

## Implementação de um controle PID de temperatura em uma bancada experimental de refrigeração

### Implementation of a PID temperature control in a refrigeration experimental bench

Mariany Polizeli Spagnollo<sup>1</sup>, Leandro Ribeiro Alves<sup>1</sup>, Vinícius Abrão da Silva Marques<sup>1\*</sup>,  
Guilherme Azevedo Oliveira<sup>1</sup>

---

#### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a implementação e validação de um sistema de controle para uma bancada experimental de refrigeração. O aparato foi projetado para a realização de testes com diferentes fluidos refrigerantes em busca de um substituto para o R134a. Para facilitar a obtenção dos resultados, foi desenvolvido um controle PID de temperatura capaz de manter o sistema em regime permanente de forma mais automatizada e rápida. Com a obtenção das constantes K<sub>p</sub>, K<sub>d</sub> e K<sub>i</sub> foram realizadas análises para comparar aplicações e eficácia dos resultados obtidos para o equilíbrio do sistema, resultando em uma diminuição de até 67% no tempo de teste. Apenas 3,7% dos experimentos não corresponderam ao tempo mínimo necessário de estabilização ou à variação de temperatura acima de 0,30°C. Com os resultados do controle satisfatórios foi possível avaliar a potência frigorífica e o consumo energético para os diferentes fluidos refrigerantes testados: R134a, R290 e R513a, em que o último apresentou um desempenho médio 9,8% maior que o R134a, enquanto o R290 teve um desempenho médio de 6,9% menor do que o R134a, concluindo que os testes realizados apontaram o R513a como um melhor substituto nas condições testadas.

**Palavras-chave:** controle PID, refrigeração; R513a, fluidos alternativos.

---

#### ABSTRACT

This work aims to implement and validate a control system for an experimental refrigeration bench. The apparatus was designed to carry out tests with different refrigerant fluids in search of a replacement for R134a, requiring repeated experiments for different application ranges. To make it easier to obtain the results, a PID temperature control was developed, capable of keeping the system in a steady state in a more automated and faster way. After obtaining the constants K<sub>p</sub>, K<sub>d</sub> and K<sub>i</sub>, analyzes were made to compare the effectiveness of the results obtained for the equilibrium of the refrigeration system, resulting in a decrease of up to 67% in the test time. Only 3.7% of the experiments did not correspond to the minimum necessary stabilization time for the steady state or to a temperature variation above 0.30°C. Thus, with the satisfactory control results, it was possible to evaluate the cooling capacity and power consumption for the different refrigerants tested: R134a, R290 and R513a, in which the latter presented an average performance 9.8% higher than the R134a, while the R290 had an average performance of 6.9% lower than the R134a, concluding that the tests carried out pointed the R513a as a better substitute in the tested conditions.

**Keywords:** PID Controller, refrigeration; R513a, alternative fluids.

---

---

<sup>1</sup> Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

\*E-mail: [vinicius.marques@uftm.edu.br](mailto:vinicius.marques@uftm.edu.br)

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de compressores capazes de trabalhar com fluidos como amônia e éter foi um grande marco na história da refrigeração, antes dessa descoberta, era utilizada somente a evaporação da água nesses sistemas (Matos, 2017). Posteriormente, foi a aplicação de motores elétricos que possibilitou o crescimento dessa área, impulsionando assim, muitas pesquisas com relação aos diferentes fluidos refrigerantes e como suas características influenciam nos parâmetros frigoríficos e, é a partir de 1920, que teve início o uso dos refrigerantes conhecidos como CFC's, os clorofluorcarbonetos (Arora, 2000).

No entanto, a emissão desses gases foi associada à degradação da camada de ozônio, característica quantificada pelo índice ODP (Ozone Depletion Potential). Uma convenção em Viena deu origem ao Protocolo de Montreal (1987), o qual estipulou prazos para a eliminação do uso de fluidos com elevado valor para esse índice (Calm, 2008). Essa preocupação ambiental gerou o desenvolvimento dos hidrofluorcarbonetos (HFCs) como fluidos substitutos por possuírem ODP nulo.

Por outro lado, os HFCs apresentam um alto índice intitulado GWP (Global Warming Potencial), o qual mensura a quantidade de calor que é retido na atmosfera ao emitir uma determinada massa do gás em questão com relação ao calor retido na emissão da mesma quantidade de gás carbônico utilizado como referência, isso significa que quanto maior o valor no índice, maior será a sua contribuição para o efeito estufa. Nessa conjuntura, foi consolidado o Protocolo de Kyoto (1997) que também estipulou regras para a diminuição do uso desses gases.

A partir disso, aumentaram as pesquisas em busca por melhores fluidos refrigerantes, que além de baixos valores para os índices ODP e GWP, não devem apresentar riscos de toxicidade, flamabilidade e fornecer uma alta eficiência aos sistemas. Neste contexto, foi construída uma bancada de refrigeração experimental, no Laboratório de Energia e Fenômenos de Transporte da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (LEFT/UFTM), com o objetivo de trabalhar com diferentes fluidos refrigerantes, possibilitando a análise do desempenho frigorífico do sistema nessas condições.

Embora o aparato construído tenha possibilitado a realização de alguns experimentos, aprofundando os estudos e comparando com aplicações reais, foi

observada a necessidade de desenvolver melhorias para diminuir os erros experimentais e facilitar a prática dos ensaios. Dentre essas, destaca-se a importância de um sistema de controle de temperatura, o qual elimina o ajuste feito manualmente e fornece cálculos mais precisos, além de tempo de teste reduzido.

### **Diferentes aplicações de controles na refrigeração**

Os equipamentos de refrigeração foram se aperfeiçoando e ganhando espaço na indústria alimentícia, química e na sociedade como um todo, estando presente nas residências, nos mercados, nos hospitais entre outros diversos lugares. Como todo mercado em crescimento, há a competitividade e a necessidade de melhoria contínua, sendo de extrema importância as pesquisas e desenvolvimentos nos aprimoramentos dos produtos. É através da busca por otimizações dos procedimentos com melhoria de qualidade que surge a inevitável aplicação dos sistemas de controle (Ogata, 2010).

Sabe-se que um sistema de refrigeração simples consiste em quatro principais elementos: compressor, condensador, válvula de expansão ou tubo capilar e evaporador. No entanto, para cada aplicação pode ser necessário adicionar ao aparato novos componentes para a implementação de um sistema de controle. Lokietek et al. (2019), por exemplo, frente aos problemas de congelamento das paredes de uma câmara fria, implementou um controlador PLC para eliminar o processo de descongelamento e diminuir a variação da temperatura interna.

Além de solucionar alguns problemas operacionais, a implementação de um controle também pode ter impacto na redução da energia consumida. Com essa finalidade Buzelin (2003) desenvolveu um controle de inversão de frequência para o compressor de um sistema de refrigeração comercial e calculou uma redução de, aproximadamente, 34% no consumo energético em comparação com um sistema tradicional *on-off*, que consiste em ligar ou desligar o compressor de acordo a temperatura.

Sampaio (2006) constatou que o controle de temperatura também torna o sistema mais econômico a partir de testes em um sistema de condicionamento de ar com termoacumuladores com um funcionamento *on-off* e com a implantação de um controle de temperatura PID, com o segundo resultando em ambientes com menor oscilação de temperatura e gerando maior economia.

A aplicação do controle PID para temperatura se comprova eficaz inclusive através das simulações, como foi mostrado por Hamid et. al. (2009) que simulou o comportamento da temperatura resultante de um sistema de refrigeração, comparando o controle PID com o sistema *on-off*. Com o controle PID foram obtidos os melhores ajustes para todas as temperaturas simuladas.

