

# SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE TEMPERATURA

EDUARDO HIDEYOSHI KOJIMA\*, FÁBIO IAIONE\*, VICTOR LEONARDO YOSHIMURA\*

*\*Faculdade de Computação  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil*

Emails: dukojima@gmail.com, iaione@facom.ufms.br, victor@facom.ufms.br

**Abstract**— Calibration is a process that establishes the correspondence between known values of physical quantity and the readings of a measuring instrument, usually to verify the measurement error. In precision live-stock farming, for example, it is common practice to measure the temperature of animals using RFID transponders with temperature sensors, having as goal the detection of physiological conditions, and it is necessary to calibrate these temperature measuring devices. In this article, an automated calibration system for temperature sensors is proposed.

**Keywords**— Temperature sensors, Calibration, Automation.

**Resumo**— A calibração é um processo que estabelece a correspondência entre valores conhecidos de uma grandeza física e as leituras de um instrumento de medição, geralmente com o objetivo de verificar o erro de medição. Na pecuária de precisão, por exemplo, é comum a medição da temperatura dos animais utilizando-se transponders RFID com sensor de temperatura, com o objetivo de se detectar condições fisiológicas, existindo a necessidade de realizar a calibração desses dispositivos medidores de temperatura. Neste artigo, é proposto um sistema para automação da calibração de sensores de temperatura.

**Palavras-chave**— Sensores de temperatura, Calibração, Automação.

## 1 Introdução

A calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, uma correspondência entre uma grandeza física conhecida ou padronizada e as leituras de um instrumento de medição ou sistema de medição, no qual esta grandeza é medida (BIPM-JCGM, 2012).

A calibração de sensores de temperatura é um processo cada vez mais necessário e imprescindível, pois a temperatura é, provavelmente, a grandeza física mais medida e controlada, estando presente em diversos fenômenos físicos, químicos e térmicos. Periodicamente, é necessário avaliar as medições dos sensores e aplicar os devidos ajustes, pois os sensores de temperatura, assim como quaisquer outros dispositivos de medição, estão sujeitos as variações conhecidas como erros. As variações podem ocorrer devido a qualidade dos materiais utilizados, o processo de fabricação, as condições ambientais e o desgaste físico de componentes.

Na pecuária de precisão, por exemplo, é comum a medição da temperatura dos animais utilizando-se transponders RFID<sup>1</sup> com sensor de temperatura, com o objetivo de se detectar condições infecciosas (febre aftosa e outras), inflamatórias, estresse térmico, momento do cio e do parto. Assim, diversos trabalhos tem sido desenvolvidos nessa área, nos quais existe a necessidade de realizar a calibração de dispositivos medidores de temperatura já existentes, ou que estão sendo desenvolvidos (Junior et al., n.d.) (dos S. Neto, 2010)

(Berckmans, 2006) (Junior, 2014).

Dado o exposto, este trabalho propõe um sistema de calibração através da comparação direta do instrumento a ser calibrado, com o sensor de referência DS18B20, visto que existe uma carência de sistemas de baixo custo com essa finalidade. Para a realização da calibração direta, ambos os sensores devem ser imersos em um meio líquido (no sistema proposto, o líquido utilizado é água), e então, a temperatura do líquido deve ser variada de forma controlada, ou seja, a temperatura deve variar de forma linear, formando uma rampa de temperatura, passando pela temperatura normal dos animais (aproximadamente 39°C) em algumas dezenas de minutos, para que as medidas do sensor a ser calibrado e do sensor de referência possam ser comparadas e analisadas em uma determinada faixa de temperatura.

## 2 Fundamentação teórica

O objetivo do controle por realimentação é levar o sinal de erro atuante a zero. Para tanto, o controlador (detector de erro e compensador) produz um sinal de controle, denominado de ação de controle. A Figura 1 mostra um diagrama de blocos básico de um sistema de controle, o qual consiste em um controlador, um atuador, uma planta e um sensor. O controlador detecta o sinal de erro atuante e alimenta um atuador, dispositivo de potência que produz um sinal de entrada na planta de acordo com o sinal de controle, de modo que a saída se aproxime do sinal de entrada da referência. O sensor converte a variável de saída em

<sup>1</sup> Radio-Frequency Identification

outra variável conveniente, para comparar a saída ao sinal de entrada de referência (Ogata, 2011).

