

14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO REFRIGERADOR DOMÉSTICO

LUCAS EDUARDO MORAES ECHING¹, WILIAN RICARDO TESSARI JÚNIOR², FABIANO TADEU MATHIAS COSTA³

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Catanduva, lucas.eching@aluno.ifsp.edu.br.

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Câmpus Catanduva, wilian.junior@aluno.ifsp.edu.br.

³ Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Catanduva, fabiano.tmc@ifsp.edu.br. Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.05.02.03-9 Aproveitamento da Energia

RESUMO: A refrigeração desempenha um papel crucial na preservação de alimentos e em diversos processos industriais. Propõe-se a criação de um sistema de monitoramento acessível para refrigeradores domésticos, unindo baixo custo com a capacidade de conduzir experimentos práticos e fornecer dados essenciais para a análise termodinâmica de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica sobre o ciclo de refrigeração, os principais fluidos refrigerantes e os componentes eletrônicos encarregados da instrumentação e controle do refrigerador, com o intuito de selecionar os materiais mais adequados às necessidades do projeto. Os resultados obtidos foram a construção de placas de circuito impresso destinadas à conversão e processamento de sinais elétricos, provenientes dos transdutores de pressão e temperatura instalados em um refrigerador residencial, as quais viabilizam as leituras dessas informações por meio da conexão I2C, que estabelece a comunicação com a plataforma de prototipagem *Raspberry PI*. A partir dos resultados alcançados conclui-se que os transdutores de pressão e temperatura, juntamente com as placas de circuito desenvolvidas, oferecem um sistema de monitoramento eficiente e robusto para capturar informações de um refrigerador de uso doméstico.

PALAVRAS-CHAVE: ciclo de refrigeração por compressão de vapor; interface homem-máquina; fluidos refrigerantes; aquisição de dados.

DEVELOPMENT OF A DOMESTIC REFRIGERATOR MONITORING SYSTEM

ABSTRACT: Refrigeration plays a crucial role in food preservation and various industrial processes. The creation of an accessible monitoring system for household refrigerators is proposed, combining low cost with the ability to conduct practical experiments and provide essential data for the thermodynamic analysis of a vapor compression refrigeration cycle. The adopted methodology consisted of a literature review on the refrigeration cycle, the main refrigerants, and the electronic components responsible for the instrumentation and control of the refrigerator, in order to select materials most suitable for the project's needs. The obtained results included the construction of printed circuit boards designed for the conversion and processing of electrical signals from pressure and temperature transducers installed in a residential refrigerator, these boards enable the reading of this information through the I2C connection, which establishes communication with the Raspberry PI prototyping platform. Based on the achieved results, it is concluded that the pressure and temperature transducers, along with the developed circuit boards, provide an efficient and robust monitoring system to capture information from a household refrigerator.

KEYWORDS: vapor compression refrigeration cycle; human-machine interface; refrigerant fluids; data acquisition.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração utilizam a transferência de calor para remover calor de um meio de baixa temperatura e transferi-lo para um meio de alta temperatura. Essenciais para a preservação de alimentos e procedimentos industriais, esses sistemas têm o papel fundamental de conter as atividades microbiológicas e enzimáticas, evitando a deterioração dos produtos alimentícios (Oliveira, 2020).

Um exemplo amplamente utilizado é o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, no qual um fluido de trabalho, chamado refrigerante, é comprimido na fase de vapor por um compressor. Em seguida, o refrigerante passa pelo condensador, onde libera calor para o meio externo, é estrangulado por um dispositivo de expansão e, ao percorrer o evaporador, absorve calor do meio interno e, por fim, o refrigerante retorna à entrada do compressor para reiniciar o ciclo (Çergel; Boles, 2013).

A refrigeração por compressão de vapor faz parte de diversos currículos da engenharia, sendo muitas vezes tratada apenas de forma teórica. Diante da crescente competitividade do mercado de trabalho, se torna essencial que os futuros profissionais busquem por um diferencial. Sendo assim, os futuros engenheiros devem ser mais do que apenas detentores de teorias, devem possuir habilidades para produzir conhecimento por meio de experiências práticas (Lopes; Almeida, 2015). Entretanto, a aquisição de equipamentos como bancadas didáticas requer um investimento considerável, o que dificulta a implementação e o desenvolvimento de novas metodologias de ensino.