Para o desenvolvimento do controle PID é necessário o conhecimento das metodologias que podem ser utilizadas para a obtenção das três constantes necessárias. No trabalho realizado por Junior et al. (2019) para o controle de temperatura em uma impressora 3D foi adotada a Regra de Sintonia de Zeigler-Nichols, que consiste em aplicar uma função degrau no sistema e com a observação da curva resultante é possível definir os valores de atraso (L) e da constante de tempo (T) para aplicar nos cálculos das constantes Kp, Ki e Kd mostrados na tabela 1. O resultado encontrado foi satisfatório para os três locais de teste, fazendo com que a temperatura do material utilizado fosse constante durante todo o processo de impressão.

**Tabela 1** – Metodologia para o cálculo das constantes do controle

Constantes	Kp	Ki	Kd
PID	1,2 T/L	0,5/L	0,5L

Fonte: Junior et al., 2019

Para cada situação que se aplica o controle PID deve ser analisada a melhor metodologia para determinar as constantes utilizadas. No trabalho experimental de Ranjan et al. (2014) foram testados dois diferentes métodos: Zeigler-Nichols e Chien-Hrones-Reswick em que o segundo retornou o menor tempo de resposta e zero *overshoot*. A estimativa dessas constantes foi feita pelo *simulink* MATLAB, já que era um sistema de difícil modelagem.

Mesmo com a literatura oferecendo diversos métodos para a obtenção do valor exato dessas constantes, há ainda algumas limitações, sendo necessário o entendimento de como cada uma interfere nas respostas obtidas. O ganho proporcional, por exemplo, denominado como Kp, gera uma resposta proporcional ao desvio do valor da variável a ser controlada e é responsável por aumentar a velocidade da resposta do controle. Quando adicionada a função integral, tem-se a constante Ki que multiplica a soma de todo o erro

da variável de controle em relação ao valor desejado e acumulado ao longo do tempo, podendo eliminar o erro de regime estacionário. Já a constante derivativa,  $K_d$ , multiplica a diferença dos desvios a cada tempo e causa uma redução do *overshoot* e o tempo de assentamento (Ogata, 2010). A tabela 2 a seguir demonstra como cada constante interfere em cada parâmetro na curva de resposta.

**Tabela 2** – Resumo do efeito de cada parâmetro

<b>Constantes</b>	<b>Tempo de subida</b>	<b>Overshoot</b>	<b>Tempo de assentamento</b>	<b>Erro de estado estacionário</b>
<b><math>K_p</math></b>	Reduz	Aumenta	Pouco efeito	Reduz
<b><math>K_i</math></b>	Reduz	Aumenta	Aumenta	Elimina
<b><math>K_d</math></b>	Pouco Efeito	Reduz	Reduz	Não muda

Fonte: Muniz, 2017

### Motivação do projeto

Para análise da capacidade frigorífica e potência consumida pelo sistema de refrigeração, foram realizados testes em regime permanente de, pelo menos, 20 minutos. Isso significa que devem se manter constantes nesse tempo as características em cada ponto do ciclo, ou seja, na entrada do compressor, do condensador, da válvula de expansão e do evaporador. Sabendo que um dos objetivos da bancada é a comparação dos resultados de diferentes fluidos refrigerantes trabalhando em diversas faixas de aplicação, utilizou-se as diferentes aberturas da válvula de expansão eletrônica e diferentes temperaturas para o ambiente refrigerado.

Neste trabalho, o evaporador do sistema está imerso em água e isolado termicamente, sendo quantificada a capacidade frigorífica do sistema com o cálculo da potência de uma resistência elétrica no mesmo líquido quando esse apresenta uma temperatura constante. A exemplo disso, pode-se entender que transferência de calor da água com o fluido refrigerante é compensada pela absorção da mesma quantidade de calor que é dissipado devido a ação da resistência elétrica.

Então, para que esse processo ocorra em regime permanente, deve haver o controle da potência da resistência elétrica que é aplicada em cada teste. Nos primeiros testes realizados, o controle foi através do ajuste manual da tensão aplicada por um variavolt, que é um transformador de tensão variável, até a obtenção do regime permanente desejado. Com a dificuldade de obtenção de regime permanente de forma rápida e com desvios de temperatura com relação ao desejado, observou-se a necessidade da implementação de uma melhoria através do controle da temperatura conforme variação da potência elétrica da resistência, já que não havia uma precisão e nem uma padronização dos ajustes realizados até o início do regime permanente, o que ocasiona em testes longos e menos confiáveis.

A respeito disso, a busca pelo desenvolvimento de melhorias do processo gerou o interesse pela aplicação de um controle automático que fosse capaz de manter as variáveis do sistema dentro dos limites pré-estabelecidos. Como apresentado, há diferentes possibilidades para implementação de controle, no entanto, sabendo das condições que a bancada experimental será submetida, para a realização dos testes é imprescindível que o método escolhido leve em consideração as interferências em cada aplicação. Isto posto, houve o início do desenvolvimento do controle PID (Proporcional–Integral-Derivativo), o qual apresenta grande facilidade de implantação e robustez, sendo um dos sistemas de controle mais utilizados dentre os outros (SILVA,2003), além de atender as requisições das práticas.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

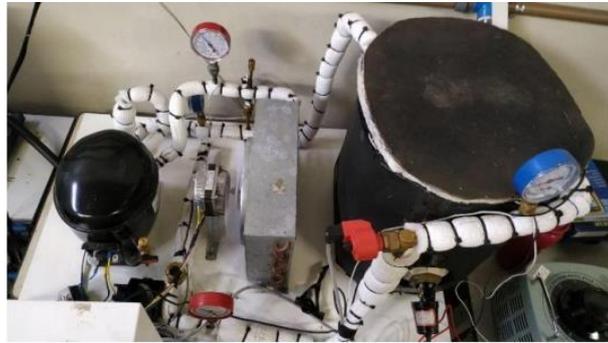
Para o desenvolvimento do controle que foi implementado é necessário conhecer o funcionamento da bancada experimental e como eram realizados esses ajustes anteriormente.

### **Características da bancada experimental**

A bancada de refrigeração construída, ilustrada na figura 1, consiste em quatro principais componentes, sendo: compressor hermético de ¼ de HP projetado para trabalhar com R134a, condensador a ar, válvula de expansão eletrônica que permite determinar sua porcentagem de abertura, ou seja, a vazão do fluido refrigerante e um

evaporador em formato de serpentina projetado com tubo de cobre liso imerso em banho de água isolado termicamente.

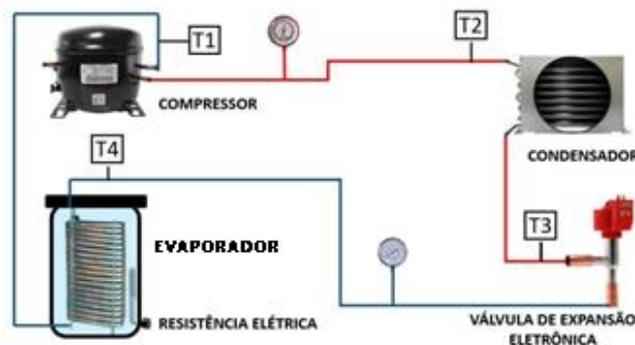
**Figura 1** – Aparato experimental



Fonte: Santis et al., 2019

Para que os testes fossem realizados em regime permanente e em diferentes faixas de aplicação, foi necessário controlar a temperatura da água no reservatório com o evaporador, onde foi instalada uma resistência elétrica, de forma que fosse possível alterar sua potência até a obtenção de uma temperatura constante. O ajuste da potência ideal para cada condição, inicialmente, era realizado manualmente através de um varivolt ao serem observadas as variações de temperatura adquiridas por um sensor imerso no mesmo líquido. A figura 2 ilustra o esquema da bancada e os quatro principais pontos onde são medidas as temperaturas e as pressões do ciclo.

