

CONTROLE DE TEMPERATURA DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS COM BASE NA CORRENTE ELÉTRICA DO COMPRESSOR

Gustavo A. de Souza ¹
Raul J. Liston ¹
Everton Machado ^{2,*}
Alexsandro S. Silveira ¹
Christian J. L. Hermes ¹

¹ POLO Laboratórios, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil

² Whirlpool Latin America, Joinville, SC, Brazil. * Autor para correspondência: everton_machado@whirlpool.com

Resumo: Com o passar dos anos, os refrigeradores domésticos passaram por diversas atualizações no sistema de controle de temperatura nos compartimentos refrigerados. A principal delas foi a migração dos termostatos eletromecânicos de bulbo para sensores de temperatura do tipo termistores, conectados a uma placa eletrônica. Porém, tal atualização implica em um alto custo de manufatura e manutenção. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma técnica alternativa de controle de baixo custo capaz de regular a temperatura interna de um refrigerador doméstico utilizando apenas a corrente elétrica do compressor como variável de processo, a qual é sensível à variação de carga térmica em sistemas de refrigeração. Tal estratégia foi aplicada em um produto doméstico com uma única porta e um compressor de velocidade fixa. O aparelho foi testado em dois níveis de temperatura ambiente (16 e 32°C). Dois diferentes tipos de ensaios foram realizados: abaixamento de temperatura e perturbação por degelo. Todos os experimentos foram realizados em uma câmara climatizada que controla temperatura, umidade e velocidade do ar de acordo com as normas vigentes. O algoritmo de controle foi composto por uma troca dinâmica de referência para um controlador PI, juntamente com um conjunto de conjecturas empíricas. A técnica de controle por corrente elétrica foi capaz de manter a temperatura do refrigerador em níveis de tolerância aceitáveis, na ordem de $\pm 1^\circ\text{C}$, valores muito próximos dos resultados de controle de temperatura apresentados nos testes de referência, mas com um custo de implementação aproximadamente 2 vezes menor.

Palavras-chave: controle por corrente, compressor de velocidade fixa, refrigeradores domésticos

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que, atualmente, existam mais de um bilhão de refrigeradores domésticos em operação no globo. Dada tamanha demanda de mercado, os fabricantes operam em um processo contínuo para reduzir custo e manter a qualidade do produto. A evolução desses aparelhos eletrodomésticos levou à algumas mudanças no sistema de controle, tais como a substituição de termostatos eletromecânicos por termistores conectados a uma placa eletrônica, o que trouxe vantagens e desvantagens ao produto. As vantagens estão relacionadas a flexibilidade de ajuste no controle por parte do usuário e a facilidade de embarcar novas lógicas de controle por parte do fabricante. Entretanto, dentre as desvantagens pode-se citar o posicionamento do sensor e os custos de fabricação e manutenção, problemas que podem ser contornados através de estratégias de controle baseadas em estimativas de variáveis.

Tais estratégias, também conhecidas como técnicas *sensorless*, são bastante difundidas no controle de posição e rotação de motores DC do tipo *Brushless*. O estudo de Johnson *et al.* (1999), por exemplo, contempla os principais métodos de controle para atuar sobre motores do tipo DC, destacando-se a implementação de um filtro de Kalman para estimar a variável de processo. Ao longo dos anos, as técnicas de controle antes aplicadas a motores DC começaram a ser utilizadas em motores de indução de velocidade variável. Contudo, para controlar esse tipo de motor é necessária uma malha de atuação interna, como proposto por Cho (2003), que desenvolveu e patenteou um controlador capaz de regular os níveis de corrente e manter a velocidade do atuador nos níveis desejados. Na mesma linha, Shiga *et al.* (2020) obtiveram resultados satisfatórios ao projetar um estimador para a velocidade de rotação do compressor utilizando apenas a corrente elétrica do motor como variável de processo.

Aplicações e estudos de técnicas *sensorless* em sistemas de refrigeração com compressores de velocidade fixa são escassos na literatura. Contudo, existem trabalhos que apresentam alternativas para regular a temperatura de um ambiente refrigerado de forma não convencional com resultados satisfatórios. Por exemplo, Choi *et al.* (1998) mesclaram algoritmos *fuzzy* e rede neurais artificiais para controlar a temperatura interna de um depósito de alimentos. Alguns anos depois, Di Felice *et al.* (2009) propuseram um controle adaptativo capaz de melhorar tanto a amplitude quanto o período

de oscilação da temperatura interna de um refrigerador mediante a utilização de técnicas *fuzzy*. No entanto, a temperatura foi a principal variável de processo em ambos os trabalhos. Recentemente, o controle da temperatura interna de um refrigerador aplicando técnicas de estimativa de variáveis foi proposto por Machado (2019) com a finalidade de utilizar a corrente elétrica do compressor como uma alternativa em caso de falha no sistema de controle por temperatura. Para tanto, uma lógica sensorless do tipo *fuzzy* foi aplicada em um refrigerador doméstico de uma porta. Nesta linha, o presente artigo apresenta uma nova estratégia de controle para compressores de velocidade única, a partir da medição de corrente elétrica do compressor. Para tanto, um circuito eletrônico de baixo custo foi desenvolvido, permitindo manter a temperatura do gabinete de um refrigerador doméstico de uma porta em níveis estabelecidos por norma.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

