

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC Centro Tecnológico
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Concepção de um Sistema de Aquecimento de Compressores para Bancadas Automatizadas de Ensaio

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Rubens Hardt Junior

Florianópolis, Agosto de 2016

Concepção de um Sistema de Aquecimento de Compressores para Bancadas Automatizadas de Ensaios

Rubens Hardt Junior

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.

Banca Examinadora:

João Paulo Rossetto
Orientador na Empresa

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.
Orientador no Curso

Prof. Ricardo José Rabelo, Dr.
Responsável pela disciplina

Prof. Daniel Ferreira Coutinho, Dr.
Avaliador

Eduardo Dutra Garcia
Debatedor

Caio Augusto Araújo Amaral
Debatedor

Agradecimentos

À minha família, pelo exemplo de vida e companheirismo.

À minha namorada, Ana, pelo apoio, carinho e amizade.

Ao meu orientador no Labmetro, Maurício M. Schaefer, pelos inúmeros ensinamentos, paciência, dedicação, amizade e confiança depositada em mim para a realização deste trabalho.

A toda equipe do Labmetro/LIAE pelo suporte, companheirismo e momentos de descontração.

Ao Prof. Rodolfo, pela orientação, correção deste trabalho e amizade.

À empresa parceira pela oportunidade e fomento. E por acreditar na competência da equipe do LIAE.

Resumo

Fabricantes de compressores de refrigeração investem em pesquisas de novas tecnologias a fim de aumentarem a eficiência energética dos seus produtos. Uma parte importante no desenvolvimento de produtos mais eficientes é avaliar o compressor através de testes, realizados em bancadas específicas para este fim, denominadas bancadas de ensaios de desempenho. Essas bancadas são capazes de medir o desempenho dos compressores seguindo normas internacionais, porém, estes ensaios de desempenho costumam demandar um tempo muito longo, podendo levar mais de 3 horas para a sua conclusão. Atualmente, a etapa dos testes que demanda mais tempo é o aquecimento do compressor. Este trabalho apresenta a concepção de um sistema de aquecimento de compressores para bancadas de testes automatizadas, a fim de diminuir consideravelmente o tempo despendido na etapa de aquecimento. Neste trabalho, apresentam-se os sensores e atuadores, o sistema de aquisição utilizado e o software desenvolvido para o sistema. Também são realizados ensaios no sistema e indicam que o mesmo funciona de forma satisfatória, aquecendo o compressor em apenas uma pequena fração do tempo usual.

Palavras-chave: Instrumentação, Ensaio Laboratorial, Compressor, Aquecimento, Tempo Reduzido.

Abstract

Refrigeration compressors manufacturers invest in research on new technologies in order to increase the energy efficiency of their products. An important part in the development of more efficient products is to evaluate the compressor through tests that are performed in specific test rigs for this purpose termed performance test rigs. These test rigs are able to measure the performance of compressors according to international standards, however, these performance tests usually require a very long time and can take more than three hours to be concluded. Currently, the part of the tests that requires more time is the compressor heating. This paper presents the design of a compressor heating system for automated test rigs, to considerably reduce the time spent in the heating step. In this paper, the sensors and actuators are presented, also the acquisition system employed and the software developed for the system. Tests are also conducted on the system and indicate a satisfactory operation of the system, heating the compressor in only a small fraction of the usual time.

Keywords:Instrumentation, Laboratory Testing, Compressor, Heating, Time Reduced.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração de um sistema de refrigeração doméstico. Adaptada de [1]	20
Figura 2 – Ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Adaptada de [2]	21
Figura 3 – Estrutura interna de um compressor alternativo hermético. Adaptada de [3]	23
Figura 4 – Ciclo de compressão em um compressor hermético alternativo. Adaptada de [4]	24
Figura 5 – Componentes elétricos básicos de um motor de indução: (a) estator e (b) rotor. Adaptada de [5]	24
Figura 6 – Foto de uma bancada de ensaios de desempenho.	27
Figura 7 – Diagrama esquemático da bancada disponível no Labmetro. Adaptada de [6]	28
Figura 8 – Ilustração da arquitetura atual da bancada experimental.	29
Figura 9 – Esquema pneumático atual da bancada experimental. Adaptada de [7]	30
Figura 10 – Conceito para medição da vazão mássica. Adaptada de Coral [6]	30
Figura 11 – Conceito do ensaio. Adaptada de [6]	31
Figura 12 – Ilustração da combinação de curvas de temperatura com e sem sobreaquecimento. Adaptada de Scussel [3]	33
Figura 13 – Ensaio em compressor com alimentação CC de 55 V sem corrente alternada com compressor em repouso. Adaptada de Scussel [3]	34
Figura 14 – Ensaio com tensão de alimentação CA de 110 V e tensão CC por 40 minutos de 15 V com compressor em movimento. Adaptada de Scussel [3]	34
Figura 15 – Ensaio realizado com o compressor a vazio e sem CC. Adaptada de Silveira [8]	35
Figura 16 – Ensaio com o compressor a vazio e com injeção CC constante de 20 V. Adaptada de Silveira [8]	35
Figura 17 – Diagrama geral da arquitetura do sistema de aquecimento.	38
Figura 18 – Ilustração do esquema de conexão dos termorresistores Pt100.	39
Figura 19 – Ilustração da posição dos termorresistores Pt100.	40
Figura 20 – Especificações da fonte de alimentação FCAM 150-30-15.	42
Figura 21 – Diagrama da estratégia de comutação de alimentação.	42
Figura 22 – Ilustração da contatora utilizada.	43
Figura 23 – Ilustração do rele de estado sólido utilizado.	43
Figura 24 – Ilustração do rele de estado sólido utilizado.	44
Figura 25 – Sinal de controle a ser aplicado sobre o botão para simular o seu pressionamento	45
Figura 26 – Diagrama da lógica do controle de potência do fogão de indução.	49

Figura 27 – Gráfico das temperaturas das bobinas, para um degrau CC na alimentação.	49
Figura 28 – Gráfico das temperaturas da carcaça, para um degrau CC na alimentação	50
Figura 29 – Gráfico das temperaturas das bobinas, para um degrau no fogão de indução.	51
Figura 30 – Gráfico das temperaturas da carcaça, para um degrau no fogão de indução.	51
Figura 31 – Distribuição térmica no compressor desligado ao ser aquecido com o fogão de indução, no primeiro quadro, antes de ligar o aquecimento e a cada minuto nos quadros seguintes, até o quinto minuto de ensaio. . . .	52
Figura 32 – Distribuição térmica no compressor em funcionamento ao ser aquecido com o fogão de indução, no primeiro quadro, antes de ligar o aquecimento e a cada minuto nos quadros seguintes, até o quinto minuto de ensaio. .	53
Figura 33 – Ilustração do sistema composto pelas duas malhas controle, variáveis de controle e de processo.	54
Figura 34 – Diagrama da lógica de implementação do controle Liga-Desliga com histerese.	55
Figura 35 – Teste do controle liga-desliga com histerese.	56
Figura 36 – Comparação entre as resposta do modelo obtido e do modelo real. . . .	57
Figura 37 – Diagrama do controle proporcional que define a temperatura do fundo, referência para o controle Liga-Desliga.	58
Figura 38 – Diagrama da estratégia de controle para a temperatura da bobina principal.	60
Figura 39 – Diagrama do controle para a bancada de ensaio de elevação de capacidade de elevação.	61
Figura 40 – Diagrama da etapa de aquecimento super rápido da bobina.	62
Figura 41 – Gráfico do teste final do controle da carcaça, com uma referência de temperatura da carcaça de 60°C	63
Figura 42 – Gráfico do teste final do controle da temperatura da bobina, com uma referência de temperatura da bobina de 60°C	64
Figura 43 – Gráfico das temperaturas da carcaça, utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C	65
Figura 44 – Gráfico das temperaturas do fundo e da referência para o controle liga-desliga, utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C	65
Figura 45 – Gráfico das temperaturas da bobina utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C	66
Figura 46 – Gráfico do instante em que a bobina e carcaça atingem a mesma temperatura utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C	66

Lista de abreviaturas e siglas

<i>CC</i>	Corrente contínua
<i>CA</i>	Corrente alternada
<i>PWM</i>	Modulação por largura de pulso (do inglês <i>Pulse-Width Modulation</i>)
<i>COP</i>	Coefficiente de desempenho do compressor (do inglês <i>Coefficient of Performance</i>)
<i>ISO</i>	Organização internacional para padronização (do inglês <i>International Organization for Standardization</i>)
<i>Labmetro</i>	Laboratório de Metrologia e Automatização
<i>LIAE</i>	Laboratório de Instrumentação e Automatização de Ensaios
<i>UFSC</i>	Universidade Federal de Santa Catarina
<i>USB</i>	Barramento Serial Universal (do inglês <i>Universal Serial Bus</i>)
<i>LAN</i>	Rede de Área Local (do inglês <i>Local Area Network</i>)
<i>LXI</i>	Extensões LAN para Instrumentação (do inglês <i>LAN EXTensions for Instrumentation</i>)
<i>DAQ</i>	Aquisição de dados (do inglês <i>Data Acquisition</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.2.3	Resultados Esperados	17
1.3	Estrutura do Documento	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	Sistemas de Refrigeração	19
2.1.1	Principais Componentes de um Sistema de Refrigeração	19
2.1.2	Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor	21
2.2	Compressores Herméticos	22
2.2.1	Motores de indução utilizados em compressores	23
2.3	Ensaio de Desempenho Energético de Compressores	25
2.3.1	Bancadas de Ensaio de Desempenho	26
2.3.2	Ensaio de Capacidade de Elevação	28
2.4	Métodos de Aquecimento de Compressores	31
2.4.1	Injeção de Corrente Contínua Para diminuição do Tempo de Transitório	32
2.5	Considerações sobre o Capítulo	36
3	ARQUITETURA DO SISTEMA DE AQUECIMENTO	37
3.1	Visão Geral do Sistema de Aquecimento	37
3.2	Sistema de Aquisição	38
3.2.1	Transdutores de Temperatura	38
3.2.2	Unidade de Aquisição e Comutação	40
3.2.3	Processador	41
3.3	Sistema de Atuação	41
3.3.1	Sistema de Injeção CC	41
3.3.2	Sistema de Aquecimento por Indução	44
3.3.2.1	Análise dos Circuitos e Estratégia de Controle do Fogão de Indução	44
3.3.2.2	Dispositivo de E/S Digital NI USB-6501	45
3.3.2.3	Circuito de Isolamento Óptico	45
4	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA	47
4.1	Sistema Supervisório	48

4.2	Automação do Fogão de Indução	48
4.3	Ensaio Preliminares para a Definição do Sistema de Controle . .	48
4.3.1	Aquecimento Via Controle de Alimentação Elétrica	49
4.3.2	Aquecimento via Indução Eletromagnética	50
4.3.3	Considerações Sobre o Sistema	52
4.4	Controle de Temperatura da Carcaça	53
4.4.1	Malha de Controle Interna	54
4.4.2	Malha de Controle Externa	56
4.5	Controle de Temperatura da Bobina	59
4.6	Controle Para a Bancada de Ensaio de Capacidade de Elevação .	59
5	AVALIAÇÃO DO SISTEMA E RESULTADOS	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
6.1	Conclusões	69
6.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	70
	REFERÊNCIAS	71

1 Introdução

1.1 Contextualização

O aumento do custo da energia elétrica, verificado nos últimos anos, impulsionado pela crescente demanda e limitação da oferta, aumentou a importância da eficiência nos equipamentos elétricos. Dentro do setor residencial uma parcela significativa de energia elétrica é consumida por aparelhos de refrigeração e de condicionamento de ar, que juntos representam 33 % do consumo total [9].

Atualmente, 97,3 % das residências brasileiras possuem refrigeradores [10]. O consumo energético é considerado um dos mais importantes fatores para escolha de um refrigerador. Um dos principais componentes de um refrigerador é o seu compressor, sendo ele o maior responsável pelo gasto energético do equipamento. Nesse contexto, os fabricantes de compressores de refrigeração investem em pesquisas de novas tecnologias a fim de aumentarem a eficiência energética dos seus produtos.

Uma parte importante no desenvolvimento de produtos mais eficientes, bem como para garantir a qualidade da produção, é avaliar o compressor através de ensaios de desempenho [11]. Nesse cenário, surge uma demanda por testes de desempenho, utilizados para determinar os parâmetros de desempenho de um compressor.

Normalmente, os principais parâmetros funcionais de um compressor são obtidos através de ensaios realizados em bancadas específicas para este fim, denominadas bancadas de ensaios de desempenho. Essas bancadas são capazes de medir o desempenho dos compressores seguindo normas internacionais, como a ISO 917 [11], que permitem às empresas consumidoras de compressores comparar os diversos modelos de diferentes fabricantes, analisando quais produtos atendem melhor às suas necessidades.

No entanto, uma única bancada de ensaio de desempenho pode custar centenas de milhares de dólares e os ensaios de desempenho realizados nelas podem levar mais de 3 horas para serem concluídos [3]. Como o número de compressores fabricados em uma planta industrial pode chegar a dezenas de milhares por dia, não é possível realizar ensaios em tempo compatível com a produção. Com isso, falhas podem ser detectadas de maneira tardia, após uma grande quantidade de compressores defeituosos ser fabricada.

Dentre os parâmetros de desempenho do compressor, a capacidade de refrigeração é uma das principais variáveis no estabelecimento de um projeto de sistemas de refrigeração. Com o fim de diminuir o tempo para a determinação dessa variável, Coral [6] propôs um método para estimar a capacidade de refrigeração a partir de um ensaio de capacidade de elevação de pressão, realizado em poucos segundos. Ele obteve excelentes resultados, com

erros ligeiramente acima dos obtidos com a bancada de ensaios de desempenho, e observou que um dos principais parâmetros que precisariam ser controlados para a obtenção de um menor erro seria a temperatura do compressor ao iniciar os ensaios.

Zanol [7] concebeu uma arquitetura para aquisição de dados e controle de bancada para a realização desses ensaios com tempos extremamente reduzidos em ambiente laboratorial. Essa bancada foi posteriormente aprimorada. Atualmente, um dos principais problemas da bancada experimental é garantir a condição inicial de temperatura do compressor no ensaio.

Diversos trabalhos abordaram diferentes estratégias de aquecimento acelerado de compressores. Silveira [8] buscou diminuir o tempo total dos ensaios de desempenho através da redução do tempo de transitório mediante aquecimento acelerado do compressor, utilizando-se injeção de corrente contínua. Lima [12] estudou o uso de variação de tensão e de frequência de alimentação, bem como a injeção de tensões distorcidas para esse mesmo fim.

Neste trabalho foram estudadas bibliografias relacionadas para um melhor entendimento dos possíveis métodos de aquecimento de um compressor para o ensaio. As diferentes técnicas de aquecimento presentes na bibliografia foram comparadas e através desse estudo se concluiu sobre as estratégias mais apropriadas a serem utilizadas para o aquecimento do compressor. A solução escolhida foi implementada e o resultado de sua aplicação foi analisado conforme descrito neste documento.

Este trabalho apresenta a concepção de um sistema de aquecimento de compressores para bancadas de ensaio de capacidade de elevação de pressão, a fim de diminuir consideravelmente o tempo despendido na etapa de aquecimento. Neste trabalho, apresentam-se os transdutores e atuadores empregados, o sistema de aquisição utilizado e o software desenvolvido para o sistema. Também são realizados ensaios no sistema.

O projeto descrito neste relatório foi desenvolvido no Labmetro – Laboratório de Metrologia e Automação da UFSC em parceria com a Embraco. Dentro do Labmetro existe o LIAE – Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios. Este laboratório tem atuação multidisciplinar englobando diversas áreas das engenharias mecânica, elétrica e de controle e automação, realizando projetos com foco em aplicações industriais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral projetar, construir e validar um sistema de aquecimento de compressores para ser utilizado em bancadas de ensaio de capacidade de elevação de pressão, a fim de reduzir o tempo total de ensaios, utilizando um conjunto de

técnicas estudadas ou desenvolvidas durante o projeto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral, é necessário atender aos objetivos específicos descritos a seguir:

- conceber e construir arquitetura do sistema de aquecimento de compressores;
- desenvolver software de aquisição e controle para o sistema proposto;
- realizar ensaios para validação da arquitetura concebida para o sistema;

1.2.3 Resultados Esperados

Ao final deste projeto, espera-se obter um sistema de aquecimento de compressores para bancadas de capacidade de elevação de pressão. O sistema deve possuir transdutores e um sistema de aquisição, além de um software de que implementará a lógica de controle proposta. O sistema será documentado e validado. Através deste trabalho, é esperado controlar a temperatura do compressor, levando ela até um valor definido num tempo menor que o atual, possibilitando melhorar os resultados obtidos por Coral [6] .

