



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE

GUSTAVO ROHRICHT MACHADO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS AUTOMOTIVOS DE
CONDICIONAMENTO DE AR

Orientador: Prof. Diogo Lôndero da Silva, Dr.Eng.

Joinville
2025

RESUMO

Este relatório apresenta uma análise experimental do comportamento transiente de um sistema de condicionamento de ar automotivo sob diferentes condições de operação. Foram medidos temperatura, pressão, umidade relativa e vazão mássica em pontos estratégicos do sistema durante cinco ensaios com perturbações provocadas pela variação da rotação do compressor e da vazão de ar do ventilador do evaporador. Observou-se que o aumento da vazão de ar gera resposta oscilatória, com sobressinal de 2 °C e 3 °C para as temperaturas de sucção e descarga, respectivamente, ao aumentar a vazão mássica de 0,037 kg/s para 0,071 kg/s, enquanto alterações na rotação do compressor resultam em resposta suave, sem sobressinal. As maiores histereses ocorreram na descarga do compressor, atingindo 16% na forma normalizada. Quanto ao desempenho, o COP aumentou de 26% com aumento da vazão de ar e diminuiu 33% com sua redução. Foi identificada histerese de aproximadamente 10% no COP. Ele também reduziu durante o aumento da rotação do compressor e cresceu durante sua redução, diminuindo 30% no aumento da rotação de 500 RPM para 890 RPM e aumentando 13% na diminuição da rotação do compressor de 1074 RPM para 890 RPM.

Palavras-chave: Coeficiente de desempenho (COP); Comportamento transiente; Condicionamento de ar automotivo; Histerese.

ABSTRACT

This report presents an experimental analysis of the transient behavior of an automotive air conditioning system under different operating conditions. Temperature, pressure, relative humidity, and mass flow rate were measured at strategic points of the system during five tests with disturbances caused by variations in compressor speed and evaporator fan airflow. It was observed that increasing airflow generates an oscillatory response, with overshoots of 2 °C and 3 °C for suction and discharge temperatures, respectively, when the mass flow rate increases from 0.037 kg/s to 0.071 kg/s, while changes in compressor speed result in a smooth response without overshoot. The largest hysteresis occurred at the compressor discharge, reaching 16% in normalized form. Regarding performance, the COP increased by 26% with higher airflow and decreased by 33% with lower airflow. A hysteresis of approximately 10% was identified in the COP. It also decreased during compressor speed increase and rose during its reduction, dropping by 30% when the speed increased from 500 RPM to 890 RPM, and rising by 13% when the compressor speed decreased from 1074 RPM to 890 RPM.

Keywords: Automotive air conditioning; Coefficient of performance (COP); Hysteresis; Transient behavior.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Refrigeração Veicular (REVE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo suporte na realização deste projeto, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (Fapesc) pelo apoio financeiro para aquisição dos equipamentos necessários para a construção do aparato. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Representação do Sistema MAC (Mobile Air Conditioning) no Veículo Packard 180 | 8 |
| 2 | Bancada Experimental | 11 |
| 3 | Representação dos Pontos de Instalação dos Transdutores | 12 |
| 4 | Inversor CFW-300 Utilizado para Alterar a Velocidade de Rotação do Compressor | 15 |
| 5 | Painel Utilizado para Alterar a Vazão de Ar do Ventilador do Evaporador . . . | 16 |
| 6 | Representação Visual do Algoritmo de Cálculo do Tempo de Acomodação . . | 18 |
| 7 | Representação Visual da Histerese Normalizada | 19 |
| 8 | Temperaturas de Descarga e Sucção do Transiente de P1 e P3 | 23 |
| 9 | Vazão de Fluido Refrigerante Transiente de P1 e P3 | 24 |
| 10 | Pressões de Descarga e Sucção P1 e P3 | 25 |
| 11 | Pressões de Descarga e Sucção P2 | 26 |
| 12 | Temperaturas de Descarga e Sucção P2 | 27 |
| 13 | Histereses Normalizadas das Principais Variáveis do Teste | 28 |
| 14 | Pressão de Sucção nas Perturbações P4 e P5 | 29 |
| 15 | Temperatura de Sucção nas Perturbações P4 e P5 | 30 |
| 16 | Temperatura de Descarga nas Perturbações P4 e P5 | 31 |
| 17 | Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor nas Perturbações P1 e P3 | 32 |
| 18 | COP nas Perturbações P1 e P3 | 33 |
| 19 | Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor na Perturbação P2 | 34 |
| 20 | Transiente da Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor na Perturbação P2 | 35 |
| 21 | COP na Perturbação P2 | 36 |
| 22 | Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor nas Perturbações P4 e P5 | 37 |
| 23 | Histerese no COP nas Perturbações P4 e P5 | 38 |
| 24 | Módulo da Diferença entre as Constantes de Tempo do Sistema nas Perturbações P4 e P5 | 39 |
| 25 | Histerese Normalizada e Módulo da Diferença entre as Constantes de Tempo do Sistema | 40 |

LISTA DE TABELAS

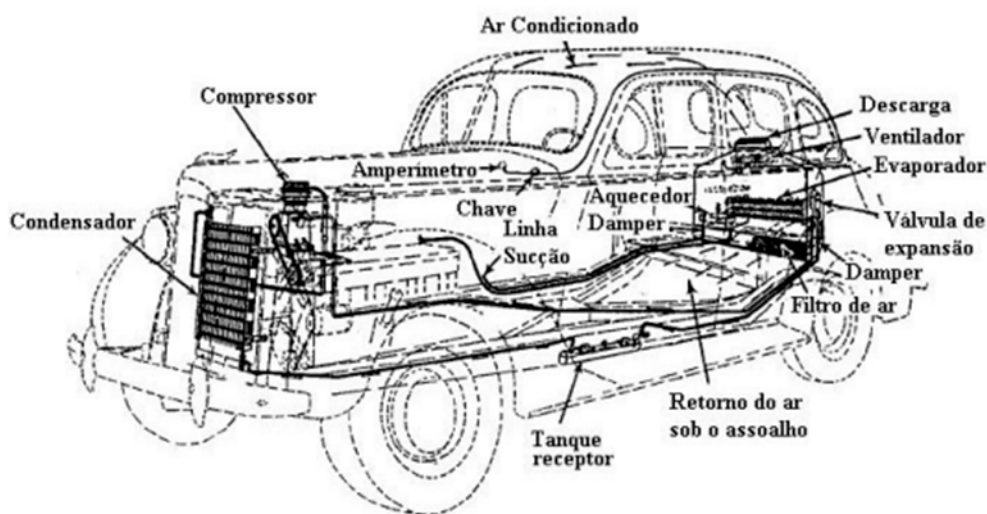
| | | |
|---|--|----|
| 1 | Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise do Transiente | 13 |
| 2 | Condições de Temperatura e Umidade das Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise do Transiente | 13 |
| 3 | Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise da Histerese | 14 |
| 4 | Condições de Temperatura e Umidade das Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise da Histerese | 14 |
| 5 | Velocidades de Rotação do Compressor Aferidas para as Perturbações P1-P5 | 21 |
| 6 | Perturbações Geradas para Análise do Sistema | 22 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 10 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 10 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 10 |
| 2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 11 |
| 2.1 | PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL | 13 |
| 2.2 | DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE ACOMODAÇÃO DO SISTEMA . . . | 16 |
| 2.3 | ANÁLISE E COMPARAÇÃO DAS HISTERESES | 18 |
| 2.4 | DETERMINAÇÃO DO COP DO SISTEMA | 20 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 21 |
| 3.1 | PERTURBAÇÃO PELA VARIAÇÃO DA VAZÃO DE AR DO VENTILADOR . | 22 |
| 3.2 | PERTURBAÇÃO PELA VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO DO COMPRESSOR . . | 26 |
| 3.3 | ANÁLISE DA HISTERESE | 28 |
| 3.4 | ANÁLISE DO COP | 31 |
| 3.4.1 | Efeito da Variação da Vazão de Ar do Ventilador no COP | 31 |
| 3.4.2 | Efeito da Variação de Rotação do Compressor no COP | 33 |
| 3.4.3 | Efeito da Histerese no COP | 36 |
| 3.5 | ESTUDO DA HISTERESE NORMALIZADA PARA CONTROLE NÃO ADAP- TATIVO | 38 |
| 4 | CONCLUSÃO | 42 |
| 4.1 | COMO O IC CONTRIBUIU PARA A MINHA FORMAÇÃO | 44 |
| | REFERÊNCIAS | 45 |

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência da popularização dos veículos de carroceria fechada, constatou-se a necessidade do desenvolvimento de sistemas voltados à garantia do conforto térmico de seus ocupantes. Assim, na década de 1930, iniciou-se nos Estados Unidos o desenvolvimento do sistema de condicionamento de ar em veículos, com o primeiro registro de comercialização do primeiro veículo com sistema de condicionamento de ar nativo de fábrica, o Packard 180 (One-Eighty) produzido pela fabricante Packard Motor Car (Bhatti, 1999), o qual é apresentado na Figura 1, assim como a disposição dos principais componentes necessários para o funcionamento do sistema de condicionamento de ar no veículo.



Fonte: Bhatti adaptado por Santos (2005).

Figura 1 – Representação do Sistema MAC (Mobile Air Conditioning) no Veículo Packard 180

Atualmente, o Brasil está bem ranqueado na produção de veículos com sistema de condicionamento de ar nativo de fábrica, sendo o maior montador de veículos com ar condicionado da América do Sul e o 10º maior da América Latina com cerca de dois milhões de unidades de passeio (Da Silva *et al.*, 2024). Analisando o ano de novembro de 2024, a frota de veículos somente no Brasil era de 123,5 milhões, aproximadamente 63 milhões são automóveis, o que equivale a cerca de 51,2% (Ministério dos Transportes, 2024).

Esse sistema de condicionamento de ar automotivo consome uma parte significativa da potência do motor durante a operação do veículo, com sua eficiência de refrigeração diretamente relacionada à capacidade de carga térmica. Em média, o ar-condicionado é utilizado entre 43% e 49% do tempo total de uso do veículo (Farrington; Rugh, 2000).

O sistema por compressão mecânica de vapor utilizado em sistemas veiculares, segundo Da Silva e Melo (2016), possui uma estrutura semelhante à dos sistemas de condicionamento de ar mecânico convencionais. Os principais componentes desses sistemas incluem trocadores de calor, um compressor e uma válvula ou dispositivo de expansão.

O princípio de funcionamento dos sistemas de condicionamento de ar e de refrigeração por compressão mecânica de vapor é compreendido pela operação dos quatro principais componentes: o compressor promove o escoamento do refrigerante ao longo do sistema, elevando a pressão e temperatura do fluido refrigerante, enquanto isso, o evaporador e condensador atuam como trocadores de calor, absorvendo e rejeitando o calor do ambiente a ser resfriado, e o dispositivo de expansão realiza a expansão isentrópica do fluido refrigerante, causando a redução da temperatura do mesmo (Junior, 2023).

Em geral, as propriedades dos sistemas veiculares não permanecem constantes durante toda a operação de um veículo, sendo precedidas por um regime transitório em que as propriedades do sistema variam devido a fatores externos. Em veículos com motores a combustão interna o compressor é acionado pelo próprio motor do veículo, de forma que a sua rotação depende da rotação do motor e normalmente não está correlacionada com a carga térmica do sistema de condicionamento de ar. Tal condição, devido aos sucessivos transientes na operação do compressor, resulta em desafios para o dimensionamento dos componentes e implementação de uma lógica de controle. Além disso, deve-se levar em conta o ciclo tradicional de controle da temperatura do veículo, no qual o sistema é acionado e desligado continuamente com o objetivo de atingir uma temperatura determinada (Juliani *et al.*, 2017).

Durante a operação nesse tipo de regime, os componentes podem apresentar não uniformidade das condições internas, a vazão mássica do refrigerante varia continuamente, resultando em mudanças na distribuição do refrigerante entre os componentes do sistema assim como a variação do superaquecimento e o ponto de operação do dispositivo de expansão, que se ajusta e regula continuamente para a operação (Rangel, 2007). Devido a esse motivo, faz-se necessária a realização de mais estudos sobre o comportamento do sistema durante o regime transiente com o intuito de aumentar a eficiência do sistema de condicionamento de ar.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Análise experimental do comportamento transiente de um sistema de condicionamento de ar automotivo e de seu ciclo de histerese para avaliar o seu efeito sobre o coeficiente de performance (COP), considerando diferentes condições de operação.

1.1.2 Objetivos Específicos

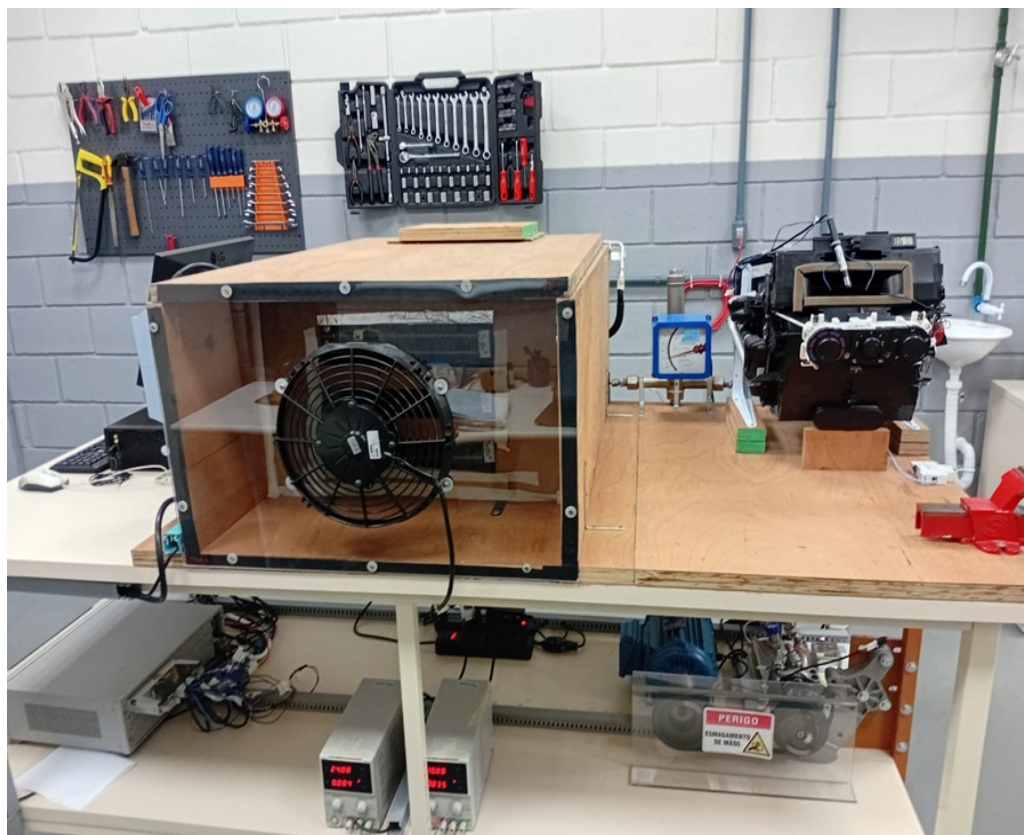
Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos propostos são:

- 1 Revisão bibliográfica e obtenção de dados do sistema de referência;
- 2 Identificar modos para controle da rotação do compressor;
- 3 Adaptação do aparato experimental;
- 4 Estimativa das incertezas experimentais;
- 5 Elaboração do plano experimental;
- 6 Realização dos experimentos e obtenção da base de dados experimental;
- 7 Quantificar as histereses associadas às diferentes perturbações.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aparato experimental consiste em um sistema de condicionamento de ar automotivo equipado com transdutores de pressão, temperatura e umidade relativa, vazão mássica e controle de temperatura com resistências elétricas, além de um sistema de aquisição de dados instalado na bancada de testes, destinado à execução de ensaios experimentais e à coleta de dados. Detalhes adicionais sobre a bancada experimental podem ser encontrados no relatório de De Oliveira (2023) e no artigo de Da Silva *et al.* (2024).

