrão, resolução, estabilidade, entre outras).

$$\textbf{Resultado} = Valor\ medido \pm U$$

onde U é a incerteza expandida.

Exemplo:

100,20 ± 0,93 *mmHg*

($k = 2$, aproximadamente 95% de confiança)

A **incerteza** informa a faixa de valores dentro da qual o valor verdadeiro é esperado, com um nível de confiança definido.

3 Tolerância / EMA

Representa o limite considerado aceitável de acordo com o critério definido, como normas, especificações do fabricante ou requisitos regulatórios.

Exemplo de EMA (Equipamento de medição):

Para um manômetro de pressão, um EMA típico pode ser:

±3 *mmHg*

(valor ilustrativo, pode variar conforme a norma e o tipo de equipamento)

A **tolerância/EMA** define qual é o limite máximo permitido para que o equipamento seja considerado conforme.
Ela não é um valor de medição, mas sim um critério de aceitação.

Comparação entre os conceitos	Erro	Incerteza	Tolerância / EMA
O que representa	Diferença entre a indicação e o valor de referência.	Dúvida associada ao resultado da medição.	Limite aceitável definido por norma, fabricante ou requisito.
Como é expresso	Em unidades de medição (ex.: *mmHg*).	Como um valor ± (incerteza expandida), com fator de abrangência (*k*).	Em unidades de medição (ex.: *mmHg*).
Pode ser positivo, negativo ou zero?	Sim.	Sempre positivo (valor ±).	Sempre positivo (limite).
O que indica	O quanto o resultado está deslocado.	A confiabilidade do resultado.	O limite para aceitação do equipamento.

Importante

- Erro, incerteza e tolerância/EMA são conceitos diferentes e não devem ser utilizados como sinônimos.
- Um resultado pode estar dentro da tolerância mesmo apresentando erro.
- A incerteza deve ser considerada na avaliação da conformidade.

16 A INCERTEZA ENTRA NA DECISÃO DE CONFORMIDADE?

Pode entrar. A definição da regra de decisão é importante quando se declara a conformidade de um equipamento, pois não basta apenas observar se o valor central está dentro ou fora da tolerância.



1 Exemplo prático

Resultado da medição:	**100,0 ± 2,0 *mmHg***
Limite máximo permitido (EMA):	101,0 *mmHg*
Limite mínimo (exemplo):	99,0 *mmHg*

2 Análise do resultado

O valor medido é 100,0 *mmHg* com incerteza expandida de ± 2,0 *mmHg*.

Intervalo associado à incerteza:

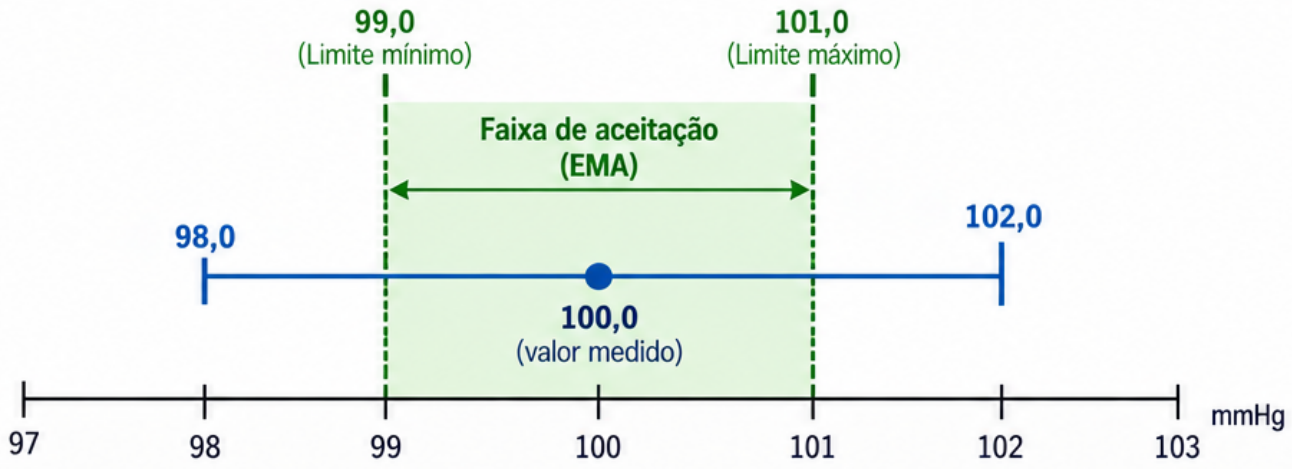
100,0 − 2,0 a 100,0 + 2,0

98,0 a 102,0 *mmHg*

Observe

Embora o valor central (100,0 mmHg) esteja dentro do limite máximo permitido (101,0 mmHg), o intervalo associado à incerteza (98,0 a 102,0 mmHg) ultrapassa o limite de aceitação.

