



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

## Sistema de controle PI em caixa térmica para transplante de órgãos

Sabrina Rodrigues de Araújo, [sabrina.engmect@gmail.com](mailto:sabrina.engmect@gmail.com)<sup>1</sup>  
Gabriel Rodrigues de Castro, [gabrielrcaastro23@gmail.com](mailto:gabrielrcaastro23@gmail.com)<sup>1</sup>  
Liniker Cristhian de Oliveira, [liniker\\_12@outlook.com](mailto:liniker_12@outlook.com)<sup>1</sup>  
Thiago Rodrigues Oliveira, [thiago.oliveira@ifsudestemg.edu.br](mailto:thiago.oliveira@ifsudestemg.edu.br)<sup>2</sup>  
Sara Del Vecchio, [sara.vecchio@ifsudestemg.edu.br](mailto:sara.vecchio@ifsudestemg.edu.br)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Aluno do curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica e membro do Grupo PET Conexões Mecatrônica/BSI do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Docente do núcleo de Eletrônica e Automação e Tutor Bolsista do Grupo PET Conexões Mecatrônica/BSI do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Docente do núcleo de Mecânica do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

**Resumo.** *Dentre os países que realizam transplante de órgãos, o Brasil se destaca ocupando o segundo lugar no ranking. Porém, os recipientes utilizados para armazenamento do órgão ao longo do transporte possuem gargalos no que diz respeito ao monitoramento e controle de temperatura ambiente. Tendo isso em vista, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de controle de temperatura utilizando um controlador PI. A pesquisa proposta é de natureza quantitativa, aplicada e experimental. A partir da revisão bibliográfica, realizou-se o projeto, a modelagem e a construção do protótipo. O sistema foi testado e obteve-se um bom resultado, tendo em vista que o erro de regime estacionário foi nulo.*

**Palavras chave:** *Controlador PI. Microcontrolador. Transferência de Calor. Temperatura.*

**Abstract.** *Among the countries that perform organ transplants, Brazil ranks second. However, the containers used to store the organ during transportation have bottlenecks when it comes to monitoring and controlling the ambient temperature. With this in mind, this study aims to develop a temperature control system using a PI controller. The proposed research is of a quantitative, applied and experimental nature. Based on the literature review, the design, modeling and construction of the prototype were carried out. The system was tested and a good result was obtained, given that the steady-state error was zero.*

**Keywords:** *PI controller. Microcontroller. Heat transfer. Temperature.*

### 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Garcia; Pereira; Garcia (2015), o transplante de órgãos é uma terapêutica que objetiva a substituição de órgãos que perderam a sua função no organismo. Tendo isso em vista, há evidências de que os primeiros experimentos realizados datam de 1880, com a utilização de pequenas fatias de rim, pâncreas, tireoide e testículo. No Brasil, o primeiro transplante de órgãos ocorreu em 1954, de acordo com Moura-Neto; Moura; Souza (2016), no qual um paciente de 18 anos recebeu o rim de uma criança. A partir disso, o país já se tornou o segundo maior centro transplantador de órgãos do mundo, tendo à sua frente apenas os Estados Unidos (AZEVEDO, 2021). Todavia, o Brasil enfrenta problemas na logística de transporte de órgãos (Santos et al., 2022; Haga; De Souza; Fernando, 2022; Accioly, 2022). Desse modo, a logística impacta diretamente o procedimento cirúrgico, uma vez que é responsável por viabilizar e proporcionar os processos e exigências em relação ao armazenamento, ao manuseio, à conservação e ao transporte do órgão utilizado no transplante (DA SILVA et al., 2019).

