

# SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS COM COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA PARA UMA CÉLULA DE CARGA

THOMÁS VARGAS BARSANTE E PINTO\*<sup>†</sup>, ALAN KARDEK RÊGO SEGUNDO\*

\**Departamento de Engenharia de Controle e Automação  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto, MG, Brasil*

<sup>†</sup> *Instituto Tecnológico Vale - Mineração  
Ouro Preto, MG, Brasil*

Emails: thomasvargas@gmail.com, alankardek2@gmail.com

**Abstract**— Load cells are force transducers increasingly used in weighing systems. Its applications are found in the industry in diverse sectors, as the pharmacist, automobile and alimentary, in addition to the commerce in general. This paper presents the development of a low cost electronic system for the acquisition and processing of signals from a load cell. In addition, the system minimizes the effects of temperature by means of mathematical models generated by statistical tools. The electronic circuit mainly uses a PIC microcontroller, capacitive filters and integrated circuits. The results show that the proposed system can be used to mitigate the effect of temperature on the measurements of any load cell, besides presenting a root mean square error for a low cost charge cell, 50% lower when compared to the results obtained by an industrial load cell with internal temperature compensation.

**Keywords**— Load cell, temperature drift, electronic instrumentation, data acquisition.

**Resumo**— As células de carga são transdutores de força cada vez mais empregados em sistemas de pesagem. Suas aplicações são encontradas na indústria em diversos setores, como o farmacêutico, automobilístico e alimentício, além do comércio em geral. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema eletrônico de baixo custo para aquisição e processamento de sinais de uma célula de carga. Além disso, o sistema minimiza os efeitos da temperatura, por meio de modelos matemáticos gerados por ferramentas estatísticas. O circuito eletrônico utiliza, principalmente, um microcontrolador PIC, filtros capacitivos e circuitos integrados. Os resultados mostram que o sistema proposto pode ser usado para mitigar o efeito da temperatura sobre as medições de células de carga, além de apresentar para uma célula de carga de baixo custo, uma raiz do erro quadrático médio cerca de 50% menor se comparado aos resultados obtidos por uma célula de carga industrial com compensação interna de temperatura.

**Palavras-chave**— Célula de carga, deriva térmica, instrumentação eletrônica, aquisição de dados.

## 1 Introdução

Com o avanço da tecnologia, as células de carga se consolidam cada vez mais como principal transdutor de força do mercado, sendo encontradas em vários sistemas de pesagem. As aplicações são extensas e variadas e, por causa disso, existem diversos modelos de células de carga, conforme a aplicação, como por exemplo: *shear beam*, *single point*, tipo S, entre outros.

Os sistemas de pesagem são muito empregados na determinação da umidade de materiais porosos, por meio do método gravimétrico. Além disso, eles são utilizados como instrumento de referência durante processos de calibração indireta de sensores de umidade (Patil et al., 2015; Santos et al., 2006). O método consiste em mensurar a massa do material sob teste antes e após submetê-lo a um procedimento de secagem dentro de uma estufa a 105 °C por 12 horas. A diferença entre as massas corresponde à massa de água contida no material (Rêgo Segundo et al., 2015; Kardek, 2016). A partir dessas informações, calcula-se a umidade do material sob teste, definida como

$$U_b = \frac{m_a}{m_s}, \quad (1)$$

sendo:

- $U_b$ , a umidade em peso do material, kg/kg;
- $m_a$ , a massa de água, kg;
- $m_s$ , a massa do material seco, kg.

O sistema apresentado neste trabalho permite automatizar o procedimento de calibração indireta de sensores de umidade por meio do método gravimétrico, pois não é preciso repetir o procedimento de inserir a amostra na estufa, secar, retirar, pesar, esperar esfriar, realizar a medição com o sensor de umidade e anotar as medições, até se obter pouca variação do peso do material. As medições do peso e do sinal do sensor podem ser coletadas durante o procedimento de secagem, sem a necessidade de retirar a amostra da estufa e, sobretudo, de realizar as medições manualmente.

Um setor de extrema importância para o cenário econômico nacional, e que precisa avidamente de meios para medição de umidade que sejam confiáveis e de baixo custo, é o setor de mineração. Altos teores de umidade no minério oneram os custos de produção e transporte, bem como prejudica

sua estocagem (Ferreira, 2011). Desta forma, o método gravimétrico é muito aplicado nesse setor.

Todo e qualquer sistema de medição está sujeito a interferências, sejam elas internas ou externas, como por exemplo: imperfeições dos componentes, não idealidade dos princípios físicos, manuseio inapropriado pelo usuário e condições ambientais inadequadas, principalmente devido à temperatura, umidade, pressão atmosférica ou por interferências eletromagnéticas. Elas perturbam as medições, conduzindo o sistema a erros.