3 Representação gráfica



Conclusão

Como parte do intervalo associado à incerteza (até 102,0 mmHg) ultrapassa o limite máximo permitido (101,0 mmHg), o resultado **não pode ser considerado conforme**, dependendo da regra de decisão adotada.

Importância da regra de decisão

- A regra de decisão define como a incerteza será considerada na avaliação da conformidade.
- Existem diferentes abordagens (ex.: ILAC-G8, ISO 14253).
- É fundamental que a regra de decisão esteja definida no procedimento e no certificado de calibração.
- Assim, evita-se interpretações inconsistentes e garante-se uma avaliação técnica e transparente.

17 PRINCIPAIS ERROS AO CALCULAR INCERTEZA

Evite esses **erros para obter** um orçamento de incerteza correto, **consistente** e tecnicamente confiável.



1 Somar todas as incertezas diretamente

A incerteza combinada não deve ser obtida pela soma direta das incertezas. A combinação normalmente é realizada pela raiz quadrada da soma dos quadrados (método RSS).

Errado

$$u_1 + u_2 + u_3$$

Correto

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

2 Usar a incerteza expandida do certificado sem dividir por k

A incerteza informada no certificado do padrão normalmente é a incerteza expandida (U). Para utilizá-la no orçamento, é necessário converter para incerteza padrão, dividindo pelo fator de abrangência (k).

Exemplo:

Incerteza expandida do certificado (U): **0,80**

Fator de abrangência (k): **2**

Incerteza padrão (contribuição):

$$\frac{0{,}80}{2} = 0{,}40$$

3 Confundir erro com incerteza

Erro e incerteza são conceitos diferentes.

Erro

Diferença entre o valor indicado e o valor de referência.

$$Erro = \text{Valor indicado} - \text{Valor de referência}$$

Incerteza

Expressa a dúvida associada ao resultado da medição, representando uma faixa de valores.

Resultado:

$$100{,}20 \pm 0{,}93\ mmHg$$

4 Ignorar a resolução

A resolução do equipamento pode representar uma contribuição relevante para a incerteza, principalmente em equipamentos com baixa resolução ou em medições mais precisas.

Exemplo:

Resolução: 0,10 (distribuição retangular)

$$u = \frac{0{,}10}{2\sqrt{3}} = 0{,}0289$$

⚠ Em algumas medições, a resolução pode ser uma das principais fontes de incerteza.

5 Escolher um divisor sem justificar

Não basta dividir automaticamente por $\sqrt{3}$, $\sqrt{6}$ ou 2. O divisor depende da informação disponível e da distribuição de probabilidade adotada.

Distribuição	Informação disponível	Divisor
Normal	Desvio padrão (s)	—
Normal	Incerteza expandida (U) com $k = 2$	2
Retangular	Limites ($\pm a$)	$\sqrt{3}$
Retangular	Resolução (r)	$2\sqrt{3}$
Triangular	Limites ($\pm a$)	$\sqrt{6}$

6 Colocar fontes de incerteza sem avaliar o modelo

Um orçamento maior não significa necessariamente um orçamento melhor. As fontes de incerteza devem possuir relação técnica com o processo de medição e com o modelo utilizado.

Exemplo de erro

- Incluir fontes que não têm relação com a medição.
- Considerar várias fontes desnecessárias.
- Aumentar o orçamento sem justificativa.

Exemplo correto

- Incluir apenas as fontes relevantes para o modelo de medição.
- Justificar cada fonte e o divisor adotado.
- Utilizar informações técnicas e dados reais da calibração.

IMPORTANTE

Um orçamento de incerteza deve ser baseado em informações técnicas, justificativas adequadas e na metodologia correta, conforme guias e normas aplicáveis (ex.: JCGM 100, ILAC-G8, ISO 14253, entre outras).

18 FLUXO SIMPLIFICADO
PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Passo a passo para elaborar um orçamento de incerteza de forma organizada.