Segundo Accioly (2022), são diversas as variáveis envolvidas no transplante dos órgãos, como, por exemplo, o tempo de isquemia, sendo esse o tempo limite que o órgão sobrevive sem circulação sanguínea, a condição de armazenamento durante seu transporte e se a equipe é experiente ou não para o procedimento cirúrgico. Sendo assim, cabe destacar que o controle térmico possui um papel importante nestes processos de armazenamento, de conservação e de transporte, haja vista que é responsável não só pelo gerenciamento, como também pelo monitoramento de temperatura do ambiente e do órgão. Posto isso, diversas pesquisas têm buscado garantir uma melhoria nos processos de manutenção da temperatura como forma de garantir que produtos farmacêuticos e vacinas sejam armazenados, mantidos e transportados em um ambiente seguro, monitorado e com controle de temperatura, para evitar avarias, melhorando as condições da cadeia do frio (FORTUOSO DA SILVA et al., 2023). Em Rodrigues et al. (2022), foi proposto o uso de um microcontrolador, em conjunto com um sensor de temperatura e umidade e um módulo GPS (Global Positioning System), para garantir o monitoramento de caixas térmicas usadas no transporte de produtos farmacêuticos. No trabalho apresentado por Silva Lima et al. (2020), o estudo da cadeia de frio teve como objetivo a construção de um protótipo de monitoramento de temperatura para o armazenamento de vacinas, utilizando um microcontrolador, dois leds (light-emitting diode) e um buzzer para sinalizar a variação de temperatura na caixa de transporte. Silva (2022) apresentaram um estudo que propõe não apenas o uso de uma placa de Peltier para a refrigeração termoelétrica do protótipo de uma mini geladeira, mas também a implementação de um controlador PID para manter a temperatura desejada no ambiente interno. Em Romeiro (2022), foi desenvolvido um dispositivo baseado em um microprocessador ESP-32 como concentrador e processador de dados e um termômetro Bluetooth com bateria, incorporados ao sistema de condicionamento e armazenamento de medicamentos, de baixo custo, com alerta via WhatsApp em situações críticas. Por meio de testes em laboratório e em campo o autor aponta ser o dispositivo uma solução promissora, para auxílio à cadeia do frio e o manuseio de termolábeis, em especial as vacinas. Ferrasi (2023) desenvolveu um dispositivo com microcontrolador ESP32 e sensores de umidade, temperatura, DHT22 e luminosidade LDR, utilizando IoT, de baixo custo, para aquisição de dados ambientais de amostras biológicas, durante o seu transporte. Concluiu que o dispositivo se mostra promissor, principalmente devido ao seu custo e afirmando que o monitoramento das condições ambientais às quais as amostras biológicas sofrem durante o transporte pós-coleta e a chegada nos laboratórios de análise garante confiabilidade dos resultados obtidos ou assegure uma nova coleta em caso de não conformidades de armazenamento.

Diante disso, é possível verificar que se trata de um tema bastante atual e promissor, que traz lacunas de pesquisa relacionadas não só ao monitoramento, como também ao controle de temperatura, principalmente quando se considera o armazenamento de órgãos, cujas respostas podem proporcionar importantes contribuições para a comunidade científica e redução no descarte devido às más condições de armazenamento durante o transporte. Desta forma, este estudo tem como objetivo geral executar o controle da temperatura obtida por meio do sistema de refrigeração projetado, utilizando pastilha de Peltier em conjunto com um sensor de temperatura para monitoramento, sendo aquele realizado por meio da variação do valor da alimentação da pastilha termoelétrica, com o propósito de manter a temperatura constante dentro da faixa de 10°C.

## **2. METODOLOGIA**

Para este estudo, optou-se por projetar um sistema de refrigeração utilizando a pastilha termoelétrica, que consiste em um componente que apresenta funcionamento baseado no efeito Peltier. Quando submetida à passagem de uma corrente elétrica, a pastilha tem a capacidade de resfriar uma de suas faces enquanto aquece a face oposta, desse modo, sua faixa de operação é de 0 a 15,2V e de 0 a 6A.

Para obter o resfriamento desejado, é necessário que a pastilha esteja em contato com um dissipador de calor em ambas as faces. O dissipador, em contato com a parte quente, evita o superaquecimento do componente, enquanto o dissipador em contato com a parte fria é responsável pelo resfriamento do meio. O conceito da montagem da unidade de refrigeração pode ser observado na imagem da Fig. 1.