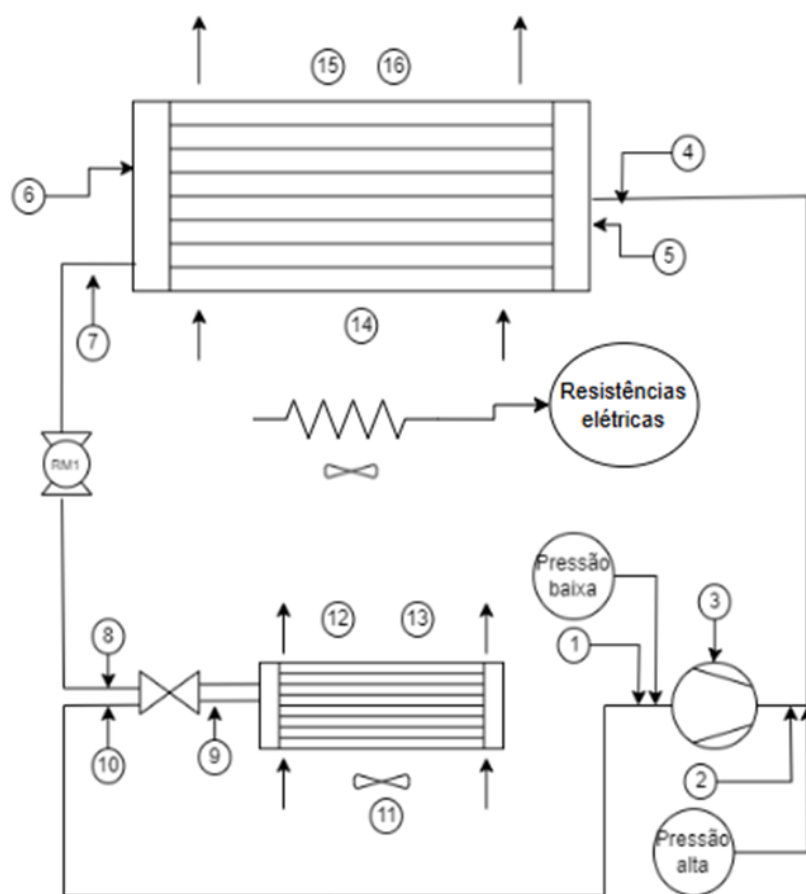
As atividades experimentais serão conduzidas no laboratório de refrigeração veicular, situado no campus Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (REVE, 2025). Por sua vez, uma imagem real da bancada que será utilizada para a obtenção dos dados experimentais é apresentada na Figura 2.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 2 – Bancada Experimental

Para a coleta de dados, foram instalados transdutores em pontos específicos no sistema de condicionamento de ar, com 17 transdutores de temperatura, 2 transdutores de pressão, 2 transdutores de umidade relativa e 3 resistências para o controle de temperatura. As posições dos pontos de medição das propriedades do sistema estão presentes na Figura 3.



Fonte: De Oliveira (2025)

Figura 3 – Representação dos Pontos de Instalação dos Transdutores

2.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O plano de teste foi desenvolvido com o objetivo de validar os dados obtidos pelo sistema de aquisição. Para a realização da fase experimental, foram elaborados dois roteiros para duas análises distintas: A primeira, cujas perturbações causadas podem ser encontradas na Tabela 1, tem o intuito único de analisar como diferentes perturbações causadas ao sistema afetam seu comportamento transiente. Os testes serão realizados alterando dois principais parâmetros: a rotação do compressor e a posição de velocidade do ventilador do evaporador.

Tabela 1 – Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise do Transiente

| Perturbação | Rotação do Compressor Esperada [RPM] | Posição Ventilador |
|--------------------|---|---------------------------|
| P1 | 500 | 1 → 4 |
| P2 | 500 → 890 | 4 |
| P3 | 890 | 4 → 1 |

Fonte: O Autor (2025)

Ainda na primeira análise, é de suma importância conhecer as condições de operação do sistema antes de iniciar os testes. A Tabela 2 apresenta essas condições antes de cada perturbação. Elas são essenciais para a análise do comportamento transiente do sistema para correta interpretação da carga térmica e desempenho do sistema de condicionamento de ar.

Tabela 2 – Condições de Temperatura e Umidade das Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise do Transiente

| Perturbação | Temperatura Entrada do Evaporador [°C] | Umidade Entrada do Evaporador [%] | Temperatura Entrada do Condensador [°C] |
|--------------------|---|--|--|
| P1 | 35 | 24 | 34 |
| P2 | 38 | 20 | 34 |
| P3 | 36 | 22 | 34 |

Fonte: O Autor (2025)

Na segunda análise, o intuito principal muda. Pretende-se gerar uma perturbação ao sistema, esperar que ele entre em estado permanente e, então, voltar ao seu estado inicial, observando assim se existe histerese no sistema de condicionamento de ar e, posteriormente, avaliando seu impacto. A Tabela 3 então mostra as perturbações causadas no sistema para a segunda parte deste trabalho. Apenas a rotação foi alterada, aumentando-a e depois voltando ao ponto original, mantendo a posição do ventilador fixa.

Tabela 3 – Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise da Histerese

| Perturbação | Rotação do Compressor Esperada [RPM] | Posição Ventilador |
|--------------------|---|---------------------------|
| P4 | 890 → 1074 | 4 |
| P5 | 1074 → 890 | 4 |

Fonte: O Autor (2025)

Também se faz necessário conhecer as condições de operação do sistema antes de iniciar os testes da segunda análise. A Tabela 4 apresenta então essas condições antes de cada perturbação. Essenciais da mesma forma que as condições de operação da primeira análise para correta comparação do comportamento do sistema. Observa-se que as condições de temperatura e umidade permanecem as mesmas para ambas as perturbações.

Tabela 4 – Condições de Temperatura e Umidade das Perturbações Geradas no Sistema de Condicionamento de Ar para Análise da Histerese

| Perturbação | Temperatura Entrada do Evaporador [°C] | Umidade Entrada do Evaporador [%] | Temperatura Entrada do Condensador [°C] |
|--------------------|---|--|--|
| P4 | 38 | 19 | 34 |
| P5 | 38 | 19 | 34 |

Fonte: O Autor (2025)

Para alterar a rotação do compressor, o laboratório REVE (2025) tem à sua disposição um inversor CFW-300 da WEG, conforme a Figura 4. O inversor controla a amplitude e a frequência do sinal (em Hertz) de tensão alternada que chega até o motor trifásico, que é acoplado ao compressor através de uma embreagem eletromagnética. Este sinal de tensão com frequência diferente da rede elétrica é, então, responsável por controlar a velocidade de rotação do motor e, por consequência, do compressor. A variação da frequência pode ser facilmente alterada nos parâmetros do inversor e, com a ajuda de

uma tabela experimental do laboratório, é possível saber a correspondência da rotação em Hertz do sinal gerado pela rotação do compressor em RPM.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 4 – Inversor CFW-300 Utilizado para Alterar a Velocidade de Rotação do Compressor

A posição do ventilador pode ser alterada em um painel analógico que é similar ao de muitos automóveis comerciais, como mostra a Figura 5. É evidente que, diferentemente da rotação do compressor, o controle da vazão de ar do ventilador é menos preciso. A posição 0 representa o ventilador completamente desligado, enquanto as posições 1-4 representam um crescente de velocidade. A vazão de ar do ventilador nestas posições foi aferida em testes anteriores e esses dados das posições 1 e 3 estão inclusos no artigo de Da Silva *et al.* (2023).



Fonte: O Autor (2025)

Figura 5 – Painel Utilizado para Alterar a Vazão de Ar do Ventilador do Evaporador

2.2 DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE ACOMODAÇÃO DO SISTEMA

A determinação dos tempos de acomodação do sistema é importante para estudar o comportamento do sistema de condicionamento de ar e, falar de forma mais assertiva sobre a diferença de convergência entre os testes de subida e descida de rotação do compressor, além de ser um parâmetro importante para possíveis modelos matemáticos que venham a ser desenvolvidos, por exemplo, para encontrar funções de transferência do sistema.

Determinar estes valores não é uma tarefa trivial. Todavia, primeiro é preciso definir o conceito de tempo de acomodação. O tempo de acomodação, conforme Ogata (2010) é o tempo necessário para que a curva de resposta do sistema alcance valores de, geralmente, 2% ou 5% do valor final. Para este trabalho, será utilizado o valor de 2% do valor final, ou seja, o tempo de acomodação será definido como o tempo necessário para que a curva de resposta do sistema atinja 98% do valor final.

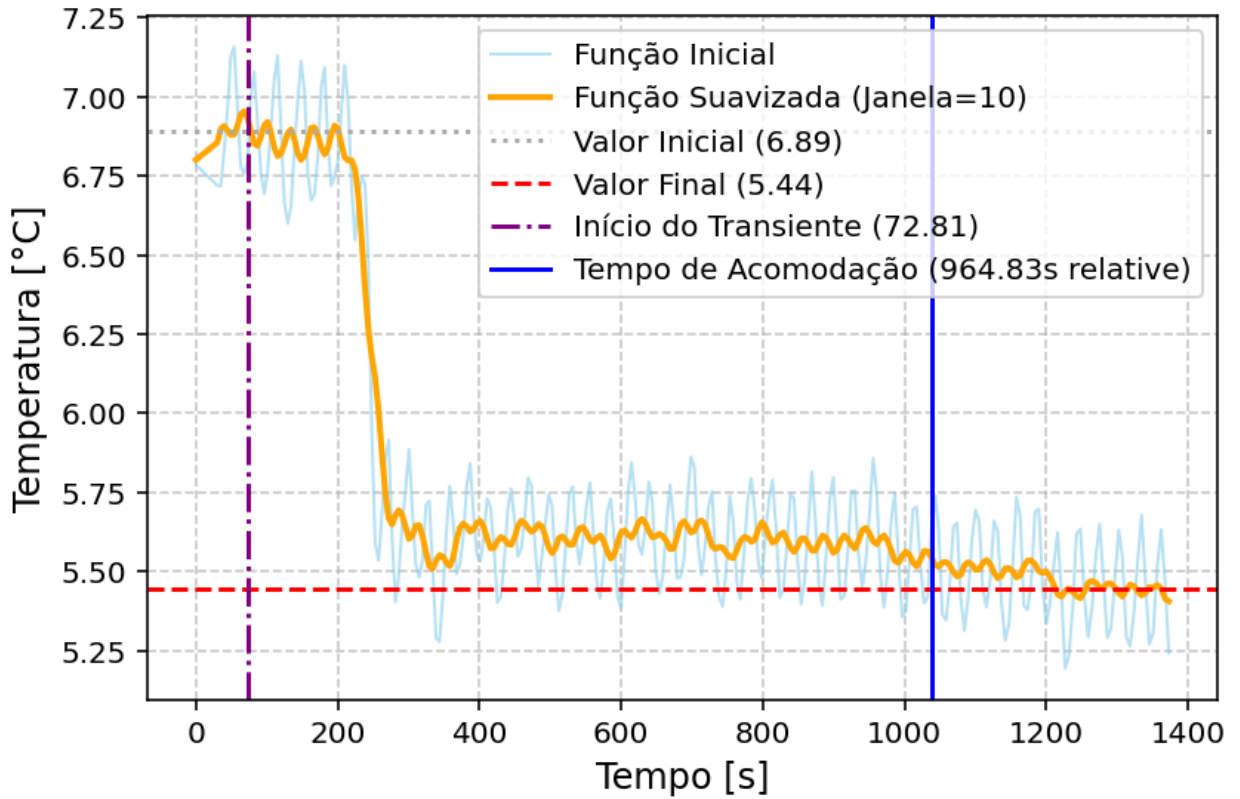
Entretanto, como está sendo estudado um sistema real, é necessário levar em consi-

deração principalmente o ruído dos dados experimentais. Caso este ruído não for levado em consideração, o valor do tempo de acomodação será calculado de forma errônea. Além disso, o transiente do sistema não inicia imediatamente na coleta de dados, os dados iniciais estão relacionados ao estado inicial permanente do sistema, portanto, ele não deve ser considerado no cálculo do tempo de acomodação.

Assim, um algoritmo foi desenvolvido para calcular o tempo de acomodação do sistema. O algoritmo é o seguinte:

1. É calculado a média dos 10 primeiros valores do teste, estes valores serão utilizados como o valor inicial do sistema.
2. É calculado a média dos últimos 10 valores do teste, estes valores serão utilizados como o valor final do sistema.
3. Para filtrar os dados experimentais e diminuir o ruído, é aplicado um filtro de média móvel com janela de 10 amostras dos dados experimentais, suavizando assim a curva.
4. Para detectar o início do transiente, é definido que o seu início no momento em que o valor da curva de resposta do sistema é maior ou menor que 2% do valor inicial do sistema. O tempo aferido nesta amostra é o momento zero do cálculo do tempo de acomodação.
5. O valor do tempo de acomodação do sistema será encontrado então a partir do último valor do teste, o tempo aferido na primeira amostra que for 2% maior ou menor que o valor final do sistema (dependendo se a curva de resposta é crescente ou decrescente).
6. O tempo de acomodação é então calculado como a diferença entre o tempo da amostra final e o tempo da amostra inicial do transiente.

Um bom exemplo de como o algoritmo funciona é apresentado na Figura 6, cujo tempo de acomodação foi calculado como 964,83 segundos. É possível observar que, ao suavizar a curva, o algoritmo consegue detectar o início e fim do transiente e o tempo de acomodação do sistema, assim como os demais passos necessários para o cálculo de maneira coerente. Através do tempo de acomodação, é possível também definir as constantes de tempo do sistema, para sistemas de primeira ordem, a constante de tempo é definida como o tempo de acomodação dividido por 4 (Ogata, 2010). Isto será relevante, já que boa parte das variáveis deste sistema, como será visto posteriormente, são, em boa aproximação, de primeira ordem.



