

Quantificação de incerteza e calibração de uma célula de carga com sistema de aquisição por Arduino

Pedro Augusto Souza das Silva

Thiago de Oliveira Santos

Kauã Ferreira de Almeida

Pedro Henrique Veiga Oliveira

Kenji Fabiano Ávila Okada

Éder Silva Costa

Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, av João Naves de Ávila 2121, 38408-100, Uberlândia/MG

pedrosouza2390@gmail.com; thiago.de@ufu.br; kauualmeida2013@hotmail.com; pedroh.veiga.o@gmail.com;

kenji_okada09@hotmail.com; edercosta@ufu.br;

Resumo: Em laboratórios e indústrias é comum encontrar processos que realizam a medição de massa ou carga para verificar a padronização da produção ou acompanhar experimentos. Entretanto, ao empregar tais métodos com sistemas de aquisição de dados para monitoramento contínuo, o custo se torna elevado, principalmente quando se necessita alta precisão e confiabilidade. A fim de contornar essa dificuldade, podem ser utilizadas células de carga, sensores de baixo custo que funcionam através da conversão da deformação de uma barra, medida por strain gages, em tensão que pode ser lida e interpretada por um sistema Arduino™. Para que esse sistema possa ser utilizado de forma confiável é necessário avaliar as incertezas de medição através de testes controlados, fazendo a calibração do sistema com base em instrumentos certificadas pelo INMETRO e desenvolvendo modelos que corrijam os erros sistemáticos. As equações para o cálculo da incerteza nas medições de massa com célula de carga e sistema de aquisição baseado em Arduino™ foram inteiramente desenvolvidas com base no método GUM, e os procedimentos descritos servem como referência para determinar as incertezas para sistemas de aquisição similares. Essa metodologia é aplicável em diversos ramos da engenharia como na padronização de processos de manufatura e construção de equipamentos mais complexos que dependem da medição de carga estática, como máquinas para ensaio de tração, compressão, flexão, ou em tribômetros. Ao utilizar uma célula de carga com carga máxima de 5 kg conectada a um módulo HX711 e Arduino Uno, foi constatado que a estabilidade do sistema de medição foi a principal limitação, pois embora o sistema tenha resolução de 0,01 g, foram verificados desvios padrão próximos a 0,5 g e uma variação absoluta da indicação da balança de até 3 g quando a amostra era mantida na bandeja por vários minutos. No entanto, estes erros estão de acordo com os limites máximos especificados pelo fabricante de 0,1 % da carga nominal máxima. A principal vantagem foi o custo-benefício, dado que o sistema tem um custo total de aproximadamente R\$50. Dessa maneira, a estratégia utilizada configura uma alternativa interessante para medições e registro de dados de carga e massa em dispositivos laboratoriais ou industriais cujos requisitos de tolerância sejam mais esparsos. Além disso, a medição da incerteza foi transformada em rotina computacional, que permite estimar com facilidade a precisão e confiabilidade da medição, em acordo com as recomendações metrológicas do Comitê Internacional de Pesos e Medidas.

Palavras-chave: célula de carga, incerteza de medição, Arduino, calibração, curva de erro.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente dentro de indústrias não é difícil encontrar equipamentos de medição de massa, seja eles com o objetivo de verificar a padronização no processo de produção de peças mecânicas, assim como medir componentes utilizados na produção de um determinado produto químico. No mercado é possível achar sensores de categorias de preço, confiabilidade e dimensões completamente diferentes. Geralmente esses sensores são indicados para aplicações em que a tolerância das medidas aferidas é grande. Como por exemplo na pesagem de alimentos em uma fábrica de produtos alimentícios, na construção de equipamentos de esclerometria e até na padronização de componentes mecânicos produzidos em larga escala.

Mesmo em sensores de alta precisão, um percentual de erros randômicos e sistemáticos podem ocorrer e alterar os resultados obtidos, dependendo de variáveis que são de difícil controle como: vibrações no sistema e campos eletromagnéticos, o resultado pode se tornar inválido para certas aplicações. Porém os erros sistemáticos podem ser corrigidos a ponto de viabilizar sistemas de menor custo e confiabilidade para uma pletera de projetos, já que em concordância as definições dadas pela metrologia, a medida não pode dar um valor exato daquilo que mede, mas sim um valor estimado com incerteza conhecida dado um nível de confiabilidade (Vuolo,1996).