1.3 Estrutura do Documento

Este relatório é dividido em 6 capítulos. O capítulo 2 aborda compressores, princípios de refrigeração e o estado da arte em ensaios de desempenho de compressores. No capítulo 3 é apresentada a concepção da arquitetura de uma bancada para avaliação de compressores em tempos extremamente reduzidos. No capítulo 4 é exposta a implementação do sistema concebido. No capítulo 5 são expostos os resultados de ensaios realizados para validação da bancada desenvolvida. No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

Para auxiliar na compreensão do projeto explanado neste documento, é necessário um estudo geral do contexto do problema. Isso inclui conhecer o funcionamento de sistemas de refrigeração, seu componente principal, o compressor, os ensaios os quais os mesmos são submetidos, bem como seus métodos de aquecimento. Para tanto, na seção 2.1, são abordados conceitos de sistemas de refrigeração. Na seção 2.2, apresenta-se um estudo sobre compressores herméticos. Na seção 2.3 são apresentados os ensaios as quais estes compressores são tipicamente submetidos. Na seção 2.4, são apresentados métodos de aquecimento de compressores que são atualmente utilizados ou já estudados em trabalhos anteriores. Por fim, na seção 2.5, é apresentada uma conclusão sobre o conteúdo apresentado no capítulo e suas implicações no projeto com um todo.

2.1 Sistemas de Refrigeração

O processo de refrigeração pode ser definido como o processo de remoção do calor de um meio, reduzindo a sua temperatura e mantendo essa condição por meios mecânicos ou naturais [13]. Um sistema de refrigeração consiste de um conjunto de equipamentos que operam de forma integrada com o objetivo de remover calor de um meio de baixa temperatura para um meio a uma temperatura maior. Este processo ocorre de maneira contrária ao comportamento natural da transferência de calor e, para isso, necessita de uma fonte externa de energia para realizar a troca de calor [14].

2.1.1 Principais Componentes de um Sistema de Refrigeração

Em um sistema de refrigeração são usados diversos componentes. Os principais equipamentos dos sistemas de refrigeração residenciais são mostrados na Figura 1 e descritos a seguir.

- Compressor: ele é o dispositivo responsável pela entrega de energia necessária para o sistema, para que o calor flua do ambiente frio para o quente, sentido contrário a uma transferência térmica sem atuação externa;
- Fluido refrigerante: absorve o calor no ambiente interno (evaporador) e o libera no ambiente externo pelo condensador. O fluido refrigerante é uma substância (ou mistura) que circula através do sistema de refrigeração. É a sua manipulação, através da compressão, descompressão, e trocas de fase, que proporciona a refrigeração;

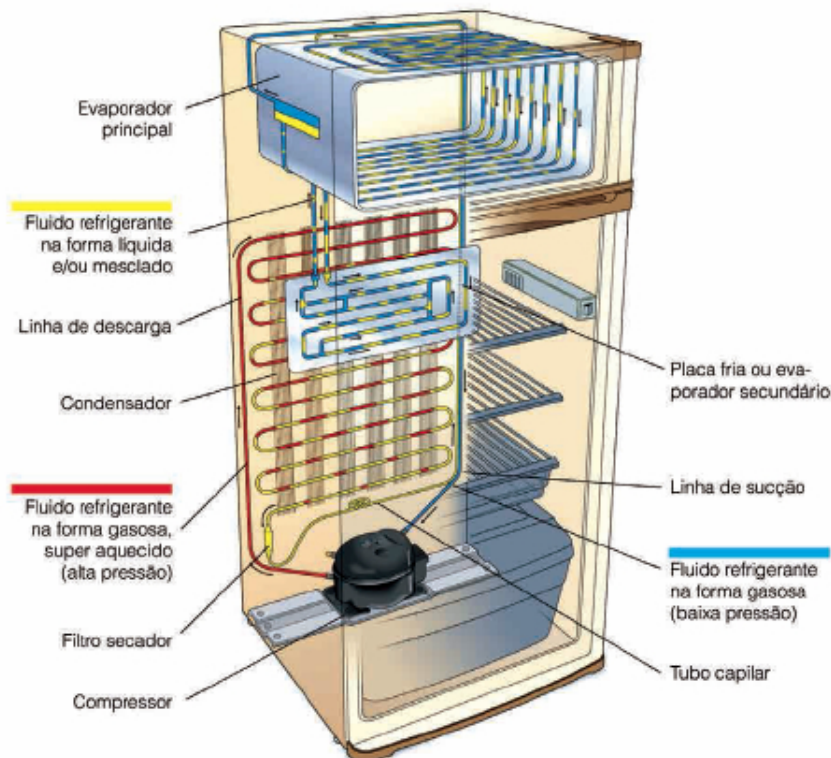


Figura 1 – Ilustração de um sistema de refrigeração doméstico. Adaptada de [1]

- Condensador: transfere o calor do fluido refrigerante para o ambiente externo. É a interface entre o sistema de refrigeração e o meio para o qual o calor é transferido. Três tipos de condensadores são encontrados mais frequentemente: o resfriador a ar, o resfriador a água e o evaporativo; todos eles com constituição semelhante a dos evaporadores;
- Evaporador: transfere o calor do ambiente interno para o fluido refrigerante. É a interface entre o sistema de refrigeração e o meio a ser resfriado. É composto por uma câmara, tubo ou serpentina, na qual o refrigerante evapora no interior. Nessa superfície, que separa o refrigerante do meio a ser resfriado, é interessante haver alta condutividade térmica para facilitar a troca de calor entre os meios;
- Elemento de controle: é o tubo capilar ou válvula de expansão, que cria uma resistência à circulação do fluido refrigerante, causando um diferencial de pressão entre o condensador, a alta pressão, e o evaporador, a baixa pressão. Em sistemas de refrigeração residencial não é comum o emprego de válvulas por uma questão de custo. Em seu lugar são empregados dispositivos passivos que causam perda de carga, chamados tubos capilares. Em sistemas de maior valor agregado, como grandes sistemas comerciais, por exemplo, é mais comum o emprego de válvulas, pois os ganhos de desempenho energético obtidos com esses dispositivos são enormes e justificam o custo adicional ao produto.;

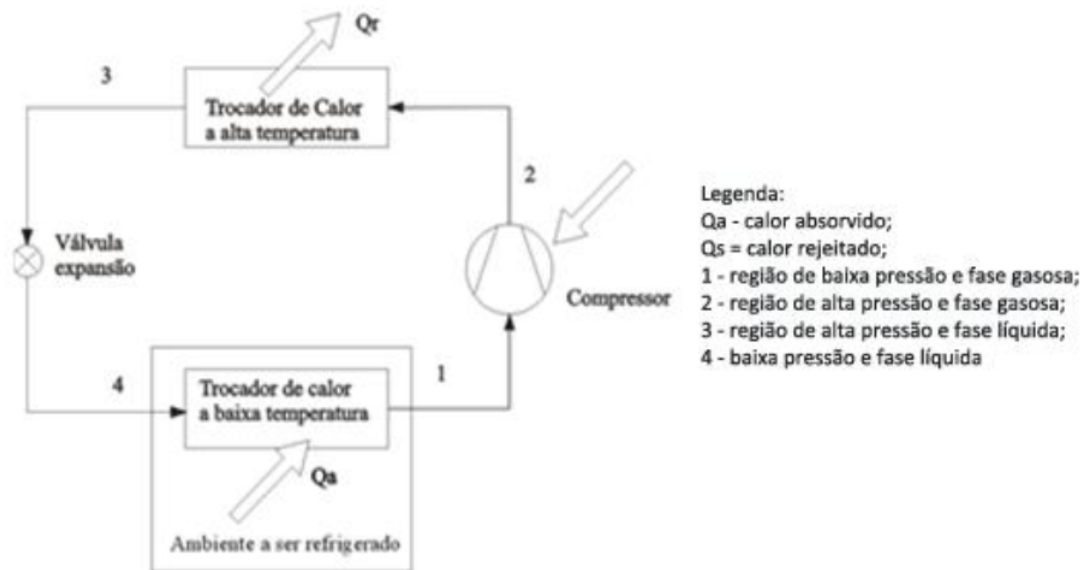


Figura 2 – Ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Adaptada de [2]

- Filtro secador: retém impurezas e/ou umidade quando estão presentes no sistema;

2.1.2 Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor consiste em circular um fluido refrigerante por diversas etapas e retorná-lo ao ponto inicial, utilizando processos de compressão e expansão para retirar calor de um ambiente a baixa temperatura. Na Figura 2 tem-se um esboço do ciclo de refrigeração.

Conforme mostrado na Figura 2, o ciclo de compressão tem início com a compressão do vapor do refrigerante superaquecido e em baixa pressão entrando na câmara de volume variável do compressor pela região de sucção (1). No interior do compressor a pressão é elevada e o fluido conduzido por uma diferença de pressão até a entrada do condensador (2). No condensador ocorre a transferência de calor para o meio externo (Q_r), diminuindo a temperatura do refrigerante, causando a sua condensação e o deixando no estado de líquido sub-resfriado. Isso ocorre naturalmente, visto que ao sair do compressor o fluido se encontra em uma temperatura mais alta que a do meio externo, onde está situado o condensador. O refrigerante deixa o condensador liquefeito e ainda sob alta pressão e a seguir chega ao dispositivo de expansão (3) no qual ocorre uma redução brusca de pressão do fluido e ele passa para um estado bifásico, com predominância de líquido. Para poder se evaporar completamente, o refrigerante necessita absorver calor de um meio externo. Este calor é fornecido pelo evaporador. A medida que o refrigerante passa através do evaporador o fluido atinge novamente o estado de vapor. Essa evaporação acontece devido a uma outra transferência de calor (Q_a), desta vez do meio para o evaporador. Esse processo de troca de calor ocorre de forma natural, uma vez que o fluido a baixa pressão apresenta

temperatura mais baixa que a do meio que se deseja refrigerar. Por fim, o refrigerante retorna para o compressor e o ciclo é repetido continuamente [2]. Dessa forma, em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor o calor apenas é transferido de um ambiente para outro e o responsável por movimentar o fluido que realiza essa transferência é o compressor [15].

2.2 Compressores Herméticos

O compressor é um dos principais componentes de um circuito de refrigeração. Ele é o dispositivo responsável pela realização do trabalho necessário para que o calor flua do ambiente frio para o quente, sentido contrário a uma transferência térmica sem atuação externa. Para realizar tal tarefa, ele aumenta a pressão do fluido refrigerante na fase de vapor. Tal diferença de pressão é responsável pelo movimento do fluido através do circuito. Ao comprimir o fluido ele também aumenta a sua temperatura, um efeito indesejável, que faz com que o condensador tenha que retirar mais calor do fluido.

Em sistemas de refrigeração são utilizados praticamente todos os tipos de compressores, como, alternativos, rotativos (parafuso e de palhetas) e centrífugos. Os compressores alternativos aparecem em concepções distintas, dentre elas os tipos aberto, semi-hermético e selado ou hermético (Figura 3), são os mais comuns. No compressor aberto, o eixo de acionamento passa através da carcaça e é acionado por um motor externo. Os compressores herméticos e semi-herméticos possuem, na mesma carcaça, o compressor e o motor de acionamento. A presença do motor elétrico dentro do mesmo ambiente do fluido refrigerante permite trocas de calor entre o óleo, o fluido refrigerante e o motor elétrico, o resfriando. Isso pode diminuir a eficiência do compressor, mas aumenta a vida útil do motor. O semi-hermético permite a remoção do cabeçote, tornando acessíveis as válvulas e os pistões. Já nos herméticos, não se tem acesso ao interior do compressor e estão disponíveis no exterior apenas as conexões de sucção, processo (por onde são injetado óleo e fluido refrigerante), descarga e as conexões elétricas do motor. Devido às dificuldades de acesso, não é possível realizar manutenções preventivas ou corretivas neste tipo de compressor, por outro lado, eliminam-se problemas de vazamentos [16].

A figura 3 apresenta a estrutura de um compressor hermético, apontando seus principais componentes. Nela é possível observar que a energia elétrica fornecida ao conjunto estator-rotor (08 e 09) é transmitida pelo eixo (06) e transformada em um movimento linear através do conjunto biela-manivela (05). Este movimento linear é realizado pelo pistão (04) dentro da camisa (03) [17].

Dentro do cilindro de compressão existem duas válvulas, que restringem o fluxo do fluido em apenas uma direção. A válvula de sucção fica aberta enquanto a pressão dentro do cilindro é menor que a pressão de sucção e permite a entrada do fluido. A válvula de

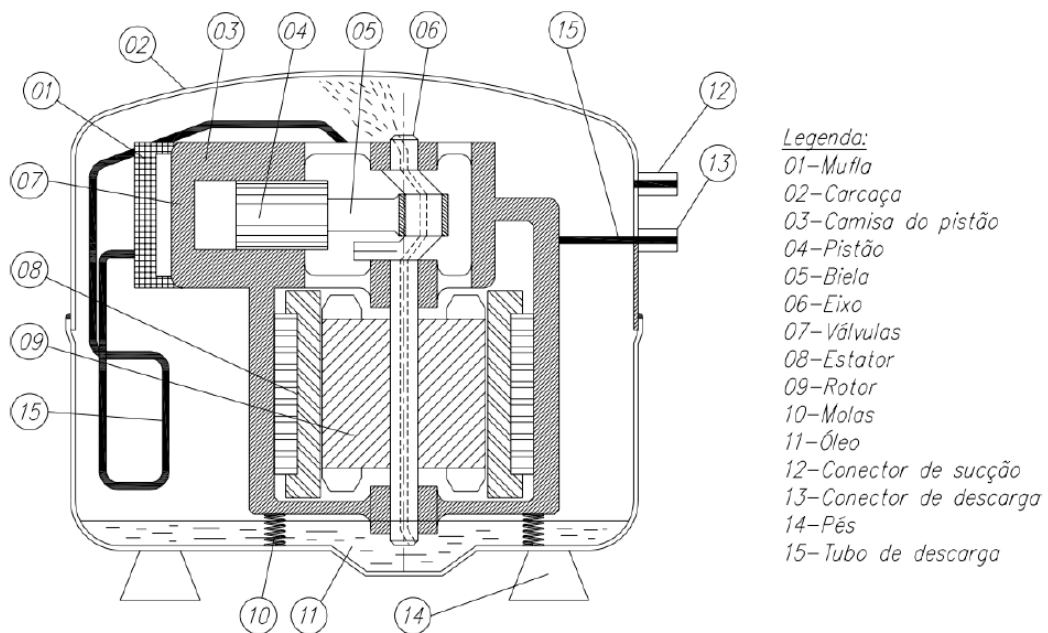


Figura 3 – Estrutura interna de um compressor alternativo hermético. Adaptada de [3]

descarga fica aberta enquanto a pressão no interior do cilindro é maior que a pressão de descarga e permite a saída do fluido.

O ciclo de compressão de um compressor alternativo pode ser visto na figura 4. Na etapa A, o pistão se encontra em seu curso máximo. Com o retorno do pistão, começa a expansão do fluido refrigerante com ambas as válvulas fechadas, caracterizada na imagem pela etapa B. Quando a pressão no interior do cilindro é menor que a pressão externa, a válvula de sucção é aberta e começa o fluxo de fluido para dentro do cilindro, na figura representada pela etapa C. O fluido é aspirado, preenchendo a câmara até que o pistão chegue no seu curso mínimo. Ao avançar novamente, a pressão no cilindro aumenta e as válvulas se fecham. O pistão passa então a comprimir o fluido, etapa D. Quando a pressão no interior do cilindro se torna maior do que a pressão de descarga, a válvula de descarga se abre e ocorre a saída do fluido, etapa E, até que o pistão atinja o curso máximo, retornando à etapa A.

2.2.1 Motores de indução utilizados em compressores

Embora existam projetos de compressores utilizando outros tipos de motores, os motores de indução são os mais utilizados em sistemas de refrigeração, devido a características como robustez, baixo custo e alimentação monofásica.