Fonte: O Autor (2025)

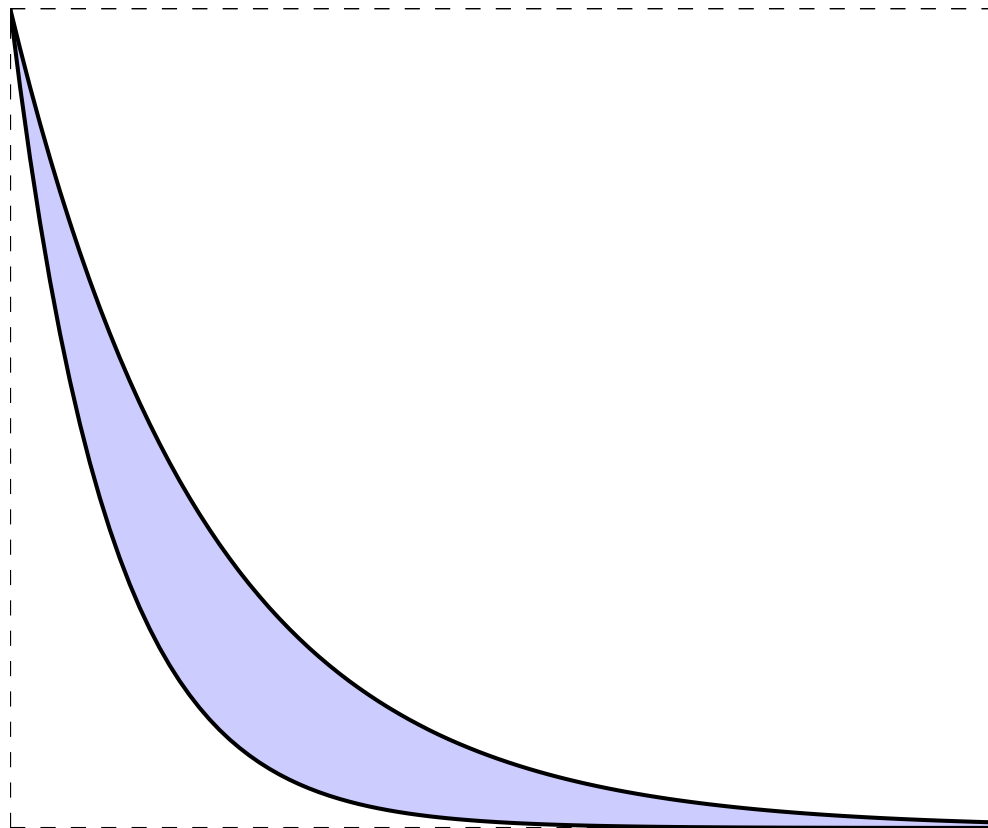
Figura 6 – Representação Visual do Algoritmo de Cálculo do Tempo de Acomodação

2.3 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DAS HISTERESES

Antes de realizar as análises em si, é preciso definir uma forma de comparar a histerese de várias variáveis diferentes de forma única. A histerese é usualmente definida como a área entre as curvas de subida e descida, isto é, a diferença de caminho entre a ida e volta a um mesmo ponto. A fim de ser possível relacionar diferentes variáveis com variações distintas, a histerese será calculada da seguinte forma: é feito o cálculo da diferença entre a área das curvas de subida e descida da velocidade de rotação do compressor, então esta área é dividida pela multiplicação dos intervalos das variáveis nos eixos t e y a fim de normalizá-la; por fim, é aplicado o módulo neste número. De forma genérica pode-se escrever a fórmula utilizada para o cálculo da histerese normalizada H_{norm} como:

$$H_{norm} = \left| \frac{\int_{t_0}^t f_{subida}(t)dt - \int_{t_0}^t f_{descida}(t)dt}{\Delta y \Delta t} \right| \quad (1)$$

Em que t representa o tempo do teste, e as funções genéricas f podem representar: temperatura, pressão ou vazão de fluido refrigerante. No entanto, como estas funções de ida e da volta na equação 1 são desconhecidas, dada a natureza do estudo experimental, estas integrais são calculadas de forma numérica utilizando o método numérico de 1/3 de Simpson composto (Chapra, 2013). Uma representação visual do que a equação 1 representa é apresentada na Figura 7, as funções $f_{subida}(t)$ e $f_{descida}(t)$ são representadas pelas curvas contínuas e o retângulo tracejado representa a área $\Delta y \Delta t$. Ao encontrar a área entre as duas curvas e dividi-la pela área do retângulo em que elas estão inscritas, encontra-se a porcentagem de histerese de determinada variável, o que facilita a comparação entre as diferentes condições operacionais analisadas.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 7 – Representação Visual da Histerese Normalizada

2.4 DETERMINAÇÃO DO COP DO SISTEMA

O COP segue alguns dos métodos e dados experimentais já utilizados e existentes no laboratório REVE (2025), como no artigo de Da Silva *et al.* (2023) no qual já constam dados experimentais da vazão mássica necessária para calcular o COP nas condições deste artigo. Isto é, o COP será avaliado da seguinte forma:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}} \quad (2)$$

Em que \dot{W} é a potência consumida pelo compressor e \dot{Q}_e é a capacidade de refrigeração do evaporador dada por:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{ar}(h_{ar,entrada} - h_{ar,saida}) \quad (3)$$

Em que \dot{m}_{ar} é a vazão mássica de ar e h_{ar} é a entalpia do ar úmido. Os valores de \dot{m}_{ar} foram medidos como 0,037 kg/s e 0,071 kg/s para as posições do ventilador 1 e 4, respectivamente, dados experimentais provenientes do artigo de Da Silva *et al.* (2023) e do laboratório REVE (2025). Os dados de entalpia são determinados utilizando o software EES. Para o cálculo das entalpias de entrada, os dados experimentais da temperatura e umidade relativa de entrada do evaporador foram utilizados, assumindo pressão constante igual a uma atmosfera. Para as entalpias de saída, foi também assumida uma pressão constante de uma atmosfera e utilizados os dados de temperatura e umidade relativa de saída do evaporador.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será discutido, da melhor maneira possível, os resultados obtidos causando as perturbações P1-P5 no sistema de condicionamento de ar. Antes de iniciar o tópico da variação das temperaturas e pressões, é importante saber se as velocidades de rotação reais do compressor estão próximas do esperado durante o planejamento experimental. A Tabela 5 mostra as velocidades de rotação aferidas utilizando o tacômetro MDT-2238B. Nota-se que estas velocidades estão próximas das esperadas conforme as Tabelas 1 e 3, logo, conclui-se que as condições de teste reais estão dentro do planejamento experimental esperado.

Tabela 5 – Velocidades de Rotação do Compressor Aferidas para as Perturbações P1-P5

| Perturbação | Rotação Medida no Compressor [RPM] |
|--------------------|---|
| P1 | 489 |
| P2 | 838 |
| P3 | 838 |
| P4 | 1083 |
| P5 | 883 |

Fonte: O Autor (2025)

3.1 PERTURBAÇÃO PELA VARIAÇÃO DA VAZÃO DE AR DO VENTILADOR

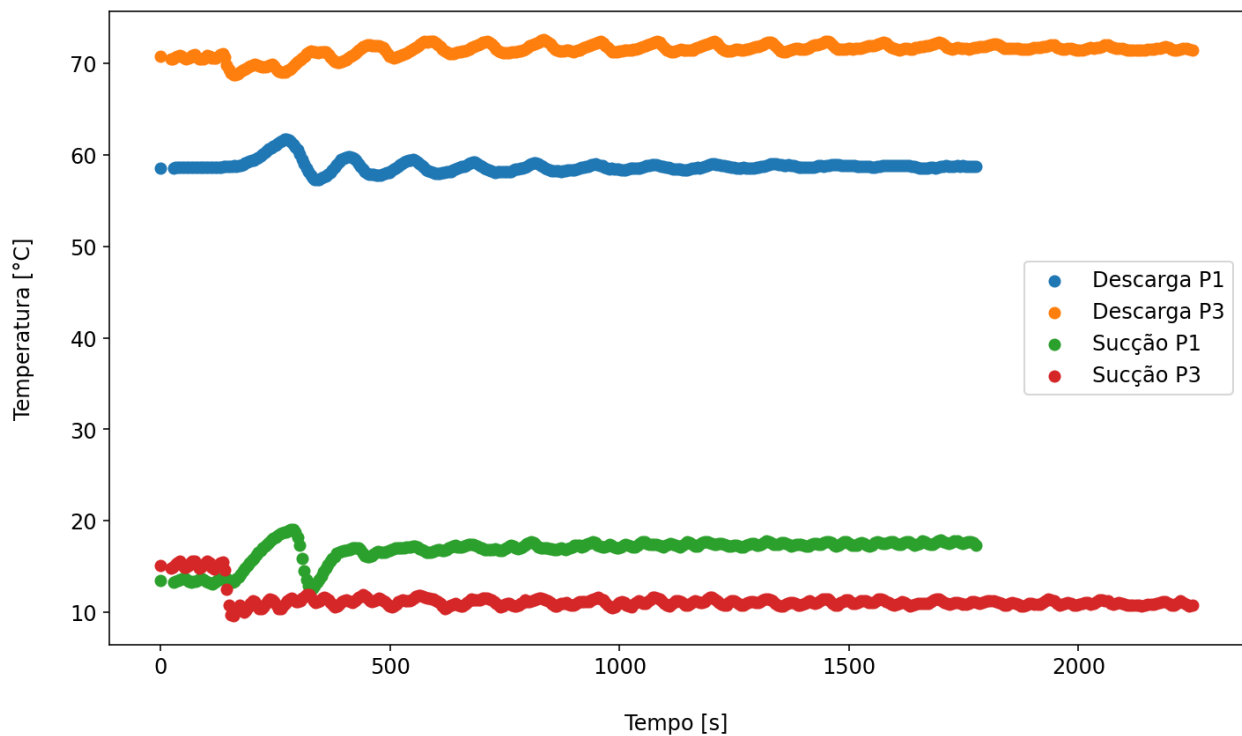
Antes de iniciar a análise dos resultados experimentais, é importante lembrar sobre as perturbações que serão analisadas nesta subseção. As perturbações P1 e P3 são causadas pela variação da vazão de ar do ventilador do evaporador, sendo que em P1 a vazão de ar é aumentada e em P3 a vazão de ar é diminuída. Já as perturbações P2, P4 e P5 são causadas pela variação da rotação do compressor, sendo que em P2 e P4 a rotação é aumentada e em P5 a rotação é diminuída. A Tabela 6 relembra as perturbações causadas no sistema apresentadas na subseção 2.1.

Tabela 6 – Perturbações Geradas para Análise do Sistema

| Perturbação | Rotação do Compressor Esperada [RPM] | Posição Ventilador |
|-------------|--------------------------------------|--------------------|
| P1 | 500 | 1 → 4 |
| P2 | 500 → 890 | 4 |
| P3 | 890 | 4 → 1 |
| P4 | 890 → 1074 | 4 |
| P5 | 1074 → 890 | 4 |

Fonte: O Autor (2025)

A primeira observação, que talvez seja a mais específica entre todas, não observada de maneira tão clara, por exemplo, nas perturbações de rotação, são oscilações análogas a oscilações senoidais decrescentes até que o sistema estabilize em um determinado valor de temperatura ou pressão. Por exemplo, a Figura 8 mostra o comportamento mencionado na temperatura de sucção e descarga do compressor nas perturbações P1 e P3 apresentadas na Tabela 6. As regiões de sucção e descarga estão relacionadas com a Figura 3, onde a região de sucção é a região do transdutor de temperatura 1 e a região de descarga é a região do transdutor de temperatura 2.

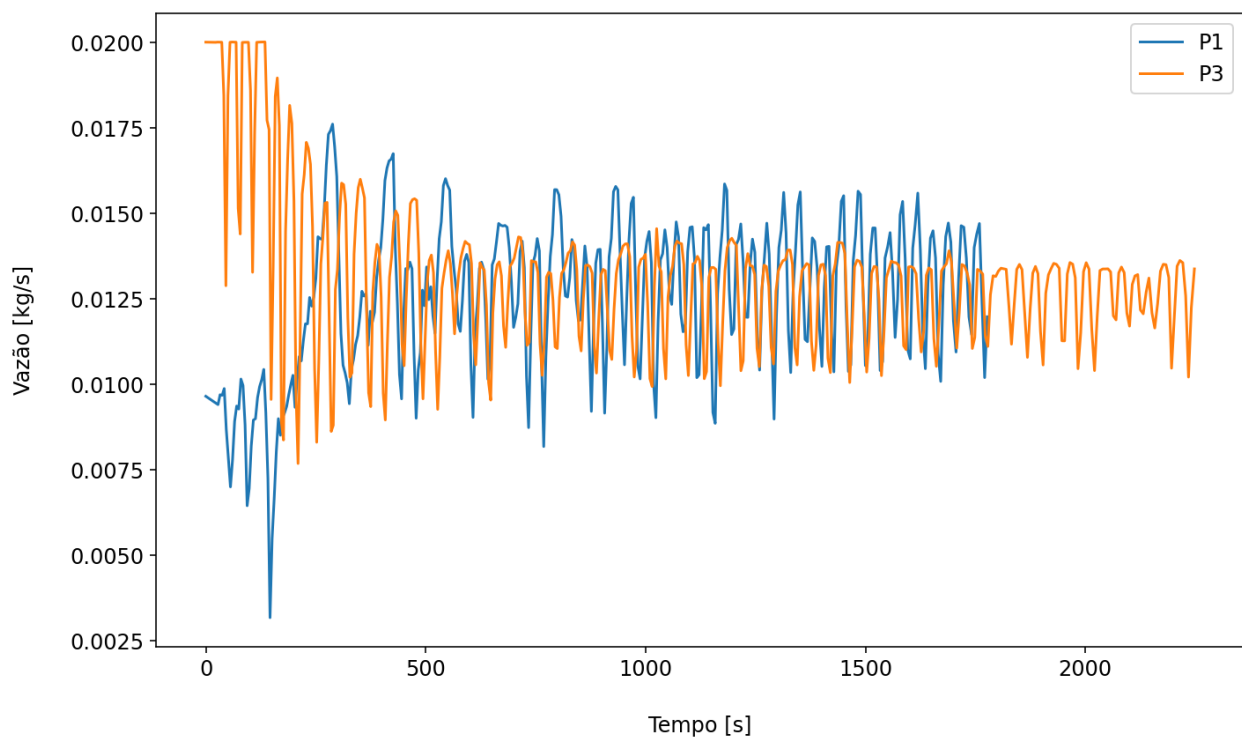


Fonte: O Autor (2025)

Figura 8 – Temperaturas de Descarga e Sucção do Transiente de P1 e P3

Nota-se, na Figura 8, que há um pico máximo de temperatura de sucção e descarga em P1 logo após o aumento da vazão de ar. Este pico foi calculado como sendo 2 °C e 3 °C acima do valor final em estado estacionário das temperaturas de sucção e descarga de P1, respectivamente. Após o pico máximo, as temperaturas de sucção e descarga demoram aproximadamente 140 e 200 segundos para estabilizar em seus respectivos valores finais. Isto ocorre devido a um evaporador subalimentado (Stoecker; Jones, 1982). Tal fato acontece quando a válvula de expansão não consegue alimentar o evaporador com refrigerante o suficiente para refrigerar a superfície do evaporador adequadamente; como resultado, a temperatura e a pressão sobem.

O pico mínimo de temperatura ocorre logo depois, provavelmente, devido a um evaporador inundado, isto é, após a subalimentação do evaporador, a válvula de expansão então deixa que mais fluido refrigerante passe até que o evaporador inunde, esta interpretação pode ser embasada com dados experimentais como na Figura 9, onde há um pico máximo de vazão de fluido refrigerante ao mesmo tempo em que as temperaturas de sucção e descarga são mínimas. Além disso, no artigo de Cavallaro e Bullard (1994) foi observado que aumentar a vazão de ar do ventilador implica em um aumento do coeficiente de transferência de calor h do sistema. Isto também deve estar auxiliando para que a queda da temperatura ocorra mais rapidamente.