A temperatura ambiente influencia diretamente o funcionamento dos circuitos eletrônicos (Burnos and Gajda, 2016), por causar deformações e alterações nas propriedades físicas dos componentes, à medida que ela se altera (Zhang et al., 2013). Visto isso, ela pode afetar consideravelmente as medições de um sistema composto por uma célula de carga, principalmente se houver necessidade de o sistema operar dentro de uma estufa, submetido à temperatura de até 60 °C. Por causa disso, e considerando a aplicação do método gravimétrico, esse fator se tornou um importante aspecto de estudo, sendo realizado, neste artigo, um trabalho específico para minimizar os efeitos da temperatura.

Algumas pesquisas propõem compensar a temperatura por meio de uma configuração de elementos resistivos (Dinh and Kanoun, 2015). Outros sugerem o uso de ferramentas de software, como explicitado por Pačnik and Novak (2010).

Neste artigo, propõe-se o desenvolvimento um sistema eletrônico de baixo custo para aquisição e processamento de sinais para uma célula de carga. Além disso, é apresentado um sistema supervisor vinculado ao circuito eletrônico, garantindo uma compensação digital dos efeitos da temperatura.

Este projeto foi desenvolvido em parceria com o Instituto Tecnológico Vale (ITV), e concomitante a um outro projeto que visa elaborar um sensor de umidade para minério. O objetivo é realizar a integração entre os dois trabalhos, ao usar o sistema de pesagem apresentado neste artigo como instrumento de calibração do sensor de umidade, pelo método gravimétrico.

## 2 Materiais e métodos

Na Figura 1, pode-se observar o sistema elaborado neste trabalho. Ele é composto por quatro circuitos com funções distintas, sendo que três deles foram previamente desenvolvidos por (Rêgo Segundo et al., 2015), mais especificamente para alimentação do sistema, processamento de dados e comunicação com o programa supervisor via XBee.

O quarto circuito (destacado na Figura 1), foi desenvolvido exclusivamente para este trabalho, sendo responsável por amplificar e filtrar o sinal proveniente da célula de carga. A Figura 2 mostra

o esquemático da placa desenvolvida, bem como uma representação 3D do circuito em uma placa de circuito impresso.

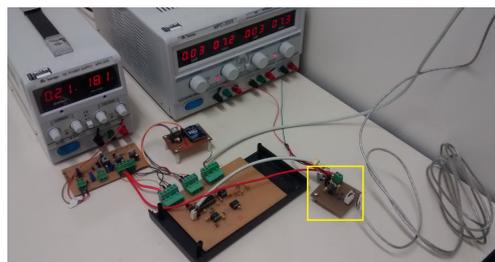


Figura 1: Imagem do circuito de pesagem desenvolvido.

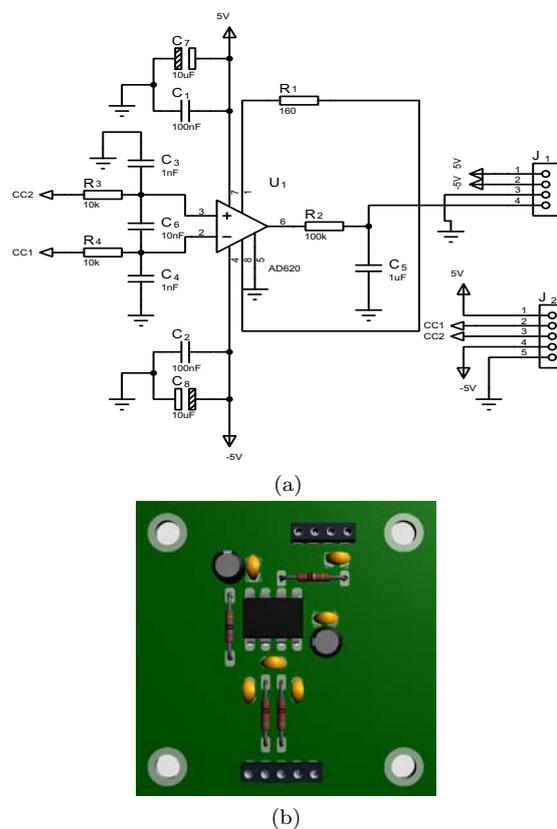


Figura 2: (a) Esquemático e (b) desenho 3D da placa de condicionamento de sinais.

Na placa vista na Figura 2b, está instalado o amplificador de instrumentação AD620, para amplificar o sinal de saída da célula de carga, que não é grande o suficiente para ser manipulado diretamente pelo microcontrolador. O ganho aplicado ao sinal depende exclusivamente do valor do resistor  $R_1$  visto na Figura 2a, de acordo com

$$G = \frac{49,9k}{R_1} + 1, \quad (2)$$

sendo:

- $G$ , o ganho aplicado ao sinal;

- $R_1$ , o resistor colocado entre os pinos 1 e 8 do AD620,  $\Omega$ .