Os principais componentes de um motor de indução são apresentados na figura 5. Em (a) são exibidos os componentes de um estator em (b) são exibidos os componentes

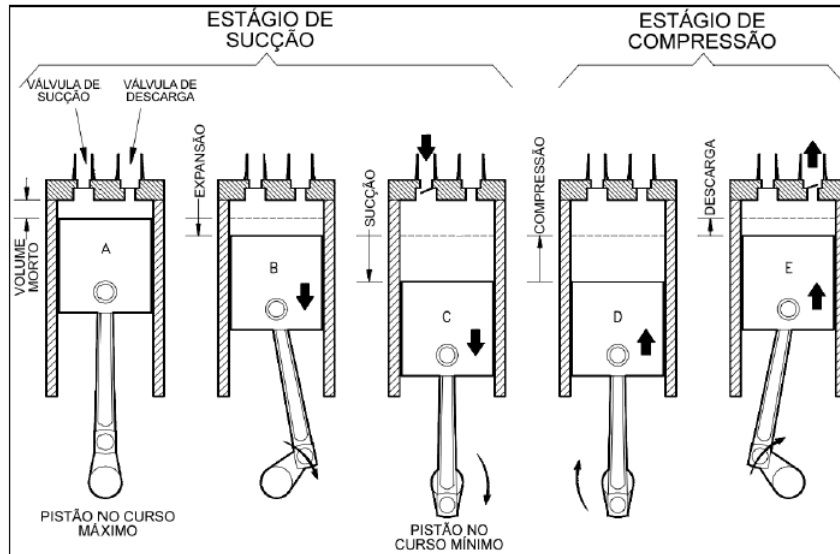


Figura 4 – Ciclo de compressão em um compressor hermético alternativo . Adaptada de [4]

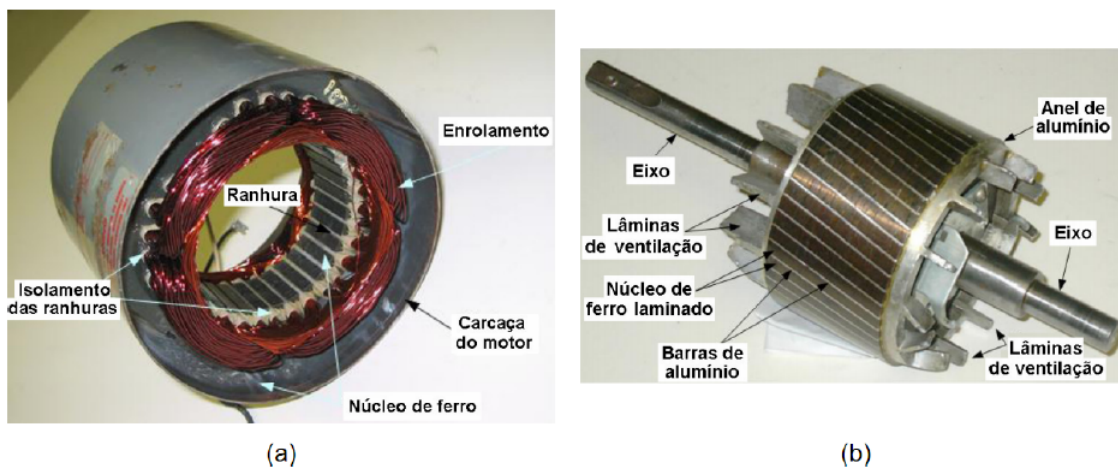


Figura 5 – Componentes elétricos básicos de um motor de indução: (a) estator e (b) rotor. Adaptada de [5]

de um rotor. Existem basicamente dois tipos de rotores para motores de indução, rotores bobinados ou com barras em formato de gaiola de esquilo. Quanto aos estatores, nos motores trifásicos, o estator é formado por enrolamentos dispostos de maneira a criar um campo girante. As linhas de campo do estator cortam os condutores do rotor, induzindo assim, uma corrente no rotor. Essa corrente, por sua vez, gera outro campo magnético que tende a seguir o campo girante do estator [18]. Já em motores monofásicos, o campo produzido com apenas um enrolamento de estator não é girante, mas sim pulsante. Dessa forma, o torque inicial é nulo [19].

A principal diferença entre os motores monofásicos e trifásicos está na forma com que o campo girante é obtido. Para o motor trifásico, a própria defasagem entre as fases

juntamente com o posicionamento das espiras induz a criação de um campo girante. Para os motores monofásicos, no entanto, o torque inicial é nulo enquanto o rotor estiver em repouso. Dessa forma, é necessário um meio de se induzir um torque não nulo para sua partida. Isso é realizado, normalmente, com a utilização de um segundo enrolamento, chamado de enrolamento auxiliar [8].

2.3 Ensaio de Desempenho Energético de Compressores

Uma parte importante no desenvolvimento de produtos mais eficientes e na análise da qualidade da produção de compressores de refrigeração é avaliar o compressor através de ensaios de desempenho. Ensaio são uma forma de analisar determinados parâmetros de desempenho energético de um compressor e verificar se estes estão de acordo com as especificações projetadas.

Os ensaios de desempenho de compressores herméticos têm por objetivo determinar os valores da capacidade de refrigeração, da potência elétrica consumida pelo compressor e, conseqüentemente, do coeficiente de desempenho [11].

No entanto, não existe um experimento único e universal aceito para os ensaios de desempenho de compressores [11]. Para possibilitar a comparação entre diferentes fabricantes, existem normas que buscam padronizar os diferentes métodos, de modo que os resultados possam ser comparados, reproduzidos e aceitos com maior confiança pelos fabricantes de sistemas de refrigeração [20].

Dentre as normas que regulamentam os ensaios, duas são mais frequentemente utilizadas e aceitas pela indústria são a ANSI/ASHRAE 23 [21] e a ISO 917 [11]. A norma ISO 917, norma internacional que apresenta métodos para avaliação de desempenho de compressores, estabelece que para medir a capacidade de refrigeração o compressor deve ser mantido em condições de regime permanente. Essa condição é caracterizada por um período contínuo de uma hora de operação no qual pontos de operação e variáveis específicas devem permanecer dentro de limites estabelecidos. As variáveis específicas são pressões, temperaturas, tensão e frequência elétrica de alimentação, volume específico do refrigerante e capacidade de refrigeração.

A capacidade de refrigeração, ϕ_0 , é uma medida da capacidade de geração de vazão de massa de fluido refrigerante sob determinadas condições de operação. Ela é quantificada pelo produto da vazão mássica de fluido refrigerante por uma diferença de entalpias. A vazão mássica é única em todos os pontos do circuito para um sistema em uma determinada condição de ensaio. Já a diferença de entalpias pode ser tomada em diversos pontos do circuito de refrigeração e possui diferentes valores em cada um deles. Os pontos escolhidos

para medição da entalpia são, em geral, especificados por alguma norma. Segundo a ISO 917 [11], a capacidade de refrigeração pode ser calculada através da equação 2.1

$$\phi_0 = q_{mf} \frac{V_{ga}}{V_{gl}} (h_{g1} - h_{f1}) \quad (2.1)$$

Onde:

- ϕ_0 capacidade de refrigeração do compressor [W]
- q_{mf} vazão mássica de refrigerante [kg/s]
- V_{ga} volume específico do fluido refrigerante (gás) entrando no compressor, durante o ensaio [m³/kg]
- V_{gl} volume específico do refrigerante entrando no compressor na condição definida para o ensaio [m³/kg]
- h_{g1} entalpia específica do refrigerante entrando no compressor nas condições básicas específicas de ensaio [J/kg]
- h_{f1} entalpia específica do refrigerante líquido na pressão correspondente à de descarga especificada para o compressor durante o ensaio [J/kg]

Potência elétrica (P) consumida é definida como toda a potência elétrica consumida pelo compressor e acessórios necessários para seu funcionamento. O coeficiente de desempenho (COP) é definido como a razão da capacidade de refrigeração pela potência elétrica consumida.

2.3.1 Bancadas de Ensaio de Desempenho

Normalmente, os principais parâmetros de desempenho energético de um compressor são obtidos através de testes realizados em bancadas específicas para este fim, denominadas bancadas de ensaios de desempenho. Uma bancada automatizada desenvolvida pelo Laboratório de Instrumentação e Automatização de Ensaio (LIAE) em parceria com a WHIRLPOOL (unidade EMBRACO) é mostrada na Figura 6.

Uma ilustração do circuito de uma bancada de ensaio de desempenhos de compressores é mostrada na figura 7. Nela estão representados os principais componentes de uma bancada, como o compressor, condensador, medidor de vazão mássica, válvula de expansão, condensador e evaporador (calorímetro). Na configuração apresentada nesta figura, é possível realizar a medição da capacidade com a utilização de calorímetros e de um medidor de vazão mássica na fase líquida do fluido refrigerante



Figura 6 – Foto de uma bancada de ensaios de desempenho.

Além do circuito principal, onde está inserido o compressor em teste, existem dois outros sistemas de refrigeração. Um deles auxilia no controle da temperatura do ambiente onde permanece o compressor em teste. O outro exerce função semelhante para o ambiente onde está inserido o calorímetro (não mostrado na Figura7).

Conforme mencionado anteriormente, a norma ISO 917 [11] detalha cada um dos métodos que podem ser utilizados, bem como sugere quais pares de método devem ser empregados em conjunto para garantir uma maior confiabilidade dos resultados. A determinação da capacidade deve ser realizada utilizando-se dois métodos distintos simultaneamente. Um deles será o valor oficial adotado para capacidade e outro servirá para confirmação (desde que a diferença entre os valores seja inferior a um desvio máximo) [11].

Embora a norma ISO 917 descreva diversos métodos para a medição da capacidade, modo geral, todos os métodos se resumem a apenas dois princípios: utilizando a medição da vazão mássica diretamente e utilizando um calorímetro. Nos métodos que utilizam transdutores para a medição direta da vazão mássica, é utilizada a equação (2.1), descontando a parcela de massa de óleo de lubrificação que circula junto com o refrigerante, para a determinação da capacidade.

Segundo Silveira [8], nos outros, a capacidade de refrigeração é obtida através do princípio de conservação de energia. Em um ambiente fechado e isolado termicamente (calorímetro) uma resistência elétrica transforma energia elétrica em calor. Nesse mesmo ambiente, o evaporador do circuito de refrigeração retira o calor injetado pela resistência.

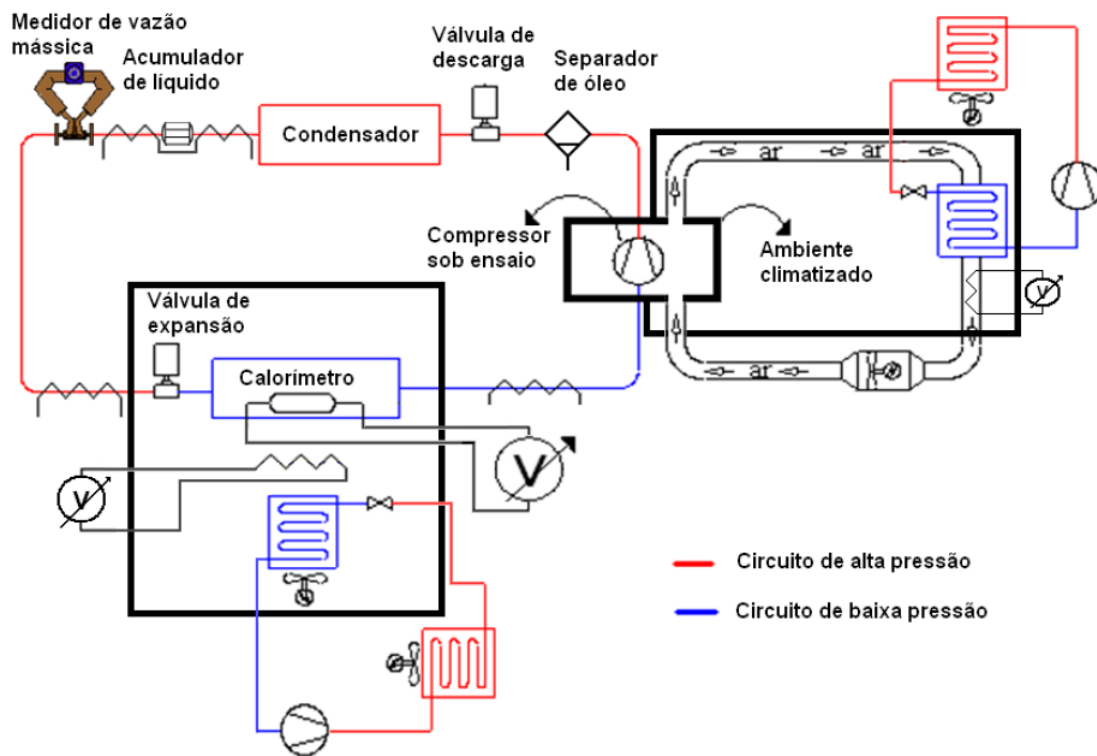


Figura 7 – Diagrama esquemático da bancada disponível no Labmetro. Adaptada de [6]

As pressões e temperaturas do calorímetro são medidas durante o ensaio. Como o ensaio leva em consideração apenas os dados obtidos em regime permanente, ou seja, após os transitórios das variáveis, pode-se obter a capacidade de refrigeração como sendo igual à potência elétrica injetada pela fonte que alimenta a resistência do calorímetro, descontadas as perdas para o ambiente.

Ainda de acordo com as normas, devem-se obter os resultados do ensaio de capacidade apenas quando todas as variáveis estiverem em condições de regime, ou seja, assentadas dentro de certos limites. Sendo assim, do tempo total de um ensaio, apenas a última hora é significativa para os resultados. O tempo anterior é utilizado apenas para garantir o assentamento do sistema, de modo que seja possível realizar as medições em condição de regime permanente. Atualmente, o tempo total para um ensaio de capacidade pode chegar a mais de 4 horas [8].

2.3.2 Ensaio de Capacidade de Elevação

Bancadas de ensaio de desempenho tradicionais são capazes de medir o desempenho dos compressores seguindo normas internacionais. Porém, estes ensaios de desempenho costumam demandar um tempo muito longo, podendo levar mais de 3 horas para a sua conclusão [3].

Coral [6] observou a necessidade de ensaios com duração extremamente reduzidas,



Figura 8 – Ilustração da arquitetura atual da bancada experimental.

compatíveis com o tempo de produção. Uma das características testadas na linha de produção é capacidade do compressor de elevar a pressão em um vaso fechado, a partir de uma condição específica, imposta ao mesmo. Característica então denominada capacidade de elevação.

Através de técnicas de inteligência artificial, Coral [6] estimou a capacidade de refrigeração de um compressor a partir da capacidade de elevação do mesmo, que pode ser obtida em poucos segundos. Ele obteve excelentes resultados, com erros ligeiramente acima dos obtidos com a bancada de ensaios de desempenho. Ele observou, no entanto, que um dos principais parâmetros que precisaria ser controlado para a obtenção de um menor erro com o ensaio reduzido é a temperatura do compressor ao iniciar os testes.

Posteriormente, Zanol [7] concebeu uma arquitetura para aquisição de dados e controle de bancada para a realização destes testes com tempos extremamente reduzidos em ambiente laboratorial. Essa bancada foi posteriormente aprimorada, sendo mostrada sua arquitetura atual nas figuras 8 e 9

Esse conceito de ensaio para inferir sobre o desempenho do compressor foi criado a partir do fato de que a vazão mássica tem relação com a capacidade de refrigeração de um compressor. Uma forma para determinar a vazão mássica é conectar a descarga do compressor a uma linha de pressurização externa com volume conhecido e selado, como demonstra a Figura 10.

Assim, caso os ensaios sejam feitos sob as mesmas condições e o tempo de ensaio seja constante em todas as medições, pode-se afirmar que quanto maior for a taxa de elevação de pressão, maior será a massa deslocada para dentro do volume. Da mesma

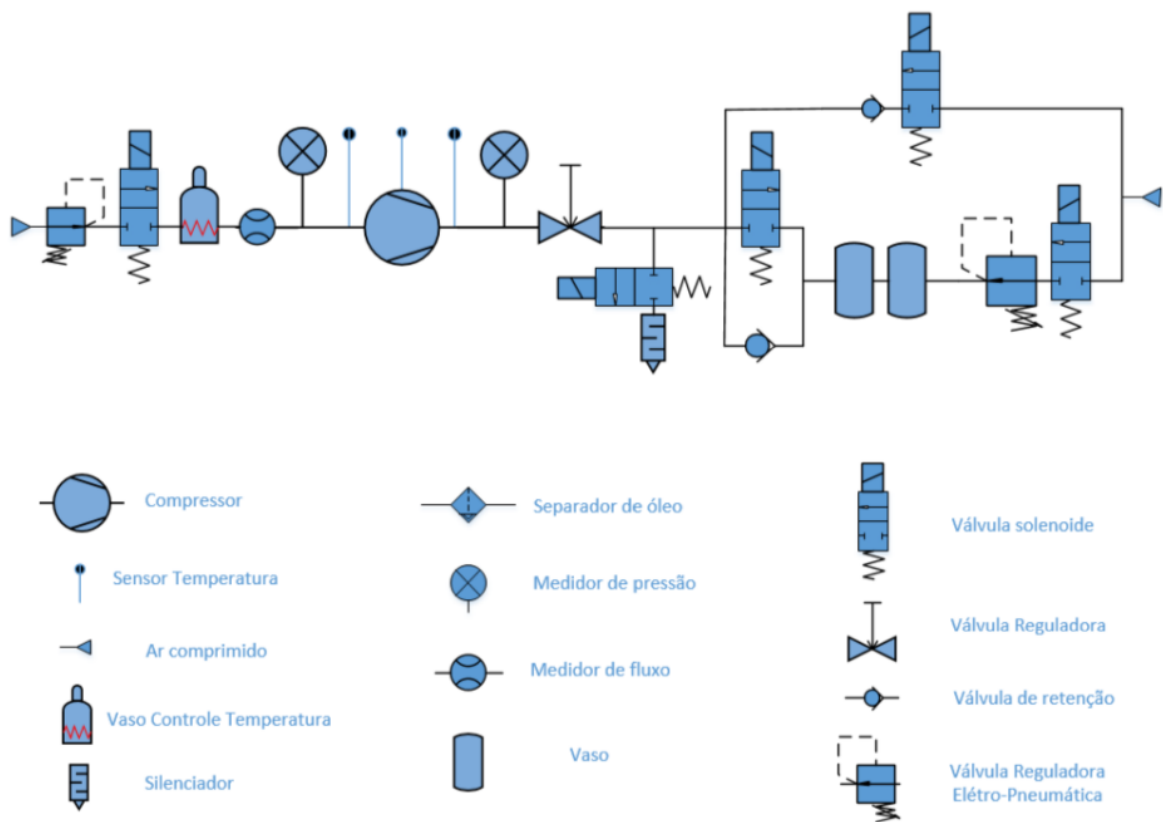


Figura 9 – Esquema pneumático atual da bancada experimental. Adaptada de [7]