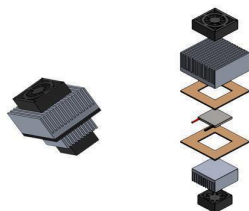


Figura 1 - Vista explodida do sistema de refrigeração (Próprios Autores, 2023).

A ventoinha presente na parte exterior é responsável por fazer uma convecção forçada no lado quente da célula de Peltier, ocasionando, assim, a redução de temperatura na parte fria. Enquanto a ventoinha presente no interior da caixa térmica é utilizada por distribuir de maneira uniforme o ar frio obtido no processo.

Inicialmente, foi executada uma variedade de testes com o sistema de refrigeração sem estar encaixado na estrutura de isopor da caixa térmica, visando avaliar o funcionamento do circuito eletrônico implementado. Para isso, foi utilizado o módulo *PWM* com a função de modular a tensão aplicada na alimentação da pastilha de Peltier, de acordo com a necessidade de resfriamento do interior da caixa. A medição da temperatura presente na unidade de refrigeração foi feita pelo sensor DS18B20 do tipo sonda, com faixa de medição de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , resolução de 12 bits e tempo de resposta de 750 ms. Além disso, foi utilizado o módulo relé, responsável por ativar as ventoinhas e mantê-las ligadas a uma velocidade constante durante o funcionamento do sistema. Por fim, foram inseridos dois LEDs para sinalização, um vermelho, responsável por informar que a caixa estava em processo de resfriamento, e um branco para indicar que a temperatura alcançou o valor desejado. O esquemático do circuito aplicado no protótipo pode ser observado na Fig. 2.

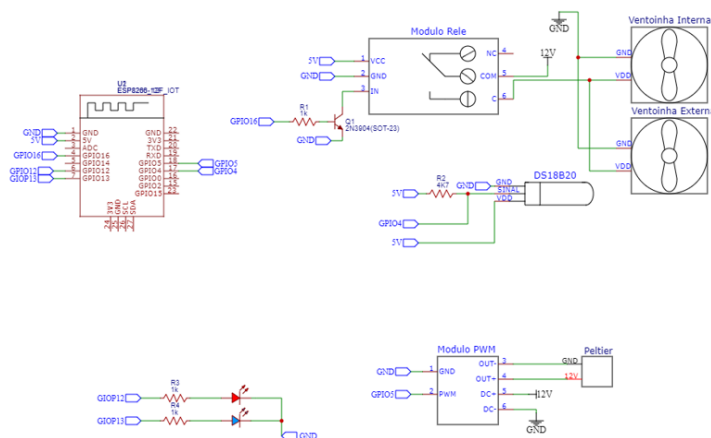


Figura 2 - Esquemático do circuito projetado (Próprios Autores, 2023).

Com o sistema eletrônico finalizado, realizou-se o encaixe na caixa de isopor, concluindo assim a montagem do protótipo para a obtenção da função de transferência da planta projetada. O protótipo final pode ser observado na Fig. 3.

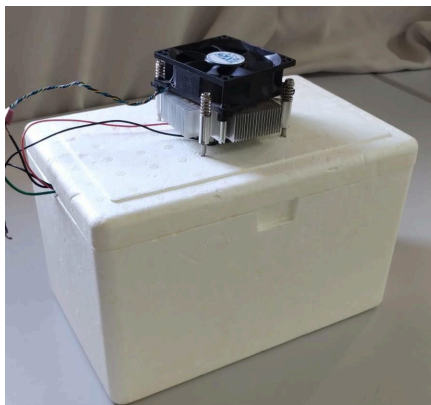


Figura 3 - Protótipo montado (Próprios Autores, 2023).

## 2.1. PROJETO DO CONTROLADOR PI

Para o processo de obtenção da função de transferência, foi executada a programação do código na plataforma Arduino IDE, com o foco em simular o funcionamento de todos os componentes do sistema de forma constante, desconsiderando a desativação do Peltier e das ventoinhas ao obter a temperatura desejada. Para este caso, então, utilizou-se o PWM para gerar um degrau de aproximadamente 6V e, em seguida, esperou-se até que o sistema apresentasse uma estabilização em relação ao decréscimo da temperatura obtida. A curva do decaimento da temperatura no interior da caixa em função do tempo pode ser observada na Fig. 4.