Todos os amplificadores de instrumentação, como o AD620, retificam pequenos sinais fora da sua banda de frequência, e esse distúrbio pode aparecer na forma de uma pequena tensão contínua de deslocamento (*offset*). Já os sinais de alta frequência, podem ser filtrados pelo uso de filtros passa baixa inseridos na entrada do amplificador (circuito RC) (Devices, 2011). Como pode ser visto na Figura 2a, filtros foram inseridos à placa nas entradas e saída do circuito integrado (CI). O limite imposto pelos filtros na entrada do CI é calculado de acordo com

$$F_{DIFF} = \frac{1}{2\pi R_3(2C_6 + C_3)}, \quad (3)$$

$$F_{CM} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3}, \quad (4)$$

sendo:

- $F_{DIFF}$ , a frequência de corte para o modo diferencial;
- $F_{CM}$ , a frequência de corte para o modo comum;
- $R_3$ , o resistor conectado no pino 3 do AD620,  $\Omega$ ;
- $C_3$ , o capacitor conectado no pino 3 do AD620, F;
- $C_6$ , o capacitor colocado entre os pinos 2 e 3 do AD620, F.

Além disso, capacitores de desacoplamentos foram inseridos para eliminar interferências e estabilizar os sinais de alimentação ao CI (Fan et al., 2001; Gu et al., 2009; Pant et al., 2002).

Uma vez que o sinal é ampliado e filtrado pela placa, ele é enviado ao circuito de processamento de sinal, que possui um microcontrolador PIC18F25K80. Esse dispositivo possui um conversor AD de 12 bits, garantindo uma maior resolução do sinal — essencial para um sistema de precisão. Após o processamento do sinal pelo microcontrolador, os dados são enviados a um sistema supervisorio, desenvolvido no software Visual Studio, via XBee.

## 2.1 Método experimental

Foi desenvolvida uma plataforma de madeira sobre a qual foi instalada uma célula de carga e um sensor de temperatura LM35. Cinco testes foram realizados, cada um com uma massa diferente sendo aplicada a uma célula de carga de baixo custo. As massas padrão usadas como referência de teste foram de 0 g, 100 g, 200 g, 300 g

(100 g e 200 g combinados) e 500 g. A plataforma foi colocada no interior de uma câmara climática (KPK200, Feutron Klimasimulation GmbH).

A célula de carga usada no experimento (FEFA Sensores) é resistiva, do tipo *single point*, tendo assim a característica de ser insensível à posição do objeto posto sobre ela. Essa propriedade a torna ideal para aplicações de pesagem, como em Lee et al. (2016) e Choi et al. (2009). O resistor  $R_1$  escolhido foi de  $57 \Omega$ , resultando em um ganho de 868 ao sinal. A escolha do valor de  $R_1$  ocorreu de forma a adequar o sinal de saída com a faixa de tensão de entrada do conversor analógico-digital do microcontrolador, de 0 V a 5 V, de acordo com o peso máximo aplicado à célula de carga.

A Figura 3 mostra uma representação da célula de carga utilizada, que possui as seguintes especificações técnicas:

- Material do equipamento: alumínio anodizado;
- Sensibilidade:  $2,0 \pm 0,1$  mV/V;
- Máxima tensão: 15 V;
- Capacidade máxima: 5 kg;
- Impedância de entrada:  $410 \pm 30 \Omega$ .



Figura 3: Célula de carga de ponto único usada neste trabalho.

No interior da câmara climática, a temperatura foi controlada de acordo com a seguinte programação: a temperatura ambiente inicial foi determinada em  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  e, posteriormente, a temperatura se eleva até um valor máximo de  $57,5 \text{ }^\circ\text{C}$  em degraus de  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . A cada degrau, a temperatura se mantém constante por 20 minutos. Após a etapa de incremento da temperatura, inicia-se o processo de decaimento, que ocorre na mesma taxa, até o limite de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O procedimento contemplado pela programação também é usado durante a calibração de sensores de umidade de materiais porosos (solo, grãos ou minério), permitindo que o método gravimétrico seja utilizado de forma automática, ou seja, não há a necessidade de ficar retirando a amostra da estufa para pesagem, pois o procedimento é realizado online. No entanto, sem compensar o efeito da temperatura, o instrumento de referência (célula de carga) apresenta muita incerteza, inviabilizando o procedimento de calibração.

