

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALINNE GERONIMO

**APRIMORAMENTO DA BANCADA DIDÁTICA PORTÁTIL DE
REFRIGERAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

ALINNE GERONIMO

APRIMORAMENTO DA BANCADA DIDÁTICA PORTÁTIL DE REFRIGERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

APRIMORAMENTO DA BANCADA DIDÁTICA PORTÁTIL DE REFRIGERAÇÃO

Alinne Geronimo

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 07/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Ms. Paulo Cezar Adamczuk
(UTFPR)

Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay
(UTFPR)

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

Aos meus pais, que dedicaram grande parte de suas vidas à minha.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Agradeço aos meus pais, Arnaldo e Rosana, que sempre acreditaram em mim, me apoiaram, me motivaram e muitas vezes se sacrificaram para me proporcionar tudo o que precisei.

Ao meu irmão Rafael, minha irmã Vanessa, meus primos Ricardo e Joana, que sempre estiveram presente me apoiando.

Ao meu orientador, Luiz Carlos Martinelli Júnior, pela paciência, sabedoria e dedicação para a realização deste trabalho.

A todas as minhas amigas que me apoiaram e fizeram parte desta jornada, contribuindo direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho, Nayssa, Ketlen e Iasmim, muito obrigada!

RESUMO

GERONIMO, Alinne. Aprimoramento da Bancada Didática Portátil de Refrigeração. 2017 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este presente trabalho tem por objetivo apresentar o detalhamento da implementação de um sistema de controle de temperatura em uma bancada de refrigeração e seu impacto no ciclo. Tal bancada era destinada ao ensino básico da calorimetria em sala de aula de ensino médio e fundamental assim, este trabalho teve por objetivo tornar possível seu uso e estudo para termodinâmica em ensino superior. Para isto, foram utilizados equipamentos que possibilitaram controlar a temperatura no reservatório do condensador ou do evaporador. Foram realizados experimentos com três temperaturas distintas em cada reservatório e, então, montados os gráficos dos ciclos. Observou-se que os ciclos apresentam o mesmo comportamento independente a temperatura escolhida como constante, nos experimentos realizados no evaporador o coeficiente de performance cai conforme o condensador esquenta, já nos experimentos realizados a temperatura constante no condensador, o coeficiente de performance cai conforme a temperatura do evaporador diminui. Para realizar a análise dos ciclos obtidos comparando-os com o ciclo teórico, foram escolhidos um experimento mantendo a temperatura constante no evaporador e um no condensador assim, foi possível verificar que o ciclo real segue o teórico, porém com perdas. O coeficiente de performance do ciclo teórico e real seguiram a mesma curva, porém os resultados numéricos do ciclo real devem ser desconsiderados devido ao manômetro da saída do evaporador estar avariado. Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar a calibração dos manômetros.

Palavras-chave: Refrigeração. Ciclo. Temperatura. Coeficiente de Performance.

ABSTRACT

GERONIMO, Alinne. Improvement of the Didactic Portable Refrigeration Bench. 2017 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This project presents the detailed implementation of a temperature control system in a refrigeration bench and its impact on the refrigeration cycle. Such a bench was intended for the basic teaching of calorimetry in middle and high school, so this project aimed to make possible its use and study for thermodynamics in higher education. For this purpose, an equipment was used to control the temperature in the condenser or evaporator reservoir. Experiments were carried out with three different temperatures in each reservoir, and then the graphs of the cycles were assembled. It was observed that the cycles have the same behavior, independent of the temperature chosen as constant. In the experiments carried out on the evaporator, the performance coefficient drops as the condenser warms up, while in the experiments carried out at constant temperature in the condenser, the performance coefficient drops as the evaporator temperature decreases. To perform the analysis of the obtained cycles comparing them with the theoretical cycle, an experiment was chosen maintaining the constant temperature in the evaporator and one in the condenser, it was possible to verify that the real cycle follows the theoretical, but with losses. The coefficient of performance of the theoretical and real cycle followed the same curve, but the numerical results of the real cycle should be disregarded because the manometer of the evaporator output is malfunctioning. For future work, it is recommended to calibrate the pressure gauges.

Key-words: Refrigeration. Cycle. Temperature. Performance coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Painel da Bancada Didática de Treinamento em Refrigeração ALGETEC.....	18
Figura 2 - Esquema de um Diagrama de Mollier (P _{xh}) para um refrigerante.	22
Figura 3 – Esquema de funcionamento do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.....	23
Figura 4 - Diagrama pressão-entalpia do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.....	24
Figura 5 - Diagrama pressão-entalpia do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.....	25
Figura 6 – Fases de transmissão de calor no condensador.....	26
Figura 7 – Bancada didática existente.....	29
Figura 8 - Vistas da Bancada Didática Portátil de Refrigeração existente.	30
Figura 9 – Comparativo furo de saída da bancada inicialmente e após a modificação.....	33
Figura 10 – Válvulas de saída da água dos reservatórios.....	33
Figura 11 – Bancada durante a realização de experimentos – condensador a 25°C.....	34
Figura 12 – Conexões elétricas do controlador microprocessado CT-10 plus, Sensym.....	34
Figura 13 – Bomba d’água submersa 520l/h da marca Sarlo Better.	35
Figura 14 – Bancada configurada para controlar a temperatura do condensador.....	36
Figura 15 – Bancada configurada para controlar a temperatura do evaporador.....	36
Figura 16 – Lógica escolhida para a operação do controlador microprocessado.....	37
Figura 17 – Ciclos de refrigeração real e Coeficiente de performance para T _c = 35°C.....	43
Figura 18– Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance teóricos para T _c = 35°C.....	46
Figura 19 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para T _c = 30°C.....	49
Figura 20 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para T _c = 25°C.....	52
Figura 21 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para T _e = 15°C.	55
Figura 22 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para T _e = 10°C.	58
Figura 23 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance teórico para T _e = 10°C.....	60
Figura 24 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para T _e = 5°C.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas utilizadas para programar o controlador microprocessado.	37
Tabela 2 - Medições escolhidas do experimento com o condensador a 35°C	41
Tabela 3 - Resultado do cálculo do COP real para $T_c = 35^\circ\text{C}$	42
Tabela 4 – Dados para análise teórica do ciclo com $T_c=35^\circ\text{C}$	44
Tabela 5 – Resultado do cálculo do COP teórico para $T_c = 35^\circ\text{C}$	45
Tabela 6 – Medições escolhidas do experimento com o condensador a 30°C.....	47
Tabela 7 – Resultado do cálculo do COP real para $T_c = 30^\circ\text{C}$	48
Tabela 8 – Medições escolhidas do experimento com o condensador a 25°C.....	50
Tabela 9 – Resultado do cálculo do COP real para $T_c = 25^\circ\text{C}$	51
Tabela 10 – Medições escolhidas do experimento com o evaporador a 15°C.....	53
Tabela 11 – Resultado do cálculo do COP real para $T_e = 15^\circ$	54
Tabela 12 – Medições escolhidas do experimento com o evaporador a 10°C.....	56
Tabela 13 – Resultado do cálculo do COP teórico para $T_e = 10^\circ\text{C}$	57
Tabela 14 – Dados para análise teórica do ciclo com $T_e=10^\circ\text{C}$	59
Tabela 15 – Resultado do cálculo do COP teórico para $T_e = 10^\circ\text{C}$	59
Tabela 16 – Medições escolhidas do experimento com o evaporador a 5°C.....	61
Tabela 17 – Resultado do cálculo do COP real para $T_e = 5^\circ\text{C}$	62
Tabela 18 - Dados obtidos no experimento com o condensador a 35°C.....	72
Tabela 19 – Dados obtidos no experimento com o condensador a 30°C.....	72
Tabela 20 – Dados obtidos no experimento com o condensador a 25°C.....	73
Tabela 21 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 15°C	74
Tabela 22 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 10°C	75
Tabela 23 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 5°C	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivo Específico.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS.....	21
2.2	FLUIDOS REFRIGERANTES.....	21
2.3	CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR.....	22
2.3.1	Ciclo Ideal de Refrigeração por Compressão de Vapor.....	23
2.3.2	Ciclo Real de Refrigeração por Compressão de Vapor.....	24
2.4	PRINCIPAIS COMPONENTES DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO.....	25
2.4.1	Compressor.....	25
2.4.2	Condensador.....	26
2.4.3	Dispositivo de Expansão.....	27
2.4.4	Evaporador.....	27
2.5	COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO CICLO (COP).....	28
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	BANCADA EXISTENTE.....	29
3.1.1	Descrição da Bancada Existente.....	29
3.1.2	Componentes da Bancada Existente.....	30
3.1.3	Funcionamento da Bancada Existente.....	31
3.2	MATERIAIS.....	32
3.3	BANCADA APRIMORADA.....	32
3.3.1	Controlador Microprocessado CT-10 Plus Sensym.....	34
3.3.2	Termopar Tipo “J” da marca MS Instrumentação.....	35

3.3.3	Bomba Submersa Sarlo Better S520 520l/h.....	35
3.4	PROCEDIMENTOS.....	35
4	RESULTADOS	41
4.1	CONDENSADOR 35°C	41
4.2	CONDENSADOR 30°C	47
4.3	CONDENSADOR 25°	50
4.4	EVAPORADOR 15°C	53
4.5	EVAPORADOR 10°C	56
4.6	EVAPORADOR 5°C	61
5	DISCUSSÕES	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69
	ANEXOS	71

1 INTRODUÇÃO

Didática, termo empregado para descrever um ramo da ciência pedagógica que visa ensinar técnicas e orientar atividades educativas, possibilitando e facilitando a aprendizagem.

Aulas práticas e de simulação são de suma importância durante qualquer curso de Engenharia, pois é nelas que o aluno tem a oportunidade de visualizar o funcionamento das teorias vistas em sala e, se deparar com problemas que serão recorrentes em sua vida profissional.

A Bancada Didática Portátil de Refrigeração, visa facilitar o aprendizado dos alunos, apresentando um ciclo real de refrigeração, no qual muitos alunos, futuramente, podem se deparar em suas vidas profissionais. Essa bancada possibilita a análise e o estudo do ciclo de refrigeração, assim os alunos podem realizar experimentos, observar e aprender com seus resultados.

De acordo com Zukowski (1999, apud QUEIROZ), o princípio dos ciclo de refrigeração é transferir calor de um reservatório de baixa temperatura para um reservatório de mais alta temperatura.

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor pode ser estudado em partes ou realizando uma análise entre o ciclo real e o ciclo ideal de refrigeração. O ciclo ideal é o que apresenta maior eficiência operando nas mesmas condições do ciclo real.

Os principais componentes que compõem um ciclo de refrigeração e suas funções no ciclo serão tratados a seguir.

O condensador é o componente responsável por transformar o refrigerante quente e gasoso, que vem a alta pressão do compressor, em líquido, rejeitando o calor até atingir a temperatura de condensação e todo o vapor se tornar líquido. Então o líquido refrigerante segue para o dispositivo de expansão.

Os dispositivo de expansão tem como função reduzir a pressão do refrigerante e controlar sua vazão na entrada do evaporador. Há dois dispositivos de expansão mais utilizados, são eles a válvula de expansão e o tubo capilar.

O evaporador é responsável por absorver o calor do ambiente a ser refrigerado. O líquido refrigerante absorve o calor do ambiente até evaporar e então segue para o compressor. No compressor o refrigerante expandido é recuperado para que possa ser reutilizado inúmeras vezes, fechando, assim, o ciclo.

Este trabalho visa ajustar uma bancada didática portátil de refrigeração já existente, com a finalidade de melhorar seu uso no ensino de termodinâmica. Nela vários ensaios poderão ser realizados, com o intuito de ensinar na prática, o funcionamento do sistema de refrigeração e a influência da temperatura na eficiência do sistema.

1.1 OBJETIVOS

São apresentados os principais objetivos do trabalho em questão e o que se pretende fazer para alcançar tais objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Atualmente, a bancada didática existente é utilizada em sala de aula para demonstrar para alunos de ensino médio e fundamental o funcionamento básico de um ciclo de refrigeração, exemplificando a teoria vista em sala de aula e evidenciando que o condensador esquenta e o evaporador esfria durante o funcionamento da bancada.

O objetivo geral deste trabalho é ajustar a Bancada Didática Portátil de Refrigeração, já existente, para que a mesma seja utilizada também em cursos de graduação, com a finalidade de realizar ensaios para a observar o comportamento do ciclo de refrigeração quando o condensador ou o evaporador são mantidos a uma temperatura constante, exemplificando o que pode ser estudado com a bancada e esclarecendo, em seguida, o que se pretende implantar para se fazer possível tal análise.

1.1.2 Objetivo Específico

Com o objetivo de aprimorar a bancada já existente, deve-se adicionar os equipamentos necessários para estabelecer as seguintes funções:

- Circulação de água por meio de bomba d'água, no condensador ou evaporador, de acordo com a escolha do operador da bancada.

- Controlar a temperatura da água. Para que se torne possível manter a temperatura, do condensador ou do evaporador, constante para realizar estudos sobre o impacto desta temperatura em todo o sistema de refrigeração, variando a troca de água no respectivo reservatório por meio de controlador de temperatura digital.
- Analisar, através de gráficos, o impacto da temperatura constante do evaporador ou condensador no ciclo e no coeficiente de performance do sistema de refrigeração

1.2 JUSTIFICATIVA

O mercado de trabalho vem buscando profissionais cada vez mais capacitados e, para atender esta demanda, as universidades estão sempre na busca de qualidade no ensino.

Nos cursos de engenharia, as atividades práticas são de grande importância, uma vez que elas possibilitam uma preparação dos estudantes para o mercado de trabalho, ensinando-os a lidar com problemas e situações práticas consideradas recorrentes no dia a dia de um profissional.

De acordo com Pekelman e Mello (2004), se o engenheiro deve ser capaz de adaptar seus conhecimentos às necessidades humanas, nada mais justo, que no decorrer do seu curso de Engenharia, lhe seja proporcionado a possibilidade de se deparar e manipular as principais tecnologias básicas em condições próximas, simuladas, às do mundo real, ou melhor, profissional.

Segundo Pekelman e Mello (2004):

Além de aproximar o aluno da ciência e tecnologia, as ferramentas do engenheiro, no atendimento às necessidades humanas, os laboratórios devem também servir como treinamento da criatividade, ou seja, deve permitir ao aluno desenvolver diferentes aplicações utilizando as mesmas ferramentas e exteriorizar este ambiente para o mundo real. (PEKELMAN; MELLO, 2004, p. 02).

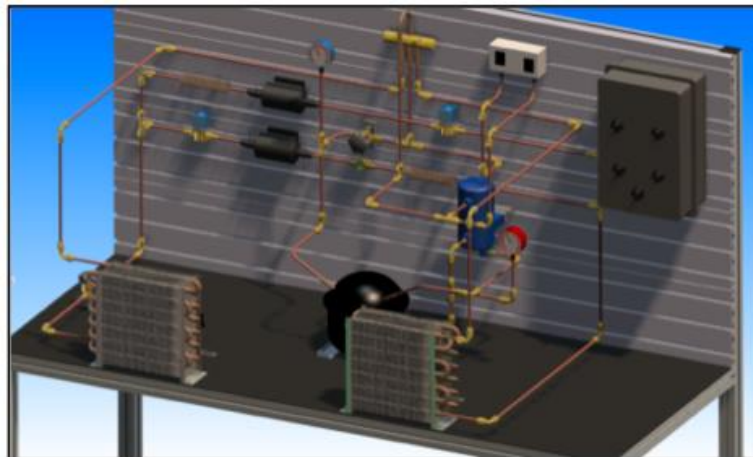
De acordo com Guedes e Fernandes (2006, apud BRAGA) os estudantes motivam-se de modo significativo e adquirem familiaridade com os processos das sequências operacionais otimizadas.

