



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Cassiano Montibeller

**Adaptação de Bancada de Ensaio para Emulação de Condições de Operação  
de Compressores Herméticos**

Florianópolis  
2023

Cassiano Montibeller

**Adaptação de Bancada de Ensaio para Emulação de Condições de Operação  
de Compressores Herméticos**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.  
Supervisor: João Paulo Zomer Machado, MSc. Eng.

Florianópolis  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Montibeller, Cassiano

Adaptação de Bancada de Ensaios para Simulação de  
Condições de Operação de Compressores Herméticos / Cassiano  
Montibeller ; orientador, Rodolfo César Costa Flesch,  
coorientador, João Paulo Zomer Machado, 2023.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -Universidade  
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em  
Engenharia de Controle e Automação, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Compressores  
herméticos. 3. Automação. 4. Bancada de ensaios. I. Flesch,  
Rodolfo César Costa . II. Machado, João Paulo Zomer . III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

Cassiano Montibeller

**Adaptação de Bancada de Ensaios para Emulação de Condições de Operação  
de Compressores Herméticos**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 12 de dezembro de 2023.

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.  
Orientador  
UFSC/CTC/DAS

João Paulo Zomer Machado, MSc. Eng.  
Supervisor  
UFSC/CTC/LIAE

Eng. Diogo Ortiz Machado, Dr.  
Avaliador  
IFRS

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.  
Presidente da Banca  
UFSC/CTC/DAS

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a Deus, pela força, coragem e por iluminar meu caminho durante toda esta longa jornada. Dedico também à minha amada família e aos meus queridos amigos, por toda a compreensão, carinho e apoio recebidos.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Adenor e Eliane, e à minha irmã, Daiara, por todo o apoio e motivação que me forneceram durante toda a minha formação, não me deixando desanimar ou desistir deste caminho. Amo vocês e espero corresponder à altura a tudo que fizeram por mim.

À minha família, agradeço por todo o suporte que me deram, não medindo esforços para me ajudar a chegar até aqui.

Aos meus amigos de laboratório Gustavo, Guilherme, João Paulo, Gabriel Thaler, Juliano, Matheus, Rafael, Vitória, Jhonatam, João, Marcus e Vinícius, agradeço por todos os conselhos, amizade e companheirismo no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de graduação, agradeço por toda a amizade desenvolvida durante esses anos de curso, fundamental para minha permanência e continuidade do processo de formação.

Ao meu co-orientador João Paulo, agradeço por todos os ensinamentos passados e por estar sempre disponível para me auxiliar, não importando o dia e a hora que eu precisasse.

Ao meu orientador, professor Rodolfo Flesch, que sempre esteve disposto a me auxiliar, compartilhando valiosos conhecimentos e me motivando a seguir adiante. Se estou apresentando este trabalho hoje, é graças à primeira oportunidade que o senhor me concedeu.

A todos os professores que participaram do meu processo de formação, espero honrar da melhor forma todos os conhecimentos e aprendizados repassados por vocês.

“As invenções são, sobretudo, o resultado de um trabalho teimoso.”  
(SANTOS DUMONT, 1873-1932)

## **DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE**

Florianópolis, 31 de novembro de 2023.

Na condição de representante do Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaio no qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização online no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor Cassiano Montibeller, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa nº 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.

---

João Paulo Zomer Machado

Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaio

## RESUMO

No contexto da pesquisa conduzida no Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE), uma das linhas de estudo focaliza a construção e automação de bancadas para ensaios de compressores herméticos, com o intuito de coletar dados referentes ao seu desempenho operacional. Este trabalho concentra-se na adaptação de uma bancada de ensaios para simular condições específicas de temperatura de condensação e evaporação de compressores. A necessidade dessa adaptação surgiu de limitações na versão anterior da bancada, que não conseguia reproduzir o envelope operacional dos novos modelos de compressores destinados a sorveteiros. O processo envolveu a desmontagem parcial da configuração anterior, com redesenho do circuito e a adição de um tanque reservatório entre o caminho de descarga e o processo. Adicionalmente, novos transdutores de pressão e temperatura foram incorporados para aprimorar a coleta de dados. Foi realizada uma refatoração do código LabVIEW, que estava desestruturado e continha processos inutilizados e redundantes. Um controle de temperatura na sucção do compressor foi projetado para avaliar operações em temperaturas específicas. Os resultados preliminares indicam que as modificações realizadas ampliaram as condições de temperaturas de condensação e evaporação emuladas, possibilitando a realização de ensaios com a nova família de compressores da Nidec Global Appliance.

**Palavras-chave:** Compressores herméticos. Bancada de ensaios. Automação.

## ABSTRACT

In the context of research conducted at the Laboratory of Instrumentation and Automation of Tests (LIAE), one research line focuses on the construction and automation of test benches for hermetic compressors to gather data related to their operational performance. This work specifically addresses the adaptation of a test bench to simulate specific conditions of condensation and evaporation temperatures for compressors. The need for this adaptation arose from limitations in the previous version of the test bench, which could not replicate the operational envelope of new compressor models designed for ice cream makers. The process involved partial disassembly of the previous configuration, circuit redesign, and the addition of a reservoir tank between the discharge path and the process. Additionally, new pressure and temperature transducers were incorporated to enhance data acquisition. A refactoring of the LabVIEW code was performed to address its disorganization and eliminate unused and redundant processes. Furthermore, a temperature control system was designed for the compressor suction to evaluate operations at specific temperatures. Preliminary results indicate that the modifications expanded the range of emulated condensation and evaporation temperatures, enabling tests with the new compressor family from Nidec Global Appliance.

**Keywords:** Hermetic compressors. Test bench. Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Troca de calor entre a fonte de menor para a de maior temperatura .	20
Figura 2 – Ciclo de refrigeração por compressão de vapor . . . . .	21
Figura 3 – Funcionamento de um sistema de refrigeração . . . . .	22
Figura 4 – Compressor do tipo aberto . . . . .	23
Figura 5 – Modelo de compressor hermético . . . . .	24
Figura 6 – Elementos de um compressor hermético . . . . .	24
Figura 7 – Condições de operação de um compressor hermético . . . . .	28
Figura 8 – Extensômetro aliado a ponte de Wheatstone . . . . .	29
Figura 9 – Diagrama de funcionamento termopar . . . . .	30
Figura 10 – Estrutura de um sistema de controle . . . . .	31
Figura 11 – Elementos do sistema . . . . .	31
Figura 12 – Ensaio de resposta ao degrau . . . . .	32
Figura 13 – Bancada de ensaios . . . . .	33
Figura 14 – P&ID da bancada . . . . .	34
Figura 15 – Novo envelope de operação . . . . .	35
Figura 16 – Tanque reservatório . . . . .	36
Figura 17 – Desmontagem do circuito . . . . .	37
Figura 18 – Instalação do reservatório . . . . .	38
Figura 19 – Soldagem das conexões . . . . .	39
Figura 20 – Procedimento manual para detecção de vazamentos . . . . .	40
Figura 21 – Vácuo gerado . . . . .	41
Figura 22 – Nova configuração da bancada . . . . .	42
Figura 23 – Válvula de diafragma de acionamento manual . . . . .	42
Figura 24 – Válvula solenoide . . . . .	43
Figura 25 – Funcionamento da válvula solenoide . . . . .	43
Figura 26 – Transdutor de pressão UNIK PMP 5073 instalado na bancada . . . .	44
Figura 27 – Passos adotados no projeto do controle de temperatura . . . . .	46
Figura 28 – Ensaio em malha aberta . . . . .	47
Figura 29 – Temperatura de sucção por ciclo de trabalho . . . . .	48
Figura 30 – Resposta ao degrau no ponto de operação de 40% de ciclo de trabalho	49
Figura 31 – Diagrama de lugar das raízes . . . . .	49
Figura 32 – Diagrama de polos-zeros em malha fechada da saída em função da referência . . . . .	50
Figura 33 – Resposta em malha fechada . . . . .	51
Figura 34 – Abrangência do envelope de operação na versão antiga da bancada	52
Figura 35 – Cenários dos ensaios realizados . . . . .	53
Figura 36 – Resultado de abrangência do envelope de operação . . . . .	54

Figura 37 – Regiões divididas . . . . .	54
Figura 38 – Ensaio automatizado . . . . .	55
Figura 39 – Abrangência de cenários alcançadas na versão anterior . . . . .	61
Figura 40 – Envelope de operação à 1800 RPM e com o reservatório pressurizado	62
Figura 41 – Envelope de operação à 1800 RPM e com o reservatório vazio . . .	62
Figura 42 – Envelope de operação à 2600 RPM e com o reservatório pressurizado	63
Figura 43 – Envelope de operação à 2600 RPM e com o reservatório vazio . . .	63
Figura 44 – Envelope de operação à 3000 RPM e com o reservatório pressurizado	64
Figura 45 – Envelope de operação à 3000 RPM e com o reservatório vazio . . .	64
Figura 46 – Envelope de operação à 3800 RPM e com o reservatório pressurizado	65
Figura 47 – Envelope de operação à 3800 RPM e com o reservatório vazio . . .	65
Figura 48 – Envelope de operação à 4500 RPM e com o reservatório pressurizado	66
Figura 49 – Envelope de operação à 4500 RPM e com o reservatório vazio . . .	66

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de compressores herméticos por sua faixa de temperatura de evaporação (EMBRACO, 2020) . . . . .	21
--	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CPU	Central Processing Unit
GWP	Global Warming Potential
LIAE	Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios
NTC	Negative Thermal Coefficient
PFC	Projeto de Fim de Curso
PTC	Positive Thermal Coefficient
PWM	Pulse Width Modulation
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.2	OBJETIVO GERAL	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	16
<b>2</b>	<b>LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE ENSAIOS (LIAE)</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>19</b>
3.1	SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO	19
<b>3.1.1</b>	<b>Ciclos termodinâmicos de refrigeração</b>	<b>19</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Operação dos sistemas de refrigeração</b>	<b>20</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Histórico sobre compressores e o termo hermético</b>	<b>22</b>
3.1.3.1	Motor	25
3.1.3.2	Mecanismo de compressão	25
3.1.3.3	Princípio de funcionamento	26
3.2	SISTEMAS DE MEDIÇÃO	27
<b>3.2.1</b>	<b>Transmissor de pressão</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Sensor de temperatura</b>	<b>29</b>
3.3	SISTEMAS DE CONTROLE	30
<b>3.3.1</b>	<b>Identificação de sistemas</b>	<b>31</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Resposta ao degrau unitário</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>ESTADO ORIGINAL DA BANCADA</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO</b>	<b>35</b>
5.1	IMPLANTAÇÃO DO TANQUE RESERVATÓRIO	37
5.2	INSTRUMENTOS ADICIONADOS	40
5.3	OTIMIZAÇÃO DO CÓDIGO	45
5.4	CONTROLE DE TEMPERATURA	46
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E AVALIAÇÃO</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>56</b>
7.1	CONCLUSÕES	56
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE A – ENSAIO DE ABRANGÊNCIA DA VERSÃO ANTIGA DA BANCADA</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DA NOVA VERSÃO DA BANCADA</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXO A – DATASHEET UNIK 5000</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A diversificação do portfólio de produtos é um processo constante no cenário industrial atual, em que cada vez mais são demandados produtos com características personalizadas e específicas. A produção de compressores para refrigeração não foge a essa regra. Devido às suas inúmeras aplicações, diversos modelos e configurações são projetados para atender à demanda do mercado atual (NIDEC, 2023a). Nesse sentido, garantir que essas características de projeto e operação funcionem da melhor forma requer um rigoroso processo de validação e ensaios. Esse processo ocorre por meio de ensaios experimentais, submetendo o produto analisado a diversas condições de operação, com o objetivo de verificar seu funcionamento nos cenários propostos (TROTT, P., 2012).

Muitas vezes, o controle desses ensaios é realizado de forma manual, em que o operador fica responsável pelo monitoramento e atuação sobre o processo. Contudo, mesmo sendo simples e direta, essa abordagem se torna ineficiente para a realização de ensaios mais complexos, além de contar com o fator humano na formulação de seus resultados. Nesse sentido, a busca por maior confiabilidade nos resultados tem levado ao crescimento dos requisitos de desempenho desses ensaios, necessitando o desenvolvimento de processos automatizados para sua realização. Dentre suas linhas de pesquisa, o Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) possui um eixo de trabalho dedicado a essa temática, sendo um importante instrumento para o desenvolvimento de tecnologias na área de compressores de refrigeração.

### 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O LIAE possui uma sólida e extensa cooperação com Nidec Global Appliance, referência mundial na produção de compressores herméticos dedicados à refrigeração. Essa iniciativa permitiu, e ainda permite, o desenvolvimento de diversas soluções para problemas encontrados no setor. Fruto desta cooperação, a linha de pesquisa dedicada à automação e controle de ensaios de condições operacionais de compressores herméticos dedica-se ao estudo e elaboração de ferramentas que venham a auxiliar na validação de parâmetros de operação dos diversos modelos de compressores.

Como resultado desses estudos, foi desenvolvida durante anos anteriores uma bancada automatizada dedicada à realização de ensaios de condições operacionais de compressores herméticos. No entanto, sua configuração atual não é capaz de conduzir ensaios abrangendo certas condições de pressão e de temperatura de operação, o que impede a realização de análises abrangentes que cubram todo o espectro de operação desejado para determinados modelos de compressor. Outra limitação ocorre pelo fato de a automação dos ensaios não operar corretamente, sendo necessário

realizar intervenções manuais durante a execução desses ensaios. Devido à complexidade do programa desenvolvido para automatizar os ensaios, a bancada apresenta problemas de alocação de recursos em seu processamento, deixando o software lento e, por vezes, não operacional. Essas restrições, somadas à complexidade de substituir o compressor de ensaio por outros modelos, prejudicam a capacidade de realizar análises detalhadas e abrangentes, resultando na impossibilidade de obter determinadas conclusões.

Nesse sentido, obter uma bancada de ensaio capaz de mapear e conduzir automaticamente os compressores por todos os cenários incluídos em seu envelope de operação trará ganho de tempo, economia de recursos e agilidade para o processo de aceitação e definição dos limites de operação.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é reformular a bancada de ensaios dedicada à avaliação das condições operacionais de compressores herméticos localizada nas instalações do LIAE. Este processo de aprimoramento exige alterações tanto em hardware quanto em software, com o objetivo de conduzir automaticamente ensaios que atinjam todo o espectro de pressão e de temperatura presentes na operação de compressores para uso em sorveteiros, além de simplificar o processo de substituição das unidades a serem submetidas a ensaios.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Emular cenários de temperaturas de evaporação e de condensação do novo envelope de operação do compressor testado;
- Automatizar as etapas do ensaio que ainda são feitas manualmente;
- Otimizar o algoritmo executado pela unidade de processamento para evitar sobrecarga;
- Projetar e implementar uma camada de controle regulatório cujos atuadores recebem sinal de um controlador próprio.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O Projeto de Fim de Curso (PFC) está organizado em sete capítulos. No capítulo 1, é apresentada uma contextualização sobre o tema trabalhado, assim como são elencados o problema de pesquisa e os objetivos desejados no desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta um resumo sobre o LIAE, mostrando suas áreas de pesquisa, projetos e um pouco de sua formação.

No capítulo 3, é realizada uma revisão da literatura sobre os principais conceitos e temas necessários para a compreensão deste projeto. Conceitos de sistemas de refrigeração, sistemas de controle, metrologia e instrumentação são elucidados durante o decorrer desse capítulo.

O capítulo 4 apresenta uma descrição detalhada da bancada base do projeto, descrevendo seu funcionamento, projeto, componentes e limitações.

Já no capítulo 5, o desenvolvimento e a implementação são descritos. Nesse capítulo é apresentada a solução proposta para o problema limitante da bancada atual, assim como o processo de sua implementação. As etapas de cada fase do projeto são detalhadas nesse capítulo, apresentando os passos percorridos no transcorrer do trabalho realizado.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos com solução proposta, demonstrando o alcance das condições de temperaturas de condensação e evaporação atingidas, assim como, as automações dos ensaios.

O capítulo 7 apresenta uma conclusão sobre o projeto realizado, avaliando os objetivos atendidos, assim como sugestões de trabalhos complementares para serem desenvolvidos futuramente.

## **2 LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE ENSAIOS (LIAE)**

Fundado em 2007, o Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaio (LIAE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), local de desenvolvimento deste trabalho, possui atuação multidisciplinar em diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento. Com parcerias estratégicas e consolidadas, o laboratório possui foco no desenvolvimento de projetos no setor refrigeração, petrolífero e de energias renováveis. Os trabalhos realizados seguem as seguintes linhas de atuação:

- automação e controle de ensaios;
- aquisição e processamento de dados;
- projeto e desenvolvimento de ferramentas de medição, atuação e controle;
- aplicações de técnicas de inteligência artificial em processos metrológicos;
- tratamento de sinais;
- inovação tecnológica.

Formado por estudantes de graduação, pós-graduação e pesquisadores de diversas áreas da engenharia, o laboratório contribui diretamente no desenvolvimento acadêmico e profissional. O processo de interação e desenvolvimento conjunto permite que haja trocas de experiências e conhecimentos, enriquecendo o aprendizado e solidificando os conteúdos vistos em sala de aula. Além dos contatos internos, devido a diversas parcerias consolidadas com grandes empresas, entre elas o grupo Nidec Global Appliance, maior fabricante de motores do mundo, é possível trocar conhecimento com profissionais do setor produtivo, vivenciando na prática a rotina de desenvolvimento de projetos na área empresarial.

Paralelamente à sua missão no desenvolvimento tecnológico, o laboratório também se empenha no avanço científico. Por meio de extensas pesquisas, uma variedade de artigos, monografias, dissertações e teses foram divulgados em conferências nacionais e internacionais, bem como em periódicos e repositórios, contribuindo para a expansão do conhecimento e inspirando os atuais e futuros bolsistas a se envolverem na unidade.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta revisões dos conceitos teóricos fundamentais para o desenvolvimento e compreensão deste trabalho. Na seção 3.1, é realizada uma revisão sobre sistemas de refrigeração, compressores e seus componentes. Na seção 3.2, é descrito o funcionamento de alguns sistemas de medição utilizados neste trabalho. Por fim, na seção 3.3, são apresentadas algumas características importantes do processo de identificação de sistemas e controle de processos.

#### 3.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Presente em diversos locais e lugares, os sistemas de refrigeração compõem diversos equipamentos e processos, dos mais simples, como ar-condicionados e geladeiras, aos mais complexos presentes em grandes indústrias petroquímicas. Segundo R. Miller e M. Miller (2014), todo o processo de remoção de calor de um sistema ou de um corpo pode ser denominado como refrigeração.

As formulações dos princípios da 2ª Lei da Termodinâmica de Clausius e Kelvin expressam que é impossível transferir calor de um determinado corpo a outro de maior temperatura sem o auxílio de um agente externo (THOMSON, 1853). Para que o processo inverso ocorra, é necessário introduzir uma fonte de trabalho no processo, como visto na Figura 1.

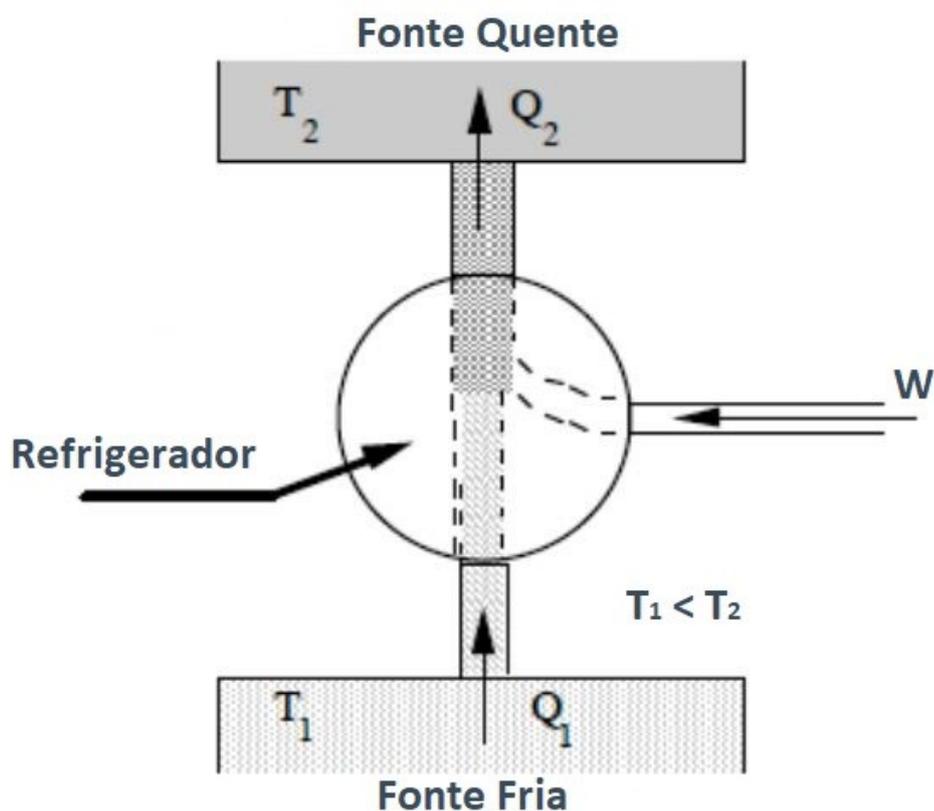
Nesse sentido, um sistema de refrigeração pode ser definido como sendo um grupo de componentes que operam em conjunto com o objetivo de realizar a troca de calor entre um meio de menor temperatura e um meio de maior temperatura (ÇENGEL; BOLES, 2013).

##### 3.1.1 Ciclos termodinâmicos de refrigeração

De acordo com Stoecker e Saiz Jabardo (2002), um ciclo termodinâmico de refrigeração consiste de uma série de transformações termodinâmicas ocorridas em um fluido refrigerante em seu transporte pelo sistema. Dentre os ciclos termodinâmicos de refrigeração, o ciclo de Carnot é que apresenta a maior eficiência. Em seu estudo, Carnot (1872) concluiu que nenhuma máquina térmica, operando com fontes a temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , pode possuir maior rendimento do que uma máquina baseada em seu ciclo operando nessas mesmas condições.

O sistema de refrigeração operado na bancada funciona através da compressão mecânica de vapor. Utilizado por uma ampla gama de refrigeradores e aparelhos condicionadores de ar, esse sistema pode assumir diferentes tipos de ciclos, dependendo da forma de operação do circuito de refrigeração. O circuito é composto por quatro componentes básicos: compressor, condensador, dispositivo de expansão e

Figura 1 – Troca de calor entre a fonte de menor para a de maior temperatura



Fonte: Adaptado de (VALÈNCIA, 2023).

evaporador. Seu funcionamento ocorre conforme apresentado na Figura 2.

No processo de  $1 \rightarrow 2$ , o fluido refrigerante passa pelo dispositivo de expansão, onde é submetido a uma rápida queda de pressão, passando a ter dois estados: líquido e vapor. Após essa transformação, a temperatura cai ao valor da temperatura de evaporação do refrigerante. Na etapa  $2 \rightarrow 3$ , o refrigerante adentra no evaporador, onde ocorre a sua transformação completa em vapor, absorvendo o calor do ambiente que será refrigerado.

Após ser vaporizado, o vapor é succionado pela unidade compressora, provocando um aumento de sua pressão e temperatura. Este procedimento ocorre na etapa  $3 \rightarrow 4$ .