**Figura 2** – Esquema da bancada experimental



Fonte: Santis et al., 2019

Com o ajuste da tensão feito manualmente exigia-se muito tempo para que o sistema entrasse em regime permanente, chegando em uma média de 2 horas por teste. Considerando o critério de manter as propriedades constantes durante 20 minutos. A capacidade frigorífica ( $Q_{ev}$ ) foi calculada conforme a Eq.1, onde  $W_{res}$  corresponde à potência elétrica,  $U_{res}$  a tensão e  $i_{res}$  a corrente aplicada na resistência elétrica.

$$Q_{ev} = W_{res} = U_{res} \cdot i_{res} \quad (1)$$

De forma análoga, a potência consumida pelo compressor  $W_{comp}$  também é calculada com a multiplicação da corrente,  $U_{comp.}$ , e tensão elétrica,  $i_{comp.}$ , medida no compressor durante o regime permanente, como mostra a Eq. 2.

$$W_{comp} = U_{comp.} \cdot i_{comp.} \quad (2)$$

Com a obtenção desses dois parâmetros é possível calcular o COP do sistema, que indica a eficiência da bancada nas condições testadas, sendo a razão do calor removido da água ( $Q_{ev}$ ) pela potência de compressão ( $W_{comp}$ ), conforme apresentado na Eq. 3.

$$COP = \frac{Q_{ev}}{W_{comp}} \quad (3)$$

### Principais modificações do sistema

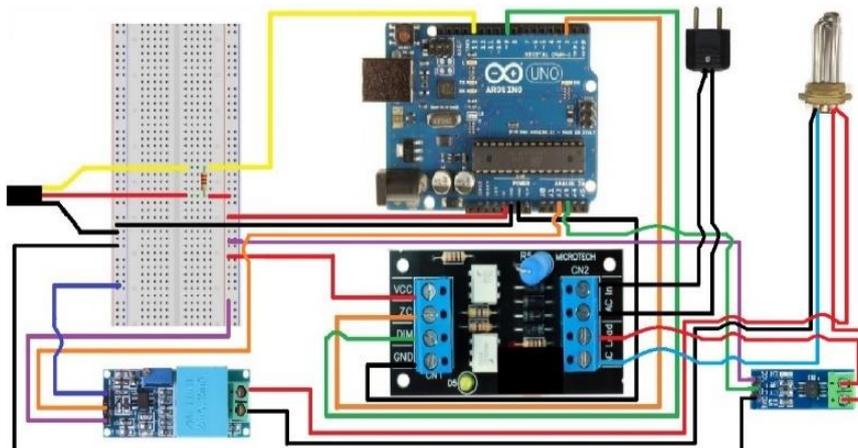
O controle de temperatura foi desenvolvido para atuar como substituto do varivolt, automatizando o processo de regulagem da potência da resistência elétrica e minimizando o tempo demandado para a obtenção da estabilização. Sabendo que a lógica utiliza as diferenças de temperatura obtidas ao longo da atuação do controle no cálculo da tensão retornada, para cada instante de tempo há um novo cálculo da potência da resistência elétrica que deverá ser aplicada, podendo ter variações desse valor. Isso quer dizer que a potência frigorífica, nesse caso, será equivalente ao cálculo da potência média instantânea  $P_{med}$ , apresentado na Eq. 4, para o período que o sistema se encontra em regime permanente, portanto,  $t_1$  é o tempo em que se inicia a estabilização e  $t_2$  é o tempo final do teste.

$$Q_{ev} = P_{med} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot i(t) dt \quad (4)$$

Como parte da adaptação do sistema, foram acrescentados alguns componentes eletrônicos necessários para a automatização do processo. A temperatura da água do banho é adquirida com um sensor DS18B20 ligado em um Arduino Uno que, conforme o código programado, processa e envia ao Módulo Dimmer a regulagem de tensão que deve ser transmitida à resistência elétrica imersa na água. Para o cálculo da potência média instantânea, descrito anteriormente, foi necessária a instalação dos sensores de tensão ZMPT101B e de corrente ACS712-5A, cujas leituras dos valores também são

apresentadas pelo Arduino. O esquema elétrico dessas ligações está ilustrado na figura 3 a seguir.

**Figura 3** – Esquema elétrico ligações sensores



Os dados de temperatura, tensão, corrente, potência elétrica e tempo de teste ficam descritos a cada aquisição e, ao final do teste, foram exportados para um arquivo .txt e tratados no MATLAB para plotar os gráficos necessários que demonstram o comportamento da temperatura ao longo do tempo e calcular a potência frigorífica média do sistema durante o regime permanente. Além das análises dos valores retornados pelo programa do Arduino, durante o funcionamento do controle, foram coletadas as demais informações do ciclo necessárias para a obtenção dos parâmetros frigoríficos através do EES (Engineering Equation Solver).

### **Cálculo das constantes de controle**

O controle PID consiste na obtenção de três constantes, sendo:  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . A variável que se deseja controlar nesse sistema é a temperatura do banho ( $T_b$ ), dessa forma, a diferença do valor desejado e do valor que o sensor mede em um determinado momento é denominado erro. Ou seja,  $K_p$ , que é a constante proporcional ao erro, deve ter o seu valor multiplicado por essa diferença. Já a constante  $K_i$  deve ser multiplicada pelo somatório dos erros obtidos até aquele determinado momento. Por último, a constante  $K_d$ , que deve ser multiplicada pela diferença do erro atual para o erro anterior. Todas essas operações somadas resultam no valor da variável de saída  $S$ , que por sua vez é um valor de acionamento do dimmer e, portanto, proporcional à tensão enviada à resistência e altera a quantidade de calor fornecida à água até o momento que a temperatura se

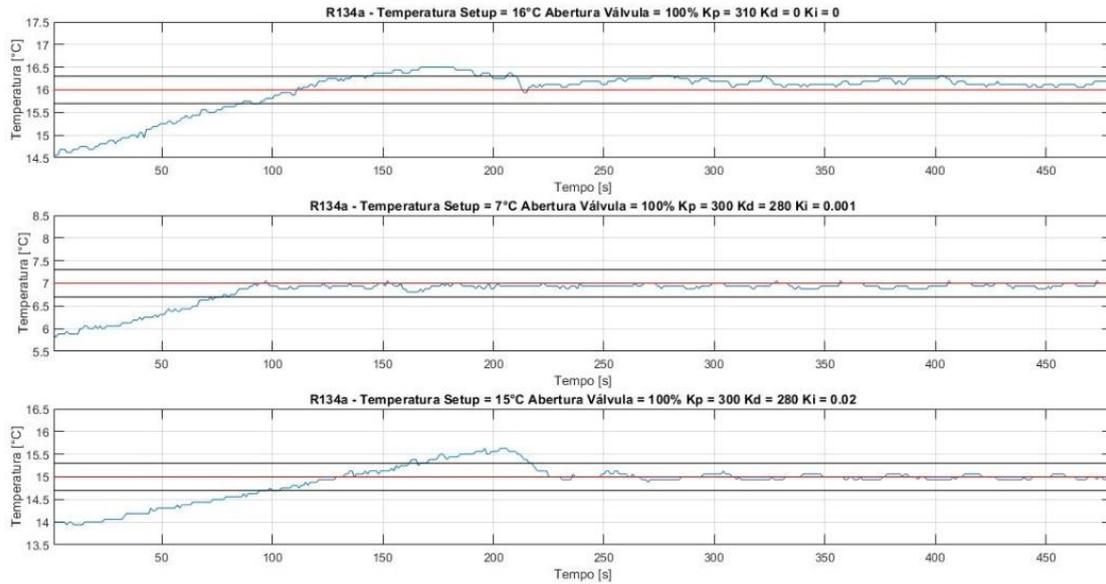
mantenha tão próxima quanto se queira do estipulado quando é alcançado o regime permanente.