A programação contempla uma etapa de incremento e outra de decremento da temperatura, com o intuito de verificar a relevância do efeito da histerese no sistema. O erro por histerese é definido como a diferença de leitura para a mesma massa analisada durante o aumento e o decremento gradual da temperatura. Para mensuração da histerese no sistema, foi usado o método analítico, por meio de

$$X_m = \left( \frac{X_{max} - X_{min}}{2} \right) + X_{min}, \quad (5)$$

$$H_{\%} = \left| \frac{Y_{md} - Y_{ms}}{Y_{max} - Y_{min}} \right| 100, \quad (6)$$

sendo:

- $X_m$ , o valor de X médio;
- $X_{max}$ , o valor de X máximo;
- $X_{min}$ , o valor de X mínimo;
- $H_{\%}$ , o valor da histerese;
- $Y_{md}$ , o valor de Y em  $X_m$  para modelo de descida;
- $Y_{ms}$ , o valor de Y em  $X_m$  para modelo de subida;
- $Y_{max}$ , o valor de X máximo;
- $Y_{min}$ , o valor de X mínimo.

Os dados da célula de carga foram coletados a cada 10 segundos e enviados ao sistema supervi-sório. Um banco de dados extenso armazena os milhares de dados, além de permitir serem exportados para manipulação. Por meio de ferramentas estatísticas do software Minitab, os modelos de compensação de temperatura para o sistema foram elaborados.

## 2.2 Célula de carga industrial

Os resultados obtidos ao final do experimento foram comparados a resultados adquiridos com o uso de uma célula de carga industrial (LCEC-50, OMEGA), que possui, internamente, compensação *premium* de temperatura. Para esta parte do experimento, o valor do resistor R1 foi ajustado para 18  $\Omega$ , gerando um ganho de 2686. Com essa configuração de resistor, garantiu-se que a faixa de tensão correspondente ao sinal de saída das células de carga fosse semelhante.

A Figura 4 mostra uma imagem do equipamento usado, que apresenta as seguintes especificações técnicas:

- Material do equipamento: alumínio anodizado;

- Sensibilidade: 3,0 mV/V;
- Máxima tensão: 15 V;
- Capacidade máxima:  $\sim 23$  kg;
- Impedância de entrada:  $350 \pm 50 \Omega$ .



Figura 4: Célula de carga industrial utilizada neste trabalho.

A Figura 5 mostra as montagens inseridas no interior da câmara climática para a realização dos testes.

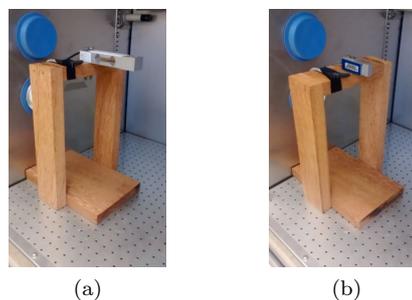


Figura 5: Montagem mecânica usada no experimento com uma célula de carga de baixo custo (a) e uma célula de carga industrial (b).

## 3 Resultados e discussão

Os dados lidos da célula de carga foram separados em três categorias: *Subida*, que contempla os dados coletados durante a elevação da temperatura nos testes; *Descida*, que contém os dados obtidos durante o decaimento da temperatura nos testes; e *Subida/Descida*, que engloba todos os dados. O procedimento adotado durante a análise foi idêntico para as três categorias.

### 3.1 Célula de carga de baixo custo

Para este trabalho, adotou-se a temperatura de 20 °C como referência. Desta forma, os dados coletados a essa temperatura foram usados para gerar modelos iniciais do comportamento do sistema. Para isso, foi usada a técnica de Regressão Linear (RL) no software Minitab. As Figuras 6a, 6b e 6c mostram a curva dos modelos para as categorias *Subida*, *Descida* e *Subida/Descida*, respectivamente. Os modelos iniciais para as três categorias são representadas, na mesma ordem, por

$$M_I = -135,1 + 0,2510S - 0,000008S^2, \quad (7)$$

$$M_I = -122,1 + 0,2352S - 0,000003S^2, \quad (8)$$

$$M_I = -134,3 + 0,2507S - 0,000008S^2, \quad (9)$$

sendo:

- $M_I$ , a massa medida pelo modelo inicial, g;
- $S$ , o resultado da conversão AD de 12 bits do sinal da célula de carga à temperatura de  $20 \pm 0,5$  °C.