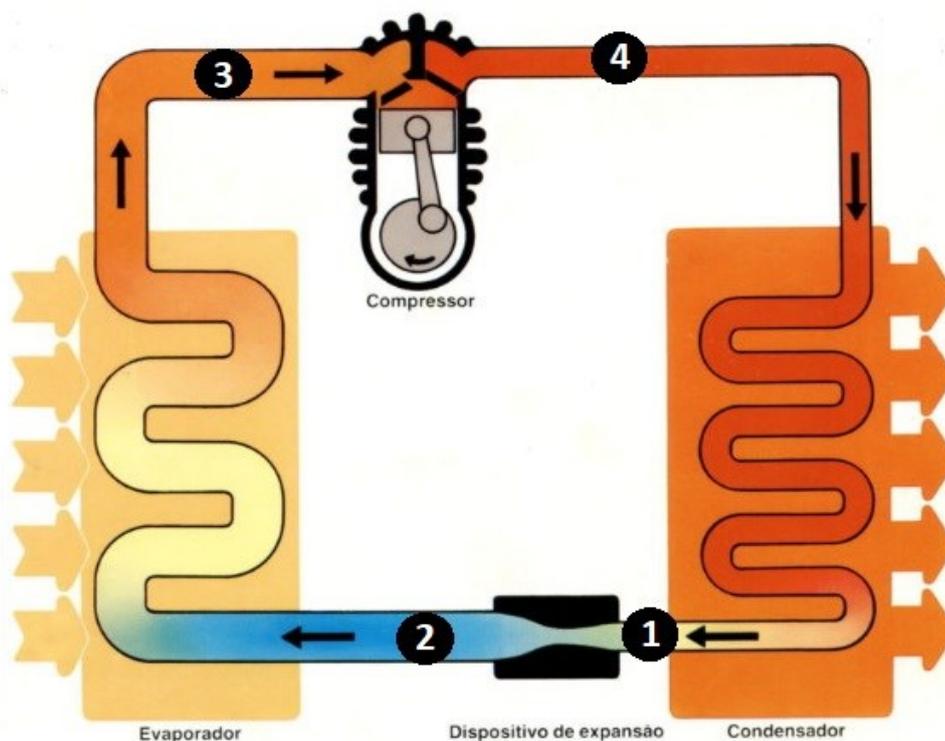
Por fim, no processo de  $4 \rightarrow 1$ , o fluido refrigerante segue à unidade de condensação. Nessa etapa, o calor é retirado e dispensado ao ambiente, ocasionando mudança de estado do refrigerante de vapor para líquido.

### 3.1.2 Operação dos sistemas de refrigeração

O funcionamento de um sistema de refrigeração pode ser resumido por meio de um diagrama, ilustrado na Figura 3.

A partir do diagrama percebem-se duas variáveis essenciais: temperatura de

Figura 2 – Ciclo de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: Adaptado de (ENGENHARIA, 2020).

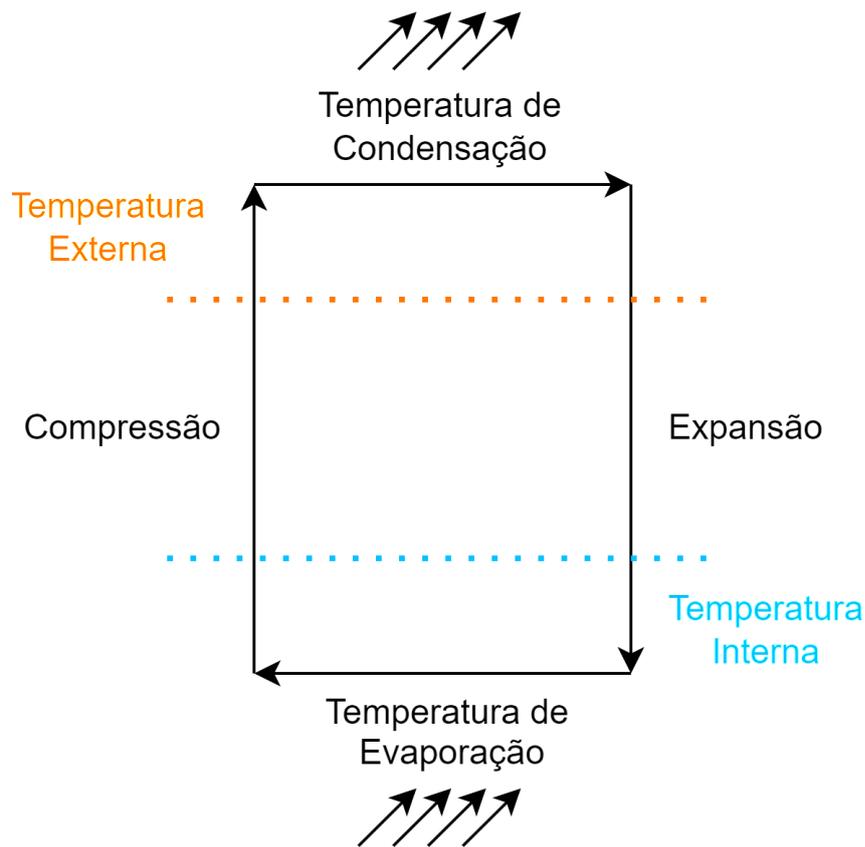
evaporação e a temperatura de condensação. A primeira refere-se à temperatura em que o fluido transita do estado líquido para o estado de vapor, determinada pelo nível de pressão percebido dentro do evaporador, visto que dentro do evaporador o fluido está em estado bifásico (mudança de estado físico). Essa temperatura deve ser inferior à temperatura interna do ambiente a ser refrigerado, permitindo que o fluido absorva calor do ambiente interno e evapore.

A temperatura de evaporação está vinculada à operação do sistema de refrigeração, podendo ser classificada em três categorias de acordo com o Quadro 1 (EMBRACO, 2020).

Quadro 1 – Classificação de compressores herméticos por sua faixa de temperatura de evaporação (EMBRACO, 2020)

		Temperatura de evaporação (°C)	Aplicações
LBP	Baixa pressão de retorno	Entre -35 e -10	Refrigeradores, ilhas de congelados
MBP	Média pressão de retorno	Entre -15 e 0	Autosserviços, expositores de bebidas, expositores refrigerados
HBP	Alta pressão de retorno	Entre 0 e +15	Autosserviços, adegas refrigeradas, desumidificadores de ar, refrigeradores

Figura 3 – Funcionamento de um sistema de refrigeração



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Cada temperatura no evaporador possui uma pressão específica correspondente, dado que o fluido refrigerante está em estado bifásico. Assim, é comum que o projeto do sistema de refrigeração seja feito em função da temperatura de evaporação, dado que ela é que dita diretamente a temperatura que pode ser obtida dentro do compartimento a ser refrigerado. Entretanto, a medição da condição tipicamente ocorre por meio da pressão no evaporador, que é a variável efetivamente alterada no sistema para permitir a definição da temperatura de evaporação.

Por sua vez, temperatura de condensação representa a temperatura na qual o fluido faz a transição do estado de vapor para líquido, sendo determinada pelo nível de pressão presente no condensador. Para assegurar o desempenho satisfatório do circuito, essa temperatura deve ser ligeiramente superior à temperatura ambiente onde o sistema está instalado. Essa disposição viabiliza que o fluido libere calor para o ambiente externo, induzindo assim sua condensação (FLESCHE, 2012).

### 3.1.3 Histórico sobre compressores e o termo hermético

Os compressores de refrigeração têm como função o aumento da pressão e temperatura do fluido refrigerante quando o mesmo se encontra no estado gasoso

(SOTOMAYOR, 2013). Em suas primeiras formulações, os compressores possuíam um sistema de acionamento baseados em um motor externo independente, como visto na Figura 4. Nessa configuração, comumente denominada de aberta, o eixo de rotação do motor atravessa a carcaça do compressor, ocasionando um problema de estanqueidade nesse ponto (HUNDY; TROTT, A. R.; WELCH, 2008). A estanqueidade é um fator importante para o compressor, pois impede que haja a contaminação do fluido refrigerante e o óleo lubrificante por agentes externos, além de evitar a ocorrência de vazamento do fluido para o ambiente, situação associada com a perda de eficiência do compressor.

Figura 4 – Compressor do tipo aberto



Fonte: (REFRIGERAÇÃO E ENROLAMENTOS, 2023).

Com o desenvolvimento dos compressores herméticos, essas dificuldades foram gradualmente superadas. Neles, o conjunto formado pelo mecanismo de compressão e motor fica alojado no interior de uma carcaça selada e submetida a baixa pressão. No exterior da carcaça, apenas os terminais elétricos e as entradas de fluido ficam à mostra, garantindo uma maior estanqueidade ao compressor. O aspecto de um compressor hermético típico é apresentado na Figura 5

A vedação hermética possibilita que os componentes internos permaneçam em contato direto com o fluido refrigerante, contribuindo para o seu arrefecimento. Essas modificações permitiram reduzir significativamente o volume dos compressores e os níveis de ruído, além de obter uma maior robustez estrutural. Entretanto, devido ao fato de não ser possível realizar acesso ao interior da carcaça, na ocorrência de alguma falha, não há como realizar manutenção ou reparo, inutilizando o equipamento (HUNDY; TROTT, A. R.; WELCH, 2008).

Conforme ilustrado na Figura 6, os principais elementos de um compressor

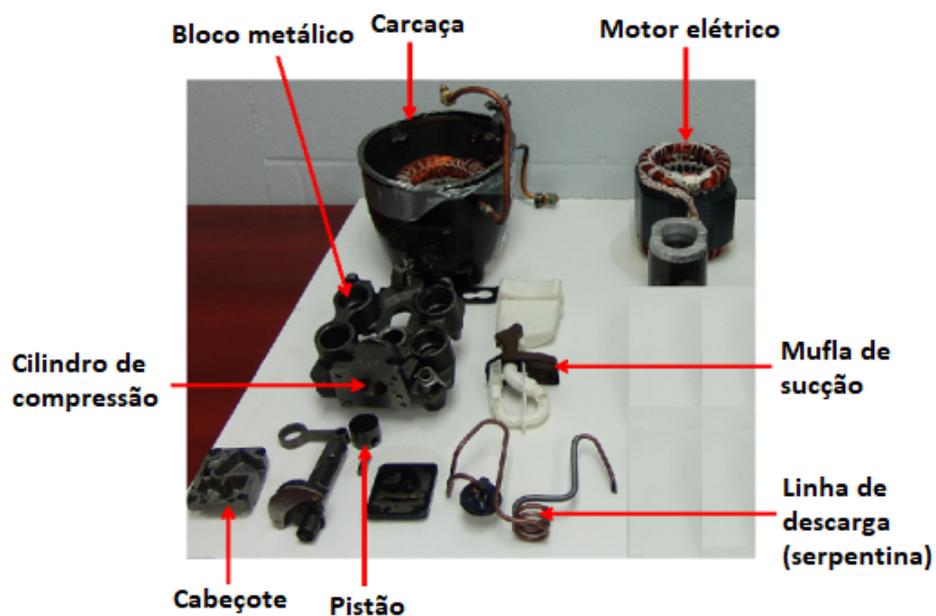
Figura 5 – Modelo de compressor hermético



Fonte: (NIDEC, 2023b).

hermético consistem em seu motor elétrico, a carcaça, o bloco metálico, o cilindro de compressão, o cabeçote, o pistão, a mufla de sucção e a linha de descarga. De maneira geral, esses componentes podem ser agrupados em dois grupos, o motor e o mecanismo de compressão, apresentados nas seções 3.1.3.1 e 3.1.3.2.

Figura 6 – Elementos de um compressor hermético



Fonte: Adaptado de (SOTOMAYOR, 2013).

### 3.1.3.1 Motor

O motor é o responsável pela geração da força motriz do conjunto, provendo a potência para o mecanismo de compressão (BROWN, 2005). Em sua maioria, os compressores herméticos são comandados por motores elétricos, que são projetados considerando as exigências de torque de partida e operação do compressor. O objetivo é maximizar a eficiência dentro do intervalo de aplicação. Conforme destacado por Hundy, A. R. Trott e Welch (2008), os compressores utilizados em aplicações residenciais majoritariamente adotam motores elétricos monofásicos síncronos e de indução.

Os motores de indução, caracterizados por um estator enrolado e um rotor em formato de gaiola de esquilo, são reconhecidos por sua acessibilidade econômica e alta confiabilidade. Sua quase inexistente necessidade de manutenção os torna preferenciais em diversas aplicações (MILLER, R.; MILLER, M., 2014).

Diante da ausência de torque de partida em motores de indução monofásicos, adota-se um arranjo chamado fase dividida. Esse arranjo incorpora um enrolamento auxiliar no estator, defasado em 90 graus em relação ao enrolamento principal. Essa configuração permite a criação de um campo girante no momento da partida. Após atingir a velocidade operacional, o enrolamento auxiliar é desconectado do circuito, frequentemente por meio de um relé ou de um dispositivo semicondutor com coeficiente de temperatura positivo (MILLER, R.; MILLER, M., 2014).

Para atender às demandas específicas, os motores de indução fazem uso de acessórios elétricos adicionais, como capacitores, além do dispositivo de partida. Um dispositivo de segurança conhecido como protetor térmico também é empregado para proteger o motor contra picos de corrente e superaquecimento (MILLER, R.; MILLER, M., 2014).

Os motores de indução são a escolha padrão para a maioria dos modelos de compressores atuais. No entanto, há configurações de compressores, principalmente os de capacidade variável, que empregam motores de corrente contínua sem escovas.

No caso dos motores do tipo sem escovas, que possuem um estator enrolado e um rotor com ímãs permanentes na superfície, sua operação requer o uso de um inversor de frequência devido à necessidade de uma frequência variável para acionamento (BRASÃO, 2012). Apesar das características vantajosas dessa categoria de motores, seu custo é significativamente mais elevado quando comparado aos motores de indução.

### 3.1.3.2 Mecanismo de compressão

O mecanismo de compressão pode ser constituído de variadas formulações e configurações, classificando o compressor de acordo com o tipo utilizado. Os compres-

sores herméticos realizam, geralmente, a compressão por meio da redução de volume utilizando o método de deslocamento positivo. Nesse método, mecanicamente ocorre a redução do espaço ocupado pelo fluido refrigerante a fim de aumentar sua pressão. Compressores de deslocamento positivo podem ser categorizados em tipos rotativos e alternativos.

Nos compressores de parafuso rotativo, o fluido refrigerante ingressa pela entrada na extremidade do compressor, onde os rotores macho e fêmea se desenroscam. O fluido fica retido entre os rotores e o alojamento, sendo o espaço reduzido à medida que os rotores se deslocam para o lado oposto da entrada de fluido. Dessa forma, o refrigerante é comprimido e direcionado para a porta de descarga. O fluido de resfriamento, introduzido no invólucro, mistura-se ao óleo lubrificante para vedar, lubrificar e dissipar o calor gerado durante a compressão. Essa substância cria uma película fina entre os rotores, efetivamente eliminando o contato direto e o desgaste metal-metal. Posteriormente, o fluido é separado do óleo, resfriado, filtrado e devolvido ao ponto de injeção (PROCESSOS INDUSTRIAIS, 2019).

Compressores de ar alternativos utilizam um pistão dentro de um cilindro como o componente responsável pela compressão e deslocamento. A rotação fornecida pelo motor é convertida em movimento alternativo, através de um conjunto biela-manivela. O pistão é conectado na extremidade oposta da biela. Esse arranjo provoca a criação de uma câmara de volume variável, permitindo que aconteça o chamado trabalho de fronteira móvel (ÇENGEL; BOLES, 2013). A operação é controlada por um conjunto de válvulas posicionadas no topo do cilindro. Essas válvulas de flexão são comandadas pela diferença de pressão entre o cilindro e as câmaras de sucção e de descarga (DOSSAT, 2004). A atuação dessas válvulas permite que o fluido escoe em um único sentido, impedindo o escoamento no contra-fluxo.

### 3.1.3.3 Princípio de funcionamento

O funcionamento de um compressor hermético alternativo é fundamentado em uma sucessão de etapas. O processo se inicia com a entrada do fluido refrigerante, o qual, devido à sua baixa pressão, adentra na câmara por meio da válvula de sucção. Através do recolhimento de um pistão presente no interior do compressor, gera-se um vácuo na câmara de sucção, aspirando o vapor de refrigerante para dentro pela diferença de pressão gerada.

Após a entrada do vapor, o pistão se move para frente gerando a compressão do mesmo. Esse processo acaba aumentando a pressão do vapor, convertendo-o em um vapor de alta pressão. Ao alcançar uma pressão relativamente alta, a válvula de descarga se abre, permitindo que refrigerante pressurizado seja liberado da câmara de compressão para o sistema de condensação.

No sistema de condensação, o vapor refrigerante a alta pressão libera o calor

para o ambiente circundante ao passar por um condensador. O calor liberado faz com que o vapor se condense, transformando-o novamente em líquido. O refrigerante em estado líquido e alta pressão, atravessa uma válvula de expansão, onde ocorre a redução de sua pressão.

Após essa etapa, o líquido, já com sua pressão reduzida, adentra no evaporador, onde absorve o calor do ambiente a ser resfriado. Durante esse processo, o líquido se transforma novamente em vapor. Então, o vapor a baixa pressão é aspirado novamente para a câmara de sucção do compressor, reiniciando o ciclo. Esse processo ocorre continua e repetidamente para manter a circulação do fluido refrigerante e realizar a transferência de calor do ambiente refrigerado para o espaço externo.

As condições operacionais de um compressor hermético influenciam diretamente em seu desempenho e eficiência do sistema em que é empregado. De acordo com (ÇENGEL; BOLES, 2013), a operação de um compressor está sujeita a alguns fatores como: temperatura ambiente, carga térmica, pressões de sucção e descarga, nível de refrigerante, frequência e ciclos de operação, entre outras. Ao manter essas variáveis controladas e constantes, segundo Çengel e Boles (2013) a operação do compressor pode ser determinada, principalmente, pelo estado termodinâmico do refrigerante durante o processo de sucção e descarga.

Nesse sentido, devido ao fato de em um sistema de refrigeração o fluido se encontrar, de maneira geral, saturado dentro dos trocadores de calor, as variáveis temperatura e pressão se tornam propriedades diferentes. Com isso, é possível definir as temperaturas de evaporação e condensação do sistema em função dos valores de pressão do evaporador e condensador correspondentes.

Ao desprezar perdas de cargas no circuito de tubulação montado, essas pressões podem ser obtidas através de uma aproximação pela pressão de admissão do compressor, no caso da pressão de evaporação e, pela pressão na descarga do compressor, no caso da pressão do condensador. Nesse sentido, conhecida a curva de saturação adequada de cada tipo de fluido refrigerante, é possível converter as pressões medidas em temperaturas relacionadas, assim como, as temperaturas em pressões.

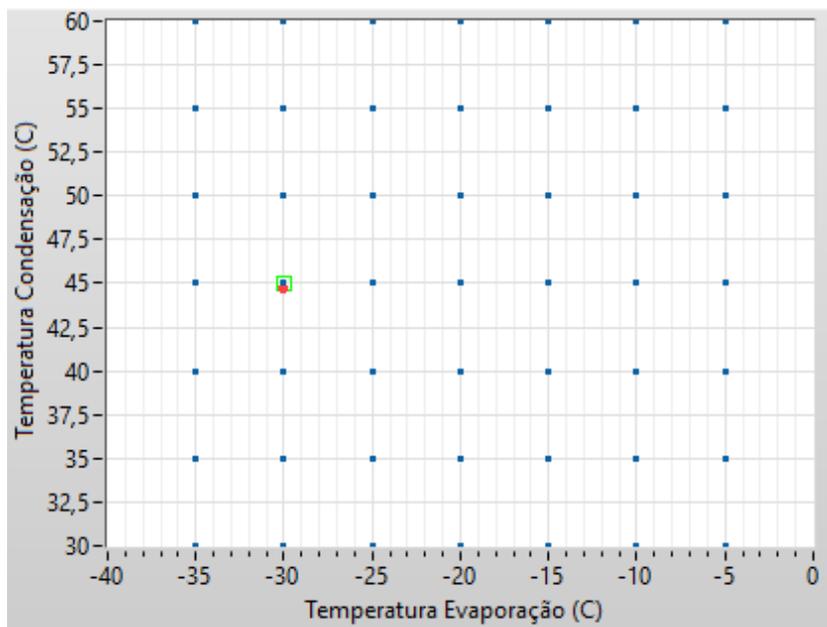
Com isso, cada cenário de operação pode ser descrito pelo par ordenado das temperaturas de evaporação (sucção) e condensação (descarga), como visto na Figura 7.

### 3.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Sistemas de medição desempenham um importante papel em diversas áreas das engenharias. Esses sistemas são projetados com o objetivo de quantificar e avaliar grandezas físicas, fornecendo dados essenciais para o auxílio nas tomadas de decisões.

Em processos ligados a sistemas de refrigeração, algumas das grandezas de

Figura 7 – Condições de operação de um compressor hermético



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

maior interesse se baseiam em dados termodinâmicos do processo. Nesse sentido, neste trabalho foi utilizado sistemas de medição dedicados a aquisição de temperatura e pressão em variados pontos e locais do circuito projetado, a fim de se obter dados para se caracterizar o estado do processo.

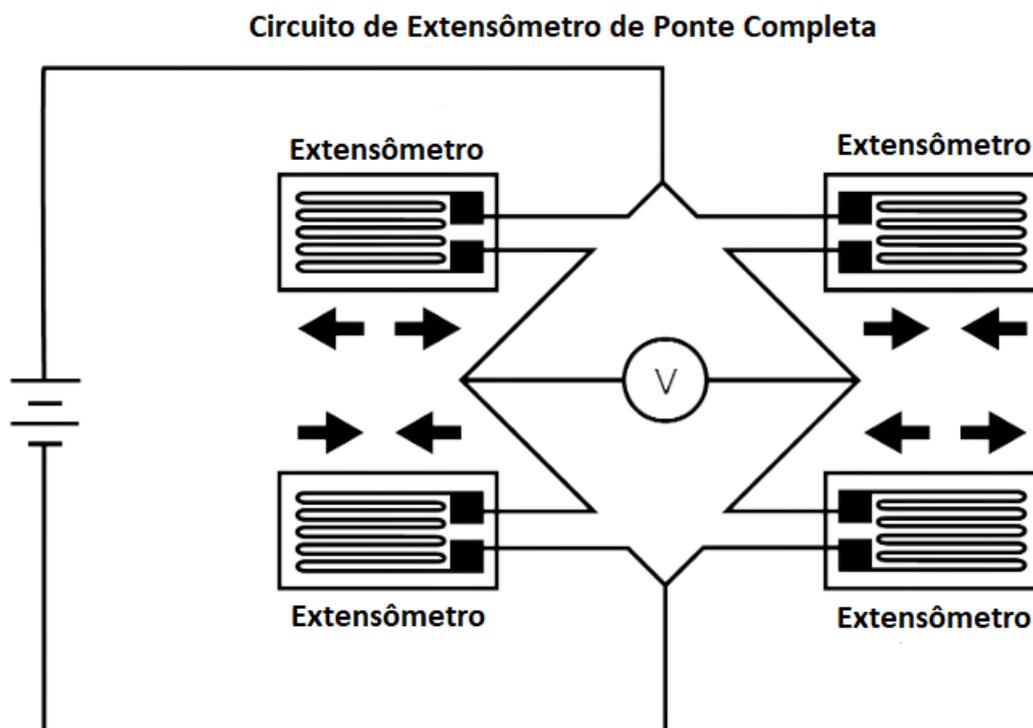
### 3.2.1 Transmissor de pressão

Transmissores de pressão são instrumentos de medição dedicados à aquisição de dados de pressão, sendo compostos, tipicamente, por elemento mecânico elástico e um transdutor elétrico. Diversos modelos existem atualmente, cada qual com princípios de funcionamento diferentes, podendo ser mecânicos, pneumáticos e eletrônicos, os quais foram utilizados neste trabalho.

Os transdutores de pressão eletrônicos funcionam através da conversão de pressão em um sinal elétrico, podendo ser corrente ou tensão. Atualmente, há uma variedade de princípios de funcionamento, sendo alguns deles os piezoresistivos, os extensométricos e os capacitivos.

O transdutor extensométrico, utilizado no projeto, tem seu funcionamento baseado na utilização de extensômetros aliados a circuitos de ponte de Wheatstone, conforme a Figura 8. Essa associação transforma a deformação do elemento elástico em um sinal elétrico padronizado.

Figura 8 – Extensômetro aliado a ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de (SMITH, 2020).

### 3.2.2 Sensor de temperatura

Os sensores de temperatura são dispositivos de medição que detectam a temperatura a partir de uma característica física correspondente do tipo de sensor utilizado. Segundo Aragonés et al. (2003), alguns dos tipos de sensores mais comuns são os termorresistores, termopares e termistores.