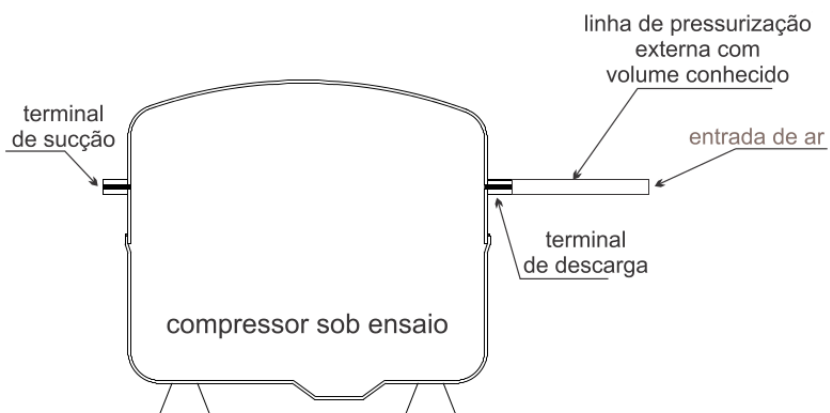


Figura 10 – Conceito para medição da vazão mássica. Adaptada de Coral [6]

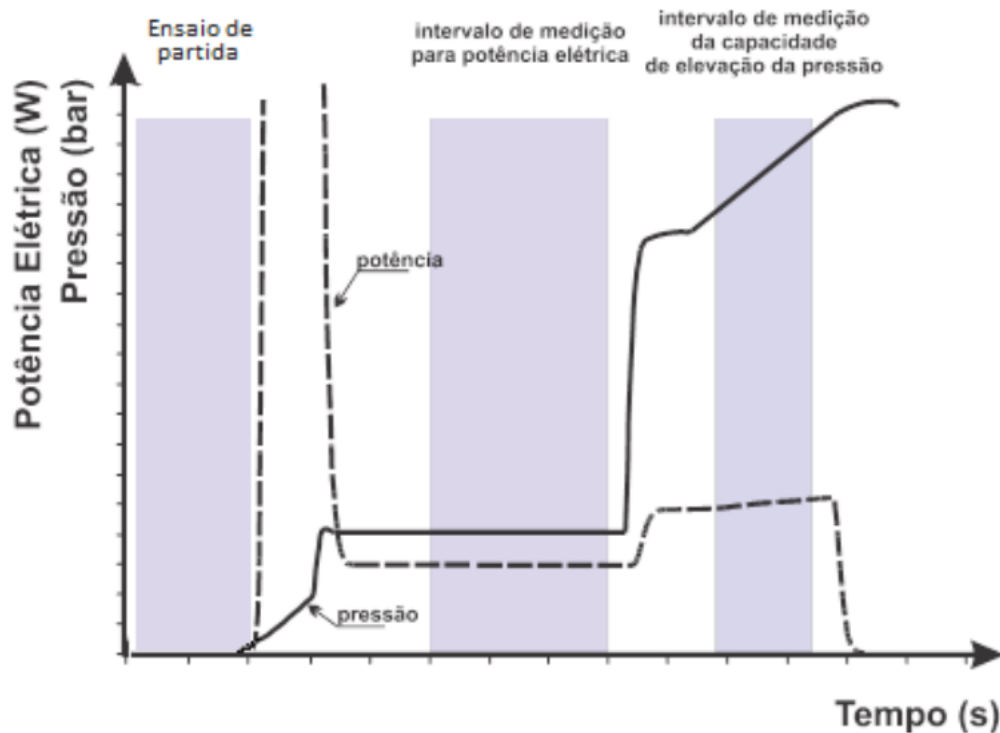


Figura 11 – Conceito do ensaio. Adaptada de [6]

forma, a taxa de elevação de pressão terá correlação com a capacidade de refrigeração do compressor. Desse modo, podem ser criados modelos para inferir a capacidade de refrigeração a partir deste ensaio.

Esse ensaio acelerado também permite uma medição de consumo de energia. O ensaio de consumo no painel proposto por Zanol [7] é realizado mantendo a pressão na linha de pressurização conectada à descarga do compressor constante durante certo período e medindo-se a potência consumida nesse tempo. Um ensaio de partida também é realizado, para que se meça a tensão mínima de partida do compressor. A forma sequencial do ciclo dos ensaios é mostrado a figura 11

2.4 Métodos de Aquecimento de Compressores

Uma das principais formas de aquecer um compressor é aumentando a sua perda de energia. Métodos de aquecimento foram estudado por Scussel [3], que trabalhou de forma bastante abrangente no que se refere ao aumento das perdas nos compressores. Em seu trabalho, foram estudados os efeitos do aumento das perdas termodinâmicas, assim como das perdas elétricas, através de ações como aumento da pressão de descarga, variação da pressão de sucção, aquecimento do gás na sucção e geração de perdas elétricas no motor.

Foram utilizadas variações das condições elétricas para aumento das perdas elétricas utilizando técnicas como alimentação do motor com tensão contínua superposta à alternada,

alimentação do motor somente com tensão contínua e alimentação do motor com tensão alternada em nível reduzido, simulação da situação de rotor bloqueado (partida do motor sem energização do enrolamento auxiliar).

Dentre os resultados obtidos por Scussel [3], os que se mostraram mais satisfatórios ocorreram com a alimentação do motor com tensão contínua (15 V) sobreposta à tensão alternada (115 V), somado ao aumento da pressão de descarga (17 bar) e à redução da convecção forçada sobre o compressor. Com essa configuração, foi possível reduzir o tempo total de ensaio para 2 horas e quinze minutos, tempo esse bastante inferior ao praticado anteriormente que era de aproximadamente 4 horas e 30 minutos [8].

Posteriormente, outros trabalhos abordaram diferentes estratégias de aquecimento acelerado de compressores. Silveira [8] buscou diminuir o tempo total dos ensaios de desempenho através da redução do tempo de transitório mediante aquecimento acelerado do compressor, utilizando-se injeção de corrente contínua. Lima [12] estudou o uso de variação de tensão e de frequência de alimentação, bem como a injeção de tensões distorcidas para esse mesmo fim.

2.4.1 Injeção de Corrente Contínua Para diminuição do Tempo de Transitório

Normalmente, componentes de corrente contínua são indesejáveis em redes de corrente alternada. Elas são particularmente prejudiciais a cargas indutivas com impedâncias muito baixas, como as encontradas em motores de indução, onde provocam sobreaquecimento e saturação do núcleo magnético [22]. No entanto, a inserção de uma componente contínua em motores de corrente alternada pode ser utilizada para aumentar as perdas elétricas em um compressor de forma a diminuir o seu tempo de aquecimento.

Scussel [3] afirma que os comportamentos das curvas de temperatura do compressor podem ser considerados como típicos de um sistema de primeira ordem com constante de tempo definida. Mesmo com a utilização de uma tensão de alimentação acima da nominal, seja com sobretensão ou injeção de corrente contínua, o tempo de assentamento das temperaturas continua o mesmo, mudando apenas as temperaturas finais de assentamento.

A diminuição do tempo de aquecimento, então, provém da possibilidade de injetar corrente contínua no início do ensaio, para que a curva de aquecimento atinja uma temperatura superior àquela que seria atingida naturalmente para um mesmo intervalo de tempo. Na sequência, deve-se retornar a alimentação para o valor nominal quando as temperaturas do compressor estiverem próximas do valor de assentamento, como ilustra a figura 12.

Os resultados obtidos por Scussel [3] são apresentados nas figuras 13 e 14. Para permitir a análise da distribuição de calor durante o aquecimento do compressor, a

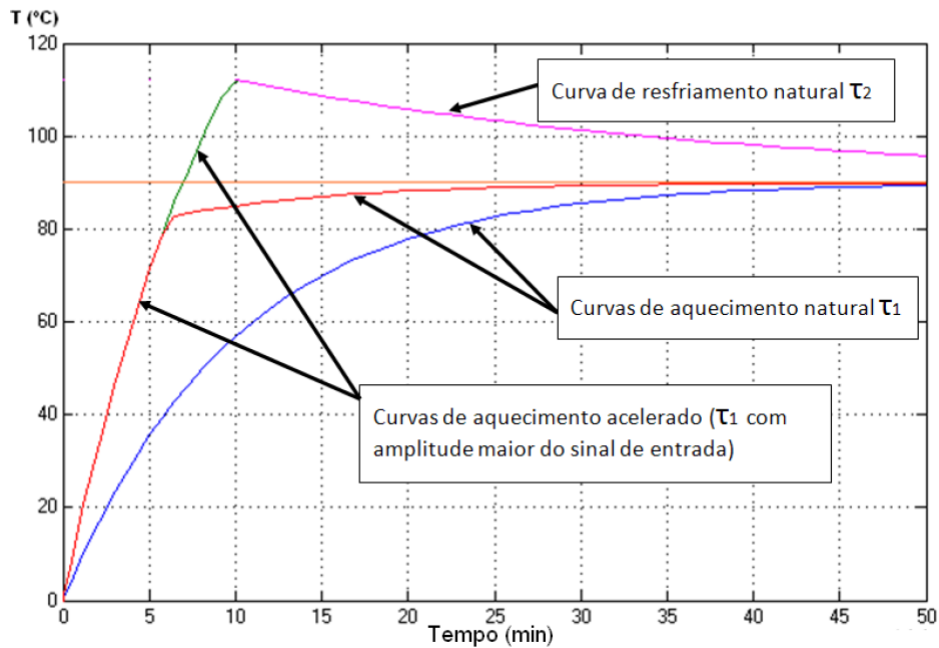


Figura 12 – Ilustração da combinação de curvas de temperatura com e sem sobreaquecimento. Adaptada de Scussel [3]

temperatura foi medida em alguns pontos considerados de interesse. Dentre esses pontos estão, a bobina, o óleo e o corpo do compressor. A utilização de corrente contínua com o compressor em repouso concentra o calor na bobina do motor, como é apresentado na figura 13. Nesse ensaio, o compressor é alimentado somente com uma tensão CC de 55 V por 60 minutos. Nesse período o compressor permanece em repouso. Após esse tempo, é dada a partida no compressor. Com a partida, o óleo circula pelo compressor, resfriando a bobina rapidamente. Na Figura 14 é mostrado um ensaio utilizando uma tensão de alimentação CA de 110 V somada a uma tensão CC de 15 V por 40 minutos, com o compressor em movimento. Nela é possível notar que a injeção de CC mais é eficaz com o compressor em movimento, por permitir uma melhor distribuição do calor pelo compressor.

Silveira [8] realizou ensaios utilizando a injeção de tensão CC sobreposta a alimentação nominal em compressores, aprofundando o estudo desta técnica. Os resultados foram obtidos com o compressor fora de um sistema de refrigeração, então o passador de descarga foi conectado ao de processo, a fim de minimizar as perdas de óleo. O primeiro ensaio, sem adição de corrente contínua, mostra o comportamento das temperaturas internas do compressor medidas em diversos pontos (figura 15). O compressor foi alimentado com tensão CA de 220 V. O tempo de assentamento da temperatura do corpo foi de aproximadamente duas horas. A figura 16 apresenta os resultados do segundo ensaio. O compressor permaneceu sob as mesmas condições, porém com injeção de tensão CC de 20 V durante todo o teste.

Com isso, foi possível concluir que o comportamento é muito próximo do afirmado

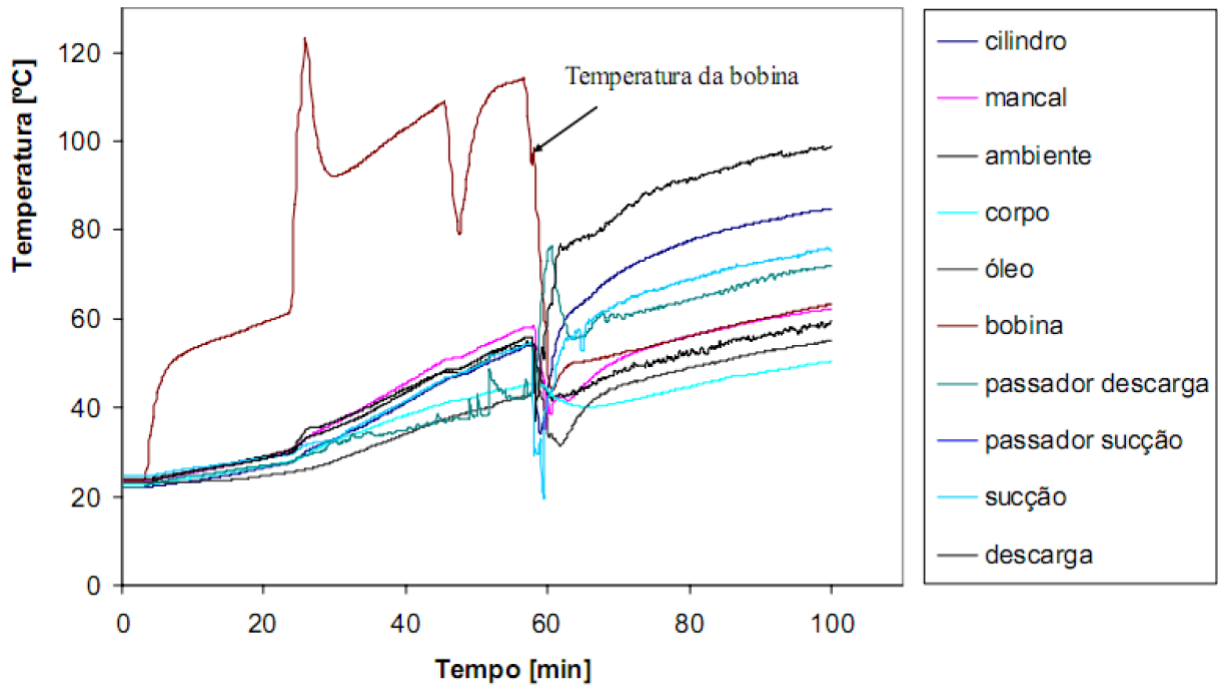


Figura 13 – Ensaio em compressor com alimentação CC de 55 V sem corrente alternada com compressor em repouso. Adaptada de Scussel [3]

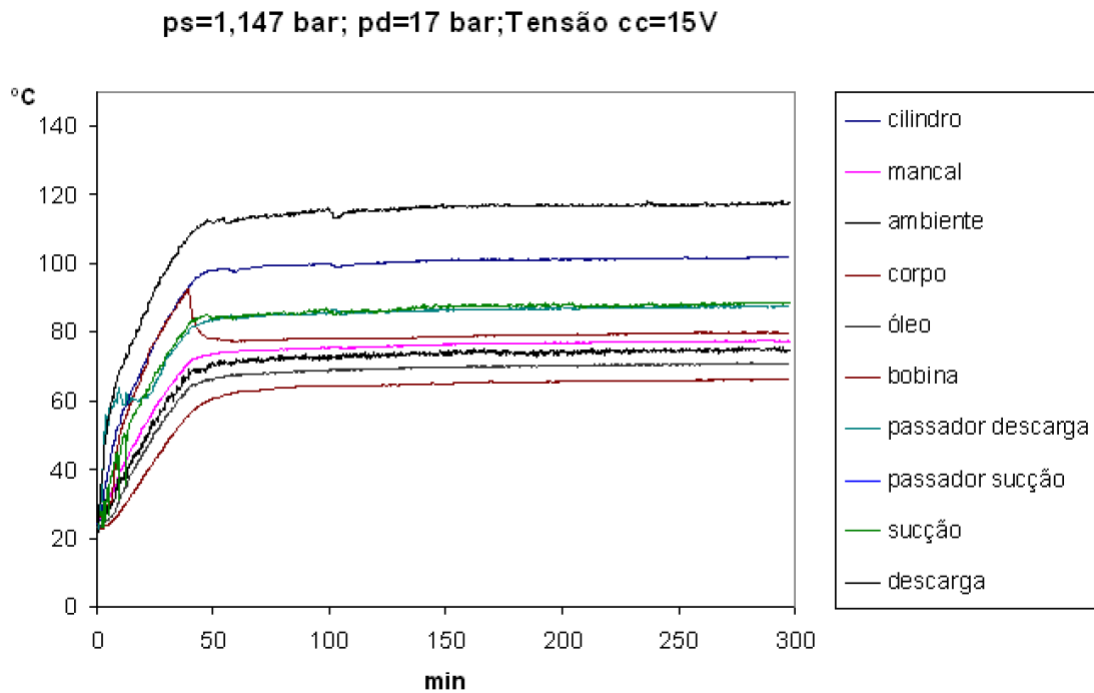


Figura 14 – Ensaio com tensão de alimentação CA de 110 V e tensão CC por 40 minutos de 15 V com compressor em movimento. Adaptada de Scussel [3]