1 Definir o mensurando

Identificar claramente qual grandeza está sendo medida.

Exemplo: pressão, temperatura, vazão, tensão, corrente, entre outros.

2 Definir o modelo de medição

Descrever como a medição será realizada, incluindo:

- equipamento e padrão utilizados
- condições de medição
- método ou procedimento
- modelo matemático (relação entre as grandezas)

3 Identificar as fontes de incerteza

Listar todas as fontes que podem influenciar o resultado.

Exemplos: repetibilidade, certificado do padrão, resolução, estabilidade, condições ambientais, histerese, linearidade, entre outras.

4 Separar Tipo A e Tipo B

Classificar cada fonte de incerteza:

- **Tipo A:** obtida por análise estatística de uma série de medições.
- **Tipo B:** obtida por outras informações (certificados, especificações do fabricante, normas, experiência, etc.).

5 Converter cada fonte em incerteza padrão

Converter os valores das fontes de incerteza para incerteza padrão (u), utilizando a distribuição de probabilidade adequada.

Exemplos:

- **Normal:** dividir por k (ex.: 2, se o certificado fornecer U com $k = 2$).
- **Retangular:** dividir por $\sqrt{3}$ (ou $2\sqrt{3}$, conforme o caso).

6 $f(x)$ Aplicar coeficientes de sensibilidade

Considerar a influência de cada fonte no resultado final por meio do coeficiente de sensibilidade (c_i).

- Em muitos casos simples, $c_i = 1$.
- Em medições indiretas, o coeficiente pode ser diferente e deve ser obtido a partir do modelo matemático.

7 Σ Calcular a incerteza combinada

Combinar todas as incertezas padrão utilizando a raiz quadrada da soma dos quadrados (RSS).

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \cdots + u_n^2}$$

8 Determinar o fator de abrangência

Definir o valor de k de acordo com o nível de confiança desejado.

- Normalmente $k = 2$ (aproximadamente 95% de confiança).
- Outros valores podem ser utilizados conforme o objetivo e a distribuição.

9 U Calcular a incerteza expandida

Multiplicar a incerteza combinada pelo fator de abrangência.

$$U = k \times u_c$$

10 Expressar corretamente o resultado

Apresentar o valor medido com a incerteza expandida, a unidade e o fator de abrangência correspondente.

Exemplo: $\mathbf{100{,}20 \pm 0{,}93\ mmHg}$

($k = 2$, aproximadamente 95% de confiança)

19 FÓRMULAS PARA GUARDAR



Principais expressões utilizadas no cálculo da incerteza de medição.

1 Média

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Onde:

- $\bar{x}$ = média dos valores medidos
- x_i = cada valor individual medido
- n = número de medições

Utilização:
Representa o valor médio das medições realizadas.

2 Incerteza Tipo A da média

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Onde:

- u_A = incerteza padrão Tipo A da média
- s = desvio padrão da amostra
- n = número de medições

Utilização:
Avalia a contribuição da repetibilidade a partir de uma série de medições.

3 Certificado com fator k

$$u = \frac{U}{k}$$

Onde:

- u = incerteza padrão
- U = incerteza expandida informada no certificado
- k = fator de abrangência do certificado

Utilização:
Converte a incerteza expandida do certificado para incerteza padrão.

4 Distribuição retangular

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Onde:

- u = incerteza padrão
- a = semi-amplitude do intervalo (limite)

Utilização:
Aplicada quando o valor pode estar em qualquer ponto do intervalo com a mesma probabilidade.

5 Distribuição triangular

$$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

Onde:

- u = incerteza padrão
- a = semi-amplitude do intervalo (limite)

Utilização:
Aplicada quando valores próximos ao centro são mais prováveis do que os extremos.

6 Contribuição com coeficiente de sensibilidade

$$u_i = c_i \times u(x_i)$$

Onde:

- u_i = incetribuição da fonte i
- c_i = coeficiente de sensibilidade
- $u(x_i)$ = incerteza padrão da grandeza x_i

Utilização:
Considera a influência da fonte de incerteza no resultado por meio do coeficiente de sensibilidade.

7 Incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2}$$

Onde:

- u_c = incerteza padrão combinada
- u_i = incertezas padrão individuais

Utilização:
Combina todas as contribuições de incerteza utilizando a raiz quadrada da soma dos quadrados (método RSS).