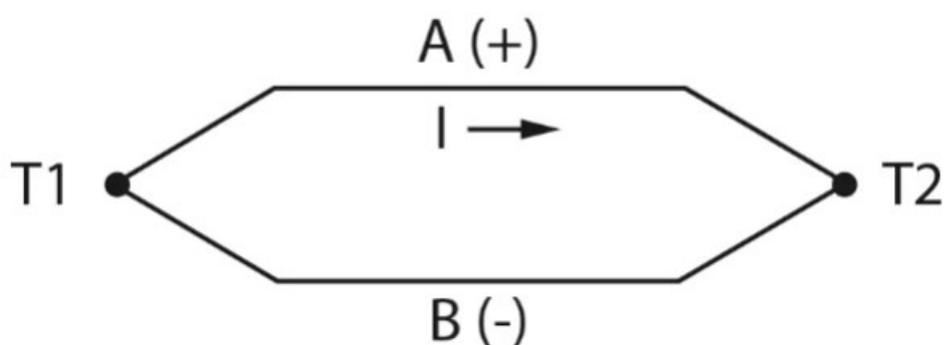
Os sensores de temperatura termorresistivos, utilizados no desenvolvimento deste projeto, se baseiam na variação conhecida da resistência elétrica de alguns materiais ao serem submetidos à uma variação de temperatura. Segundo (MOTA, 2017), a medição por termorresistência possui um coeficiente positivo de temperatura, onde, conforme o aumento da temperatura do termorresistor, há o aumento da resistência elétrica da resistor.

Um dos tipos de sensores de temperatura termorresistivos mais utilizados atualmente é o Pt100. Esse tipo de sensor possui alguns métodos construtivos, sendo o mais comum a configuração de uma extensão de um fino fio espirado envolto em um núcleo de cerâmica ou vidro. Em uma temperatura de 0 °C, o Pt100 possui uma resistência de 100  $\Omega$ , característica essa que atribui o nome ao sensor.

Os termopares, conhecidos também como par termoelétricos, são sensores de temperatura que possuem aplicação para medição de temperatura desde algumas dezenas negativas até milhares de graus Célsius.

Os termopares funcionam com base no princípio do efeito Seebeck, no qual são constituídos por dois metais distintos, unidos e conectados em suas extremidades, formando um circuito fechado, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de funcionamento termopar



Fonte: (TRUST, 2023).

Quando uma das extremidades é aquecida, ocorre a geração de uma corrente contínua que flui no circuito termoelétrico. Se o circuito for interrompido no centro, a tensão de circuito aberto líquido se torna uma função da temperatura de junção e da composição dos dois metais. O que significa que, ao aquecer ou arrefecer uma das extremidades, é possível correlacionar a tensão gerada a uma temperatura.

Os termistores, termo originado da junção de resistores térmicos, são componentes eletrônicos semicondutores, cuja resistência é afetada pela variação de temperatura. Assim como as termorresistências, o termistor também é um resistor sensível à temperatura, no qual, preza pela alto grau de sensibilidade, traduzindo pequenas variações de temperatura em grandes variações na resistência elétrica do dispositivo, seguindo uma relação exponencial. Sua faixa de aplicação geralmente dá na ordem de temperaturas criogênicas, cerca de  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$  até valores de  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

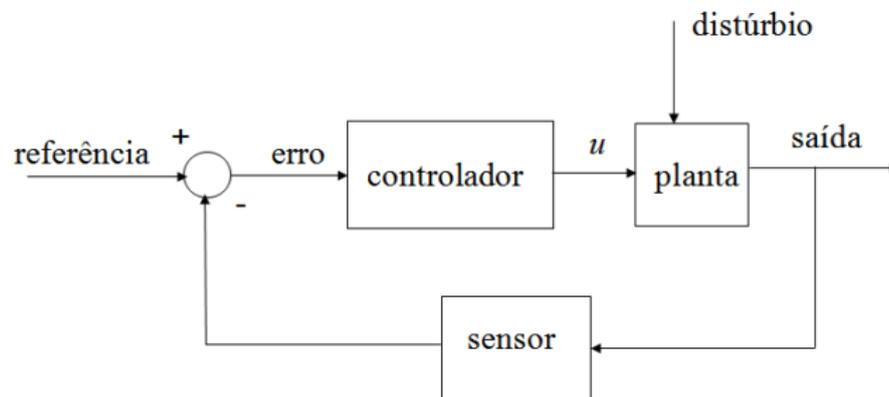
Os termistores que possuem uma elevação da resistência com o aumento da temperatura são denominados de coeficiente térmico positivo, do inglês Positive Thermal Coefficient (PTC). Já os termistores cujo a resistência diminui com o aumento da temperatura são classificados como coeficiente térmico negativo, do inglês Negative Thermal Coefficient (NTC).

### 3.3 SISTEMAS DE CONTROLE

Um sistema controle de processos tem por objetivo atuar sobre uma ou mais variáveis determinadas, a fim de fazer com que o estado de um processo atinja os valores desejados (SEBORG, 2011). Essa característica advém da formulação mate-

mática de sistemas realimentados, no qual, destina-se uma ponderação constante do erro monitorado entre o valor desejado e a saída do processo, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Estrutura de um sistema de controle



Fonte: (SIQUEIRA, 2017).

Para que o controle projetado atue corretamente, faz-se necessário conhecer a forma em que a variável manipulada influencia sobre a variável de processo. De modo geral, essa relação não é estática, e faz-se necessário realizar a identificação dessa dinâmica.

### 3.3.1 Identificação de sistemas

O propósito da identificação de sistemas é encontrar um modelo matemático que represente todas as características fundamentais do sistema, com base na aplicação de uma entrada conhecida no processo e na medição da resposta obtida (COELHO, A. A. R.; COELHO, L., 2004).

Sendo uma entrada conhecida  $u(.)$  e uma saída  $y(.)$ , então, a partir da relação de causa e efeito, é possível se obter uma relação  $h(.)$  que descreve a dinâmica do processo, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Elementos do sistema



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

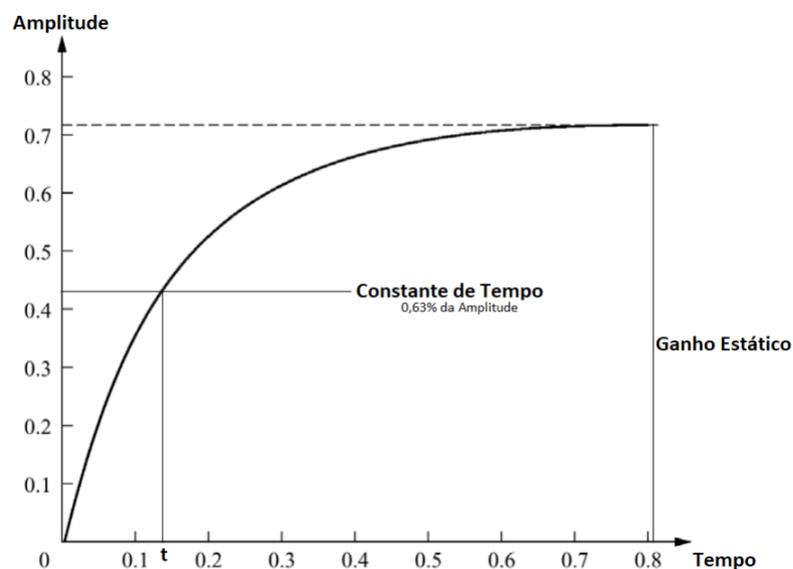
Embora este processo de identificação seja muito útil para a elaboração de sistemas de controle, o modelo obtido não corresponde fielmente ao processo real. Isto ocorre devido as simplificações adotadas durante o levantamento do modelo, entretanto, para maioria dos casos de projeto de controlador, o modelo adquirido satisfaz os requisitos desejados.

### 3.3.2 Resposta ao degrau unitário

O ensaio de resposta ao degrau unitário visa, através da variação abrupta da magnitude do sinal de entrada, identificar as características dinâmicas do processo (COELHO, A. A. R.; COELHO, L., 2004).

Considerando um sistema estável, ao aplicar um sinal do tipo degrau unitário na entrada, é possível identificar na saída, conforme a Figura 12, o valor de ganho estático e a constante de tempo, podendo, com base nisso, descrever a função de transferência do sistema.

Figura 12 – Ensaio de resposta ao degrau

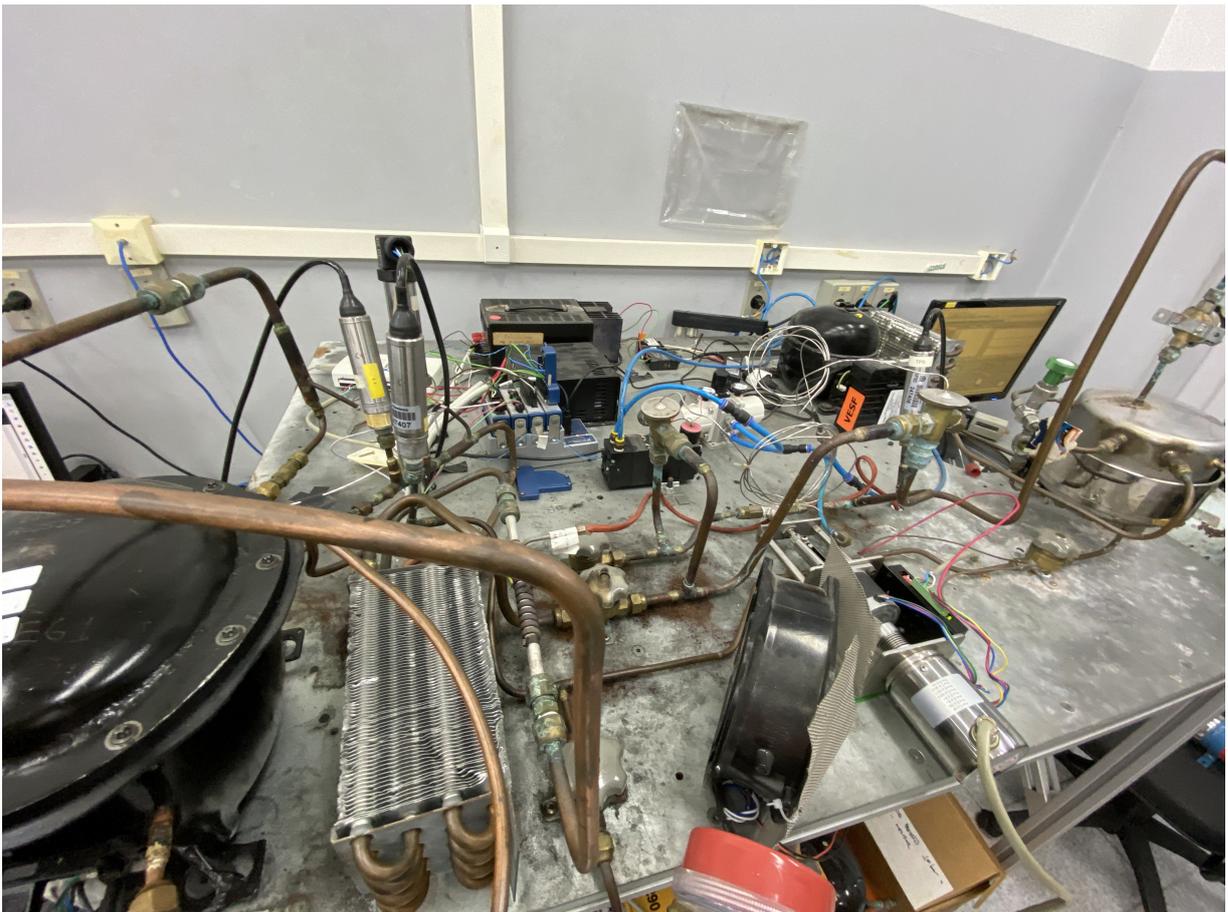


Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

#### 4 ESTADO ORIGINAL DA BANCADA

A bancada de ensaios utilizada neste trabalho, apresentada na Figura 13, é fruto de um projeto de pesquisa realizado com apoio da Nidec Global Appliance juntamente com o LIAE. O principal propósito consiste em emular as condições de pressão e temperatura encontradas em ambientes operacionais, com a finalidade de adquirir dados relativos à operação do compressor nestes cenários específicos, sem necessidade de construção de um sistema específico para cada condição.

Figura 13 – Bancada de ensaios

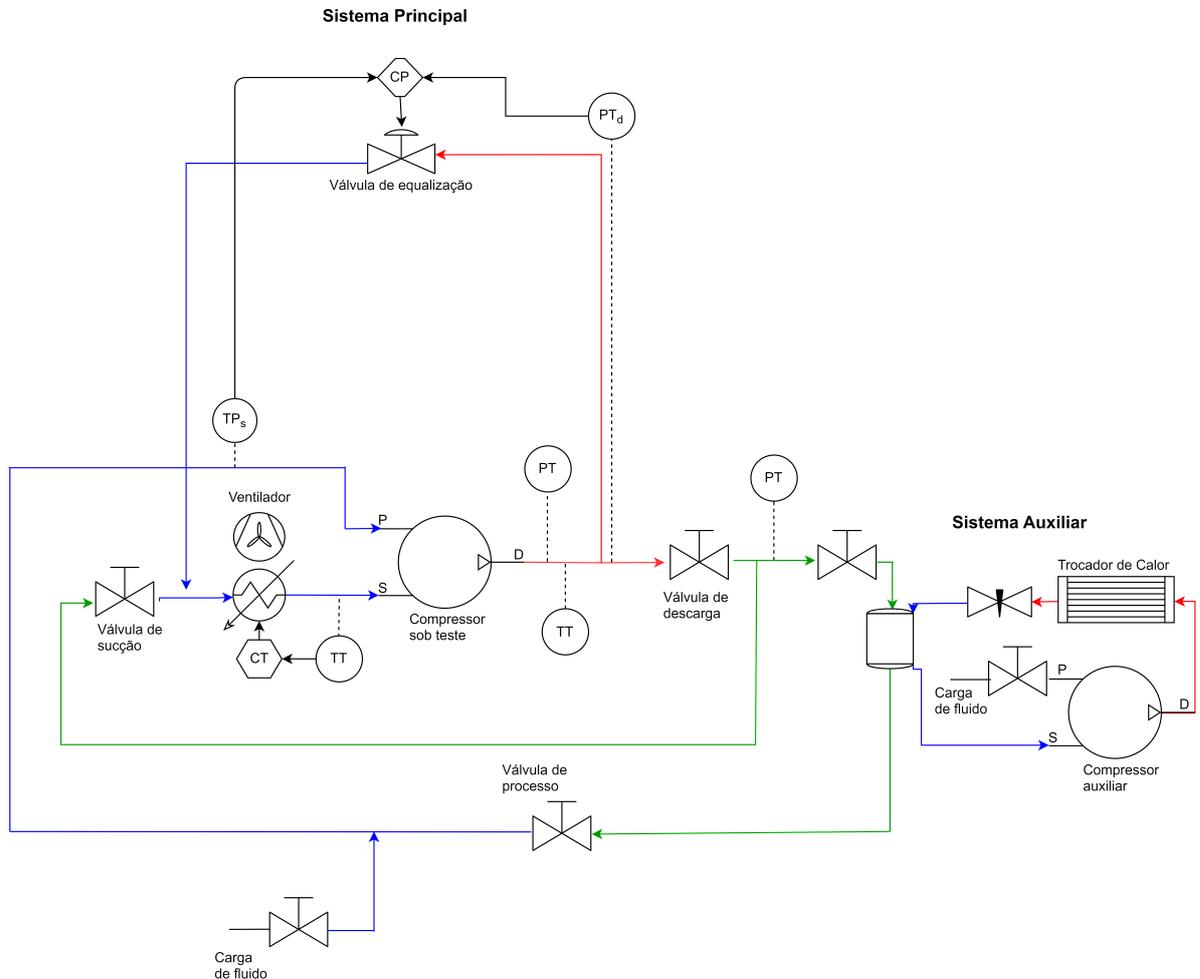


Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

A formulação original do sistema, anterior ao início deste PFC, consistia em uma configuração com um circuito principal e um circuito auxiliar, como ilustrado de maneira mais detalhada no diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID, do inglês Piping and Instrumentation Diagram) na Figura 14. O circuito principal desempenha um papel fundamental na emulação das condições de operação. Seu funcionamento é baseado no conceito de operação em ciclo quente, no qual não há troca de fase do fluido refrigerante. Por contrapartida, o circuito auxiliar atua como um suporte ao circuito principal, sendo responsável por resfriar o reservatório de fluido da bancada, prevenindo, assim, o sobreaquecimento do sistema. Para desempenhar esse papel, o

circuito auxiliar opera como um circuito de refrigeração convencional no qual ocorre a mudança de fase do fluido refrigerante.

Figura 14 – P&ID da bancada



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

No circuito principal, o fluido é fornecido por meio do caminho de processo que se conecta ao compressor submetido ao ensaio. Quando o compressor é ativado, ocorre a sucção do refrigerante e a compressão na saída de descarga. O fluido passa por diversas válvulas no decorrer do circuito, dentre elas, a de equalização. Essa válvula tem por objetivo equalizar as pressões entre a descarga e a sucção, sendo mais um grau de liberdade para o controle do sistema.

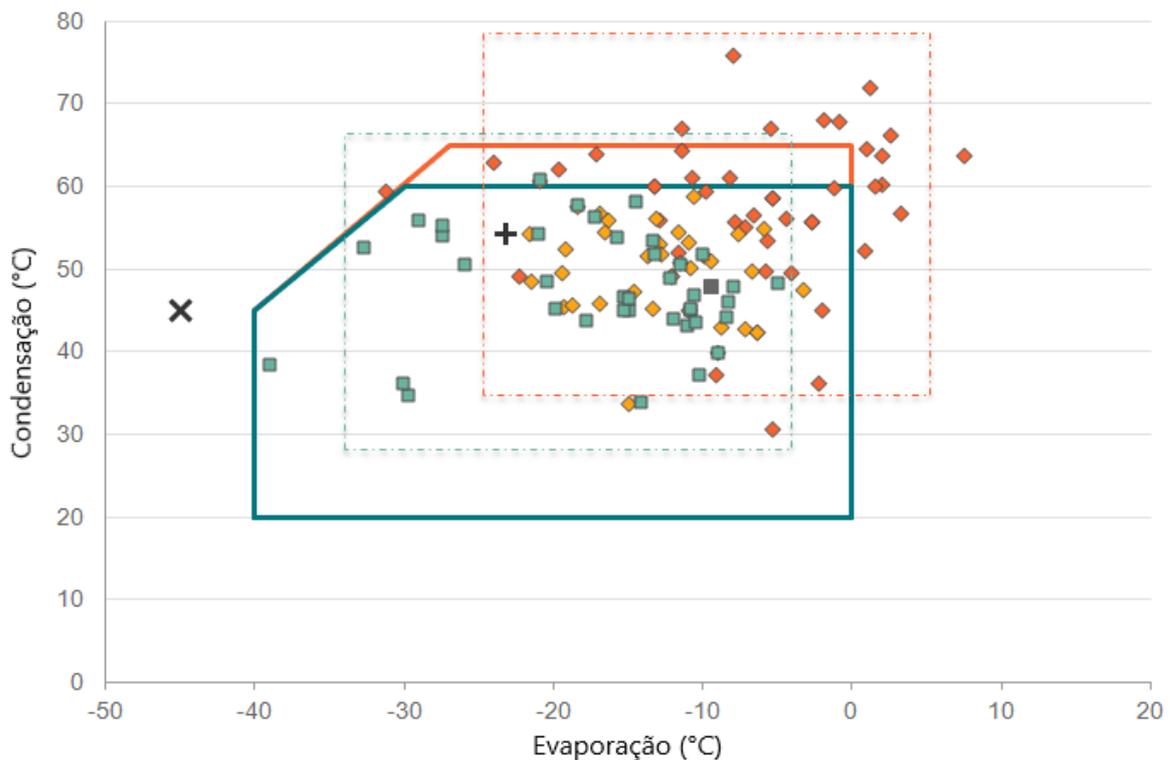
Ao longo do circuito estão presentes vários instrumentos de medição, como transdutores de pressão e temperatura. A colocação desses instrumentos foi planejada com base nas informações necessárias para emular as condições operacionais. Além disso, no trecho de pré-sucção, há uma malha de controle de temperatura. Essa estação tem como finalidade aquecer ou resfriar o fluido refrigerante para garantir a condição de temperatura de sucção durante os ensaios.

## 5 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

Como forma de adequar a bancada a novos modelos de compressores desenvolvidos, as regiões de operação foram alteradas em relação aos modelos originalmente utilizados na bancada. O compressor cedido pela Nidec Global Appliance para realização de ensaios pertence a uma linha dedicada a aplicações de uso em sorveteiros, possuindo características próprias de sua aplicação.

Nesse sentido, o envelope de condições operacionais dessa linha de compressores, na Figura 15, abrange cenários em que a configuração base da bancada não consegue chegar. Normalmente, o envelope base originalmente alcançado compreendia temperaturas de evaporação na ordem de  $-5\text{ °C}$  a  $-35\text{ °C}$  e temperaturas de condensação de  $35\text{ °C}$  a  $55\text{ °C}$ . De acordo com o novo envelope, percebe-se que o novo compressor opera em cenários mais extremos, constituindo um mapa de condições com temperaturas de evaporação na ordem de  $0\text{ °C}$  a  $-40\text{ °C}$  e de condensação de  $20\text{ °C}$  a  $60\text{ °C}$ .

Figura 15 – Novo envelope de operação



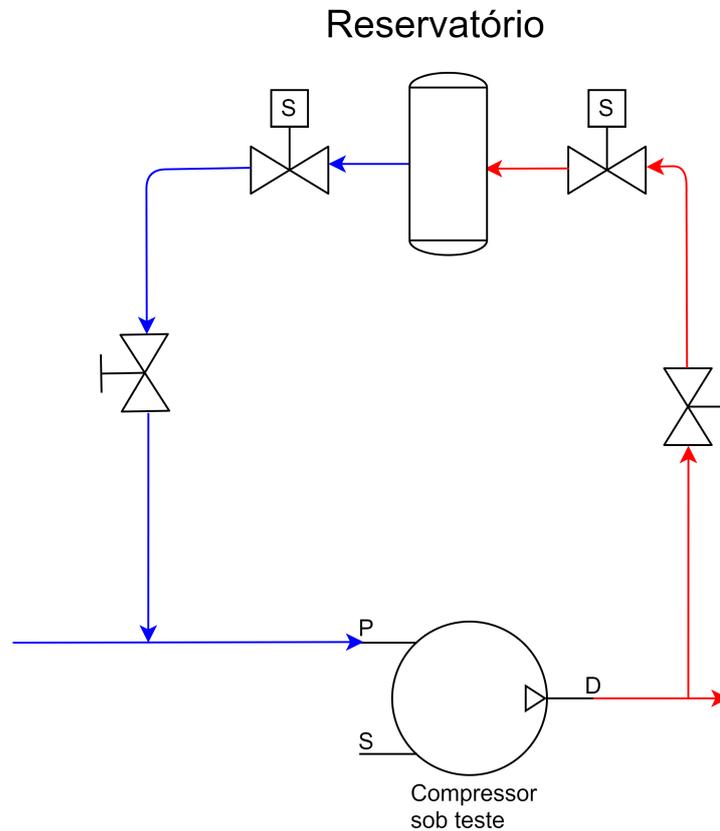
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Nesse sentido, para que a bancada pudesse alcançar tais condições, foi necessário projetar uma série de modificações em sua estrutura e programação.

Devido ao fato de o circuito possuir uma quantidade limitada de fluido refrigerante, uma das soluções propostas baseou-se no acréscimo de um tanque reservatório,

realizando um desvio entre os caminhos de descarga e de processo, apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Tanque reservatório



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

A inserção desse tanque permite que haja um controle sobre o volume de fluido no sistema. Devido ao posicionamento estar entre a saída de descarga e o processo, será possível, ao pressurizar o tanque, diminuir a pressão de sucção e a de descarga, fazendo com que se converta em menores temperaturas de evaporação e de condensação. Por outro lado, ao liberar o refrigerante pressurizado no caminho do processo, tem-se uma elevação das pressões do sistema, alcançando temperaturas de evaporação e de condensação mais elevadas.

Paralelamente à modificação física do circuito, pensou-se também na realização do controle sobre a ventoinha de arrefecimento da temperatura de sucção do sistema. Essa implementação possibilitará realizar ensaios em diversas condições operacionais, bem como avaliar o comportamento do compressor em cenários de maiores e menores temperaturas.

Devido à grande complexidade do código LabVIEW utilizado na programação da bancada, alguns problemas de processamento foram encontrados. Nesse sentido, uma outra abordagem proposta visou uma otimização de sua estrutura.