Apesar de classificado como uma porta, o produto escolhido possui um gabinete com 342 L dividido em congelador, localizado na sua parte superior, e gabinete resfriado, posicionado na parte inferior, como ilustra a Fig. 1. O sistema de refrigeração utiliza R600a como fluido refrigerante e um compressor de velocidade fixa, com condensação natural e evaporação forçada por um ventilador de 5 W, além de um tubo capilar que troca calor com a linha de sucção, configurando um trocador de calor interno. O sistema possui um processo de degelo automático, enquanto o controle de temperatura é feito por histerese controlada com base em um termistor encontrado entre os compartimentos congelador e resfriado (1), com uma faixa de operação entre -9°C e -15°C . O sinal elétrico gerado pela medição é enviado até uma placa de controle interna (2) através de um fio embutido no material isolante do gabinete. A placa envia o sinal de atuação até o compressor (3). Uma vez que a lógica de controle por corrente se prove equivalente ou melhor do que o controle original do produto, pode-se remover o termistor (1) do sistema e realocar a placa de controle da posição (2) para junto do compressor (3) através da inserção de um circuito *shunt*, o que não só reduz o custo de cabeamento, mas também facilita o processo de manufatura.

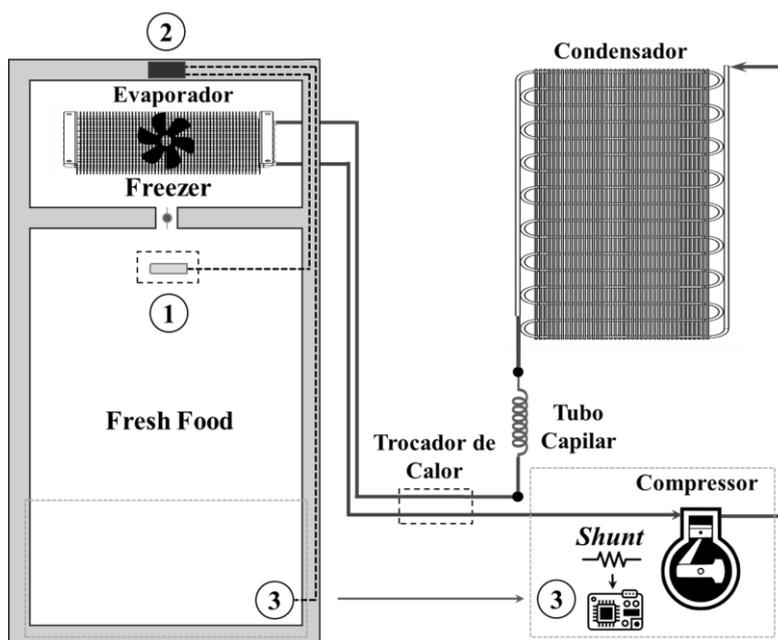


Figura 1. Diagrama esquemático do refrigerador em estudo.

Os testes experimentais foram realizados em uma câmara climatizada, capaz de controlar a temperatura ambiente na faixa de 15°C a 60°C , com uma umidade relativa podendo variar entre 30% e 95%. Neste trabalho, todos os experimentos foram conduzidos com o produto a vazio, em temperaturas ambientes de 16°C e 32°C e umidade relativa de 50%. Durante os testes, perturbações foram impostas ao produto a fim de simular um processo de degelo. As variáveis resposta empregadas para avaliar e comparar o desempenho das lógicas de controle foram os tempos de abaixamento de temperatura (*pull-down*) e de rejeição de perturbação.

3. MEDIÇÃO DE CORRENTE

Um resistor *shunt* é usado para medir a corrente que o percorre através da queda de tensão resultante nos seus terminais. Para tanto, o *shunt* precisa ter uma resistência conhecida e com baixa magnitude para não afetar a corrente original do circuito, motivo pelo qual um circuito amplificador é necessário. No entanto, é possível criar um circuito completo com um AmpOp (amplificador operacional) e alguns componentes passivos de baixo custo.