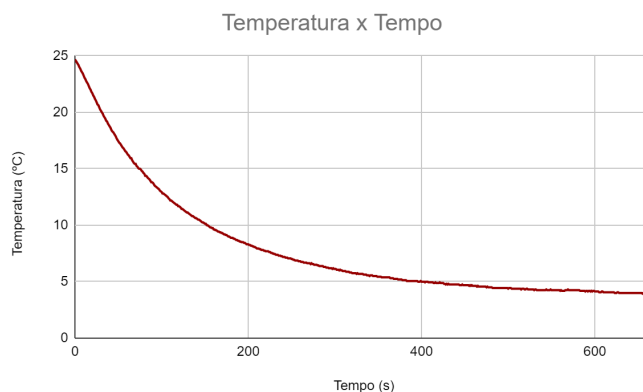


Figura 4 - Curva da queda temperatura em relação ao tempo (Próprios Autores, 2023).

Como a curva obtida para o decaimento de temperatura apresenta um comportamento contrário ao que geralmente é trabalhado no projeto de controladores, utilizou-se a estratégia de complementar o resultado obtido, reduzindo as medições pela maior temperatura visualizada. Dessa forma, obteve-se uma versão invertida da curva original, observada na Fig. 5, para assim retirar a função de transferência da planta.

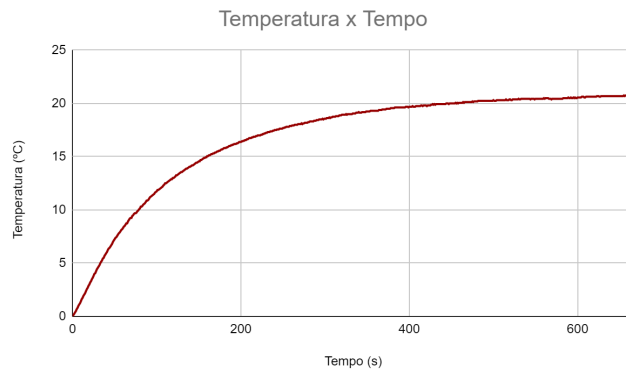


Figura 5 - Curva invertida da queda temperatura em relação ao tempo (Próprios Autores, 2023).

A função de transferência do sistema proposto é dada por:

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (1)$$

Em que, de acordo com os dados da Fig. 5, tem-se:

$$K = \frac{20,75 - 0}{6} = 3,4583 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$T = 0,632 * 202 \approx 128 \text{ s} \quad (3)$$

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts+1} = \frac{3,4583}{128s+1} \quad (4)$$

Dessa forma, a partir da função de transferência modelada, foi possível realizar a comparação com a resposta ao degrau obtida por meio do procedimento de amostragem feito em laboratório, conforme demonstrado na Fig. 6.

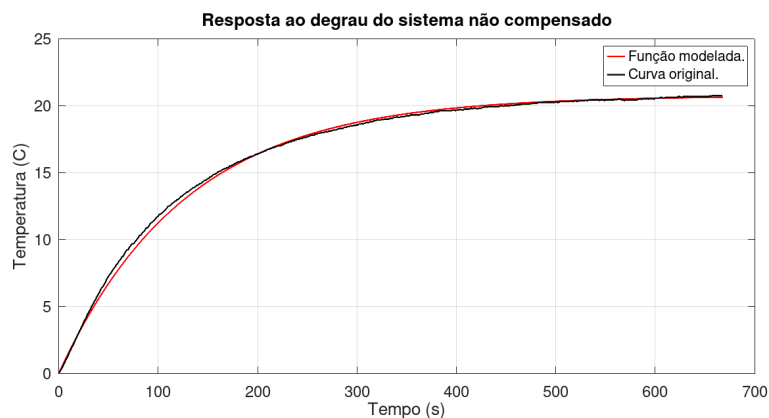


Figura 6- Comparativo das curvas para resposta ao degrau de 6V (Próprios Autores, 2023).