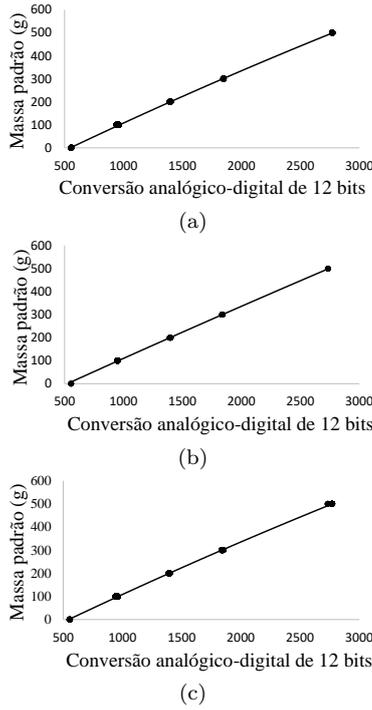


Figura 6: Gráfico de linha ajustada para modelos da categoria *Subida* (a) *Descida* (b) e *Subida/Descida* (c).

A partir dos modelos iniciais, foi feita uma Regressão Linear Múltipla (RLM) na qual foi tomada como variáveis independentes a temperatura e a resposta dos modelos iniciais. Esses modelos finais geram resultados já com compensação da temperatura. O modelo final para as categorias *Subida*, *Descida* e *Subida/Descida* são representadas, respectivamente, por

$$M_F = -6,9160 + 0,42606T + 0,997509M_I, \quad (10)$$

$$M_F = -8,6798 + 0,37516T + 0,999863M_I, \quad (11)$$

$$M_F = -7,0669 + 0,40420T + 1,00107M_I, \quad (12)$$

sendo:

- $M_F$ , a massa medida pelo modelo final, g;
- $T$ , a temperatura medida, °C;
- $M_I$ , a massa medida pelo modelo inicial, g.

A partir dos dados obtidos pelos modelos finais em cada uma das categorias, e pelas Equações 5 e 6, encontrou-se um valor de histerese para o sistema de aproximadamente 0,2%. Portanto, o efeito da histerese foi negligenciado na modelagem da compensação de temperatura.

A Figura 7 mostra gráficos de correspondência entre os dados de dois dos três modelos finais, nos quais uma linha de tendência com passagem forçada pelo zero foi traçada.

Os coeficientes angular e de determinação de cada reta foram analisados. Todos os valores, para ambos os coeficientes, foram muito próximos de 1, o que indica uma equivalência entre os modelos. Ou seja, apesar de não serem idênticos na estrutura, apresentam resultados equivalentes. Dessa forma, qualquer modelo está apto a ser usado no software do sistema. Escolheu-se, assim, o modelo *Subida/Descida* para ser usado.

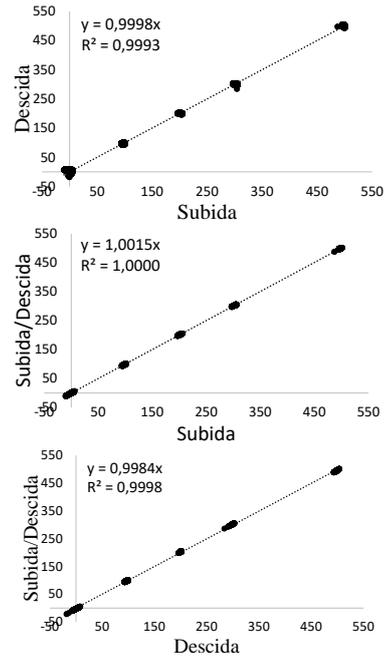


Figura 7: Gráfico de linha ajustada para análise de equivalência entre modelos.

As respostas para cada um dos modelos referentes ao sinal da célula de carga é mostrado na Figura 8. Os gráficos pertinentes aos modelos finais (com compensação de temperatura) apresentam pontos de resposta muito menos dispersos quando comparados àqueles referentes aos modelos iniciais (sem compensação de temperatura). Isso indica melhoria de exatidão e precisão do sistema de pesagem, ao minimizar o efeito da temperatura na resposta do sistema.