Como os compressores de refrigeração funcionam por corrente alternada, a tensão medida sobre o resistor *shunt* oscila entre valores positivos e negativos de forma senoidal. Todavia, a entrada analógica do microcontrolador embarcado no produto só opera com níveis de tensão acima de 0 V para não danificar a placa. Assim, surge a necessidade de um circuito que consiga não só deslocar o sinal medido para valores superiores a 0 V, mas também amplificá-lo para facilitar a sua medição. Além disso, o circuito foi concebido para operar sem a necessidade de ser alimentado por uma fonte simétrica. Para atingir todos os requisitos de projeto, chegou-se ao desenho de circuito amplificador não inversor com terra flutuante ilustrado na Fig. 2.

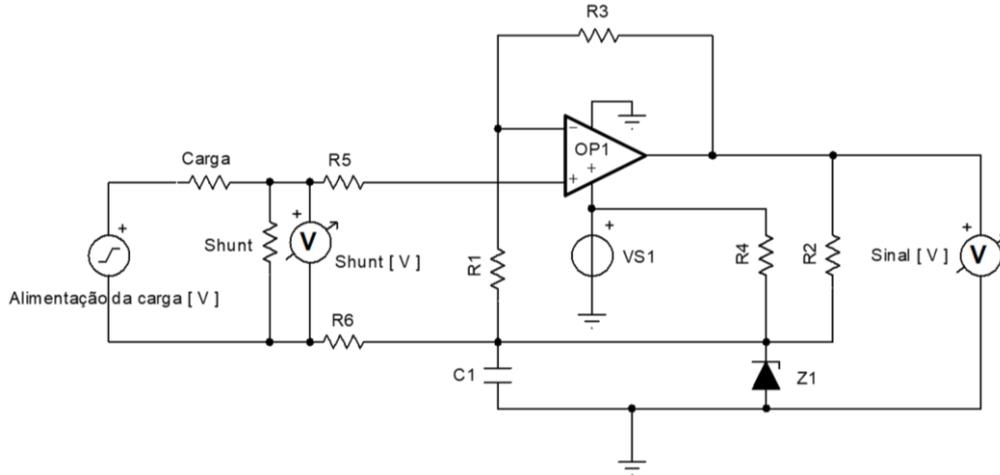


Figura 2. Diagrama do circuito amplificador não inversor com terra flutuante.

O funcionamento do circuito foi simulado através do pacote SPICE. Os resultados são apresentados na Fig. 3 em termos de (a) tensão sobre o resistor *shunt* e (b) o sinal de saída do circuito. Os resultados obtidos mostram que o circuito consegue realizar a amplificação sem distorções. O circuito também apresenta uma saída com nível DC positivo, necessário para que o ADC (conversor analógico digital) do microcontrolador consiga efetuar a leitura. Com os requisitos de projeto satisfeitos, o circuito foi então montado em *proto-board* e avaliado com um gerador de sinais e um osciloscópio. Após esta etapa, o circuito *shunt* foi acoplado ao circuito elétrico do compressor do produto em estudo, onde a corrente elétrica quadrática média foi obtida via *software* embarcado no microcontrolador, sendo usada então como variável de processo para o controlador de temperatura do produto.

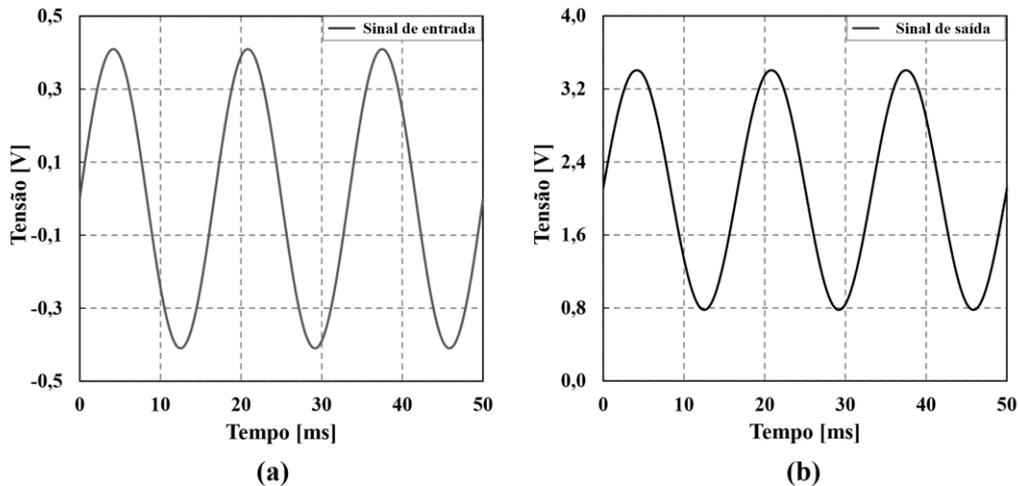


Figura 3. Resultados da simulação do circuito *shunt*: sinais de (a) entrada e (b) saída.