Nesse contexto, é proposta a instrumentação e o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para um refrigerador doméstico por compressão de vapor, que atenda às necessidades das disciplinas dos cursos do IFSP - Campus Catanduva, além de combinar baixo custo com a possibilidade de oferecer habilidades similares às das bancadas comerciais de refrigeração.

MATERIAL E MÉTODOS

No desenvolvimento do projeto, optou-se pelo uso do refrigerador doméstico "Consul Super Luxo" disponível no IFSP - Campus Catanduva, devido a sua tubulação permitir a conexão com adaptadores que, por sua vez, possibilitam o contato direto dos transdutores com o fluido refrigerante. O refrigerador em questão é um modelo de porta única com um compartimento de refrigeração interno (congelador) de 280 litros.

Após a seleção do refrigerador, foram elaborados os adaptadores com o intuito de permitir o contato entre o fluido refrigerante e os transdutores. Devido à proximidade dos componentes no refrigerador, como mostra a Figura 1, a leitura será realizada em um único ponto entre os dispositivos.

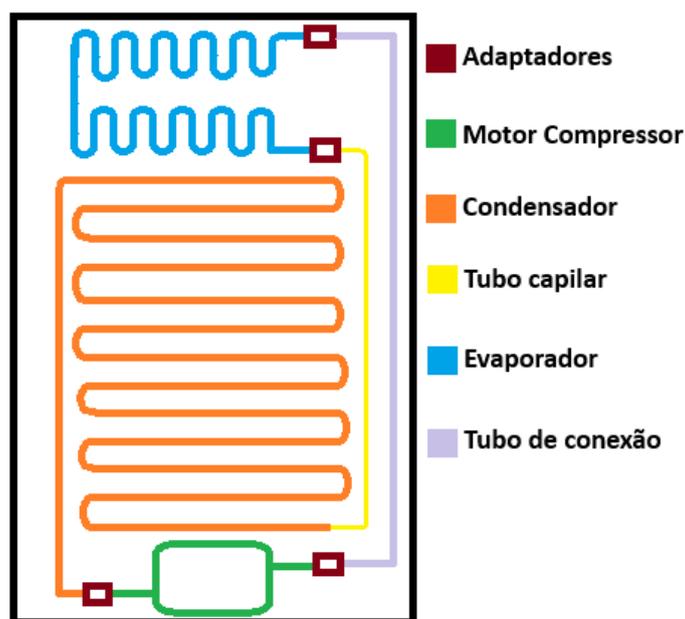


FIGURA 1. Diagrama simplificado dos elementos do refrigerador residencial selecionado.

Foi escolhido como fluido refrigerante o R-134a devido à sua compatibilidade com o óleo de lubrificação do compressor, baixa toxicidade, fácil acesso, propriedades não inflamáveis, ponto de

ebulição moderado, impacto mínimo na camada de ozônio (ODP) e eficiência energética. O fluido refrigerante R134a (tetrafluoroetano) tem sido amplamente empregado nas indústrias de refrigeração e ar-condicionado devido às suas propriedades vantajosas para o ciclo de refrigeração (Sánchez *et al.*, 2016).

Para coletar os dados de pressão no ciclo, foram selecionados transdutores de pressão. O modelo escolhido apresenta uma alimentação padrão de 5 V, sinais de saída lineares de 0,5 a 4,5 V e rosca 1/8 in NPT (*National Pipe Thread*) feitas de aço inoxidável. Sendo a conexão elétrica realizada por três pinos de saída, cada um ligado a um respectivo cabo: o vermelho é destinado à alimentação, o preto ao GND e o verde é responsável pela transmissão do sinal (Reveltronics, 2016).

Para coletar os dados referentes a temperatura no ciclo de refrigeração, foram selecionados termistores NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) de 10 k Ω . O funcionamento desses transdutores é caracterizado pelo aumento da condutividade e a diminuição da resistência à medida que a temperatura aumenta (Jung *et al.*, 2003). O modelo selecionado possui uma faixa de leitura ampla, variando de -55 a 300 °C, com as resistências de 519,91 k Ω , 10 k Ω e 29,94 Ω correspondendo às temperaturas de -55 °C, 25 °C e 300 °C respectivamente. A precisão de um termistor NTC varia com a temperatura, sendo de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ a 25 $^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$ a 100 $^{\circ}\text{C}$ (Bosch, 2022).