8 Incerteza expandida

$$U = k \times u_c$$

Onde:

- U = incerteza expandida
- k = fator de abrangência
- u_c = incerteza padrão combinada

Utilização:
Fornece a incerteza final do resultado, associada a um determinado nível de confiança (geralmente $k = 2$ para ≈ 95%).

DICA

Utilize as fórmulas sempre com base no modelo de medição e nas informações disponíveis. A escolha da distribuição, do coeficiente de sensibilidade e das fontes de incerteza deve ser tecnicamente justificada.

20 CHECKLIST ANTES DE FINALIZAR O CÁLCULO DA INCERTEZA



Confira os principais pontos para garantir um orçamento de incerteza correto, consistente e tecnicamente confiável.

✓	Item	O que verificar?
☐	1 O mensurando foi definido?	Identifique claramente qual grandeza está sendo medida (ex.: pressão, temperatura, vazão, tensão, etc.).
☐	2 Todas as unidades estão compatíveis?	Verifique se todas as grandezas estão na mesma unidade e se não há necessidade de conversão.
☐	3 Foram identificadas as principais fontes de incerteza?	Liste todas as fontes relevantes para o modelo de medição (repetibilidade, padrão, resolução, estabilidade, ambiente, etc.).
☐	4 A repetibilidade foi corretamente calculada?	Confirme se o desvio padrão e a incerteza da média foram calculados corretamente ($u_A = s/\sqrt{n}$).
☐	5 A incerteza do padrão foi retirada do certificado correto?	Utilize o certificado atualizado e verifique se a grandeza, faixa e condições de medição são compatíveis.
☐	6 O fator k do certificado foi considerado?	Se o certificado informa a incerteza expandida (U), converta para incerteza padrão dividindo pelo fator de abrangência (k).
☐	7 A resolução foi avaliada?	Verifique se a resolução do equipamento representa uma contribuição relevante para o resultado.
☐	8 As distribuições utilizadas foram justificadas?	Defina a distribuição adequada (normal, retangular, triangular, etc.) e justifique com base nas informações disponíveis.
☐	9 Todas as contribuições foram transformadas em incerteza padrão?	Converta cada fonte para incerteza padrão (u), utilizando a distribuição e o divisor adequados.
☐	10 Os coeficientes de sensibilidade foram avaliados?	Considere a influência de cada fonte no resultado por meio do coeficiente de sensibilidade (c_i).
☐	11 A incerteza combinada foi calculada pela raiz da soma dos quadrados?	Combine todas as incertezas padrão utilizando o método RSS: $u_c = \sqrt{\sum u_i^2}$
☐	12 A incerteza expandida foi calculada?	Multiplique a incerteza combinada pelo fator de abrangência (k) definido (geralmente $k = 2$ para 95% de confiança).
☐	13 O resultado foi arredondado adequadamente?	Verifique o número de casas decimais conforme as boas práticas e a norma aplicável.
☐	14 A regra de decisão foi considerada quando houver declaração de conformidade?	Avalie se o intervalo associado à incerteza pode influenciar a decisão de conformidade e aplique a regra de decisão definida no procedimento.