A equação 5 abaixo demonstra o cálculo da variável de saída (S), para a qual devem ser adotados valores na faixa de 10 à 90, os mesmos correspondem a uma diferença de potencial que é enviada pelo Dimmer à resistência elétrica, equivalente a uma faixa entre 34V e 217V. Foi adotado o erro<sub>atual</sub> como a diferença entre a temperatura de setup desejada e a temperatura atual, já o erro<sub>anterior</sub> é o mesmo cálculo do erro<sub>atual</sub> para a aquisição anterior e  $\sum$  erros são todos os erros obtidos até aquele momento somados. As constantes do controle são informadas ao programa assim como a temperatura de setup para o banho.

$$S = K_p \cdot (\text{erro}_{\text{atual}}) + K_d \cdot (\text{erro}_{\text{anterior}} - \text{erro}_{\text{atual}}) + K_i \cdot \sum \text{erros} \quad (5)$$

A obtenção das constantes que devem ser utilizadas em todos os testes foi feita de modo empírico, contando com a análise das curvas de temperatura plotadas no MATLAB e observando o efeito de cada uma no sistema. O objetivo da primeira etapa foi definir as constantes para o controle com uma abertura da válvula de expansão fixa até a obtenção do ajuste fino para a manutenção da temperatura com, no máximo, 0,30°C de variação durante o regime permanente. A figura 4 mostra a comparação do comportamento da temperatura do banho para a válvula aberta em 100% e três combinações diferentes dos valores das constantes, sendo:  $K_p=310$ ,  $K_d=K_i=0$ ;  $K_p=300$ ,  $K_d=280$ ,  $K_i = 0,001$ ;  $K_p=300$ ,  $K_d=280$ ,  $K_i=0,02$ . A temperatura de setup para a água do reservatório também foi diferente, alterando entre 16°C, 7°C e 15°C, o que não interferiu nos testes realizados que apresentaram a última condição como sendo a mais satisfatória.

**Figura 4** – Comportamento da temperatura do banho para diferentes constantes do controle

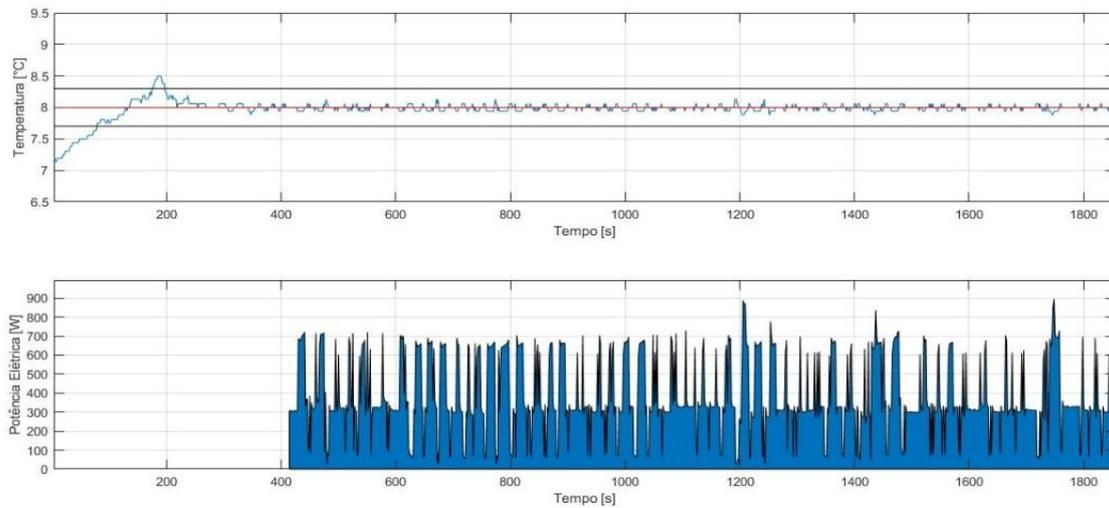


### Estruturação dos testes

Após a definição das constantes, alguns ajustes foram necessários no programa para um melhor assentamento da potência elétrica, visto que para cada ponto há o cálculo de um novo valor para regular a tensão aplicada, o que resulta em uma oscilação muito grande desses números. Com o objetivo de diminuir essas alterações, foi adicionado às linhas de código um filtro para o erro da temperatura. Como o sensor DS18B20 possui uma resolução de  $0,0625^{\circ}\text{C}$  ao ser utilizado na configuração com 12bits (Maxim Integrated, 2016), só foi considerado no cálculo do erro diferenças maiores que esse incremento, sendo assim, uma diferença de  $0,0625^{\circ}\text{C}$  ou menos da temperatura desejada não será considerada, fazendo com que, próximo da temperatura de setup indicada no programa, as pequenas variações não sejam levadas em consideração no cálculo de regulação da tensão.

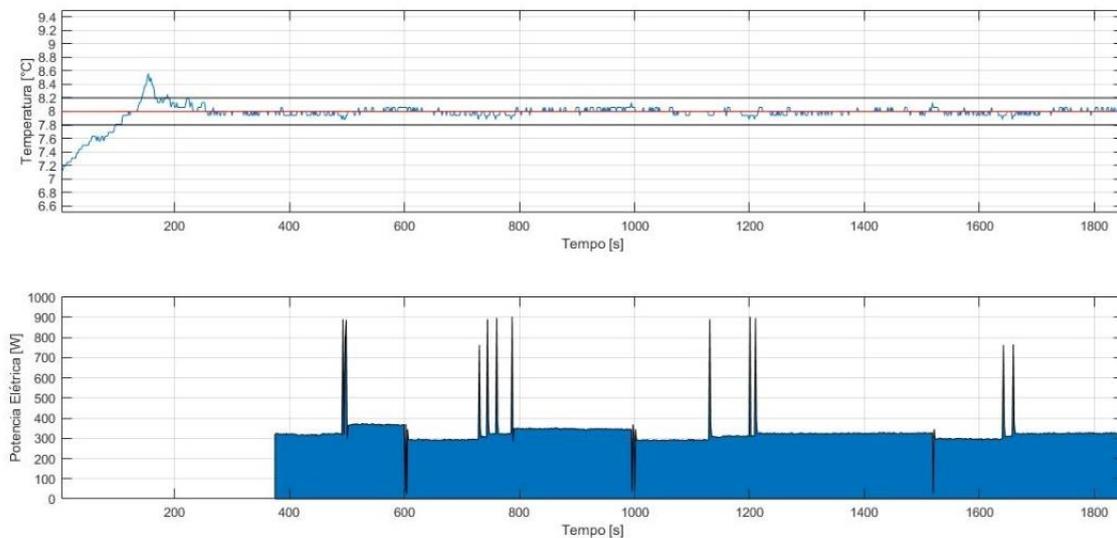
**Figura 5** – Comportamento da potência elétrica na estabilização sem a implementação do filtro na diferença de temperatura

R134a - Temperatura Setup = 8°C Abertura Válvula = 100% (SEM FILTRO)



**Figura 6** – Comportamento da potência elétrica na estabilização após implementação do filtro na diferença de temperatura

Temperatura Setup = 8°C Abertura Válvula = 100% (COM FILTRO)



As figuras 5 e 6 comparam a reação da potência elétrica em testes nas mesmas condições de temperatura de setup, 8°C, e abertura da válvula, 100%, no entanto, para o primeiro caso, foi considerada a variação mínima da temperatura no período da estabilização nos cálculos, enquanto a outra figura mostra uma melhor estabilização do valor da potência ao desconsiderar a mínima variação de 0,0625°C.