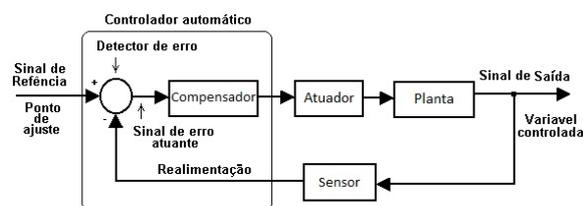


Figura 1: Diagrama de blocos de um sistema de controle.

### 3 Metodologia

Inicialmente serão apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento do sistema e na sequência, os métodos.

#### 3.1 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento do sistema foram utilizados os seguintes materiais:

- Pastilha termoeétrica Peltier TEC1-12710 (Rocha et al., 2013) (Hebei I.T. (Shanghai) Co., n.d.);
- Sensor de temperatura DS18B20 (Maxim Integrated, 2015);
- Arduino Mega 2560 (Monk, 2013);
- Transistor MOSFET FQP27P06 (canal P) (Fairchild Semiconductor, 2001);
- Transistor bipolar BC547 (Fairchild Semiconductor, 2002);
- Porta garrafa de isopor (600ml); e
- Bomba de água (AD20P-1230B).

A Figura 2 mostra um diagrama de blocos do sistema desenvolvido.

#### 3.2 Cálculo da potência de aquecimento da água

A seguir é apresentado o cálculo para o aquecimento de água (300 ml) de uma temperatura de 0°C para 45°C em 15 minutos, valores aceitáveis para calibração de sensores usados em animais. O cálculo foi fundamental para se ter uma base da potência necessária para aquecer o sistema.

Considerando-se:  $1\text{cal} \cong 4,186\text{J}$ , densidade da água =  $1\text{g}/\text{cm}^3$  e calor específico ( $c$ ) da água =  $1\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$ , 300ml de água = 300g de água e 15 minutos = 900 segundos, tem-se que:

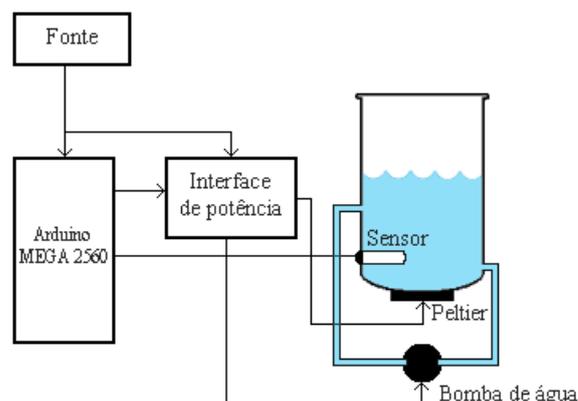


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema desenvolvido.

$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot c \cdot \Delta\theta \\
 Q &= 300 \cdot 1 \cdot (45^\circ - 0^\circ) \\
 Q &= 13500\text{cal} \\
 13500\text{cal} &= 56511\text{J} \\
 \text{Pot} = \frac{En}{\Delta t} &= \frac{56511}{900} = 62,79\text{J}/\text{s} = 62,79\text{W}
 \end{aligned}$$

Com o resultado, selecionou-se uma pastilha Peltier de 60W

#### 3.3 Teste com a pastilha Peltier TEC1-12710

Uma fonte de alimentação foi ajustada para operar em 12V, com limite de corrente de 6A. Com a fonte de alimentação ajustada, iniciou-se o teste, coletando a temperatura medida pelo sensor DS18B20 a cada 1s. A faixa utilizada para o aquecimento foi de 7°C até 50°C. O gráfico da Figura 3 mostra o resultado obtido.

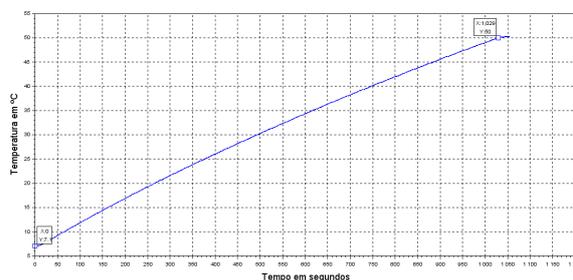


Figura 3: Gráfico da elevação de temperatura da água utilizando a pastilha Peltier TEC1-12710.

Nota-se que o tempo de aquecimento no intervalo de temperaturas foi de aproximadamente 17 minutos.