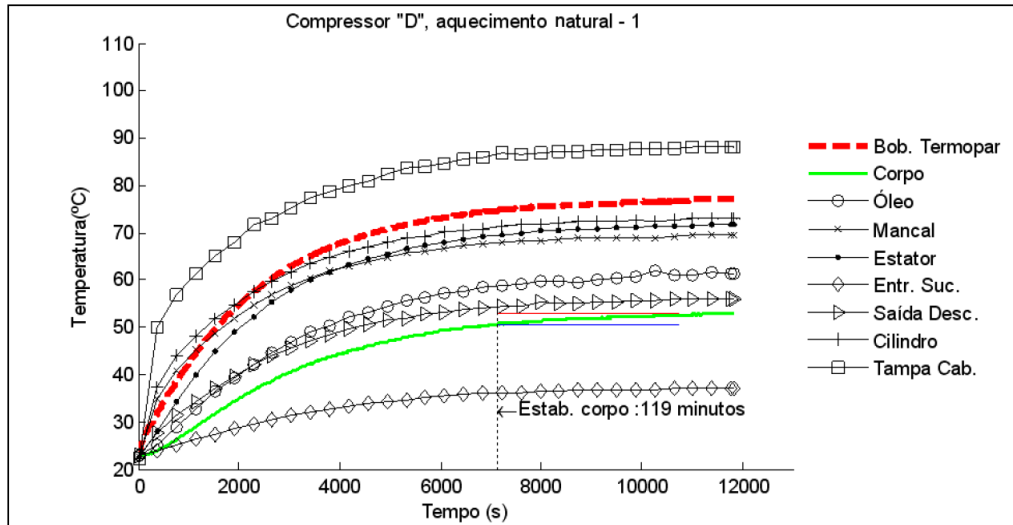


Figura 15 – Ensaio realizado com o compressor a vazio e sem CC. Adaptada de Silveira [8]

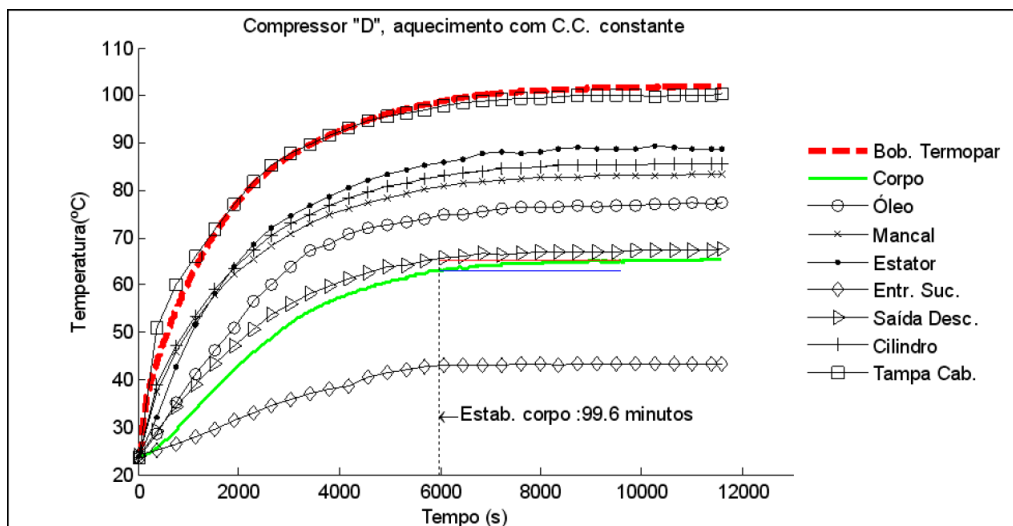


Figura 16 – Ensaio com o compressor a vazio e com injeção CC constante de 20 V. Adaptada de Silveira [8]

por Scussel [3], no qual as constantes de tempo das variáveis quase não mudam e apenas altera-se o valor final de assentamento. Percebe-se o efeito principalmente sobre a bobina principal do compressor, pois é justamente esse componente que dissipa a energia elétrica adicionada ao sistema transferindo-a para o restante do compressor. O valor da temperatura de assentamento do corpo mudou de 52°C , do primeiro ensaio, para 66°C no segundo. O tempo necessário, no ensaio com injeção de CC, para que o corpo do compressor atingisse os 52°C do ensaio sem CC foi de apenas 50 minutos. Isso representa uma redução de 50% do tempo gasto para se atingir essa temperatura [8].

2.5 Considerações sobre o Capítulo

A partir do estudo desenvolvido neste capítulo pode ser entendido o que são sistemas de refrigeração e os seus principais componentes, em especial, os compressores herméticos. A partir desta revisão também é possível entender como são realizados ensaios para determinar parâmetros dos compressores. Pode-se observar também, que os métodos atuais desses ensaios necessitam de um elevado tempo para obter um resultado. Ainda, foram mostrados métodos para acelerar o aquecimento do compressor. Esses tópicos serviram como base para o desenvolvimento deste trabalho.

3 Arquitetura do Sistema de Aquecimento

Neste capítulo serão explicados a arquitetura geral do sistema e os motivos que levaram a tal concepção. Serão detalhados os subsistemas que compõem o sistema de aquecimento, como o sistema de aquisição e o sistema de atuação, composto pelo sistema de injeção CC e pelo sistema de aquecimento via indução.

3.1 Visão Geral do Sistema de Aquecimento

Dentre os requisitos estabelecidos para a automação do sistema de aquecimento da bancada estão que o aquecimento ocorra em um tempo preferencialmente de alguns minutos e que o mesmo ocorra da maneira mais uniforme possível em todo o compressor. O sistema de aquecimento também não deve interferir em outros sistemas de medição presentes e deve realizar o aquecimento utilizando um controle realimentado, levando o compressor até uma determinada temperatura pré-estabelecida.

Foram realizados estudos de bibliografias relacionadas para um melhor entendimento dos possíveis métodos de aquecimento de um compressor para o teste. Através desse estudo foi possível concluir sobre as estratégias que poderiam ser utilizadas para o aquecimento do compressor. Devido à presença de gás dentro do compressor, existe um isolamento térmico significativo entre a bobina e a carcaça do compressor, portanto, a estratégia adotada consistirá na utilização de métodos de aquecimento para ambas as partes de forma relativamente independente e utilizados concomitantemente.

Para o aquecimento da bobina será utilizado um controle na alimentação elétrica do compressor, a fim de aquecer o mesmo injetando uma corrente CC na alimentação. Scussel [3] indicou que a injeção de corrente CC somente é eficiente se for utilizada com o compressor em operação. Em suma, o método consiste em somar uma componente CC à alimentação CA, o que provoca o aumento das perdas elétricas e consequente aquecimento.

Para o aquecimento da carcaça, será utilizado um fogão de indução a ser automatizado. O mesmo consiste de uma bobina, um circuito de controle que determina a potência entregue para a bobina utilizando um sinal PWM e um circuito de potência, responsável por alimentar a bobina de acordo com o sinal passado pelo circuito de controle. Um diagrama geral do sistema é mostrado na figura 17.

Os subsistemas que compõem o sistema de aquecimento são detalhados nas seções nas seções 3.2 e 3.3.

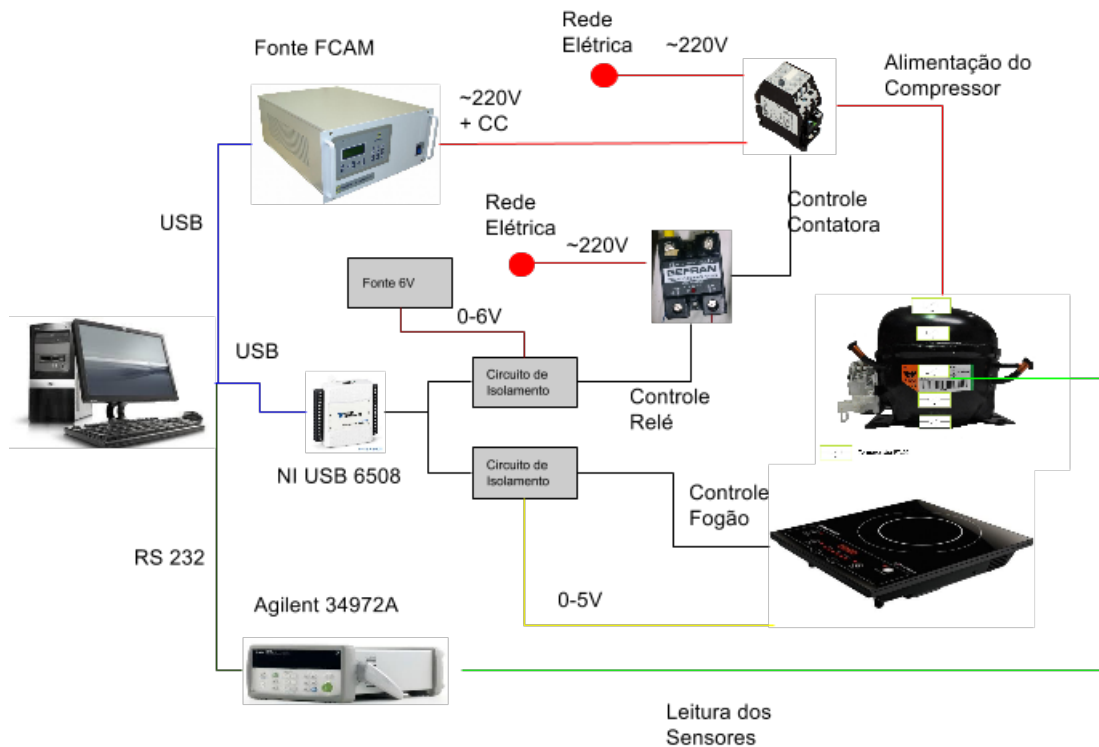


Figura 17 – Diagrama geral da arquitetura do sistema de aquecimento.

3.2 Sistema de Aquisição

Nesta seção será descrita a arquitetura do sistema de aquisição. Na subseção 3.2.1 serão descritos os transdutores de temperatura utilizados. Na subseção 3.2.2 será descrita a unidade de aquisição e comutação utilizada. Na subseção 3.2.3 será descrito brevemente o processador do sistema de aquisição.

3.2.1 Transdutores de Temperatura

Para a medição da temperatura o sistema conta com transdutores de dois tipos, termorresistores e termopares. Ao todo o sistema de aquisição conta com 7 transdutores, sendo 5 termorresistores do tipo Pt100 para medição a 4 fios e 2 termopares do tipo T.

A medição da temperatura da carcaça foi feita utilizando termorresistores. Um termorresistor (RTD do inglês *Resistance Temperature Detector*) é um instrumento que permite conhecer uma temperatura de interesse baseado no princípio da variação da resistência elétrica de um metal, em função da temperatura [23]. A maior parte dos termorresistores são feitos de platina, mas são também utilizados outros materiais, como por exemplo o níquel. Por norma, quando se fala de um termorresistor, ele é identificado pelo material que o constitui e pela resistência que apresenta a 0°C. Por exemplo, um

Pt100 é um termorresistor de platina que a 0°C apresenta uma resistência de $100\ \Omega$ [24]. Suas principais características são a alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, relação de resistência por temperatura praticamente linear, desvio com o uso e envelhecimento desprezíveis. O transdutor de resistência de platina é muito utilizado em laboratórios para medidas de temperatura na faixa de -200°C a $+850^{\circ}\text{C}$ [24]. Para a utilização industrial é um transdutor de excelente precisão, estabilidade e comportamento metrológico.

Para uma maior exatidão da medição, os termorresistores foram utilizadas com uma conexão a 4 fios, conforme mostrado na figura 18. Nessa configuração, a fonte de corrente fornece uma corrente estabilizada e conhecida através do termorresistor R e a tensão gerada é medida com um voltímetro de alta impedância. Dessa forma, a resistência dos condutores exerce um efeito desprezível sobre a medição.

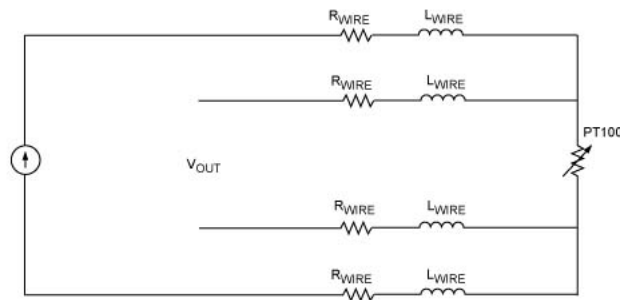


Figura 18 – Ilustração do esquema de conexão dos termorresistores Pt100.

A medição da temperatura da carcaça foi feita utilizando termorresistores em 5 pontos do compressor: (i) no fundo da carcaça, a parte que atinge a maior temperatura quando utilizando o fogão de indução para aquecimento; (ii) entre o fundo e o meio da carcaça; (iii) no meio da carcaça, onde a medição da temperatura normalmente é realizada; (iv) entre o meio e o topo da carcaça; (v) no topo, a parte mais difícil de ser aquecida. A posição dos termorresistores na carcaça é mostrada na figura 19.

Para a medição das temperaturas das bobinas foram utilizados termopares. Estes já haviam sido previamente instalados no compressor pela Embraco.

Termopares são transdutores de temperatura simples, robustos e de baixo custo, sendo amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura. Um termopar é constituído de dois metais distintos que unidos por sua extremidade formam um circuito fechado. O termopar desta maneira gera uma força eletromotriz (FEM), que quando conectada a um instrumento de leitura consegue ler a temperatura do processo destes termopares. Diferentes tipos de termopares possuem diferentes tipos de curva FEM x temperatura [23].

Existem tabelas normalizadas que indicam a tensão produzida por cada tipo de



Figura 19 – Ilustração da posição dos termorresistores Pt100.

termopar para todos os valores de temperatura que suporta. Todas as tabelas normalizadas apresentam os valores da tensão de saída do termopar considerando que a segunda junção do termopar (a junção fria) é mantida a exatamente zero graus Celsius [25].

Tipicamente a temperatura da junção fria é medida por um termistor de precisão. A leitura desta segunda temperatura, em conjunto com a leitura do valor da tensão do próprio termopar, é utilizada para o cálculo da temperatura verificada na extremidade do termopar. Em aplicações menos exigentes, a compensação da junção fria é feita por um semicondutor sensor de temperatura, combinando o sinal do semicondutor com o do termopar [23].

Neste trabalho foram utilizados termopares do tipo T (Cobre / Constantan). Este é um dos termopares mais indicados para medições na gama dos -200°C . a $+370^{\circ}\text{C}$ [25]. As características típicas desses sensores são listadas abaixo:

- Termoelemento positivo (TP): Cu100%
- Termoelemento negativo (TN): Cu55%Ni45% (Constantan)
- Intervalo de utilização: -200°C a $+370^{\circ}\text{C}$

3.2.2 Unidade de Aquisição e Comutação

Para a medição da temperatura da carcaça, serão utilizados 3 termoresistores do tipo Pt100 em conjunto com a unidade de aquisição Agilent 34972A. A unidade de aquisição (DAQ), comutação e registro de dados LXI 34972A consiste de um *mainframe* com 3 *slots*, um multímetro digital de 6,5 dígitos integrado e 8 módulos diferentes de comutação e controle. Ela possui interfaces LAN e USB [26]. Ela possui um conversor

interno, que, quando usado em conjunto com termorresistores e termopares, consegue converter automaticamente a leitura para um valor de temperatura, além de conseguir realizar medições a 4 fios. Nesta unidade foi utilizado o módulo 34901A, que possui um multiplexador com 20 canais e é consegue ler até 60 canais por segundo. Ele possui uma junta fria de referência para termopares e a capacidade de fazer leituras de termorresistores utilizando ligações a 2 ou 4 fios.

3.2.3 Processador

O processamento foi realizado com um computador com um processador *Intel Celeron* de 2.2 Ghz e 2 GB de memória RAM, com um sistema operacional *Windows 7*. O computador foi conectado ao DAQ via USB, utilizando um software implementado em *LabVIEW*, conforme mostrado na seção 4.

3.3 Sistema de Atuação

Nesta seção será descrita a arquitetura do sistema de atuação. Na subseção 3.3.1 será descrito detalhadamente o sistema de injeção CC utilizado. Na subseção 3.3.2 será descrito detalhadamente o sistema de aquecimento por indução utilizado.

3.3.1 Sistema de Injeção CC

Baseado nos estudos das referências bibliográficas optou-se por usar uma fonte para alimentar o compressor e ao mesmo tempo injetar CC. O modelo escolhido devido a disponibilidade da mesma no laboratório foi a FCAM 150-30-15. Este modelo possibilita a variação da tensão e da frequência em uma ampla faixa, além da injeção simultânea de corrente contínua em diferentes níveis de tensão. A comunicação pode ser realizada através de uma interface RS-232, o que permite controlar remotamente a fonte e automatizar os ensaios. As especificações técnicas da fonte utilizada são mostradas na figura 20.

No entanto, notou-se que a fonte FCAM 150-30-15, utilizada na realização do sistema, não era capaz de variar a taxa de injeção CC em pleno funcionamento. Assim, ela necessita ser desligada toda vez que se deseja mudar o valor da ação de controle via alimentação elétrica, o que implica na necessidade de desligar o compressor caso seja a única fonte de alimentação empregada. Com isso, seria necessário partir o compressor novamente, toda vez que a taxa de injeção CC mudasse. Como o compressor utiliza muita corrente para partir, isto aqueceria o mesmo de forma descontrolada, dificultando o controle da temperatura.

