

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

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA LABORATÓRIO REMOTO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

WILIAN RICARDO TESSARI JÚNIOR¹, LUCAS EDUARDO MORAES ECHING², FABIANO
TADEU MATHIAS COSTA³

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBITI, IFSP, Câmpus Catanduva, wilian.junior@aluno.ifsp.edu.br.

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Catanduva, lucas.eching@aluno.ifsp.edu.br.

³ Professor Doutor do IFSP, Câmpus Catanduva, fabiano.tmc@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.05.02.03-9 Aproveitamento da Energia

RESUMO: Os laboratórios remotos são tecnologias que permitem a realização de estudos e atividades práticas de forma presencial e a distância. Propõe-se desenvolver uma estrutura para um laboratório remoto de refrigeração por compressão de vapor de baixo custo e que permita a realização de atividades práticas presenciais ou de forma remota, por meio da disponibilização dos dados em uma página web. A metodologia consistiu em projetar a estrutura de uma bancada de refrigeração doméstica e um sistema de aquisição de dados para coletar os sinais dos transdutores de pressão e temperatura, os quais foram instalados nas entradas e saídas dos componentes do refrigerador. A estrutura desenvolvida foi capaz de receber os sinais dos sensores de pressão e temperatura, ajustá-los para a faixa de operação de um conversor de sinal A/D e fornecer as informações aos dispositivos de *hardware* responsáveis por enviar os dados para a página web e de fornecê-los de forma presencial, além disso foi possível realizar o controle do ciclo de refrigeração. Conclui-se que a estrutura desenvolvida é capaz de atender os requisitos básicos das disciplinas relacionadas com a área da refrigeração, e que permitirá a realização de experimentos presenciais e remotos e atender alunos, docentes e pesquisadores do IFSP e de outras instituições que não tenham a sua disposição laboratórios de refrigeração.

PALAVRAS-CHAVE: atividades práticas; aquisição de dados; controle.

DEVELOPMENT OF A DIDACTIC BENCH FOR A REMOTE VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION LABORATORY

ABSTRACT: Remote laboratories are technologies that allow the execution of studies and hands-on activities both in person and at a distance. The aim is to develop a framework for a low-cost remote laboratory for vapor compression refrigeration, which enables the conduction of practical activities either on-site or remotely by providing data through a web page. The methodology involved designing a setup for a domestic refrigeration bench and a data acquisition system to gather signals from pressure and temperature transducers, which were installed at the inputs and outputs of the refrigerator's components. The developed structure was capable of receiving signals from pressure and temperature sensors, adjusting them to the operating range of an analog-to-digital converter, and delivering the information to hardware devices responsible for sending the data to the web page and making them available on-site. Additionally, it was possible to control the refrigeration cycle. In conclusion, the developed structure is capable of meeting the basic requirements of disciplines related to the refrigeration field. It will enable both in-person and remote experimentation, benefiting students, educators, and researchers from IFSP and other institutions lacking access to refrigeration laboratories.

KEYWORDS: practical activities; data acquisition; control.

INTRODUÇÃO

A refrigeração tem ampla utilização na regulação de temperatura de espaços para proporcionar conforto, preservação de itens perecíveis e produtos alimentares, além de ser empregada em diversas atividades industriais. Atualmente, o ciclo de refrigeração por compressão de vapor é o método predominante, nele o fluido refrigerante é comprimido ao passar pelo compressor, transfere calor em um condensador, passa por uma restrição em um dispositivo de expansão e absorve calor no evaporador (Çengel; Boles, 2013).

Bancadas didáticas baseadas no ciclo de refrigeração por compressão de vapor são amplamente usadas em instituições educacionais e de pesquisa para estudar as propriedades e a eficiência de fluidos refrigerantes, com o intuito de reduzir impactos ambientais e gastos energéticos. Elas também melhoram as habilidades dos futuros profissionais ao integrar teoria e prática (Pandini *et al.*, 2017). No entanto, essas bancadas geralmente não possuem todas as funcionalidades desejadas e têm custo elevado, cerca de R\$56.000,00 em média (cotação realizada pelo próprio autor).