O material conhecido como “Guide for Expression of Uncertainty in Measurement” (INMETRO, JCGM, 2008), fornece um protocolo expressivo para identificar e quantificar os diferentes fatores que podem gerar erros nas medições e suas incertezas, utilizando uma abordagem Bayesiana. Realizar esse processo de forma detalhada e controlada é importante para ter uma medição confiável e consistente. A priori uma vantagem de aplicar esse processo é dada pela capacidade de identificar individualmente as variáveis que influenciam as medições e os erros associados a cada fator de incerteza, sendo possível corrigir ou ajustar esses parâmetros de forma personalizada para diversos processos (Arencibia et al., 2019). Outra vantagem de adotar o método GUM é a rastreabilidade que o procedimento traz consigo, por ser um processo documentado e amplamente testado, é possível fazer sua verificação em concordância com padrões internacionais, já que um estudo publicado sem validação não tem credibilidade de seus resultados devido à falta da confiabilidade nos mesmos. A medição de incerteza permite rastreamento das fontes de erro até o padrão internacional, que tem adotado definições cada vez mais precisas. A definição de massa dada pelo sistema internacional de medidas é a quilograma, e inicialmente o valor de 1 quilograma era dado por um decímetro cúbico de água destilada, no vácuo, no seu ponto de solidificação. Em 1875 o valor foi alterado para a massa de um cilindro de platina iridiada e atualmente seu valor foi alterado na Conferência Geral sobre Pesos e Medidas (CGPM), em Paris, e está relacionada com a constante de Planck.

As células de carga são sensores de massa que têm seu funcionamento baseado na deformação de uma barra de metal e extensômetro resistivos colados na mesma. Gupta (2012) define que a flexão da barra provoca a deformação do extensômetro, que varia sua resistência elétrica linearmente. Um circuito elétrico aplica uma diferença de potencial e captura a variação de corrente ou tensão resultante da mudança da resistência elétrica através de um sinal analógico, convertido em sinal digital por um módulo adequado e interpretado por um microcontrolador. Esses sensores têm seu custo baseado no limite máximo de carga que pode ser lido, sendo que a carga máxima é diretamente proporcional a resolução e precisão. Ao aliamos as células de carga a um sistema compatível com um controlador Arduino® e seus acessórios, são notáveis as vantagens na medição devido a variações na casa de poucas unidades, assim como na extensa biblioteca de códigos compatíveis com os sensores e a alta confiabilidade proporcionada pelo método de medição das incertezas no GUM (INMETRO, JCGM, 2008), o que torna o sistema ideal para indústrias e laboratórios nas mais diversas aplicações. Segundo Muller (2010), o principal objetivo da obtenção da confiabilidade de incerteza de medição de cargas é aplicá-lo na construção de equipamentos onde o monitoramento de forças axiais seja necessário, de forma a empregar o uso combinado da célula de carga e Arduino visando os melhores resultados e custo-benefício.

2. CÁLCULO DA INCERTEZA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO COM ARDUINO E CÉLULA DE CARGA.

As células de carga têm seu funcionamento baseado na transformação da deformação elástica do sensor em uma medida de carga, utilizando os “strain-gauges”. Esse é um método capaz de medir a deflexão de objetos sólidos, inventado por Edward E. Simmons e Arthur C Ruge, em 1938. Nessa metodologia de pequenas folhas metálicas com presença de linhas espaçadas entre si, medem a deformação de um sólido, e transmitem essa informação na forma de variação de corrente para um módulo digital. Sendo o mesmo princípio de balanças alimentícias encontradas em lojas pelo país e na medição da deformação de barras de aço em (Anand, 2021).