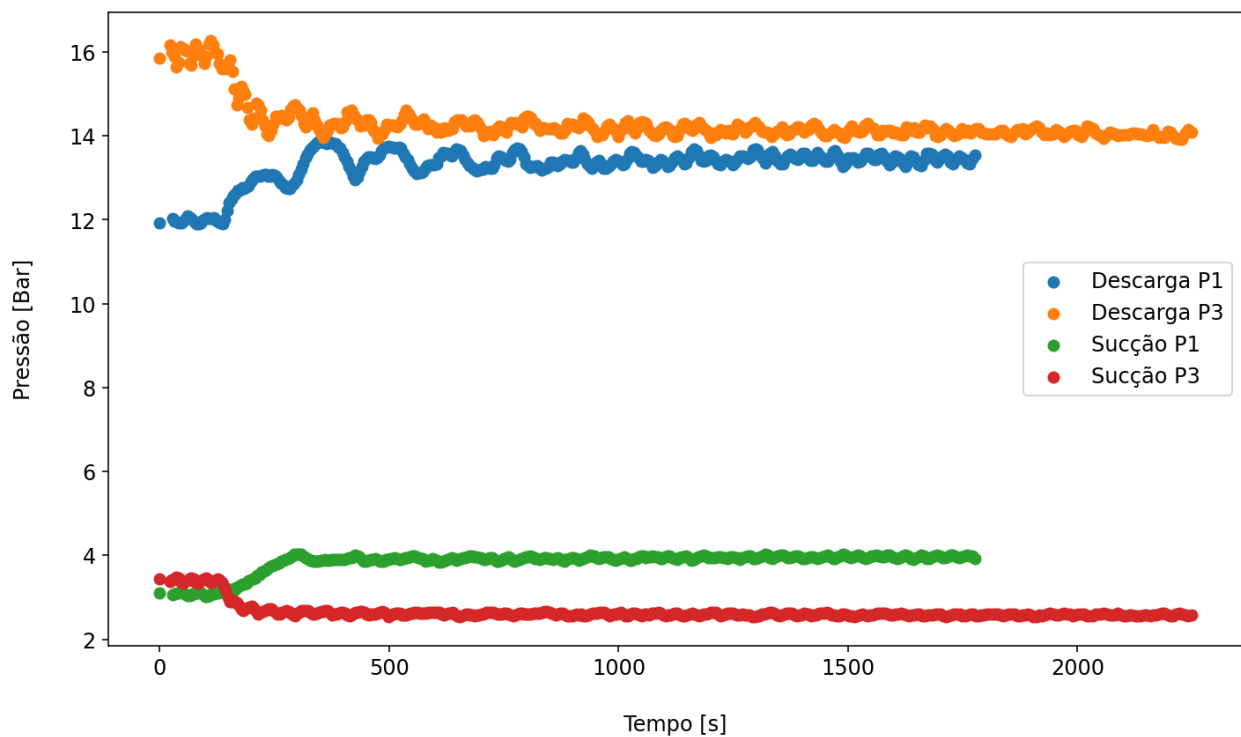
Fonte: O Autor (2025)

Figura 9 – Vazão de Fluido Refrigerante Transiente de P1 e P3

No entanto, as temperaturas de sucção e descarga após isso sobem aproximadamente 5 °C e 1 °C, respectivamente, em relação à temperatura mínima atingida, e oscilam até estabilizar. Esta subida de temperatura possivelmente tem relação com que, embora o coeficiente de transferência de calor tenha aumentado, há mais vazão de ar do que o que pode ser resfriado de maneira mais eficaz pelo sistema, então as temperaturas sobem e fazem isso oscilando, procurando a posição de equilíbrio entre a pressão de sucção e o fluxo da taxa de massa (Stoecker; Jones, 1982).

No caso de P3 não são observados extremos de temperatura, provavelmente pois, como a velocidade e vazão de ar neste caso são reduzidos, diminuí-los é uma alteração menos brusca no sistema, ela apenas decresce oscilando, devido possivelmente à mesma razão que P1 cresce, isto é, com menos vazão de ar é mais fácil resfriá-lo e oscila procurando o equilíbrio.

As pressões de descarga e sucção ambas crescem ou decrescem conjuntamente, o que é o oposto do observado nas pressões nas perturbações por rotação. Como na Figura 10, o aumento das pressões ou a diminuição delas ocorre em decorrência do aumento ou diminuição da carga térmica no evaporador, respectivamente (Datta *et al.*, 2014).

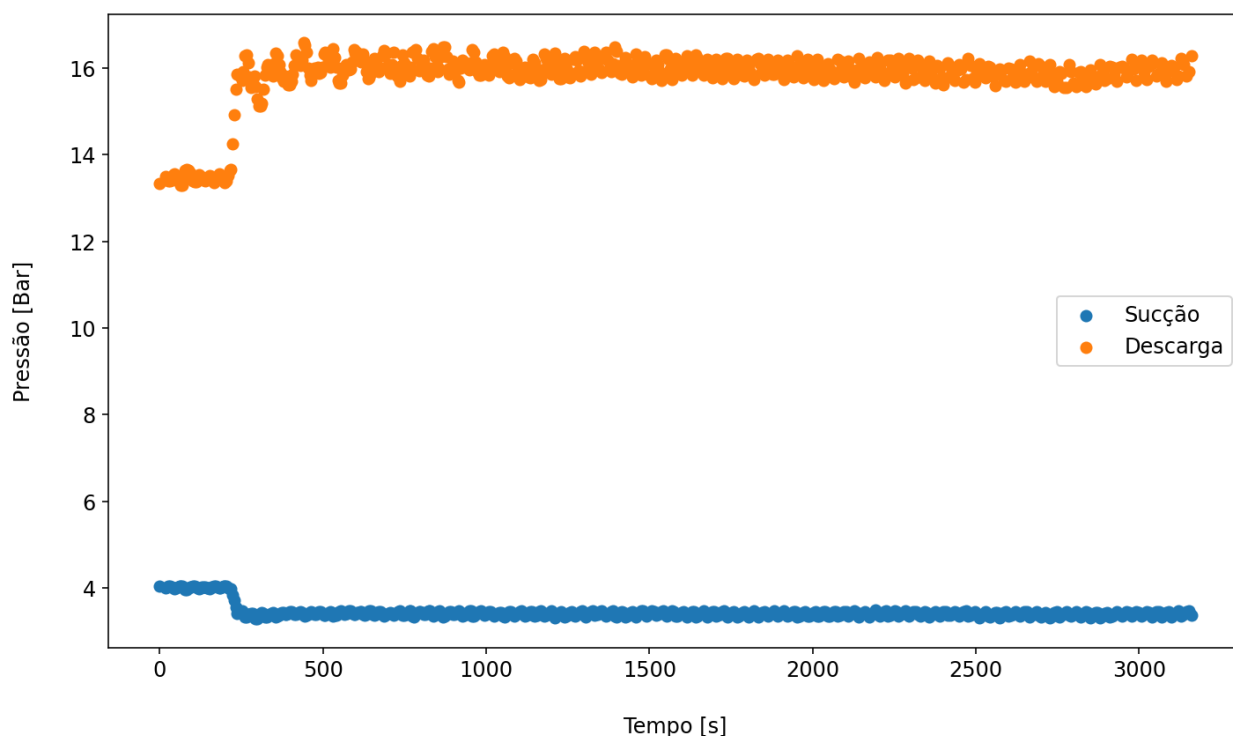


Fonte: O Autor (2025)

Figura 10 – Pressões de Descarga e Sucção P1 e P3

3.2 PERTURBAÇÃO PELA VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO DO COMPRESSOR

As perturbações causadas por rotação, como P2, P4 e P5, demonstraram um comportamento, em geral, menos oscilatório do que as que foram apresentadas previamente na subseção 3.1. É perceptível que, em relação às pressões, quando há aumento da velocidade de rotação do compressor, a pressão de descarga sobe aproximadamente 3 bar e a de sucção desce cerca de 1 bar. Esta relação inversa entre as pressões também foi apontada em outros trabalhos, como o estudo de Datta *et al.* (2014). Por exemplo, a Figura 11 mostra esta relação nas pressões de P2.



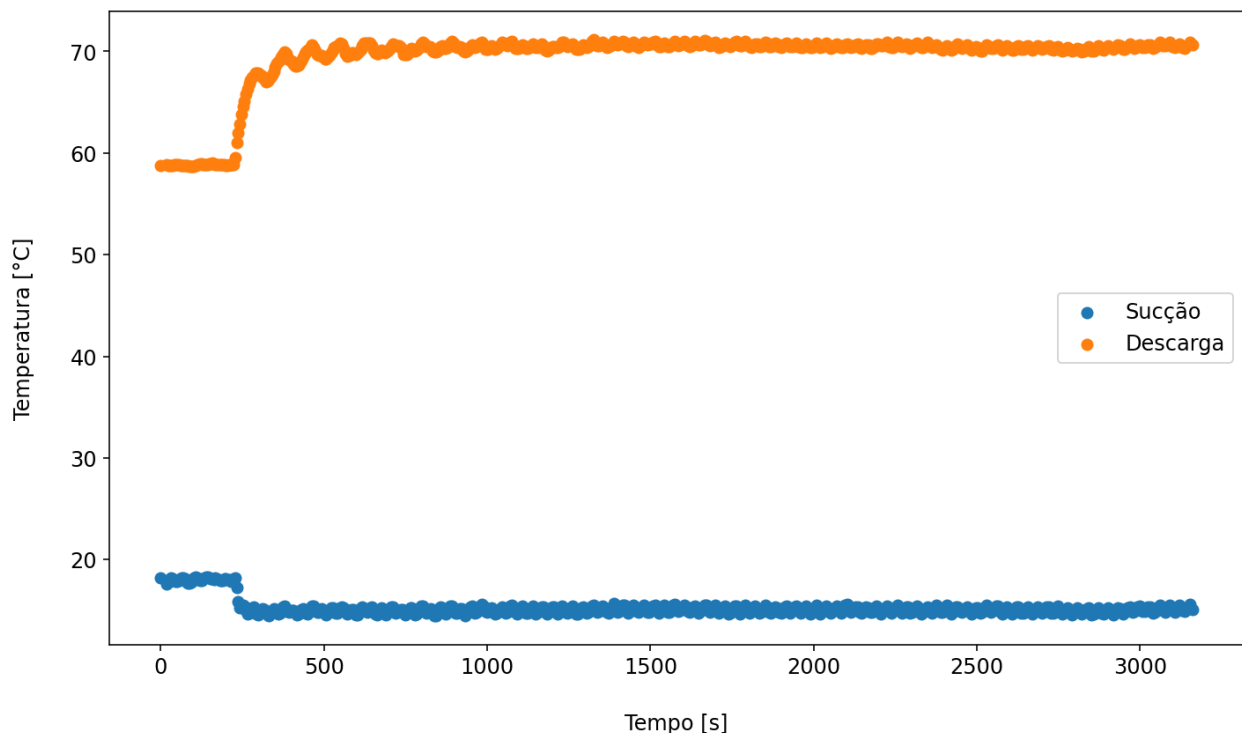
Fonte: O Autor (2025)

Figura 11 – Pressões de Descarga e Sucção P2

A relação inversa entre as pressões pode ser explicada devido à capacidade do compressor aumentar quando a rotação é elevada, variando então inversamente as quedas de pressão, como pode ser representado por um diagrama P-V do compressor, as quedas de pressão variam com o RPM ao quadrado (Phillippi, 2008). É observado também uma maior variação na pressão de descarga do que na pressão de sucção; tal comportamento ocorre devido ao aumento da região ocupada por líquido sub-resfriado no condensador. A prática é usual e serve à função de fazer com que apenas líquido entre na válvula de

expansão (Stoecker; Jones, 1982).

O transiente da parte de sucção é mais rápido que na parte de descarga e isto é possível de concluir não somente das pressões, mas também das temperaturas respectivas, assim como mostra a Figura 12. Esta diferente velocidade dos transientes ocorre, provavelmente, devido à maior inércia térmica do condensador, fazendo com que a sua resposta seja mais lenta e também devido ao efeito da válvula de expansão. Ao aumentar a velocidade do compressor, a carga térmica aumenta quase que instantaneamente no sistema, isto aumenta a pressão e temperatura de descarga e mais fluido refrigerante é sugado pelo compressor por consequência. No entanto, a válvula de expansão ainda demora para permitir que mais fluido refrigerante passe para o evaporador (Chen *et al.*, 2008). Então, causando atraso, como visto nas Figuras 11 e 12.

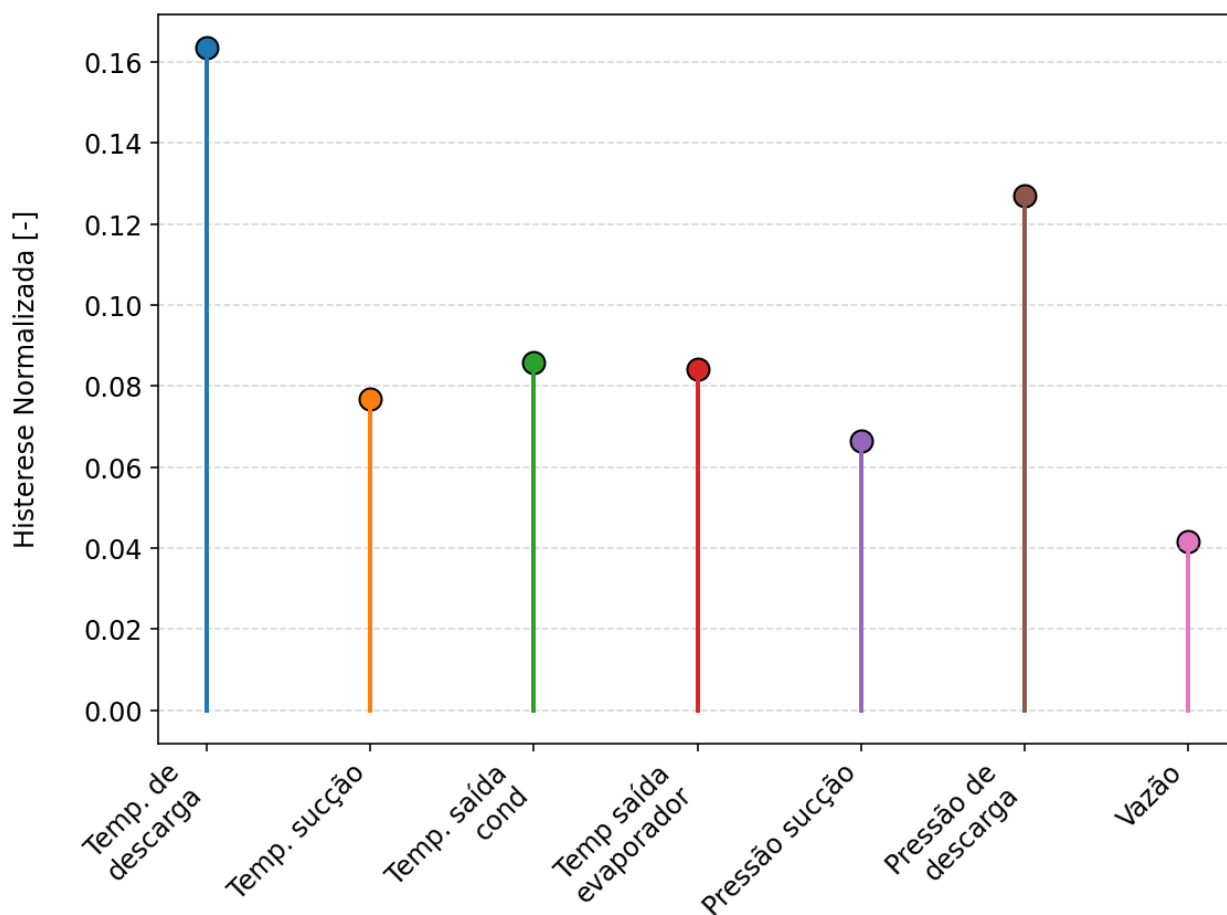


Fonte: O Autor (2025)

Figura 12 – Temperaturas de Descarga e Sucção P2

3.3 ANÁLISE DA HISTERESE

Os resultados obtidos são calculados a partir das variáveis das perturbações P4 e P5, cujo teste foi realizado de forma que a rotação do compressor voltasse ao seu estado inicial, permitindo desta forma aferir a histerese, conforme anteriormente apresentado nas Tabelas 3 e 6 utilizando o método de análise introduzido na subseção 2.3 deste trabalho. A Figura 13 demonstra, então, esses valores encontrados.

