Apêndice F

ANÁLISE DE INCERTEZA EXPERIMENTAL

F.1 INTRODUÇÃO

Dados de testes experimentais são freqüentemente utilizados para complementar análises de engenharia como uma base para o projeto. Nem todos os dados são igualmente bons; a validade dos dados deve ser documentada antes que os resultados do teste sejam usados no projeto. A análise de incerteza é o procedimento usado para quantificar a validade dos dados e sua acurácia.

A análise de incerteza também é útil durante o projeto do experimento. Estudos cuidadosos podem indicar fontes potenciais de erros inaceitáveis e sugerir métodos aperfeiçoados de medição.

F.2 TIPOS DE ERROS

Erros estão sempre presentes quando medições experimentais são feitas. Além dos enganos grosseiros do experimentalista, os erros podem ser de dois tipos. O erro fixo (ou sistemático) causa repetidas medições erradas da mesma quantidade em cada tentativa. O erro fixo é o mesmo para cada leitura e pode ser eliminado pela calibração ou correção adequada. O erro aleatório (não repetitivo) é diferente para cada leitura e, portanto, não pode ser eliminado. Os fatores que introduzem o erro aleatório são incertos por sua própria natureza. O objetivo da análise de incerteza é estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

Admitimos que o equipamento foi construído corretamente e calibrado de forma adequada para eliminar os erros fixos. Admitimos que os instrumentos têm resolução apropriada e que as flutuações nas leituras não são excessivas. Admitimos também que observações são feitas e registradas com o devido cuidado de modo que só os erros aleatórios permanecem.

F.3 ESTIMATIVA DE INCERTEZA

Nossa meta é estimar a incerteza de medições experimentais e de resultados calculados devida aos erros aleatórios. O procedimento tem três etapas:

1. Estimar o intervalo de incerteza para cada quantidade medida.
2. Enunciar o limite de confiança em cada medição.
3. Analisar a propagação de incerteza nos resultados calculados a partir dos dados experimentais.

A seguir delineamos o procedimento para cada etapa e ilustramos aplicações com exemplos.

Etapa 1. *Estimar o intervalo da incerteza de medição.* Designe as variáveis medidas numa experiência como $x_1, x_2, ..., x_n$. Um modo possível para determinar o intervalo de incerteza para cada variável seria repetir cada medição muitas vezes. O resultado seria uma distribuição de dados para cada variável. Os erros aleatórios na medição em geral produzem uma distribuição de freqüência *normal* (*gaussiana*) dos valores medidos. A dispersão dos dados para uma distribuição normal caracteriza-se pelo desvio padrão, σ. O intervalo de incerteza para cada variável medida, x_i, pode ser enunciado como $\pm n\sigma_i$, onde $n = 1, 2$ ou 3.

Para dados normalmente distribuídos, mais de 99% dos valores medidos de x_i situam-se dentro de $\pm 3\sigma_i$ do valor médio, 95% situam-se dentro de $\pm 2\sigma_i$ e 68% situam-se dentro de $\pm \sigma_i$ do valor médio do conjunto de dados [1]. Dessa forma, seria possível quantificar os erros esperados dentro de qualquer *limite de confiança* desejável se um conjunto de dados estatisticamente significativos estivesse disponível.

Em geral, o método das medições repetidas é impraticável. Na maioria das aplicações é impossível obter dados suficientes para uma amostra estatisticamente significativa, em virtude do tempo e custo excessivos. Contudo, a distribuição normal sugere diversos conceitos importantes:

1. Os pequenos erros são mais prováveis do que os grandes.
2. Os erros para mais e para menos são igualmente prováveis.
3. Nenhum erro máximo finito pode ser especificado.

Uma situação mais típica do trabalho de engenharia é uma experiência de "uma só amostra", na qual apenas uma medição é feita para cada ponto [2]. Uma estimativa razoável da incerteza de medição devida ao erro aleatório numa experiência de uma só amostra é geralmente mais ou menos metade da menor divisão da escala (a *contagem mínima*) do instrumento. Contudo, essa abordagem também deve ser usada com cautela, conforme ilustrado no exemplo seguinte.

EXEMPLO F.1 — Incerteza na Leitura de um Barômetro

A altura observada da coluna de mercúrio de um barômetro é $h = 752{,}6$ mm. A contagem mínima na escala do vernier é de 0,1 mm, de modo que o erro provável da medição pode ser estimado como $\pm$ 0,05 mm.