Assim, este trabalho justifica-se pela importância de melhorar, cada vez mais, as aulas práticas e simulações ofertadas para os alunos, buscando melhorar habilidades de criatividade, lógica e trabalho em equipe, forçando os alunos a se depararem com problemas e situações reais e solicitando uma solução.

Para o bom aproveitamento de uma bancada didática, a mesma deve apresentar seus componentes de forma clara e visível, para que, durante seu funcionamento, os alunos possam compreender o ciclo e observar o máximo de informação possível.

Tendo isto em vista, ao realizar uma busca por bancadas didáticas de refrigeração já existentes no mercado, algumas bancadas se sobressaem, uma delas é a Bancada Didática de Treinamento em Refrigeração – ALGETEC. Esta é uma bancada de estudos de refrigeração e ar condicionado. Ela apresenta porte médio/grande e deve ser mantida em laboratório. Esta bancada é completa e apresenta todos os componentes reais existentes no ciclo de refrigeração e diversos ensaios podem ser realizados.

Figura 1 – Painel da Bancada Didática de Treinamento em Refrigeração ALGETEC



Fonte: ALGETEC - Bancada Didática De Treinamento em Refrigeração.

Ao comparar bancadas já existentes com a bancada que será aprimorada ao longo deste trabalho, é possível notar que não há uma bancada didática portátil de refrigeração similar a estudada, há apenas bancadas de porte grande para laboratórios.

A maior vantagem apresentada pela bancada em estudo é sua portabilidade. Pois ela apresenta dimensões e peso adequados para seu transporte, possibilitando sua utilização dentro da sala de aula, tanto em escolas para o estudo de calorimetria, quanto em cursos técnicos e superiores, para o estudo da termodinâmica.

Assim, este trabalho justifica-se não só por se tratar do aprimoramento de um produto inovador (com patente requerida) que pode ser utilizado em qualquer ambiente, mas também, por aumentar o número de ensaios possíveis, promovendo a melhora da qualidade de ensino que será passada aos alunos.

Justifica-se também pela importância das aulas práticas na formação de engenheiros e a contribuição positiva para a inserção dos mesmos no mercado de trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Tendo em vista que, este trabalho visa aprimorar a Bancada Didática Portátil de Refrigeração para a otimização e realização de experimentos e análise de resultados, visando o ensino prático de refrigeração, faz-se uma revisão bibliográfica realizando um levantamento de informações consideradas relevantes ao trabalho aqui apresentado.

2.1 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

De acordo com Silva (2005), propriedade de uma substância é qualquer característica que ela apresenta e que possa se observar. As propriedades termodinâmicas mais comuns são: temperatura (T), pressão (P), volume específico (v) e massa específica (ρ). Além destas, existem outras, fundamentais para a análise de transferência de calor, trabalho e energia, que não são mensuráveis diretamente: energia interna (u), entalpia (h) e entropia (s). Estas propriedades são definidas a seguir.

Segundo Silva (2005), energia interna é a energia que a matéria possui devido ao movimento e/ou forças intermoleculares

A entalpia é a combinação das propriedades $u + Pv$, ela foi assim nomeada para simplificar o estudo e a utilização desta combinação. Stoecker e Jones (1985), dizem que a variação da entalpia é igual ao calor adicionado ou removido em um processo com pressão constante.

Já a entropia, de acordo com Çengel (2006), pode ser vista como uma medida da desordem molecular. A medida aumenta a desordem de um sistema, as posições das moléculas se tornam mais imprevisíveis e a entropia aumenta.

2.2 FLUIDOS REFRIGERANTES

O fluido refrigerante é utilizado para absorver o calor do ambiente a ser refrigerado.

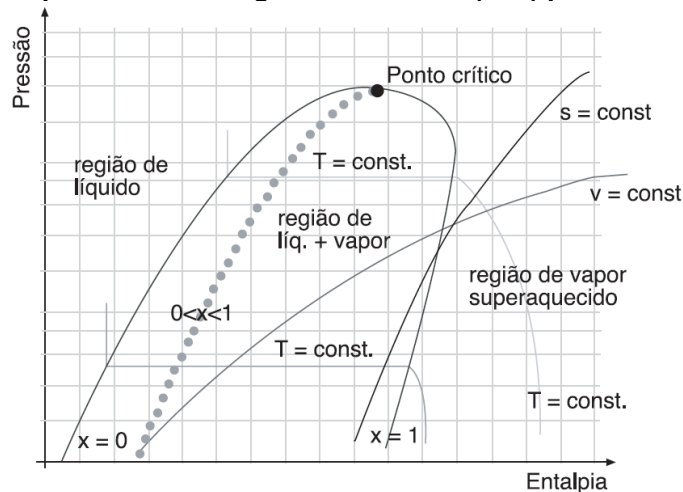
Para cada sistema de refrigeração deve-se escolher o fluido refrigerante que melhor atenda às necessidades do sistema. De acordo com Van Wylen (1995), os

dois aspectos mais importantes na escolha de um refrigerante são a temperatura na qual se deseja a refrigeração e o tipo de equipamento a ser usado.

É de extrema importância que o usuário conheça as características e propriedades físicas do fluido refrigerante, tais como toxicidade, inflamabilidade, estabilidade térmica, reações com outros materiais, entre outros. Para assim, ao utilizar tal refrigerante, tomar as medidas cabíveis de segurança.

Segundo Silva (2005), as propriedades termodinâmicas de uma substância são frequentemente representadas em diagramas. O diagrama mais utilizado é o Diagrama de Mollier (P-h) que está retratado na figura 2.

Figura 2 - Esquema de um Diagrama de Mollier (P-h) para um refrigerante.



Fonte: Silva, 2005, p. 23.

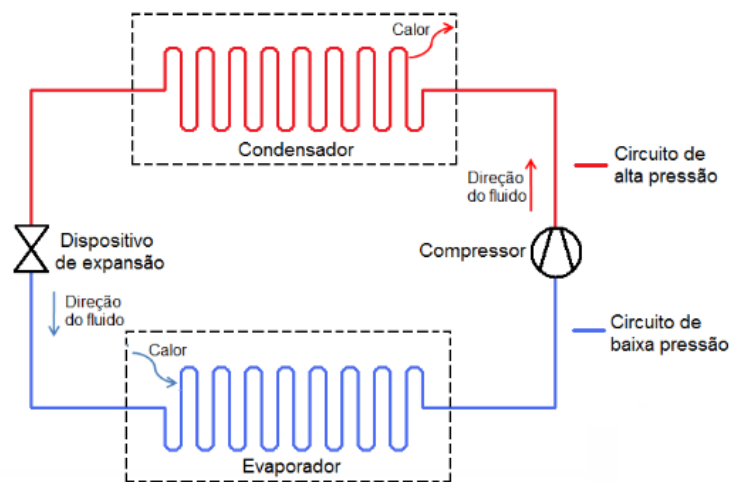
2.3 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

Este item trata dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor. Primeiramente será definido o ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor, ou seja, o teórico. Depois, será definido o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor onde será realizada uma comparação entre estes dois ciclos.

2.3.1 Ciclo Ideal de Refrigeração por Compressão de Vapor

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é o mais utilizado em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar. Este ciclo apresenta quatro processos que podem ser observados na figura 3 e serão descritos a seguir.

Figura 3 – Esquema de funcionamento do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Penteado, 2009, p 21.

Processo 1 – 2: Compressão isentrópica no compressor. O refrigerante chega no compressor em forma de vapor saturado e então é comprimido de forma isentrópica e sua temperatura sobe a uma temperatura maior que a ambiente.

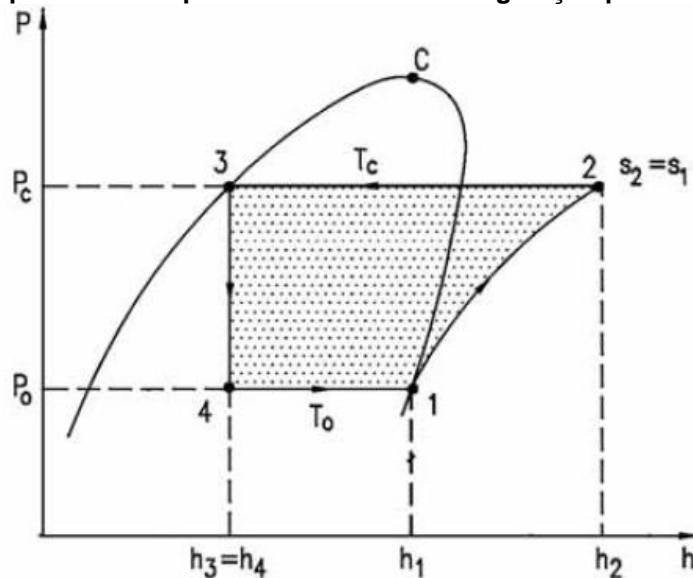
Processo 2 – 3: O refrigerante chega do compressor para o condensador onde, a uma pressão constante, seu calor é rejeitado até que o refrigerante condense totalmente, se tornando líquido.

Processo 3 – 4: O refrigerante vindo do condensador agora chega no dispositivo de expansão, onde ele é expandido até sua pressão diminuir chegando na pressão desejada para entrar no condensador. Durante a expansão do refrigerante, sua temperatura cai abaixo da temperatura desejada no ambiente a ser resfriado.

Processo 4 – 1: O refrigerante chega, então, ao evaporador, onde, a uma pressão constante, ele absorve a energia, em forma de calor, vinda do espaço a ser refrigerado, até evaporar. O refrigerante, então, segue para o compressor, fechando o ciclo.

Os processos também podem ser observados na figura 4, apresentada a seguir:

Figura 4 - Diagrama pressão-entalpia do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Silva, 2005, p 39.

2.3.2 Ciclo Real de Refrigeração por Compressão de Vapor

O ciclo real de refrigeração por compressão a vapor apresenta algumas diferenças em relação ao ciclo ideal, devido as perdas e a ineficiência que ocorre nos processos do ciclo.

De acordo com Çengel (2012), no ciclo ideal, o refrigerante sai do evaporador para o compressor em forma de vapor saturado, porém na prática, não há como controlar o estado do refrigerante com tanta precisão. Assim, para garantir que o refrigerante não entre no compressor em forma líquida, é aconselhado criar o sistema para que o refrigerante esteja ligeiramente superaquecido na entrada do compressor, garantindo que o refrigerante se encontre totalmente em forma de vapor.

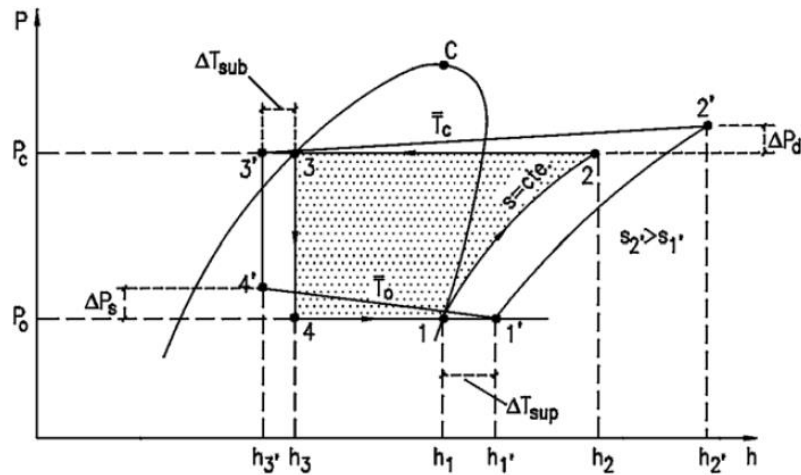
No ciclo real também há queda de pressão devido ao atrito do fluido e da transferência de calor entre o fluido e o ambiente, como o ciclo é pequeno, estas perdas podem ser significativas e afetar na eficiência do sistema.

Também há diferenças na saída do condensador, que, no ciclo ideal o refrigerante sai como líquido saturado porém, no ciclo real, há uma queda de pressão no condensador, o que prejudica a transformação do fluido, de vapor para líquido.

Assim é necessário sub-resfriar o fluido refrigerante de alguma forma, para então passar pela válvula de expansão ou tubo capilar.

A comparação do ciclo real de refrigeração por compressão de vapor com o ideal, pode ser vista na figura 5.

Figura 5 - Diagrama pressão-entalpia do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Silva, 2005, p 40.

2.4 PRINCIPAIS COMPONENTES DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO

Neste tópico, serão apresentados os principais componentes encontrados em um sistema de refrigeração.

2.4.1 Compressor

O compressor é utilizado no ciclo de refrigeração por compressão a vapor, para recuperar o refrigerante expandido, comprimindo-o e devolvendo suas propriedades iniciais, para que o fluido possa percorrer o ciclo novamente.

O ciclo de refrigeração pode funcionar sem o compressor. O fluido entraria diretamente no dispositivo de expansão e, ao sair do evaporador, seria descartado sendo descarregado diretamente na atmosfera. Assim, a cada ciclo deveria repor o refrigerante, tornando o sistema inviável, tanto pelo custo de tal reposição, quanto pelo impacto ambiental causado pela liberação do fluido refrigerante na atmosfera. Sendo

assim, é possível visualizar a importância do compressor em um sistema de refrigeração.

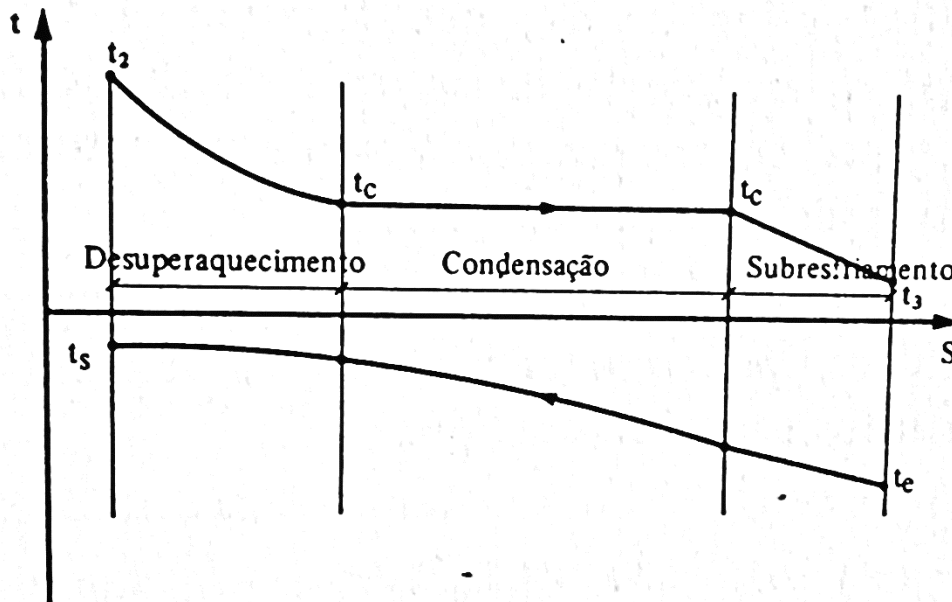
De acordo com Martinelli (2008), os principais tipos de compressores utilizados em sistemas de refrigeração são: Compressor Alternativo (de êmbolo); Compressor de Parafuso; Compressor de Palheta; Compressor Centrífugo e Compressor Scroll.