Para calibrar o sensor foi utilizada uma metodologia matemática para modelar as medições obtidas e calibrar o equipamento para a melhor obtenção de resultados. Esses modelos têm como objetivo apontar as variações nos resultados obtidos e determinar o “erro” sistemático dentro do sistema de aquisição. Algumas variações foram desconsideradas pois sua aleatoriedade advém de características inerentes aos componentes, como a influência de campos magnéticos na variação da corrente enviada pelo sensor, consequentemente afetando a informação que chega ao módulo de conversão. Em Da Silva e Ferreira-Oliveira (2021), é traçado um modelo matemático para a calibração de um sensor termopar em conjunto ao sistema Arduino, cujo modelo pode ser regredido a uma forma geral para determinar as incertezas do sistema de medição com um sensor qualquer. A priori as grandezas medidas podem ser diferentes, porém se o método de transmissão dos dados é feito de maneira similar (transmissão por variação de corrente) é possível definir uma forma genérica que depende da variação da média, resolução e incerteza de calibração. Ao adaptarmos as equações e modelos para a medição do sistema proposto obtemos a Eq. (1), onde ΔY é a soma das incertezas, $\overline{\Delta Y}$ é a incerteza associada a variabilidade em torno da média, ΔR é a incerteza da resolução do sistema e ΔIC é a incerteza atribuída a calibração do sistema de aquisição utilizada no processo. Em conjunto ao modelo de equações utilizamos a metodologia do Guia Internacional para Medição de Incertezas (Guide for Uncertainty Measurement – GUM), (INMETRO, JCGM, 2008), que explicita na Eq. (2) um modelo de cálculos para incerteza de medição a atribuindo a uma função de resultado Y , onde as variáveis $X_1, X_2, \dots, X_N$ são possíveis entradas.

$$\Delta Y = \overline{\Delta Y} + \Delta R + \Delta IC \quad (1)$$

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2)$$

Contanto que possamos garantir a independência das variáveis determinadoras das incertezas podemos utilizar a lei de propagação de incerteza na Eq. (3) para determinar a incerteza combinada do sistema/método de medição. onde $u(x_i)$

fornece a variância de cada variável do sistema, X_i e o resultado advindo das derivadas parciais de cada incerteza nos fornecem os coeficientes de sensibilidade c_{x_i} . O cálculo da variância também depende do tipo de variável empregada, sendo que elas podem ter estimativa de incerteza do tipo A ou B, como definido pelo GUM (INMETRO JCGM, 2008).

$$U^2_c(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3)$$

Pela metodologia é definida que a incerteza utilizada para resultados seja a incerteza expandida, $U(y)$, calculada pela Eq. (4), que explicita o valor expandido como o produto da incerteza determinada pela Eq. (3) e o fator de abrangência K , determinado pelo grau de liberdade efetiva v_{eff} o qual é calculado pela equação de Welch-Satterthwaite conforme Eq. (5), onde i é o grau de liberdade de cada variável, que quando avaliada em um intervalo de confiança nos fornece o valor de K .

$$U(y) = K \cdot u_c(y) \quad (4)$$

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u_i(x_i) \cdot c_{x_i})^4}{v_i}} \quad (5)$$

3. HARDWARE E SOFTWARE COMPATÍVEL COM O SISTEMA ARDUINO E CÉLULA DE CARGA.

Para a aquisição de dados foi utilizado a combinação de uma placa Arduino UNO, um módulo HX711 e a célula de carga conforme a Fig. 1. Sendo esse sistema projetado de forma que os dados foram obtidos com a célula de carga acoplada a uma superfície fixa de um lado e um bandeja de acrílico do outro, o módulo tem função de receber o sinal digital em forma de variação de voltagem e emitir um sinal analógico para o microcontrolador Arduino, que por sua vez executa um código programado em linguagem nativa para interpretar e exibir a massa captada pelo sensor. Em relação às especificações técnicas, em concordância com (Kraus, 1992) o sensor utilizado possui a carga nominal de 5 kg, sendo que pelo datasheet do fabricante a resolução mínima é de 0,001% da carga nominal, equivalente a 0,05 g. O sistema roda em uma taxa de aquisição máxima de 12 Hz, com uma comunicação de 14 bits para a porta serial do computador.