Para realizar a aquisição de dados dos transdutores e o desenvolvimento futuro de uma IHM, foi realizada a seleção do *Raspberry Pi 2 Model B* devido a sua capacidade de processamento, acessibilidade, conectividade com a internet, facilidade de interação com outros dispositivos e disponibilidade de bibliotecas. Essa placa se destaca por tornar a implementação de algoritmos de monitoramento, controle e análise de dados mais simples. Além disso, como um microcomputador, ela dispensa a necessidade de um computador adicional, necessitando apenas de periféricos básicos, como teclado, *mouse* e monitor. Placas de prototipagem são sistemas automatizados que aceleram e melhoram a elaboração de protótipos por parte de desenvolvedores, ao disponibilizarem elementos prontos, como rotinas de drivers para periféricos desenvolvidas por outros usuários (Cardoso *et al.*, 2021).

Para a construção do sistema de aquisição de sinais, foram desenvolvidas duas placas de circuito impresso (PCIs) responsáveis por alimentar os transdutores, receber seus sinais e realizar as conversões necessárias. Os sinais capturados são encaminhados para um conversor analógico-digital (A/D) e, posteriormente, direcionados para uma terceira placa. Essa terceira placa é responsável por converter a saída digital de 5 V em um sinal de 3,3 V, compatível com os pinos de entrada do *Raspberry Pi 2 Model B*.

Os amplificadores incorporados nas PCIs foram alimentados por uma fonte de alimentação simétrica, pois necessitam de sinal negativo de tensão. Essa fonte opera com duas entradas projetadas para receber energia de uma fonte externa, e em seguida, converte esse sinal em saídas com polaridades positiva, negativa e terra.

A comunicação entre os transdutores e a *Raspberry Pi* foi estabelecida por meio de um ADS1115, utilizando o protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Cada placa PCI inclui um componente ADS1115 que assume a função de receber os sinais provenientes de quatro sensores diferentes. Estes componentes são acessíveis pela *Raspberry Pi* mediante endereçamento dedicado (0x48 e 0x49), o qual permite uma comunicação entre os dispositivos.

A programação do *Raspberry* para aquisição dos sinais dos transdutores foi realizada por meio do *Shell* disponível no *Raspbian* (sistema operacional). O *Shell* é um programa que funciona como uma interface para interação entre o usuário e a máquina por meio de linhas de código baseadas na linguagem *Python*. No caso do *Raspbian*, seu *Shell* compartilha as mesmas funções e comandos encontrados em outros sistemas *Linux*, proporcionando uma familiaridade no gerenciamento do sistema (Ebermam *et al.*, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após concluir o desenvolvimento e os testes dos circuitos projetados para as PCIS, foram realizadas as impressões das placas para os transdutores, alimentação e conversão 5V/3,3V, em seguida, foi realizada a soldagem dos seus respectivos componentes. As placas referentes aos transdutores de pressão e temperatura podem ser observadas na Figura 2.

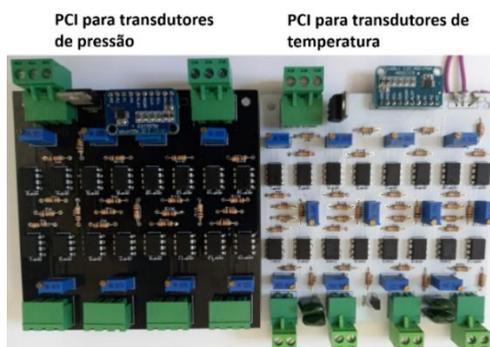


FIGURA 2. PCIs para transdutores de pressão e temperatura respectivamente.