2.4.2 Condensador

O condensador tem como finalidade resfriar e condensar o fluido refrigerante, para que ele assuma a forma líquida. Para isto, ele utiliza ar ou água, e as vezes os dois, como meio de refrigerar o fluido refrigerante.

De acordo com Costa (1982), a transmissão de calor em um condensador caracteriza-se em três fases distintas: o desuperaquecimento, a condensação e o subresfriamento. Essas fases podem ser observadas na figura 6.

Figura 6 – Fases de transmissão de calor no condensador.



Fonte: Costa, 1982, p 89. MELHORAR IMAGEM

2.4.3 Dispositivo de Expansão

Os dispositivos de expansão mais utilizados em sistemas de refrigeração por compressão a vapor, são o tubo capilar e a válvula de expansão.

2.4.3.1 Tubo capilar

De acordo com Martinelli (2008), o tubo capilar é um dispositivo de expansão que é responsável por diminuir a pressão do fluido refrigerante e regular sua vazão na entrada do evaporador. Normalmente, os tubos capilares são utilizados em sistemas de refrigeração de pequeno porte.

Para garantir um bom funcionamento do sistema de refrigeração, uma boa escolha e dimensionamento do tubo capilar deve ser realizada. Também deve-se tomar cuidados no processamento do sistema, pois a presença da umidade e partículas sólidas, podem causar a obstrução do tubo capilar, prejudicando e comprometendo o funcionamento do sistema.

2.4.3.2 Válvula de expansão

A válvula de expansão é um dispositivo que expande o fluido refrigerante e gerencia sua vazão, o diâmetro onde o fluido refrigerante passa pode ser regulado.

As válvulas de expansão podem ser divididas em manuais e automáticas, as manuais são mais simples e normalmente utilizadas como by-pass das automáticas. As válvulas de expansão automáticas apresentam uma ótima precisão e mantem a temperatura no evaporador praticamente constante.

2.4.4 Evaporador

O evaporador é um trocador de calor, onde o refrigerante absorve o calor do ambiente a ser resfriado. Segundo Stoecker e Jones (1985), os evaporadores onde o refrigerante muda de fase dentro dos tubos e refrigera o fluido que passa por fora dos tubos são comumente chamados de evaporadores de expansão direta.

2.5 COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO CICLO (COP)

De acordo com Silva (2005), o coeficiente de performance do ciclo (COP), é uma parâmetro importante na análise das instalações frigoríficas. Mesmo sendo o COP do sistema real sempre menor que do teórico, para as mesmas condições de operação, pode-se, com o ciclo teórico, verificar que parâmetros influenciam no desempenho do sistema. O COP é definido por:

$$COP = \frac{\text{Energia Util}}{\text{Energia Gasta}} = \frac{Q_o}{\dot{W}_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

O coeficiente de performance do ciclo pode sofrer influencias de vários fatores, os principais são a temperatura de evaporação, a temperatura de condensação, o subresfriamento e o superaquecimento.

3 METODOLOGIA

3.1 BANCADA EXISTENTE

Neste tópico será apresentada a Bancada Didática Portátil de Refrigeração já existente, seus componentes e seu funcionamento.

3.1.1 Descrição da Bancada Existente

A atual Bancada Didática Portátil de Refrigeração foi projetada, construída e possui patente requerida (BR1020160237033) pelo Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Jr.

A Bancada Didática Portátil de Refrigeração é um equipamento de refrigeração projetado para ser leve e portátil, possibilitando seu traslado para salas de aula e/ou treinamento. Suas dimensões e peso possibilitam o fácil transporte, dispensando a necessidade de maiores cuidados. Na Bancada são realizados ensaios didáticos ligados ao ensino de calorimetria, com a finalidade de demonstrar para alunos de ensino fundamental e médio o funcionamento básico de um sistema de refrigeração, indicando o reservatório que esquentava (condensador) e o que esfria (evaporador). Na figura 7 a bancada existente é apresentada.

Figura 7 – Bancada didática existente.



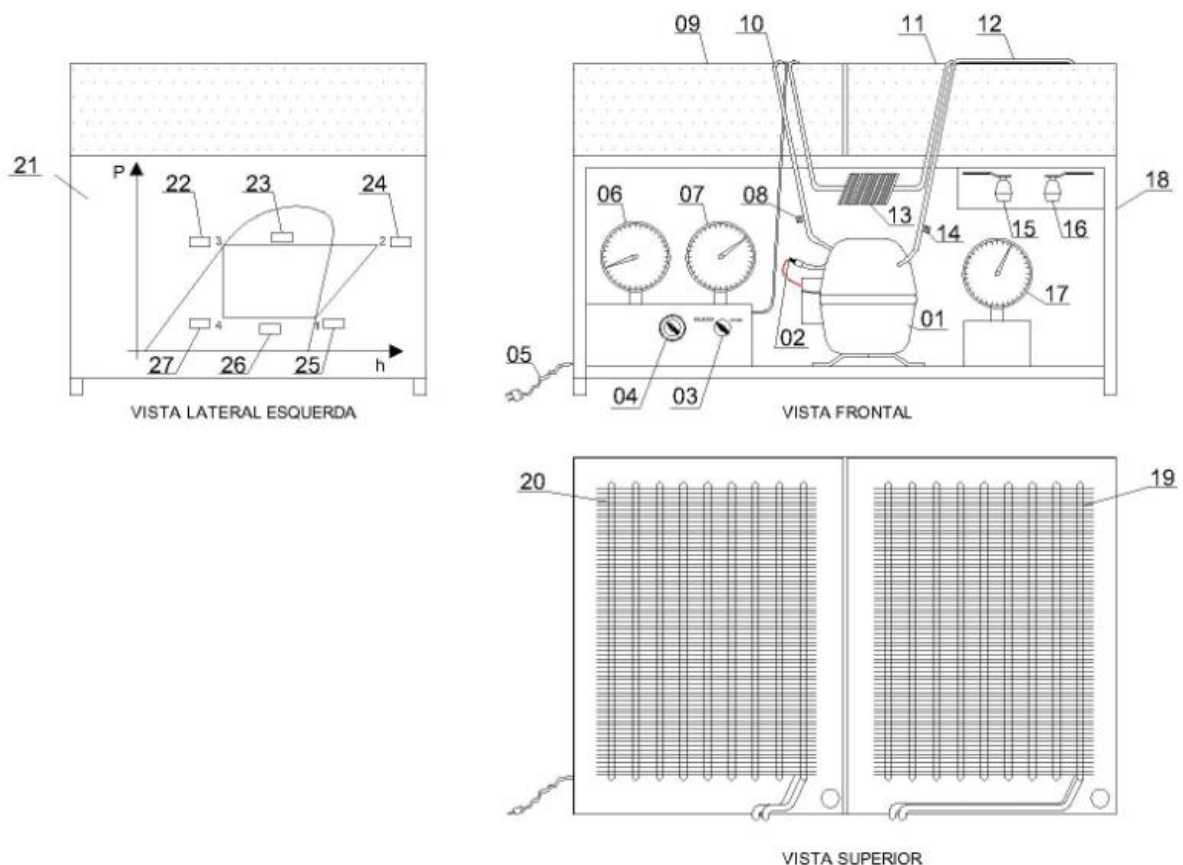
Fonte: Arquivo pessoal.

3.1.2 Componentes da Bancada Existente

De acordo com Martinelli (2016), a bancada é composta por um compressor hermético [01] com proteção por pressostato [02], um tubo capilar [13] dimensionado para o equipamento, um condensador [19] e um evaporador [20] ambos trocadores de calor aletados ligados por tubos de cobre [10] e [12] ao sistema, três manômetros [06], [07] e [17], seis termômetros digitais [22], [23], [24], [25], [26] e [27] instalados em uma placa de policarbonato [21], dois reservatórios em aço inoxidável [09] e [11], um termostato de controle [04], duas torneiras para drenagem dos Líquidos Secundários [15] e [16] e ligação elétrica [03] e [05]. Estes equipamentos estão instalados sobre uma estrutura tubular de aço [18] de modo a facilitar o manejo e transporte.

Para maior compreensão da Bancada Didática de Refrigeração apresenta-se, na Figura 8, o desenho em três vistas (vista frontal, superior e lateral direita) que ilustram seu formato, disposição de componentes e o possibilitam entender seu funcionamento.

Figura 8 - Vistas da Bancada Didática Portátil de Refrigeração existente.



Fonte: Martinelli, 2016.

O compressor instalado nesta bancada é da marca ELGIN e modelo ECP-1085D, possui uma potência de 290W e pode trabalhar com os refrigerantes R-12, R401a, R401b e R409a.

O líquido refrigerante utilizado no sistema é o R401a (Suva™ MP39) que, de acordo com o site da Chermous, é um HCFC desenvolvido para substituir o R-12 em sistemas com temperaturas de evaporação acima de -26°C. Este líquido refrigerante possui baixa toxicidade e não é inflamável

3.1.3 Funcionamento da Bancada Existente

Segundo Martinelli (2016), a Bancada recebe energia pela sua ligação elétrica, plug tomada, é ligado pela chave Liga/Desliga. O Compressor Hermético, que é um dispositivo eletromecânico, comprime o refrigerante em estado de vapor saturado (ou superaquecido) a baixa temperatura e pressão para o Condensador. No Condensador, que está dentro do Reservatório Direito, ocorre a condensação do fluido refrigerante pela rejeição do calor para o Líquido Secundário 1. Este refrigerante, agora no estado líquido, passa pelo componente Tubo Capilar, onde ocorre a queda de pressão e temperatura até a condição desejada para o Evaporador. Ao sair do Tubo Capilar, o fluido entra no Evaporador, que está localizado dentro do Reservatório Esquerdo. Este fluido refrigerante retira calor do Líquido Secundário 2, evaporando-se. Após este processo retorna ao Compressor Hermético, reiniciando o ciclo. A temperatura do Líquido Secundário 2 pode ser controlada pela atuação do Termostato de Controle, que desliga ou liga o Compressor conforme a sua regulagem.

As pressões do fluido refrigerante no ciclo de refrigeração são apresentadas pelos manômetros. Sendo dois manômetros para altas pressões um manômetro para baixas pressões. Com a leitura dos manômetro é possível representar a perda de carga no condensador. Os Termômetros estão instalados em uma Placa de Policarbonato onde está representado um ciclo de refrigeração por compressão de vapor em um Diagrama de Mollier genérico. Estes termômetros possibilitam a leitura das temperaturas do fluido refrigerante em 04 pontos no ciclo e dos Fluidos Líquidos Secundários. Ao término das atividades, as torneiras, ao serem abertas, permitem o esvaziamento dos reservatórios. As válvulas Schrader possibilitam modificações na quantidade ou mesmo mudança de fluido refrigerante.

3.2 MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados, para ajustar a bancada, são os seguintes:

- a) Bomba d'água – para tornar possível um sistema de alimentação automática de água;
- b) Mangueiras – ligando o sistema “bomba d'água → condensador/evaporador”;
- c) Dispositivo de controle de temperatura – será o responsável em acionar o sistema de alimentação de água quando necessário;
- d) Termopar Tipo J – para realizar a medição da temperatura da água no condensador ou no evaporador;
- e) Abraçadeiras rosca sem-fim de metal – serão utilizadas para fixar a mangueira na saída da bomba d'água;
- f) Furadeira e serra-copo – serão utilizados para aumentar o diâmetro do furo de saída dos reservatórios de água do condensador e do evaporador;
- g) Válvulas globo – substituirão as atuais torneiras da bancada;
- h) Válvula plástica curta – será colocada no furo de saída dos reservatórios antes da válvula globo;
- i) Silicone vedação – Será utilizado para a vedação no contorno das válvulas plásticas;
- j) Baldes – utilizados como reservatórios, um para a água de entrada e outro para a água de saída.

3.3 BANCADA APRIMORADA

Primeiramente, foram retiradas as torneiras que eram utilizadas para a saída da água dos reservatórios do condensador e do evaporador. O furo por onde a água saía foi aumentado utilizando uma furadeira com uma serra-copo para aço inox e, então, no lado de trás da bancada, foi feita a instalação da válvula plástica curta seguida da válvula globo, como mostram as imagens 9 e 10.

Figura 9 – Comparativo furo de saída da bancada inicialmente e após a modificação



Fonte: Arquivo pessoal.

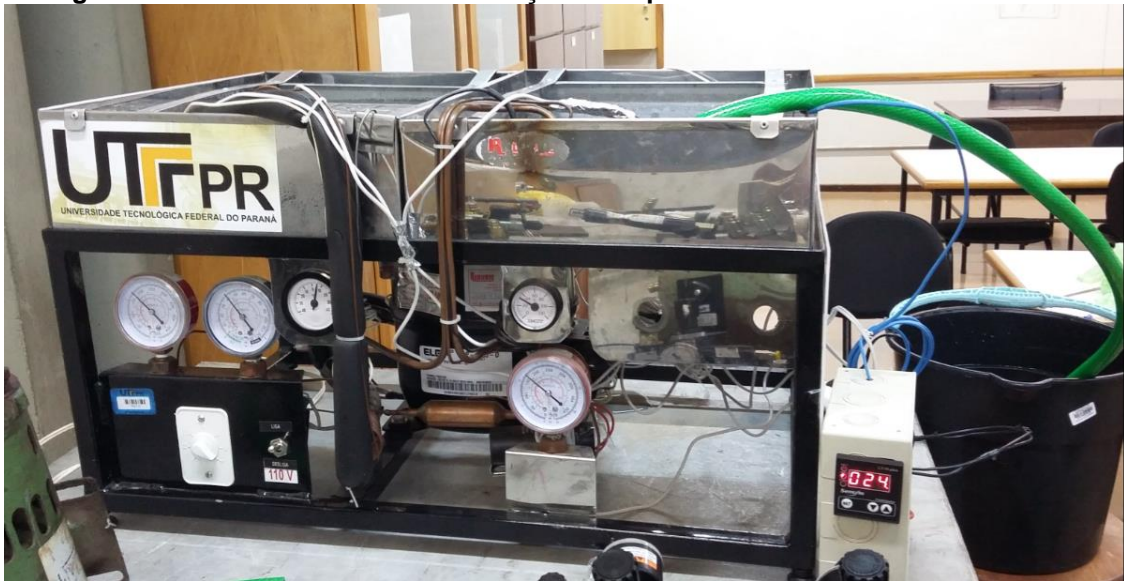
Figura 10 – Válvulas de saída da água dos reservatórios.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para fazer o controle de temperatura do evaporador ou condensador da bancada, foi utilizado o controlador microprocessado CT-10 plus da Sensym ligado a um termopar J da marca MS Instrumentação e a uma bomba d'água submersa da marca Sarlo Better modelo S520 com uma vazão máxima de 520 litros por hora. A bancada montada para a realização dos experimentos pode ser observada na figura 11.

Figura 11 – Bancada durante a realização de experimentos – condensador a 25°C.