A Fig. 4(a) compara as medições do método desenvolvido e do equipamento de referência, que consiste em um transdutor de corrente, enquanto a Fig. 4(b) mostra o desvio relativo entre os dois métodos, onde se pode observar que a maioria dos pontos experimentais apresentou erros dentro de uma banda de 10%. Sendo assim, os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, com precisão suficiente para que o algoritmo de controle possa atuar de maneira adequada.

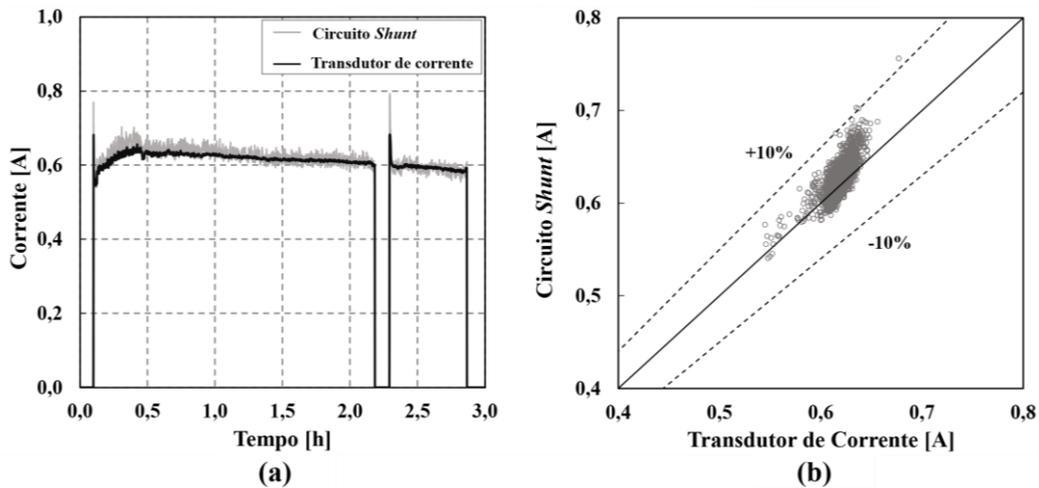


Figura 4. Resultados experimentais: (a) comparação entre transdutor de corrente e circuito shunt e (b) incerteza na medição da corrente.

4. LÓGICA PROPOSTA

A lógica de controle desenvolvida pode ser entendida através do diagrama de blocos da Fig. 5. Uma vez que a corrente do compressor chega ao bloco Setup, dois valores de correntes médias são calculados. Inicialmente, o algoritmo aguarda o desligamento do compressor para então calcular a média de todos os valores de corrente lidos até o momento, denominada de CML (Corrente Média Ligado). A segunda variável só é calculada ao final do ciclo completo do compressor, indicando, portanto, a média de todas as leituras de corrente do compressor durante os períodos ligado e desligado, denominada de CMT (Corrente Média Total).

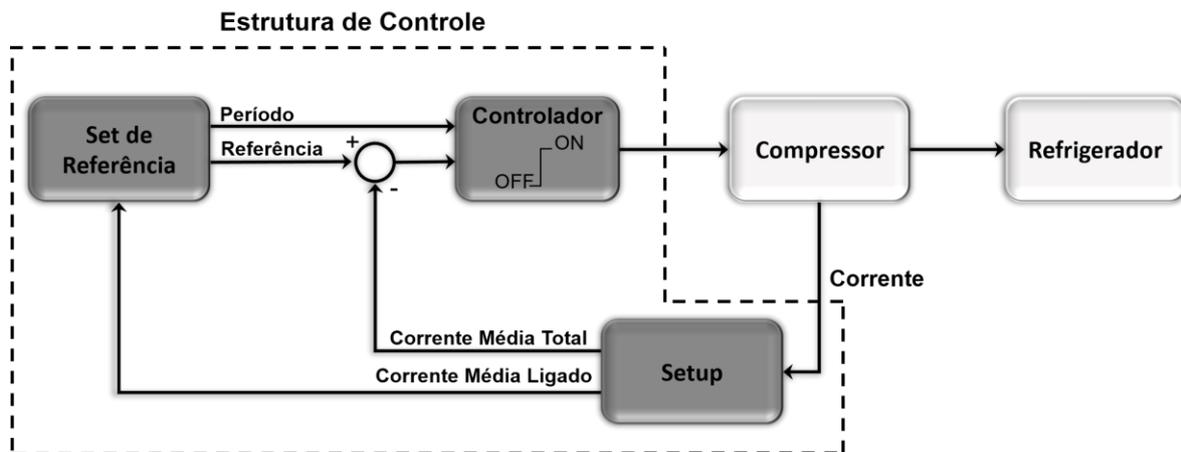


Figura 5. Diagrama de Blocos geral da lógica.