Para solucionar este problema, foi adotada a estratégia de comutar a alimentação do compressor entre a fonte e a rede elétrica, conforme mostrado no digrama da figura

Especificações	FCAM 150-30-15
Faixa de Tensão	0 – 300V
Resolução de Tensão	0,5V
Precisão de Tensão	Medição True RMS ±0,5 V @ 25°C
Regulação de Carga	Medição True RMS: ±0,2% FS, De vazio a plena carga
Regulação de Linha	Medição True RMS: ±0,03% FS para ±10% de variação na tensão de alimentação
Tensão e Frequência Padrão	220V / 60Hz – Senoidal
Faixa de Frequência	30 – 150 Hz
Banda Passante	500 Hz
Resolução em Frequência	0,1 Hz: 30 Hz a 150 Hz
Precisão de Frequência	±0,2% do valor ajustado
Distorção Harmônica Total (DHT)	< 1 %: 30 Hz a 100 Hz < 2 %: 100 Hz a 150 Hz
Corrente Nominal de Saída	12 A @ 125V 6,8 A @ 220V
Limites de Corrente	40A de pico / 12A RMS (A proteção da corrente de pico atua instantaneamente / a proteção de corrente eficaz permite ultrapassar o limite em 100% por até 2.000ms)
Limite de Potência	1.500VA
Relé de contato seco	Relé de contato NA/NF para informar se atuou alguma proteção
Leitura de Corrente	1% do valor medido ± 2mA
Leitura de Potência	1% do valor medido ± 1W/VA
Fator de Potência	1% do valor medido ± 0,01
Proteções	Proteções de sobrecorrente, sobretensão interna, sobretemperatura e de curto-circuito
Peso	34kg
Dimensões	Gabinete Padrão 19", 5U de altura, 475mm de profundidade

Figura 20 – Especificações da fonte de alimentação FCAM 150-30-15.

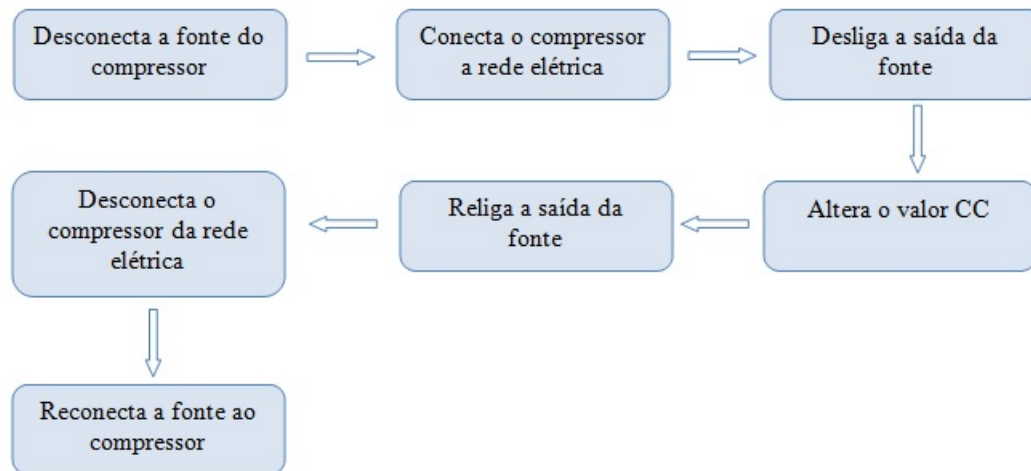


Figura 21 – Diagrama da estratégia de comutação de alimentação.

21. Conforme o diagrama, o procedimento para a mudança de nível CC é iniciado ao se desconectar a fonte de alimentação do compressor. Logo em seguida o compressor é conectado a rede elétrica. Como a fonte em questão alimenta o compressor em fase com a rede, o compressor mantém a rotação. Após, a saída da fonte é desligada e o valor da injeção CC é modificado. Em seguida, a saída da fonte é religada, permitindo que o compressor seja desconectado da rede e reconectado à fonte, que agora o alimenta com um valor diferente de injeção CC.

Para realizar a conexão e desconexão da fonte e da rede elétrica ao compressor de



Figura 22 – Ilustração da contatora utilizada.



Figura 23 – Ilustração do relé de estado sólido utilizado.

uma forma intertravada, foi utilizada uma contatora. Esta, do modelo Siemens 3TH80 22 OA, possui 4 pares de contatos, sendo 2 normalmente fechados (NC, do inglês *normally closed*) e os outros 2 normalmente abertos (NO, do inglês *normally open*). Uma imagem da contatora é mostrada na figura 22.

Esta contatora possui um intertravamento internamente implementado, o que garante que não ocorrerá um curto circuito entre as comutações. Esse intertravamento é implementado com a contatora sempre primeiramente abrindo os contatos normalmente fechados e posteriormente fechando os contatos normalmente abertos quando ela é energizada.

Como a contatora é controlada com uma tensão alternada 220 V, ela não poderia ser controlada utilizando a placa aquisição utilizada. Para tanto, foi utilizado um relé de estado sólido GEFRAM BRA4425 *zero crossing*. O relé *zero crossing* é energizado quando a tensão atinge o ponto zero e é desenergizado quando a corrente atinge o ponto zero, conforme o sinal de controle no circuito de entrada. Uma imagem do relé utilizado é mostrada na figura 23.

No entanto, a corrente fornecida pela placa de controle mostrou-se insuficiente para a ativação do relé de estado sólido em questão. Assim, para o acionamento do mesmo, foi utilizado um acoplador óptico em conjunto com uma fonte de alimentação independente de 6 V. Uma ilustração do esquema de controle em cascata utilizado para o chaveamento entre a fonte e a rede é mostrada na imagem 24 .

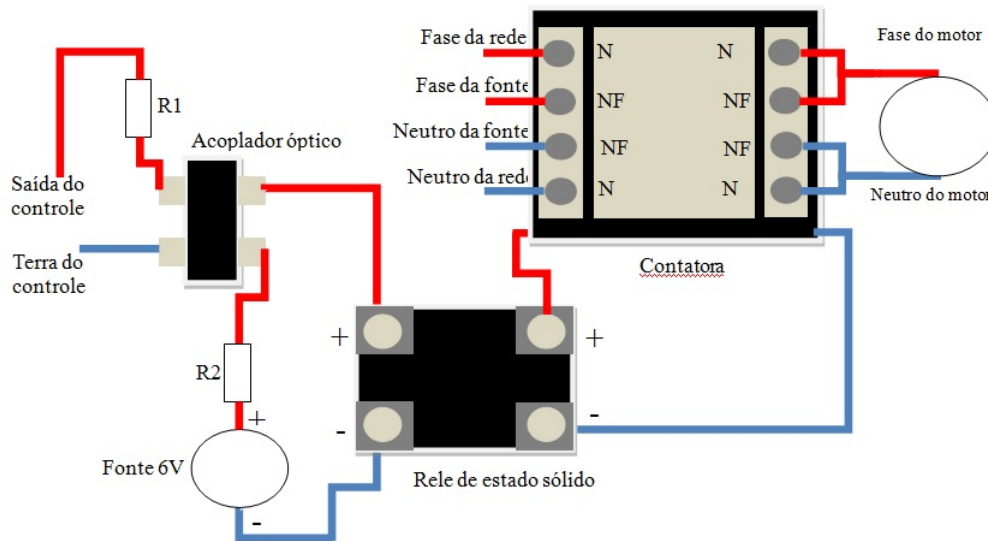


Figura 24 – Ilustração do relé de estado sólido utilizado.

3.3.2 Sistema de Aquecimento por Indução

Para o aquecimento da carcaça, será utilizado um fogão de indução que foi automatizado para este propósito. O mesmo consiste de uma bobina, um circuito de controle que determinará a potência que será entregue para a bobina utilizando um sinal PWM e um circuito de potência, responsável por alimentar a bobina de acordo com o sinal passado pelo circuito de controle. O modelo, escolhido devido à disponibilidade no laboratório, foi o *Brastemp Gourmand* Portátil. Ele é alimentado com uma tensão de 220 V e é capaz de drenar uma corrente de até 12 A. Sua potência é dividida em 6 níveis de intensidade, variando de 1 a 6, e o controle realizado através de botões capacitivos.

3.3.2.1 Análise dos Circuitos e Estratégia de Controle do Fogão de Indução

Após uma extensa análise dos circuitos que compõem o fogão de indução, e que foi considerada fora do escopo deste relatório, conclui-se que não haviam os equipamentos e materiais necessários para o realizar controle através do sinal PWM, devido à complexidade dos circuitos auxiliares a essa função e às altas potências envolvidas.

Portanto, optou-se por simular o pressionamento dos botões capacitivos presentes no fogão de indução. Para isso, foram analisados os comportamentos de diferentes pontos do circuito de controle com o auxílio de um osciloscópio. Com essa análise foi possível concluir sobre a forma de funcionamento dos botões.

Notou-se que enquanto nenhum botão está sendo pressionado, existe um valor de tensão correspondente a um nível lógico alto. Ao pressionar o botão, a tensão sobre o botão cai, para subir novamente quando o botão é solto. Esses níveis de tensão são comparados utilizando um amplificador operacional. Após mais testes, podemos concluir

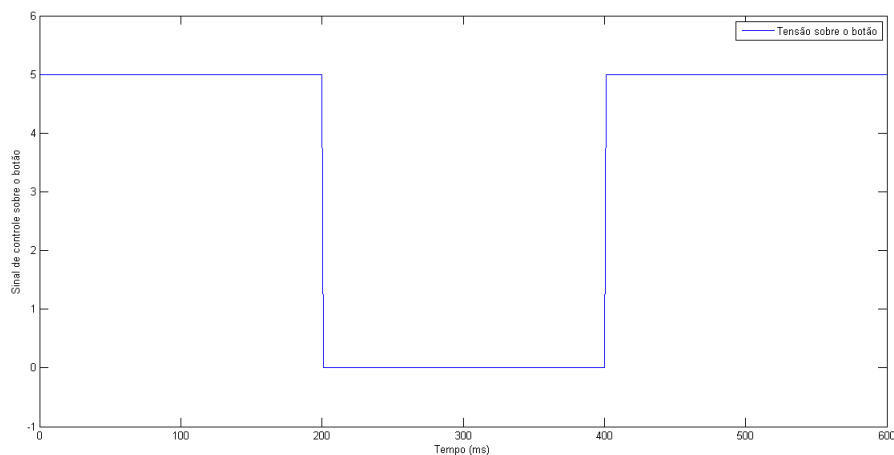


Figura 25 – Sinal de controle a ser aplicado sobre o botão para simular o seu pressionamento

que o circuito detectava um pulso de tensão negativo aplicado nos botões, com um duração de aproximadamente 200 ms, conforme ilustrado na figura 25

Foi necessário automatizar o acionamento de 4 botões para executar uma rotina de funcionamento normal do fogão. Foram automatizados o botão para ligar e desligar, o botão para iniciar o juste de potência, o botão para aumentar a potência e outro para diminuir a mesma. Para realizar o acionamento, foi utilizado um circuito auxiliar para cada botão, composto por optoacopladores e resistores.

3.3.2.2 Dispositivo de E/S Digital NI USB-6501

Para realizar o controle conforme o especificado anteriormente foi utilizando um dispositivo de entrada e saída digital, o NI USB-6501. Ele possui 24 linhas de entradas/saídas digitais programáveis individualmente, um contador de 32 bits e proteção contra sobrecorrente. Este dispositivo se comunica com o computador via USB, com uma velocidade de até 12Mbit/s.

3.3.2.3 Circuito de Isolamento Óptico

Durante os testes realizados anteriormente, foi possível observar que todos os circuitos do fogão de indução possuíam como referência um potencial de aproximadamente -110 V. Isto impossibilitou a conexão direta dos circuitos do fogão com o dispositivo de controle. Para contornar este problema e proteger a placa NI USB-6501 foi utilizado um circuito de proteção. Ele possui optoacopladores SFH 615, que desacoplam eletricamente os circuitos.

4 Implementação do Sistema

Neste capítulo será abordada a implementação do sistema, baseada na arquitetura apresentada no capítulo 3. A primeira etapa do sistema foi compreendida pelo desenvolvimento de um sistema supervisor responsável pela aquisição de dados e comunicação com os equipamentos utilizados no sistema. Na segunda etapa, o fogão indução foi automatizado. Assim que todos os elementos do sistema estavam funcionais, deu-se início a testes preliminares, que serviram de base para o desenvolvimento dos controles, tanto para o sistema de aquecimento por indução, quanto para o sistema de aquecimento via alimentação elétrica.

O objetivo dos controles é controlar a temperatura da bobina principal e a temperatura medida no meio do compressor, local onde a temperatura da carcaça é medida durante os ensaios de desempenho, segundo a norma ISO 917 [11]. O quadro 4.1 apresenta as variáveis controladas e medidas do sistema.

Quadro 4.1 – Quadro de variáveis medidas e controladas do sistema

Variáveis Controladas	Variáveis Medidas
Tensão CC da Alimentação	Temperatura da Bobina Principal
Liga/Desliga do Fogão de Indução	Temperatura da Bobina Auxiliar
Potência do Fogão de Indução	Temperatura do Topo do Compressor
	Temperatura entre o Topo e o Meio do Compr.
	Temperatura do Meio do Compressor
	Temperatura entre o Meio e o Fundo do Compr.
	Temperatura do Fundo do Compressor

Com os dois sistemas de controles prontos, foi implementado um controle que integrava ambos, resultando no sistema final de controle. Neste trabalho foi implementado um controle final específico para a bancada de ensaios de capacidade de elevação, na qual era desejado que tanto a carcaça, quanto a bobina atingissem uma mesma determinada temperatura. Após ambas as variáveis atingirem a temperatura desejada, o teste de elevação de pressão deve ser imediatamente iniciado. Em todos os testes, o compressor está operando a vazio (desconectado de um sistema de refrigeração).

Nas seções seguintes serão detalhadas as etapas da implementação do sistema de aquecimento. Na seção 4.1 será descrito o sistema supervisor criado para monitorar as variáveis do sistema de aquecimento. Na seção 4.2 será descrita a etapa de automação do fogão de indução. Na seção 4.3 serão analisados os ensaios preliminares utilizados para a definição do sistema de controle. Na seção 4.4 será detalhado o sistema de controle de temperatura da carcaça do compressor. Na seção 4.5 será detalhado o sistema de

controle de temperatura da bobina do compressor. Na seção 4.6 será detalhado o sistema de controle de temperatura para a bancada de elevação de pressão, que integra os dois controles descritos anteriormente.

4.1 Sistema Supervisório

O sistema supervisório foi implementado utilizando a plataforma de desenvolvimento *LabVIEW*. Através do sistema supervisório é possível realizar a aquisição e visualização das temperaturas, se comunicar com a fonte e com isso ajustar valores de tensão e frequência, ligar/desligar a saída, verificar a atuação das diversas proteções, realizar a leitura da corrente de saída, ou seja, fazer todo o controle e supervisão da fonte. Neste sistema também é possível acionar o fogão de indução. Posteriormente, os controles também foram incluídos nesse sistema.

4.2 Automação do Fogão de Indução

O primeiro passo para a implementação efetiva do sistema de aquecimento foi a automação do fogão de indução. Ela foi feita utilizando a estratégia definida a partir das análises dos circuitos que compõem o fogão, realizadas anteriormente e omitidas neste documento, por fugirem do escopo deste relatório. O acionamento dos botões foi realizado utilizando uma ação de controle conforme mostrado na Figura 25. O sistema de controle que automatiza o acionamento do fogão foi implementado utilizando o programa *LabVIEW*, utilizando programação orientada a eventos. O fogão liga ao receber um comando do usuário (ou, posteriormente, do sistema de controle). Ao ligar, por padrão, o fogão sempre inicia o seu funcionamento no nível de potência 5. Em seguida, o sistema identifica qual o valor da referência de potência e segue esse valor, conforme a lógica apresentada no diagrama da Figura 26. Ele se mantém ligado até receber um comando para desligar.

4.3 Ensaios Preliminares para a Definição do Sistema de Controle

Foram realizados testes preliminares com a fonte de alimentação e o fogão de indução para inferir sobre os efeitos dos controles nas variáveis medidas. Os controles foram utilizados de maneira isolada, para permitirem analisar a influência de cada um nas temperaturas das diferentes partes do compressor.

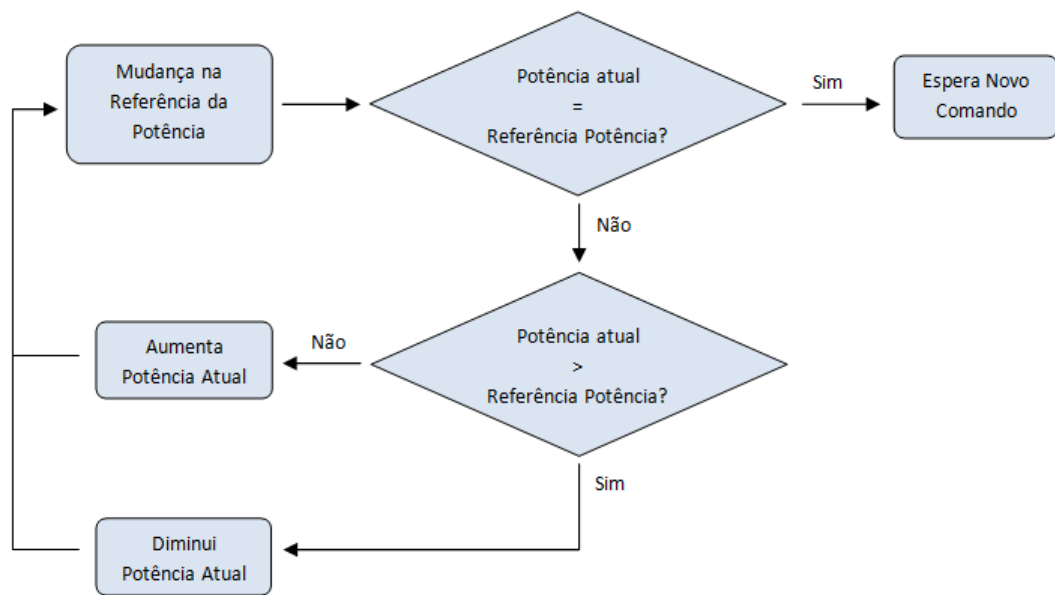


Figura 26 – Diagrama da lógica do controle de potência do fogão de indução.