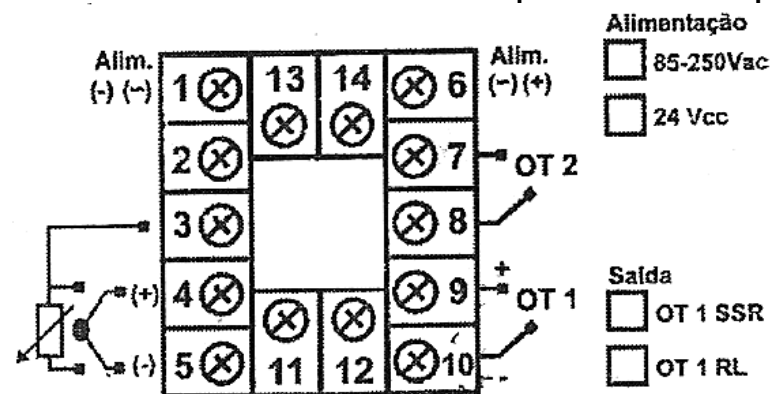


Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.1 Controlador Microprocessado CT-10 Plus Sensym

O controlador microprocessado CT-10 Plus da Sensym pode ser utilizado para efetuar medições de 0°C a 75°C e possui entrada para termopares PT-100, J, K e ni120. Este controlador efetua uma medida por segundo com uma precisão de 0,5% FE, possui duas saídas, OUT1 e OUT2, e apresenta as conexões elétricas conforme a figura 12.

Figura 12 – Conexões elétricas do controlador microprocessado CT-10 plus, Sensym.



Fonte: Manual de Instalação e Operação “Controlador Microprocessado MK-10plus ou CT-10plus – PID – Versão 1.01”

Neste trabalho, a saída OUT1 foi utilizada como controle e a OUT2 como alarme, ou seja, OUT1 atuou durante todo o ensaio e OUT2 foi acionada apenas quando a leitura das temperaturas acusassem um valor fora do intervalo escolhido.

3.3.2 Termopar Tipo “J” da marca MS Instrumentação

Para a realização dos experimentos apresentados neste trabalho foi utilizado um termopar do tipo J da marca MS Instrumentação. De acordo com a MS Instrumentação Industrial, o termopar tipo J pode atuar na faixa de temperatura de 0 a 760°C e apresenta um erro padrão de $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$

3.3.3 Bomba Submersa Sarlo Better S520 520l/h

A bomba d’água (marca Sarlo Better), indicada na figura 13, foi escolhida por trabalhar submersa e por sua vazão de 520l/h pois, durante os experimentos, aproximadamente 10 litros de água são postos no condensado e no evaporador, sendo assim, esta bomba realizaria quase uma troca de água por minuto no lado escolhido, o que foi avaliado sendo suficiente para manter a temperatura constante.

Figura 13 – Bomba d’água submersa 520l/h da marca Sarlo Better.



Fonte: arquivo pessoal.

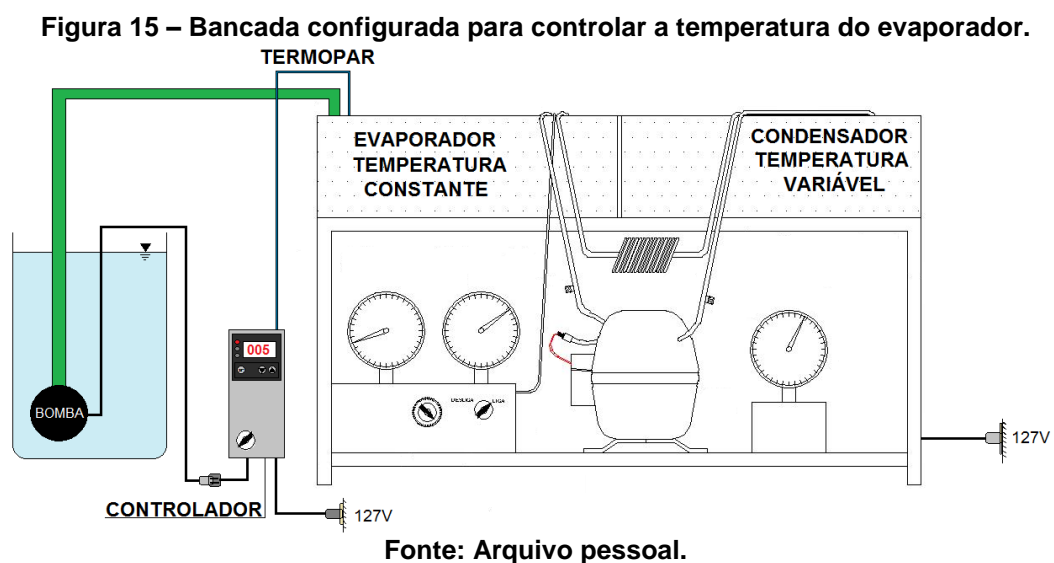
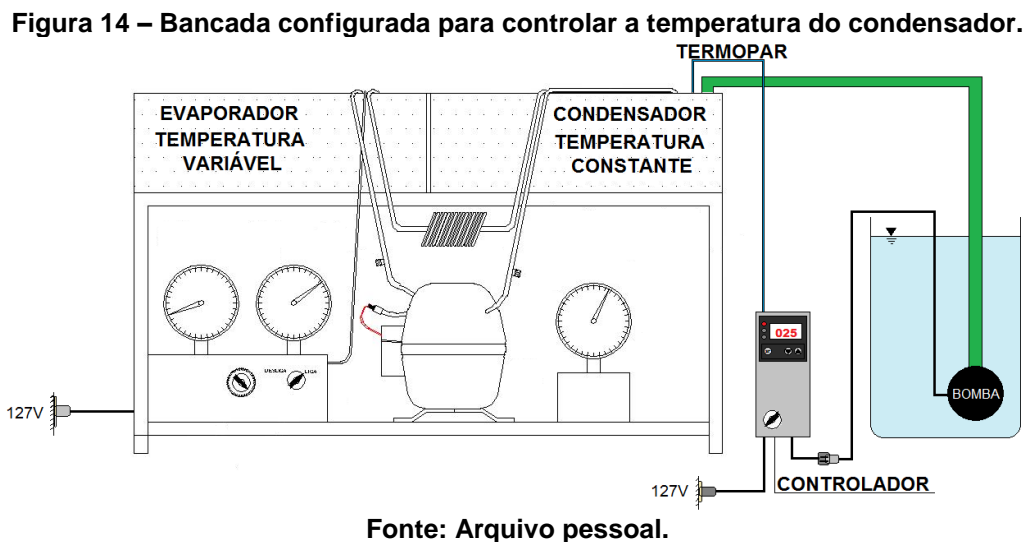
3.4 PROCEDIMENTOS

No total foram realizados seis experimentos com temperaturas distintas, três mantendo a temperatura constante no condensador e três mantendo a temperatura constante no evaporador.

Para realizar estes experimentos, o termopar foi posto no meio a ser controlado (condensador ou evaporador) e ligado no controlador microprocessado que realizou as leituras de temperatura. A água posta no meio a ser controlado estava com

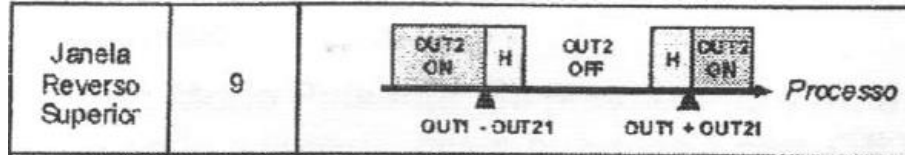
a temperatura cujo o objetivo era manter constante, e água à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) foi posta no reservatório onde a temperatura seria variável. O controlador microprocessado, foi ligado diretamente na energia e a bomba d'água foi submersa no balde com água a temperatura ambiente e foi ligada no controlador microprocessado, que foi o responsável por acionar a bomba quando a temperatura do meio a ser controlado saísse do intervalo estabelecido. A bancada foi ligada diretamente na energia.

Nas figuras 14 e 15 a montagem da bancada para os dois tipos de experimentos pode ser visualizada.



Ao programar o controlador microprocessado, a função alarme utilizada em OUT2, foi a função 9 apresentada no manual do controlador de acordo com a figura 16.

Figura 16 – Lógica escolhida para a operação do controlador microprocessado.



Fonte: Manual de Instalação e Operação “Controlador Microprocessado MK-10plus ou CT-10plus – PID – Versão 1.01”

Ajustando a histerese (H) para 1 - valor mínimo disponível no controlador - no condensador, a saída OUT2 é acionada sempre que a temperatura alcançar o valor da temperatura escolhida mais 1°C e desativada sempre que a leitura da temperatura indicar o valor da temperatura escolhida menos 2°C. Já no evaporador, a saída OUT2 é acionada sempre que a temperatura alcançar a temperatura escolhida menos 1°C e desativada sempre que a leitura da temperatura indicar o valor da temperatura escolhida mais 2°C

Seguindo esta lógica, para controlar as temperaturas propostas no condensador e no evaporador, os valores de OUT1 e OUT2 foram os seguintes:

Tabela 1 – Temperaturas utilizadas para programar o controlador microprocessado.

	Temperatura desejada [°C]	Faixa de Temperatura [°C]	OUT1 [°C]	OUT2 [°C]
Condensador	35	33 – 36	20	15
	30	28 – 31	20	10
	25	23 – 26	15	10
Evaporador	15	14 – 17	30	15
	10	9 – 12	30	20
	05	4 - 7	25	20

Fonte: Arquivo pessoal.

O volume de controle de água no sistema foi feito manualmente, abrindo e fechando a válvula globo toda a vez que a bomba d’água era acionada.

Não foi possível medir a pressão na entrada do evaporador devido à dificuldade encontrada na aquisição e instalação de um manômetro neste ponto. Sendo assim, seguindo a teoria, a entalpia da entrada do evaporador foi considerada igual à de saída do condensador ($h_4 = h_3$) e então, pelo diagrama de Mollier do líquido refrigerante R401a (Suva MP39 da marca DuPont disponível em anexo 1), foi encontrada a pressão de entrada do evaporador que foi utilizada nos resultados apresentados a seguir.

Durante os experimentos foram realizadas várias medições, desde a partida do compressor até o sistema ser desligado automaticamente pelo pressostato. Porém, para realizar a montagem de gráficos e o cálculo do rendimento do ciclo foram escolhidas quatro medições de cada experimento.

Foram realizados seis experimentos, dos quais três foram controladas as temperaturas do meio do evaporador e três do condensador. Nos experimentos de controle de temperatura no evaporador as temperaturas de 5°C, 10°C e 15°C foram estudadas. Nos experimentos de controle de temperatura no condensador foram estudadas as temperaturas 25°C, 30°C e 35°C.

Após a realização dos experimentos, foram montados os gráficos dos respectivos ciclos e foram escolhidos dois experimentos, um do evaporador a temperatura constante de 35°C e outro do condensador a temperatura constante de 10°C, para fazer a comparação com o ciclo teórico.

Para a construção do ciclo teórico, foram consideradas as seguintes condições:

- Pressão da entrada do evaporador igual a pressão de saída do mesmo;
- Entropia da entrada do compressor igual a de saída do mesmo (compressor isentrópica);
- Pressão de saída do condensador igual a de entrada do mesmo;
- Entalpia da entrada do evaporador igual a da saída do condensador (expansão isoentálpica);

Para o ciclo teórico, nos experimentos realizados no evaporador, a temperatura do evaporador foi considerada constante com o valor igual ao definido para o início do experimento, e para a pressão de entrada e saída no evaporador, também considerada constante, foi utilizada a média dos valores obtidos experimentalmente para a pressão do ponto 1. Já nos experimentos realizados no condensador a temperatura do condensador foi considerada constante com o valor

igual ao definido para o início do experimento, e para a pressão de entrada e saída no condensador, também considerada constante, foi utilizada a média dos valores obtidos experimentalmente para a pressão do ponto 3.

Como apoio para plotagem dos gráficos foi utilizado o software CoolPack, que é um software livre criado para dimensionar e analisar ciclos de refrigeração. Tal software se encontra livremente disponível para download no site da companhia IPU.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados das medições obtidas em cada experimento, a análise de COP acordo com a equação (1) apresentada anteriormente e a comparação do ciclo de refrigeração real com o teórico.

4.1 CONDENSADOR 35°C

Para realizar este experimento, foi adicionado água a 35°C no condensador, regulado o controlador microprocessado conforme especificado na tabela 1.

As medições realizadas durante este experimento podem ser consultadas na tabela 18 disponível em anexo 2.

Foram escolhidas quatro medições, e encontrados seus referentes valores para entalpia através do Diagrama de Mollier do líquido refrigerante 401a (Suva™ MP39) disponível no anexo 1 deste trabalho.

Tabela 2 - Medições escolhidas do experimento com o condensador a 35°C

(continua)

Medição	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	20,3	1,5	424
	2	60,3	16,0	434
	3	40,4	15,6	252
	4	-1,2	3,3	252
B	1	20,2	1,3	424
	2	85,1	15,4	458
	3	38,9	15,2	250
	4	-10,6	2,3	250
C	1	16,5	1,2	421
	2	92,9	15,4	465
	3	38,1	15,0	249
	4	-11,2	2,3	249

**Tabela 2 - Medições escolhidas do experimento com o condensador a 35°C
(conclusão)**

Medição	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
D	1	10,7	1,2	417
	2	103,0	15,2	475
	3	37,8	14,8	249
	4	-11,6	2,2	249

Fonte: Arquivo pessoal.

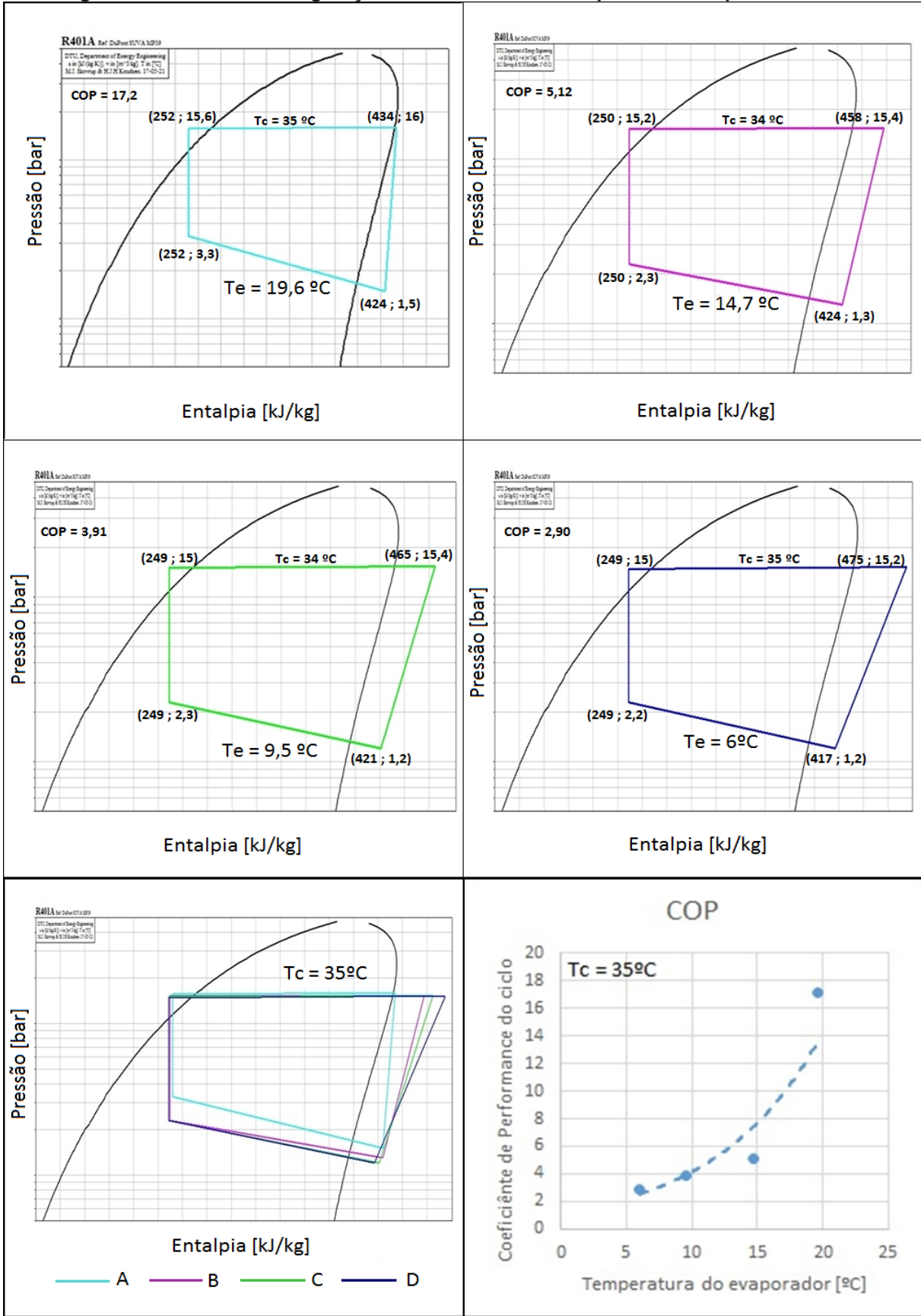
A partir destas medições, utilizando a equação (1), calculou-se o coeficiente de performance do ciclo, o qual apresentou valores conforme a tabela 3, e foram gerados os gráficos apresentados na figura 17.