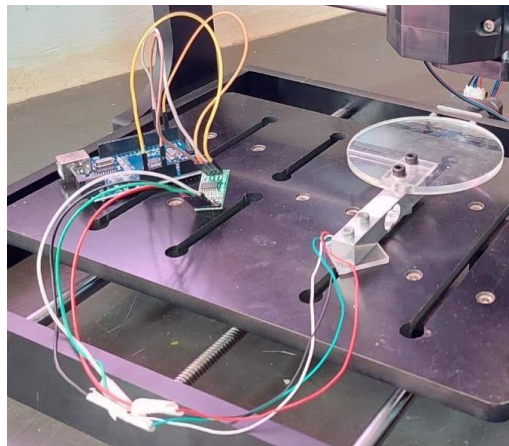


Figura 1. Conjunto de medição (Célula de carga e Arduino).

4. METODOLOGIA

4.1. Cálculo da incerteza de medição

Desenvolvendo a Eq. (1) no contexto de sistema baseado no conjunto célula de carga e Arduino, obtém-se a Eq. (6) com termos equivalentes, onde ΔM é a soma das incertezas do sistema, $\overline{\Delta M}$ é a incerteza associada a variabilidade em torno da média das massas, ΔR é a incerteza da resolução do sistema e $\Delta ICac$ é a incerteza atribuída a calibração do sistema célula de carga e Arduino, para a qual podemos afirmar a linearidade de tais variáveis em relação à incerteza total, devido a não correlação entre elas. Na Eq. (7) a propriedade de linearidade dos fatores de sensibilidade implica que todas as derivadas parciais são iguais a 1 na Eq. (8).

$$\Delta M = \overline{\Delta M} + \Delta R + \Delta ICac \quad (6)$$

$$u_c^2(\Delta M) = \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial \overline{\Delta M}}\right)^2 \cdot u^2(\overline{\Delta M}) + \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial \Delta ICac}\right)^2 \cdot u^2(\Delta ICac) \quad (7)$$

$$c_{\overline{\Delta M}} = \frac{\partial \Delta M}{\partial \overline{\Delta M}} = 1; \quad c_{\Delta R} = \frac{\partial \Delta M}{\partial \Delta R} = 1; \quad c_{\Delta ICac} = \frac{\partial \Delta M}{\partial \Delta ICac} = 1 \quad (8)$$

Para o processo de cálculo de $\Delta ICac$ é necessário a comparação com um instrumento calibrado, de incerteza conhecida. No caso da calibração do sensor foi utilizado uma balança digital de precisão, para a qual a incerteza pode ser estimada se o operador possui conhecimento profundo sobre o sistema de medição (Vuolo, 1996). Assim, foi estipulado um fator aconselhado entre 0,5 e 2 multiplicado pela resolução Rb do instrumento. Para as aplicações desse estudo foi adotado o valor mais conservador, a fim de ter uma margem segura na incerteza estimada para o sistema.

4.2. Calibração do sistema célula de carga e Arduino.

A calibração do equipamento foi realizada com a comparação de 5 massas medidas no sistema da célula de carga e em uma balança digital de precisão Shimadzu modelo BL 3200H. Para conhecer o valor de calibração $\Delta ICac$ precisamos conhecer a maior incerteza possível que o sistema possui dentro da faixa de medição de interesse. Para isso, foram medidas 5 diferentes massas nos 2 sistemas, sendo 3 medidas para cada peso na balança digital e 3 medições para o sistema célula de carga com aquisição de 30 s em cada e taxa de 10 Hz, a fim de obter melhor confiabilidade dos dados. Após conhecidos os valores de ΔM , para um índice i de cargas variando de 1 a 5 nas Eq. (9) a Eq. (11) para as diferentes i medições, adotamos como o valor de $\Delta ICac$ a maior incerteza padrão obtida. Já o valor de ΔRb é a resolução da balança digital utilizada para calibrar o sistema e ΔICb é o valor estipulado em duas vezes o valor de Rb , que é a resolução da balança de precisão (Vuolo, 1996).

$$\Delta M_i = \overline{\Delta M_i} + \Delta Rb + \Delta ICb \quad (9)$$

$$u_c^2(\Delta M_i) = \left(\frac{\partial \Delta M_i}{\partial \overline{\Delta M_i}}\right)^2 \cdot u^2(\overline{\Delta M_i}) + \left(\frac{\partial \Delta M_i}{\partial \Delta Rb}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Rb) + \left(\frac{\partial \Delta M_i}{\partial \Delta ICb}\right)^2 \cdot u^2(\Delta ICb) \quad (10)$$

$$c_{\overline{\Delta M_i}} = \frac{\partial \Delta M_i}{\partial \overline{\Delta M_i}} = 1; \quad c_{\Delta Rb} = \frac{\partial \Delta M_i}{\partial \Delta Rb} = 1; \quad c_{\Delta ICb} = \frac{\partial \Delta M_i}{\partial \Delta ICb} = 1; \quad (11)$$