Por fim, foi projetada uma malha de controle da temperatura de sucção do

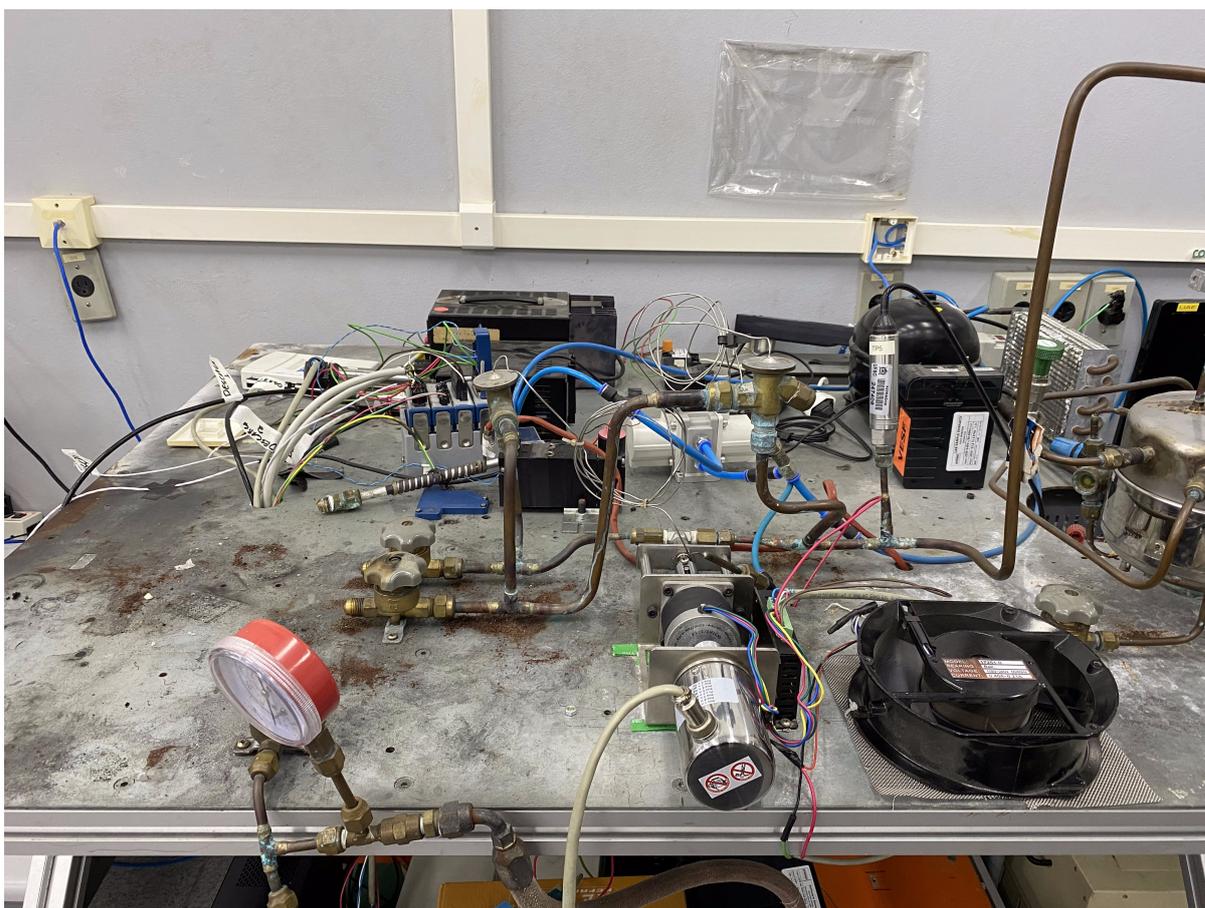
fluido refrigerante, de modo a permitir a definição desse parâmetro, que é um dos que caracterizam a condição de operação do compressor.

As principais modificações realizadas na bancada são descritas nas seções a seguir.

### 5.1 IMPLANTAÇÃO DO TANQUE RESERVATÓRIO

O processo de implementação do reservatório iniciou-se pela desmontagem da antiga estrutura da bancada já existente, armazenando o fluido refrigerante na parte do circuito em que não haveria modificações, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Desmontagem do circuito



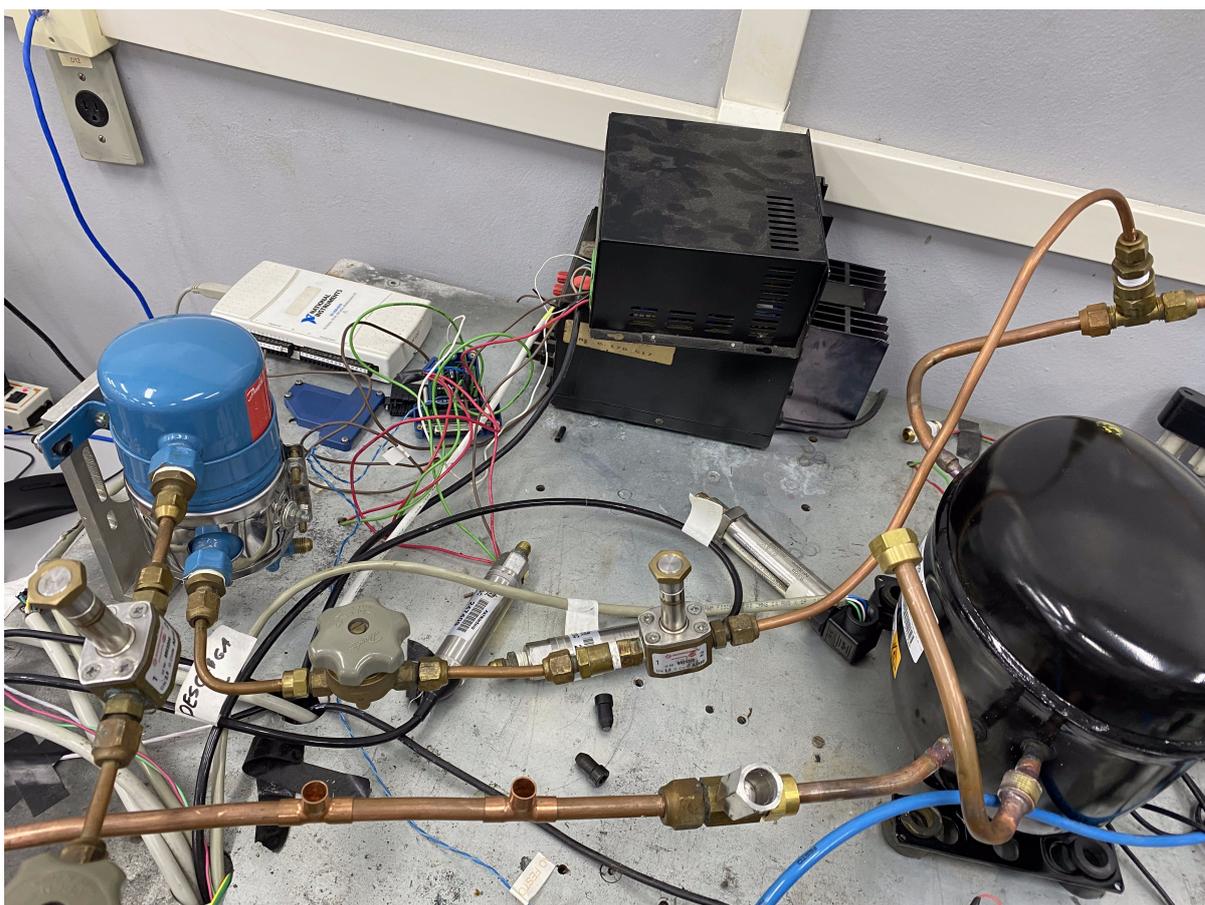
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Devido ao fato de o compressor estar em um local muito restrito e compacto, o que fazia com que o circuito possuísse muitas curvas fechadas e, conseqüentemente diversos pontos de perda de carga, pensou-se em uma nova maneira de posicionar o novo compressor. Esse novo local deveria permitir uma maior liberdade para o projeto das tubulações, bem como, possibilitar uma maior facilidade na troca dos compressores, caso necessário futuramente.

Nesse sentido, o melhor local a se instalar acabou sendo a parte posterior do circuito principal, pois havia maior espaço e liberdade para se projetar os circuitos. Em vista disso, foi necessário reorganizar as fontes e placas de aquisição presentes na parte de trás da bancada para que fosse possível alocar o compressor neste local.

Após a definição da posição do compressor, procedeu-se para a instalação do reservatório. Entre as linhas de entrada e de saída do reservatório, instalou-se uma válvula do tipo solenoide e, de redundância, uma outra de acionamento manual, conforme Figura 18. A instalação desses atuadores se fez necessária para o controle de entrada e saída do fluido refrigerante que passa por este caminho.

Figura 18 – Instalação do reservatório



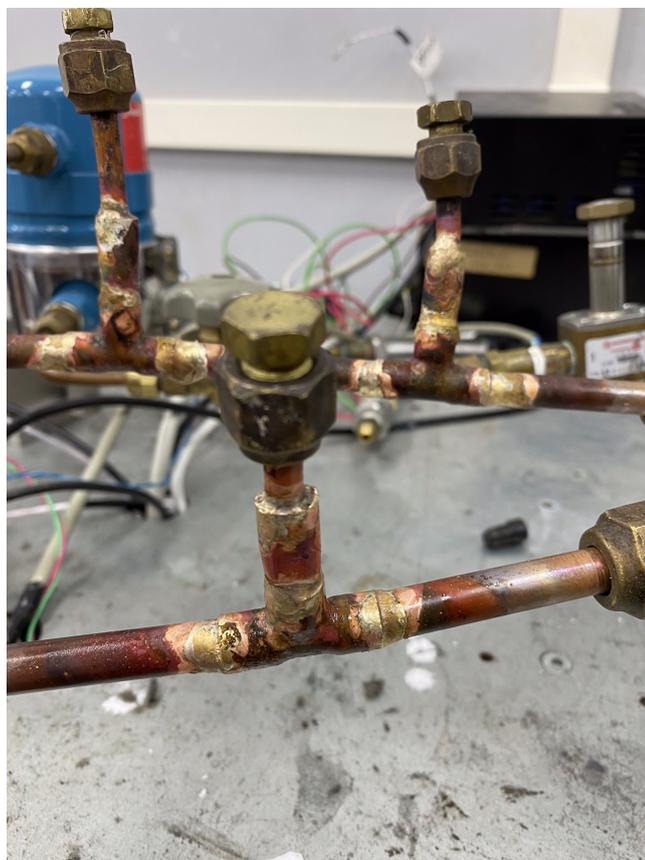
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Durante o reprojeto dos circuitos, realizou-se a troca dos tubos de cobre de 0.003 m para tubos de 0.006 m de diâmetro. Essa alteração visou padronizar o diâmetro das tubulações utilizadas, que apresentavam diversos tamanhos na configuração anterior. Essa mistura de diâmetros provoca perda de carga no circuito, gerando inconformidades nas simulações realizadas.

A conexão das tubulações foi executada por meio de duas técnicas distintas. Nos pontos em que houve compatibilidade de diâmetro, optou-se pelo processo de flangeamento. Esse procedimento envolve a criação de uma rebarba no tubo para

que ele se encaixe perfeitamente na conexão correspondente. Em contrapartida, nos pontos em que o flangeamento não era viável, recorreu-se à aplicação de solda de prata para efetuar a conexão, como ilustrado na Figura 19. Esses pontos incluíam, principalmente, os locais de ligação dos transdutores de pressão, os quais, não eram compatíveis com as tubulações de 0.006 m de diâmetros utilizadas.

Figura 19 – Soldagem das conexões



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Após a realização da brasagem, realizou-se a pressurização da linha com gás nitrogênio, uma vez que, devido ao fato de não ser inflamável, não seria perigoso se houvesse vazamentos. Ao pressurizar, verificou-se que havia alguns pontos de vazamento presentes no circuito, Figura 20, sendo necessária a realização de um acréscimo de solda no local novamente. Esse procedimento de verificação de vazamentos foi realizado diversas vezes, sendo necessário, a cada verificação, repetir o processo de brasagem do ponto identificado.

Concluído o processo de verificação e validação dos pontos de solda realizados, procedeu-se para a etapa de remontagem da bancada. Nessa etapa, realizou-se primeiramente o processo de extração do ar presente no circuito. Esse processo se faz necessário para que se possa preencher o espaço interior completamente com o fluido refrigerante, sem haver contaminação com outro tipo de gás. Para execução desta etapa, utilizou-se uma ferramenta especial, a qual, pode gerar vácuo a pressões

Figura 20 – Procedimento manual para detecção de vazamentos



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

na ordem de 100 Pa, conforme Figura 21.

Após a geração de vácuo no circuito, procedeu-se para a liberação do fluido refrigerante na tubulação. O refrigerante utilizado é o **R290**, um hidrocarboneto amplamente utilizado em sistemas de refrigeração residenciais e comerciais. Sua composição é natural, o que faz com que esse refrigerante possua um baixo valor de potencial de aquecimento global, termo traduzido do inglês Global Warming Potential (GWP), não sendo agressivo à camada de ozônio.

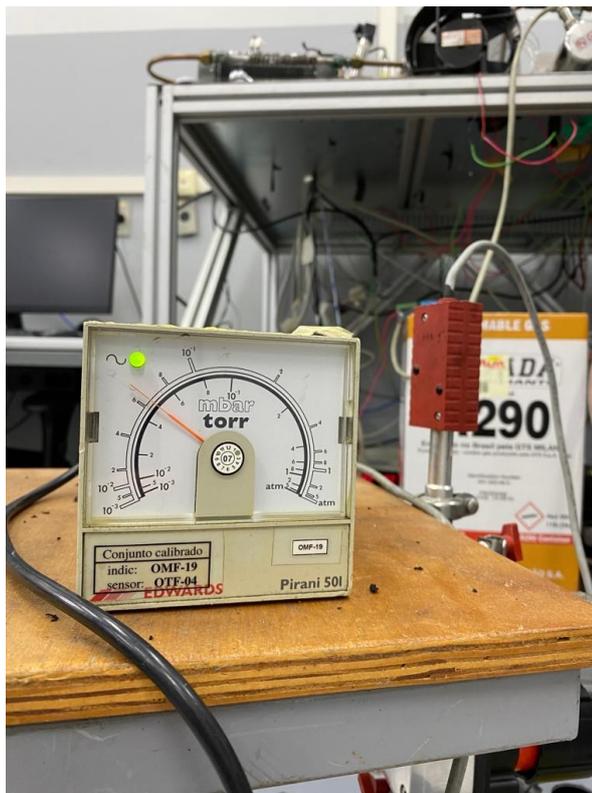
Por fim, com a inserção de refrigerante realizada, concluiu-se o processo de modificação estrutural da bancada. A nova configuração da mesma, compreendendo agora o novo compressor para ensaios e o acréscimo do reservatório para controle de pressão pode ser vista na Figura 22.

## 5.2 INSTRUMENTOS ADICIONADOS

Com o reprojeto estrutural da bancada, algumas modificações nos meios de medição e atuação foram realizadas. Essas alterações visaram complementar as informações adquiridas.

Com o acréscimo do tanque reservatório, fez-se necessário instalar válvulas de controle para que fosse possível realizar a pressurização e despressurização do

Figura 21 – Vácuo gerado



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

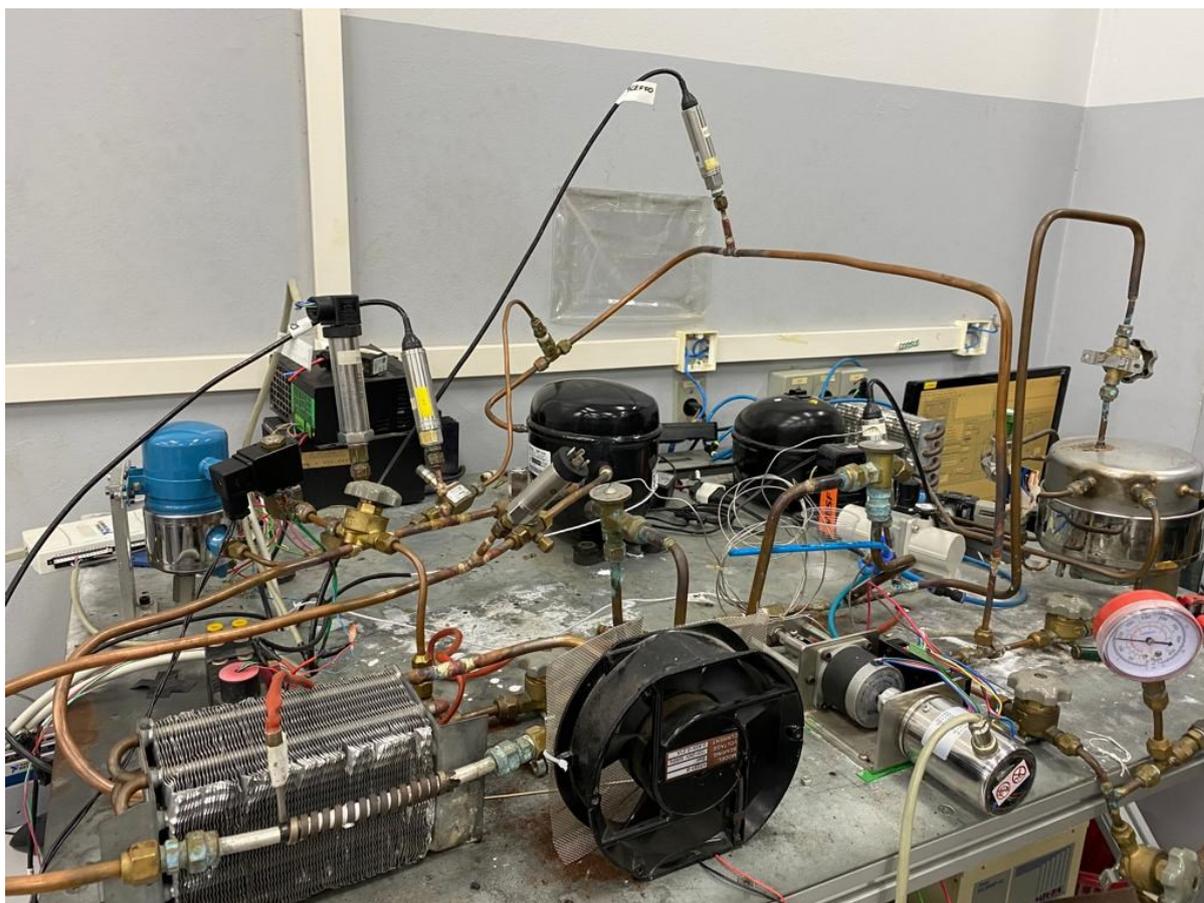
mesmo. Em um primeiro momento, as válvulas instaladas foram as de diafragma de abertura e fechamento manual, Figura 23.

Esse modelo de válvula é indicado para sistemas de refrigeração devido a sua alta confiabilidade e seus limites de operação. No entanto, por ser de acionamento manual, utilizar somente este modelo acrescentaria um grau de atenção extra na operação da bancada. Com isso, juntamente ao uso deste tipo de válvula, acrescentou-se um modelo do tipo solenoide, apresentado na Figura 24.

A válvula solenoide é controlada através da corrente elétrica que passa por uma bobina, conforme pode ser visualizado na Figura 25. Quando esta é energizada, um campo magnético é criado fazendo com que um êmbolo dentro da bobina se mova. Dependendo do estado da bobina, o movimento do êmbolo pode resultar em uma passagem ou não do fluido refrigerante. A grande vantagem de utilizar este modelo é a possibilidade de realizar um controle automático de seu acionamento via software, não sendo mais necessário realizar manualmente.

Em relação à medição de pressão no sistema, identificou-se a necessidade de se implementar um novo ponto de monitoramento no caminho da sucção, o qual não havia na formulação anterior da bancada. Para isso, foram analisados alguns modelos de transdutores disponíveis no laboratório visando um equipamento que operasse na faixa desejada (0 MPa a 2.5 MPa) e que possuísse uma menor incerteza de medição.

Figura 22 – Nova configuração da bancada



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 23 – Válvula de diafragma de acionamento manual



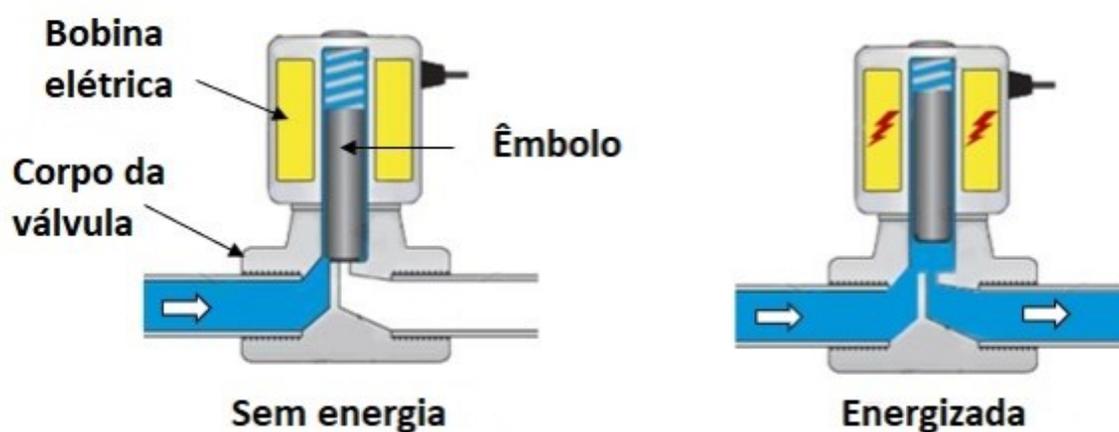
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 24 – Válvula solenoide



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 25 – Funcionamento da válvula solenoide



Fonte: Adaptado de MTi Brasil, 2023.

Após verificação no datasheet no Anexo 7.2, considerou-se a escolha do modelo **UNIK PMP 5073**, Figura 26. Este transdutor de pressão apresenta uma faixa de medição na ordem de 0 MPa a 2.5 MPa e uma especificação de incerteza de medição adequada para a aplicação ( $\pm 0,04\%$  do fundo de escala).

Figura 26 – Transdutor de pressão UNIK PMP 5073 instalado na bancada



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

### 5.3 OTIMIZAÇÃO DO CÓDIGO

O software por de trás do funcionamento da bancada foi escrito em código LabVIEW. Esse tipo de linguagem se baseia na programação gráfica, através de blocos de códigos e funções.

Na configuração anterior, a programação da bancada apresentava um grande consumo de processamento da unidade central de processamento, do inglês Central Processing Unit (CPU), ocasionando, por muitas vezes, o interrompimento do ensaio em andamento. Nesse sentido, uma ampla verificação de sua programação foi necessária, no objetivo de reduzir partes redundantes e não utilizadas, assim como modificar algumas estruturas afim de otimizar seu funcionamento.

Ao realizar a verificação na programação, percebeu-se que o código não possuía uma estrutura de funcionamento bem definida. Encontrou-se, também, muitas partes de código redundante e outras não utilizadas em nenhum momento de sua operação, que por estarem rodando em paralelo com as demais, consumiam processamento da CPU.

A abordagem de retificação do código seguiu, primeiramente, na definição da prioridade na ordem de inicialização. Nesse sentido, criou-se uma Flat Sequence, estrutura de prioridade de execução. Nessa estrutura, foram inicializadas, primeiramente, todas as variáveis e estados do sistema. Somente após este passo, o programa entra em modo de execução dos blocos de lógica. Essa separação de tarefas permitiu o início adequado do sistema, garantindo que todos os estados comecem no valor desejado.

Posteriormente, foram identificadas estruturas que implementavam a mesma funcionalidade. Essas partes do código realizavam repetidamente diversas análises de caso, cada uma com uma aplicação de uma estrutura do tipo Case Structure, lógica que analisa a condição de uma variável e executa alguma função a depender da condição observada. Nesse sentido, procurou-se agrupar essas partes em uma estrutura de Event Structure, que realiza a mesma ação desejada, porém, com um menor uso de poder computacional.