Provavelmente, uma medição não poderia ser feita com tal precisão. Os cursores e o menisco do barômetro devem ser alinhados pelo olho humano. O cursor tem uma contagem mínima de 1 mm. Como estimativa conservadora, uma medição poderia ser feita dentro do milímetro mais próximo. O valor provável de uma só medição seria então expresso como 752,6 $\pm$ 0,5 mm. A incerteza relativa na altura barométrica seria determinada como

$$u_h = \pm \frac{0{,}5 \text{ mm}}{752{,}6 \text{ mm}} = \pm\, 0{,}000664 \quad \text{ou} \quad \pm\, 0{,}0664\%$$

Comentários:

1. Um intervalo de incerteza de ± 0,1% corresponde a um resultado especificado dentro de três dígitos significativos; essa acurácia é suficiente para a maioria dos trabalhos de engenharia.
2. A medição da altura do barômetro foi acurada, conforme mostrado pela estimativa de incerteza. Mas foi acurada o suficiente? A temperaturas ambientes típicas, a leitura observada do barômetro deve ser reduzida por uma correção devida à temperatura de quase 3 mm! Esse é um exemplo de erro fixo que requer um fator de correção.

Etapa 2. *Enunciar o limite de confiança de cada medição.* O intervalo de incerteza de uma medição deve ser enunciado em probabilidades especificadas. Por exemplo, pode-se escrever $h = 752{,}6 \pm 0{,}5$ mm (20 para 1). Isto significa que aposta-se 20 por 1 que a altura da coluna de mercúrio realmente está dentro de $\pm$ 0,5 mm do valor declarado. É óbvio [3] que "... a especificação de tais probabilidades só pode ser feita pelo experimentalista com base na ... experiência total de laboratório. Não há substituto para o julgamento sólido de engenharia na estimativa da incerteza de uma variável medida."

O enunciado do intervalo de confiança baseia-se no conceito de desvio padrão para uma distribuição normal. Probabilidades de cerca de 370 por 1 correspondem a $\pm\, 3\sigma$; 99,7% de todas as leituras futuras são esperadas cair dentro do intervalo. Probabilidades de cerca de 20 por 1 correspondem a $\pm\, 2\sigma$ e de 3 por 1 correspondem a limites de confiança de $\pm\, \sigma$. Probabilidades de 20 por 1 são as utilizadas, tipicamente, nos trabalhos de engenharia.

Etapa 3. *Analisar a propagação de incerteza nos cálculos.* Suponha que medições das variáveis independentes, x_1, x_2, ..., x_n, são feitas no laboratório. A incerteza relativa de cada quantidade medida independentemente é estimada como u_i. As medições são usadas para calcular algum resultado, R, para o experimento. Desejamos analisar como os erros nos x_i propagam-se no cálculo de R a partir dos valores medidos.

Em geral, R pode ser expresso matematicamente como $R = R(x_1, x_2, ..., x_n)$. O efeito sobre R de um erro na medição de um x_i individual pode ser estimado por analogia com a derivada de uma função [4]. Uma variação, δx_i, em x_i, causaria a variação de δR_i em R,

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i}\delta x_i$$

A variação relativa em R é

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial x_i}\delta x_i = \frac{x_i}{R}\frac{\partial R}{\partial x_i}\frac{\delta x_i}{x_i} \tag{F.1}$$

A Eq. F.1 pode ser empregada para estimar o intervalo de incerteza no resultado devido às variações em x_i. Introduzindo a notação de incerteza relativa, obtemos

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R}\frac{\partial R}{\partial x_i}u_{x_i} \tag{F.2}$$

Como estimamos a incerteza relativa em R causada pelos efeitos combinados das incertezas relativas em todos os x_i? O erro aleatório em cada variável tem uma faixa de valores dentro do intervalo de incerteza. É improvável que todos os erros terão valores adversos ao mesmo tempo. Pode ser mostrado [2] que a melhor representação para a incerteza relativa do resultado é

$$u_R = \pm\left[\left(\frac{x_1}{R}\frac{\partial R}{\partial x_1}u_1\right)^2 + \left(\frac{x_2}{R}\frac{\partial R}{\partial x_2}u_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{x_n}{R}\frac{\partial R}{\partial x_n}u_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{F.3}$$