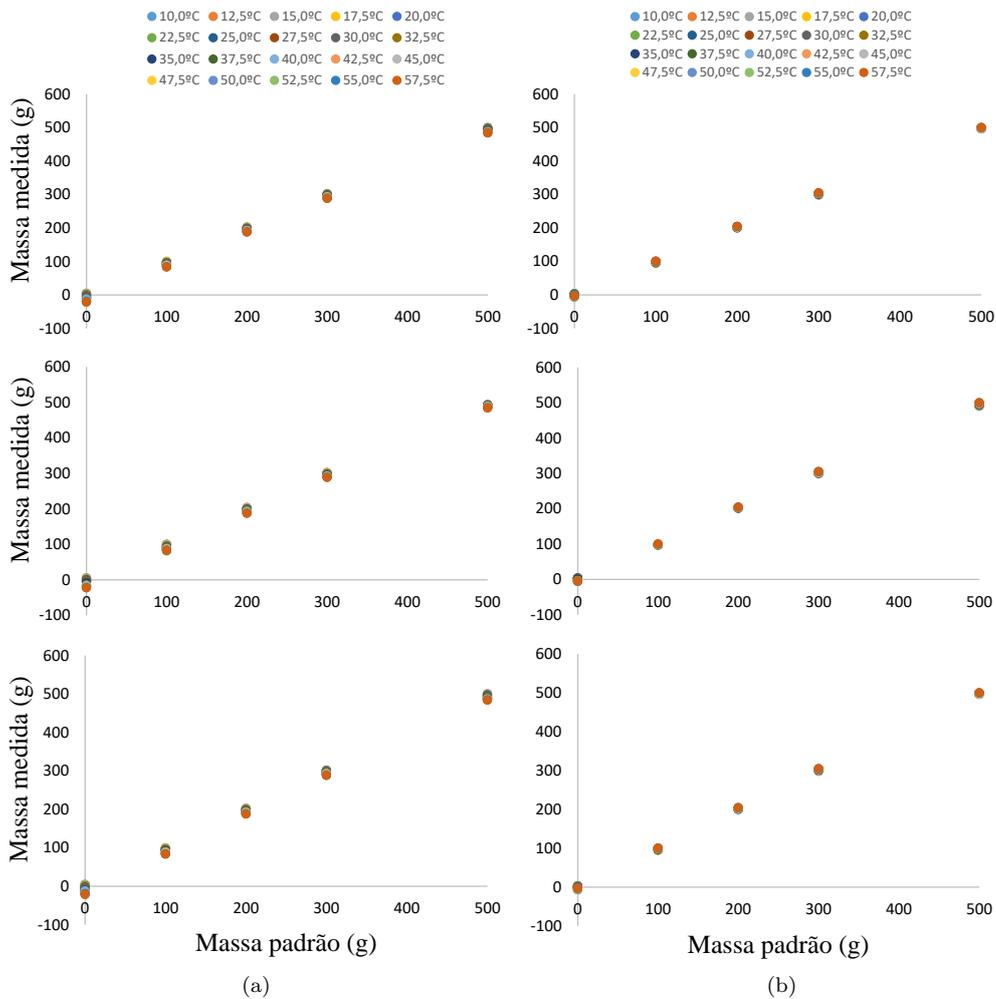


Figura 8: Relação entre as massas medidas e as massas padrão para modelos sem (a) e com (b) compensação de temperatura (b) para as etapas de subida, descida e subida/descida, respectivamente.

O modelo escolhido é, por fim, inserido ao sistema supervisor. Agora, a leitura da célula de carga é realizada na unidade de medida desejada (gramas).

O erro médio do sistema para cada massa testada antes e depois da compensação de temperatura é apresentada na Figura 9. Após a compensação de temperatura, o erro médio máximo do sistema foi reduzido em cerca de 68%.

A Figura 10 apresenta as curvas de erros para os testes com as diferentes massas sem e com compensação de temperatura pelo modelo *Subida/Descida*. Os gráficos mostram o comportamento dos erros sistemáticos do sistema, bem como a faixa de ocorrência de erros aleatórios considerando-se uma probabilidade de 95%. Após a aplicação da compensação de temperatura, o erro sistemático máximo do sistema, que antes foi de aproximadamente 20,53 g, equivalente a 0,41% de fundo de escala, diminuiu para 7,08 g, correspondente a 0,14%. Já o erro máximo, que sem a compensação de temperatura foi de 21,12 g, diminuiu para aproximadamente 7,38 g após a com-

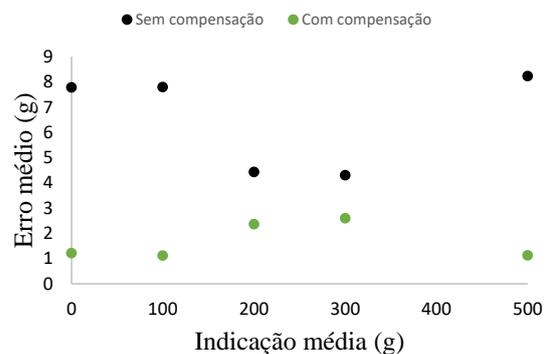


Figura 9: Comparação de erro médio para o sistema sem e com compensação de temperatura.

pensação.