Observou-se, também, um problema na parte da configuração da aquisição de dados. Ao executar o código, percebeu-se diversas vezes que o acesso à placa de aquisição acontecia de forma simultânea, gerando um problema de alocação de recurso no sistema. Nesse sentido, implementou-se uma lógica com o objetivo de, primeiramente, verificar a disponibilidade da placa. Se ela estiver disponível, o recurso é reservado, para então realizar a leitura necessária e, posteriormente, liberar o recurso. Com essa modificação, não houve mais a ocorrência do problema relatado.

Por fim, outra abordagem se deu na eliminação de blocos não utilizados. Durante a verificação, encontrou-se diversas variáveis e partes de códigos criadas que não eram usados em nenhuma parte da programação. Esse acúmulo de partes inutilizadas

gerava uma sobrecarga no sistema, prejudicando seu funcionamento. Com todas as modificações realizadas foi possível reduzir o tamanho do programa em torno de 10%.

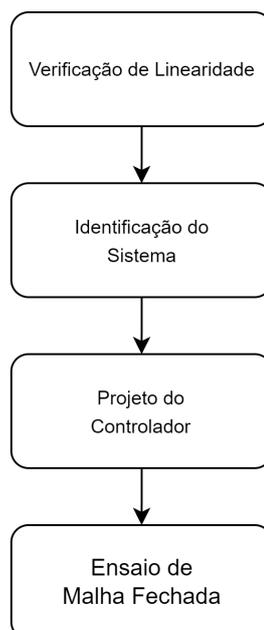
#### 5.4 CONTROLE DE TEMPERATURA

Após a conclusão da adaptação física da bancada, uma fase subsequente foi iniciada para o desenvolvimento do controle de temperatura na sucção. A incorporação desse controlador visa habilitar a realização de ensaios em uma ampla faixa de temperaturas, abrangendo diversos cenários observados na operação prática dos compressores herméticos.

Devido ao desenvolvimento em trabalhos anteriores de um controlador manipulando a potência dissipada em um resistor de aquecimento na sucção, focou-se, neste projeto, na elaboração de um controlador manipulando a ventoinha de refrigeração. O propósito desse controlador é agilizar o processo de resfriamento, permitindo a redução da temperatura de sucção em um menor intervalo.

No âmbito do projeto do controlador, utilizou-se como ponto de partida o fluxograma de processos apresentado na Figura 27. Este fluxograma detalha as etapas realizadas durante o desenvolvimento do sistema de controle, fornecendo uma orientação clara sobre os procedimentos adotados.

Figura 27 – Passos adotados no projeto do controle de temperatura

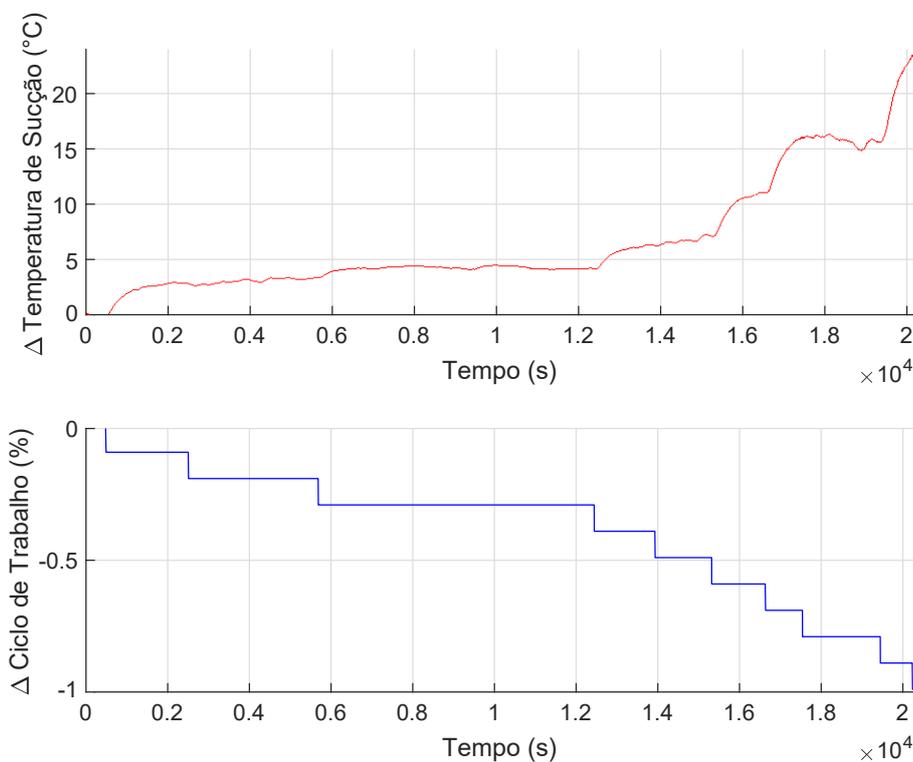


Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Nesse sentido, em um primeiro momento realizou-se um ensaio com o objetivo de identificar o comportamento da temperatura de sucção ao se variar a velocidade do ventilador. O acionamento da ventoinha se realizou por meio de modulação de largura de pulso, do inglês Pulse Width Modulation (PWM), variando o seu ciclo de

trabalho em intervalos de 10%. Para o ensaio, deixou-se primeiramente a temperatura de sucção assentar em um valor de operação, utilizando o ventilador em 100% de sua velocidade, reduzindo, posteriormente em intervalos de 10%. O resultado do ensaio pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 – Ensaio em malha aberta

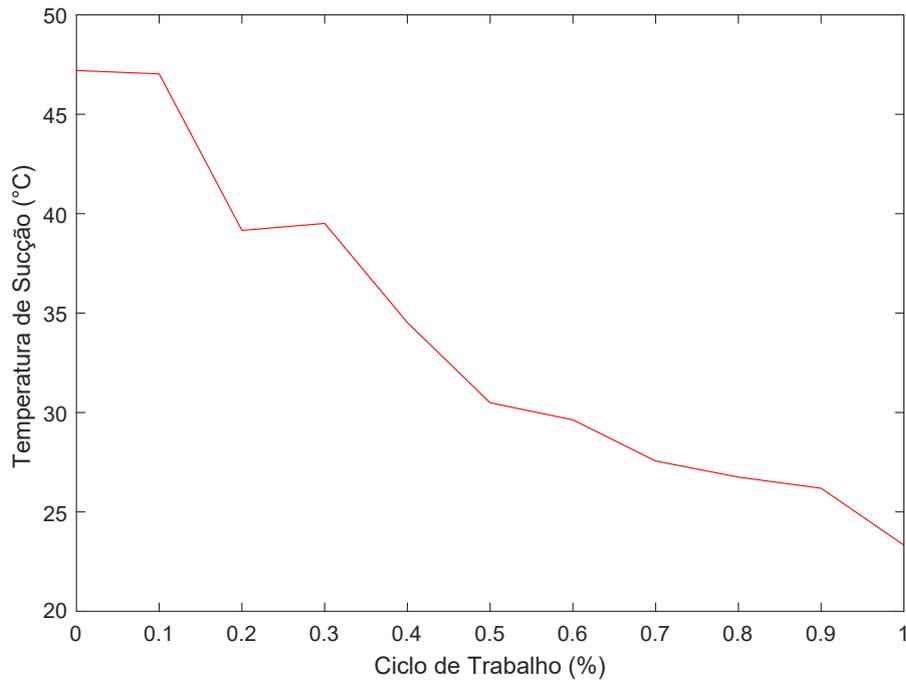


Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Ao analisar a resposta obtida, verificou-se que o comportamento da temperatura de sucção apresenta uma dinâmica lenta e não linear, característica de sistemas térmicos. Percebe-se que, ao se operar a ventoinha em intervalos de 100% a 50% do seu ciclo de trabalho, a variação de temperatura devido à redução da velocidade se limita a poucos graus Celsius. No entanto, na medida em que o ciclo de trabalho opera em valores menores que 50%, o ganho de temperatura se eleva muito em relação ao obtido na outra faixa. Essa variação de ganho se torna mais evidente ao ser comparada a temperatura de equilíbrio em função da variação do ciclo de trabalho, conforme apresentado na Figura 29.

Considerando que, devido a testes e ensaios realizados, a operação média da ventoinha se situa em intervalos de 30% a 50% de ciclo de trabalho, esse intervalo foi considerado para projeto do controlador. Possuindo por base esse intervalo e, observando o resultado obtido na Figura 29, pode-se aproximar a região por um comportamento linear. Com isso, assumiu-se 40% de ciclo de trabalho como ponto de operação para o projeto deste controlador.

Figura 29 – Temperatura de sucção por ciclo de trabalho



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Nesse sentido, após realizar o ensaio de resposta ao degrau, Figura 30, foi possível levantar o modelo do comportamento da temperatura de sucção em relação ao acionamento da ventoinha. Esse modelo pode ser aproximado por um sistema de primeira ordem, caracterizado pela função de transferência em (1):

$$G(s) = -\frac{0,001058}{s + 0,002527}. \quad (1)$$

Com o modelo levantado, definiu-se que a resposta do controlador deverá estar dentro dos limites apresentados abaixo:

- $T_{5\%} = \tau_{MA} = 395,7$  segundos;
- sobressinal  $\leq 5\%$ ;
- erro nulo no seguimento de referência.

Possuindo os requisitos e, seguindo a metodologia de projeto de controladores pelo lugar das raízes, concluiu-se que um controle proporcional-integral atenderia as necessidades impostas. Nesse sentido, o polo desejado em malha fechada ficou em:

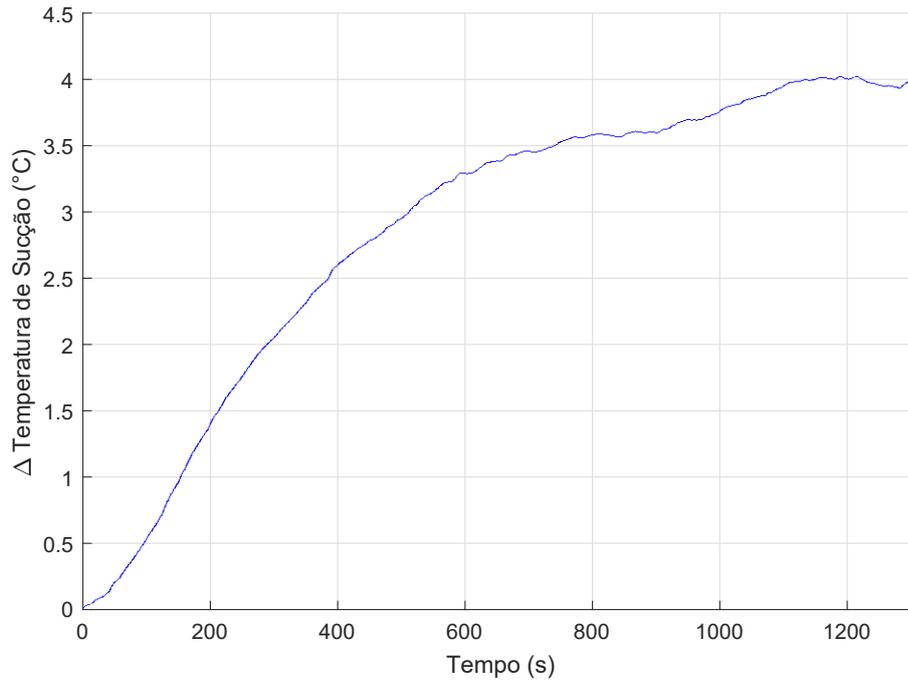
$$s_d = -0,00758 + 0,0079j, \quad (2)$$

resultando no diagrama de lugares das raízes apresentado na Figura 31.

Com isso, o controlador obtido para a ventoinha é apresentado na equação (3):

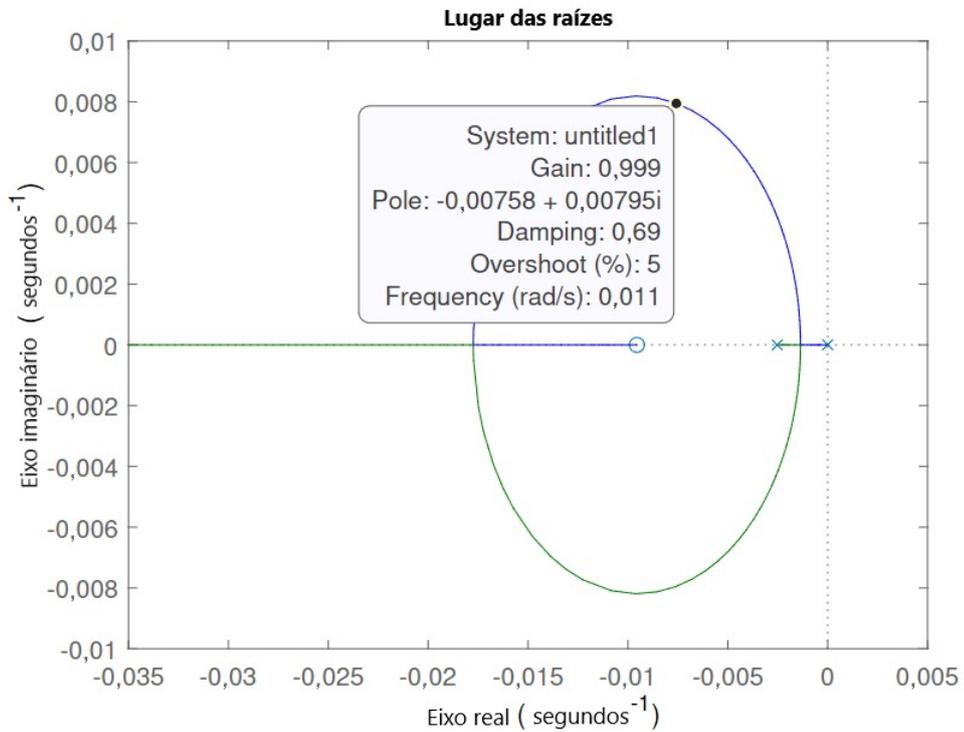
$$C(s) = -11,94 \frac{(s + 0,0095)}{s}, \quad (3)$$

Figura 30 – Resposta ao degrau no ponto de operação de 40% de ciclo de trabalho



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 31 – Diagrama de lugar das raízes

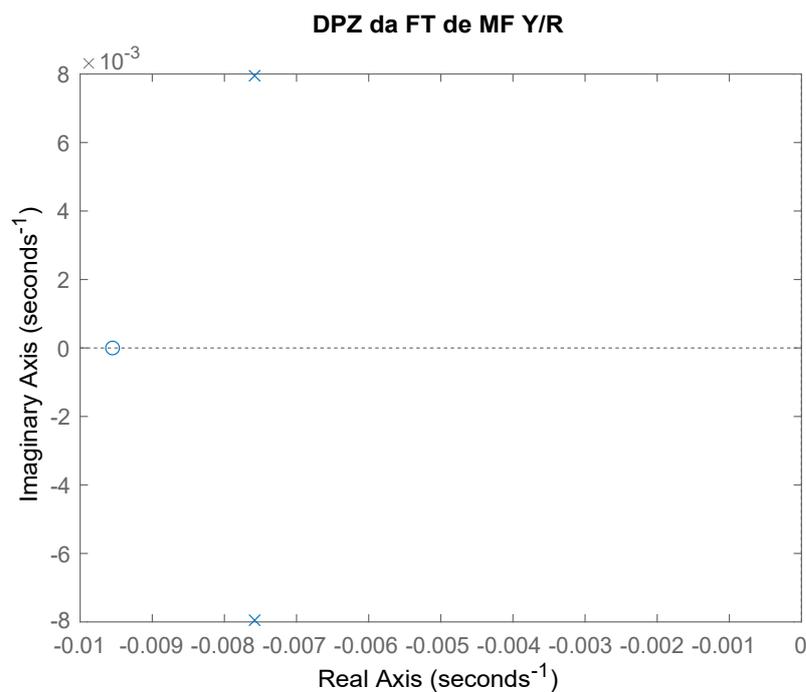


Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

que tem os ganhos  $K_p$  e  $K_i$  dados por  $-11,94$  e  $0,0095$ , respectivamente.

Ao se observar o diagrama de polos e zeros da função de transferência em malha fechada obtida, verifica-se, conforme a Figura 32, que há a presença de um zero influenciando a resposta. Para solucionar essa questão, projetou-se um filtro, como apresentado em (4), com o objetivo de realizar o cancelamento deste zero, deixando a resposta dominada apenas pelos polos desejados.

Figura 32 – Diagrama de polos-zeros em malha fechada da saída em função da referência



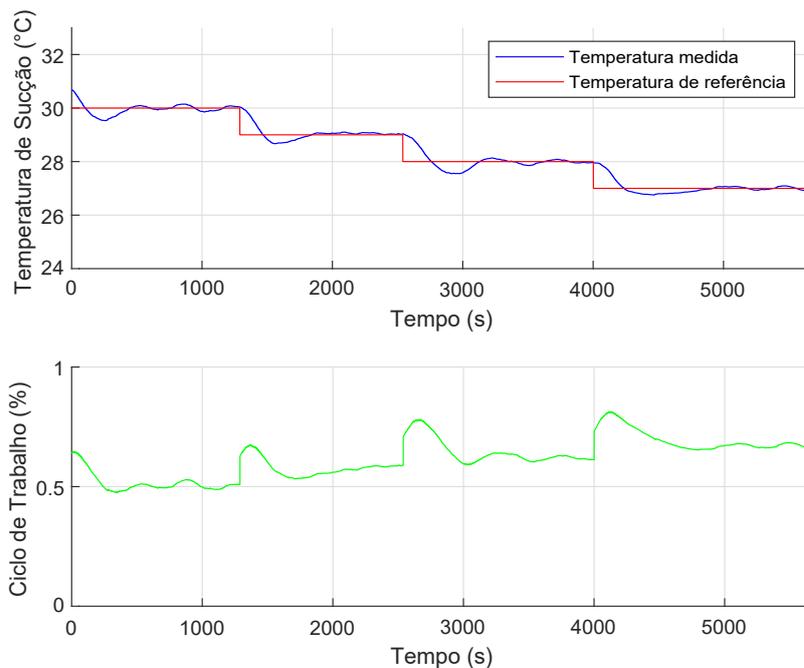
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

$$F = \frac{1}{104,7s + 1} \quad (4)$$

Com o controle da ventoinha projetado, implementou-se o mesmo no código LabVIEW da bancada. Nos primeiros ensaios realizados, foi possível observar, como ilustrado na Figura 33, que o controlador projetado conseguiu assentar a temperatura de sucção no valor desejado.

Devido às não linearidades presentes no sistema, perturbações devidas às variações da temperatura ambiente e atraso de resposta, o resultado do controlador não ficou dentro dos limites estabelecidos de seu projeto. No entanto, a sua utilização atende os requisitos de operação da bancada, uma vez que resultou em uma aceleração do processo de resfriamento da temperatura de sucção e acabou com a variação de  $\pm 1$  °C encontrada na utilização somente do controlador proporcional da resistência de aquecimento.

Figura 33 – Resposta em malha fechada



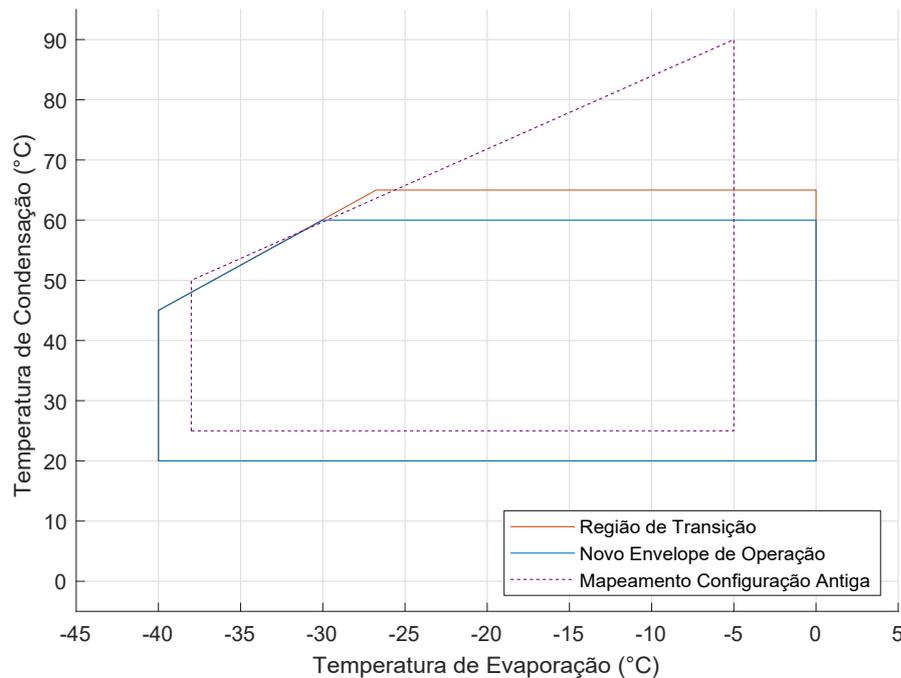
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

## 6 RESULTADOS E AVALIAÇÃO

Após a conclusão das fases de modificação e implementação, deu-se início à realização dos primeiros ensaios de teste da solução adotada neste PFC.

O Apêndice A mostra os cenários alcançados pela bancada antes das modificações realizadas. Nota-se, através da Figura 39, que a versão anterior da bancada não consegue emular todos os cenários dispostos no envelope de operação dos novos compressores (área em azul e laranja).

Figura 34 – Abrangência do envelope de operação na versão antiga da bancada



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

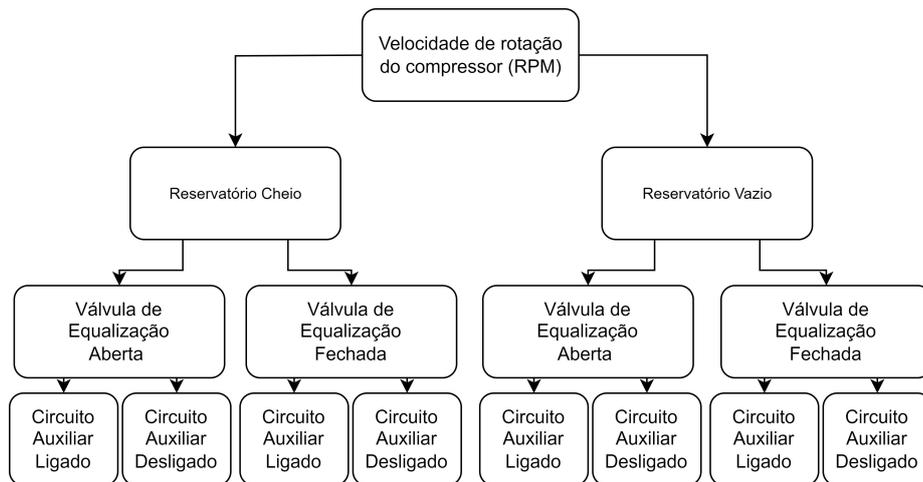
Nesse sentido, faz-se necessário que as adaptações realizadas permitam com que a bancada seja capaz de emular cenários com temperatura de evaporação menores de  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$  e maiores de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  assim como, temperaturas de condensação menores do que  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A configuração desses ensaios foi planejada para abranger todos os limites operacionais, considerando os graus de liberdade disponíveis na formulação da bancada. Inicialmente, foram estabelecidos cinco intervalos de velocidade de rotação do compressor (1800 RPM, 2600 RPM, 3000 RPM, 3800 RPM e 4500 RPM). Além disso, foram contemplados os dois estados possíveis do reservatório integrado ao circuito, pressurizado ou vazio. No que diz respeito à válvula de equalização, foram analisados os efeitos decorrentes de sua total abertura ou fechamento. Por fim, foi examinada a influência do acionamento circuito auxiliar no mapeamento das condições operacionais.

De forma abrangente, a configuração dos ensaios foi distribuída em 40 cenários, como ilustrado na Figura 35. Em todos esses cenários, a temperatura de sucção foi

mantida controlada a 30 °C.

Figura 35 – Cenários dos ensaios realizados



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Nesse sentido, com base nos resultados apresentados no Apêndice B, foi possível identificar um comportamento comum entre os ensaios. Na medida em que o reservatório esteja pressurizado, uma menor quantidade de fluido refrigerante fica disponível no sistema. Resultante dessa baixa disponibilidade, as pressões de sucção e de descarga permanecem em valores mais baixos, traduzindo-as em alcance de baixas temperaturas de evaporação e condensação. De modo inverso ocorre ao liberar o fluido pressurizado do reservatório novamente ao circuito. Com a disponibilidade de uma maior quantidade de refrigerante no circuito, as pressões, como um todo, sofrem uma elevação, convertendo-se em temperaturas mais elevadas.