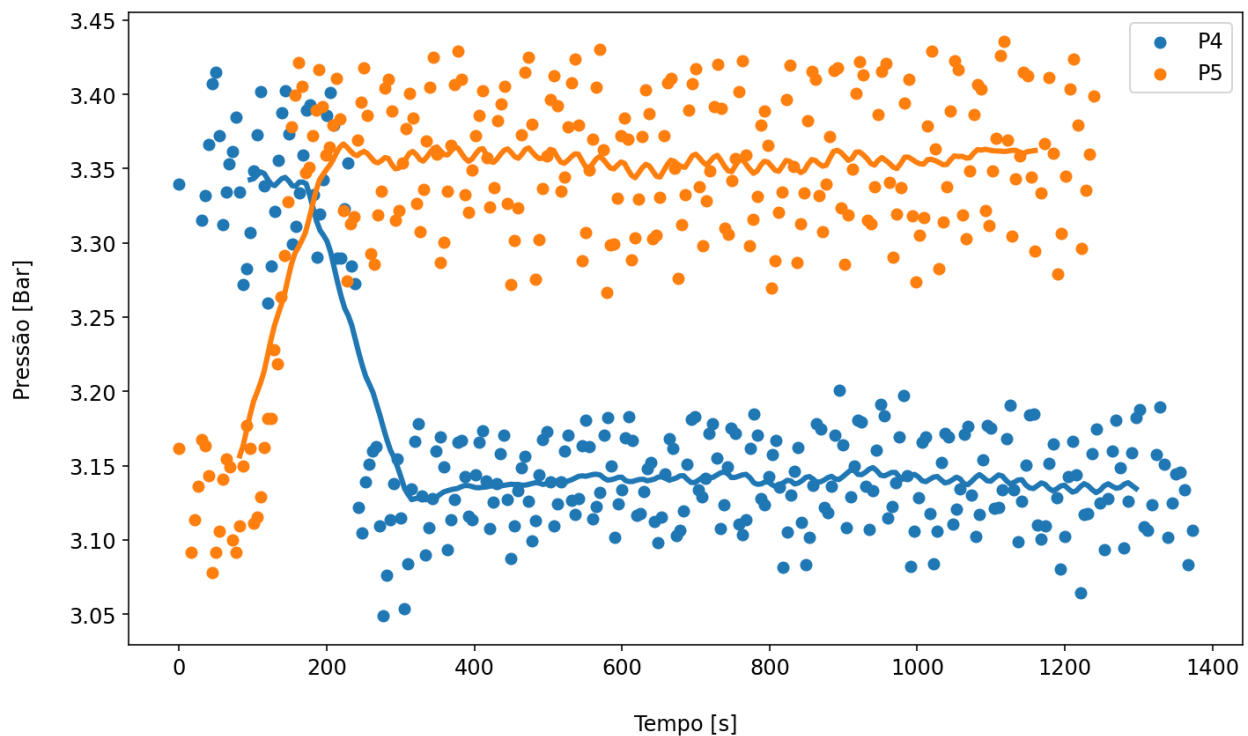


Fonte: O Autor (2025)

Figura 13 – Histereses Normalizadas das Principais Variáveis do Teste

Nota-se que as histereses mais altas, como observadas na Figura 13 sendo Temp. de descarga e Pressão de descarga, encontram-se próximas da região da válvula de expansão. O que é um possível indício de que ela é a principal responsável pelas variações observadas no sistema, como, por exemplo, a diferença entre a velocidade dos transientes das variáveis de P4 e P5. É também perceptível que a velocidade de convergência das variáveis de teste é afetada pela subida ou descida de rotação, principalmente das de

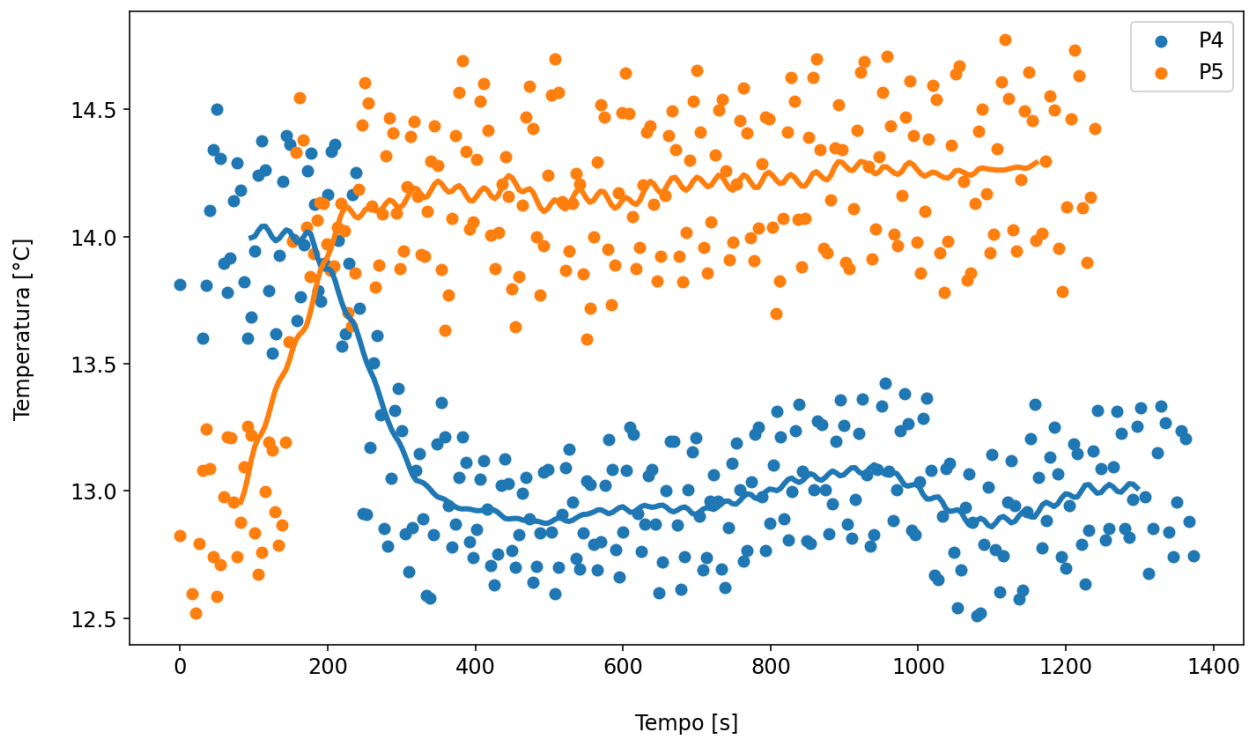
menor histerese, como a temperatura e pressão de sucção. Por exemplo, o gráfico da Figura 14 mostra a pressão de sucção nas perturbações P4 e P5, nota-se que em boa parte do transiente na subida de rotação há uma lacuna na coleta dos dados. Isto acontece pois a subida do transiente foi mais rápida do que a taxa de amostragem do sistema de aquisição.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 14 – Pressão de Sucção nas Perturbações P4 e P5

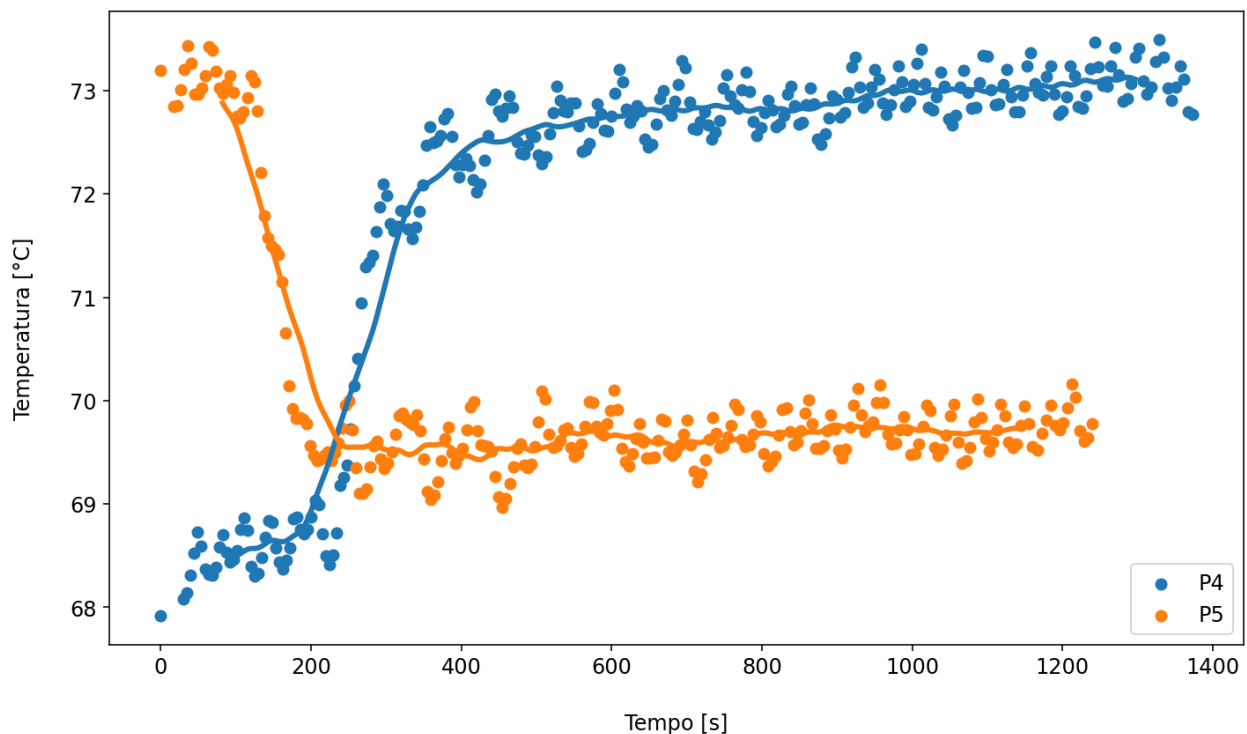
Uma possível explicação para esta mudança da velocidade de convergência pode ser o efeito da válvula de expansão. Quando a velocidade de rotação do compressor é diminuída, a vazão de fluido refrigerante passando pela válvula diminui, então ela começa a se fechar, não completamente, mas há diminuição da seção por onde passa o fluido, causando atraso no aumento da pressão de sucção. Contrastando com a situação oposta, isto é, durante o aumento da velocidade de rotação, há um aumento na vazão de fluido refrigerante, e a válvula já está completamente aberta, permitindo que a pressão varie mais facilmente. Tal comportamento é observável não só na pressão de sucção, mas também na temperatura, como mostra a Figura 15, o que demonstra que o comportamento citado acima é compatível com a observação experimental.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 15 – Temperatura de Sucção nas Perturbações P4 e P5

O transiente da pressão e temperatura de descarga é mais lento que o de sucção, como demonstrado na Figura 16. O que já era esperado, conforme discutido na subseção 3.2 de forma mais detalhada. Percebe-se, no entanto, após a estabilização da temperatura de descarga em P5, ela não volta ao mesmo valor que tinha inicialmente em P4, o que deveria ser o comportamento esperado. É razoável propor que isso ocorra devido ao aumento da temperatura ambiente, que foi de 22 °C em P4 para 24 °C ao final de P5, o que diminui a eficiência do sistema de condicionamento de ar e, consequentemente, a temperatura de descarga não conseguiu voltar ao seu valor inicial.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 16 – Temperatura de Descarga nas Perturbações P4 e P5

A maior histerese encontrada nas variáveis de descarga, como observado na Figura 13, pode ser explicada pois estas variáveis são mais lentas em seu transiente, e são dependentes das variáveis de sucção e da ação da válvula de expansão, ou seja, elas acabam acumulando no seu resultado os efeitos da histerese destas outras partes do sistema.

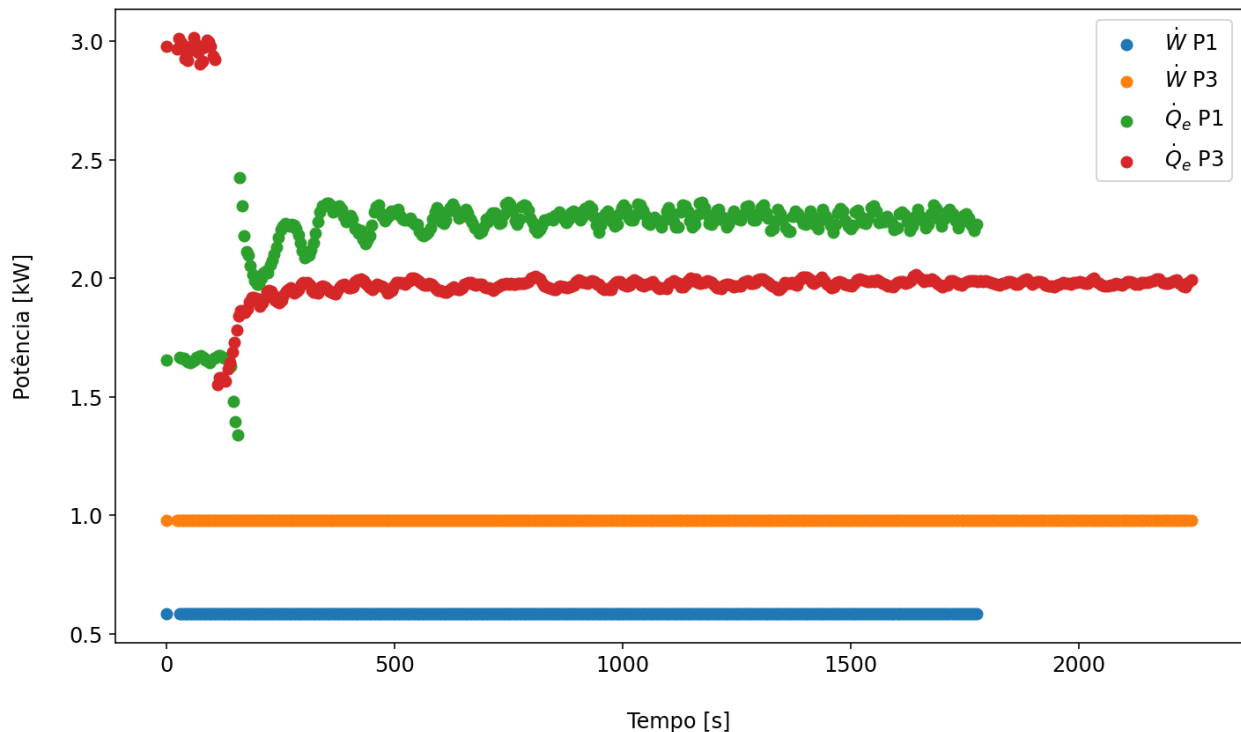
3.4 ANÁLISE DO COP

Nesta subseção, serão apresentadas as análises do Coeficiente de Performance (COP) do sistema de condicionamento de ar nas condições de perturbação aplicadas ao sistema. O cálculo da determinação do COP foi feito conforme detalhado na subseção 2.4.