Com a CML devidamente calculada no bloco Setup e os dados da Tabela 1 – obtidos através de ensaios de identificação do produto, em regime permanente, para diferentes temperaturas ambiente – o bloco Set de Referência escolhe qual CMT será utilizada como referência para o cálculo da próxima ação de controle, neste caso, a fração de funcionamento do compressor, também chamada de RTR (*Runtime Ratio*). Vale salientar que, além do RTR, faz-se necessário estimar o período de duração do próximo ciclo, em minutos, o que também é feito pelo bloco Set de Referência com base nos dados da Tab. 1.

Tabela 1. Valores de referência extraídos dos testes de *baseline*.

Temperatura [°C]	Corrente Média Ligado [A]	Corrente Média Total de Referência [A]	Período [min]
16	0,34	0,12	15
25	0,36	0,21	19
32	0,38	0,28	23

O controlador desenvolvido foi implementado de maneira modular, como mostra a Fig. 6. Após receber o valor atual e de referência da CMT, o controlador calcula o erro associado a essa grandeza, que é usado como entrada para o primeiro bloco representado na Fig. 6, onde foi implementado um controle do tipo PI com ação *anti-windup*, que estima o RTR do próximo ciclo através das seguintes expressões:

$$u(i) = u(i - 1) + k_p e(i) + k_p \left(-1 + \frac{T_s}{T_i} \right) e(i - 1) - \frac{T_s}{T_i} e_{aw}(i - 1) \quad (1)$$

$$\begin{cases} e(i) = y_m(i) - r(i) \\ e_{aw}(i) = u(i) - u_s(i) \end{cases} \quad (2)$$

onde, u representa o RTR do próximo ciclo, que é a ação de controle calculada pelo PI, k_p e T_i os ganhos proporcional e integral do controlador PI, $e(i)$ a diferença entre a referência e a variável de processo, e_{aw} o erro associado a saturação da ação de controle utilizada pela lógica anti-windup e T_s a taxa de amostragem utilizada nos experimentos.

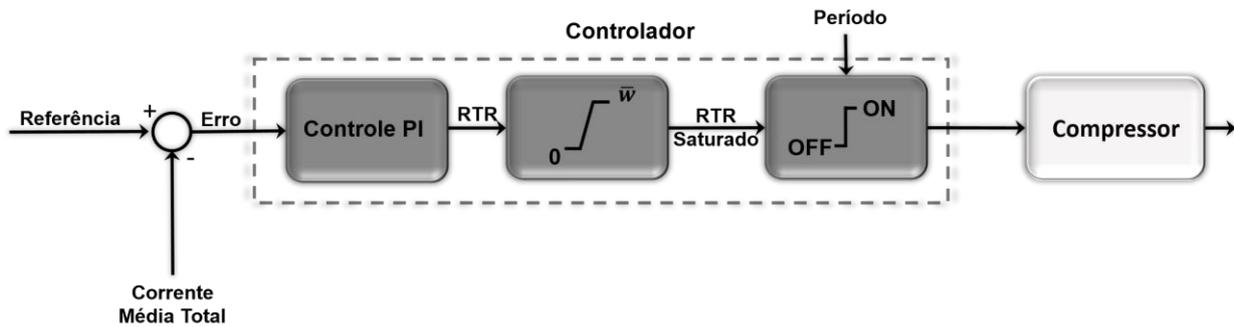


Figura 6. Diagrama de Blocos do Controlador.

Como o RTR de um ciclo do compressor representa a razão entre o tempo de compressor ligado e o tempo total do ciclo (ligado e desligado), seus valores variam na faixa de 0 a 100%. Faz-se necessário, portanto, tratar o sinal da ação de controle estabelecida pelo PI, o qual é primeiramente saturado e depois normalizado conforme a seguinte expressão:

$$\begin{cases} u_s(i) = \text{sat}(u) \begin{cases} 2\bar{w} \\ 0 \end{cases} \\ RTR \text{ Saturado}(i) = \frac{u_s(i)}{2\bar{w}} \end{cases} \quad (3)$$

onde, \bar{w} representa uma constante utilizada como limite da saturação e normalização do sinal de controle, u_s representa o sinal de controle saturado e $RTR \text{ Saturado}$ o sinal de controle que será efetivamente enviado ao sistema após todas as etapas do tratamento de sinal.

Vale salientar que o ajuste dos parâmetros k_p e T_i do controlador PI, relativos aos ganhos proporcional e integral, respectivamente, foi realizado através do *Good Gain Method*, segundo o qual o sistema é estimulado gradativamente em malha fechada até se conseguir boa estabilidade. Feito isso, colocou-se o sistema a operar em malha fechada e ajustou-se os ganhos até que os resultados de tempo de resposta do sistema se mostraram satisfatórios.