5. RESULTADOS

A Tabela 1 demonstra os resultados obtidos em um ambiente controlado onde foram realizadas as medições de massa no sistema projetado, além de uma sexta medição que foi utilizada como parâmetro para identificar a incerteza dentro de uma medição qualquer no sistema. Cada medição teve duração de 90 segundos com aquisição de 10 Hz. Os cálculos de incerteza foram realizados conforme a Tabela 2, segundo os tipos de estimação das incertezas e suas distribuições. Para variáveis com estimação do tipo A os graus de liberdade dependem do número n de dados amostrais utilizados nos cálculos. Já para variáveis com estimação do tipo B as avaliações dependem da distribuição atribuída para cada variável. Em GUM (INMETRO, JCGM, 2008) é determinado como e quando devem ser feitas as estimativas matemáticas tanto do tipo A, quanto do tipo B.

Tabela 1. Média, desvio padrão, incerteza calculada e expandida para as variáveis.

	Balança (Kg)					Célula de Carga (Kg)					
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M
Média	99,69	416,67	363,40	1024,57	1562,18	97,38	408,04	356,29	1004,88	1533,62	30,12
Desv. pad	0,07	0,009	0,004	0,008	0,008	0,95	0,39	0,72	0,31	0,44	0,13
n	3					965	961	959	956	949	985
ν	1					11	1	5	1	2	2
u_c	0,02					0,036	0,022	0,023	0,022	0,024	0,027
K	13,97					2,25	13,97	2,65	13,97	4,53	4,53
U	0,2794					0,082	0,321	0,081	0,316	0,112	0,124

Tabela 2. Valores e cálculo dos componentes de incerteza para todas as variáveis.

Variável	Tipo da variável	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	u(xi)	u(xi) (g)	Contribuição. (%) [Eq.] (i)	K
ΔM	B	Normal	2	resultado da Eq.7	0,027		4,53
$\overline{\Delta M}$	A	Normal	985	$=\frac{s_{\Delta M}}{\sqrt{n}}$, onde $s_{\Delta M}$ é o desvio padrão em relação a $\overline{\Delta M}$	0,004	2,28 [7]	
ΔR	B	retangular	INF	$=\frac{R}{2\sqrt{3}}$, onde R é a resolução da célula de carga	0,014	27,63 [7]	
$\Delta ICac$	B	Normal	1	O maior entre os ΔMi das 5 cargas	0,023	70,10 [7]	13,97
$\Delta M1$	B	Normal	11	Resultado da Eq.8 com $i = 1$.	0,037		2,25
$\Delta M2$	B	Normal	1	Resultado da Eq.8 com $i = 2$.	0,023		13,97
$\Delta M3$	B	Normal	5	Resultado da Eq.8 com $i = 3$.	0,031		2,65
$\Delta M4$	B	Normal	1	Resultado da Eq.8 com $i = 4$.	0,023		13,97
$\Delta M5$	B	Normal	2	Resultado da Eq.8 com $i = 5$.	0,025		4,53
$\overline{\Delta M}_1$	A	Normal	965	$=\frac{s_{\Delta M}}{\sqrt{n}}$, onde $s_{\Delta M}$ é o desvio padrão reativo a $\overline{\Delta M}$ com $i=1$.	0,031	69,61 [10]	
$\overline{\Delta M}_2$	A	Normal	961	$=\frac{s_{\Delta M}}{\sqrt{n}}$, onde $s_{\Delta M}$ é o desvio padrão reativo a $\overline{\Delta M}$ com $i=2$.	0,011	22,76 [10]	
$\overline{\Delta M}_3$	A	Normal	959	$=\frac{s_{\Delta M}}{\sqrt{n}}$, onde $s_{\Delta M}$ é o desvio padrão reativo a $\overline{\Delta M}$ com $i=3$.	0,023	56,97 [10]	
$\overline{\Delta M}_4$	A	Normal	956	$=\frac{s_{\Delta M}}{\sqrt{n}}$, onde $s_{\Delta M}$ é o desvio padrão reativo a $\overline{\Delta M}$ com $i=4$.	0,010	20,57 [10]	
$\overline{\Delta M}_5$	A	Normal	949	$=\frac{s_{\Delta M}}{\sqrt{n}}$, onde $s_{\Delta M}$ é o desvio padrão reativo a $\overline{\Delta M}$ com $i=5$.	0,014	33,32 [10]	
ΔRb	B	Retangular	∞	$=\frac{Rb}{2\sqrt{3}}$, onde Rb é a resolução da balança de precisão.	0,003	0,62 [10], (i=1) 1,58 [10], (i=2) 0,88 [10], (i=3) 1,62 [10], (i=4) 1,36 [10], (i=5)	
ΔICb	B	t-student	1	$2 \cdot Rb$, onde Rb é a resolução da balança digital.	0,020	29,77 [10], (i=1) 75,67 [10], (i=2) 42,15 [10], (i=3) 77,80 [10], (i=4) 65,32 [10], (i=5)	