Uma alternativa para reduzir os custos de aquisição de bancadas didáticas tradicionais é o desenvolvimento de laboratórios remotos, os quais permitem o compartilhamento de recursos entre instituições sem a necessidade de infraestruturas físicas próprias (Odeh *et al.*, 2015). A construção dos laboratórios remotos é facilitada quando se integra ao projeto o uso de dispositivos de *hardware* para controle e monitoramento de sensores e atuadores, dentre esses dispositivos destacam-se o *Raspberry Pi*, *Arduíno*, *ESP8266* e *ESP32*.

Os desafios relacionados aos custos elevados e à limitada disponibilidade de laboratórios remotos na área de refrigeração têm dificultado a introdução e aplicação de abordagens educacionais inovadoras que envolvam práticas de aprendizado no IFSP – Câmpus Catanduva. Nesse contexto, propõe-se desenvolver uma estrutura de baixo custo para um laboratório remoto voltado para o estudo da refrigeração por compressão de vapor.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, buscou-se compreender quais seriam os componentes necessários para montar um ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Sabendo-se da necessidade de adquirir um compressor, um condensador, um tubo capilar e um evaporador, foram pesquisados modelos de refrigeradores domésticos a fim de encontrar referências de componentes compatíveis entre si, com alta disponibilidade e baixo preço.

Com base na geladeira CRB39AB da Consul, foi selecionado o compressor EMIS70HHR da Embraco, compatível com o fluido refrigerante R134a (tetrafluoroetano - CH₂FCF₃), com potência de 1/5 HP e a exigência de se utilizar um tubo capilar de 0,036 in (3,3 m) para restringir o fluido (EMBRACO, 2019). Na sequência foram selecionados o condensador e o evaporador, cujos modelos são, respectivamente, W10221052 e W10215337. Adicionalmente, foi incluído um filtro capilar para prevenir a entrada de substâncias contaminantes no evaporador, tubulações de 1/4 in para ligar os componentes e uma válvula Schrader para permitir a conexão de equipamentos de manutenção ao sistema de refrigeração.

Para realizar a coleta dos níveis de pressão e temperatura nas entradas e saídas de cada componente do ciclo de refrigeração estudado, foram selecionados modelos de sensores analógicos de pressão e temperatura, ambos com um custo acessível. Para a temperatura, foi escolhido um NTC de 10 kΩ, modelo MF52D-103F3950. Enquanto para a pressão foram selecionados transdutores com 3 níveis diferentes de pressão, sendo os de 100 psi para a saída do evaporador e entrada do compressor, os de 200 psi para a saída do tubo capilar e entrada do evaporador e os de 500 psi para a saída do compressor, entrada e saída do condensador e entrada do capilar.

Para mensurar a temperatura no interior e no exterior do espaço refrigerado, assim como das cargas térmicas presentes, a escolha recaiu sobre o sensor digital DS18B20. Este transdutor resistente a líquidos, é habilitado para efetuar avaliações numa faixa que varia de -55 °C a 125 °C e funciona com tensões entre 3 V e 5,5 V (Dallas Semiconductor, 2023).

Em seguida, foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de compreender os *hardwares* disponíveis para o controle de uma bancada e um estudo sobre o protocolo de comunicação I2C.

Com o auxílio da revisão bibliográfica sobre os diferentes *hardwares* e dos equipamentos disponíveis no IFSP – Câmpus Catanduva, escolheu-se trabalhar com o ESP32 em conjunto com a Raspberry Pi 2 modelo B+. O ESP32 é uma alternativa com amplas possibilidades de uso e pode ser

codificado pela interface IDE do Arduino, além de incluir conectividade *WiFi*, *Bluetooth* e uma variedade de sensores integrados (Cantú; Montez, 2020). Já o microcomputador, é um modelo que conta com um processador de 32 bits quad-core, memória RAM de 1 GB, conector de vídeo HDMI, 4 portas USB 2.0, conector Ethernet 10/100, GPIO de 40 pinos, conectores de áudio e vídeo, slot para cartão micro SD e interfaces para câmera de vídeo e display (Raspberry Pi, 2015).