Com a consolidação do programa contendo as constantes do controle e os ajustes para uma melhor estabilização, foi estipulado o planejamento dos testes a serem realizados para validação do controle de temperatura do sistema. Sendo assim, foi avaliado o comportamento da temperatura na estabilização do sistema quando realizados os testes para diferentes condições de abertura da válvula e para outros fluidos refrigerantes, buscando um tempo mínimo de 20 minutos para a estabilização da temperatura com variação de menos de  $0,30^{\circ}\text{C}$  com uma padronização nos tempos de subida e para o assentamento.

Foram realizados testes com diferentes temperaturas de banho,  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $9^{\circ}\text{C}$  e  $12^{\circ}\text{C}$ . Para cada temperatura foram avaliadas 3 aberturas da válvula, 20%, 60% e 100%, configurando, ao todo 9 condições de teste que foram replicadas para três fluidos refrigerantes, uma vez que um dos objetivos da bancada experimental é o estudo de fluidos alternativos ao R134a, os testes também foram realizados no sistema trabalhando com os fluidos R290 e com o R513a.

Por fim, uma vez satisfeitas as condições para o regime permanente, a obtenção dos dados da bancada experimental no momento da estabilização possibilitou o cálculo da potência frigorífica, do consumo do compressor e do coeficiente de desempenho para cada situação testada. Portanto, comparando entre as mesmas faixas de aplicação, foi possível analisar o fluido refrigerante que melhor substituiu o R134a.

## **RESULTADOS**

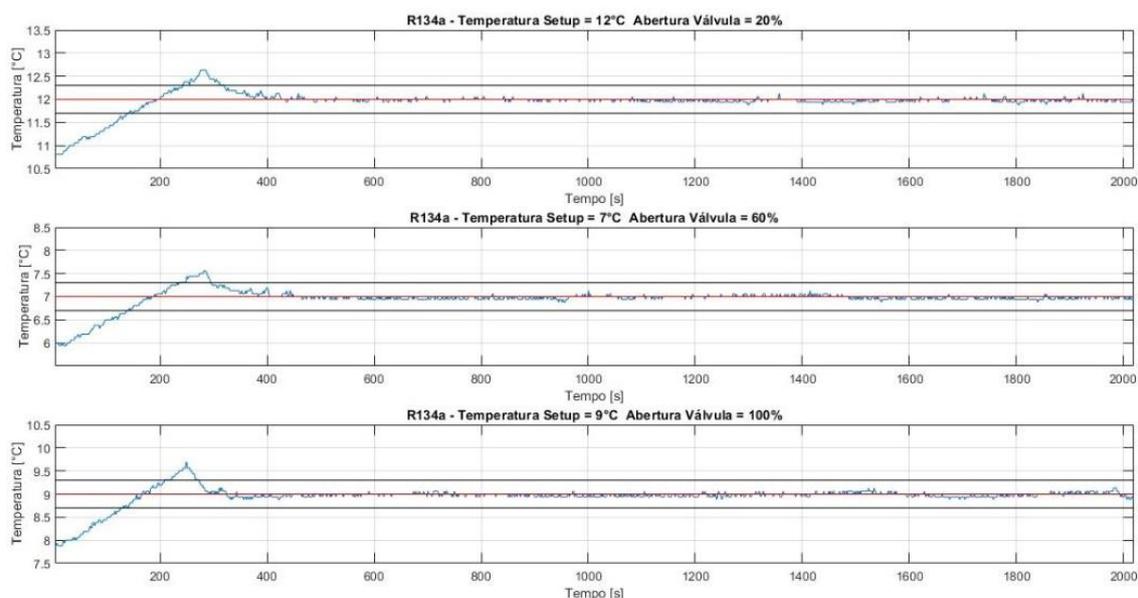
Inicialmente foram realizados testes com o fluido R134a, seguido pelo R290 e R513a, sendo aplicadas as condições especificadas de temperatura de setup do banho e porcentagem de abertura da válvula. Sabendo que as constantes de controle definidas foram  $K_p=300$   $K_d=280$  e  $K_i=0.02$  e que são fixas em todas as situações testadas, a seguir serão analisados os resultados alcançados para as diferentes atuações do controle ao longo do trabalho.

### **Aplicação do controle com diferentes porcentagens de abertura da válvula**

A válvula eletrônica instalada na bancada experimental em questão permite configurar uma porcentagem de abertura, controlando assim o fluxo de passagem no

fluido refrigerante e a temperatura de entrada do evaporador, o que, conseqüentemente, influencia na capacidade frigorífica do ciclo. O controle desenvolvido deve ser eficaz em todas as faixas de abertura da válvula para que possam ser testadas diferentes faixas de aplicação ao substituir os fluidos de trabalho. A figura 7 a seguir mostra a temperatura controlada ao longo do tempo para os testes realizados com o fluido R134a com a válvula eletrônica em 20%, 60% e 100%.

**Figura 7** – Comportamento da temperatura do banho controlada para diferentes aberturas



Analisando os testes apresentados acima, além de, as temperaturas apresentarem um comportamento semelhante nas diferentes condições do experimento, foi possível confirmar essa padronização através dos parâmetros analisados na tabela 3 a seguir.

**Tabela 3** – Resultados obtidos nos testes do controle de temperatura para diferentes aberturas

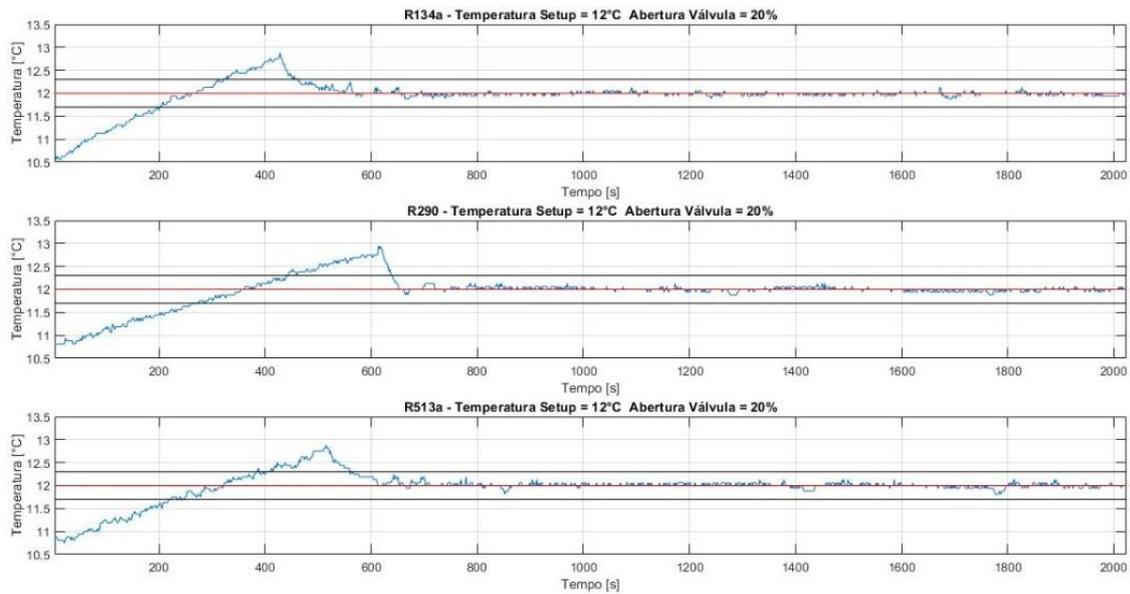
Temperatura - Abertura	Tempo de subida [min]	Overshoot [%]	Tempo até estabilização [min]	Máxima variação de temperatura na estabilização [°C]
12°C - 20%	2,4	5,2	7,5	0,12
7°C - 60%	2,1	8,0	7,5	0,12
9°C - 100%	2,3	7,7	6,3	0,12