A PCI dos transdutores de pressão utiliza um regulador de tensão 7805 para fornecer energia aos transdutores. Cada transdutor produz sinais de saída que variam de 0,5 V a 4,5 V, esses sinais são direcionados para um *buffer* e um amplificador somador. Em paralelo, o amplificador somador recebe um segundo sinal de um divisor de tensão, que é utilizado para somar 3,5 V ao sinal do transdutor de pressão. Como resultado desse processo, a saída do amplificador somador varia de 2,5 V a 5 V que é encaminhada para o ADS1115.

A Placa de Circuito Impresso projetada para os transdutores de temperatura é composto por vários componentes. A primeira parte do circuito envolve uma ponte de *Wheatstone* alimentada por uma tensão de 3,3 V proveniente do regulador de tensão 78133. Essa ponte mede as variações elétricas nos dois pontos centrais, que são originadas pelas mudanças na resistência elétrica do termistor NTC, as quais ocorrem em resposta às mudanças de temperatura. Os sinais resultantes são então enviados para o amplificador de instrumentação INA128 para serem amplificados, o ganho desse amplificador pode ser avaliado por meio da equação (1). Em seguida, o sinal amplificado é direcionado para um amplificador somador, onde ele é combinado com outro sinal vindo de um divisor de tensão, o que resulta em um sinal de saída que varia entre 2,5 V e 5 V. Por fim, esse sinal é enviado ao conversor analógico-digital ADS1115 para conversão.

$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (1)$$

em que,

G - ganho;

R_G – resistência de ganho.

A Figura 3 ilustra a PCI para conversão dos sinais digitais de 5 V para 3,3 V.

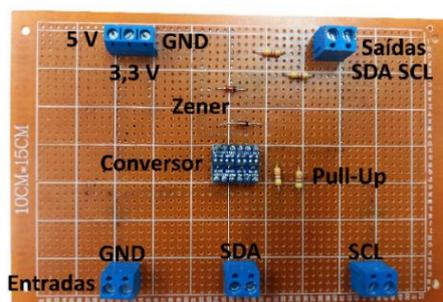


FIGURA 3. PCI para conversão dos sinais digitais de 5 V para 3,3 V.

Para converter os sinais de 5 V dos SCL (*Serial Clock Line*) e SDA (*Serial Data Line*) provenientes dos conversores ADS1115, foi preciso utilizar um conversor de nível lógico bidirecional que transformou esses sinais para 3,3 V. Esta placa de circuito impresso incorpora resistores de *pull-up* tanto em suas entradas quanto em suas saídas, o que garante que os sinais sejam ajustados aos níveis lógicos esperados. Além disso, foram incluídos dois diodos *zener* nas saídas para proteger os pinos de entrada da *Raspberry Pi*.

A alimentação das duas placas de circuito impresso foi fornecida por uma única placa que, por sua vez, recebe energia de uma fonte de 9 V (Figura 4). Essa placa apresenta duas entradas alimentadas por uma fonte de energia, responsável por fornecer os sinais de +9 V e GND, e oferecem três saídas: +9 V, -9 V e GND.



FIGURA 4. Placa para alimentação das PCIs.

Os adaptadores foram empregados para a instalação adequada dos transdutores de pressão e temperatura nas tubulações que interligam os diversos componentes do refrigerador doméstico. Dessa forma, foi possível alcançar resultados satisfatórios nos testes iniciais ao utilizar a comunicação via I2C, com a coleta de dados dos quatro transdutores de pressão e dos quatro transdutores de temperatura acontecendo simultaneamente e sem falhas detectadas, como ilustra a Figura 5.

```
Pressão:
Saída compressor (kPa): 2552.04
Saída condensador (kPa): 638.23
Saída tubo capilar (kPa): 0.00
Saída evaporador (kPa): 64.46
Temperatura:
Saída compressor (Temperatura °C): 47.59
Saída condensador (Temperatura °C): 43.17
Saída tubo capilar (Temperatura °C): -15.93
Saída evaporador (Temperatura °C): 4.38
```

FIGURA 5. Dados de pressão e temperatura coletados nos testes iniciais.

Apesar do funcionamento adequado da comunicação, dois sensores de pressão apresentaram dados divergentes do que era esperado. O sensor na saída do tubo capilar não apresentou sinal de saída e o sensor na saída do condensador apresentou um valor muito menor do que o esperado. Novos sensores foram encomendados para substituir os sensores defeituosos.