Um fato observado durante a realização do teste com a pastilha Peltier foi que a corrente diminuía conforme a temperatura da água subia.

Esse fato pode ser explicado por conta da pastilha Peltier aumentar sua resistência elétrica interna em função do aumento da diferença entre a temperatura do ar (lado frio) e da água (lado quente).

### 3.4 Modelagem do sistema e escolha do compensador

A princípio desejava-se modelar cada componente separadamente (atuador, planta e sensor), porém, realizou-se a modelagem de todos os componentes do sistema em conjunto. A modelagem partiu do teste sobre a pastilha Peltier da seção 3.3, no qual a pastilha TEC1-12710 foi submetida a entrada degrau de 12V, gerando o gráfico da Figura 3. Com esses dados foi possível obter a função transferência do sistema, da seguinte forma:

$$v(t) = 12 \cdot \tilde{1}(t) \xrightarrow{TL} V(s) = \frac{12}{s} \quad (1)$$

Através do gráfico da Figura 3 tem-se:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \frac{(50-7,1) \cdot t}{1029} = \frac{42,9 \cdot t}{1029} \\ &\xrightarrow{TL} \Theta(s) = \frac{42,9}{1029 \cdot s^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Onde TL é a Transformada de Laplace e  $\tilde{1}(t)$  é a função degrau unitário. A Equação 2 refere-se a inclinação da reta.

Através das Equações 1 e 2 obteve-se a função transferência (Equação 3).

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{\frac{42,9}{1029 \cdot s^2}}{\frac{12}{s}} = \frac{42,9}{1029 \cdot s^2} \cdot \frac{s}{12} \\ &= \frac{3,575}{1029 \cdot s} = \frac{1}{287,83 \cdot s} \end{aligned} \quad (3)$$

A modelagem do sistema contendo atuador, sensor e planta resultou em um sistema de primeira ordem.

Para o sistema modelado, optou-se por utilizar um controlador somente com um compensador proporcional, pois um compensador proporcional mais integral poderia causar um overshoot na saída, dificultando o controle do sistema, já que o atuador somente aquece o sistema, não podendo resfriá-lo.

### 3.5 Simulações

Para verificar o comportamento do sistema modelado e a ação do compensador proporcional, foram realizadas simulações no (Scilab Enterprises, 2017), utilizando o pacote *XCOS*. A Figura 4 mostra o diagrama de blocos utilizado nas simulações. No diagrama de blocos, nota-se a presença de um limitador de tensão ajustado para 12V, o qual tem a finalidade de simular a restrição da tensão aplicada na pastilha Peltier.

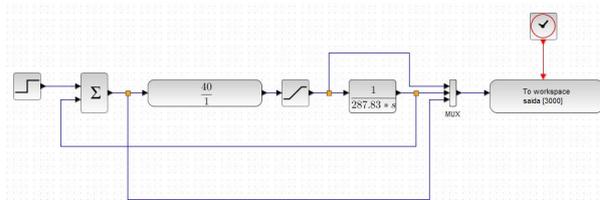


Figura 4: Diagrama de blocos utilizado na simulação.

Através das simulações, verificou-se que aumentando o valor de  $Kp^2$ , o sistema tende a estabilizar mais rápido. Porém, com ganhos proporcionais elevados, como por exemplo  $Kp = 40$  e  $Kp = 100$ , não há grandes diferenças no tempo para estabilizar.

### 3.6 Circuito eletrônico

Para fazer o controle do sistema, foi projetado o circuito eletrônico, cujos diagrama esquemático e representação do protótipo estão na Figura 5. Observa-se que existem dois *buffers* de corrente, um para a pastilha Peltier e um para a bomba de água.

Apesar da bomba de água ser controlada por meio de PWM<sup>3</sup>, utilizou-se somente de um controle LIGA/DESLIGA, PWM = 0 para desligá-la ou PWM = 255 para ligá-la. Já o controle da pastilha Peltier depende do erro em relação a referência (*setpoint*), ou seja, o microcontrolador irá enviar um sinal PWM entre 0 e 255 (Monk, 2013).