Tabela 3 - Resultado do cálculo do COP real para Tc = 35°C.

Medição	Temperatura [°C]	Coeficiente de Performance do Ciclo
A	19,6	17,20
B	14,7	5,12
C	9,5	3,90
D	6,0	2,89

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 17 – Ciclos de refrigeração real e Coeficiente de performance para $T_c = 35^\circ\text{C}$



Fonte: Arquivo pessoal.

Para o ciclo teórico os seguintes dados foram utilizados, seguindo os critérios especificados anteriormente.

Tabela 4 – Dados para análise teórica do ciclo com Tc=35°C

Ciclo	Ponto	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	1,5	398
	2	15,15	453
	3	15,15	269
	4	1,5	269
B	1	1,3	396
	2	15,15	455
	3	15,15	269
	4	1,3	269
C	1	1,2	395
	2	15,15	456
	3	15,15	269
	4	1,2	269
D	1	1,2	395
	2	15,15	456
	3	15,15	269
	4	1,2	269

Fonte: Arquivo pessoal.

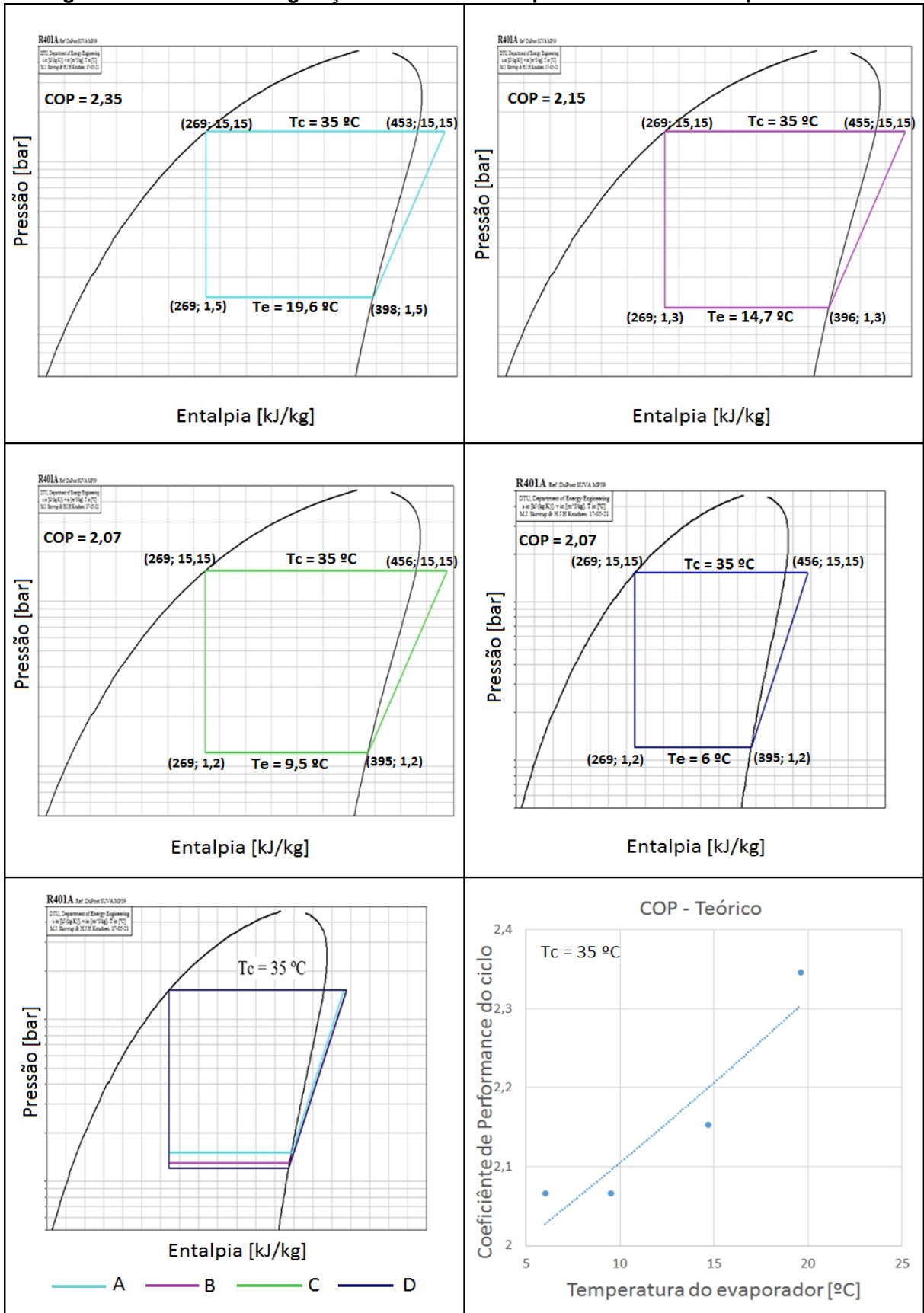
Para o ciclo teórico, utilizando da equação (1), também foram calculados os coeficientes de performance do ciclo, os quais apresentaram valores conforme a tabela 5. Assim, foram gerados os gráficos de cada ciclo e do coeficiente de performance, tais gráficos podem ser observados na figura 18.

Tabela 5 – Resultado do cálculo do COP teórico para $T_c = 35^\circ\text{C}$.

Medição	Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Coefficiente de Performance do Ciclo
A	19,6	2,35
B	14,7	2,15
C	9,5	2,07
D	6,0	2,07

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 18– Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance teóricos para $T_c = 35^\circ\text{C}$



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 CONDENSADOR 30°C

Para realizar este experimento, foi adicionado água a 30°C no condensador, regulado o controlador microprocessado conforme especificado na tabela 1.

As medições realizadas durante este experimento podem ser consultadas na tabela 19 disponível em anexo 3.

Assim, foram escolhidas quatro medições, e encontrado seus referentes valores para entalpia através do Diagrama de Mollier do líquido refrigerante 401a (Suva™ MP39) disponível no anexo 1 deste trabalho.

Tabela 6 – Medições escolhidas do experimento com o condensador a 30°C

Medição	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	12,9	0,7	420
	2	51,7	13,0	432
	3	34,0	12,6	244
	4	-17,1	1,8	244
B	1	13,8	0,8	420
	2	60,1	13,2	439
	3	33,5	12,8	243
	4	-17,9	1,8	243
C	1	11,2	1,0	418
	2	85,1	13,8	460
	3	33,0	13,4	242
	4	-13,8	2,0	242
D	1	9,2	1,1	417
	2	99,9	13,8	474
	3	33,3	13,4	243
	4	-13,0	2,2	243

Fonte: Arquivo pessoal.

A partir destas medições, utilizando a equação (1), calculou-se o coeficiente de performance do ciclo, o qual apresentou valores conforme a tabela 7. Em seguida

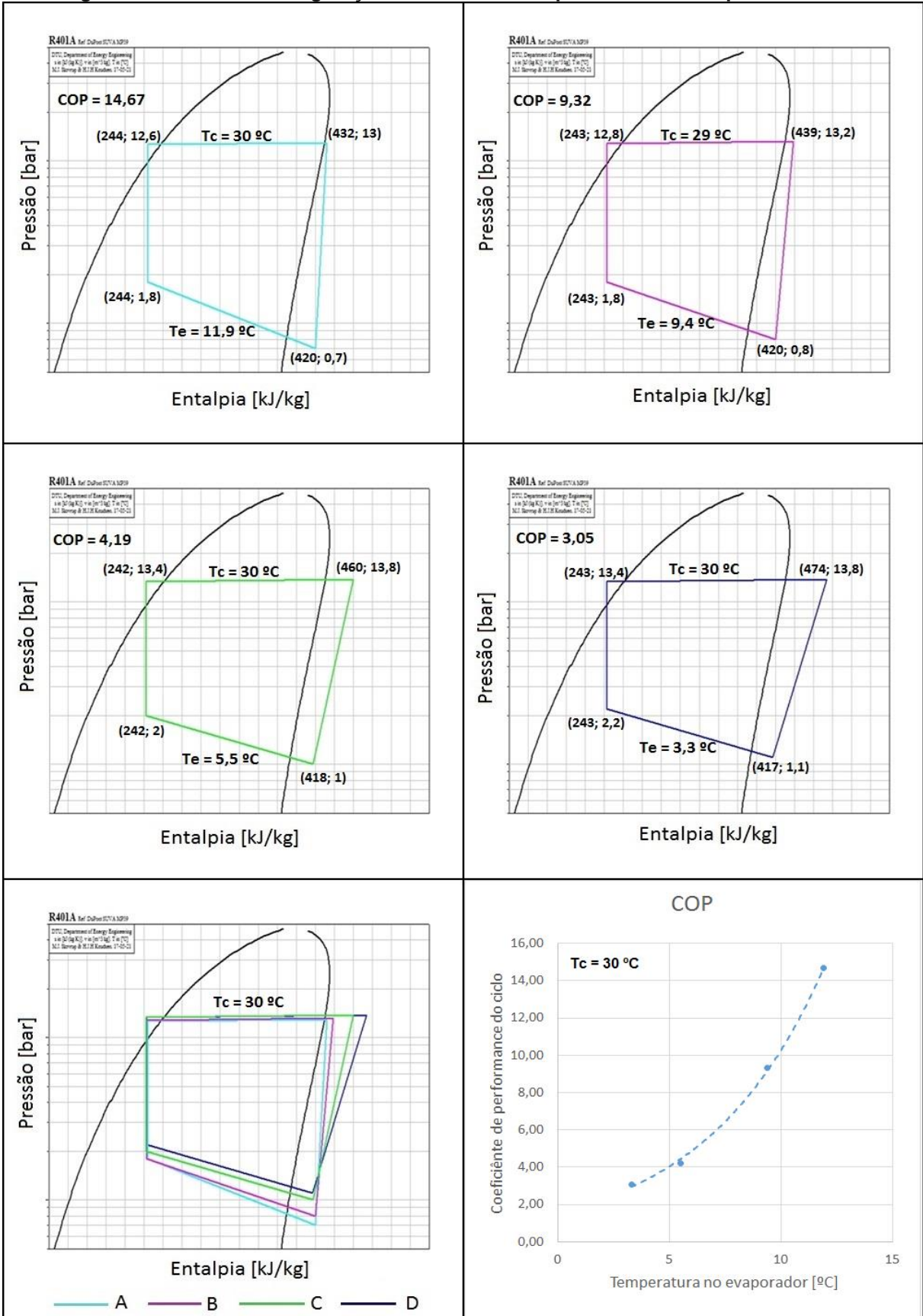
foram montados os gráficos do ciclo e do coeficiente de performance conforme apresenta a figura 19.

Tabela 7 – Resultado do cálculo do COP real para $T_c = 30^\circ\text{C}$.

Medição	Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Coeficiente de Performance do Ciclo
A	11,9	14,67
B	9,4	9,32
C	5,5	4,19
D	3,3	3,05

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 19 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para $T_c = 30^\circ\text{C}$



Fonte: Arquivo pessoal.

4.3 CONDENSADOR 25°

Para realizar este experimento, foi adicionado água a 25°C no condensador, regulado o controlador microprocessado conforme especificado na tabela 1.

As medições realizadas durante este experimento podem ser consultadas na tabela 20 disponível em anexo 2.

Assim, foram escolhidas quatro medições, e encontrado seus referentes valores para entalpia através do Diagrama de Mollier do líquido refrigerante 401a (Suva™ MP39) disponível no anexo 1 deste trabalho.

Tabela 8 – Medições escolhidas do experimento com o condensador a 25°C

Medição	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	18,2	0,5	424
	2	50,4	11,6	433
	3	28,7	11,2	237
	4	-19,9	1,7	237
B	1	17,4	0,7	423
	2	70,4	12,2	450
	3	30,0	11,8	238
	4	-16,0	1,9	238
C	1	13,8	0,9	420
	2	84,1	12,2	462
	3	27,8	11,8	235
	4	-13,8	2,1	235
D	1	9,5	1,0	417
	2	96,9	12,6	472
	3	29,9	12,2	238
	4	-14,3	2,0	238

Fonte: Arquivo pessoal.