EXEMPLO F.2 — Incerteza no Volume de um Cilindro

Obtenha uma expressão para a incerteza na determinação do volume de um cilindro a partir de medições do seu raio e da sua altura. O volume do cilindro em termos do raio e da altura é

$$\forall = \forall(r, h) = \pi r^2 h$$

Diferenciando, obtemos

$$d\forall = \frac{\partial \forall}{\partial r}dr + \frac{\partial \forall}{\partial h}dh = 2\pi rh\, dr + \pi r^2 dh$$

uma vez que

$$\frac{\partial \forall}{\partial r} = 2\pi r h \qquad \text{e} \qquad \frac{\partial \forall}{\partial h} = \pi r^2$$

Da Eq. F.2, a incerteza relativa devida ao raio é

$$u_{\forall,r} = \frac{\delta \forall_r}{\forall} = \frac{r}{\forall}\frac{\partial \forall}{\partial r}u_r = \frac{r}{\pi r^2 h}(2\pi r h)u_r = 2u_r$$

e a incerteza relativa devida à altura é

$$u_{\forall,h} = \frac{\delta \forall_h}{\forall} = \frac{h}{\forall}\frac{\partial \forall}{\partial h}u_h = \frac{h}{\pi r^2 h}(\pi r^2)u_h = u_h$$

A incerteza relativa no volume é

$$u_{\forall} = \pm\,[(2u_r)^2 + (u_h)^2]^{1/2} \tag{F.4}$$

Comentário: O coeficiente 2, na Eq. F.4, mostra que a incerteza na medição do raio do cilindro tem um efeito maior do que a incerteza na medição da altura. Isto ocorre porque o raio é elevado ao quadrado na equação do volume.

F.4 APLICAÇÕES A DADOS

Aplicações a dados obtidos de medições de laboratório são ilustradas nos exemplos seguintes.

EXEMPLO F.3 — Incerteza na Vazão em Massa de um Líquido

A vazão em massa de água fluindo através de um tubo deve ser determinada coletando-a num recipiente. A vazão em massa é calculada a partir da massa líquida de água coletada dividida pelo intervalo de tempo,

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \tag{F.5}$$

onde $\Delta m = m_f - m_e$. As estimativas de erro para as quantidades medidas são

Massa do recipiente cheio, $m_f = 400 \pm 2$ g (20 por 1)
Massa do recipiente vazio, $m_e = 200 \pm 2$ g (20 por 1)
Intervalo de tempo de coleta, $\Delta t = 10 \pm 0{,}2$ s (20 por 1)

As incertezas relativas nas quantidades medidas são

$$u_{m_f} = \pm\frac{2\text{ g}}{400\text{ g}} = \pm\,0{,}005$$

$$u_{m_e} = \pm\frac{2\text{ g}}{200\text{ g}} = \pm\,0{,}01$$

$$u_{\Delta t} = \pm\frac{0{,}2\text{ s}}{10\text{ s}} = \pm\,0{,}02$$

A incerteza relativa no valor medido da massa líquida é calculada a partir da Eq. F.3 como

$$u_{\Delta m} = \pm\left[\left(\frac{m_f}{\Delta m}\frac{\partial \Delta m}{\partial m_f}u_{m_f}\right)^2 + \left(\frac{m_e}{\Delta m}\frac{\partial \Delta m}{\partial m_e}u_{m_e}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$= \pm\,\{[(2)(1)(\pm\,0{,}005)]^2 + [(1)(-1)(\pm\,0{,}01)]^2\}^{1/2}$$

$$u_{\Delta m} = \pm\,0{,}0141$$

Uma vez que $\dot{m} = \dot{m}(\Delta m, \Delta t)$, podemos escrever a Eq. F.3 como

$$u_{\dot{m}} = \pm\left[\left(\frac{\Delta m}{\dot{m}}\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta m}u_{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\dot{m}}\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta t}u_{\Delta t}\right)^2\right]^{1/2} \tag{F.6}$$

Os termos requeridos das derivadas parciais são

$$\frac{\Delta m}{\dot{m}}\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta m} = 1 \qquad \text{e} \qquad \frac{\Delta t}{\dot{m}}\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta t} = -1$$

Substituindo na Eq. F.6 resulta

$$u_{\dot{m}} = \pm \{[(1)(\pm 0{,}0141)]^2 + [(-1)(\pm 0{,}02)]^2\}^{1/2}$$

$$u_{\dot{m}} = \pm 0{,}0245 \quad \text{ou} \quad \pm 2{,}45 \text{ por cento (20 para 1)}$$

Comentário: O intervalo de incerteza de 2% na medição do tempo é a contribuição mais importante para o intervalo de incerteza do resultado.