### 3.7 Firmware

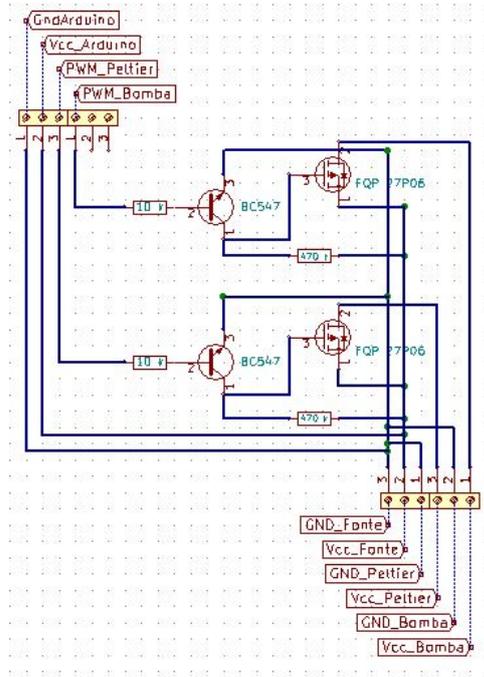
O *firmware* para o Sistema de Calibração foi desenvolvido em linguagem C++.

O *firmware* inicia carregando as variáveis globais e definindo os pinos do Arduino a serem utilizados. Em seguida o usuário deve informar o modo de utilização, para isso ele deve digitar 0, caso deseje modo usuário ou 1, caso deseje a conexão entre microcontroladores. No modo 0, o sistema é controlado por um usuário por meio de um computador PC, e no modo 1 o sistema pode ser controlado por outra placa. As diferenças entre os modos são:

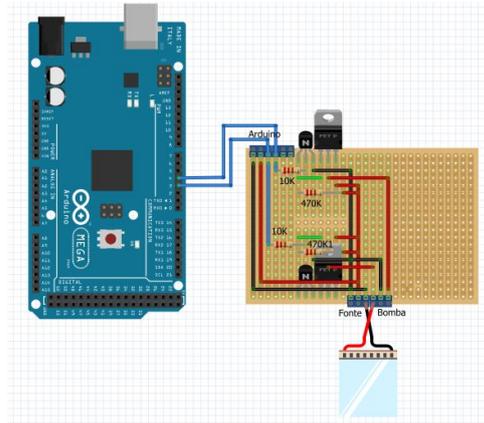
- No modo 0 as etapas de configuração são mostradas (como um menu) no monitor serial de um PC, enquanto no modo 1 não são;
- Caso haja um erro em definir alguma das variáveis, o modo 0 informa esse erro, enquanto o modo 1 envia a *string* “ERRO”;
- A temperatura atual do sensor, o valor do erro, o valor proporcional e o sinal PWM são

<sup>2</sup>Ganho proporcional

<sup>3</sup>Pulse Width Modulation



(a)



(b)

Figura 5: Diagrama esquemático (a) e protótipo do circuito eletrônico (b).

mostrados no monitor serial no modo 0 a cada iteração. Enquanto no modo 1, é possível apenas se ler a temperatura atual, com o comando  $Ta$ ;

- A comunicação no modo 1 é realizada pela porta serial física do Arduino 2560, pinos TX0 e RX0, e no modo 0 pela porta serial virtual (USB), ambas configuradas em 9600, 8, N, 1.

Em ambos os modos, no próximo passo deve-se definir as variáveis temperatura inicial, temperatura final e tempo. Porém, as definições devem seguir a regra da Equação 4.

$$\frac{T_f - T_i}{T} < 0,039 \quad (4)$$

Onde,  $T_f$  é a temperatura final,  $T_i$  é a temperatura inicial e  $T$  é o tempo. Esse cálculo é necessário, pois de acordo com o gráfico da Figura 3, consegue-se uma taxa de elevação de temperatura de no máximo aproximadamente  $0,041^\circ\text{C}$  por segundo. Define-se um valor abaixo do valor do gráfico para se ter uma margem de segurança.

Com as variáveis definidas, pode-se então acionar o elemento aquecedor do sistema. O sistema possui o comando *Start* para ligar o sistema e o comando *Stop* para desligar. No modo 0, os dados são coletados e exibidos em um intervalo de  $750\text{ms}$ , tempo de conversão do sensor. Como já foi mencionado anteriormente, existe o comando  $Ta$  em ambos os modos, para a exibição da temperatura atual a qualquer momento. Quando o sistema é ligado, no modo 0 mostra uma mensagem no monitor serial e no modo 1 transmite um sinal de “OK”, ocorrendo o mesmo ao desligar o sistema. Com o sistema ligado, inicialmente precisa-se chegar a temperatura inicial, então o sistema faz um controle para atingir essa temperatura. Quando a temperatura inicial é atingida, a referência (*set-point*) é incrementada, de acordo com o tempo e variação de temperatura desejados, até atingir a temperatura final. Esse controle faz com que se consiga a “rampa” de temperatura desejada, entre a temperatura inicial e a temperatura final, de acordo com o tempo definido.