## 2.2. PROGRAMAÇÃO DO CONTROLADOR PI

O objetivo do controlador PI implementado é garantir que a temperatura mantenha-se no setpoint desejado, que nesse caso foi estipulado como sendo de 10°C. Além disso, optou-se por utilizar apenas as parcelas proporcional e integrativa, haja vista que a parcela derivativa do controlador atua a partir da diferença entre o erro atual e o erro anterior, ocasionando problemas de estagnação do sistema antes do setpoint desejado caso a diferença de erros seja zero

(NISE, 2017), o que pode prejudicar toda a cadeia logística de transporte e, principalmente, o órgão a ser transplantado. Tendo isso em vista, estabeleceu-se que a variável a ser controlada é a tensão aplicada à pastilha de Peltier, que impacta diretamente na temperatura de resfriamento, que neste caso é a variável de saída do sistema. O código do controlador PI foi implementado utilizando a IDE do Arduino e sua estrutura pode ser observada na Fig. 7. O início do código representa a inclusão das bibliotecas necessárias para o correto funcionamento, tanto do sensor quanto da comunicação. Posteriormente, foram estabelecidas as portas que os componentes utilizados seriam inseridos, e além disso, todas as variáveis úteis foram declaradas, de acordo com o tipo que elas pertencem de acordo com as referências do Arduino.

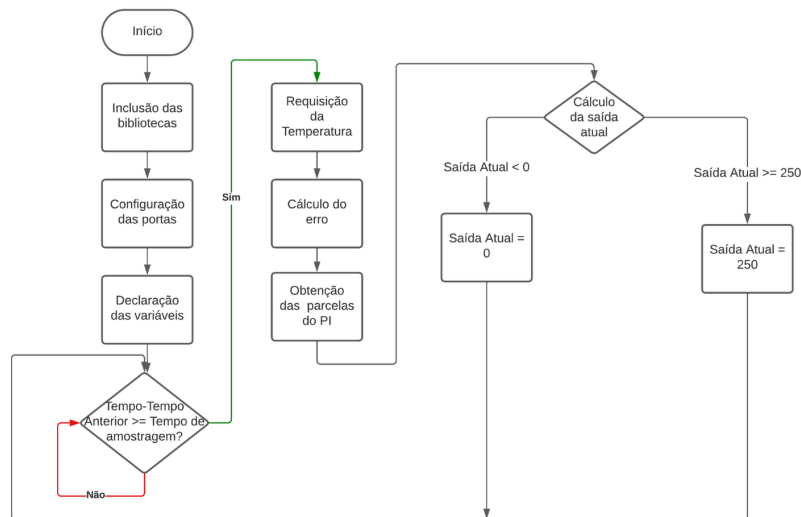


Figura 7- Método de controle PI (Próprios Autores, 2023).

Inicialmente, a variável *millis* foi utilizada para realizar o controle do tempo e, a partir da comparação com o tempo de amostragem, entra-se na parte referente ao controlador. Assim como já foi dito, o *setpoint* foi configurado para 10°C, e ao comparar com a leitura do sensor de temperatura, foi possível obter o erro necessário para se obter os ganhos do tipo proporcional e integrativo. A partir da soma das parcelas dos ganhos, a saída pôde ser obtida, e com isso atuação dessa saída do controlador foi inserida no módulo PWM, fazendo assim o controle da temperatura. Já para o cálculo do erro, como a curva da temperatura *versus* tempo da planta é decrescente, ao realizar essa parte do código, foi necessário inverter a equação normalmente utilizada, sendo feita a leitura do sensor e subtraindo pelo *setpoint* escolhido.

### 3. RESULTADOS

Após obter os ganhos por meio do procedimento de ajuste, realizado de maneira prática, pode-se observar a curva obtida para a resposta ao degrau do sistema na Fig. 8.