Os valores apresentados na tabela 3 mostram que, apesar de algumas diferenças na porcentagem de overshoot, todos foram abaixo de 10% como é indicado por Thomasson e Eriksson (2009). Além disso, o maior valor de overshoot não interferiu no tempo necessário para o início da estabilização, o qual foi considerado pequeno comparado com o controle manual através do varivolt. Sendo assim, sabendo que são necessários, no mínimo, 20 minutos de sistema estável para realizar um teste em regime permanente, um tempo total de teste de, aproximadamente 30 minutos seria suficiente para a obtenção dos parâmetros frigoríficos. Ou seja, para o R134a em diferentes porcentagens de abertura da válvula eletrônica, o controle foi eficaz na redução do tempo de teste e na manutenção da temperatura do banho com uma diferença menor que  $0,3^{\circ}\text{C}$ .

### **Aplicação do controle no sistema operando com diferentes fluidos refrigerantes**

Com os resultados satisfatórios para os testes utilizando fluido R134a, foram realizados experimentos semelhantes substituindo o refrigerante, primeiramente pelo R290 e após isso pelo R513a. A escolha desses dois fluidos é devido às características semelhantes ao R134a, porém, com um valor menor que 1430 para o índice GWP. O R290 é apresenta um valor mínimo para o índice, igual a 3, no entanto esse fluido é inflamável, podendo entrar em combustão na presença de faíscas, o que requer uma maior atenção ao ser utilizado. Enquanto isso, o R513a é uma mistura do HFC R134a com o HFO R1234yf, possuindo um GWP igual a 600 e sem índices de flamabilidade, indicando uma boa alternativa para a substituição. A comparação do desempenho da bancada trabalhando com esses diferentes refrigerantes demanda, inicialmente, um bom controle dos parâmetros frigoríficos nas faixas de aplicação testadas anteriormente, a figura 8 ilustra as curvas obtidas através do controle de temperatura desenvolvido com a bancada experimental trabalhando com as mesmas condições de temperatura de banho e abertura da válvula, porém com a substituição do fluido refrigerante.

**Figura 8** - Comportamento da temperatura do banho controlada para diferentes fluidos refrigerantes



O comportamento da temperatura do banho com o controle PID para os três refrigerantes também se mostrou satisfatório, analisando a figura 8 é possível observar que para todos os casos houve a manutenção da temperatura do banho entre os limites de variação de  $\pm 0,30^{\circ}\text{C}$ . A tabela 4 indica os resultados dos parâmetros necessários para a análise do controle nos testes para temperatura do banho  $12^{\circ}\text{C}$  e abertura da válvula 60% com os diferentes refrigerantes.

**Tabela 4** - Resultados obtidos nos testes do controle de temperatura para diferentes refrigerantes

Refrigerante	Tempo de subida [min]	Overshoot [%]	Tempo até estabilização [min]	Máxima variação de temperatura na estabilização [°C]
<b>R134a</b>	3,1	7,3	10,2	0,12
<b>R290</b>	4,5	7,8	12,4	0,12
<b>R513a</b>	3,8	7,3	12,2	0,19

Analisando os dados obtidos para os diferentes fluidos, observa-se que o controle de temperatura desenvolvido também apresentou resultados satisfatórios, tanto para o R290 quanto para o R513a. Ainda que o tempo de subida e o tempo para o início da estabilização da temperatura desejada tenham aumentado em até 2 minutos com a troca do refrigerante, nesses casos, pouco mais de 32 minutos seriam suficientes para a finalização do experimento, diminuindo, significativamente, o tempo total de teste necessário para quando usado o varivolt.

### **Análise geral**

Os exemplos das aplicações citadas demonstram a ampla versatilidade do controle PID desenvolvido para a implementação na bancada experimental. Uma vez adquirido o equilíbrio da temperatura, foi possível observar que os demais parâmetros do sistema, como as temperaturas e pressões nos principais pontos do ciclo, também estabilizavam, possibilitando adquirir os dados para a obtenção da temperatura de evaporação, potência frigorífica, potência consumida pelo compressor e do coeficiente de desempenho.

A fim de analisar a constância do controle de temperatura, foram realizadas 4 repetições de cada teste para os três fluidos refrigerantes em análise. A tabela 5 abaixo mostra a média e o desvio padrão dos dados obtidos para cada condição citada em relação à implementação do controle PID de temperatura na bancada experimental trabalhando com os fluidos R134a, R290 e R513a.

**Tabela 5** – Médias dos resultados calculados para as replicações dos testes

Fluido	Abertura Válvula [%]	20			60			100		
	Temperatura do banho [°C]	7	9	12	7	9	2	7	9	12
R134a	Média do tempo total do sistema em regime permanente [min]	28,3	26,6	26,4	25,4	26,3	3,8	28,7	27,8	26,1
	Desvio padrão do tempo total do sistema em regime permanente [min]	1,1	0,4	1,5	2,3	0,8	0,1	1,4	0,1	0,7
	Média do tempo total de teste [min]	34,8	33,7	34,2	32,9	34,8	4,1	34,2	33,7	33,7
	Desvio padrão do tempo total de teste [min]	0,6	0,2	0,7	2,4	0,7	0,6	1,0	0,3	0,1
	Máxima variação de temperatura no regime permanente [°C]	0,15	0,13	0,13	0,16	0,16	0,21	0,16	0,13	0,15
R290	Média do tempo total do sistema em regime permanente [min]	24,1	23,0	21,8	25,6	24,6	21,8	26,5	26,6	25,6
	Desvio padrão do tempo total do sistema em regime permanente [min]	20,4	20,6	20,1	20,8	10,0	10,7	10,7	10,7	20,3
	Média do tempo total de teste [min]	35,6	35,4	36,4	35	36,4	35,2	34,4	34,9	34,5
	Desvio padrão do tempo total de teste [min]	1,9	0,1	3,2	1,0	2,2	1,1	0,6	1,4	0,7
	Máxima variação de temperatura no regime permanente [°C]	0,21	0,19	0,19	0,19	0,16	0,18	0,21	0,24	0,21
R513a	Média do tempo total do sistema em regime permanente [min]	25,6	27,0	25,5	27,1	26,1	26,4	28,3	8,9	26,4
	Desvio padrão do tempo total do sistema em regime permanente [min]	1,9	3,2	1,1	1,0	1,4	5,5	1,7	1,8	0,3
	Média do tempo total de teste [min]	35,4	36,6	35,1	35,2	35,5	38,3	34,3	35,2	33,8
	Desvio padrão do tempo total de teste [min]	1,0	2,1	0,3	1,2	1,0	5,5	0,5	1,6	0,2
	Máxima variação de temperatura no regime permanente [°C]	0,27	0,22	0,19	0,25	0,19	0,22	0,27	0,24	0,21