EXEMPLO F.4 — Incerteza no Número de Reynolds para Escoamento de Água

O número de Reynolds deve ser calculado para o escoamento de água num tubo. A equação de cálculo para o número de Reynolds é

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu D} = Re(\dot{m}, D, \mu) \tag{F.7}$$

Consideramos o intervalo de incerteza no cálculo da vazão em massa. E com relação às incertezas em μ e D? O diâmetro do tubo é dado como $D = 6{,}35$ mm. Podemos admitir esse valor como exato? O diâmetro pode ser medido com resolução de 0,1 mm. Se assim for, a incerteza relativa no diâmetro seria estimada como

$$u_D = \pm\frac{0{,}05 \text{ mm}}{6{,}35 \text{ mm}} = \pm 0{,}00787 \quad \text{ou} \quad \pm 0{,}787 \text{ por cento}$$

A viscosidade da água depende da temperatura. Esta é estimada como $T = 24 \pm 0{,}5$°C. Como a incerteza na temperatura afetará a incerteza em μ? Um modo de estimar isto é escrever

$$u_{\mu(T)} = \pm\frac{\delta\mu}{\mu} = \frac{1}{\mu}\frac{d\mu}{dT}(\pm\delta T) \tag{F.8}$$

A derivada pode ser estimada a partir de dados tabulados de viscosidade perto da temperatura nominal de 24°C. Assim,

$$\frac{d\mu}{dT} \approx \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{\mu(25°\text{C}) - \mu(23°\text{C})}{(25-23)°\text{C}} = (0{,}000890 - 0{,}000933)\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} \times \frac{1}{2°\text{C}}$$

$$\frac{d\mu}{dT} = -2{,}15 \times 10^{-5}\ \text{N}\cdot\text{s}/(\text{m}^2\cdot°\text{C})$$

Segue-se, da Eq. F.8, que a incerteza na viscosidade devida à temperatura é

$$u_{\mu(T)} = \frac{1}{0{,}000911}\frac{\text{m}^2}{\text{N}\cdot\text{s}} \times -2{,}15\times 10^{-5}\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2\cdot°\text{C}} \times (\pm 0{,}5°\text{C})$$

$$u_{\mu(T)} = \pm 0{,}0118 \quad \text{ou} \quad \pm 1{,}18 \text{ por cento}$$

Os próprios dados tabulados de viscosidade também têm alguma incerteza. Se ela for de ± 1,0%, uma estimativa para a incerteza relativa resultante na viscosidade será

$$u_\mu = \pm[(\pm 0{,}01)^2 + (\pm 0{,}0118)^2]^{1/2} = \pm 0{,}0155 \quad \text{ou} \quad \pm 1{,}55 \text{ por cento}$$

As incertezas na vazão em massa, diâmetro do tubo e viscosidade, necessárias para calcular o intervalo de incerteza do número de Reynolds calculado, são agora conhecidas. As derivadas parciais requeridas, determinadas a partir da Eq. F.7, são

$$\frac{\dot{m}}{Re}\frac{\partial Re}{\partial \dot{m}} = \frac{\dot{m}}{Re}\frac{4}{\pi\mu D} = \frac{Re}{Re} = 1$$

$$\frac{\mu}{Re}\frac{\partial Re}{\partial \mu} = \frac{\mu}{Re}(-1)\frac{4\dot{m}}{\pi\mu^2 D} = -\frac{Re}{Re} = -1$$

$$\frac{D}{Re}\frac{\partial Re}{\partial D} = \frac{D}{Re}(-1)\frac{4\dot{m}}{\pi\mu D^2} = -\frac{Re}{Re} = -1$$