### 3.2 Comparação entre células de carga

As mesmas técnicas de análise e compensação de temperatura foram aplicadas ao sistema usando-se uma célula de carga industrial. Modelos com compensação de temperatura foram ge-

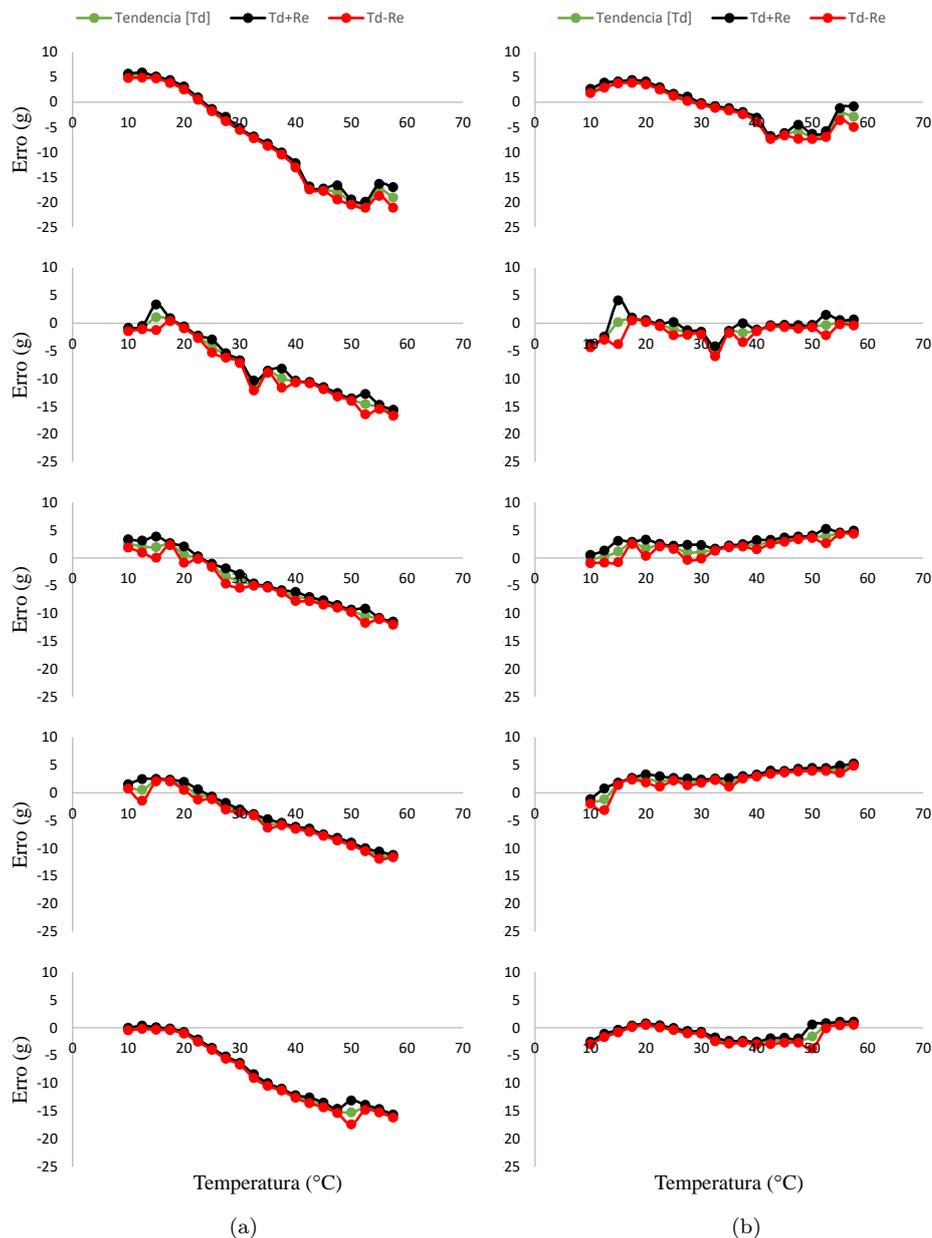


Figura 10: Curvas de erros para as massas de 0 g, 100 g, 200 g, 300 g e 500 g (de cima para baixo) para o sistema sem (a) e com (b) compensação de temperatura via modelo *Subida/Descida*.

radados, sendo escolhido novamente o modelo *Subida/Descida*. O valor da histerese foi de aproximadamente 0,14%, sendo também desconsiderada neste trabalho.

Em seguida, foram analisados os resultados obtidos pelo modelo escolhido em cada uma das células de carga. Para a comparação, três parâmetros de qualidade estatística foram analisados: o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2(a_j)$ ), a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e o coeficiente angular da reta do modelo.

A Tabela 1 mostra os valores de  $R^2(a_j)$ , REQM e coeficiente angular da reta do modelo para as duas células de carga.

Ambas as células de carga apresentaram resultados próximos ao ótimo, tanto para o  $R^2(a_j)$

quanto para o coeficiente angular da reta do modelo. Para ambos os parâmetros, quanto mais próximos de 1, melhor o desempenho do modelo.