4.3.1 Aquecimento Via Controle de Alimentação Elétrica

O primeiro teste foi realizado utilizando um degrau de 15 V (CC) somado a alimentação usual (220 V CA) na bobina principal, aproximadamente no instante 05:23:00 do teste. Os gráficos das temperaturas da carcaça e das temperaturas das bobinas são mostrados nas figuras 27 e 28 .

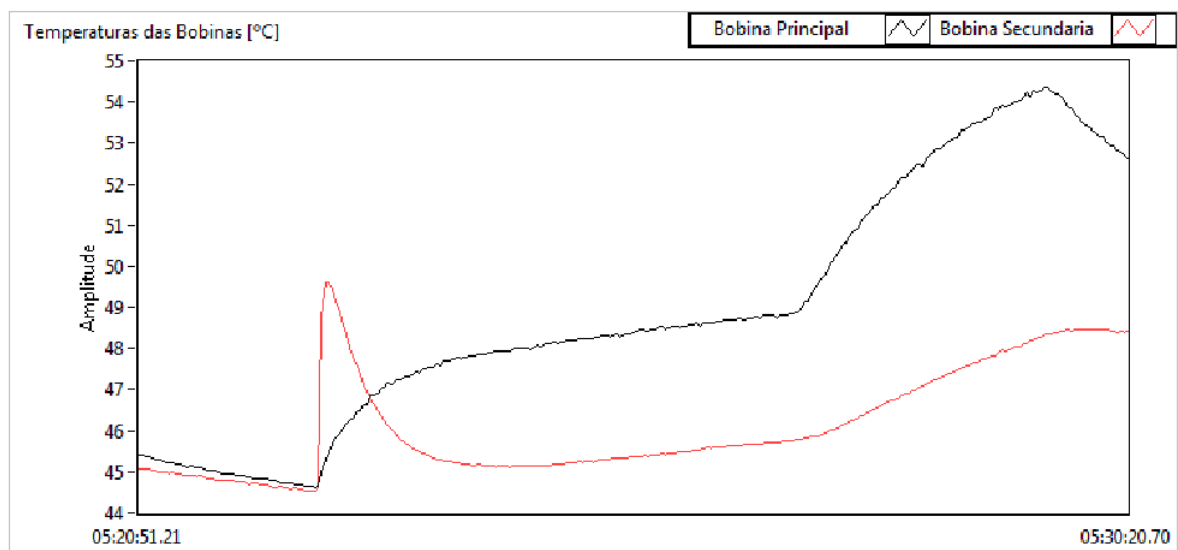


Figura 27 – Gráfico das temperaturas das bobinas, para um degrau CC na alimentação.

Pode-se observar a partir do gráfico da figura 27 que é dada a partida no compressor no primeiro pico de temperatura da bobina auxiliar. É possível observar que a bobina

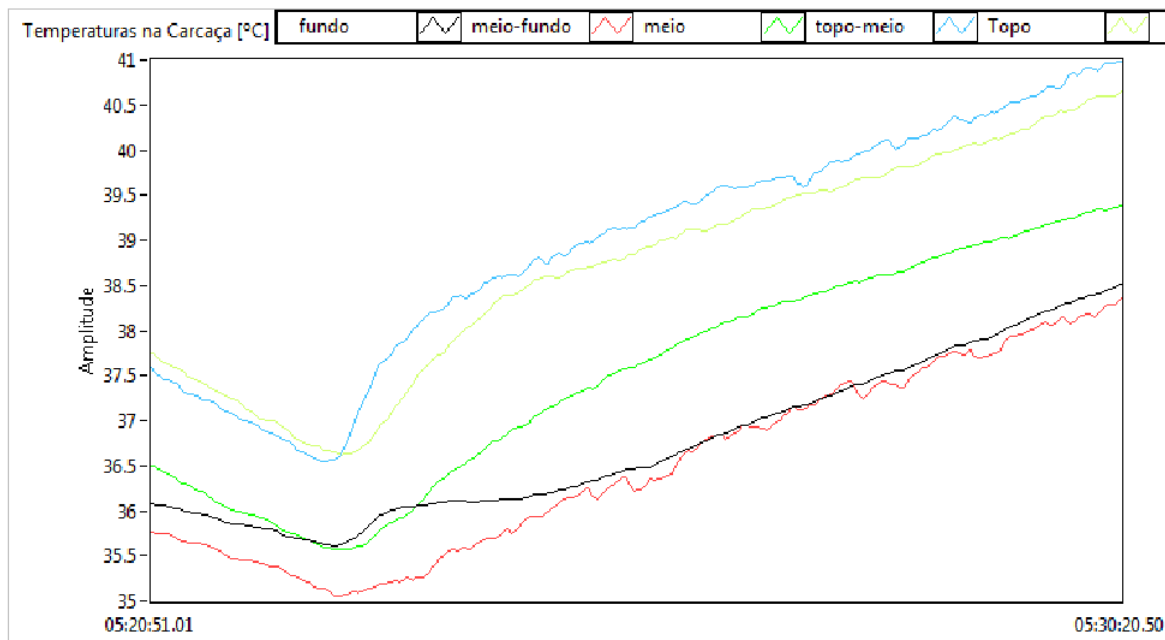


Figura 28 – Gráfico das temperaturas da carcaça, para um degrau CC na alimentação

principal é aquecida rapidamente pela dissipação de calor da bobina auxiliar até certo patamar após a partida, a partir do qual, ela é aquecida lentamente, de maneira quase linear pela sua própria corrente de alimentação. Aproximadamente no instante 05:23:00 é dado um degrau de 15 V (CC). Nesse momento a inclinação da curva de aquecimento aumenta, até o instante do pico, quando o degrau CC é retirado e o compressor é novamente alimentado somente com a tensão nominal de 220 V (CA). Neste momento as bobinas começam a diminuir sua temperatura.

Também é possível observar a partir do gráfico da figura 28 que a inclinação da curva de aquecimento da carcaça não muda consideravelmente após a adição da componente CC, o que demonstra o baixo acoplamento entre esta variável de controle e as temperaturas medidas na carcaça.

4.3.2 Aquecimento via Indução Eletromagnética

Outro teste foi realizado, utilizando um degrau de potência mínima no fogão de indução, aproximadamente no instante 05:45:25 do teste, com o compressor em funcionamento.

Novamente, é possível observar a partir do gráfico da figura 29 que é dada a partida no compressor no primeiro pico de temperatura da bobina auxiliar. Aproximadamente no instante 05:45:25 é dado um degrau de potência mínima no fogão de indução. Neste momento a inclinação da curva de aquecimento aumenta, porém de forma pouco acentuada, mesmo após o fogão de indução ser desligado. Com isso é possível perceber que existe

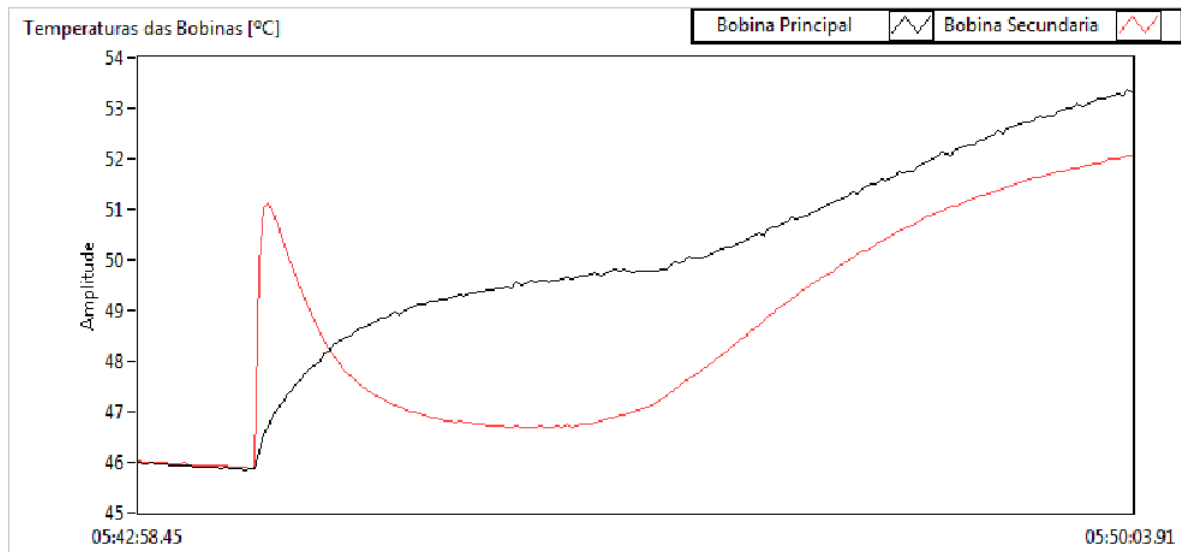


Figura 29 – Gráfico das temperaturas das bobinas, para um degrau no fogão de indução.

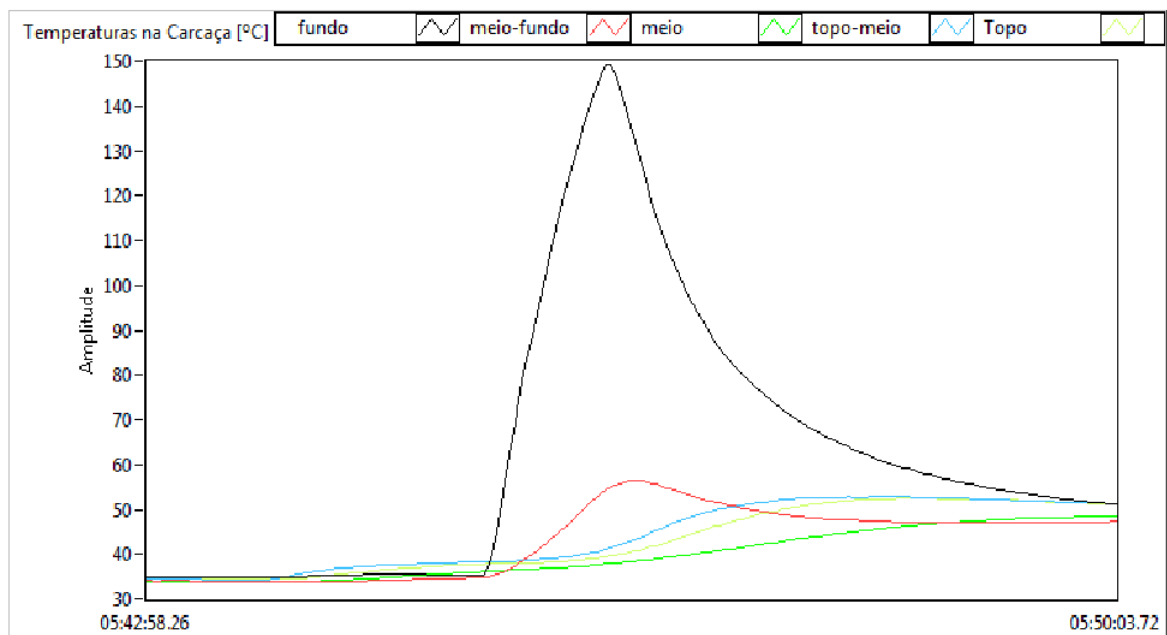


Figura 30 – Gráfico das temperaturas da carcaça, para um degrau no fogão de indução.

um acoplamento relativamente baixo entre o aquecimento gerado pelo fogão de indução e a temperatura da bobina. Também é possível observar a partir do gráfico da figura 30 que existe uma inclinação acentuada nas curvas de aquecimento dos pontos da carcaça, especialmente no localizado no fundo da mesma. Quando a temperatura do fundo atinge 150°C, temperatura considerada como o limite máximo neste trabalho para manter a integridade do compressor, o fogão é desligado e após alguns minutos as temperaturas do corpo convergem para a uniformidade.

Conforme mencionado anteriormente, um fogão de indução será utilizado para

o aquecimento da carcaça. A figura 31 , mostrada abaixo, apresenta o ensaio gravado com uma câmera térmica, com o intuito de analisar a distribuição térmica no compressor durante o aquecimento.

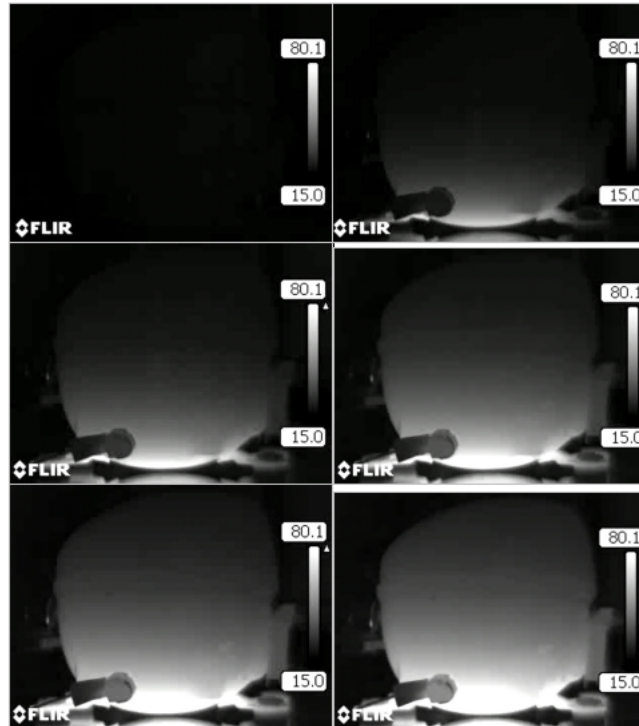


Figura 31 – Distribuição térmica no compressor desligado ao ser aquecido com o fogão de indução, no primeiro quadro, antes de ligar o aquecimento e a cada minuto nos quadros seguintes, até o quinto minuto de ensaio.

Devido a seu princípio de funcionamento e a sua forma de construção, o fogão de indução aquece principalmente o fundo do compressor. Assim o resto do corpo e interior do compressor são aquecidos apenas por condução, o que resultaria em um aquecimento muito lento do compressor como um todo. Sabendo que o óleo que lubrifica e resfria o compressor fica acumulado no fundo do mesmo, foi estudada a estratégia de utilizar o fogão de indução com o compressor em funcionamento, utilizando a circulação do óleo pelo compressor para um aquecimento eficiente e uniforme. A figura 32, mostrada abaixo, apresenta o ensaio gravado com uma câmera térmica, com o intuito de analisar a distribuição térmica no compressor durante o aquecimento com o compressor funcionando.

Conforme mostrado na figura 32, o aquecimento de fato foi mais uniforme e eficiente com o compressor em funcionamento. A partir dessas análises, decidiu-se por realizar o aquecimento com o compressor em funcionamento.

4.3.3 Considerações Sobre o Sistema

Foram realizados outros testes, similares aos apresentados nas seções 4.3.1 e 4.3.2, porém com diferentes valores de atuação, com o objetivo de analisar melhor o sistema. A

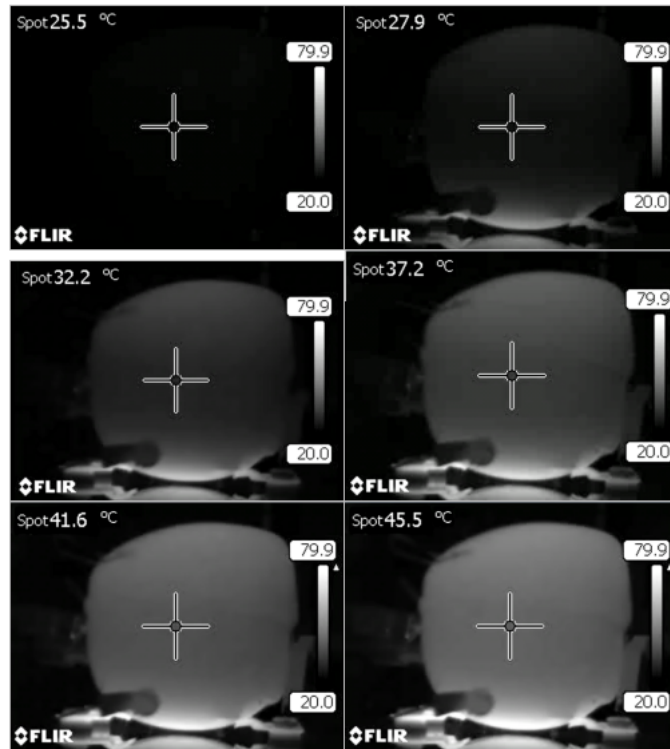


Figura 32 – Distribuição térmica no compressor em funcionamento ao ser aquecido com o fogão de indução, no primeiro quadro, antes de ligar o aquecimento e a cada minuto nos quadros seguintes, até o quinto minuto de ensaio.

partir dos testes preliminares realizados pode-se observar que o sistema é multivariável e não linear. Devido ao acoplamento relativamente pequeno entre a temperatura da bobina e da carcaça, proporcionado pela camada de ar no interior do compressor e que isola uma variável da outra, optou-se por controlar cada uma das variáveis de forma independente. Conforme a necessidade, posteriormente, pode ser considerado o uso de controladores de pré-alimentação (*Feedforward* para desacoplar ainda mais as variáveis e, assim, melhorar a resposta do sistema.