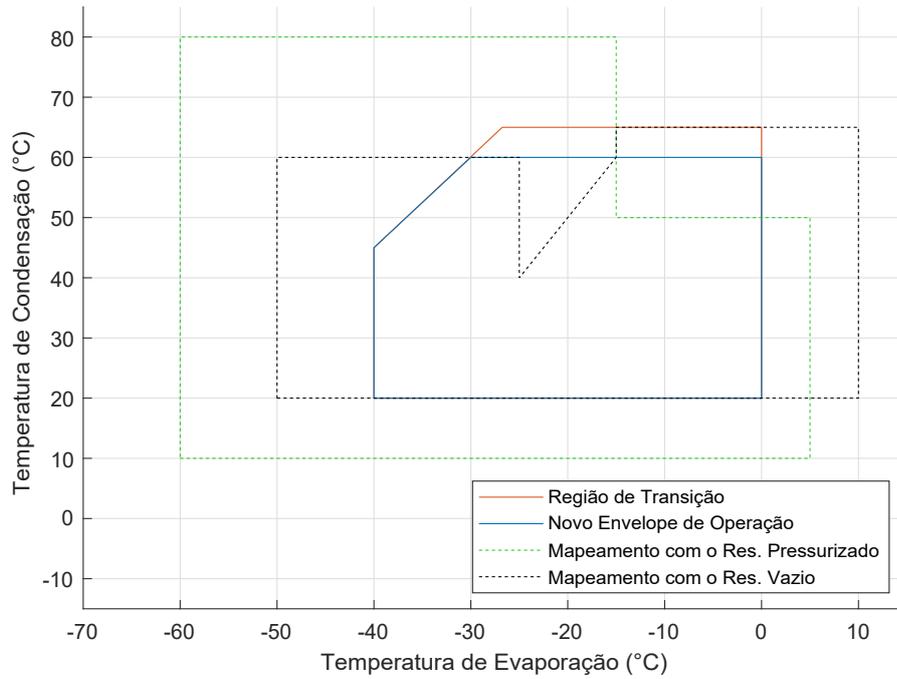
Ao olhar para a resposta gerada ao se realizar a abertura da válvula de equalização, percebe-se que a mesma possui uma grande influência no alcance das condições. Quando a válvula se encontra totalmente aberta, as pressões de descarga e sucção tendem a se equalizar, o que por sua vez, gera um aumento na pressão de sucção e uma queda na de descarga. Esse fenômeno se converte em temperaturas de evaporação mais elevadas e, de condensação mais amenas.

Avaliando, também, a utilização do circuito auxiliar no resfriamento da temperatura da região intermediária do circuito, percebe-se que o mesmo ocasiona uma leve redução nas pressões e, conseqüentemente, nas temperaturas adquiridas. Essa queda se justifica pelo fato da temperatura média do fluido refrigerante se situar em valores mais amenos ao compararmos com a operação sem o uso do circuito auxiliar.

A variação da velocidade de rotação do compressor se traduziu em variação de alcance das temperaturas. Esse fato ocorre pois ao elevar a rotação, a pressão média do sistema também se eleva, traduzindo em um aumento das temperaturas de condensação e evaporação.

Com base nos resultados obtidos na Figura 36, realizou-se a integração dos

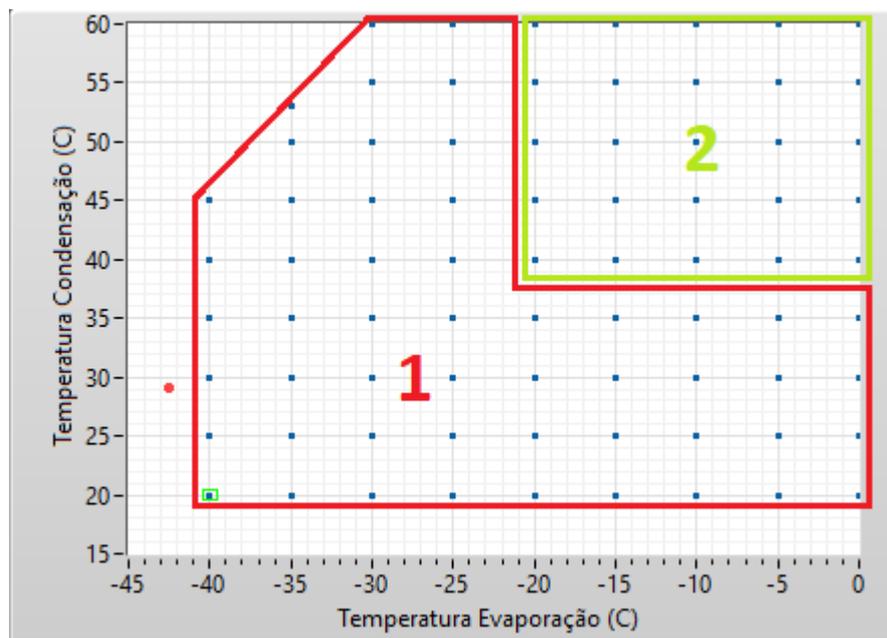
Figura 36 – Resultado de abrangência do envelope de operação



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

sistemas de controle das válvulas solenoides e da temperatura de sucção ao sistema de automação dos ensaios já presente na versão anterior. Nesse sentido, dividiu-se o envelope de cenários em duas regiões, conforme a Figura 37.

Figura 37 – Regiões divididas



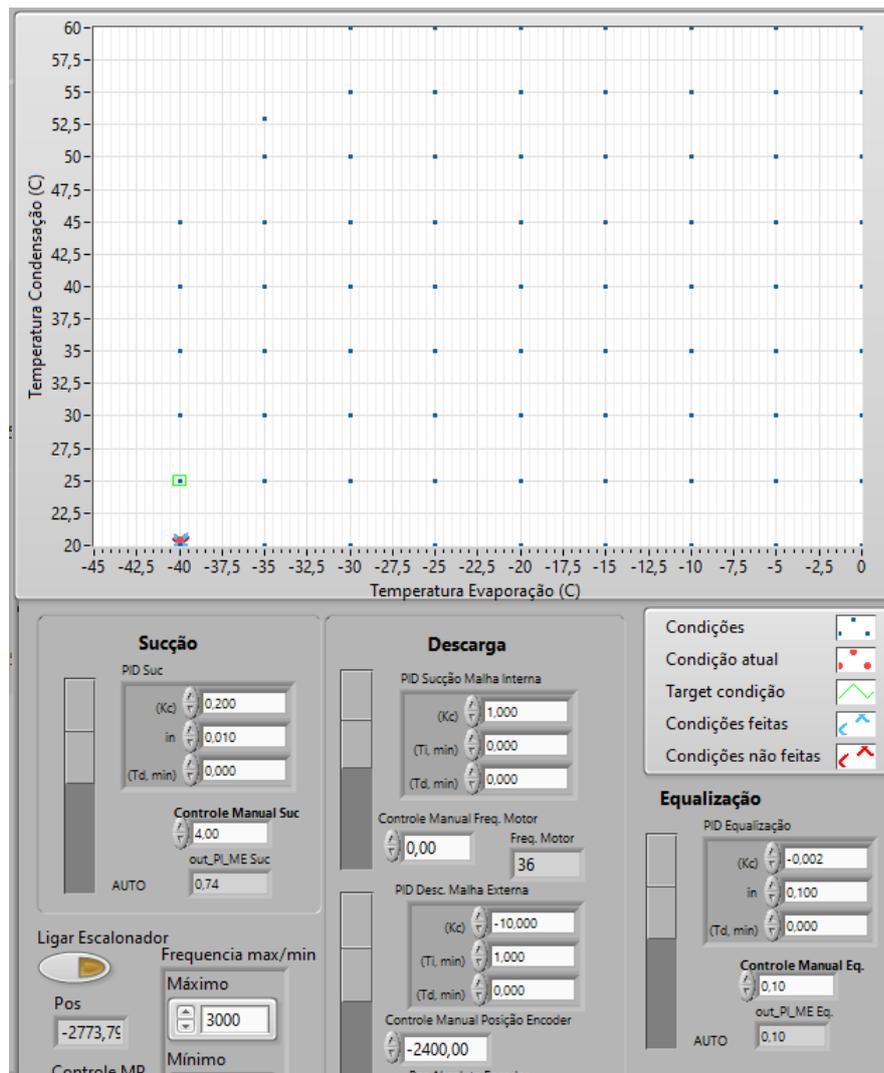
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Na região 1, o sistema irá comandar a abertura e fechamento das válvulas com o objetivo de se realizar a pressurização do reservatório. Após, seguirá com a

emulação dos cenários dentro desta região. Ao completar as simulações dessa região, ocorre a abertura das válvulas com o objetivo de pressurizar o circuito novamente, possibilitando alcançar os cenários presentes na região 2.

Durante a realização dos ensaios, o sistema irá avaliar se as condições de temperaturas de evaporação, condensação e sucção permaneceram estáveis em cada cenário emulado. Caso afirmativo, será considerada a condição atendida, caso contrário, será considerada condição não satisfeita, como pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 – Ensaio automatizado



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

De modo geral, ao analisar os resultados como um todo, pode-se ver, que as modificações realizadas neste projeto resultaram na ampliação do leque de cenários emulados pela bancada. Nesse sentido, os ensaios realizados poderão atender as demandas solicitadas pela Nidec Global Appliance ao LIAE.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado neste documento trouxe importantes avanços para a bancada de ensaios de condições operacionais de compressores herméticos. Inicialmente, devido às limitações físicas, o projeto anterior não conseguia atingir os novos requisitos de temperaturas de condensação e de evaporação necessários para avaliação do novo modelo de compressor.

As verificações iniciais constataram que o circuito de refrigeração presente na bancada necessitava operar com maiores quantidades de fluido refrigerante em seu interior, a fim de alcançar pressões mais elevadas e, conseqüentemente, atingir maiores temperaturas de condensação e de evaporação. No entanto, para alcançar as baixas temperaturas também requisitadas pelo envelope de operação, era necessário diminuir as pressões internas do circuito.

Nesse sentido, visando atender os requisitos estabelecidos, projetou-se um novo circuito para a bancada. A nova configuração possui um reservatório interligando o caminho da descarga ao caminho do processo. Esse acréscimo trouxe como vantagem a possibilidade de variar a quantidade de fluido nos ensaios. Juntamente com essa modificação, realizou-se o acréscimo de duas válvulas solenoides, as quais permitiram automatizar o processo de pressurização e de descarga do tanque instalado.

A fim de complementar a gama de dados coletados, adicionou-se um transdutor de pressão na entrada de sucção, variável de grande importância para o processo. Além desses acréscimos, as modificações realizadas seguiram os objetivos de se obter um circuito com poucos pontos de perda de carga e de uma fácil substituição do compressor. Implementou-se, também, um sistema de controle para a temperatura de sucção. Este sistema teve como foco o controle da ventoinha de arrefecimento, contribuindo para resfriar a temperatura de sucção em um tempo menor, além de alcançar um erro nulo no seguimento da referência desejada.

Essas modificações físicas se complementaram com as realizadas no código LabVIEW. Ao reduzir as funções redundantes e inoperantes, assim como reprogramar trechos de uma maneira mais eficiente, conseguiu-se obter um processamento mais fluido e sem travamentos do sistema, alcançando uma maior garantia na execução completa dos ensaios.

De modo geral, a proposta de solução levantada e implementada neste trabalho atendeu os requisitos necessários, possibilitando a partir da conclusão do trabalho a realização de ensaios com o novo modelo de compressor disponibilizado. Além dos ensaios, será possível aumentar a gama de dados coletados, assim como, se necessário, alcançar condições de temperaturas de evaporação e de condensação fora do envelope pré-estabelecido.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas melhorias ainda necessitam serem realizadas. Como sugestão de trabalhos futuros, seria interessante realizar o processo de calibração dos transdutores utilizados, atividade essa que foi programada para ser feita neste projeto mas que, devido a problemas no aparelho calibrador, não foi possível concluir. Outra sugestão é o aprimoramento do processo de automação da bancada, deixando ainda mais eficiente. Esse aprimoramento consiste na adição de válvulas solenoides na região da intermediária do circuito, como opção às válvulas manuais. Esse incremento possibilitará realizar o isolamento do fluido no reservatório intermediário de forma automática e eficiente. Por fim, o acréscimo de um transdutor de pressão no reservatório seria de muita importância, pois é um excelente indicador da quantidade de carga presente no interior do mesmo.

## REFERÊNCIAS

ARAGONÉS, Jesús Bausà; GÓMEZ, Carlos Garcia; ZARAGOZI, Benito Zaragozi; MARTINEZ, Alex Gil; CAMPOS, Daniel Moreno; LLINARES, Antonio Galiana. Sensores de temperatura. **Recuperado el**, v. 3, p. 2003–04, 2003.

BRASÃO, Lenadro Candido. **Acionamento do motor de corrente contínua a ímãs permanentes sem escovas utilizando estratégia a quatro chaves**. 2012. F. 107. Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BROWN, R. N. **Compressors: selection and sizing**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

CARNOT, S. **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance**. 2. ed. Paris: Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure, 1872. v. 1.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COELHO, Augusto A. R.; COELHO, Leandro. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Florianópolis: UFSC, 2004.

DOSSAT, R. J. **Princípios de refrigeração**. São Paulo: Hemus, 2004.

EMBRACO. **Linha de compressores**. Joinville: Nidec Global Appliance, 2020.

ENGENHARIA, Rankine. **Ciclo De Refrigeração E Suas Peculiaridades**. 2020.

Disponível em:

<https://rknengenharia.com/ciclo-de-refrigeracao-e-suas-peculiaridades/>.

FLESCHE, R. C. C. **Contribuições ao controle de sistemas monovariáveis e multivariáveis com atraso de transporte**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

HUNDY, G. F.; TROTT, A. R.; WELCH, T. C. **Refrigeration and air conditioning**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

MILLER, R.; MILLER, M. **Ar-condicionado e refrigeração**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MOTA, Thaís. **Termopar ou termorresistência?** Iperó: WIKI Blog, 2017.

NIDEC. **Compressores e Unidades Condensadoras**. Joinville: Nidec Global Appliance, 2023a.

NIDEC. **ER Series**. 2023b. Disponível em:  
<https://www.embraco.com/en/products/er-series/>.

PROCESSOS INDUSTRIAIS, Jefferson Engenharia de. **O que são compressores de ar?** 2019. Disponível em:  
<https://www.jefferson.ind.br/conteudo/o-que-sao-compressores-de-ar.html>.

REFRIGERAÇÃO E ENROLAMENTOS, CERE - Centro Especializado em. **Compressores aberto bitzer para refrigeração**. 2023. Disponível em:  
<https://www.cere.com.br/compressores-aberto-bitzer-refrigeracao>.

SEBORG, D. E. et al. **Process Dynamics and Control**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

SIQUEIRA, Adriano Almeida Gonçalves. **Aula 1 - Introdução à Sistemas de Controle**. 2017. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3762227/mod\\_resource/content/2/Aula1SCI2017.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3762227/mod_resource/content/2/Aula1SCI2017.pdf).

SMITH, Grant Maloy. **Como medir o peso com sensores de célula de carga**. 2020. Disponível em:  
<https://dewesoft.com/pt/blog/medir-peso-com-carga-celula-sensores>.

SOTOMAYOR, Paul Ortega. **Caracterização e Simulação de Compressores Alternativos Utilizando Fluidos com Baixo Potencial de Aquecimento Global**. 2013. F. 325. Doutorado em Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

STOECKER, W.F.; SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

THOMSON, William. XV.—On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's Equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam. **Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh**, Royal Society of Edinburgh Scotland Foundation, v. 20, n. 2, p. 261–288, 1853. DOI: 10.1017/S0080456800033172.

TROTT, Paul. **Gestão da inovação e desenvolvimento de novos produtos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

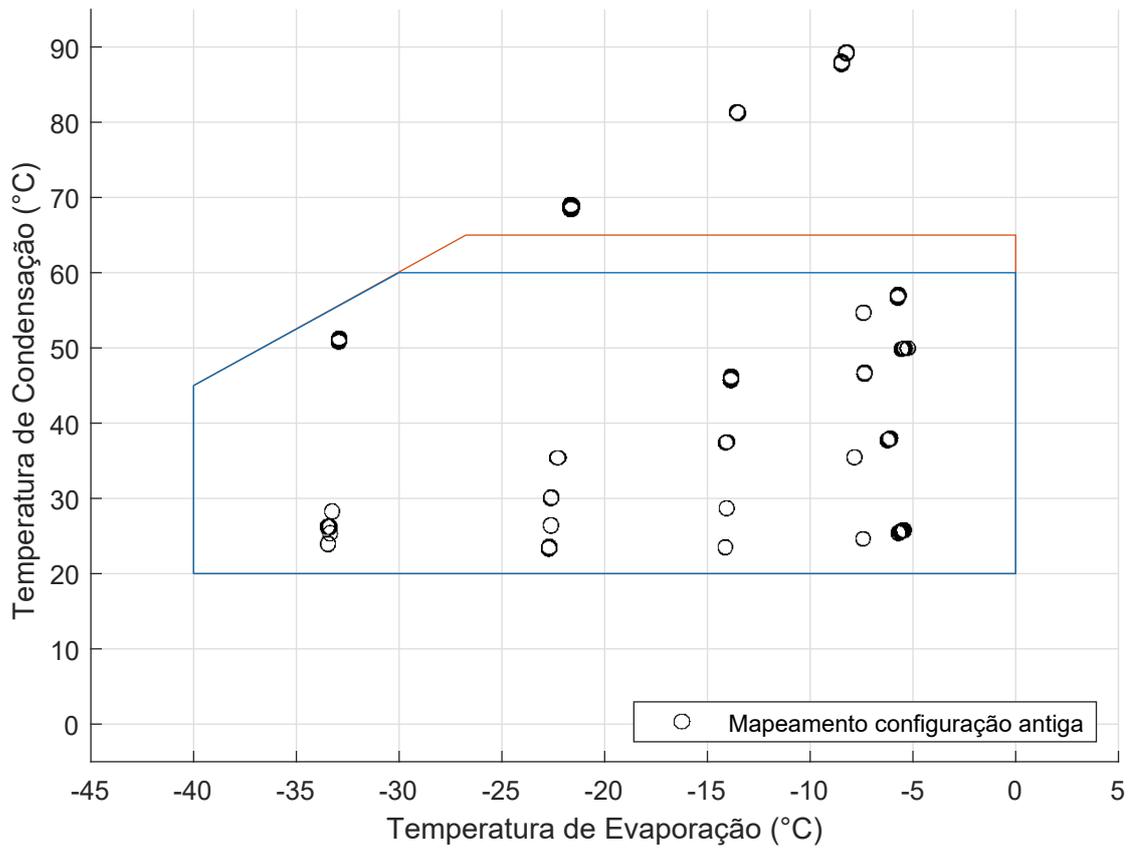
TRUST, Alutal Measure. **O que é um termopar? Qual sua importância na indústria?** 2023. Disponível em: <https://www.alutal.com.br/br/termopar>.

VALÈNCIA, Universitat de. **Máquinas Térmicas**. Valência: Universitat de València, 2023.

## APÊNDICE A – ENSAIO DE ABRANGÊNCIA DA VERSÃO ANTIGA DA BANCADA

Nesta seção de apêndice, são apresentados os resultados da abrangência de cenários alcançada pela versão anterior da bancada. Com base nesse ensaio, é possível verificar que a configuração não atendia à nova gama de temperaturas de evaporação e condensação solicitadas, tornando necessárias modificações em seu projeto.

Figura 39 – Abrangência de cenários alcançadas na versão anterior

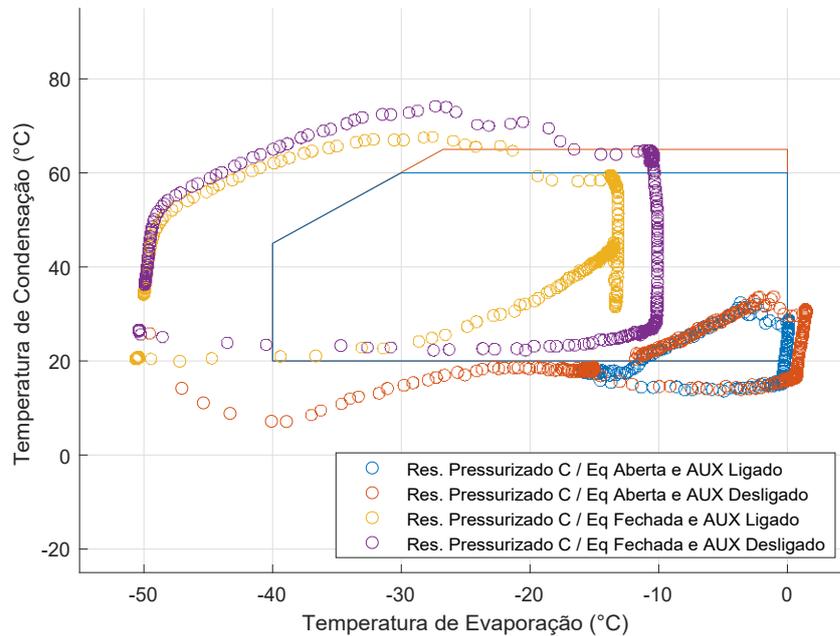


Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DA NOVA VERSÃO DA BANCADA

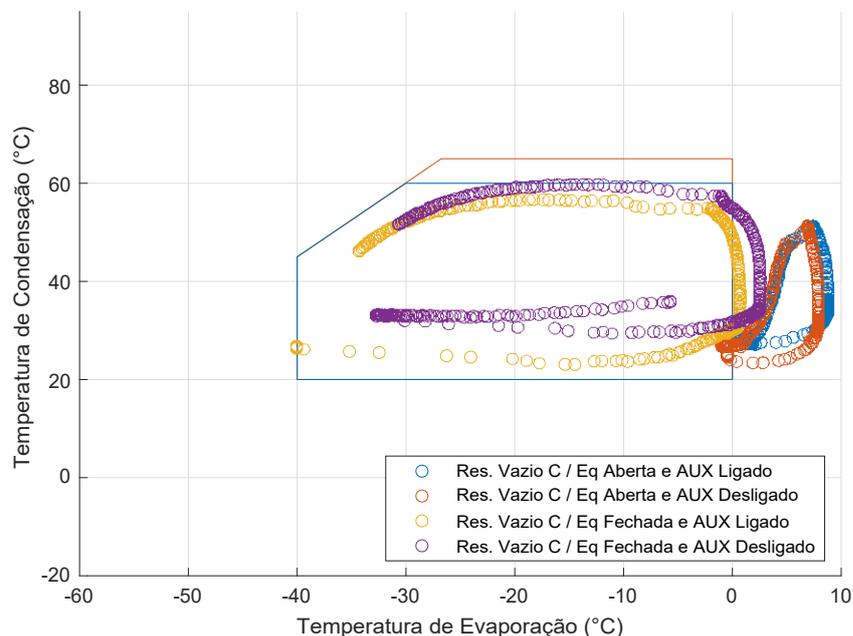
Na presente seção de apêndice, apresenta-se os resultados obtidos com a realização dos ensaios em diferentes configurações. É possível verificar que, os resultados obtidos demonstram uma abrangência positiva do novo envelope de operação da bancada, atendendo os objetivos iniciais deste projeto.