O último bloco do controlador representado na Fig. 6 é responsável por quantificar o período no qual o atuador ficará ligado e desligado a partir do RTR e do período do próximo ciclo. A fim de se obter o tempo de compressor ligado do próximo ciclo, multiplica-se o valor de RTR pelo período total estimado e, para calcular o tempo de compressor desligado, subtrai-se o tempo de compressor ligado do período total estimado. Não obstante, uma vez que os tempos de compressor ligado e desligado estão definidos, faz-se uma verificação para garantir que o tempo mínimo de compressor desligado seja suficientemente longo para permitir a equalização das pressões do sistema, já que compressores de velocidade fixa apresentam problemas de partida se as pressões não estiverem equalizadas.

5. RESULTADOS

O desempenho da lógica de controle proposta foi avaliado em diferentes situações como *pull-down*, regime permanente transitório e rejeição de perturbação que emula o processo de degelo. Basicamente, as características desejadas para um regulador de temperatura eficiente são a rejeição rápida de perturbação e o seguimento de referência com oscilações de baixa amplitude. As Figuras 7 e 8 mostram os resultados dos testes realizados para as condições de temperatura ambiente de 16°C e 32°C, respectivamente. Pode-se observar na Fig. 7(a) que o refrigerador consegue realizar o abaixamento da temperatura interna do gabinete em aproximadamente 1 hora, estabilizando-se em torno de 0°C. Na

Fig. 7(b) observa-se o comportamento do controlador durante o *pull-down*, que inicia com uma ação máxima sobre o atuador (RTR=100%). Após esse ciclo, a ação PI é acionada para regular a CMT. É possível notar nas primeiras horas de teste a referência do controle sendo alterada duas vezes, iniciando em um valor alto (utilizado para condições de 32°C), e mudando até um valor baixo (utilizado para condições de 16°C), à medida que a carga térmica inicial do refrigerador é rejeitada. Vale observar que o erro final obtido na variável de processo é nulo, já que o controlador conta com uma ação integral e *anti-windup*.

Ainda na Fig. 7(a), é possível observar um evento de degelo, que aumenta a temperatura do compartimento *freezer* até ~0°C, elevando a corrente do compressor após o evento, fato que leva o controlador a impor ações mais bruscas para rejeitar a perturbação o mais rápido possível. Uma vez que grande parte dessa carga térmica injetada no sistema é rejeitada, diminuindo o valor da corrente para patamares próximos aos encontrados antes do evento, o refrigerador volta a regular a temperatura em torno de 0°C.

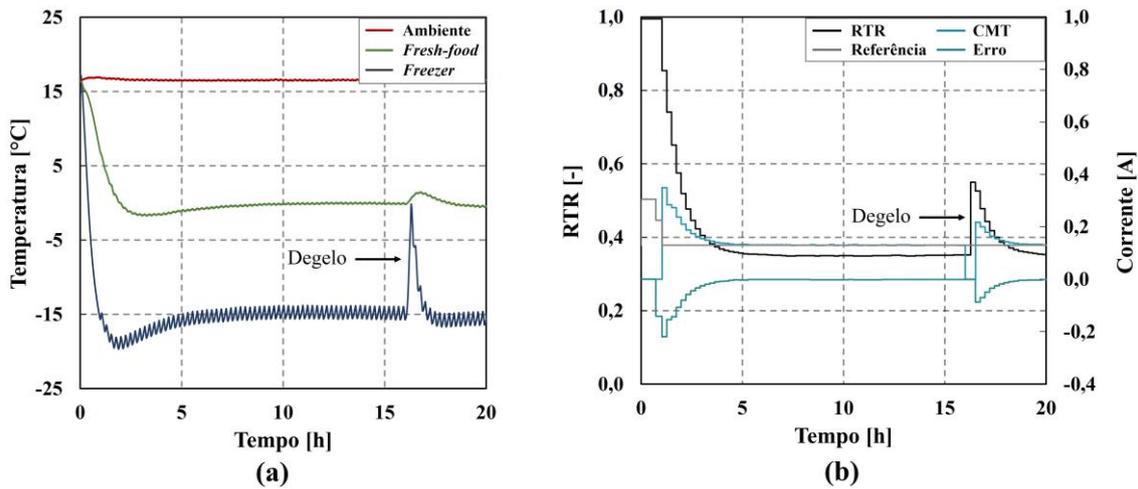


Figura 7. Resultados dos testes experimentais a 16°C: (a) temperaturas e (b) sinais de controle.