## 4 Resultados

A Figura 6 mostra o sistema completo montado para a realização dos testes.



Figura 6: Sistema completo para realização dos testes.

### 4.1 Testes 1, 2, 3 e 4

Para os testes 1, 2, 3 e 4, o sistema foi configurado com os seguintes parâmetros:

- temperatura inicial =  $30^\circ\text{C}$ ;
- temperatura final =  $50^\circ\text{C}$ ;
- Para o teste 1, o tempo foi configurado para 15 minutos. Calculando o intervalo de



A Figura 10 mostra os resultados para a temperatura dos testes 5 e 6.

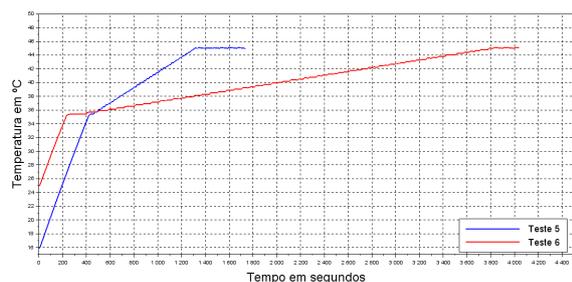
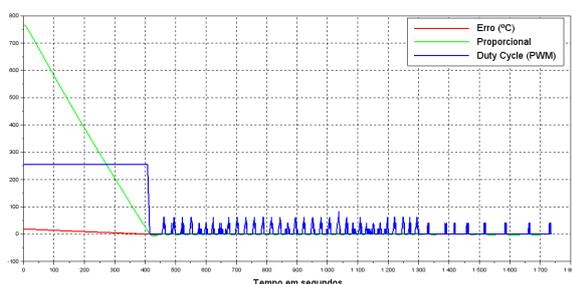
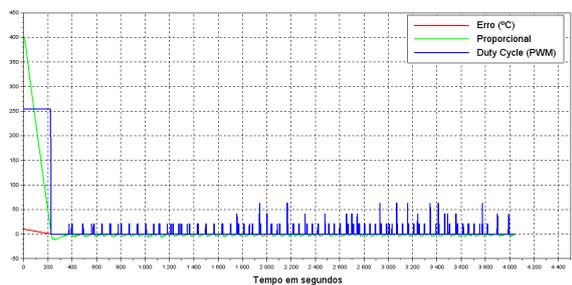


Figura 10: Gráfico da temperatura dos testes 5 e 6.

A Figura 11 mostra os sinais obtidos dos testes 5 e 6.



(a)



(b)

Figura 11: Sinais do teste 5 (a) e sinais do teste 6 (b).

### 4.3 Testes 7 e 8

Para os testes 7 e 8, o sistema foi configurado com os seguintes parâmetros:

- temperatura inicial =  $25^{\circ}\text{C}$ ;
- temperatura final =  $65^{\circ}\text{C}$ ;
- Para o teste 7, o tempo foi configurado para 30 minutos. Calculando o intervalo de tempo obtido através da Figura 12, obteve-se  $\approx 30,06\text{min}$ .
- Para o teste 8, o tempo foi configurado para 60 minutos. Calculando o intervalo de tempo obtido através da Figura 12, obteve-se  $\approx 60,08\text{min}$ .

A Figura 12 mostra os resultados para a temperatura dos testes 7 e 8.