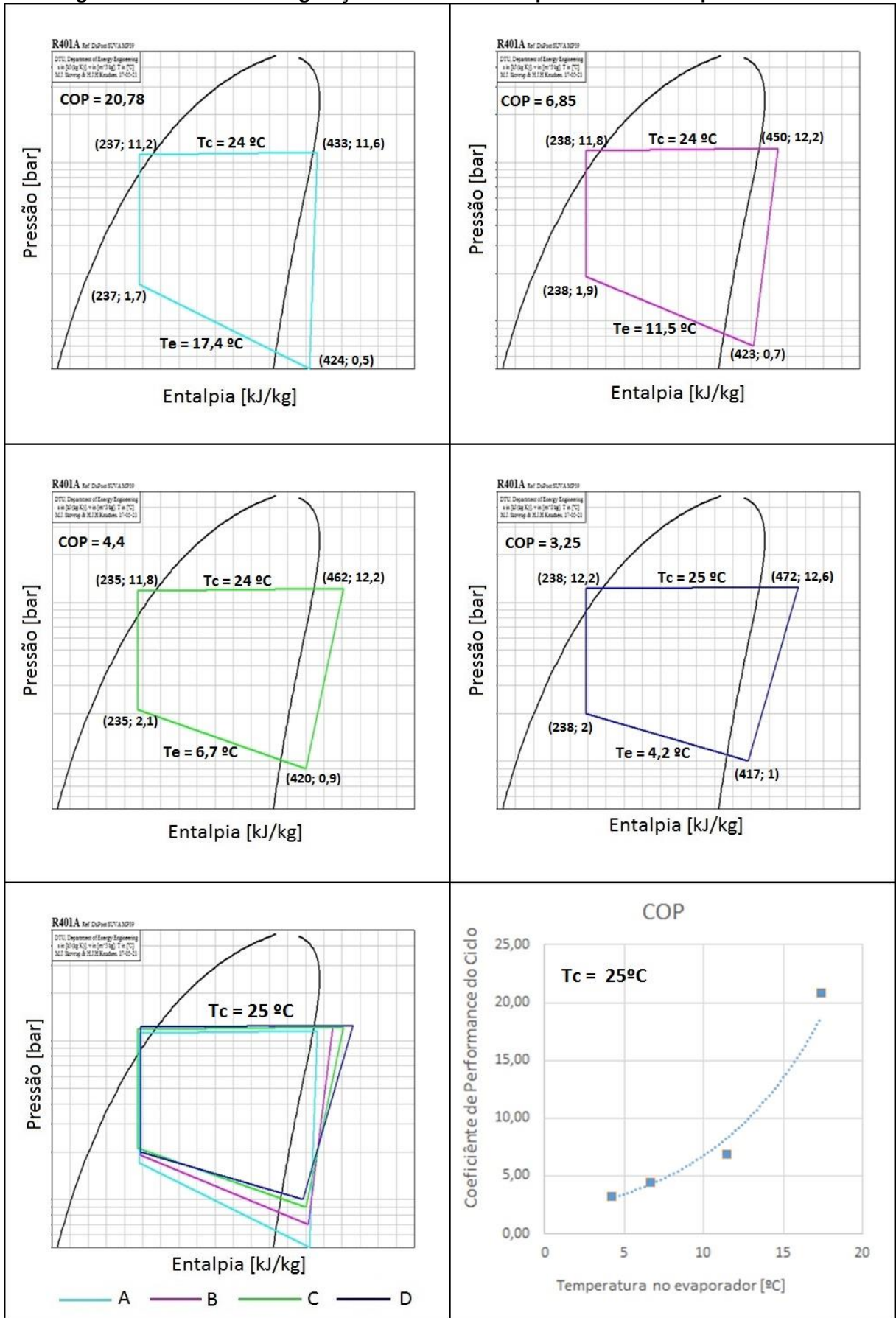
A partir destas medições, utilizando a equação (1), calculou-se o coeficiente de performance do ciclo, o qual apresentou valores conforme a tabela 9, e foram desenhados os gráficos do ciclo e da tendência do coeficiente de rendimento conforme apresentado na figura 20.

Tabela 9 – Resultado do cálculo do COP real para $T_c = 25^\circ\text{C}$.

Medição	Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Coeficiente de Performance do Ciclo
A	17,4	20,78
B	11,5	6,85
C	6,7	4,40
D	4,2	3,25

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 20 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para $T_c = 25^\circ\text{C}$.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.4 EVAPORADOR 15°C

Para realizar este experimento, foi adicionado água a 15°C no evaporador, regulado o controlador microprocessado conforme especificado na tabela 1.

As medições realizadas durante este experimento podem ser consultadas na tabela 21 disponível em anexo 2.

Assim, foram escolhidas quatro medições, e encontrado seus referentes valores para entalpia através do Diagrama de Mollier do líquido refrigerante 401a (Suva™ MP39) disponível no anexo 1 deste trabalho.

Tabela 10 – Medições escolhidas do experimento com o evaporador a 15°C

Experimento com a temperatura do evaporador a 15°C

Medição	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	21,5	0,6	426
	2	60,0	11,0	442
	3	24,8	10,4	232
	4	-18,2	1,8	232
B	1	21,3	1,0	425
	2	81,2	13,0	458
	3	30,5	12,4	239
	4	-13,7	2,1	239
C	1	23,4	1,2	426
	2	93,8	15,0	467
	3	37,0	14,6	248
	4	-10,3	2,4	248
D	1	21,3	1,4	425
	2	102,9	16,8	473
	3	42,4	16,4	255
	4	-9,1	2,5	255

Fonte: Arquivo pessoal.

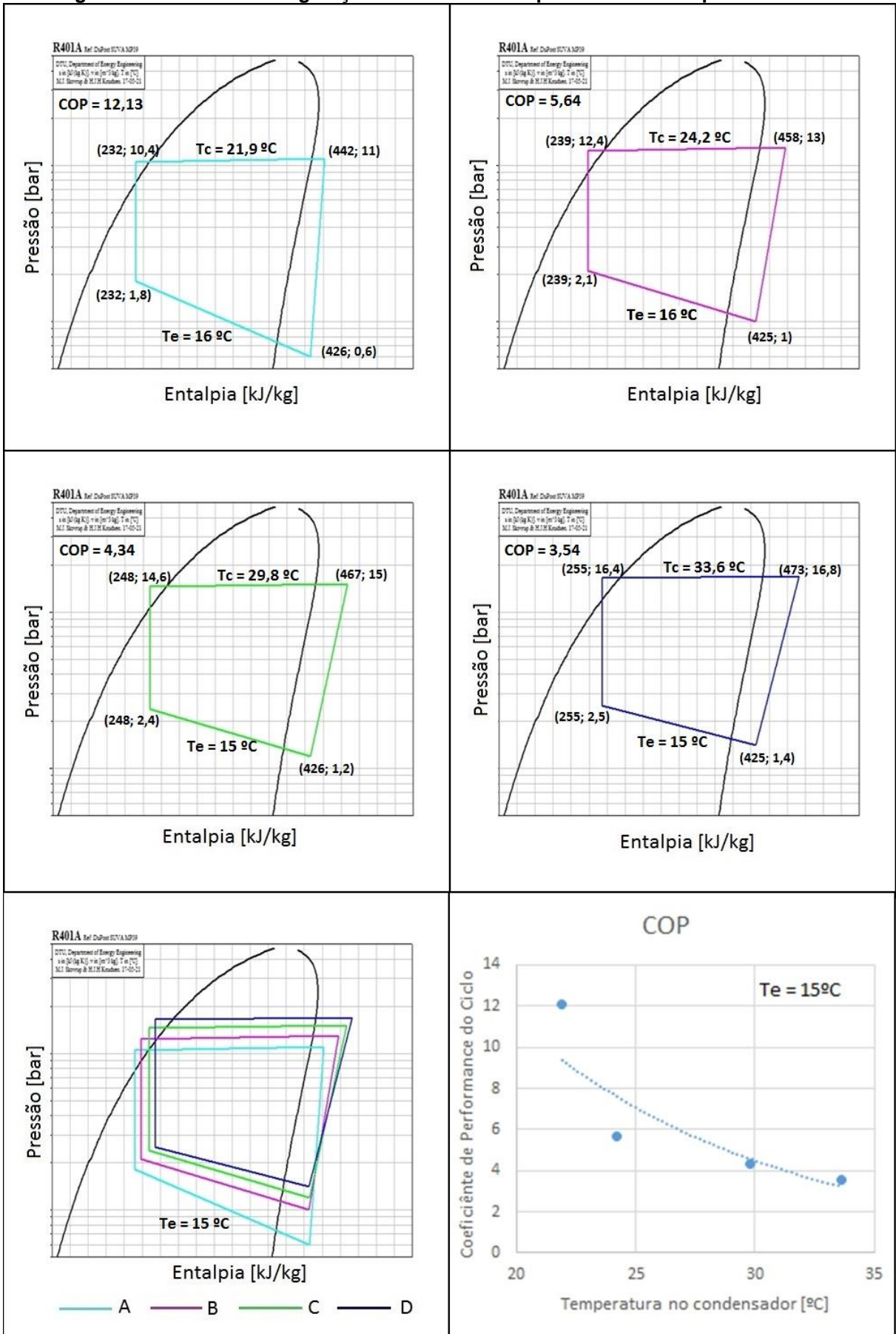
A partir destas medições, utilizando a equação (1), calculou-se o coeficiente de performance do ciclo, o qual apresentou valores conforme a tabela 11. Então foram desenhados os gráficos do ciclo e do COP conforme a figura 21.

Tabela 11 – Resultado do cálculo do COP real para $T_e = 15^\circ$.

Medição	Temperatura [°C]	Coeficiente de Performance do Ciclo
A	21,9	12,13
B	24,2	5,64
C	29,8	4,34
D	33,6	3,54

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 21 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para $T_e = 15^\circ\text{C}$.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.5 EVAPORADOR 10°C

Para realizar este experimento, foi adicionado água a 10°C no evaporador e água a temperatura ambiente no condensador.

As medições realizadas durante este experimento podem ser consultadas na tabela 22 disponível em anexo 2.

Para realizar as análises foram escolhidas quatro medições feitas no decorrer do ensaio, então, pelo Diagrama de Mollier, disponível no anexo 1, foram encontrados seus respectivos valores de entalpia para a montagem dos gráficos.

Tabela 12 – Medições escolhidas do experimento com o evaporador a 10°C

Medição	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	21,5	0,6	426
	2	60,0	11,0	442
	3	24,8	10,4	232
	4	-18,2	1,8	232
B	1	21,3	1,0	425
	2	81,2	13,0	458
	3	30,5	12,4	239
	4	-13,7	2,1	239
C	1	23,4	1,2	426
	2	93,8	15,0	467
	3	37,0	14,6	248
	4	-10,3	2,4	248
D	1	21,3	1,4	425
	2	102,9	16,8	473
	3	42,4	16,4	255
	4	-9,1	2,5	255

Fonte: Arquivo pessoal.

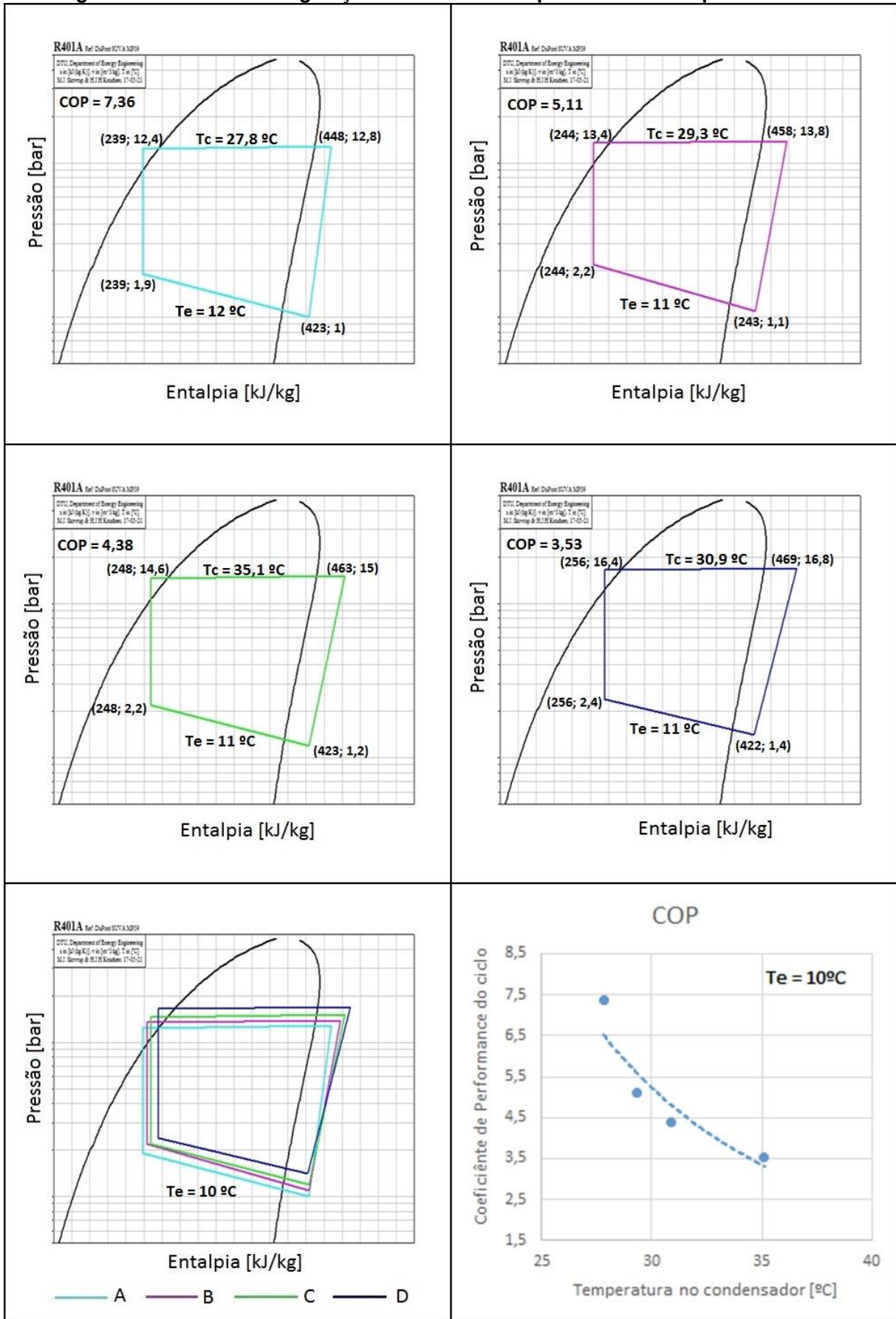
A partir destas medições, utilizando a equação (1), calculou-se o coeficiente de performance do ciclo, o qual apresentou valores conforme a tabela 13. Então foram desenhados os gráficos do ciclo e do COP conforme a figura 22.

Tabela 13 – Resultado do cálculo do COP teórico para $T_e = 10^\circ\text{C}$.

Medição	Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Coeficiente de Performance do Ciclo
A	27,8	7,36
B	29,3	5,11
C	30,9	4,38
D	35,1	3,53

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 22 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para $T_e = 10^\circ\text{C}$.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para o ciclo teórico os seguintes dados foram utilizados, seguindo os critérios especificados anteriormente.

Tabela 14 – Dados para análise teórica do ciclo com $T_e=10^\circ\text{C}$.

Ciclo	Ponto	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	1,2	395
	2	12,4	452
	3	12,4	257
	4	1,2	257
B	1	1,2	395
	2	13,4	453
	3	13,4	261
	4	1,2	261
C	1	1,2	395
	2	14,6	455
	3	14,6	267
	4	1,2	267
D	1	1,2	395
	2	16,4	456
	3	16,4	274
	4	1,2	274

Fonte: Arquivo pessoal.