3.4.1 Efeito da Variação da Vazão de Ar do Ventilador no COP

A capacidade de refrigeração do sistema oscila ao aumentar a vazão de ar do ventilador, o que é um resultado razoável devido ao analisado das perturbações nas temperaturas e pressões de sucção e descarga do compressor, analisadas com mais detalhe na subseção 3.1. A capacidade de refrigeração cresce e oscila com o aumento da vazão

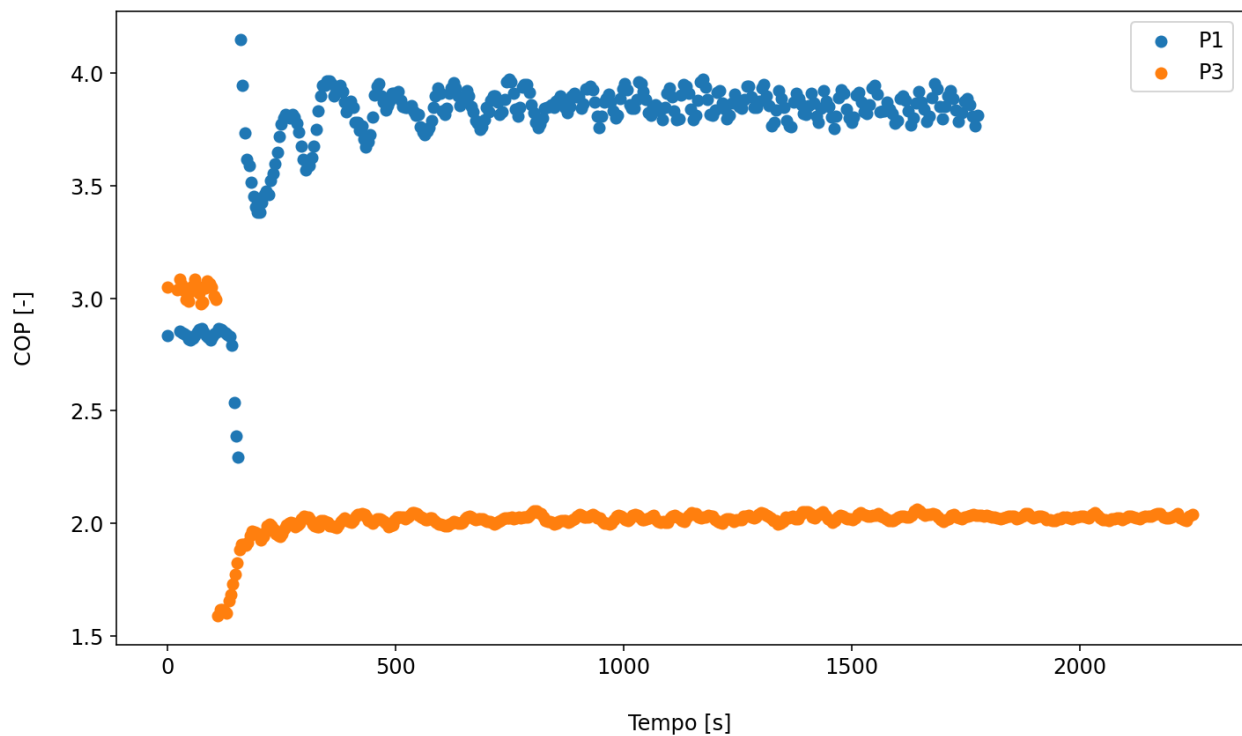
de ar do ventilador, isto é, para P1, como pode ser visto na Figura 17. Isto ocorre devido, principalmente, à temperatura de saída e umidade relativa de saída do evaporador que apresentaram oscilações, o que afeta diretamente os cálculos de entalpia do ar. P3 oscila menos, o que deve estar relacionado com as razões explicadas anteriormente na subseção 3.1. A mudança abrupta capacidade de refrigeração ocorrem devido a mudança abrupta da vazão de ar do ventilador do evaporador.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 17 – Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor nas Perturbações P1 e P3

Portanto o COP também oscila, como pode ser visto na Figura 18. A oscilação do COP é completamente relacionada à oscilação da capacidade de refrigeração neste caso, já que a potência consumida pelo compressor é mantida fixa. Oscila para P1 e menos para P3. O COP cresce quando a vazão de ar aumenta e decresce quando ela diminui, tal resultado é aferido em outros estudos como, por exemplo, no artigo de Alkinany *et al.* (2023) onde também foi observado que houve um aumento do COP ao aumentar a vazão de ar, caso a rotação do compressor seja mantida fixa. Este aumento ou diminuição do COP ocorre devido ao processo de troca de calor. Foi observado um aumento de 26% no COP em P1 e redução de 33% em P3, quando comparado ao estado estacionário.

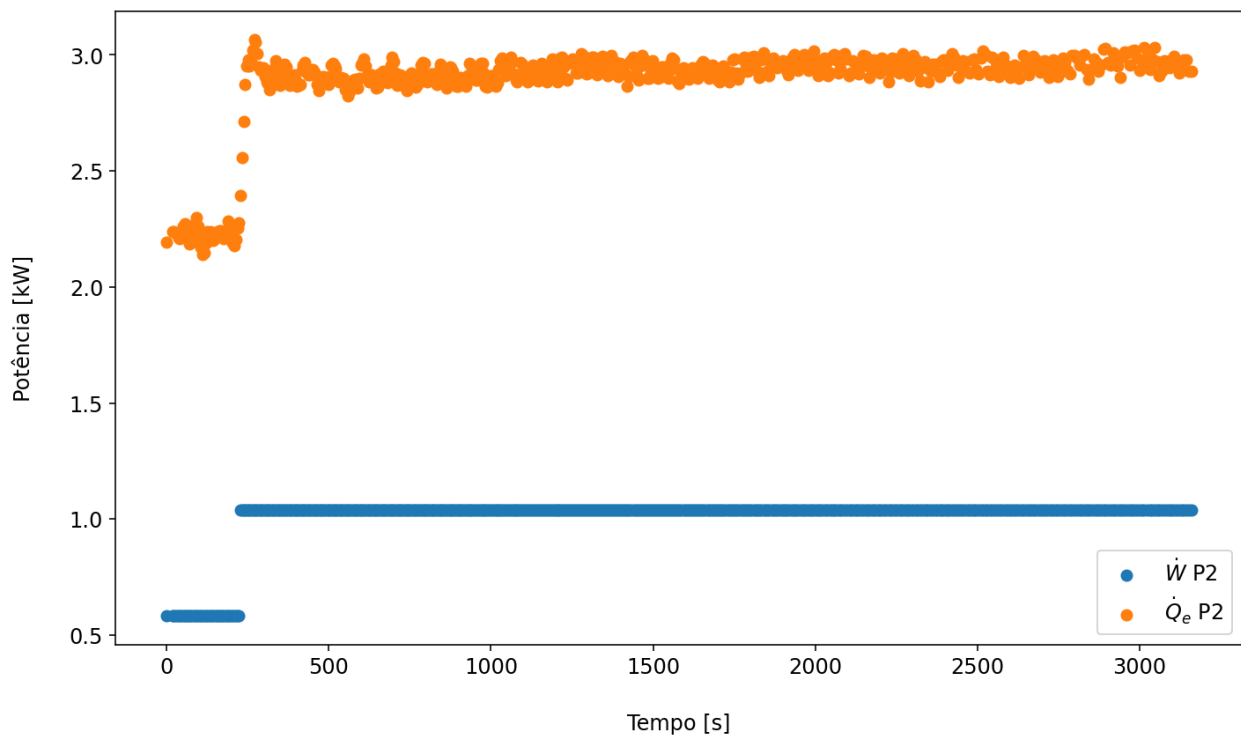


Fonte: O Autor (2025)

Figura 18 – COP nas Perturbações P1 e P3

3.4.2 Efeito da Variação de Rotação do Compressor no COP

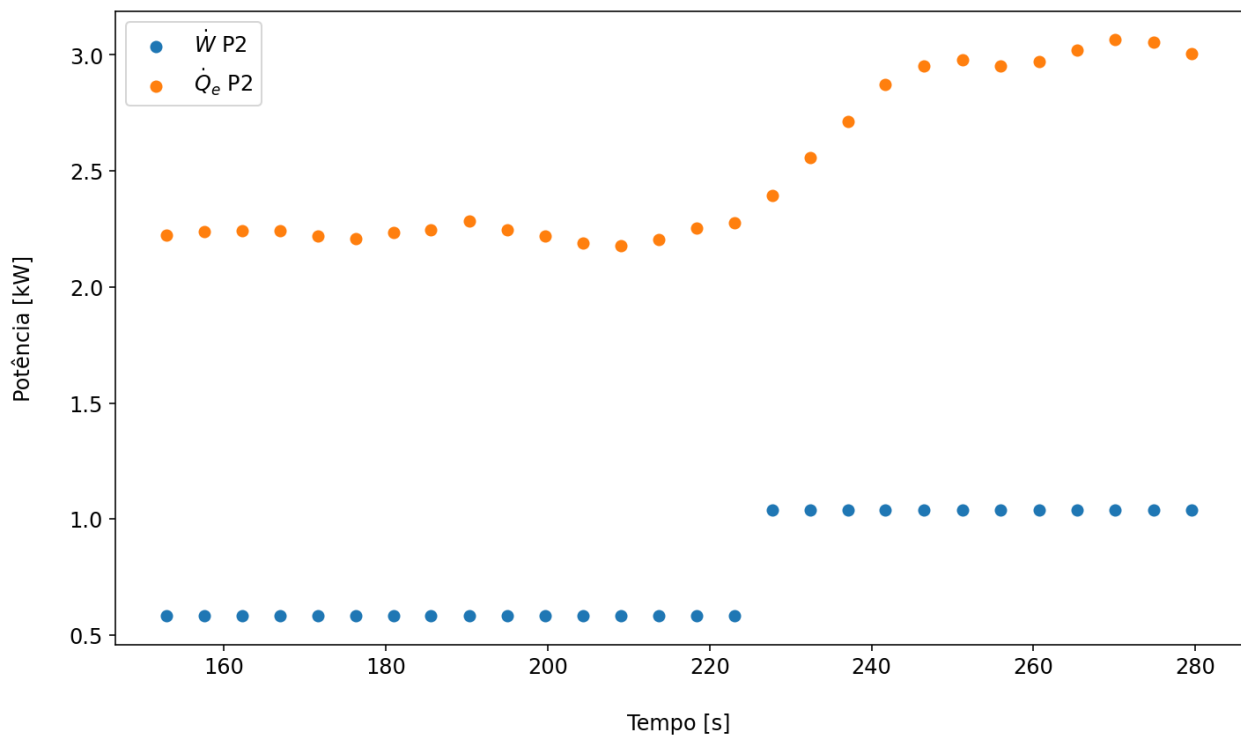
Nesta situação, ao aumentar a variação da rotação do compressor, a capacidade de refrigeração do sistema aumenta, como pode ser vista na Figura 19 para a perturbação P2. Isto ocorre devido à diminuição da entalpia de saída e ao aumento da entalpia de entrada do ar.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 19 – Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor na Perturbação P2

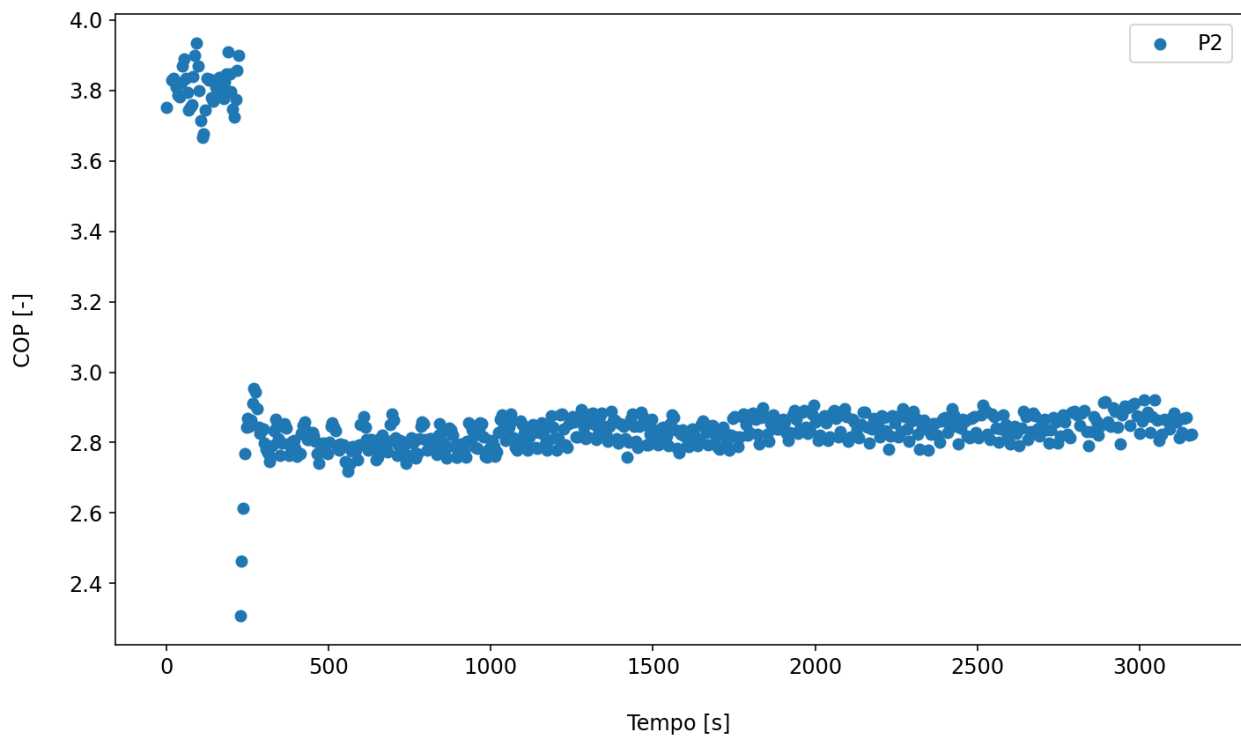
É importante ressaltar que o transiente da potência consumida pelo compressor é, para efeitos práticos de análise, instantâneo, o que não acontece com a capacidade de refrigeração. Esta diferença entre os transientes da capacidade de refrigeração e da potência consumida pelo compressor pode ser vista na Figura 20. O transiente imediato da potência consumida pelo compressor é o causador da variação abrupta do COP que pode ser observada nas Figuras 21 e 23 também.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 20 – Transiente da Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor na Perturbação P2

Embora a capacidade de refrigeração do sistema aumente, o oposto ocorre no COP, como pode ser visto na Figura 21, o COP diminui com o aumento da rotação do compressor. Este resultado é bem documentado na literatura, por exemplo Masche *et al.* (2021) explica que o COP diminui devido ao aumento da potência consumida pelo compressor, aumentando mais do que a capacidade de refrigeração do sistema. Também pode estar atrelado às quedas de pressão do fluido refrigerante ao passar pelos trocadores de calor, como mencionado por Constantino e Kanizawa (2022) o que pode levar à diminuição também da eficiência da compressão em rotações mais elevadas, como mencionado por Stoecker (1998). Foi observada uma diminuição de 30% no COP em P2, quando comparado ao estado estacionário.