Com os componentes de refrigeração e sensores definidos, somado a um entendimento sobre as tecnologias de *hardware* e de funcionamento de uma comunicação I2C, observou-se a necessidade de desenvolvimento de placas de circuito impresso (PCI ou PCB – *Printed Circuit Board*), com o objetivo de receber e adequar os sinais dos sensores a um conversor analógico/digital (ADS1115). O *software* Proteus Design Suite (2019) foi utilizado no processo de desenvolvimento das PCB's e possibilitou não apenas a criação de circuitos e lógicas, mas também a simulação deles.

Para realizar o tratamento dos sinais dos sensores, pode ser usado o OPAMP (Amplificador Operacional). Esse elemento eletrônico é recomendado para situações em que são requeridos ganhos substanciais, uma impedância de entrada alta e uma impedância de saída baixa, resistência a interferências sonoras, constância e a obtenção de sinais sem alterações indesejadas (Balbinot; Brusamarello, 2019). Dessa forma, foi adquirido o amplificador operacional de alta precisão OP07. Isso se deve à sua excelente versatilidade e capacidade de apresentar um desempenho sólido mesmo em ambientes com interferências ruidosas. Esse componente requer uma alimentação simétrica, apresenta duas entradas para ajuste de *offset*, duas entradas para sinais (uma invertida e outra não invertida), além de duas entradas para fornecimento de energia (Texas Instruments, 2023).

O OP07 foi configurado de 3 formas nas placas impressas, sendo elas: *buffer*, somador inversor e inversor unitário. Um *buffer*, também conhecido como seguidor de tensão, possui um ganho unitário, ou seja, a tensão de entrada é idêntica à tensão de saída, sendo essa configuração apta para isolar diferentes etapas de um sistema (Balbinot; Brusamarello, 2019). Já um circuito de amplificação somador desempenha a função de adicionar múltiplos sinais, cuja tensão de saída pode ser calculada pela equação (1), entretanto, por receber os dados em sua entrada inversora, a saída do circuito será inversa.

$$V_o = -G (V_1 + V_2) \quad (1)$$

em que:

V_o – tensão de saída;

G – ganho;

V_1 – tensão da primeira entrada somadora;

V_2 – tensão da segunda entrada somadora.

Segundo Pertence Jr. (2015), o ganho pode ser descrito como o coeficiente que leva a uma tensão de saída, obtida do produto entre uma tensão de entrada e é mensurado pela equação (2).

$$A_V = \frac{E_o}{E_i} \quad (2)$$

em que:

A_V – ganho de tensão;

E_o – tensão de saída;

E_i – tensão de entrada.

A fim de corrigir o sinal de um somador inversor, pode-se utilizar um amplificador configurado como inversor unitário, cujo sinal de saída será invertido após sofrer uma defasagem de 180° (Pertence Jr., 2015).

No caso da PCB do NTC, foi necessário a utilização de uma ponte de Wheatstone para, além de melhorar a linearidade do sinal, obter a variação de tensão causada pela mudança de resistência em função da temperatura. Com o objetivo de coletar as saídas diferenciais da ponte, foi adquirido um amplificador de instrumentação (INA129). Esse circuito integrado de baixa potência e alta precisão apresenta uma faixa de operação de $\pm 2,25$ V a ± 18 V e permite fornecer um ganho de até 10000 vezes por meio de um resistor externo (Burr-Brown, 1996). A equação (3) apresenta como deve ser calculado o ganho desse circuito integrado (CI).

$$G = 1 + \frac{49,4 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (3)$$

em que:

R_G – resistência de ganho.

Para alimentar as PCB's e seus respectivos amplificadores foi desenvolvida uma placa de fonte simétrica. Para harmonizar os níveis de tensão (5 V) das saídas do ADS1115 com os requisitos do microcontrolador ESP32 e do microcomputador *Raspberry Pi*, cujas portas digitais operam em até 3,3 V, foi elaborada uma placa adaptadora de níveis lógicos.