Substituindo na Eq. F.3 dá

$$u_{Re} = \pm\left\{\left[\frac{\dot{m}}{Re}\frac{\partial Re}{\partial \dot{m}}u_{\dot{m}}\right]^2 + \left[\frac{\mu}{Re}\frac{\partial Re}{\partial \mu}u_\mu\right]^2 + \left[\frac{D}{Re}\frac{\partial Re}{\partial D}u_D\right]^2\right\}^{1/2}$$

$$u_{Re} = \pm \{[(1)(\pm 0{,}0245)]^2 + [(-1)(\pm 0{,}0155)]^2 + [(-1)(\pm 0{,}00787)]^2\}^{1/2}$$

$$u_{Re} = \pm 0{,}0300 \quad \text{ou} \quad \pm 3{,}00 \text{ por cento}$$

Comentário: Os Exemplos F.3 e F.4 ilustram dois pontos importantes para projeto de experimento. Primeiro, a massa de água coletada, Δm, é calculada a partir de duas quantidades medidas, m_f e m_e. Para qualquer intervalo de incerteza admitido nas medições de m_f e m_e, a incerteza *relativa* em Δm pode ser diminuída fazendo Δm maior. Isto pode ser realizado usando-se recipientes maiores ou um tempo de medição mais longo, Δt, que também reduziria a incerteza relativa no Δt medido. Segundo, a incerteza nos dados de propriedades tabulados pode ser significativa. A incerteza dos dados também é aumentada pela incerteza na medição da temperatura do fluido.

EXEMPLO F.5 — Incerteza na Velocidade do Ar

A velocidade do ar é calculada a partir de medições com tubo de pitot num túnel de vento. Da equação de Bernoulli,

$$V = \left(\frac{2gh\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{ar}}}\right)^{1/2} \tag{F.9}$$

onde h é a altura observada da coluna do manômetro.

O único elemento novo neste exemplo é a raiz quadrada. A variação em V devida ao intervalo de incerteza em h é

$$\frac{h}{V}\frac{\partial V}{\partial h} = \frac{h}{V}\frac{1}{2}\left(\frac{2gh\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{ar}}}\right)^{-1/2}\frac{2g\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{ar}}}$$

$$\frac{h}{V}\frac{\partial V}{\partial h} = \frac{h}{V}\frac{1}{2}\frac{1}{V}\frac{2g\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{ar}}} = \frac{1}{2}\frac{V^2}{V^2} = \frac{1}{2}$$

Usando a Eq. F.3, calculamos a incerteza relativa em V como

$$u_V = \pm\left[\left(\frac{1}{2}u_h\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_{\rho_{\text{água}}}\right)^2 + \left(-\frac{1}{2}u_{\rho_{\text{ar}}}\right)^2\right]^{1/2}$$

Se $u_h = \pm 0{,}01$ e as outras incertezas forem desprezíveis,

$$u_V = \pm\left\{\left[\frac{1}{2}(\pm 0{,}01)\right]^2\right\}^{1/2}$$

$$u_V = \pm 0{,}00500 \quad \text{ou} \quad \pm 0{,}500 \text{ por cento}$$

Comentário: A raiz quadrada reduz a incerteza relativa na velocidade calculada para metade daquela de u_h.

F.5 RESUMO

Um enunciado da incerteza provável de dados é uma importante parte de um relatório de dados experimentais completo e claro. A Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos exige que todos os artigos submetidos para publicação em revistas incluam um enunciado adequado de incerteza de dados experimentais [5]. A estimativa de incerteza em resultados experimentais requer cuidado, experiência e capacidade de julgamento, em comum com muito esforço de engenharia. Enfatizamos a necessidade de quantificar a incerteza de medições, mas o espaço permitiu a inclusão de apenas alguns exemplos. Muito mais informações estão disponíveis nas referências que seguem (p. ex., [4, 6, 7]). Nós o encorajamos a consultá-las, quando estiver projetando experimentos ou analisando dados.

REFERÊNCIAS

1. Pugh, E. M., and G. H. Winslow, *The Analysis of Physical Measurements.* Reading, MA: Addison-Wesley, 1966.
2. Kline, S. J., and F. A. McClintock, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering, 75,* 1, January 1953, pp. 3–9.
3. Doebelin, E. O., *Measurement Systems,* 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
4. Young, H. D., *Statistical Treatment of Experimental Data.* New York: McGraw-Hill, 1962.
5. Rood, E. P., and D. P. Telionis, "JFE Policy on Reporting Uncertainties in Experimental Measurements and Results," *Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, 113,* 3, September 1991, pp. 313–314.
6. Coleman, H. W., and W. G. Steele, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers.* New York: Wiley, 1989.
7. Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers,* 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1989.