Na Figura 2 é demonstrada como as diferentes parcelas da Eq. (7) influenciam no resultado das incertezas do sistema, e fica visível que a menor parcela se encontra na incerteza das médias do sistema. Esse valor baixo é devido ao número grande amostral n que impacta diretamente no cálculo do erro das médias explicitada na Tab. 2. Outro fator contribuinte

é o baixo desvio padrão que em geral fica menor que 0,1 g, valor que superou as expectativas já que se apresentou com uma redução de 98% em relação à precisão da célula de carga no datasheet do fabricante. Portanto o sistema se demonstra capaz de ser aplicado em situações em que resoluções pequenas com grande confiabilidade são requeridas. E considerando o valor conservador adotado para a estimativa da incerteza de calibração da balança digital, pode-se considerar que os resultados poderiam ser ainda mais refinados, caso fosse feito o cálculo exato da incerteza de calibração da balança digital com massas padrão.



Figura 2. Contribuição percentual dos termos para a incerteza calculada.

Uma análise realizada para determinar o erro das medições em diferentes faixas de medição foi feita conforme a Fig. 3. O par ordenado representa o erro absoluto, dado pela diferença entre o valor real e o valor da medição obtida do sistema célula de carga e Arduino. Pelo que podemos observar em medições com valores de até 20% da carga nominal do sensor, obtemos erros de valor absoluto menores quando comparados aos demais, com ênfase na faixa de 1,5 kg onde é notável que o valor do erro passa da casa dos centésimos para décimos. Entretanto é notável que em aplicações até a faixa de 1 kg é possível realizar medidas com resultados dentro da resolução esperada para aplicações de menor escala. O motivo da medição 5 possuir um erro maior que os demais é explicado pela Fig. 2, que aponta um comportamento comum em relação a ΔICb , ao adotar o valor conservativo de 2 vezes o valor de Rb . A porcentagem que a incerteza desse termo ocupa na soma dos termos é extremamente alta, o que em $\Delta M5$ resulta no

valor elevado da 5ª medição. Já nas leituras de M_1 e M_3 , é possível observar um valor maior de $\overline{\Delta M}$, essa particularidade é devida à instabilidade na aquisição das amostras 1 e 3, que produziram um desvio padrão maior que os demais, mesmo estando muito abaixo da resolução da célula de carga adotada. Já os que possuem uma medição mais precisa com menor desvio padrão tiveram uma margem de segurança elevada em decorrência do valor inflado de ΔICB .