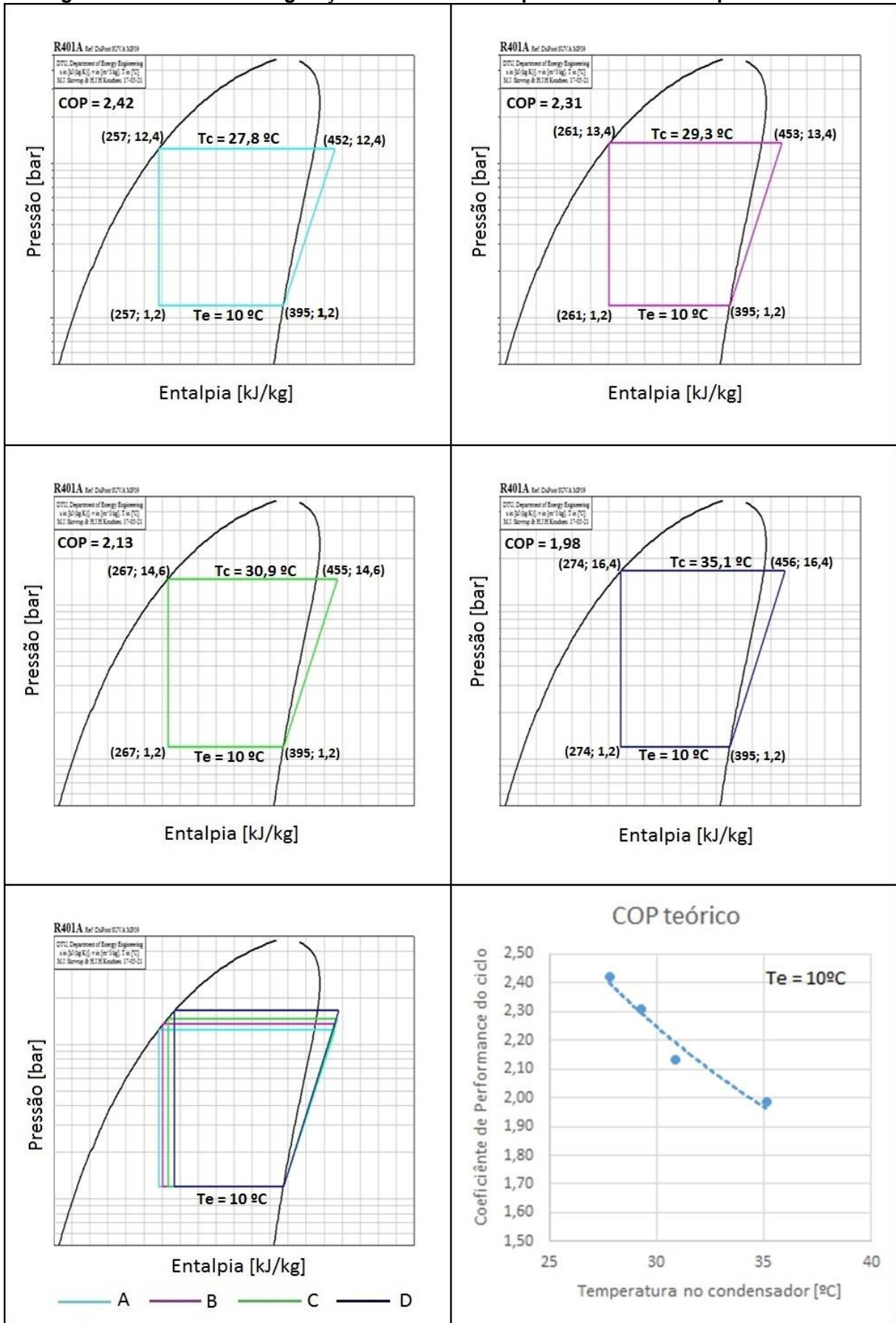
Também calculado o Coeficiente de Performance do ciclo conforme a tabela 15, e feita a montagem dos gráficos conforme a figura 23.

Tabela 15 – Resultado do cálculo do COP teórico para $T_e = 10^\circ\text{C}$.

Medição	Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Coeficiente de Performance do Ciclo
A	27,8	2,42
B	29,3	2,31
C	30,9	2,13
D	35,1	1,98

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 23 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance teórico para $T_e = 10^\circ\text{C}$.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.6 EVAPORADOR 5°C

Para realizar este experimento, foi adicionado água a 5°C no evaporador e água a temperatura ambiente no condensador.

As medições realizadas durante este experimento podem ser consultadas na tabela 23 disponível em anexo 2.

Pelo Diagrama de Mollier, disponível no anexo 1, foram encontrados seus respectivos valores de entalpia para a montagem dos gráficos.

Tabela 16 – Medições escolhidas do experimento com o evaporador a 5°C
(continua)

Medição	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Entalpia [kJ/kg]
A	1	15,8	0,5	422
	2	53,2	10,8	437
	3	36,3	10,2	270
	4	5,7	4,0	270
B	1	15,2	0,8	421
	2	73,4	12,4	452
	3	29,0	11,8	237
	4	-16,0	1,9	237
C	1	15,0	1,2	421
	2	94,6	15,0	467
	3	37,9	14,6	249
	4	-12,2	2,2	249
D	1	13,3	1,3	419
	2	99,9	15,2	472
	3	41,6	14,8	254
	4	-10,0	2,4	254

Fonte: Arquivo pessoal.

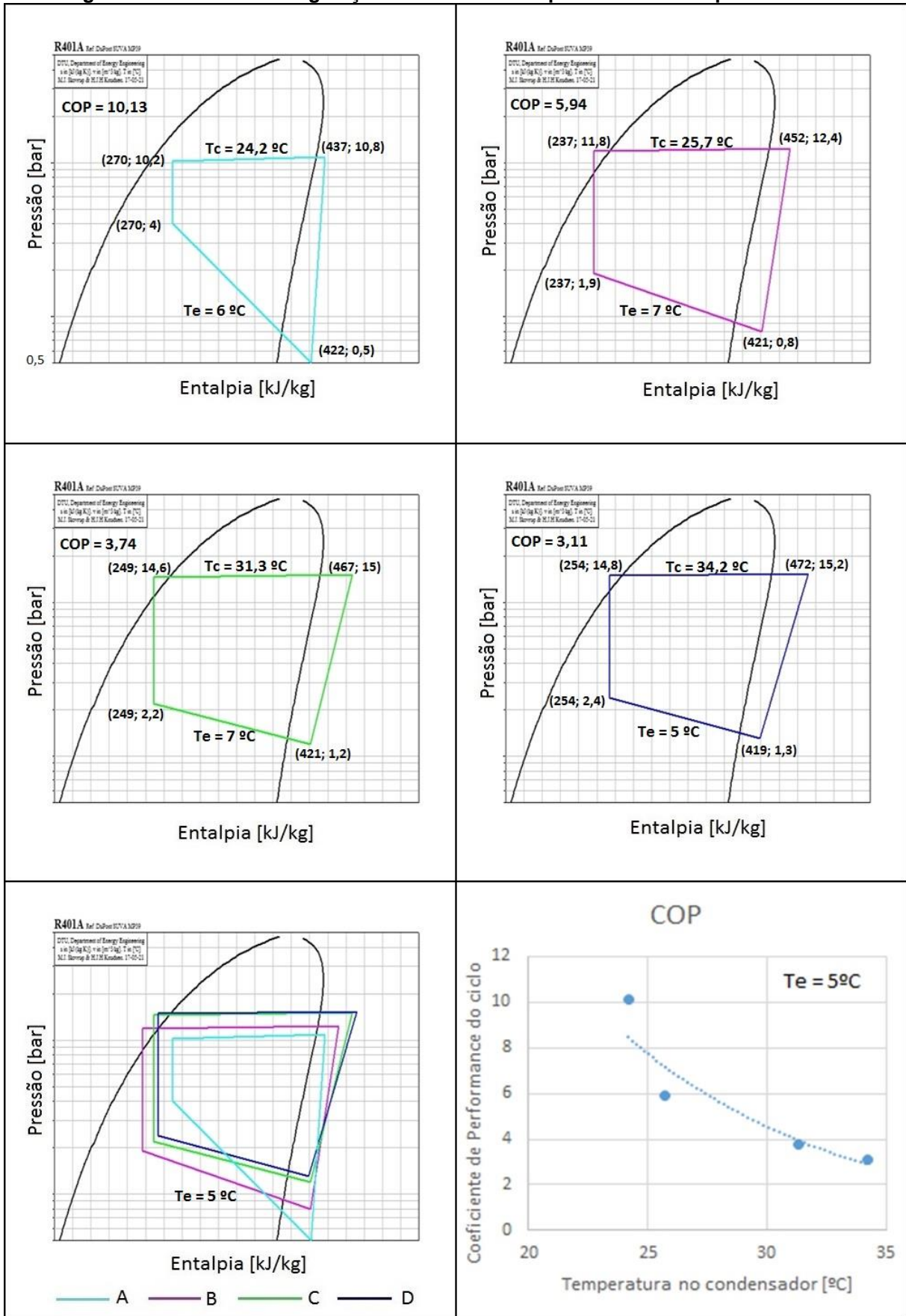
A partir destas medições, utilizando a equação (1), calculou-se o coeficiente de performance do ciclo, o qual apresentou valores conforme a tabela 17. Então foram desenhados os gráficos do ciclo e do COP conforme a figura 24.

Tabela 17 – Resultado do cálculo do COP real para $T_e = 5^\circ\text{C}$.

Medição	Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Coefficiente de Performance do Ciclo
A	24,2	10,13
B	25,7	5,94
C	31,3	3,74
D	34,2	3,11

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 24 – Ciclos de refrigeração e Coeficiente de performance real para $T_e = 5^\circ\text{C}$.



Fonte: Arquivo pessoal.

5 DISCUSSÕES

Devido ao fluxo de água, no meio em que a temperatura estava sendo mantida constante, o termômetro fixo da bancada apresentou resposta lenta, o que pode ser observado quando se compara com a temperatura obtida com o termopar. Para a análise do ciclo e a realização dos experimentos, a temperatura do termopar foi considerada a real.

Pode-se observar nos resultados obtidos, que a pressão na saída do evaporador começa a subir conforme a temperatura no meio do evaporador diminui, este resultado contraria a teoria, portanto, chegou-se à conclusão que este manômetro está avariado, sem calibração e suas medições não são de confiança.

O ponto de entrada do evaporador teve um acréscimo de pressão no decorrer dos experimentos, isto aconteceu pois ao iniciar a bancada a temperatura do líquido refrigerante sofre uma queda brusca e então volta a subir até encontrar a temperatura requerida para manter o sistema e, então, se mantém praticamente constante. O único ensaio em que pode-se observar este comportamento é o que foi mantido 35°C no condensador, pois foi o experimento mais longo, os demais experimentos tenderam a ser mais curtos, devido ao pressostato desligar a bancada, não havendo tempo o suficiente para que o líquido refrigerante chegasse neste ponto de equilíbrio.

Analisando os resultados e os gráficos, pode-se observar que a bancada apresenta um mesmo comportamento ao manter a temperatura do condensador ou do evaporador constantes, independentemente da temperatura escolhida.

Pode-se observar que coeficiente de performance do ciclo é diretamente afetado pela temperatura que se encontra o meio onde está o condensador e o evaporador. Quanto este meio se encontra com uma temperatura mais próxima da temperatura ambiente, melhor é a performance do ciclo e, conforme o meio do evaporador esfria ou o meio do condensador aquece o COP começa a diminuir.

Nos experimentos $T_c=35^{\circ}\text{C}$ e $T_e=10^{\circ}\text{C}$ foi feita a comparação com o ciclo teórico, constatando que o ciclo real segue a mesma curva de coeficiente de performance porém apresentando perdas no processo, lembrando que o resultado numérico deve ser desconsiderado devido ao manômetro avariado.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho, que era explorar a reação do ciclo de refrigeração da bancada didática quando o evaporador ou o condensador estivessem a uma temperatura constante, foi alcançado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vendo que, neste trabalho, foram cumpridas as propostas e etapas previstas para sua realização e tendo em vista a importância da melhora contínua, aproveita-se para fazer sugestões para trabalhos futuros.

É sugerido que todos os manômetros da bancada passem por calibração anualmente e, recomendado, trocar os termômetros instalados na bancada por outros que possuam uma resposta mais rápida e precisa.

Tendo como objetivo diminuir a margem de erro dos resultados dos experimentos, é sugerido a aquisição de um controlador de temperatura que possa realizar leituras a temperaturas inferiores a zero graus Célsius, abrindo a possibilidade de controlar temperaturas baixas do meio do evaporador com maior exatidão.

Também é sugerido a aquisição de outra bomba d'água, assim, pode-se realizar o controle dos dois meios (condensador e evaporador) simultaneamente, e se for possível ligar o reservatório de saída do evaporador como sendo o de entrada do condensador e vice versa, criando, assim, um ciclo fechado.

REFERÊNCIAS

ALGETEC – **Bancada Didática De Treinamento Em Refrigeração**. Disponível em: <<http://www.algetec.com.br/index.php/pt-BR/produtos/product/46-bancada-didatica-de-treinamento-em-refrigeracao>>. Acesso em 02 de outubro de 2016.

BRAGA, Thiago – **A relevância da Prática no Aprendizado em Engenharia Mecânica**. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjf3aaJiMrQAhXMHZAKHQXzCnsQFgg3MAQ&url=http%3A%2F%2Fmpu-historico.furg.br%2Findex.php%3Foption%3Dcom_phocadownload%26view%3Dcategory%26download%3D2140%3Athiago_braga%26id%3D13%3Aresumos-2015-seminario-de-ensino%26Itemid%3D191%26start%3D200&usg=AFQjCNF7d5TImL5uM9FzFaR_k5NeGnfDsQ&sig2=9WAKOwEJ68SezmjLdlq__A&bvm=bv.139782543,d.Y2l>. Acesso em 27 de novembro de 2016.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. - **Termodinâmica**. 5 ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2006. ISBN 9788586804663.

Chermous – **R401a (Suva™ MP39)**. Disponível em: <https://www.chemours.com/Refrigerants/pt_BR/products/suva/suvamp39_br.html>. Acesso em maio de 2017.

COSTA, Ennio Cruz - **Refrigeração**. 3 ed. São Paulo: E. Blücher, 1982.. ISBN 9788521201045.

IPU – **Downloads – CoolPack**. Disponível em: <<http://www.en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/downloads.aspx>>. Acesso em maio de 2017.

MARTINELLI JÚNIOR, Luiz Carlos - **Introdução às Máquinas Térmicas Refrigeração**. Paraná, 2008. Disponível em: <<http://www.martinelli.eng.br/ebooks.htm>>. Acesso em 26 de setembro de 2016. ISBN: 978-85-908775-0-9.

MARTINELLI JÚNIOR, Luiz Carlos – **Requerimento de Patente, (BR1020160237033)**, 2016.

MS Instrumentação Industrial – **Limites de Erro para Termopares de Isolação Mineral**. Disponível em: <<http://www.msinstrumentacao.com.br/index.asp?InCdSecao=3&InCdSubSecao=3>>. Acesso em maio de 2017.

PEKELMAN, Helio; MELLO Jr, Antônio G. - **A Importância Dos Laboratórios No Ensino De Engenharia Mecânica**. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2004/artigos/01_219.pdf>. Acesso em 26 de setembro de 2016.

PENTEADO, Pedro Moritz – **Desenvolvimento De Uma Bancada De Ensaio De Fadiga Por Impacto Em Válvulas De Compressores De Refrigeração**. Dissertação

submetida à UFSC para obtenção do grau de Mestre em Metrologia. Florianópolis, setembro de 2009.

QUEIROZ, Márcio Henrique Bastos de - **Bancada Didática Para Sistema De Refrigeração Por Absorção**. Trabalho de Conclusão de Curso submetido à UTFPR para obtenção do grau de Técnico em Manutenção Industrial. Medianeira, 2013.