Apêndice G

UNIDADES SI, PREFIXOS E FATORES DE CONVERSÃO

Tabela G.1 Unidades SI e Prefixos[a]

Unidades SI	Quantidade	Unidade	Símbolo SI	Fórmula
Unidades básicas SI:	Comprimento	metro	m	—
	Massa	quilograma	kg	—
	Tempo	segundo	s	—
	Temperatura	kelvin	K	—
Unidade complementar SI:	Ângulo plano	radiano	rad	—
Unidades derivadas SI:	Energia	joule	J	$N \cdot m$
	Força	newton	N	$kg \cdot m/s^2$
	Potência	watt	W	J/s
	Pressão	pascal	Pa	N/m^2
	Trabalho	joule	J	$N \cdot m$

Prefixos SI	Fator de Multiplicação	Prefixo	Símbolo SI
	1 000 000 000 000 $= 10^{12}$	tera	T
	1 000 000 000 $= 10^{9}$	giga	G
	1 000 000 $= 10^{6}$	mega	M
	1 000 $= 10^{3}$	quilo	k
	0,01 $= 10^{-2}$	centi[b]	c
	0,001 $= 10^{-3}$	mili	m
	0,000 001 $= 10^{-6}$	micro	μ
	0,000 000 001 $= 10^{-9}$	nano	n
	0,000 000 000 001 $= 10^{-12}$	pico	p

[a]Fonte: Norma ASTM para Prática Métrica E 380-97, 1997.
[b]A ser evitado sempre que possível.

G.1 CONVERSÕES DE UNIDADES

Os dados necessários para resolver problemas nem sempre estão disponíveis em unidades coerentes. Assim, é necessário freqüentemente converter de um sistema de unidades para outro.

Em princípio, todas as unidades derivadas podem ser expressas em termos das unidades básicas. Então, apenas os fatores de conversão para as unidades básicas seriam requeridos.

Na prática, muitas grandezas de engenharia são expressas em termos de unidades definidas, como, por exemplo, o *horsepower*, a *British thermal unit* (Btu), o quarto, a milha náutica. As definições de tais grandezas são necessárias, e fatores de conversão adicionais são úteis nos cálculos.

A Tabela G.2 apresenta as unidades básicas SI e os fatores de conversão necessários, mais algumas definições e fatores de conversão convenientes.

Tabela G.2 Fatores de Conversão e Definições

Dimensão Fundamental	Unidade Inglesa	Valor SI Exato	Valor SI Aproximado
Comprimento	1 pol.	0,0254 m	—
Massa	1 lbm	0,453 592 37 kg	0,454 kg
Temperatura	1°F	5/9 K	—

Definições:

Aceleração da gravidade:	g = 9,8066 m/s² (= 32,174 pés/s²)
Energia:	Btu (unidade térmica britânica) ≡ quantidade de energia requerida para aumentar a temperatura de 1 lbm de água de 1°F (1 Btu = 778,2 pés · lbf)
	quilocaloria ≡ quantidade de energia requerida para aumentar a temperatura de 1 kg de água de 1 K (1 kcal = 4187 J)
Comprimento:	1 milha = 5280 pés; 1 milha náutica = 6076,1 pés = 1852 m (exato)
Potência:	1 horsepower ≡ 550 pés · lbf/s
Pressão:	1 bar ≡ 10^5 Pa
Temperatura:	grau Fahrenheit, $T_F = \frac{9}{5} T_C + 32$ (T_C em graus Celsius)
	grau Rankine, $T_R = T_F + 459{,}67$
	Kelvin, $T_K = T_C + 273{,}15$ (exato)
Viscosidade:	1 Poise ≡ 0,1 kg/(m · s)
	1 Stoke ≡ 0,0001 m²/s
Volume:	1 gal ≡ 231 pol.³ (1 pé³ = 7,48 gal)

Fatores de Conversão Úteis:

1 lbf = 4,448 N
1 lbf/pol.² = 6895 Pa
1 Btu = 1055 J
1 hp = 746 W = 2545 Btu/h
1 kW = 3413 Btu/h
1 quarto = 0,000946 m³ = 0,946 litro
1 kcal = 3,968 Btu