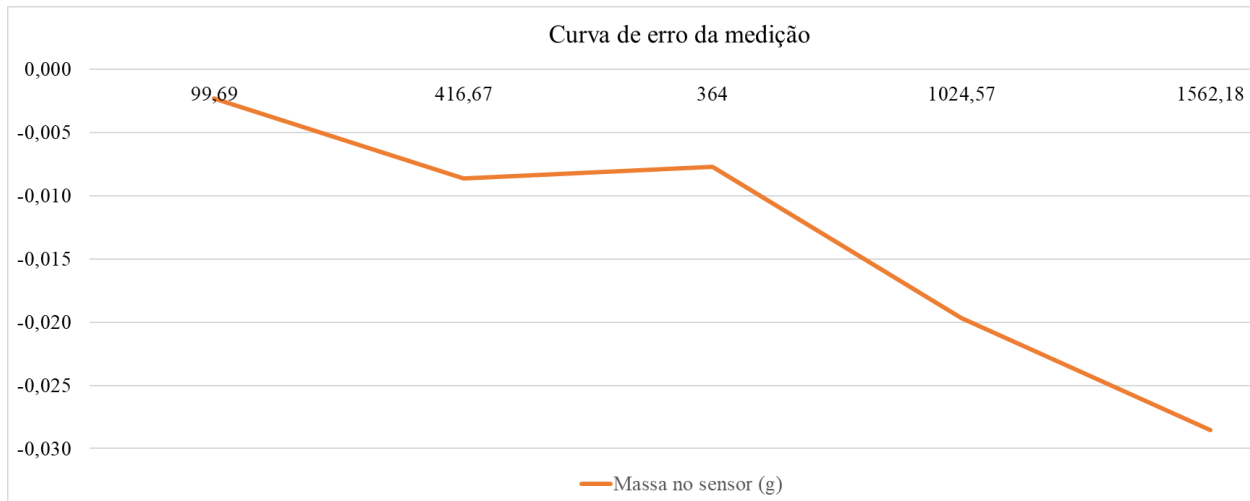


Figura 3. Gráfico da curva de erro nas medições da célula de carga

Para aplicações mais precisas é recomendado coeficientes menores ao calcular a incerteza de calibração do equipamento de referência. Valores entre 0,5 e 1 podem acomodar de forma mais precisa aplicações industriais e laboratoriais como a aquisição de dados em equipamentos que realizam a medição de forças axiais em um sistema, a exemplo de equipamentos como tribômetro e microesclerômetro. Por fim, é importante ressaltar que o resultado de medição pode ser expresso na Eq. (12) em acordo com as normas NBR ISO/IEC 17025:2017 (ABNT, ISO/IEC, 2017), onde é dada de forma clara toda informação referente às medições realizada no sistema assim como sua precisão e confiabilidade. Como mencionado anteriormente tal intervalo de confiança e resolução são suficientes para sua utilização em projetos de menor custo que permitam uma tolerância menos restritiva.

$$M = 0,03012 \pm 0,00012 \text{ Kg com } K = 4,53 \text{ e intervalo de confiança de } 95\% \quad (12)$$

6. CONCLUSÃO

O campo de pesquisa das incertezas possui metodologias e características complexas, o que torna os cálculos extremamente densos e os bancos de dados extensos. Entretanto é possível perceber que após definida um caminho para modelar e interpretar os casos em que o conhecimento de incerteza se faz necessário, a replicabilidade de fórmulas em um ambiente computacional permite a expansão desses modelos para componentes simples que antes não tinham suas características estatísticas estudadas.

Promover a descoberta de componentes de baixo custo com propriedades de medição que podem atender a maioria dos casos tanto gerais quanto específicos, possibilita o desenvolvimento de equipamentos com características customizáveis a cada aplicação e manutenção facilitada. Que por sua vez colaboram com o desenvolvimento de projetos pequenos com recursos escassos que necessitam de maquinário competente e de boa confiabilidade pelo melhor preço.

Os modelos matemáticos descritos no artigo podem ser replicados para qualquer componente de medição com as mais diversas características, de forma a garantir a veracidade do método pela simplicidade da aplicação nos mais variados sistemas. O resultado de variação de medição menor que 0,0001 Kg para uma massa de média 0,03012 Kg representa um erro de menos de 0,1% em um sistema capaz de rodar nas mais diversas máquinas assim como gerar resultados melhores para aplicações de precisão maior, sinalizando a importância da divulgação de estudos nessa área, de forma a consolidar a padronização desses testes para todos os componentes de medição, sejam em aplicações industriais ou acadêmicas, com equipamentos de alto ou baixo custo.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU) pelo apoio na realização dos experimentos, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais-FAPEMIG e a Associação Brasileira de Ciências Mecânicas pelo apoio na forma de bolsas iniciação científica.