DICA FINAL

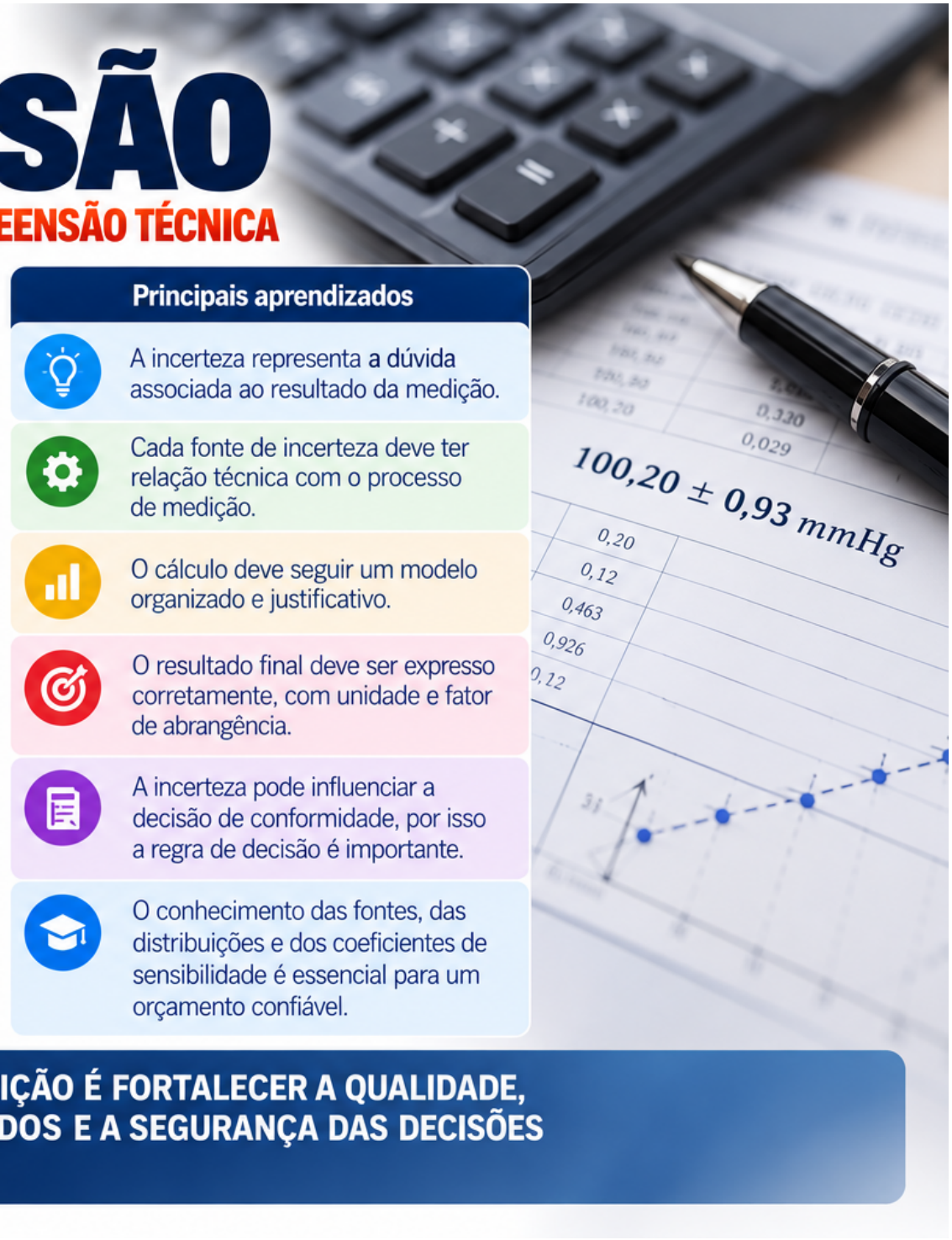
Um orçamento de incerteza bem elaborado deve ser baseado em informações técnicas, justificativas adequadas e na metodologia correta, conforme guias e normas aplicáveis (ex.: JCGM 100, ILAC-G8, ISO 14253, entre outras).

ATENÇÃO

Um orçamento maior não significa necessariamente um orçamento melhor. O importante é incluir apenas as fontes relevantes, com justificativas técnicas e dados confiáveis.

21 CONCLUSÃO

MAIS DO QUE NÚMEROS, COMPREENSÃO TÉCNICA



Calcular a incerteza de medição **não significa apenas inserir números em uma fórmula.**

O ponto mais importante é **compreender de onde vem cada contribuição e por que ela influencia o resultado.**

O profissional deve ser capaz de olhar para o processo de calibração e responder:

O que pode fazer meu resultado variar?

A partir dessa pergunta, é possível construir um orçamento de incerteza **tecnicamente coerente**, transformar cada contribuição em **incerteza padrão**, combinar os valores e chegar à **incerteza expandida**.

Com a prática, o cálculo deixa de parecer apenas estatística e passa a fazer parte natural da **análise metrológica**.

Principais aprendizados

- A incerteza representa a dúvida associada ao resultado da medição.
- Cada fonte de incerteza deve ter relação técnica com o processo de medição.
- O cálculo deve seguir um modelo organizado e justificativo.
- O resultado final deve ser expresso corretamente, com unidade e fator de abrangência.
- A incerteza pode influenciar a decisão de conformidade, por isso a regra de decisão é importante.
- O conhecimento das fontes, das distribuições e dos coeficientes de sensibilidade é essencial para um orçamento confiável.

ENTENDER A INCERTEZA DE MEDIÇÃO É FORTALECER A QUALIDADE, A CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS E A SEGURANÇA DAS DECISÕES NA ENGENHARIA CLÍNICA.