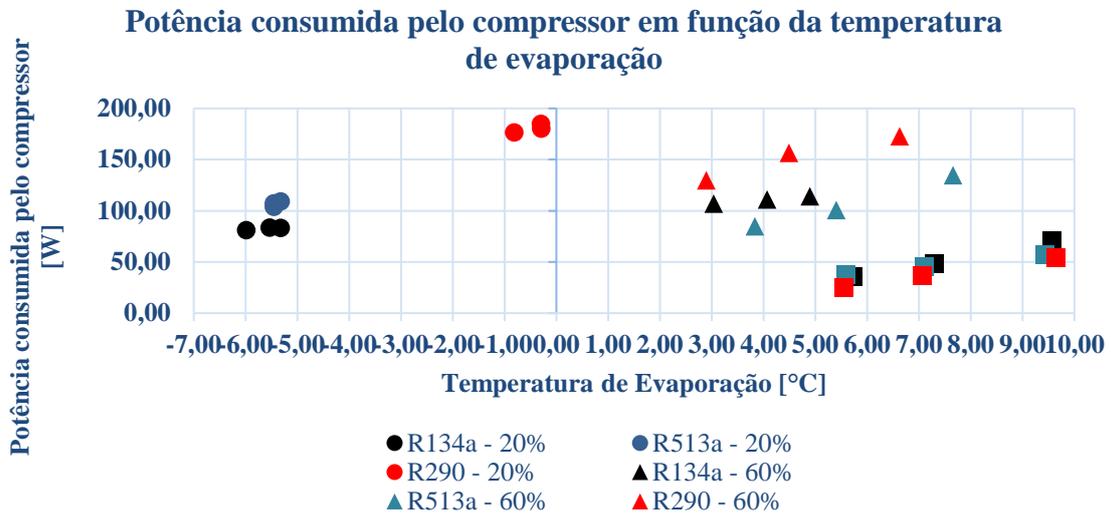
Os resultados da tabela 5 mostram que houve a preocupação em manter os tempos totais de teste próximos, de forma que a diferença entre o menor e o maior tempo fosse, menos de 6 minutos. Assim, pode-se associar o tempo total do sistema em regime permanente ao tempo necessário para atingir o assentamento da temperatura. Isso permite uma comparação de como o controle PID desenvolvido atuou ao longo dos testes na obtenção da estabilidade. A respeito disso, foi possível perceber que o tempo total que o sistema ficou estável para todas as condições acima foi, em média, 26 minutos, o que atende ao especificado para o regime permanente. Fazendo uma análise profunda através dos testes individuais, ao longo das repetições houve somente um teste que não correspondeu ao tempo mínimo de estabilização esperado, faltando apenas 40 segundos para completar os 20 minutos, sendo esse um dos testes para 12°C e 20% com o R290. Dessa forma, pode-se dizer que mais de 99% dos testes atingiram ao regime permanente com menos de 40 minutos de teste requeridos. Sabendo que com o controle da temperatura de forma manual através do variavolt eram necessárias, em média, 2 horas para finalizar um teste, a implementação desse PID correspondeu à redução de, aproximadamente, 67% no tempo total de teste.

Já com relação às variações de temperatura, em 3 testes realizados com o R513a para 7°C foi registrada uma diferença de 0,31°C, que é acima do desejado. Junto a isso, pode-se perceber pelas médias que, para os fluidos R290 e R513a, as variações na temperatura foram maiores no regime permanente, o que pode ser explicado pelo fato de ter sido utilizado um compressor desenvolvido para trabalhar com o R134a, isso fez com que o próprio ciclo se tornasse mais instável, já que há diferenças nas densidades dos fluidos. O controle desenvolvido conseguiu manter as temperaturas nas faixas esperadas em aproximadamente 98% dos casos testados, mostrando a eficácia e robustez do PID para a aplicação desejada.

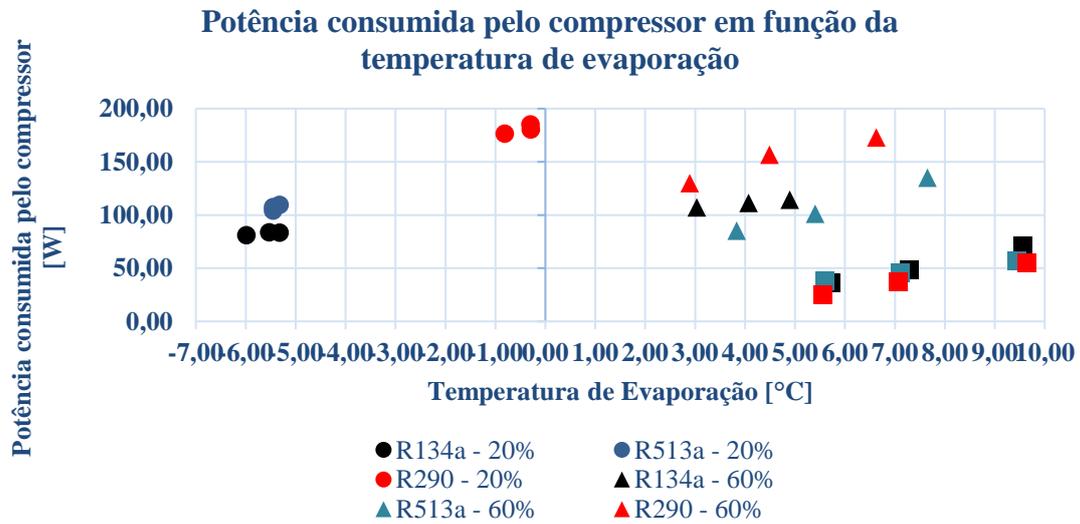
Além do comportamento da temperatura ao longo do teste, o programa desenvolvido para o controle também fornece o valor da corrente e tensão elétrica aplicada na resistência para cada aquisição. Com a definição do regime permanente, é calculada, para esse período, a potência média instantânea da resistência elétrica, correspondendo à potência frigorífica do teste, que com a obtenção da potência consumida pelo compressor é possível calcular o coeficiente de desempenho da bancada experimental nas condições avaliadas. As figuras 9, 10 e 11 a seguir, representam

graficamente os resultados obtidos no sistema de refrigeração utilizando o controle de temperatura PID.

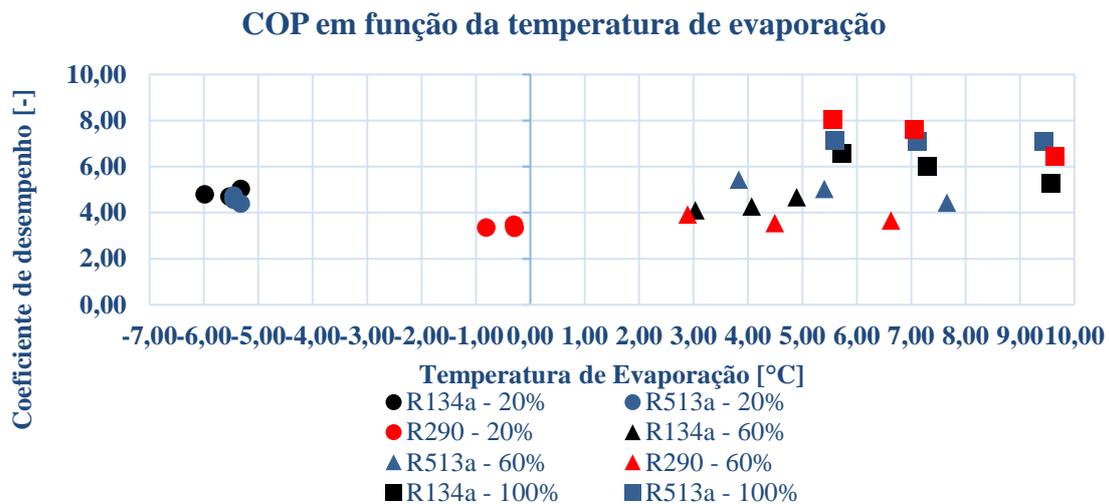
**Figura 9** – Potência frigorífica em função da temperatura de evaporação