8. REFERÊNCIAS

- Anand, L. V., Hepsiba, D., Palaniappan, S., Sumathy, B., Vijayakumar, P., & Rani, S. S. (2021). Automatic strain sensing measurement on steel beam using strain gauge. *Materials Today: Proceedings*, 45, 2578-2580.
- Arencibia, R. V., Piratelli Filho, A., Leal, J. E. S., Rosa, V. A. O. (2019). *Incerteza de Medição - metodologia de cálculo, conceitos e aplicações*. 1ª ed, Interciência, Rio de Janeiro.
- Da Silva, L. R. R.; Ferreira-Oliveira, J. R. Uncertainty quantification using thermocouple and arduino® compatible hardware. *Revista de Engenharia Térmica*, v. 20, n. 2, p. 47-54, 2021.
- JCGM, J. C. G. M. et al. Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement. *Int. Organ. Stand. Geneva* ISBN, v. 50, p. 134, 2008.
- Gupta, S. V. Strain gauge load cells. In: *Mass Metrology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 89-119.
- Karaus, A., & Paul, H. (1992). Load cells with small nominal load based on strain gauges using thin-film techniques. *Measurement*, 10(3), 133-139.
- Muller, I., de Brito, R. M., Pereira, C. E., & Brusamarello, V. (2010). Load cells in force sensing analysis--theory and a novel application. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 13(1), 15-19.
- Vuolo, J. H. (1996). *Fundamentos da teoria de erros*. Editora Blucher.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis por todo material escrito nesse artigo.

Quantification of uncertainty and calibration of a load cell with an data acquisition system by Arduino

Pedro Augusto Souza das Silva
Thiago de Oliveira Santos
Kauã Ferreira de Almeida
Pedro Henrique Veiga Oliveira
Kenji Fabiano Ávila Okada
Éder Silva Costa

Federal University of Uberlândia, Laboratory for Machining Teaching and Research, 2121 João Naves de Ávila Avenue, 38408-100, Uberlândia/MG
pedrosouza2390@gmail.com; thiago.de@ufu.br; kauualmeida2013@hotmail.com; pedroh.veiga.o@gmail.com; kenji_okada09@hotmail.com; edercosta@ufu.br;

Abstract: In laboratories and industries it is common to find processes that perform mass or load measurement to verify the standardization of production or to monitor experiments. However, when employing such methods as data acquisition systems for continuous monitoring, the cost becomes high, especially when high accuracy and reliability are required. In order to overcome this difficulty, load cells can be used, which are low-cost sensors that work by converting the deformation of a bar, measured by strain gages, into tension that can be read and interpreted by an Arduino™ system. For this system to be used reliably, it is necessary to evaluate the measurement uncertainties through controlled tests, making the system calibration based on instruments certified by INMETRO and developing models that correct the systematic errors. The equations for calculating uncertainty in mass measurements with a load cell and an Arduino™ based acquisition system were entirely developed based on the GUM method, and the procedures described serve as a reference for determining uncertainties for similar acquisition systems. This methodology is applicable in various branches of engineering such as in the standardization of manufacturing processes and construction of more complex equipment that relies on static load measurement, such as tensile, compression, and bending test machines, or in tribometers. When using a load cell with a maximum load of 5 kg connected to an HX711 module and Arduino Uno, it was found that the stability of the measurement system was the main limitation, because although the system has a resolution of 0.01 g, there were standard deviations close to 0.5 g and an absolute variation of the scale indication of up to 3 g when the sample was kept in the tray for several minutes. However, these errors are in accordance with the manufacturer's specified maximum limits of 0.1 % of the maximum rated load. The main advantage of the system was the cost benefit, since the system has a total cost of approximately R\$50. Thus, the strategy used configures an interesting alternative for measurements and recording of load and mass data in laboratory or industrial devices whose tolerance requirements are sparser. In addition, the uncertainty measurement was transformed into a computational routine, which allows easy estimation of the measurement precision and reliability, in accordance with the metrological recommendations of the International Committee on Weights and Measures.

Keywords: load cell, uncertainty of measurement, Arduino, calibration, error curve.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) are the only responsible for the printed material included in this paper.