No sistema de refrigeração do laboratório remoto, o compressor entra em funcionamento quando a temperatura do ambiente refrigerado excede um limite máximo e desliga quando atinge uma temperatura mínima. Esse controle pode ser realizado por meio da conexão do dispositivo de controle/processamento com um módulo relé. Dessa forma, foi adquirido um módulo relé com acionamento de 3 V e que possui um optoacoplador para isolar a parte AC (corrente alternada) da DC (corrente contínua), fornecendo proteção contra surtos elétricos.

Por fim, com o auxílio do *software Autodesk Inventor Professional (2023)* foram realizadas as projeções da estrutura da bancada e dos adaptadores para acoplamento dos sensores ao ciclo de refrigeração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio dos processos, materiais e métodos descritos anteriormente, foi possível desenvolver toda a estrutura para um laboratório remoto de refrigeração por compressão de vapor.

O modelo de *Raspberry Pi* (2 modelo B+) disponível no campus não foi capaz de atender todas as funções desejadas para o monitoramento e controle do laboratório remoto, dessa forma o ESP32 recebeu como função fazer a aquisição dos dados e disponibilizá-los em uma página *web*, enquanto a *Raspberry Pi* ficou com a função de receber os sinais da ESP32 e disponibilizá-los ao usuário local, além de ser capaz de armazenar internamente os dados, função essencial para a operação da bancada no modo *offline*.

A integração do microcontrolador ESP32, do *Raspberry Pi*, das PCIs dos transdutores de temperatura e pressão, do sistema de alimentação e segurança e do conversor de nível lógico foi obtida por meio da construção de um painel elétrico, apresentado na Figura 1.

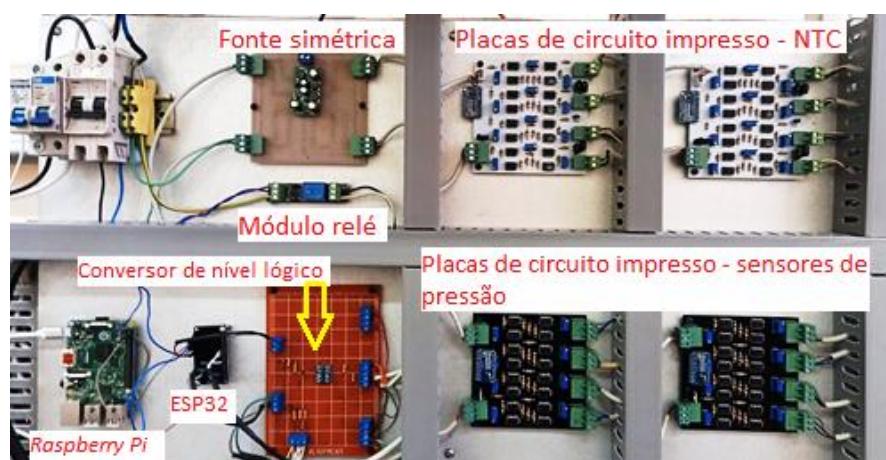


FIGURA 1. Painel elétrico.

Em relação aos aparatos de instrumentação e controle, o painel conta com uma fonte AC/DC de 9 Vdc que é conectada à placa de alimentação simétrica (-9 V / 9 V). A placa de alimentação, por sua vez, distribui essas tensões para as quatro PCB's, que também captam os sinais de seus respectivos transdutores (pressão e temperatura). Cada placa de circuito impresso emite sinais de saída digitais por meio da utilização do ADS1115 e do protocolo I2C, que é um tipo de comunicação que faz uso de dois barramentos, sendo um para sinal (SDA - *Serial Data Line*) e um para *clock* (SCL - *Serial Clock*

Line). As duas linhas de comunicação presentes em ambas as placas são consolidadas e ligadas à placa de conversão de nível lógico, que, por fim, os envia aos dispositivos de *hardware*.

A estrutura da bancada foi concebida de maneira a facilitar a observação clara de todos os elementos dentro do processo de refrigeração. Além disso, a bancada desenvolvida conta com um espaço fechado que é capaz de ser refrigerado pelo sistema e de armazenar cargas para estudos. No que se refere aos adaptadores, observou-se que eles foram capazes de conectar os sensores de forma satisfatória no ciclo do laboratório remoto (Figura 2).



FIGURA 2. Estrutura do laboratório remoto.