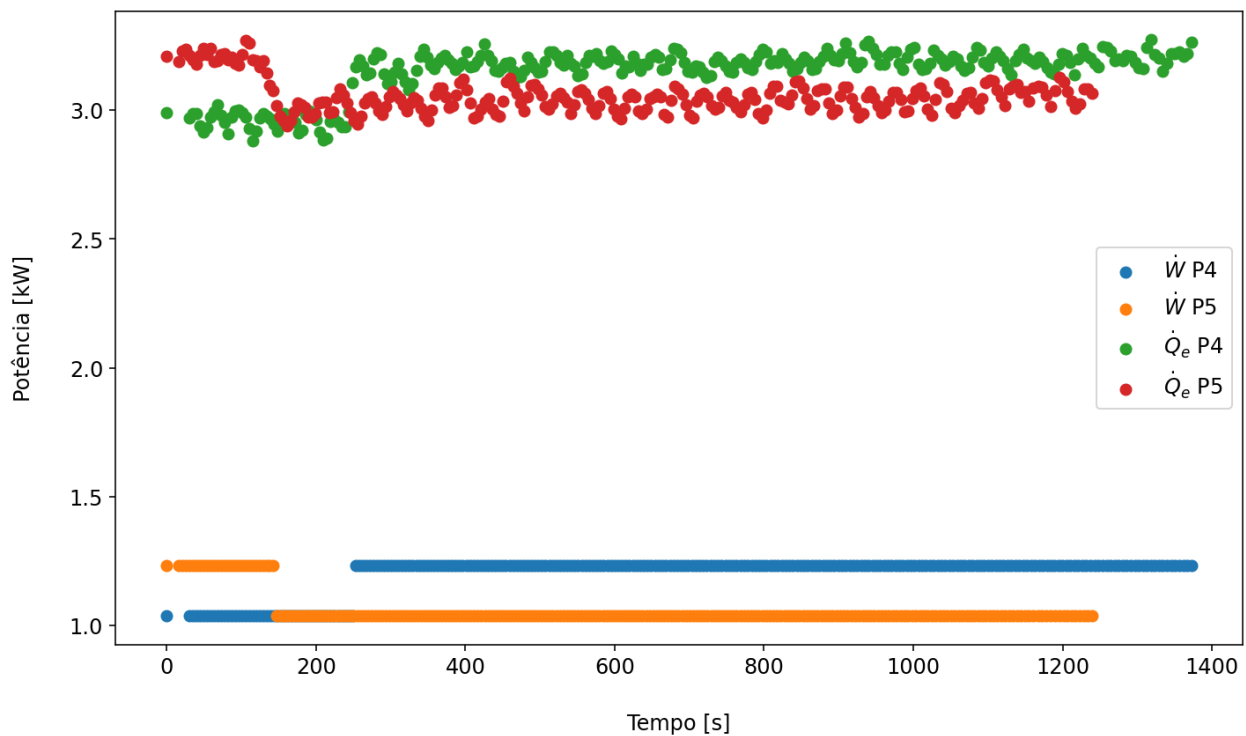


Fonte: O Autor (2025)

Figura 21 – COP na Perturbação P2

3.4.3 Efeito da Histerese no COP

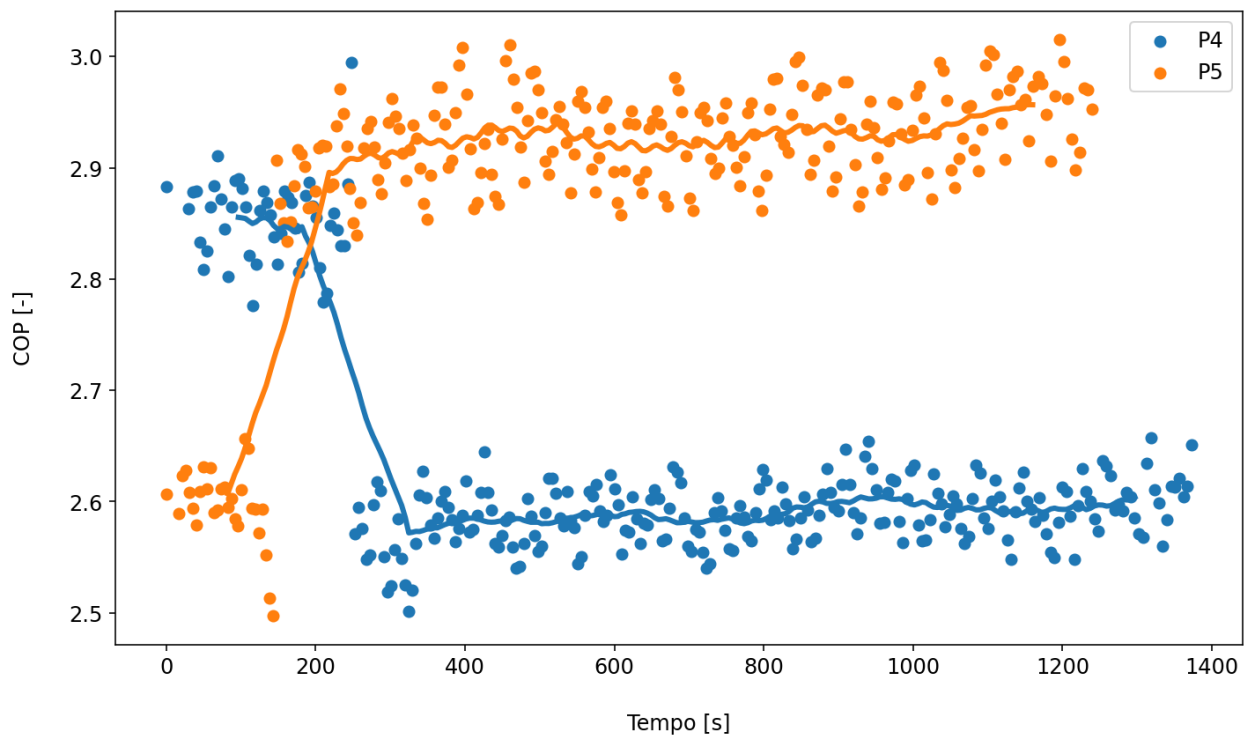
Conforme Masche *et al.* (2021), a influência da histerese no COP é muito mais dramática do que na capacidade de refrigeração do sistema. Isto acontece pois o trabalho de entrada de refrigeradores eficientes é muito baixo. O COP cai rapidamente e a histerese aumenta devido à redução da capacidade de refrigeração e ao aumento do trabalho de entrada do compressor. Esta frase é possível de ser verificada, para a capacidade de refrigeração, observando a Figura 22. Ela demonstra como a capacidade de refrigeração e a potência consumida pelo compressor variam nas perturbações P4 e P5. A potência consumida pelo compressor varia, para efeitos práticos, quase que instantaneamente, enquanto a capacidade de refrigeração varia de forma mais lenta e gradual, pois o transiente das entalpias está relacionado aos transientes de umidade e temperaturas do evaporador, que dependem também do restante do sistema, enquanto a rotação do compressor depende apenas do inversor.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 22 – Capacidade de Refrigeração e Potência Consumida Pelo Compressor nas Perturbações P4 e P5

Utilizando a equação 2, então é possível determinar o COP do sistema nas perturbações P4 e P5, o que pode ser visto na Figura 23, nota-se que a histerese do COP, como dito por Masche *et al.* (2021), é acentuada e isso ocorre devido ao impacto da variação da potência consumida pelo compressor ser consideravelmente maior do que a variação da capacidade de refrigeração do sistema. A histerese normalizada do COP foi calculada como sendo 10%, o que é um valor considerável. Houve também uma diminuição de 10% no COP em P4 e 13% de aumento em P5, quando comparado ao estado estacionário.



Fonte: O Autor (2025)

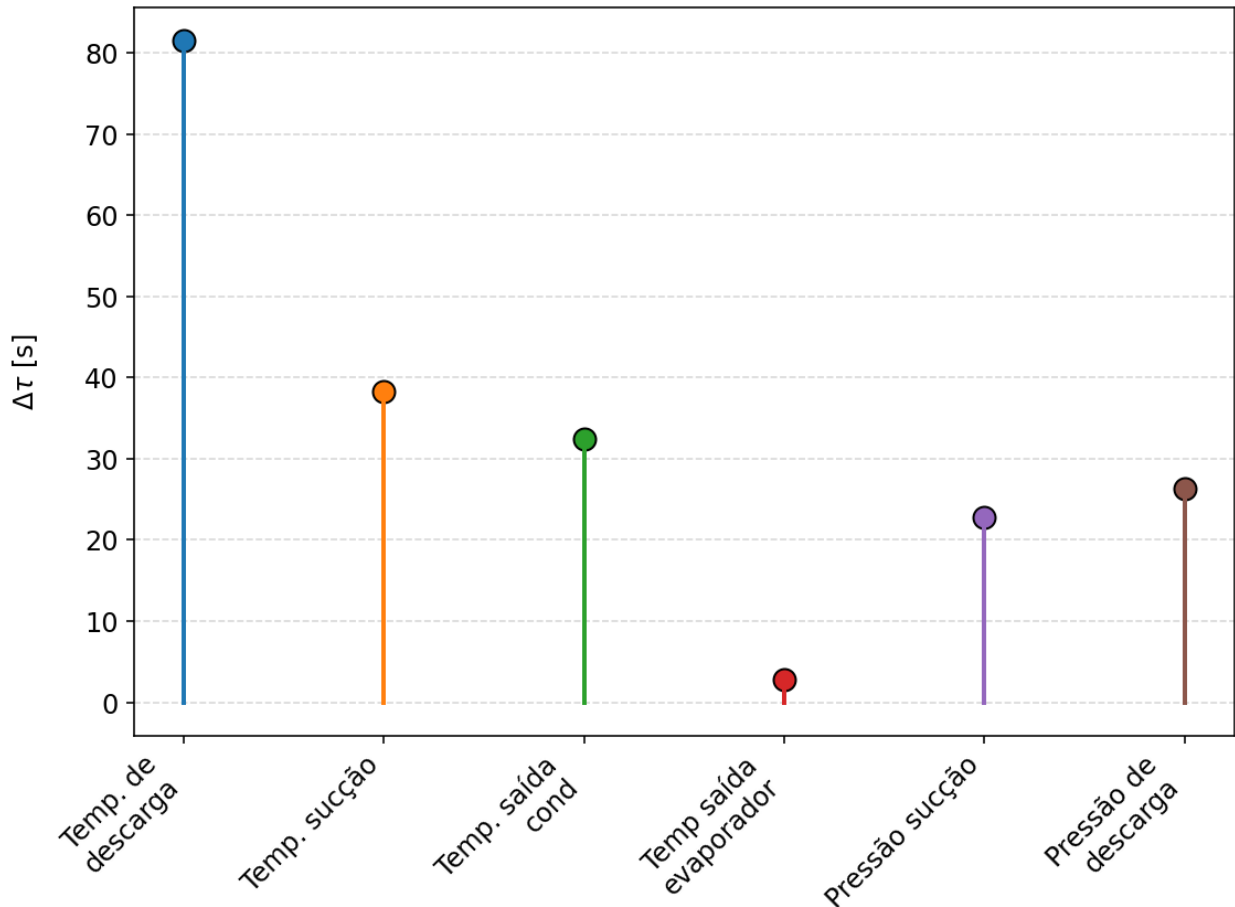
Figura 23 – Histerese no COP nas Perturbações P4 e P5

3.5 ESTUDO DA HISTERESE NORMALIZADA PARA CONTROLE NÃO ADAPTATIVO

Para finalizar esta seção, é interessante realizar um estudo final da histerese normalizada e estudar a relação dela com parâmetros do sistema, como, por exemplo, as suas constantes de tempo, que são um parâmetro importante e que são alteradas justamente devido à histerese do sistema.

Todas as variáveis de teste aqui apresentadas, considerando as perturbações P4 e P5, podem ser consideradas, no tempo, como variáveis de primeira ordem, devido ao seu comportamento aproximadamente exponencial. Para tentar então encontrar a relação entre a histerese normalizada e as constantes de tempo do sistema, como a histerese é relativa à diferença entre os caminhos de subida e descida, então é proposto tentar encontrar uma relação entre a histerese normalizada e a diferença entre as constantes de tempo de subida e descida do sistema.

A diferença entre as constantes de tempo do sistema pode ser então encontrada na Figura 24. As variáveis escolhidas para análise são as mesmas anteriormente apresentadas na Figura 13, sendo a única exceção a vazão de fluido refrigerante, já que ela não pode ser considerada de primeira ordem.

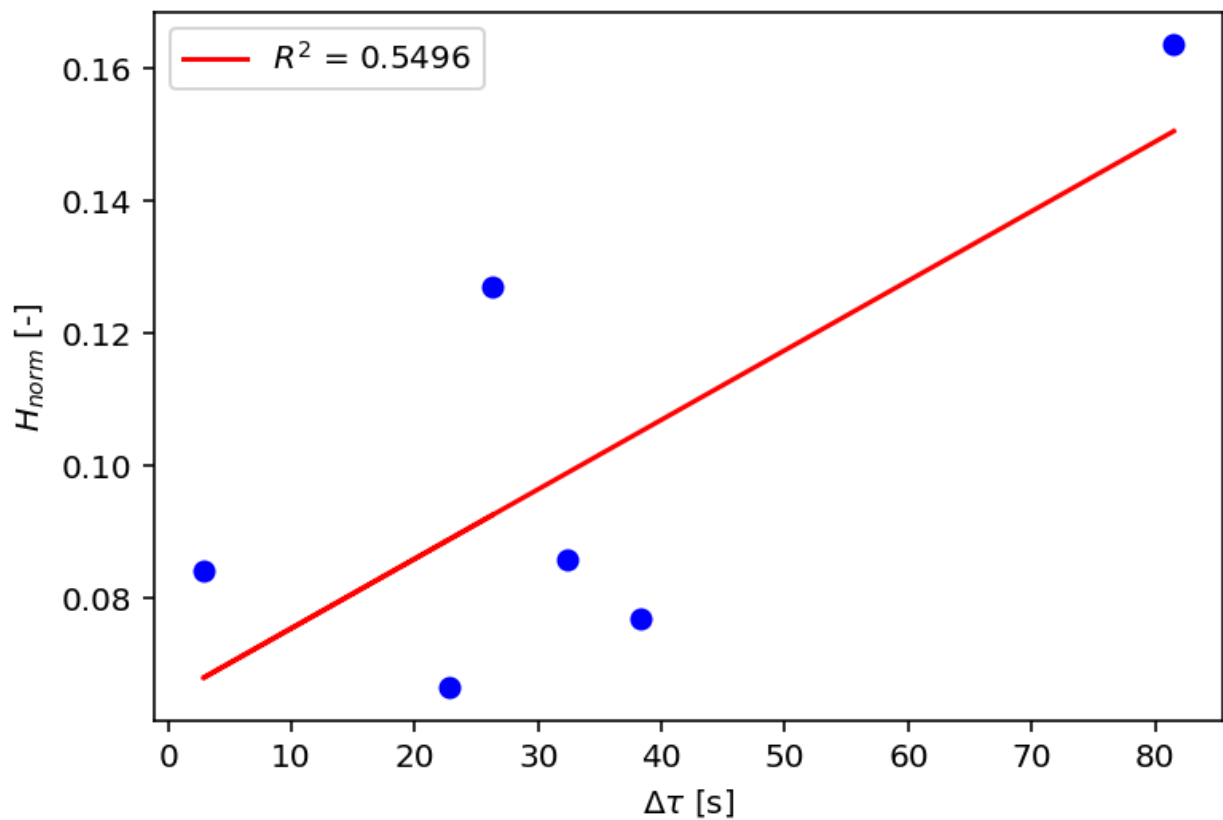


Fonte: O Autor (2025)

Figura 24 – Módulo da Diferença entre as Constantes de Tempo do Sistema nas Perturbações P4 e P5

$\Delta\tau$ é o módulo da diferença entre as constantes de tempo de subida e descida do sistema, ou seja, $\Delta\tau = |\tau_{subida} - \tau_{descida}|$, onde τ_{subida} é a constante de tempo do sistema durante a subida da perturbação e $\tau_{descida}$ é a constante de tempo do sistema durante a descida da perturbação.