CONCLUSÕES

O estudo abordou a implementação de um sistema de monitoramento para um refrigerador doméstico por compressão de vapor para atender às demandas educacionais dos cursos do IFSP - Campus Catanduva. O sistema desenvolvido oferece uma alternativa de baixo custo e com potencial para proporcionar habilidades práticas semelhantes às obtidas em bancadas comerciais de refrigeração.

Os resultados obtidos incluem o desenvolvimento e testes das placas para os transdutores de pressão e temperatura, bem como a criação de PCIs para conversão de sinais digitais e alimentação das demais placas. Esses avanços representam passos concretos na direção do objetivo final de construir um sistema de monitoramento completamente funcional e eficiente.

A utilização da *Raspberry Pi 2 Model B*, bem como a elaboração das placas de circuito impresso, oferece uma solução robusta para a aquisição e processamento de dados.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Autor 1 e 2 contribuíram no projeto e construção do sistema de monitoramento. Autor 1 também contribuiu na redação do texto. O autor 3 contribuiu no planejamento das atividades, execução de testes, redação e revisão do texto.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pelo fomento por meio da bolsa PIBIFSP e pelo apoio dos docentes e técnicos que colaboraram no desenvolvimento e construção do sistema de instrumentação do refrigerador doméstico.

REFERÊNCIAS

BOSCH. **Temperature sensor NTC M6-HS**. Gerlingen, 2022. Disponível em: https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20Sheet_70061323_Temperature_Sensor_NTC_M6-HS.pdf. Acesso em: 22 jul. 2023.

CARDOSO, G. B. GOMES, L. H. N.; BARRETO, R. A.; LAZARINI, A. Z. N.; BORGES, A. C. B.; CARNIETO, D.; RODRIGUES, F. B. **Placas de desenvolvimento e prototipagem com a plataforma Arduino**. Presidente Epitácio, out. 2021. Mostra Científica, Cultural e Tecnológica 2021. Disponível em: https://pep2.ifsp.edu.br/mct/wp-content/uploads/2021/10/00081_01_Poster-Placas-de-Desenvolvimento-e-Prototipagem-com-a-plataforma-Arduino.pdf. Acesso em: 15 jul. 2023.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; GOMES, P. M. C.; PERTENCE JUNIOR, A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

EBERMAM, E; PESENTE, G. M; RIOS, R. O; PULINI, I. C. **Programação para leigos com Raspberry Pi**. 1. ed. João Pessoa: Edifes, 2017.

JUNG, J. S; KIM, J. W; KIM, M. S; JANG, J. S; RYU, D. S. Reliability evaluation and failure analysis for NTC thermistor. **International Journal of Modern Physics B**, v. 17, n. 8, p. 1254-1260, Abr. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0217979203018831>. Disponível em: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217979203018831?journalCode=ijmpb>. Acesso em: 22 jul. 2023.

LOPES, I. S; ALMEIDA, G. M. J. **Implementação de aulas práticas na disciplina de instalações termomecânicas 1**. Orientador: João M. Dias Pimenta. 2015. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/11286/1/2015_GabrielAlmeida_IvanLopes.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.

OLIVEIRA, Alessandra Lopes de. **Refrigeração e cadeia do frio para alimentos**. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786587023021>. Acesso em: 20 mar. 2023.

REVELTRONICS. **REVELTRONICS 150 PSI (10 BAR) 1/8" NPT pressure sensor**. Varsóvia, 2016. Disponível em: https://www.reveltronics.com/downloads/datasheet/REVELTRONICS_PRESSURE_SENSOR_150PSI_10BAR_5V_DATASHEET.pdf. Acesso em: 21 jul. 2023.

SÁNCHEZ, D; CABELLO, R; LLOPIS, R; ARAUZO, I; CATALÁN-GIL, J; TORRELLA, E. Energy performance evaluation of R1234yf, R1234ze(E), R600a, R290 and R152a as low-GWP R134a alternatives. **International Journal of Refrigeration**, v. 74, p. 269-282, Feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.09.020>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700716303012?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=7dbe02d13b4dac9b. Acesso em: 23 jun. 2023.