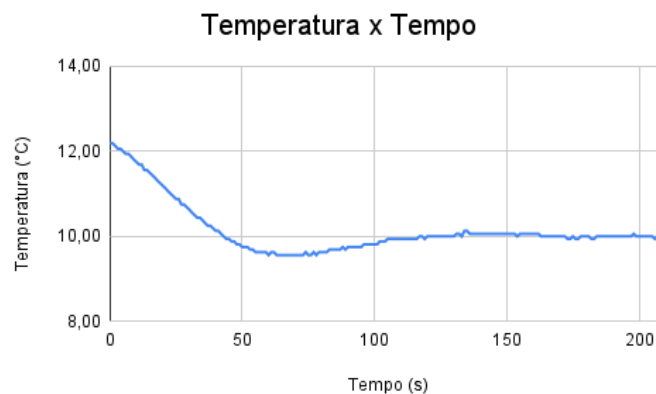


Figura 8 - Resposta ao degrau do sistema compensado (Próprios Autores, 2023).

Seguindo a mesma estratégia utilizada para a obtenção da planta, realizou-se a inversão da curva, reduzindo a partir da maior temperatura de todas as medições obtidas.

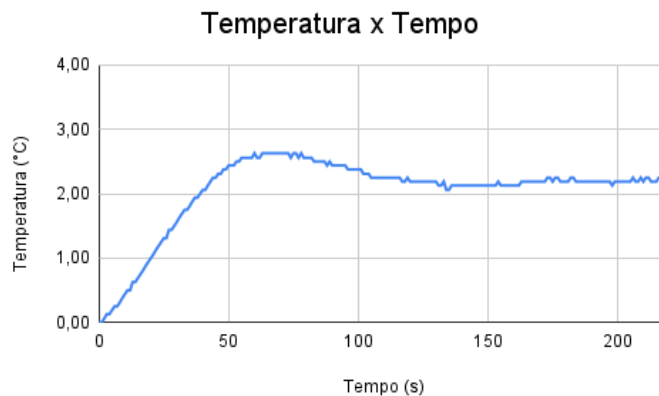


Figura 9- Resposta ao degrau do sistema compensado - Curva Invertida (Próprios Autores, 2023).

Ainda, pôde-se obter o gráfico de erro de regime estacionário, para melhor analisar os resultados, como mostrado na Fig. 10.

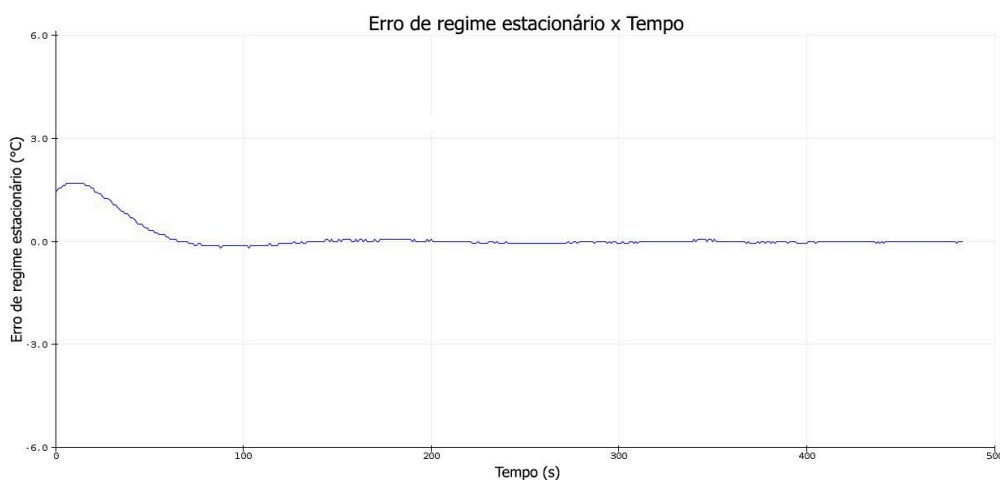


Figura 10 - Erro de regime estacionário (Próprios Autores, 2023).