Na Fig. 8(a) pode ser observado o comportamento do sistema para uma situação em que o ambiente é mantido em 32°C. Durante o abaixamento da temperatura o compressor é desligado pouco antes de atingir a temperatura de controle de 0°C. Após esse evento a temperatura do refrigerador tende a oscilar em valores próximos aos relatados em outros testes, em torno de 0°C. Novamente, na Fig. 8(b), observa-se que o controlador começa com uma ação de controle máxima na condição de *pull-down*. Após esse primeiro ciclo, a ação PI controla a CMT do compressor, regulando assim a temperatura do refrigerador. Ainda nesse teste é possível observar um degelo próximo das 20 horas de ensaio, em que a temperatura do freezer é aumentada até ~0°C. Uma vez que a carga térmica injetada no sistema é rejeitada, o refrigerador volta a regular a temperatura no mesmo patamar em que estava antes desse degelo.

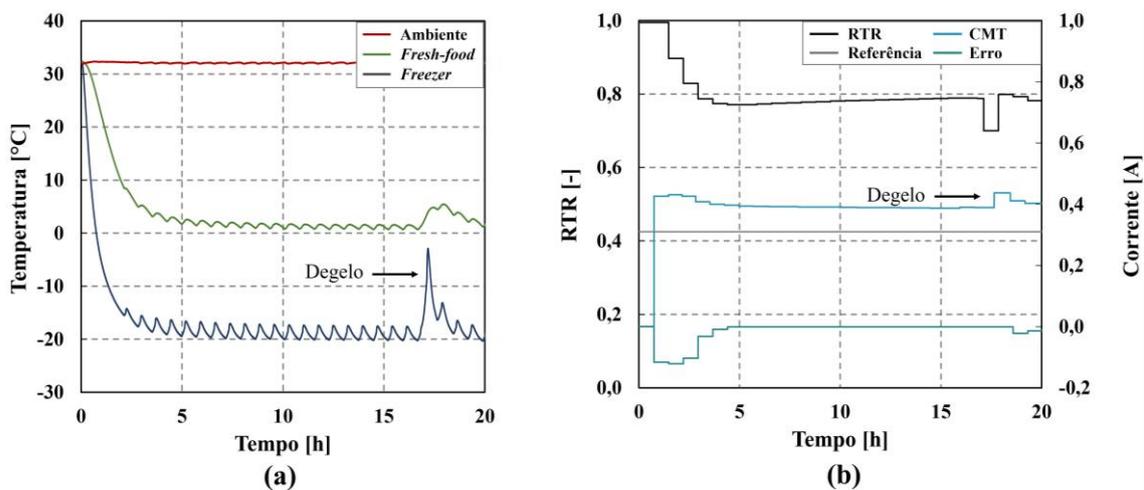


Figura 8. Resultados dos testes experimentais a 32°C: (a) temperaturas e (b) sinais de controle.

A Figura 9 mostra uma comparação de desempenho entre o controle original do produto (*baseline*) e o controle por corrente proposto neste trabalho para as temperaturas ambientes de 16°C (Fig. 9a) e 32°C (Fig. 9b). Na Fig. 9(a) pode-se observar tempos de *pull-down* similares, com a lógica *baseline* realizando o abaixamento de temperatura em 1,0 hora e o controle por corrente em 1,2 horas. Verifica-se ainda que ambas as lógicas são capazes de regular a temperatura interna

dos dois compartimentos dentro da mesma banda de histerese. Na Fig. 9(b) verifica-se novamente tempos de *pull-down* semelhantes, com a lógica original concluindo em 2,5 horas e o controle por corrente em 2,8 horas. Novamente, ambas as lógicas conseguem regular as temperaturas internas dentro de uma mesma banda de histerese.

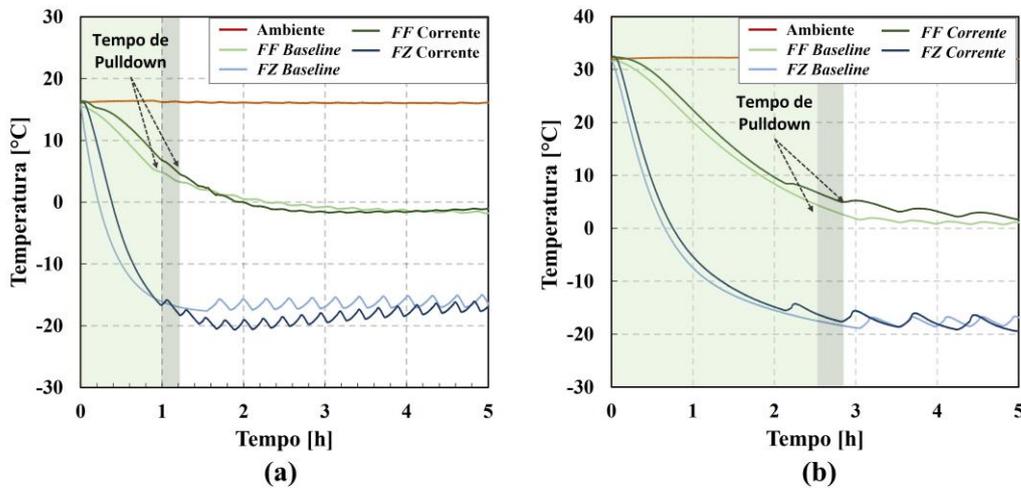


Figura 9. Comparação de desempenho entre controle de *baseline* e por corrente: (a) 16°C e (b) 32°C ambiente.