O custo total para a produção de todo o laboratório remoto foi de cerca de R\$7.613,33, valor muito abaixo se comparado com as bancadas de refrigeração encontradas no mercado que custam em média R\$56.000,00 e nem sempre possuem todas as funcionalidades desejadas.

CONCLUSÕES

Ao fim do processo, concluiu-se que a estrutura desenvolvida para um laboratório remoto de refrigeração por compressão de vapor, cumpri com todos os requisitos pré-estabelecidos no início do projeto.

A bancada foi confeccionada por um valor bem abaixo ao de mercado e possuía as características necessárias para estudos e pesquisas sobre o ciclo de compressão de vapor. Todos os componentes de refrigeração presentes têm suas entradas e saídas de temperatura e pressão monitoradas por sensores acoplados ao sistema por meio dos adaptadores.

O sistema de aquisição de dados e de controle é capaz de receber os sinais de saída dos transdutores, convertê-los e fornecê-los aos usuários de forma presencial e remota, além de ativar o funcionamento do compressor sempre que necessário.

Portanto é possível que os estudantes, professores e servidores do IFSP – Câmpus Catanduva e de outras instituições, realizem diversas práticas, estudos e pesquisas sobre a refrigeração utilizando a estrutura produzida.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Os 3 autores contribuíram na construção e nos testes da bancada didática do laboratório remoto. Autor 1 contribuiu significativamente na construção do painel elétrico e na redação do texto. O autor 3 contribuiu no planejamento das atividades, redação e revisão do texto. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao programa PIBITI do CNPq por fornecer os recursos financeiros necessários para a produção dessa pesquisa. Também agradecemos aos docentes e técnicos que contribuíram para o desenvolvimento da estrutura do laboratório remoto.

REFERÊNCIAS

AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL. Version 2023. 2023. San Rafael, CA: Autodesk. Windows 11.

CANTÚ, E.; MONTEZ, C. B. Protocolos, tecnologias, ferramentas e laboratórios para aplicações de internet das coisas. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SOFTWARE LIVRE E TECNOLOGIAS ABERTAS, 17., Itaipú. *Anais* [...]. Itaipú: SBC, 2020. online. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/18602>. Acesso em: 19 jan. 2023.

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

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019, v. 1.

BURR-BROWN CORPORATION. **Precision, low power instrumentation amplifiers**. Tucson: Burr-Brown Corporation, 1996. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56692/BURR-BROWN/INA129.html>. Acesso em: 15 fev. 2023.

DALLAS SEMICONDUCTOR. **DS18B20**. Dallas: Dallas Semiconductor, 2023. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227472/DALLAS/DS18B20.html>. Acesso em: 22 jul. 2023.

EMBRACO. **Linha de compressores**: distribuição e revenda. Joinville: Embraco, 2019. Disponível em: <https://www.embraco.com/wp-content/uploads/2020/03/1-2020-catalogo-portugues-am.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2023.

ODEH, S.; ALVES, J.; ALVES, G. R.; GUSTAVSSON, I.; ANABTAWI, M.; ARAFEH, L.; JAIZI, M.; AREKAT, M. R. A two-stage assessment of the remote engineering lab visir at al-quds university in palestine. **IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje**, v. 10, n. 3, p. 175-185, Ago. 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7155526>. Acesso em: 08 fev. 2023.

PANDINI, M. M.; NETO, J. M.; SPACEK, A. D.; JUNIOR, O. H. A. Design of a didatic workbench of industrial automation systems for engineering education. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 8, p. 1384-1391, Jul. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7994783/authors>. Acesso em: 08 fev. 2023.

PERTENCE JR., A. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. 8 ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

PROTEUS DESIGN SUITE. Version 8.9. Yorkshire: Labcenter Eletronics, 2019. Windows 11.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi 2, model B**. Caldecote: Raspberry Pi, 2015. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/pdfs/raspberrypi2modelb.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2023.

TEXAS INSTRUMENTS. **OP07x precision operational amplifiers**. Dallas: Texas Instruments, 2023. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/op07c.pdf?ts=1677521503753>. Acesso em: 20 mar. 2023.