Figura 40 – Envelope de operação à 1800 RPM e com o reservatório pressurizado



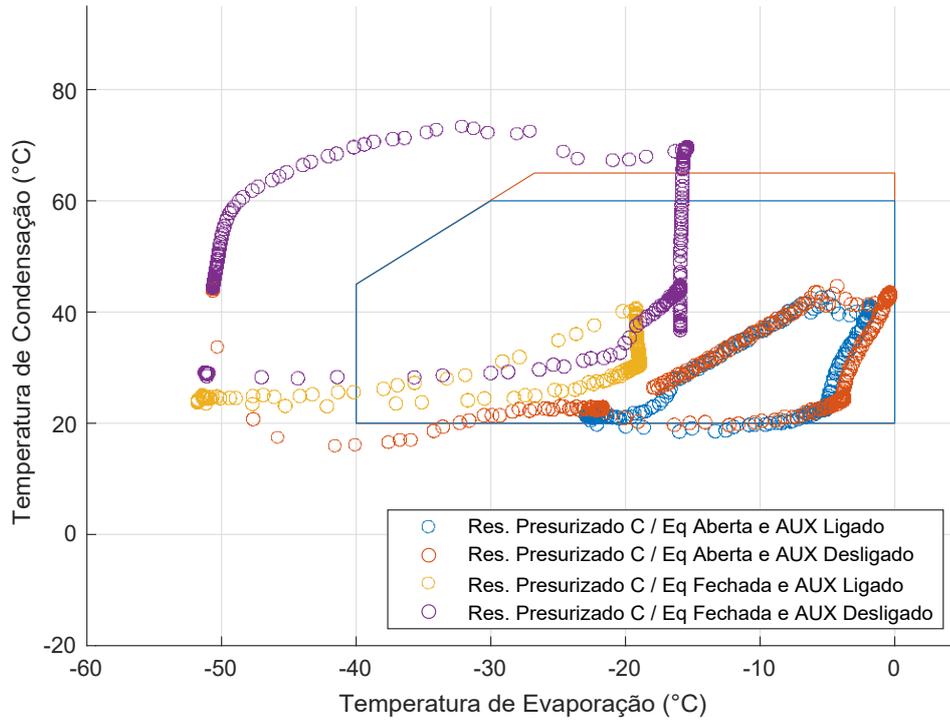
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 41 – Envelope de operação à 1800 RPM e com o reservatório vazio



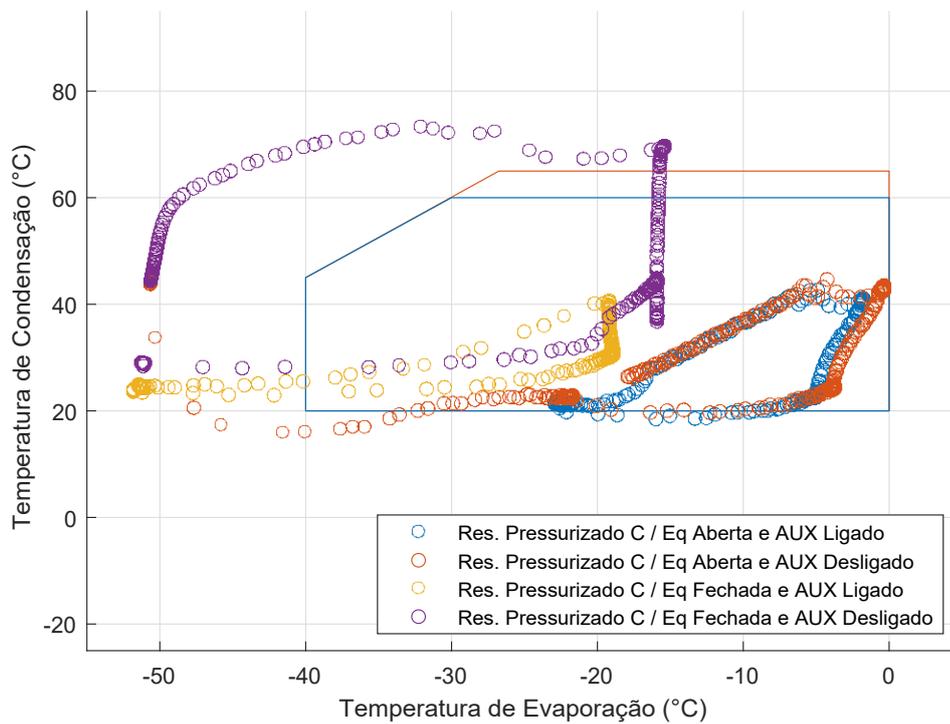
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 42 – Envelope de operação à 2600 RPM e com o reservatório pressurizado



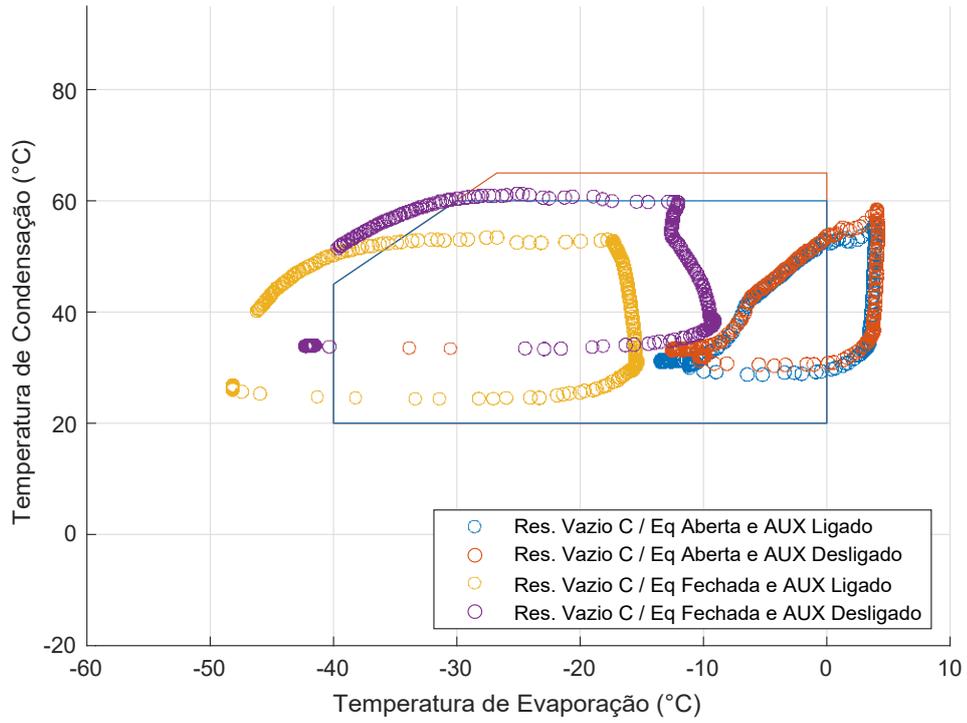
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 43 – Envelope de operação à 2600 RPM e com o reservatório vazio



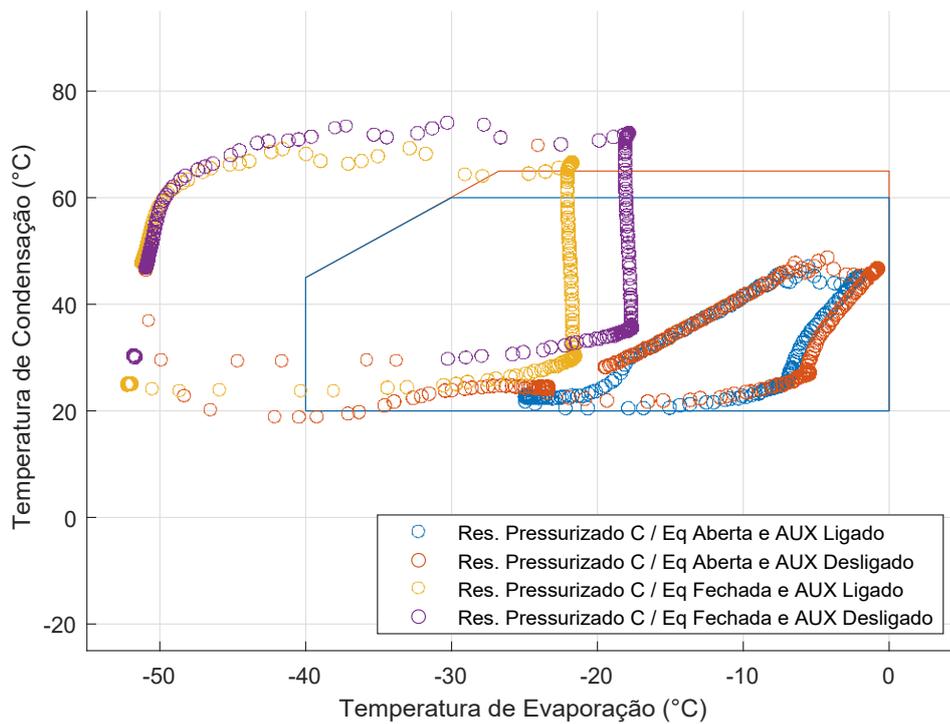
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 44 – Envelope de operação à 3000 RPM e com o reservatório pressurizado



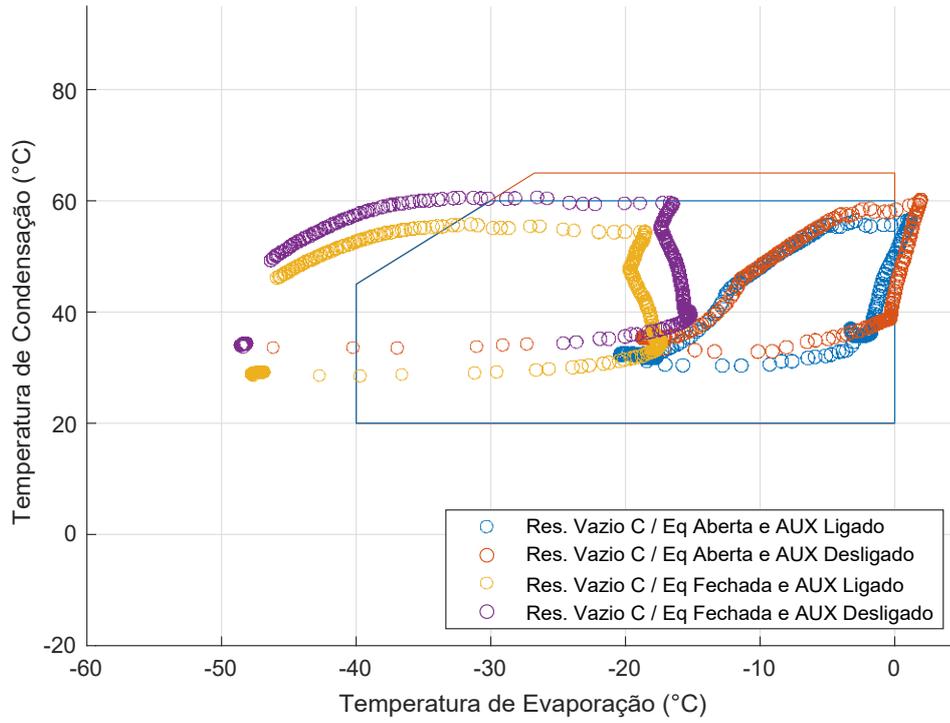
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 45 – Envelope de operação à 3000 RPM e com o reservatório vazio



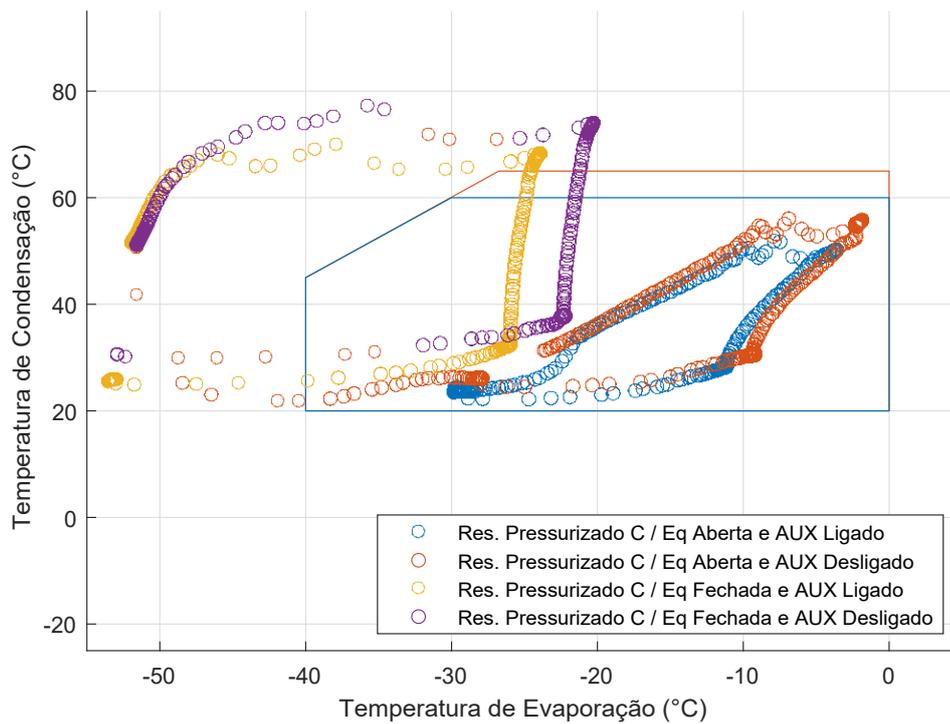
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 46 – Envelope de operação à 3800 RPM e com o reservatório pressurizado



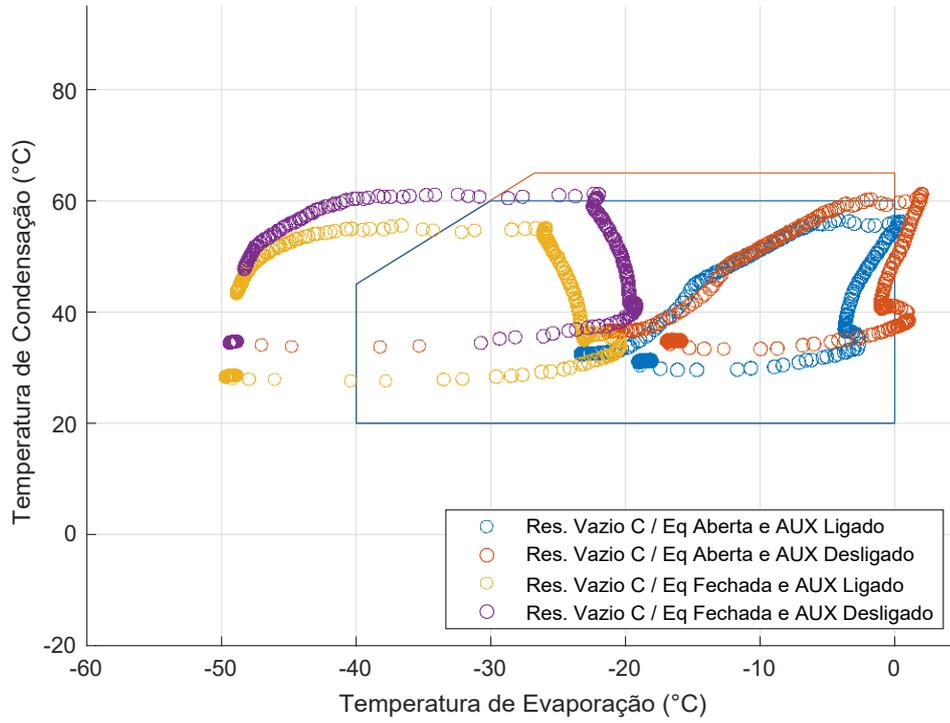
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 47 – Envelope de operação à 3800 RPM e com o reservatório vazio



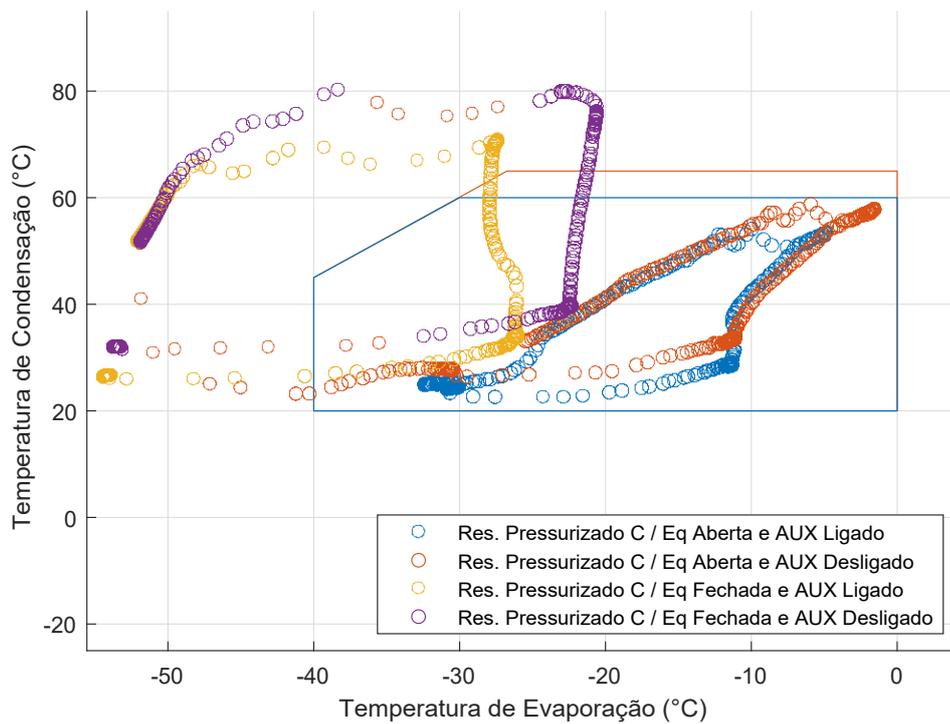
Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 48 – Envelope de operação à 4500 RPM e com o reservatório pressurizado



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

Figura 49 – Envelope de operação à 4500 RPM e com o reservatório vazio



Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

## ANEXO A – DATASHEET UNIK 5000



# UNIK 5000

## Pressure Sensing Platform

The new UNIK 5000 is a high performance configurable solution to pressure measurement. The use of micromachined silicon technology and analogue circuitry enables best in class performance for stability, low power and frequency response. The new platform enables you to easily build up your own sensor to match your own precise needs. This high performance, configurable solution to pressure measurement employs modular design and lean manufacturing techniques.

### High Quality

The combination of a high technology sensor, together with advanced signal conditioning and packaging techniques, provides an ideal long term solution for reliable, accurate and economical measurements.

### Bespoke as Standard

Custom-built from standard components, manufacturing sensors to your requirement is fast and simple; each UNIK 5000 is a "bespoke" pressure sensing solution, but with the short lead times and competitive pricing you would expect from standard products.

### Expertise

We have the people and the knowledge to support your needs for accurate and reliable product performance; our team of experts can help you make the right sensor selection, guiding you and providing the help and tools you need. It is important to ensure that the sensor material and performance selected are suitable for your application.



### Features

- Ranges from 70 mbar (1 psi) to 700 bar (10000 psi)
- Accuracy to  $\pm 0.04\%$  Full Scale (FS) Best Straight Line (BSL)
- Stainless Steel construction
- Frequency response to 3.5 kHz
- High over pressure capability
- Hazardous Area certifications
- mV, mA, voltage and configurable voltage outputs
- Multiple electrical and pressure connector options
- Operating temperature ranges from  $-55$  to  $+125^{\circ}\text{C}$  ( $-67$  to  $+257^{\circ}\text{F}$ )
- Online configuration tool

Druck.com

 **SENSYCAL**  
sensycal.com.br

Avenida do Estado 4567  
São Paulo, SP, Brasil - 03105-000  
(11) 3275 0094  
vendas@sensycal.com.br

# UNIK 5000 Specifications

## Measurement

### Operating Pressure Ranges:

#### Gauge Ranges

Any zero based range 70 mbar to 70 bar  
(1 to 1000 psi)

**Note:** All psi values are approximate.

#### Sealed Gauge Ranges

Any zero based range 10 to 700 bar  
(145 to 10000 psi)

#### Absolute Ranges

Any zero based range 100 mbar to 700 bar  
(1.5 to 10000 psi)

#### Differential Ranges

Wet/Dry

Uni-directional or bi-directional 70 mbar to 35 bar  
(1 to 500 psi)

Wet/Wet

Uni-directional or bi-directional 350 mbar to 35 bar  
(5 to 500 psi)

Line pressure: 70 bar (1000 psi) maximum

#### Barometric Ranges

Barometric ranges are available with a minimum span of 350 mbar (5.1 psi)

#### Non-Zero Based Ranges

Non-zero based ranges are available. For non-zero based gauge ranges, please contact Druck to discuss your requirements.

#### Over Pressure

- 10 × FS for ranges up to 150 mbar (2 psi)
- 6 × FS for ranges up to 700 mbar (10 psi)
- 2 × FS for barometric ranges
- 4 × FS for all other ranges (up to 200 bar for ranges ≤70 bar and up to 1200 bar for ranges >70 bar)\*

For differential versions the negative side must not exceed the positive side by more than:

- 6 × FS for ranges up to 150 mbar (2 psi)
- 4 × FS for ranges up to 700 mbar (10 psi)
- 2 × FS for all other ranges up to a maximum of 15 bar (200 psi)

#### Containment Pressure

- Ranges up to 150 mbar (2 psi) gauge 10 × FS  
Ranges up to 70 bar (1000 psi) gauge 6 × FS (200 bar (2900 psi) max)
- Ranges up to 70 bar (1000 psi) absolute 200 bar (2900 psi)
- Ranges above 70 bar (1000 psi)
- 1200 bar (17400 psi)\*

Differential (-ve port) must not exceed positive port by more than 6 × FS (15 bar (200 psi) maximum).

\* 600 bar (8700 psi) for pressure connector options PX, RA and RF

## Supply and Outputs

Electronics Option	Description	Supply voltage (V)	Output	Current Consumption (mA)
0	mV Passive	2.5 to 12	10 mV/V <sup>^</sup>	<2 at 10 V
1	mV Linearised	7 to 12	10 mV/V <sup>^</sup>	<3
2	mA	7 to 28**	4-20 mA	<30
3	0 to 5 V 4-wire	7 to 16**	0 to 5 V	<3
4	0 to 5 V 3-wire	7 to 16**	0 to 5 V*	<3
5	Basic Configurable (3-wire)	See below	See below	<3
6	0 to 10 V 4-wire	12 to 16**	0 to 10 V	<3
7	0.5 V to 4.5 V Ratiometric	5.0 ± 0.5	0.5 to 4.5 V	<3
8	Configurable (4-wire)	7 to 36	See below	See below
9	Configurable (3-wire)	7 to 36	See below	See below

<sup>^</sup> with a 10 V supply mV output sensors give 100 mV over the full scale pressure.

- Output is ratiometric to the supply voltage
- Output reduces pro-rata for pressure ranges below 350 mbar (5 psi)

\*0 to 5 V 3-wire output is non true zero. At pressures below 1% of span the output will be fixed at approximately 50 mV

\*\*32 V in non-hazardous area operation

~ Supply voltage is between [Maximum Output + 1V] (7 V minimum) to 16 V (32 V in non-hazardous area operation)

### Basic Configurable (Option 5), Configurable 4-Wire (Option 8), Configurable 3-Wire (Option 9)

Any pressure signal output configurations will be available, subject to the following limitations:

Output Specification	Basic Configurable (Option 5)	Configurable (Options 8, 9)
Minimum span:	4 V	2 V
Maximum span:	10 V	20 V
Maximum output limit:	11V	±10 V
Maximum zero offset:	Span / 2	±Span
Current consumption:	< 3 mA	< 20 mA @ 7 Vdc decreasing to < 5 mA @ 32 Vdc
Reverse output response:	No	Yes
Maximum operating temperature:	+125°C	+80°C

Output voltage range can be specified to a resolution of 0.1 V.

The output will continue to respond to 110% FS. i.e. if a 0 to 10 V output is specified, the output will continue to increase proportionally to applied pressure until at least 11 V.

Option 5: Not true zero, the output will saturate at < 50 mV.

Options 8, 9: On startup <100 mA drawn for 10 ms typically.

Options 8, 9: Shunt calibration: not available with reverse output.

## Examples

Configuration	Allowed	Not Allowed
Basic Configurable (Option 5)	0 to 5 V	1 to 4 V (span too small)
	0.5 to 4.5 V	4 to 11V (offset too big)
	1 to 6 V	
	1 to 11V	
Configurable (Options 8, 9)	-10 to 0 V	0 to 12V (outside ±10 V limits)
	0 to 5 V	6 to 10V (offset too big)
	-5 to 5 V	0 to 0.5 V (span too small)
	-2 to 10 V	
	1 to 6 V	
	10 to 0 V	

## Power-Up Time

- mV, Voltage and current versions: 10 ms
- Configurable 3-wire and 4-wire versions: 500 ms

## Insulation

- 500 Vdc: 100 MΩ
- 500 Vac: ≤ 5 mA leakage current (mV and mA versions only)

## Shunt Calibration

Shunt Calibration provides a customer accessible connection which, when applied, causes a shift in output of 80% FS in order to simulate applied pressure. It is fitted to the mV, Configurable 4-wire and Configurable 3-wire versions as standard. It is not available with DIN, M12 x 1 or M20 x 1.5 electrical connectors (options 7, D, G and R).