**Figura 10** - Potência consumida pelo compressor em função da temperatura de evaporação



**Figura 11** - Coeficiente de desempenho em função da temperatura de evaporação



A partir dos resultados encontrados pode-se perceber que os parâmetros calculados apresentaram a mesma tendência no comportamento da bancada ao aplicar diferentes fluidos refrigerantes, sendo evidente a influência da abertura da válvula na temperatura de evaporação, uma vez que as mudanças da temperatura do banho de 7°C, 9°C e 12°C para a válvula em 20% ocasionaram em uma variação de menos de 1°C na temperatura de evaporação, e foi correspondente à aproximadamente 16% da maior variação para a abertura da válvula em 100%. Com relação à alteração do fluido refrigerante, como o compressor foi projetado para o R134a, é esperado que, ao trabalhar com outros fluidos, tenha uma diminuição da faixa de aplicação, isso foi perceptível nos testes, uma vez que, para o R290 a faixa de temperatura de evaporação alcançada foi 32,7% menor do que para o fluido padrão, enquanto o R513a apresentou esse intervalo 4,23% menor comparado com o R134a. Isso pode ser visto nos testes realizados com a válvula em 20% em que os testes com o R290 não conseguem atingir temperaturas de evaporação abaixo de -1°C, indicando que nessas aplicações não poderá ser um substituto.

Por outro lado, para as aberturas de 60% e 100% o R290 apresentou resultados satisfatórios com relação à faixa de aplicação e até para o desempenho do sistema, sendo que para a temperatura de banho de 9°C e abertura de 100% apresentou um COP 26,38% maior que o calculado para o R134a e 7,67% maior que para o R513a. No entanto, devido ao maior consumo do compressor, o desempenho calculado para a válvula em 60% foi, em média, 14% menor com o R290.

Com relação ao fluido R513a, percebeu-se que ao longo de toda a faixa de aplicação foram exibidos resultados próximos aos obtidos pelo fluido refrigerante referência do sistema, sendo que as menores temperaturas de evaporação apresentaram potências frigoríficas 22% maiores do que para o R134a, e com maiores temperaturas de evaporação as potências são 10,5% maiores. Mesmo com a variação nas potências de compressão, os resultados obtidos para a performance do fluido R513a chegaram a ser 34,09% maiores que o obtido para o fluido padrão de trabalho e o menor valor para o COP foi 8,48% menor, o que mostra que o R513a é um potencial substituto ao R134a em pequenos sistemas de refrigeração.

Uma análise geral para os três fluidos mostra que o desempenho da bancada experimental é maior com o aumento da abertura da válvula. Embora as potências frigoríficas com a válvula em 100% tenham apresentado valores de até 400W a menos com relação às demais aberturas da válvula, a potência consumida foi relativamente menor, o que ocasionou em maiores coeficientes de desempenho. Sendo assim, o controle do fluxo do fluido refrigerante no dispositivo de expansão teve maior influência no coeficiente de performance do que a mudança da temperatura do banho, sendo a maior variação do COP entre as aberturas de 20% a 100% igual a 4,69, enquanto entre as temperaturas de 7°C a 12°C foi de 1,57.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a implementação de um controle de temperatura PID com o objetivo de diminuir o tempo demandado nos testes realizados em uma bancada experimental de refrigeração, e de automatizar o processo de obtenção do regime permanente requerido para a análise de possíveis fluidos refrigerantes substitutos ao R134a.

No controle utilizado, a temperatura é o dado de entrada que deve ser ajustado para um valor pré-estabelecido, enquanto a regulagem da tensão da resistência elétrica é calculada a partir das constantes do controle, sendo que  $K_p=300$ ,  $K_d=280$  e  $K_i=0.02$  implicou em resultados satisfatórios, conseguindo manter a temperatura de setup estável controlando a tensão na resistência elétrica para diferentes porcentagens de abertura da válvula eletrônica e para os diferentes fluidos refrigerantes. Assim, com apenas 33% do

tempo necessário nos testes com o varivolt foi possível obter os resultados dos testes com controlador PID.

Com relação à substituição do R134a, o fluido R513a se mostrou o melhor substituto nas condições testadas uma vez que resultou em um coeficiente de performance médio 10% maior que o R134a, enquanto o R290 mostrou um desempenho de, aproximadamente 7% menor. Além disso, o R513a conseguiu atender a quase 96% da faixa de aplicação que o R134a atende para a válvula de 20% a 100%. Isso se deve ao fato de o R513a ter em sua composição 44% em peso de R134a, fluido qual o compressor foi projetado.

## REFERÊNCIAS

ARORA, C. P. Refrigeration and Air Conditioning. Second Edition. ed: **Tata McGraw-Hill Education**, 2000.

BUZELIN, L. O. S. Concepção e desenvolvimento teórico-experimental de um sistema de refrigeração inteligente. **Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná**, 2003.

CALM, J. M. The next generation of refrigerants: Historical review, considerations, and outlook. **International Journal of Refrigeration**, p. 1-11, 10 fev. 2008.

HAMID, N. H. A., KAMAL, M. M., YAHAYA, F. H., Application of PID controller in controlling refrigerator temperature, **5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications**, pp. 378-384, 2009.

JUNIOR, E.S.S., CARVALHO, J., JUNIOR, N.F.S., SILVA, A.M.H., Desenvolvimento de um controlador PID aplicado no controle de temperatura de uma impressora 3D. **IV Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica**, IFSP-campus Araraquara, ISSN:2526-6772, 2019.

LOKIETEK, T., JASZCZAK, S., NIKOŃCZUK, P. Optimization of control system for modified configuration of a refrigeration unit. **Procedia Computer Science**, p. 2522-2532, 2019.

MATOS, R. S., História da Refrigeração Universal. In: MATOS, Prof. Rudmar Serafim. **Apostila de Refrigeração e Climatização**, cap. 1. 2017.

MAXIM INTEGRATED. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. **Datasheet** disponível

em:<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em: 18 fev.2021.

MUNIZ, S. R. Característica principais dos controladores P, I, & D. **Resumo**, 2017.

OGATA, K., Engenharia de controle moderno. 5ª edição. São Paulo – **Pearson Prentice Hall**, 2010.

RANJAN, S., SHARMA, A., CHAUDARY, P., An effective temperature controller system using PID mechanism, **2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)**, pp. 182-185, 2014.

SAMPAIO, K. A. Avaliação da demanda, do consumo elétrico e do controle de temperatura para condicionamento de ambientes, usando sistemas de refrigeração com termoacumulação. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade estadual de Campinas**, 2006.

SANTIS, I.M. ANTUNES, A.H.P., SPAGNOLLO, M.P., ALVES, L.R., OLIVEIRA, G.A. Experimental evaluation of refrigerante R290 in a small refrigeration system originally designed for R134a, **25th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2019)**, 2019.

SILVA, F. V. Comparação do desempenho de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido, controlado a diferentes modos de controle. **Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas**, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP, 2003

THOMASSON, A., ERIKSSON, L. Model-Based Throttle Control using Static Compensators and IMC based PID-Design. **IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling**. Paris – France, 2009

*Recebido em: 20/05/2022*

*Aprovado em: 25/06/2022*

*Publicado em: 29/06/2022*