Já o valor do REQM, para o sistema usando a célula de carga de baixo custo, foi cerca de 50% menor em comparação à outra célula de carga. Isso indica que o modelo proposto para o sistema desenvolvido apresenta uma incerteza de medição cerca de 50% menor do que o equipamento industrial usado para efeito de comparação.

#### 4 Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de processamento de dados e de compensação do efeito da temperatura para uma

Tabela 1: Comparação dos parâmetros de qualidade para as duas células de carga.

	Modelo <i>Subida/Descida</i>	
	CC de baixo custo	CC industrial
$R^2(a_j)$	0,9993	0,9974
REQM	4,4721	8,4261
Coef. linear	1,0000	0,9973

célula de carga. Com base nos resultados, pôde-se observar que o sistema se mostrou eficiente na mitigação do efeito da temperatura sobre as medições de peso. Vale ressaltar que a célula de carga de baixo custo, após a utilização do sistema proposto, apresentou um erro máximo de aproximadamente 0,14% e amplitude de erro sistemático menor que 1% comparada à capacidade máxima da célula de carga, o que confirma a eficácia na compensação de temperatura, melhorando a precisão e exatidão ao sistema. Dessa forma, o projeto elaborado apresenta-se como alternativa de sistema de pesagem para qualquer célula de carga, além de ser útil para aplicação do método gravimétrico de forma automática.

Para trabalhos futuros, pretende-se compactar os circuitos em apenas um, condensando o sistema, facilitando, assim, sua instalação. Além disso, pretende-se, principalmente, aplicar o sistema como ferramenta de calibração de um sensor de umidade.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Tecnológico Vale — ITV, pelo suporte financeiro dado ao projeto "Desenvolvimento de Sistema de Baixo Custo para Medição de Umidade de Minérios", do qual este trabalho faz parte.

### Referências

- Burnos, P. and Gajda, J. (2016). Thermal property analysis of axle load sensors for weighing vehicles in weigh-in-motion system, *Sensors* **16**(12): 2143.
- Choi, B. H., Chung, G. S., Lee, J.-S., Jeong, D.-U. and Park, K. S. (2009). Slow-wave sleep estimation on a load-cell-installed bed: a non-constrained method, *Physiological measurement* **30**(11): 1163.
- Devices, A. (2011). Low cost, low power instrumentation amplifier—ad620—datasheet, 2004, *Revision G*.
- Dinh, N. T. and Kanoun, O. (2015). Temperature-compensated force/pressure sensor based on multi-walled carbon nanotube epoxy composites, *Sensors* **15**(5): 11133–11150.
- Fan, J., Drewniak, J. L., Knighten, J. L., Smith, N. W., Orlandi, A., Van Doren, T. P., Hubing, T. H. and DuBroff, R. E. (2001). Quantifying smt decoupling capacitor placement in dc power-bus design for multilayer pcbs, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **43**(4): 588–599.
- Ferreira, J. d. C. (2011). Estudos sobre drenagem e redução de umidade do minério de ferro de carajás com a utilização de geossintéticos.
- Gu, J., Eom, H. and Kim, C. H. (2009). On-chip supply noise regulation using a low-power digital switched decoupling capacitor circuit, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **44**(6): 1765–1775.
- Kardek, A. A. (2016). Development of capacitive sensor for measuring soil water content, *Engenharia Agrícola* **31**(2).
- Lee, W. K., Yoon, H., Han, C., Joo, K. M. and Park, K. S. (2016). Physiological signal monitoring bed for infants based on load-cell sensors, *Sensors* **16**(3): 409.
- Pačnik, R. and Novak, F. (2010). A high-sensitivity hydraulic load cell for small kitchen appliances, *Sensors* **10**(9): 8452–8465.
- Pant, M. D., Pant, P. and Wills, D. S. (2002). On-chip decoupling capacitor optimization using architectural level prediction, *IEEE Transactions on very large scale integration (VLSI) systems* **10**(3): 319–326.
- Patil, I. N., Zope, H. and Patil, S. (2015). Development of low cost tdr system for soil moisture measurement, *Development* **2**(3).
- Rêgo Segundo, A. K., Martins, J. H., Monteiro, P. M. d. B., de Oliveira, R. A. and Freitas, G. M. (2015). A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils, *Sensors* **15**(10): 25546–25563.
- Santos, R. M., Oliveira, A., Vellame, L. M. and Brandão, F. J. C. (2006). Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo, *Ciência e Agrotecnologia* **30**(6): 1162–1169.
- Zhang, H., Jia, J., Wang, N., Hu, X., Tu, S.-T., Zhou, S. and Wang, Z. (2013). Development of on-line monitoring systems for high temperature components in power plants, *Sensors* **13**(11): 15504–15512.