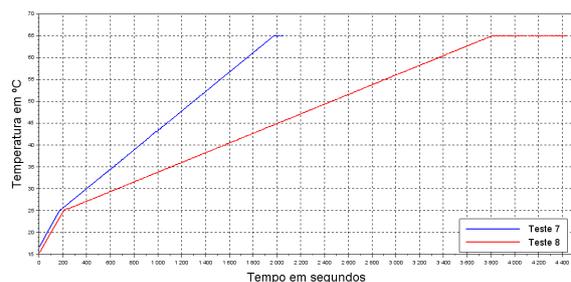
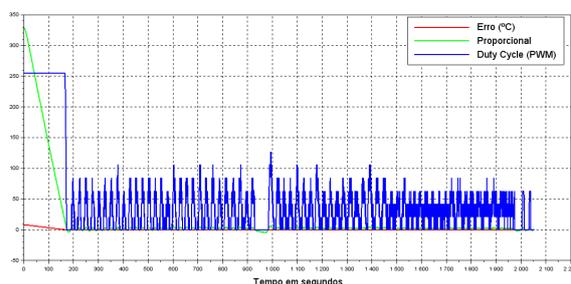
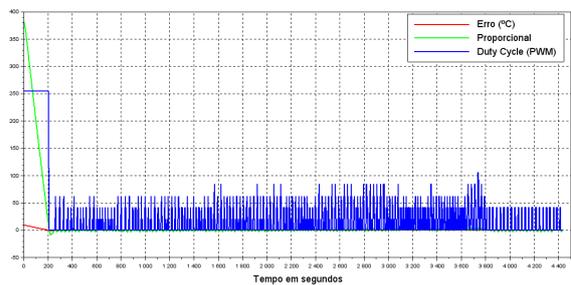


Figura 12: Gráfico da temperatura dos testes 7 e 8.

A Figura 13 mostra os sinais obtidos para os testes 7 e 8.



(a)



(b)

Figura 13: Sinais do teste 7 (a) e sinais do teste 8 (b).

## 5 Análise dos testes

Analisando os testes pode-se observar que a temperatura variou linearmente entre a temperatura inicial e a temperatura final. Em relação ao tempo para a temperatura atingir a temperatura inicial, o pior caso foi o do Teste 5, aproximadamente 7 minutos. Entretanto, neste teste a temperatura inicial era relativamente elevada ( $35^{\circ}\text{C}$ ) e a temperatura inicial da água era de aproximadamente  $15^{\circ}\text{C}$ . Cabendo observar que o tempo de 7 minutos não é um problema quando o sistema for utilizado para calibrar sensores, pois os tempos envolvidos são de 30 a 60 minutos.

Verifica-se que para determinados intervalos de temperatura e um determinado tempo, a

rampa de temperatura apresenta alguns degraus indesejáveis. Porém, esse fato pode ser explicado pela resolução do sensor DS18B20, pois como esta é de  $0,0625^{\circ}\text{C}$  e se coleta dados a cada  $750\text{ms}$ , se obtém muitas medidas sequenciais de temperatura com o mesmo valor. Por exemplo, no Teste 6, como a variação de temperatura desejada foi de  $10^{\circ}\text{C}$  ( $35^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$ ), o sensor é capaz de coletar  $160$  ( $\frac{10}{0,0625}$ ) medidas de temperatura diferentes. Como o intervalo de tempo foi de  $3600$  segundos, e coleta-se dados a cada  $750\text{ms}$ , tem-se  $4800$  ( $\frac{3600}{0,75}$ ) pontos de temperatura coletados, ou seja, o sensor irá capturar aproximadamente  $30$  ( $\frac{4800}{160}$ ) pontos de temperatura iguais, fazendo que ocorram os degraus.

A Tabela 1 mostra a quantidade de medidas em cada um dos 8 testes.

Tabela 1: Quantidade de medidas em cada um dos testes realizados.

	Nº de pontos diferentes no intervalo de temperatura devido a resolução do sensor	Nº de pontos de temperatura coletados (tempo [s] / $750\text{ms}$ )	Nº de pontos repetidos
Teste 1	320	1200	3,75
Teste 2	320	2400	7,5
Teste 3	320	3600	11,25
Teste 4	320	4800	15
Teste 5	160	1200	7,5
Teste 6	160	4800	30
Teste 7	640	1200	1,875
Teste 8	640	4800	7,5

Cabe aqui uma observação sobre a diferença entre os tempos definido e medido. Essa diferença deve-se ao fato de não se ter utilizado interrupções na temporização. Entretanto, essa discrepância entre os tempos não é um problema, pois é insignificante perante o tempo total do processo de calibração.

Calculando o coeficiente de correlação de Pearson ( $R^2$ ) dos dados mostrados nas Figuras 8, 10 e 12, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 2. Nota-se que os valores dos testes são próximos de 1, o que indica um comportamento linear do aumento de temperatura, conforme desejado.