Shunt calibration is activated in different ways depending on the electrical connector and version:

- mV versions: connect Shunt Cal to -ve Supply or where available, connect both Shunt Cal connections together.
- Configurable 4-wire and Configurable 3-wire versions: connect Shunt Cal to -ve Output or, where available, connect both Shunt Cal connections together.

**Note:** Not available with reverse output.

## Performance Specifications

There are three grades of performance specification: Industrial, Improved and Premium.

## Accuracy

### Voltage, Current and mV Linearised

Combined effects of non-linearity, hysteresis and repeatability:

- **Industrial:** ±0.2% FS BSL
- **Improved:** ±0.1% FS BSL
- **Premium:** ±0.04% FS BSL

### mV Passive

≤ 70 bar

Industrial/Improved: ±0.25% FS BSL

Premium not available

> 70 bar

Industrial/Improved: ±0.5% FS BSL

Premium not available

**Note 1:** For the barometric pressure range, accuracy is of span, not full scale.

**Note 2:** For bi-directional ranges, accuracy is specified for each direction separately.

## Zero Offset and Span Setting

Demountable electrical connector options allow access to potentiometers that give at least ±5% FS adjustment (see Electrical Connector section).

## Factory Set To:

Product Description	Industrial	Improved and Premium
Current and Voltage Versions (Demountable Electrical Connections and Cable Gland)	±0.5% FS	±0.2% FS
Current and Voltage Versions (All Other Electrical Connections)	±1.0% FS	±1.0% FS
mV Versions	±3.0 mV	±3.0 mV

## Long Term Stability

±0.05% FS typical (±0.1% FS maximum) per year increasing pro-rata for pressure ranges below 350 mbar

## Temperature Effects

Four compensated temperature ranges can be chosen. Industrial Accuracy performance:

- -10 to +50°C (+14 to +122°F): ±0.75% FS TEB\*
- -20 to +80°C (-4 to +176°F): ±1.5% FS TEB
- -40 to +80°C (-40 to +176°F): ±2.25% FS TEB
- -40 to +125°C (-40 to +257°F): ±2.25% FS TEB

\*TEB = Temperature Error Band

Improved and Premium Accuracy performance:

- -10 to +50°C (+14 to +122°F): ±0.5% FS TEB
- -20 to +80°C (-4 to +176°F): ±1.0% FS TEB
- -40 to +80°C (-40 to +176°F): ±1.5% FS TEB
- -40 to +125°C (-40 to +257°F): ±1.5% FS TEB

Temperature effects increase pro-rata for pressure ranges below 350 mbar (5 psi) and are doubled for barometric ranges.

## Line Pressure Effects (Differential Version Only)

Zero shift: <±0.03% span/bar of line pressure

Span shift: <±0.03% span/bar of line pressure

Effects increase pro-rata for differential pressure ranges below 700 mbar (10 psi).

## Physical Specifications

### Environmental Protection

- See Electrical Connector section
- Hyperbaric Pressure: 20 bar (300 psi) maximum

### Operating Temperature Range

See Electrical Connector section

### Pressure Media

Fluids compatible with stainless steel 316L and Hastelloy C276.

For the wet/dry differential version, negative pressure port: Fluids compatible with stainless steel 316L, stainless steel 304, Pyrex, silicon and structural adhesive.

### Enclosure Materials

Stainless steel (body), nitrile- or silicone-rubber (o-rings, gaskets), EPDM (gaskets), PVDF (depth cone), PTFE (vent filter), Nickel plated brass (lock rings), glass filled nylon (electrical connector assemblies), delrin (depth cone). Cable sheaths as specified (see Electrical Connector).

### Pressure Connector

Available options are:

- G1/4 Female\*
- G1/4 Male Flat
- G1/4 Male 60° Internal Cone
- G1/4 Male Flat Long
- G1/4 Male Flat with Snubber
- G1/4 Male Flat with Cross Bore Protection
- G1/4 Male with Nipple
- G1/4 Quick Connect
- G1/8 Male 60° Internal Cone
- G1/2 Male via Adaptor\*
- 1/4 NPT Female\*
- 1/4 NPT Male
- 1/8 NPT Male
- 1/8-27 NPT Female
- 1/2 NPT Male via Adaptor
- 7/16-20 UNJF Female\*
- 7/16-20 UNF Male Short Flat\*
- 7/16 UNF Long 37° Flare Tip\*
- 7/16-20 UNJF Male 74° External Cone
- 3/8-24 UNJF
- 1/4 Swagelok Bulkhead
- M10 X 180° Internal Cone
- M12 X 160° Internal Cone
- M14 X 1.5 60° Internal Cone
- M20 X 1.5 Male (3 mm bore)
- M20 X 1.5 Male (8 mm bore)
- Depth Cone (G1/4 Female Open Face)
- M12 x 1.0 74° External Cone
- Quick Release Male
- VCR Female\*
- VCR Male\*
- NW16 Flange
- R3/8 Male
- R1/4 Male

Choose connectors marked \* for pressure ranges over 70 bar. Other pressure connectors may be available, contact Druck to discuss your requirement.

### General Certifications

CRN Certified 0F13650.517890YTN ADD1/REV1, 0F13828.2 (sensor types K and O) and CSA 0F13650.56 ADD1 for pressure ranges up to and including 350 bar (5000 psi).

### Electrical Connector

Various electrical connector options are available offering different features:

Code No.	Description	Maximum Operating Temperature Range		IP Rating	Zero/ Span Adjust
		°C	°F		
0	No Connector	-55 to +125	-67 to +257	-	Y
1	Cable Gland	-40 to +80	-40 to +176	65	N
2	Raychem Cable	-55 to +125	-67 to +257	65	N
3	Polyurethane Depth	-40 to +80	-40 to +176	68	N
4	Hyrel Depth	-40 to +80	-40 to +176	68	N
6/E	Bayonet MIL-C-26482	-55 to +125	-67 to +257	67	N
7	DIN 43650 Form A Demountable	-40 to +80	-40 to +176	65	Y
A/F	Bayonet MIL-C-26482 Demountable	-55 to +125	-67 to +257	65	Y
C	1/2 NPT Conduit	-40 to +80	-40 to +176	65	N
D	Micro DIN (9.4 mm pitch)	-40 to +80	-40 to +176	65	N
G	M12x1 4pin	-55 to +125	-67 to +257	67	N
K	Zero Halogen Cable Demountable	-40 to +80	-40 to +176	65	Y
N	Kynar Depth	-40 to +80	-40 to +176	68	N
R	M20 x 1.5 Inline	-40 to +80	-40 to +176	65	Y

**Note 1:** Electronics output options 8 and 9 are restricted to a maximum operating temperature of 80°C (176°F).

**Note 2:** Hazardous area approved versions are restricted to a maximum operating temperature range of -40°C to +80°C (-40°F to +176°F).

**Note 3:** Electrical connector option R IP65 rating only with suitable conduit/cable fitting.

### CE Conformity

- RoHS 2011/65/EU
- Pressure Equipment Directive 2014/68/EU Sound Engineering Practice
- ATEX 2014/34/EU (Optional)
- EMC Directive 2014/30/EU
- BS EN 61000-6-1: 2007: Susceptibility - Light Industrial
- BS EN 61000-6-2: 2005: Susceptibility - Heavy Industrial\*
- BS EN 61000-6-3: 2007+A1:2011: Emissions - Light Industrial
- BS EN 61000-6-4: 2007+A1:2011: Emissions - Heavy Industrial
- BS EN 61326-1: 2013: Electrical Equipment for Measurement, Control and Laboratory Use
- BS EN 61326-2-3: 2013: Particular Requirements for Pressure Transducers

\*PMP/PTX models with electrical connector options 6, A, C, E, F, G, N and R with cable screen connected to case.

### Hazardous Area Approvals (optional)

General applications:

- IECEx/ATEX Intrinsically Safe 'ia' Group IIC
- INMETRO Intrinsically Safe 'ia' Group IIC
- NEPSI Intrinsically Safe 'ia' Group IIC
- FM Approved (Canada & US) Intrinsically Safe Exia Class I, Division 1, Groups A, B, C & D and Class I, Zone 0 AEx/Ex ia Group IIC; Single Seal

Mining applications:

- IECEx/ATEX Intrinsically Safe 'ia' Group I
- INMETRO Intrinsically Safe 'ia' Group I

For full certification details, refer to the type-examination certificates (or approval listings) and supplied hazardous area installation instructions.

## Electrical Connector

Connector Type	Option code	Electronics Option						
		4 to 20 mA	Voltage (3-wire) and Basic Configurable	Voltage (4-wire)	Configurable Voltage (4-Wire)	Configurable Voltage (3-Wire)	mV	
Molex	0	1 Red	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		2 Yellow	-	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		3 Green	-	-	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
		4 Blue	-ve Supply	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		5 Orange	-	-	-	Shunt Cal	Shunt Cal	Shunt Cal
		6 Black	Case	Case	Case	Case	Case	-
Cable (Not Raychem)	1, 3, 4, C, N	Red	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		Yellow	-	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		Blue	-	-	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
		White	-ve Supply	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		Orange	-	-	-	Shunt Cal	Shunt Cal	Shunt Cal
		Black	-	-	-	-	-	-
		Screen	-	-	-	-	-	-
Raychem Cable	2	Red	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		White	-	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		Green	-	-	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
		Blue	-ve Supply	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		Black	-	-	-	Shunt Cal	Shunt Cal	Shunt Cal
		Screen	-	-	-	-	-	-
Bayonet	6, A	A	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		B	-ve Supply	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		C	-	-	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
		D	-	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		E	-	-	-	Shunt Cal	Shunt Cal	Shunt Cal
		F	-	-	-	-	-	Shunt Cal
DIN A Micro DIN	7 D	1	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		2	-ve Supply	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		3	-	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		E	Case	Case	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
Bayonet Alternative Wiring Options	E, F	A	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		B	-	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		C	-	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		D	-ve Supply	-	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
		E	-	-	-	Shunt Cal	Shunt Cal	Shunt Cal
		F	-	-	-	Shunt Cal	Shunt Cal	-
M12 X 1 4-Pin	G	1	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		2	-	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		3	-ve Supply	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		4	Case	Case	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
Zero Halogen Cable (Demountable)	K	Pink	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply	+ve Supply
		White	-	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output	+ve Output
		Green	-	-	-ve Output	-ve Output	0V Common	-ve Output
		Blue	-ve Supply	0V Common	-ve Supply	-ve Supply	0V Common	-ve Supply
		Grey	-	-	-	Shunt Cal	Shunt Cal	Shunt Cal
		Brown	-	-	-	-	-	-
		Yellow	-	-	-	-	-	-
		Screen	-	-	-	-	-	-
M20 x 15 Female Demountable	R	+ve	+ve Supply	-	-	-	-	-
		-ve	-ve Supply	-	-	-	-	-

# Ordering Information *(see the online configuration tool at Druck.com)*

## (1) Select model number

### Main Product Variant

**PMP** Amplified Pressure Transducer  
**PDCR** mV Pressure Transducer  
**PTX** 4-20 mA Pressure Transmitter

### Product Series

**5** UNIK 5000

### Diameter and Material

**0** 25mm Stainless Steel

### Electrical Connector (Note 6)

**0** No Electrical Connector (Note 7)  
**1** Cable Gland (Polyurethane Cable)  
**2** Raychem Cable  
**3** Polyurethane Cable (Depth)  
**4** Hytrel Cable (Depth)  
**6** MIL-C-26482 (6-pin Shell Size 10) (Mating connector not supplied)  
**7** DIN 43650 Form A Demountable (Mating connector supplied)  
**A** Demountable MIL-C-26482 (6-pin Shell Size 10) (Mating connector not supplied)  
**C** 1/2" NPT Conduit (Polyurethane cable)  
**D** Micro DIN (9.4 mm Pitch) (Mating connector supplied)  
**E** MIL-C-26482 (6 pin Shell Size 10) Alternative Wiring (Mating connector not supplied)  
**F** Demountable MIL-C-26482 (6 pin Shell Size 10) Alternative Wiring (Mating connector not supplied)  
**G** M12 x 14-pin male (Mating connector not supplied)  
**K** Zero Halogen Cable Demountable  
**N** Kynar Cable (Depth)  
**R** M20 x 1.5 Inline Female Conduit Demountable (Note 8)

### Electronics Option

**0** mV Passive 4-wire (PDCR) (Note 1)  
**1** mV Linearised 4-wire (PDCR)  
**2** 4 to 20 mA 2-wire (PTX)  
**3** 0 to 5 V 4-wire (PMP)  
**4** 0 to 5 V 3-wire (PMP)  
**5** Basic Configurable 3-wire (PMP)  
**6** 0 to 10 V 4-wire (PMP)  
**7** 0.5 to 4.5 V Ratiometric 3-wire (PMP) (Note 5)  
**8** Configurable 4-wire (PMP) (Note 4, 5)  
**9** Configurable 3-wire (PMP) (Note 4, 5)

### Compensated Temperature Range

**TA** -10 to +50 °C (14 to +122 °F)  
**TB** -20 to +80 °C (-4 to +176 °F)  
**TC** -40 to +80 °C (-40 to +176 °F)  
**TD** -40 to +125 °C (-40 to +257 °F) (Note 2, 5)

### Accuracy

**A1** Industrial  
**A2** Improved  
**A3** Premium

### Calibration

**CA** Zero/Span Data  
**CB** Room Temperature  
**CC** Full Thermal  
**CR** Room Temperature/Measured Reading

### Hazardous Area Approval (Note 6)

**H0** None  
**H1** IECEx/ATEX Intrinsically Safe 'ia' Group IIC  
**H2** IECEx/ATEX Intrinsically Safe 'ia' Group I  
**H6** FM (C & US) Intrinsically Safe 'ia' Group IIC/ABCD  
**HA** IECEx/ATEX Intrinsically Safe 'ia' Groups I/IIC [H1 + H2]  
**HS** IECEx/ATEX/FM (C & US) Intrinsically Safe 'ia' Groups IIC/ABCD [H1 + H6]  
**J1** IECEx/ATEX/NEPSI Intrinsically Safe 'ia' Group IIC  
**JA** INMETRO Intrinsically Safe 'ia' Group IIC  
**JB** INMETRO Intrinsically Safe 'ia' Group I  
**JF** INMETRO Intrinsically Safe 'ia' Group I/IIC [JA + JB]

### Pressure Connector

**PA** G1/4 Female (Note 3)  
**PB** G1/4 Male Flat  
**PC** G1/4 Male 60° Internal Cone  
**PD** G1/8 Male 60° Internal Cone  
**PE** 1/4 NPT Female (Note 3)  
**PF** 1/4 NPT Male  
**PG** 1/8 NPT Male  
**PH** M20x1.5 Male (3 mm bore)  
**PJ** M14x1.5 60° Internal Cone  
**PK** M12x1 Internal Cone  
**PL** 7/16-20 UNJF Male 74° External Cone  
**PN** G1/2 Male via Adaptor (Note 3)  
**PQ** G1/4 Quick Connect  
**PR** 1/2 NPT Male via Adaptor (Note 3)  
**PS** 1/4 Swagelok Bulkhead  
**PT** G1/4 Male Flat Long  
**PU** 7/16-20 UNF Long 37° Flare Tip (Note 3)  
**PV** 7/16-20 UNJF Female (Note 3)  
**PW** Depth Cone (G1/4 Female Open Face)  
**PX** 7/16-20 UNF Male Short Flat (Note 3, 9)  
**PY** 3/8-24 UNJF  
**PZ** M10 x 180° Internal Cone  
**RA** VCR Female (Note 3, 9)  
**RB** G1/4 Male Flat with Snubber  
**RC** G1/4 Male Flat with Cross Bore Protection  
**RD** M12 x 1.074° External Cone  
**RE** Quick Release Mount  
**RF** VCR Male (Note 3, 9)  
**RJ** M20 x 1.5 Male (8 mm bore)  
**RQ** NW16 Flange  
**RT** 1/8-27 NPT Female  
**RU** R3/8 Male  
**RV** R1/4 Male  
**RW** G1/4 Male with Nipple

PTX 5 0 7 2 - TA - A2 - CB - H0 - PA (Example Model Number)

## Ordering Notes

**Note 1:** Premium Accuracy is not available on this version

**Note 2:** Please ensure that the electrical connector selected is option 0, 2, 6, A, E, F or G.

**Note 3:** Select one of these pressure connectors for pressure ranges over 70 bar

**Note 4:** Maximum operating temperature is 80°C (176°F)

**Note 5:** Hazardous area certifications not available

**Note 6:** Hazardous area certifications are restricted by electrical connector options in line with the following table:

Approval	Connector													
	0	1	2	3	4	6/E	7	A/F	C	D	G	K	N	R
H0	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
H1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-
H2	Y	-	Y	Y	Y	Y	-	-	Y	-	Y	-	-	-
H6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	Y
HA	Y	-	Y	Y	Y	Y	-	-	Y	-	Y	-	-	-
HS	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	Y
J1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	Y
JA	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	Y
JB	Y	-	Y	Y	Y	Y	-	-	Y	-	Y	-	-	-
JF	Y	-	Y	Y	Y	Y	-	-	Y	-	Y	-	-	-

**Note 7:** Available with component certification, use of which requires incorporation into certified apparatus with an IP rated enclosure appropriate to the certification type supplied

**Note 8:** Electronics option 2 only

**Note 9:** Pressure ranges less than 500 bar

## 2) State pressure range and units (e.g., 0 to 10 bar, -5 to +5 bar)

Pressure unit options are:

Symbol	Description
bar	bar
mbar	millibar
psi	pounds/sq. inch
Pa	Pascal
hPa	hectopascal
kPa	kiloPascal
MPa	MegaPascal
mmH <sub>2</sub> O	mm water
cmH <sub>2</sub> O	cm water
mH <sub>2</sub> O	metres water
inH <sub>2</sub> O	inches water
ftH <sub>2</sub> O	feet water
mmHg	mm mercury
inHg	inches mercury
kgf/cm <sup>2</sup>	kg force/sq. cm
atm	atmosphere
Torr	torr

## 3) State pressure reference (e.g., gauge)

Reference options are:

- gauge
- absolute
- barometric
- sealed gauge
- wet/dry differential
- wet/wet differential

## 4) State cable lengths and units

Integer values only, e.g. 1m cable, 8 ft. Minimum length 1m (3 ft) cable (only required with certain electrical connectors).

Maximum cable length 100 m (300 ft) for approval options not H0; 200 m (600 ft) for approval option H0.

## 5) Output options 5, 8 and 9

State voltage output at minimum and maximum pressure (e.g., output -1 to 9 V)

## Typical order examples

**PTX5012-TB-A2-CA-H0-PA:** 0 to 10 bar, gauge, 3 m cable

**PMP5028-TC-A3-CC-H0-PE:** -15 to 75 psi, gauge, 15 ft cable, output voltage -1 to 5 volts

**PDCR5071-TB-A1-CB-H0-PA:** 0 to 100 bar, sealed gauge

## Accessories (order as separate line items)

P/N 202-034-05: Sensor termination enclosure

P/N 600-914: Desiccant gel pack for STE

P/N 222-117-01: Short sink weight (to fit G1/4 female)

P/N 222-179-01: Depth cone injection moulded for PW connection

P/N 163-009: Mating connector for MIL-C-26482

(Electrical connector options 6, A, E, and F) (**Note 10**)

## Cable Assemblies (Note 10)

A made up electrical connector with a length of cable.

### (1) Select Part Number

Main Product (Note 10)

UNIKCABLE

Cable assembly

Electrical connector

6

MIL-C-26482

7

DIN 43650

D

MICRO DIN (9.4 mm Pitch)

Cable

1

Polyurethane cable (**Note 11**)

2

Raychem cable

UNIKCABLE - 6 - 2 (Example Part Number)

### (2) State cable length and units (Integer value only)

Minimum length 1m (3 ft)

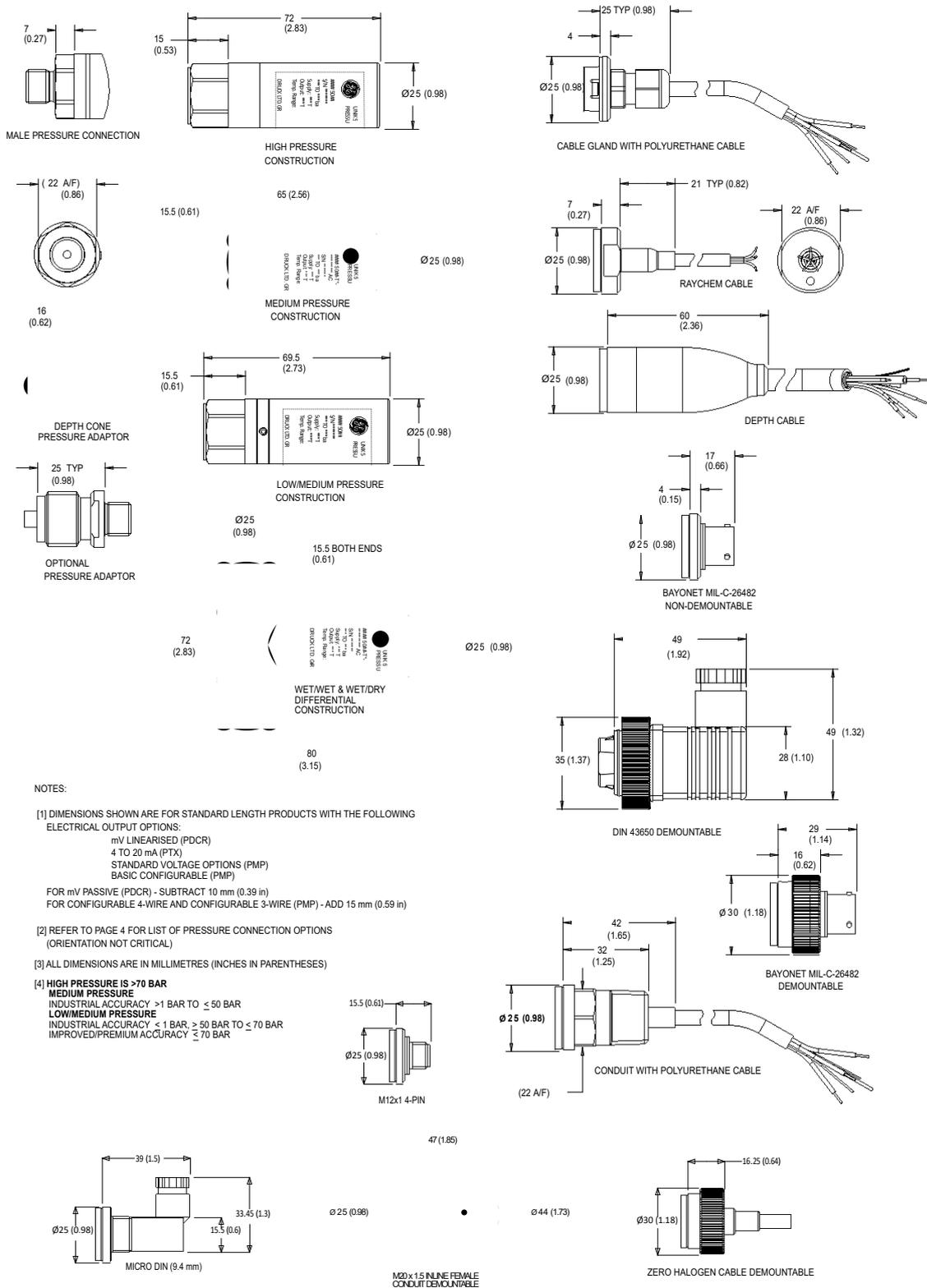
Maximum length 200 m (600 ft)

**Example:** UNIKCABLE-6-2 5 m

**Note 10:** Not considered suitable for use in hazardous areas.

**Note 11:** This cable is the same as that used in the electrical connector cable gland (Option 1 in the main product).

# Mechanical Drawings



Druck.com

Copyright 2019. Baker Hughes Company. This material contains one or more registered trademark of Baker Hughes Company and its subsidiaries in one or more countries. All third-party product and company names are trademarks of their respective holders.

920-483L

**Baker Hughes** 