SILVA, Marcelo N. – **Eficiência Energética Em Sistemas De Refrigeração Industrial E Comercial**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

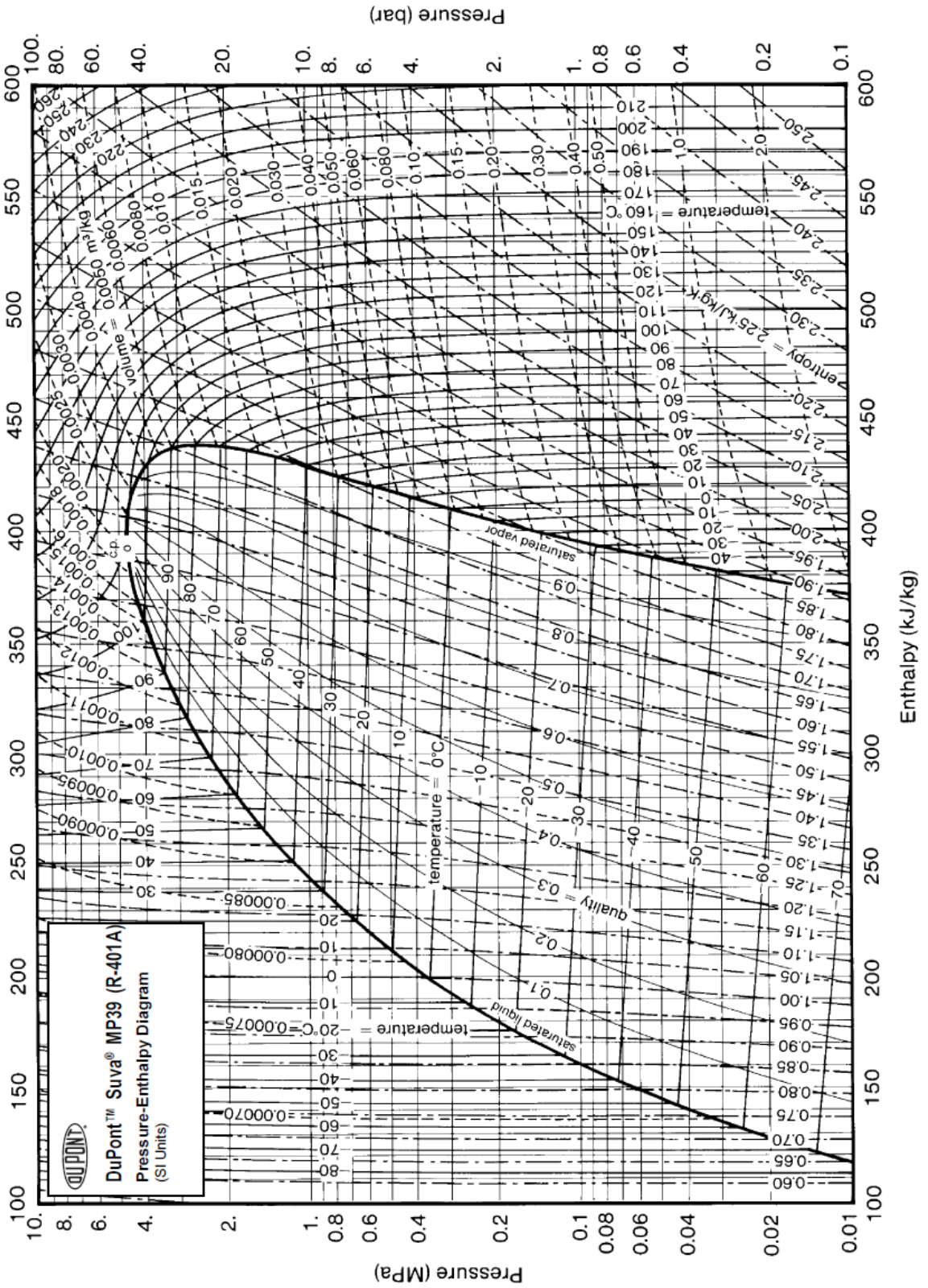
STOECKER, Wilbert F.; JONES, Jerold W. – **Refrigeração E Ar Condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

VAN WYLEN, Gordon John; SONNTAG, Richard Edwin - **Fundamentos Da Termodinâmica Clássica**. 4. ed. São Paulo, SP: Editora Edgar Blücher, 2012.

Manual de Instalação e Operação “Controlador Microprocessado MK-10plus ou CT-10plus – PID – Versão 1.01

ANEXOS

Anexo 1 – Diagrama pressão x entalpia do DuPont Suva™ MP39 R401a



Anexo 2 – Dados obtidos durante os experimentos

Tabela 18 - Dados obtidos no experimento com o condensador a 35°C

Tcontrolador	Temperatura [°C]						Pressão [bar]		
	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
35	20,3	60,3	36,0	40,4	-1,2	19,6	1,5	16	15,6
35	21,1	78,1	36,3	39,9	-11,7	16,9	1,1	15,6	15,2
33	21,0	82,6	36,8	39,1	-9,4	15,5	1,3	15,4	15,0
34	20,4	85,1	36	38,9	-10,6	14,7	1,3	15,4	15,2
34	19,5	87,8	37,2	39,0	-11,4	13,5	1,2	15,4	15,0
35	18,9	89,9	36,9	38,7	-10,7	13,0	1,3	15,6	15,2
35	17,8	91,3	36,2	38,1	-11,1	11,6	1,3	15,4	15,0
34	16,5	92,9	36,9	38,1	-11,2	9,5	1,2	15,4	15,0
34	15,1	95,9	36,6	38,3	-11,0	7,7	1,2	15,4	15,0
34	13,8	97,2	36,5	38,0	-11,1	6,9	1,2	15,4	15,0
35	12,5	99,1	37,2	38,9	-11,5	6,9	1,3	15,6	15,2
35	11,7	100,4	36,0	37,4	-11,5	6,6	1,2	15,2	14,8
34	11,1	101,2	36,5	38,2	-11,7	6,5	1,2	15,2	14,8
35	10,7	103	36,1	37,8	-11,6	6,0	1,2	15,2	14,8

*Onde: Tcontrolador é a temperatura medida no controlador microprocessado;

T1 – Temperatura no ponto 1 do ciclo (saída do evaporador).

T2 – Temperatura no ponto 2 do ciclo (entrada do condensador).

T3 – Temperatura no ponto 3 do ciclo (saída do condensador).

T4 – Temperatura no ponto 4 do ciclo (entrada do evaporador);

Tc – Temperatura medida na água do reservatório do condensador;

Te – Temperatura medida na água do reservatório do evaporador;

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 19 – Dados obtidos no experimento com o condensador a 30°C

(continua)

Tcontrolador	Temperatura [°C]						Pressão [bar]		
	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
30	12,9	51,7	30,6	34	-17,1	11,9	0,7	13,0	12,6
29	13,8	60,1	29,7	33,5	-17,9	9,4	0,8	13,2	12,8
30	13,5	70,3	31,0	34,1	-14,1	7,3	1,0	13,8	13,2
29	13,2	74,2	32,0	33	-13,6	6,2	1,0	13,6	13,2
30	12,7	76,6	31,5	33,6	-13,8	6,0	1,1	14,0	13,6
29	12,5	78,6	31,7	33,5	-13,5	5,8	1,0	13,8	13,2
29	11,7	82,0	31,8	33,1	-14,2	5,6	1,0	13,8	13,2

Tabela 20 – Dados obtidos no experimento com o condensador a 30°C
(conclusão)

Tcontrolador	Temperatura [°C]						Pressão [bar]		
	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
30	11,2	85,1	32,0	33,0	-13,8	5,5	1,0	13,8	13,4
29	10,7	87,5	32,2	33,4	-14,1	5,3	1,0	13,6	13,2
30	10,4	88,3	31,7	33,0	-14,1	5,1	1,1	13,4	13,0
30	10,0	89,6	32,3	33,0	-13,7	4,5	1,1	13,8	13,2
30	9,7	90,5	32,2	32,6	-13,6	4,1	1,1	13,8	13,2
30	9,6	93,1	31,2	32,5	-14,0	3,9	1,1	13,6	13,2
29	9,6	94,4	31,8	32,7	-14,2	3,9	1,1	13,8	13,4
30	9,4	96,8	31,9	33,0	-13,8	3,6	1,1	13,8	13,4
30	9,2	98,5	32,8	34,5	-12,4	3,5	1,1	14,2	13,8
30	9,2	99,9	32,6	33,3	-13,0	3,3	1,1	13,8	13,4

*Onde:

Tcontrolador é a temperatura medida no controlador microprocessado;

T1 – Temperatura no ponto 1 do ciclo (saída do evaporador).

T2 – Temperatura no ponto 2 do ciclo (entrada do condensador).

T3 – Temperatura no ponto 3 do ciclo (saída do condensador).

T4 – Temperatura no ponto 4 do ciclo (entrada do evaporador);

Tc – Temperatura medida na água do reservatório do condensador;

Te – Temperatura medida na água do reservatório do evaporador;

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 21 – Dados obtidos no experimento com o condensador a 25°C
(continua)

Tcontrolador	Temperatura [°C]						Pressão [bar]		
	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
24	18,2	50,4	25,0	28,7	-19,9	17,4	0,5	11,6	11,2
25	18,3	62,5	26,0	29,8	-16,4	14,9	0,7	12,2	11,8
24	17,4	70,4	27,0	30,0	-16,0	11,5	0,7	12,2	11,8
25	16,7	74,1	27,5	30,3	-13,3	10,5	0,9	12,6	12,2
24	16,0	76,6	27,5	29,4	-13,7	9,6	1,0	12,4	12,2
25	15,3	79,1	28,1	29,6	-14,0	8,8	0,9	12,6	12,2
24	13,8	84,1	26,0	27,8	-13,8	6,7	0,9	12,2	11,8
25	13,1	86,6	26,1	28,5	-13,0	6,1	1,0	12,8	12,2
25	12,8	87,3	27,2	28,7	-13,4	5,8	1,0	12,8	12,2
25	12,1	88,5	26,3	28,4	-13,9	5,7	1,0	12,4	12,0

**Tabela 22 – Dados obtidos no experimento com o condensador a 25°C
(conclusão)**

Tcontrolador	Temperatura [°C]						Pressão [bar]		
	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
25	11,4	89,7	27,0	28,8	-13,9	5,7	1,0	12,4	12,0
24	10,9	90,6	27,9	29,4	-13,9	5,7	1,0	12,8	12,0
25	10,3	92,8	27,5	29,5	-14,2	5,4	1,0	12,4	12,0
24	10,0	93,5	27,6	30,0	-14,1	5,3	0,9	12,4	12,0
25	9,7	95,1	28,0	29,7	-14,5	4,7	0,9	12,4	12,0
25	9,4	96,5	27,5	29,5	-14,3	4,2	1,0	12,6	12,2
25	9,5	96,9	28,8	29,9	-14,3	4,2	1,0	12,6	12,2
25	9,1	98,3	28,2	29,3	-14,6	4,0	0,9	12,6	12,2

*Onde:

Tcontrolador é a temperatura medida no controlador microprocessado;

T1 – Temperatura no ponto 1 do ciclo (saída do evaporador).

T2 – Temperatura no ponto 2 do ciclo (entrada do condensador).

T3 – Temperatura no ponto 3 do ciclo (saída do condensador).

T4 – Temperatura no ponto 4 do ciclo (entrada do evaporador);

Tc – Temperatura medida na água do reservatório do condensador;

Te – Temperatura medida na água do reservatório do evaporador;

Fonte: Arquivo pessoal

**Tabela 23 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 15°C
(continua)**

Experimento com a temperatura do evaporador a 15°C									
Tcontrolador	Temperatura [°C]						Pressão [bar]		
	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
16	21,5	60,0	21,9	24,8	-18,2	22,0	0,6	11,0	10,4
16	22,5	68,7	22,4	26,4	-17,9	18,0	0,8	11,4	11,0
16	22,4	72,9	23,0	27,7	-17,0	16,8	0,8	12,0	11,4
15	21,7	78,3	23,5	29,0	-16,1	15,9	0,8	12,2	11,8
16	21,3	81,2	24,2	30,5	-13,7	19,0	1,0	13,0	12,4
15	21,9	87,5	28,6	32,7	-8,3	18,0	1,0	13,6	13,2
16	22,6	93,0	29,2	36,0	-11,0	16,5	1,1	14,6	14,2
15	23,4	93,8	29,8	37,0	-10,3	15,8	1,2	15,0	14,6
15	21,5	96,4	30,7	38,6	-10,5	16,5	1,3	15,6	15,2
15	22,0	97,5	31,5	40,0	-10,0	15,6	1,3	15,8	15,4
16	21,2	99,6	32,0	40,6	-9,8	15,7	1,3	16,2	15,8

Tabela 24 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 15°C
(conclusão)

Experimento com a temperatura do evaporador a 15°C									
Temperatura [°C]							Pressão [bar]		
Tcontrolador	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
15	21,9	100,5	32,7	41,3	-9,5	15,0	1,3	16,4	16,0
15	21,3	102,9	33,6	42,4	-9,1	15,4	1,4	16,8	16,4

*Onde:

Tcontrolador é a temperatura medida no controlador microprocessado;

T1 – Temperatura no ponto 1 do ciclo (saída do evaporador).

T2 – Temperatura no ponto 2 do ciclo (entrada do condensador).

T3 – Temperatura no ponto 3 do ciclo (saída do condensador).

T4 – Temperatura no ponto 4 do ciclo (entrada do evaporador);

Tc – Temperatura medida na água do reservatório do condensador;

Te – Temperatura medida na água do reservatório do evaporador;

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 25 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 10°C

Experimento com a temperatura do evaporador a 10°C									
Temperatura [°C]							Pressão [bar]		
Tcontrolador	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
11	17,8	33,6	27,3	28,4	13,5	16,0	2,2	12,0	11,8
12	18,1	69,1	27,8	30,7	-16,8	15,0	1,0	12,8	12,4
11	17,8	83,1	29,3	34,1	-12,4	13,6	1,1	13,8	13,4
10	18,6	87,2	30,0	35,2	-12,4	13,2	1,1	14,2	13,8
11	18,4	90,2	30,9	37,2	-11,9	14,2	1,2	15,0	14,6
11	17,6	99,0	35,1	42,9	-9,9	12,0	1,4	16,8	16,4

*Onde:

Tcontrolador é a temperatura medida no controlador microprocessado;

T1 – Temperatura no ponto 1 do ciclo (saída do evaporador).

T2 – Temperatura no ponto 2 do ciclo (entrada do condensador).

T3 – Temperatura no ponto 3 do ciclo (saída do condensador).

T4 – Temperatura no ponto 4 do ciclo (entrada do evaporador);

Tc – Temperatura medida na água do reservatório do condensador;

Te – Temperatura medida na água do reservatório do evaporador;

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 26 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 5°C
(continua)

Experimento com a temperatura do evaporador a 5°C									
Temperatura [°C]							Pressão [bar]		
Tcontrolador	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
6	15,8	43,2	24,2	36,3	5,7	7,6	0,5	10,8	10,2
7	15,2	73,4	25,7	29,0	-16,0	8,6	0,8	12,4	11,8

**Tabela 27 – Dados obtidos no experimento com o evaporador a 5°C
(conclusão)**

Tcontrolador	Temperatura [°C]						Pressão [bar]		
	T1	T2	Tc	T3	T4	Te	P1	P2	P3
7	15,0	94,6	31,3	37,9	-12,2	8,8	1,2	15,0	14,6
5	13,3	99,9	34,2	41,6	-10,0	13,9	1,3	15,2	14,8

*Onde:

Tcontrolador é a temperatura medida no controlador microprocessado;

T1 – Temperatura no ponto 1 do ciclo (saída do evaporador).

T2 – Temperatura no ponto 2 do ciclo (entrada do condensador).

T3 – Temperatura no ponto 3 do ciclo (saída do condensador).

T4 – Temperatura no ponto 4 do ciclo (entrada do evaporador);

Tc – Temperatura medida na água do reservatório do condensador;

Te – Temperatura medida na água do reservatório do evaporador;

Fonte: Arquivo pessoal