Tabela 2: Coeficiente de correlação de Pearson

Teste	Valor de $R^2$
1	0,999944
2	0,999933
3	0,999939
4	0,999927
5	0,999749
6	0,999631
7	0,999987
8	0,999987

## 6 Conclusão

Os sensores de temperatura necessitam ser checados periodicamente para verificar se continuam tendo a exatidão necessária. A calibração dos sensores de temperatura é essencial para garantir a confiabilidade do valor medido.

O sistema de calibração aqui sugerido, através da comparação direta, mostra-se confiável. Uma vez que o sistema proposto consegue gerar uma “rampa” de temperatura, para que se possa comparar as medidas do sensor a ser calibrado com as medidas de um padrão local, em um determinado intervalo de temperatura e tempo. Por certo, nota-se que em determinados testes a rampa de temperatura apresentou alguns degraus entre uma temperatura e outra. Entretanto, esses degraus não são um problema para o processo de calibração, pois a calibração muitas vezes compara as medidas do sensor que está sendo calibrado a cada  $1^{\circ}\text{C}$ . Além disso, a temperatura de referência, usada na calibração, não precisa ser necessariamente a do sensor do sistema (DS18B20), podendo ser de outro medidor, também inserido no banho, com resolução melhor e com menor incerteza de medição.

Nota-se que o sinal de erro, durante a geração da rampa entre a temperatura inicial e a temperatura final, é bem pequeno. Isso se deve ao fato do *setpoint* (referência) sempre mudar ao longo do tempo definido. Ou seja, não se trata de um sistema de controle puro, mas sim de um sistema de controle com *setpoint* variável no tempo.

Enfim, os resultados obtidos foram satisfatórios, considerando a aplicação do sistema, e os objetivos do trabalho foram alcançados. Por certo, o sistema pode ser melhorado, utilizando-se uma pastilha Peltier de maior potência, uma ponte H para inverter a polaridade do Peltier e resfriar a água, e um compensador mais sofisticado.

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) pelo auxílio financeiro.

## Referências

- Berckmans, D. (2006). Automatic on-line monitoring of animals by precision livestock farming, *Livestock production and society* **287**.
- BIPM-JCGM (2012). 200 (2012) international vocabulary of metrology-basic and general concepts and associated terms (vim).
- dos S. Neto, Q. (2010). *Termus - uma plataforma para aferição remota de temperatura de bovinos da raça brangus*, Master's thesis, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
- Fairchild Semiconductor (2001). FQP27P06: 60V P-Channel MOSFET - datasheet. Disponível em: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/FQP27P06.pdf> Acessado em: 03 nov. 2017.

- Fairchild Semiconductor (2002). BC546/547/548/549/550 - datasheet. Disponível em: [http://www.ece.usu.edu/ece\\_store/spec/BC547.pdf](http://www.ece.usu.edu/ece_store/spec/BC547.pdf) Acessado em: 10 nov. 2017.
- Hebei I.T. (Shanghai) Co., L. (n.d.). TEC1-12710 - datasheet. Disponível em: <http://peltiermodules.com/peltier/datasheet/TEC1-12710.pdf> Acessado em: 10 jul. 2017.
- Junior, J. B. G. C. (2014). *Predição e comportamento do parto em bovinos da raça Holandesa*, PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Junior, J. B. G. C., Pires, P. P. and Neto, Q. S. (n.d.). Predição de eventos fisiológicos através da temperatura retículo-ruminal, *Embrapa Gado de Corte-Artigo em anais de congresso (ALICE)*, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PECUÁRIA DE PRESIÇÃO APLICADA À BOVINOCUTURA DE CORTE, 1., 2014, Campo Grande. Anais... Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2014. 10 p.
- Maxim Integrated (2015). DS18B20 - datasheet. Disponível em: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> Acessado em: 15 jun. 2017.
- Monk, S. (2013). *Programação com Arduino: Começando com Sketches*, Editora Bookman.
- Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*, 5 edn, Pearson Prentice Hall.
- Rocha, J. P. M., Mendes, M. D. S., de Medeiros, T. Í. O. and da C. Júnior, A. G. (2013). Um exemplo do uso da abp na disciplina de instrumentação eletrônica do ifpb - mini geladeira peltier controlada por arduino, *XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (Cobenge 2013)*.
- Scilab Enterprises (2017). Scilab: Open source software for numerical computation. Versão 6.0.0.