A partir dos dados apresentados na Figura 13 e na Figura 24, é possível então traçar o gráfico da histerese normalizada pela diferença entre as constantes de tempo do sistema, como mostrado na Figura 25.



Fonte: O Autor (2025)

Figura 25 – Histerese Normalizada e Módulo da Diferença entre as Constantes de Tempo do Sistema

Entretanto, não foi possível encontrar uma relação clara entre a histerese normalizada e a diferença entre as constantes de tempo do sistema. É possível notar que o R^2 da regressão linear entre a histerese normalizada e a diferença entre as constantes de tempo do sistema é baixo para tirar qualquer conclusão mais assertiva, indicando que a histerese normalizada parece não ter uma relação direta com a diferença entre as constantes de tempo do sistema, o que pode indicar que outros fatores estão influenciando a histerese do sistema.

Além desta análise, houve também a tentativa de encontrar uma relação linear entre o logaritmo da histerese normalizada e a diferença entre as constantes de tempo do sistema. A lógica por trás desta tentativa é que as funções de transferência de primeira ordem são exponenciais no domínio do tempo, o que poderia indicar então alguma relação linear entre os logaritmos da histerese normalizada e da diferença entre as constantes de tempo do sistema. No entanto, esta tentativa também não mostrou resultados satisfatórios, o que indica que talvez não seja possível encontrar uma relação direta entre a histerese

normalizada e as constantes de tempo do sistema.

Embora não tenha sido possível encontrar uma relação clara entre a histerese normalizada e as constantes de tempo do sistema, estes resultados obtidos não são inúteis em termos de controle. Para um controle não adaptativo, saber a diferença entre as constantes de tempo pode ser bem útil para determinar o tempo de amostragem do controlador, ou seja, o tempo que o controlador deve esperar para fazer uma nova leitura das variáveis do sistema e tomar uma nova ação de controle. Isto é, escolher o menor tempo de amostragem possível para evitar que certas variáveis não sejam amostradas de maneira adequada, comprometendo o controle do sistema.

Todavia, é possível observar que há uma tendência geral de que quanto maior a diferença entre as constantes de tempo do sistema, maior é a histerese normalizada. Isto, embora não funcionará necessariamente em todos os casos, pode ser utilizado como uma regra prática para realizar certos cuidados no projeto do controlador para lidar com uma possível alta histerese no sistema.

Também vê-se necessário que o controlador seja projetado de tal forma que tenha uma banda morta em torno do valor de referência desejado, isto porque é possível que os valores em estado estacionário do sistema da ida não sejam exatamente iguais aos da volta, assim como observado na Figura 16. É importante então que o controlador entenda que uma certa variação em torno do valor de referência é aceitável, e que não deve ser considerado um erro de controle, mas sim uma característica do sistema.

Por fim, para um controle adaptativo, é possível utilizar modelos matemáticos mais complexos para modelar o fenômeno da histerese do sistema de forma mais precisa. Um exemplo de modelo que poderia ser utilizado é o modelo de histerese de Bouc-Wen, que é um modelo matemático não linear que pode ser utilizado para modelar sistemas com histerese, como utilizado por Zhang *et al.* (2024). Neste artigo, foi utilizado para modelar histerese em um sistema de servoacionamento de microdeslocamento piezolétrico. Obtendo erro máximo de 0,06% em uma trajetória senoidal, o que demonstra que esta abordagem pode ser bastante eficaz para modelar sistemas com histerese e, se necessário, pode ser utilizada para projetar um controlador adaptativo para um sistema de condicionamento de ar. Além do modelo de Bouc-Wen, o modelo de Prandtl-Ishlinskii também é um modelo matemático que pode ser utilizado para modelar sistemas com histerese, porém, conforme também Zhang *et al.* (2024), ele é computacionalmente mais complexo que o de Bouc-Wen. Mesmo assim, pode ser interessante de ser utilizado em estudos futuros.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposta a análise experimental do comportamento transiente de um sistema automotivo de condicionamento de ar do laboratório de refrigeração veicular REVE (2025) e do seu ciclo de histerese. Para isso, foram realizados ensaios experimentais, causando perturbações na rotação do compressor e na vazão de ar do ventilador do evaporador. Ao todo, foram realizadas cinco perturbações distintas para estudar o resultado das perturbações e da histerese no sistema de condicionamento de ar.

Foi possível observar que, para perturbações pela variação da vazão de ar do ventilador, isto é, para P1 e P3, o sistema apresenta um comportamento oscilatório, principalmente ao aumentar a vazão de ar, com sobressinal de aproximadamente 2 °C e 3 °C acima do valor final em estado estacionário para as temperaturas de sucção e descarga de P1, respectivamente. Elas também levaram aproximadamente 140 e 200 segundos, a partir de seu valor máximo, para estabilizar em seus respectivos valores finais.

No entanto, quando a vazão de ar do ventilador é reduzida, o sistema apresenta um comportamento mais estável, sem sobressinal, e comportamento mais similar a sistemas de primeira ordem. Para a perturbação P2, que consiste na variação da rotação do compressor, o sistema apresenta um comportamento suave, também sem sobressinal.

As perturbações P4 e P5 também são perturbações na rotação do compressor, mas com foco na análise do ciclo de histerese. Foi notado que a histerese está presente em todas as variáveis do sistema, as maiores histereses estão na região de descarga do compressor, com a maior histerese normalizada observada sendo de 16%. Isto é, há uma diferença de 16% entre os caminhos de subida e descida da rotação do compressor.

No COP foi demonstrado experimentalmente que quando há aumento da vazão de ar, o COP cresce e quando a vazão de ar diminui neste sistema, o COP decresce. Foi observado um aumento de 26% na perturbação P1 e uma redução de 33% na perturbação P3, quando comparado ao estado estacionário.

Para as perturbações de rotação do compressor como P2, P4 e P5 é possível observar que o COP apresenta um comportamento suave, sem sobressinal, assim como as demais variáveis do sistema em transiente. O COP diminui quando a rotação do compressor aumenta e aumenta quando a rotação do compressor diminui, o que é o oposto da capacidade de refrigeração do sistema. Para a perturbação P2, por exemplo, o COP apresentou uma diminuição de 30% quando comparado ao estado estacionário.

Além disso, foi possível observar expressiva histerese no COP, o principal responsável por isso sendo, provavelmente, a mudança abrupta da potência consumida pelo compressor. Em P4 observou-se uma diminuição de aproximadamente 10% no COP quando comparado ao estado estacionário, enquanto que em P5, o COP aumentou 13% quando comparado ao estado estacionário. O que indica que o sistema retorna, mesmo que com histerese, ao seu estado estacionário anterior após a perturbação.

Ademais, não foram observadas correlações significativas entre as histereses normalizadas do sistema e as constantes de tempo das variáveis do sistema, o que indica que a histerese observada no sistema não é diretamente proporcional às constantes de tempo do sistema. Um controle não adaptativo, no entanto, utilizando as menores constantes de tempo observadas como referência para a taxa de amostragem dos sensores e escolhendo uma banda morta em torno do valor final da variável de interesse, pode ser uma abordagem viável para lidar com a histerese observada no sistema.

Por fim, para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de mais ensaios experimentais com diferentes condições de operação do sistema, como variações na temperatura ambiente e umidade relativa do ar, para uma análise mais abrangente do comportamento transiente e da histerese do sistema de condicionamento de ar automotivo. Além disso, a implementação de técnicas de controle não adaptativo e adaptativo, conforme mencionadas anteriormente, pode ser uma abordagem interessante para confirmar a eficácia das estratégias de controle propostas.

4.1 COMO O IC CONTRIBUIU PARA A MINHA FORMAÇÃO

A realização deste trabalho de Iniciação Científica foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Através da análise experimental do sistema de condicionamento de ar automotivo, pude aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso em um contexto prático, além de adquirir conhecimentos que vão além dos ensinados em sala, desenvolvendo habilidades essenciais como a coleta e análise de dados, a interpretação e tratamento de resultados experimentais e a elaboração de relatórios técnicos. Além disso, a experiência me proporcionou uma compreensão mais profunda no que diz respeito ao comportamento transiente e à histerese em sistemas de condicionamento de ar veicular. A interação com os equipamentos do laboratório REVE e a realização de ensaios experimentais foram enriquecedoras, permitindo-me aprimorar minhas habilidades técnicas e de resolução de problemas. Também tive a oportunidade de me aprofundar em conceitos de controle, como a análise de histerese e a influência das variáveis do sistema no desempenho do condicionamento de ar, o que é essencial para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e sustentáveis. Essas experiências foram valiosas para minha formação, pois me proporcionaram uma formação mais sólida, além de despertar meu interesse por pesquisas futuras na área de refrigeração veicular e controle de sistemas.

REFERÊNCIAS

ALKINANY, A.; AL-BADRI, A.; HAMED, A. Experimental study of the split-type air conditioner with the variable-speed compressor, variable-speed supply fan, and electronic expansion valve. **Wasit Journal of Engineering Sciences**, v. 11, p. 57–70, dez. 2023. DOI: [10.31185/ejuow.Vol11.Iss3.458](https://doi.org/10.31185/ejuow.Vol11.Iss3.458).

BHATTI, M. S. Riding in Comfort, Part 2: Evolution of Automotive Air Conditioning. **ASHRAE Journal**, v. 41, n. 8, p. 51–57, 1999. Disponível em: <https://www.ashrae.org/file%20library/about/mission%20and%20vision/ashrae%20and%20industry%20history/evolution-of-automotive-heating-riding-in-comfort-part-ii.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

CAVALLARO, A.; BULLARD, C. Effects of Varying Fan Speed on a Refrigerator/Freezer System. **ACRC**, jul. 1994.

CHAPRA, S. C. **Métodos Numéricos Aplicados com MatLab para Engenheiros e Cientistas**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHEN, Y.; DENG, S.; XU, X.; CHAN, M. A study on the operational stability of a refrigeration system having a variable speed compressor. **International Journal of Refrigeration**, v. 31, n. 8, p. 1368–1374, 2008. ISSN 0140-7007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.04.012>.

CONSTANTINO, M. C.; KANIZAWA, F. T. Evaluation of pressure drop effect on COP of single-stage vapor compression refrigeration cycles. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 28, p. 101048, 2022. ISSN 2451-9049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101048>.

DA SILVA, D.; MELO, C. **A Perspective on R&D&I Activities in the Brazilian Mobile Air Conditioning Market**. In: 16TH Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Vitória, ES, Brazil: [s. n.], 2016. Disponível em: <https://refridynamics.ufsc.br/>. Acesso em: 10 out. 2024.

DA SILVA, D.; OLIVEIRA, I. D.; JULIANI, A.; CORDOVA, G. M. D. Avaliação do desempenho térmico de sistemas de ar condicionado automotivo: uma abordagem experimental combinando primeira e segunda leis da termodinâmica. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.**, v. 46, p. 703, 2024. DOI: [10.1007/s40430-024-05283-1](https://doi.org/10.1007/s40430-024-05283-1). Acesso em: 28 nov. 2024.

DA SILVA, D. L.; DE OLIVEIRA, I. S.; JULIANI, A. D. P.; FISCHER, F.; DE CORDOVA, G. M. **Experimental Thermal Performance Evaluation of an Automotive Air Conditioning System**. In: COBEM. Florianópolis: [s. n.], jan. 2023. DOI: [10.26678/ABCM.COBEM2023.COB2023-1460](https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2023.COB2023-1460).

DATTA, S.; DAS, P. K.; MUKHOPADHYAY, S. **Effect of Refrigerant Charge, Compressor Speed and Air Flow Through the Evaporator on the Performance of an Automotive Air Conditioning System**. In: INTERNATIONAL Refrigeration and Air Conditioning Conference. [S. l.: s. n.], jul. 2014. Disponível em: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2469&context=iracc#:~:text=Increase%20of%20blower%20speed%20induces,are%20direct%20outcome%20of%20that.&text=Figure%204%20describes%20the%20effect,compressor%20speeds%20and%20blower%20settings..> Acesso em: 13 jun. 2025.

DE OLIVEIRA, I. S. **Avaliação do desempenho energético de sistemas automotivos de condicionamento de ar**. In: 33º Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica. Santa Catarina, Brazil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2023. Acesso em: 10 nov. 2024.

DE OLIVEIRA, I. S. **Deteção preditiva de falhas em sistemas de refrigeração de contêineres com ênfase em vazamentos de carga de fluido refrigerante**. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/266640>. Acesso em: 21 ago. 2025.

FARRINGTON, R.; RUGH, J. **Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range**. In: EARTH Technologies Forum. Washington, D.C.: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2000.

JULIANI, A. D.; JASKOWIAK, P. A.; DA SILVA, D. L. **Estratégias de Controle para Sistemas de Condicionamento de Ar Automotivo**. In: III Congresso Nacional das Engenharias da Mobilidade. Joinville, Brazil: CONEMB, 2017.

JUNIOR, A. C. K. **Modelagem matemática e simulação de um condensador do tipo tubo aleta empregado em um condicionador de ar doméstico**. 2023. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brazil. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/245221>. Acesso em: 28 nov. 2024.

MASCHE, M.; IANNICIELLO, L.; TUŠEK, J.; ENGELBRECHT, K. Impact of hysteresis on caloric cooling performance. **International Journal of Refrigeration**, v. 121, p. 302–312, 2021. ISSN 0140-7007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.10.012>.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Frota Nacional (Novembro de 2024)**. 2024.

Disponível em: [https://www.gov.br/transportes/pt-](https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024)

[br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024](https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024). Acesso em: 12 dez. 2024.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PHILLIPPI, G. **Basic Thermodynamics of Reciprocating Compression**. In: TURBOMACHINERY Laboratory, Texas A&M Engineering Experiment Station.

[S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/147252848.pdf>.

Acesso em: 13 jun. 2025.

RANGEL, S. **Simulação transiente de um sistema de refrigeração doméstico -**

Análise paramétrica. 2007. f. 102. Diss. (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil.

REVE. **Laboratório de Refrigeração Veicular**. 2025. Disponível em:

<https://refridynamics.ufsc.br/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeration and Air Conditioning**. 2. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 1982.

STOECKER, W. F. **Industrial Refrigeration Handbook**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

ZHANG, Y.; YAO, Q.; LUO, B.; CHEN, N. Robust control of uncertain asymmetric hysteretic nonlinear systems with adaptive neural network disturbance observer. **Applied Soft Computing**, v. 167, p. 112387, 2024. ISSN 1568-4946. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112387>.