6. CONCLUSÕES

Um método de baixo custo para regulação da temperatura interna de um refrigerador doméstico foi proposto. Para tanto, escolheu-se a corrente do compressor medida através de um circuito com resistor *shunt* e um controlador PI com ação *anti-windup*. Durante todas as situações de *pull-down*, o produto foi capaz de realizar o abaixamento de temperatura em tempos próximos aos obtidos através da lógica original do produto, com uma ressalva para o teste realizado a 32°C, em que o refrigerador começou a ciclar o compressor pouco antes de atingir a temperatura de referência. Com relação aos eventos de degelo, é possível notar que o desempenho do controlador em modo de rejeição de perturbação foi bastante satisfatório. Na situação de 16°C de temperatura ambiente, esse evento pode ser rejeitado de maneira rápida utilizando a mudança de referência dinâmica, ocasionada pelo aumento da corrente consumida pelo compressor quando essa perturbação atinge o sistema. No teste realizado em 32°C, foi observada uma ação de controle agressiva na recuperação da temperatura do *freezer*, voltando a regular a temperatura interna próxima a 0°C após o evento. Em geral, a estratégia de controle proposta é capaz de realizar a medição da corrente do compressor e regular a temperatura do refrigerador dentro da banda de histerese do controle original, não impactando no desempenho geral do produto. Devido ao seu baixo custo de implementação, a nova lógica também pode ser usada como um sistema de controle redundante em caso de falha no produto, diminuindo custos com assistência técnica.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no POLO/UFSC sob os auspícios do programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (CNPq 404023/2019-3, FAPESC 2019TR0846). Os autores agradecem às empresas Whirlpool e Embrapii pelo suporte financeiro através do projeto No. PPOL-1710.0012.

8. REFERÊNCIAS

- Choi, B. J., Han, S. W., & Hong, S. K., 1998. "Refrigerator temperature control using fuzzy logic and neural network". In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No. 98TH8357) (Vol. 1, pp. 186-191). IEEE.
- Di Felice, M., Piroddi, L., Leva, A., & Boer, A., 2009. "Adaptive temperature control of a household refrigerator". In *2009 American Control Conference* (pp. 889-894). IEEE.
- Johnson, J. P., Ehsani, M., & Guzelgunler, Y., 1999. "Review of sensorless methods for brushless DC". In *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference*. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370) (Vol. 1, pp. 143-150). IEEE.
- Machado, E. (2019). "Desenvolvimento de algoritmos de detecção e correção de falha em sensores de temperatura de refrigeradores domésticos".
- Odachi, Y., et al., 2003. "Electric compressor and control method therefor" (European Patent No. 02015851.5) European Patent Office.
- Shiga, F. S., et al., 2020. "Refrigeration cycle device with motor speed estimator" (U.S. Patent No. 10,590,934 B2) United States Patent.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TEMPERATURE CONTROL OF DOMESTIC REFRIGERATORS BASED UPON THE ELECTRIC CURRENT OF THE COMPRESSOR

Gustavo A. de Souza¹
Raul J. Liston¹
Everton Machado^{2,*}
Alexsandro S. Silveira¹
Christian J. L. Hermes¹

¹ POLO Labs, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil

² Whirlpool Latin America, Joinville, SC, Brazil. * Corresponding author: everton_machado@whirlpool.com

Abstract: *Over the years, household refrigerators have undergone several control systems upgrades. The main change was the migration of electromechanics bulb thermostats to thermistor-type temperature sensors, connected to an electronic board. However, such an update implies a high cost of manufacturing and maintenance. This study was aimed at developing an alternative low-cost control strategy capable of regulating the internal temperature of a domestic refrigerator using only the electric current of the compressor as the process variable, which is sensitive to the variation of thermal load in refrigeration systems. Such a technique was applied to a single-door refrigerator using a single-speed compressor. The device was tested at two different ambient temperature levels (16 and 32°C). Also, two different types of tests were performed: pulldown and defrost recovery. All experiments were performed in a climate chamber that controls temperature, humidity and air speed according to the current standards. The control algorithm consisted of a dynamic reference modification for a PI controller, together with a set of empirical conjectures. The electric current control technique was able to maintain the refrigerator temperature within acceptable tolerance levels, around $\pm 1^\circ\text{C}$, figures quite similar to those obtained from the baseline temperature control, albeit costing twice as lower.*

Keywords: *current control, single speed compressor, household refrigerators*