Logo, comparando as curvas obtidas na Figura 5 com a da Figura 10, tem-se que o controlador PI projetado foi capaz de alterar a curva de temperatura para o valor estipulado, visto que a sinusidade atende aos parâmetros de projeto, uma vez que passa a apresentar um erro de regime estacionário nulo, não apresentando oscilações na resposta obtida para o controle de temperatura alcançada na pastilha de Peltier.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um controlador PI para o protótipo de uma caixa térmica, visando o controle de temperatura interna em recipientes que podem ser utilizados para o transporte de órgãos para transplante. Considerando-se que os principais desafios logísticos estão relacionados às grandes distâncias e à conservação da temperatura do órgão, este trabalho contribuiu principalmente com a proposição de um sistema de controle de temperatura e não apenas monitoramento. Em trabalhos futuros, pretende-se otimizar a estrutura do protótipo, adicionar um módulo GPS (Global Positioning System) e testar novas alternativas de manutenção de temperatura, assim como

avaliar o desempenho destes sistemas. Além disso, almeja-se testar o protótipo para outras aplicações em saúde e comerciais.

### 3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora pelo auxílio financeiro fornecido através da bolsa de iniciação científica, que tornou possível a realização deste estudo. Ainda, agradecem ao Grupo PET Conexões Mecatrônica/BSI do qual são membros.

### 4. REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, João Victor Canelas de. Avaliação da eficiência da logística de transplante de órgãos das unidades federativas brasileiras através da análise envoltória de dados. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 101 p., 2022;
- AZEVEDO, Ana Paula Gravina. O trabalho da equipe de retirada de múltiplos órgãos e tecidos e os riscos ocupacionais. 2021;
- DA SILVA, ANDRÉ LUIS ALVEA et al. O cenário atual e as dificuldades encontradas no transporte de órgãos no Brasil. 2019;
- FERRASI, Emerson Carlos Sarti. Internet das coisas aplicada ao gerenciamento de rastreabilidade de amostras biológicas. Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Mídia e Tecnologia – Doutorado Acadêmico, da Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, 53 p., 2023;
- FORTUOSO DA SILVA, Givan Aparecido et al. Análise dos desafios do processo logístico da cadeia de frio e a influência na importação de imunobiológicos para combate à covid-19. Revista Gestão e Organizações, v. 8, n. 1, p. 1-26, abr. 2023. ISSN 2526-2289. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/rgo/article/view/7080>>. Acesso em: 05 Jun.2023;
- GARCIA, Clotilde Druck; PEREIRA, Japão Dröse; GARCIA, Valter Duro. Doação e transplante de órgãos e tecidos. São Paulo: Segmento Farma, 2015;
- HAGA, Sheila Mirelle Bormann; DE SOUZA, Washington Luiz; FERNANDO, Paulo Henrique Lixandrao. Questões logísticas para distribuição da vacina contra a malária. REGRA SP-Revista para Graduandos/IFSP-Câmpus São Paulo, v. 7, n. 1, p. 65-89, 2022;
- MOURA-NETO, José Andrade; MOURA, Ana Flávia; SOUZA, Edison. Cinquenta anos do primeiro transplante no Brasil. Brazilian Journal of Transplantation, v. 19, n. 4, p. 26-29, 2016;
- NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 7. ed. São Paulo: LTC, 2017.
- RODRIGUES, Renato Klehm et al. Sistema de monitoramento e alerta para caixas térmicas utilizadas no transporte de produtos farmacêuticos. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Elétrica, Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 54 p., 2022;
- ROMEIRO, Lucas de Araújo Wanderley. Sistema de baixo custo para monitoramento e alerta remoto da temperatura de medicamentos termolábeis, com base em tecnologia Edge Computing, BLE e IoT. Dissertação de Mestrado Profissional, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Distrito Federal, 53 p., 2022;
- SANTOS, Carlos et al. Modelo de eficiência para o processo logístico de transporte de fármacos no Brasil. 2022. Projeto final do Programa de Pós-graduação em Gestão de Negócios, SEST-SENAT, São Paulo, 151 p., 2022;
- SILVA, Ítalo Souza da. Utilização de um controle PID de temperatura para estudo de resfriamento termoelétrico. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 88p., 2022;
- Silva Lima, M., Fontanella Santiago, R., Pedro Maciel Trajano, J., Chahim Pereira, L., & Rocha de Abreu, S. Controle De Temperatura Com Arduino. Revista Mythos, 12(2), 48-55, 2020.

### 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.