4.4 Controle de Temperatura da Carcaça

O objetivo deste subsistema é controlar a temperatura medida no meio do compressor utilizando o fogão de indução.

Com os resultados obtidos nos testes preliminares foi possível observar que, mesmo utilizando um degrau com o fogão de indução na menor potência possível, se o degrau fosse aplicado por tempo suficiente, a temperatura do fundo passaria do limite estabelecido de 150°C, o que poderia danificar alguma parte do compressor. Pela impossibilidade de manter o fogão ligado indefinidamente ao longo do tempo de aquecimento, optou-se por utilizar uma estrutura de controle em cascata. Na malha externa, a variável de processo

é a temperatura do meio do compressor, que é a temperatura que realmente se deseja controlar e a temperatura do fundo da carcaça é a ação de controle utilizada. Na malha interna, foi implementada uma estratégia de controle de ação Liga-Desliga com histerese, tendo a temperatura do fundo do compressor como variável de processo e a ação de ligar e desligar, em conjunto com a potência, como variáveis de controle.

As duas malhas de controle com suas respectivas variáveis de controle e processo são mostradas na Figura 33.

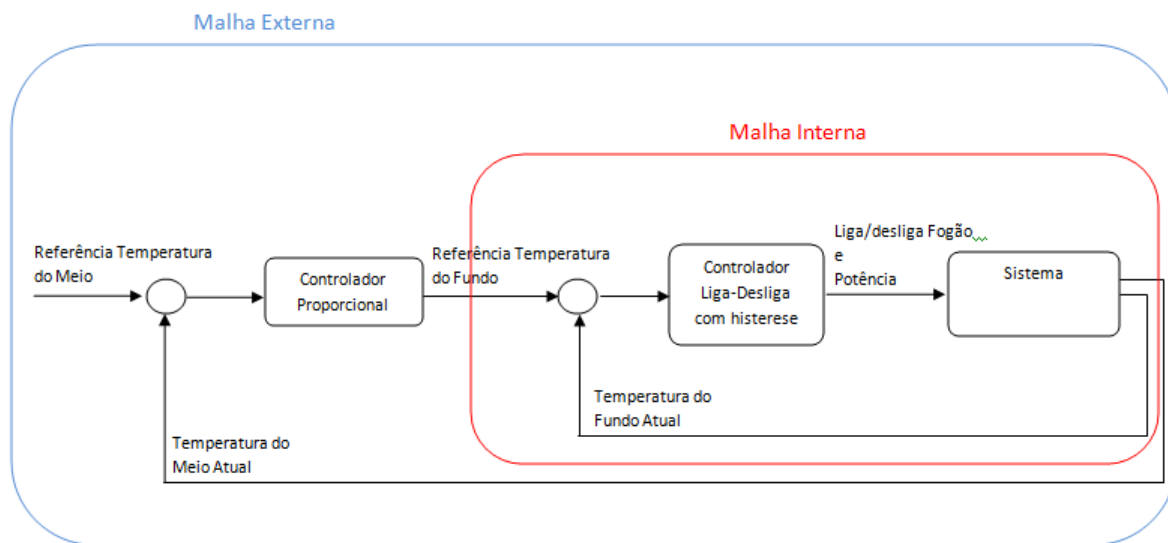


Figura 33 – Ilustração do sistema composto pelas duas malhas controle, variáveis de controle e de processo.

4.4.1 Malha de Controle Interna

Esta malha é responsável por manter a temperatura do fundo da carcaça em torno de um valor definido. Este controle foi implementado utilizando o programa *LabVIEW*, utilizando um laço de controle conforme a lógica do diagrama da Figura 34.

O controle possui duas etapas, uma de aquecimento e outra de resfriamento. O controle sempre é iniciado em uma etapa de resfriamento, quando o fogão está desligado. O controle implementado na malha interna ainda adapta a potência aplicada nos próximos ciclos de aquecimento de acordo com o tempo decorrido no ciclo de aquecimento anterior.

Conforme o diagrama, ao iniciar o controle, primeiramente ele lê o valor da referência para a temperatura de fundo. Após, ele confere se está em uma etapa de aquecimento ou resfriamento. Se estiver em uma etapa de resfriamento, ele analisa o valor da temperatura de fundo. Se este valor for menor que a referência, subtraindo o valor da histerese, ele guarda o tempo de execução daquele instante, liga o fogão de indução e passa para uma etapa de aquecimento. Se o valor for maior que a referência, subtraindo o valor da histerese,

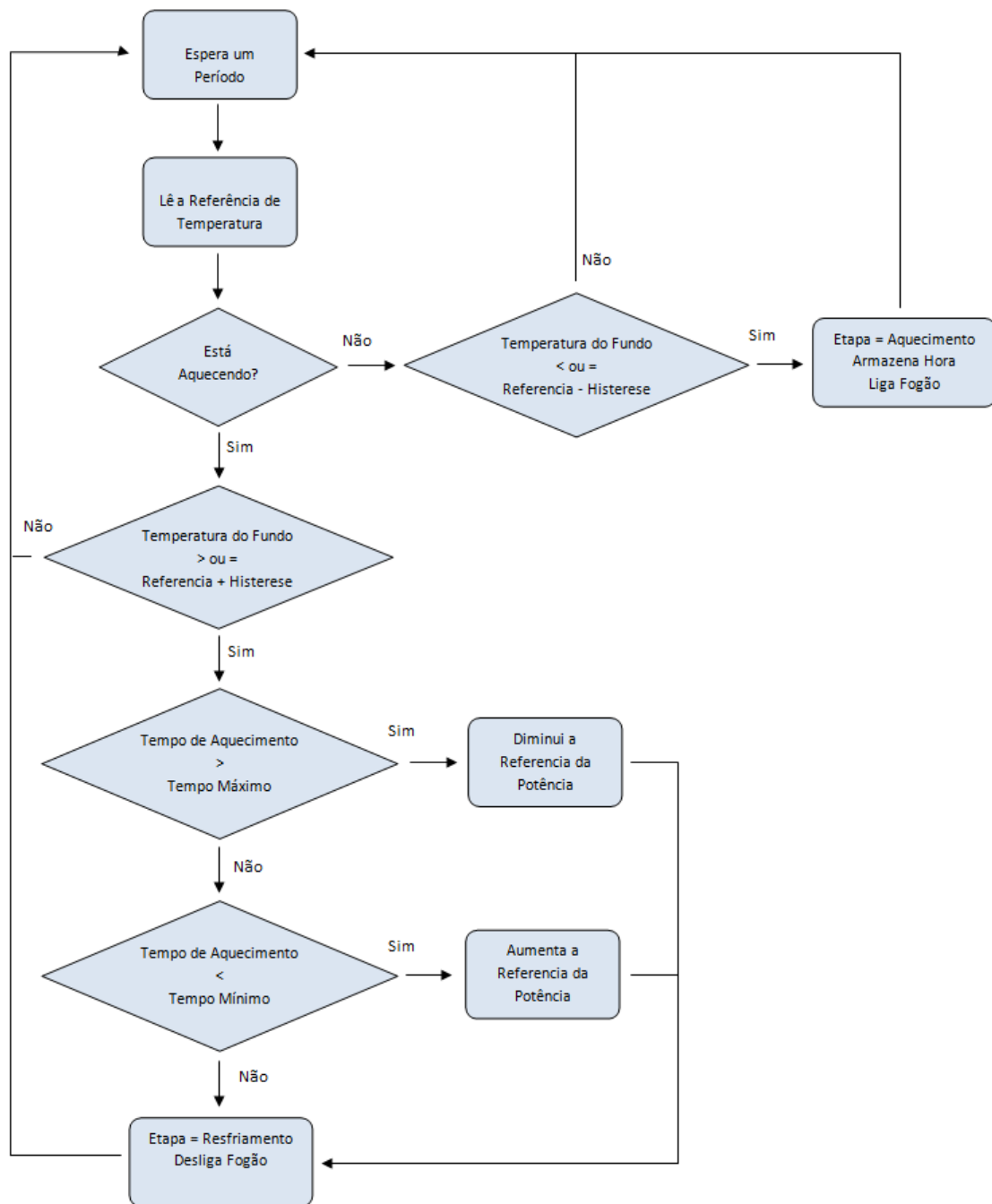


Figura 34 – Diagrama da lógica de implementação do controle Liga-Desliga com histerese.

ele continua em uma etapa de resfriamento. De outra forma, se o controle estiver em uma etapa de aquecimento, ele novamente analisa o valor da temperatura de fundo. Porém desta vez, se este valor for maior que a referência, somando o valor da histerese, ele analisa o tempo de execução desta última etapa de aquecimento. Se o tempo for menor que o mínimo definido para o aquecimento, ele diminui a potência para o próximo ciclo de aquecimento, se possível, senão apenas mantém a potência atual. Se o tempo for maior que o tempo máximo definido para o aquecimento, ele tenta diminuir a potência para o

próximo ciclo. Em ambos os casos, após essa análise, o controle desliga o fogão de indução e passa para uma fase de resfriamento. Se o valor da temperatura de fundo for menor que a referência, somando o valor da histerese, ele continua em uma etapa de aquecimento.

A partir do controle implementado, foi determinado empiricamente que o valor adotado para a histerese seria de 5°C, que o tempo mínimo para uma etapa de aquecimento seria de 15 segundos e que o tempo máximo seria de 60 segundos.

Um resultado de um teste utilizando o controle implementado, com uma referência para a temperatura do fundo de 100°C é mostrado na Figura 35.

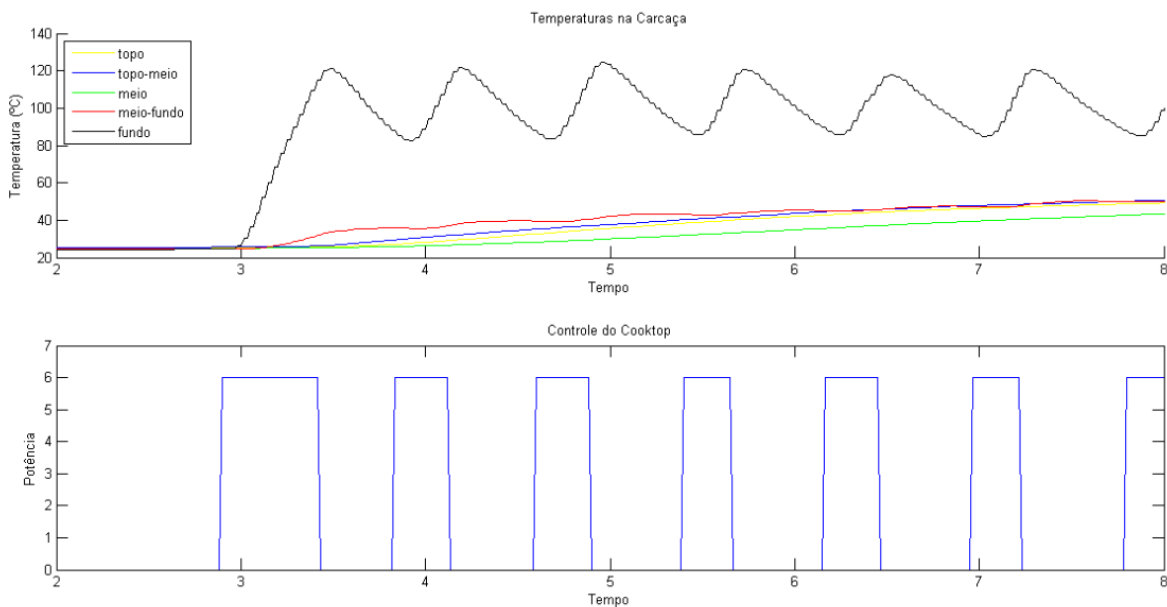


Figura 35 – Teste do controle liga-desliga com histerese.

A partir da Figura 35 pode-se observar que o valor da temperatura de fundo varia em torno de 10°C ao invés dos 5°C estabelecidos para a histerese. Isso se deve ao atraso no acionamento, que é de aproximadamente 9 segundos, dependendo do nível definido para a potência.

4.4.2 Malha de Controle Externa

Esta malha é responsável por calcular a temperatura do fundo da carcaça do compressor necessária para manter a temperatura medida no meio do mesmo em torno de um valor definido. Para tanto, foram utilizados os dados do teste mostrado na figura 35 para determinar a função de transferência da temperatura de fundo para a temperatura medida no meio do compressor. Com isso, foi obtido o modelo da equação (4.1), considerando o tempo em segundos:

$$H(s) = \frac{0,0008455 e^{-54}}{s} \quad (4.1)$$

Note que o sistema possui um atraso de 54 segundos. Uma comparação entre as respostas do modelo obtido e do modelo real é mostrada na figura 36.

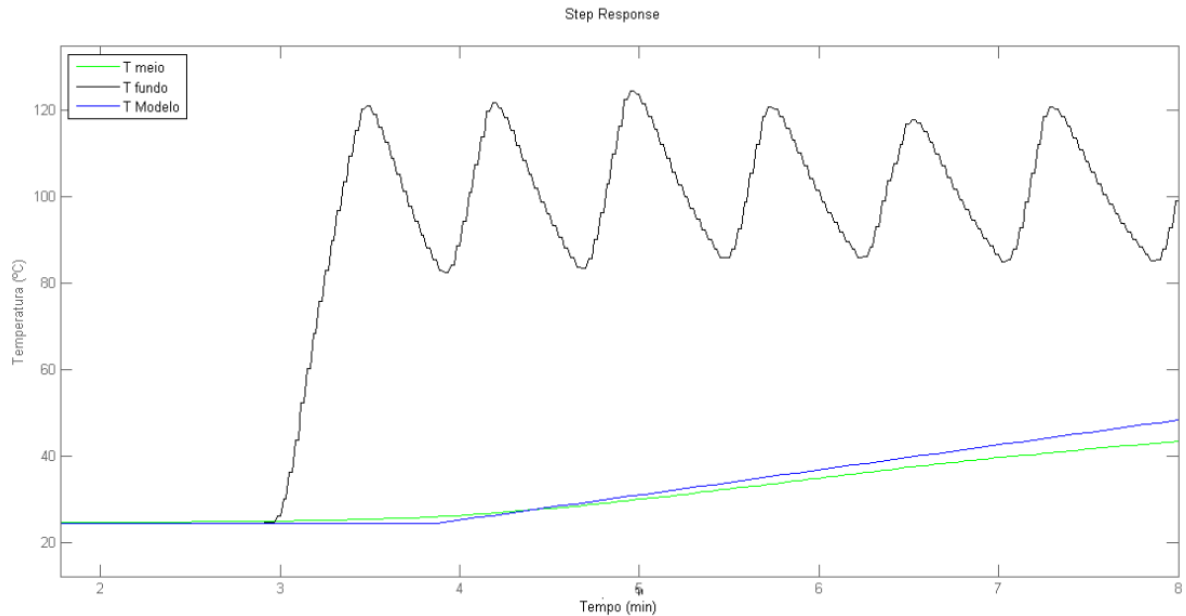


Figura 36 – Comparação entre as resposta do modelo obtido e do modelo real.

Com a comparação, foi possível concluir que o modelo é suficientemente próximo do real. A partir do modelo obtido, sendo o sistema representado por um integrador com um ganho, foi decidido utilizar apenas um controlador do tipo proporcional. Esse controlador foi calculado utilizando o método de lugar das raízes, de forma que o tempo de assentamento do sistema seja menor que 5 minutos. O controlador proporcional obtido foi :

$$K_c = 7,9 \quad (4.2)$$

Devido às características não lineares do sistema, ao controle liga-desliga implementado na malha interna e ao requisito de que as temperaturas estejam uniformes, o que para este projeto foi assumido como nenhuma temperatura estar a mais de 10°C distante da temperatura de referência, foi utilizada uma estratégia onde o compressor é aquecido até uma temperatura maior que a referência. Esse valor é chamado neste trabalho de margem. Depois, é esperado o mesmo resfriar até a temperatura desejada, de forma que, no decorrer deste tempo, as temperaturas da carcaça se acomodem e o aquecimento seja mais uniforme. Assim, a temperatura que o controlador usará como referência será a temperatura de referência escolhida pelo operador do sistema somada a uma margem, também escolhida pelo operador.

A condição de parada para o controle, por sua vez, será a temperatura do meio do compressor atingir o valor da referência escolhida somado a uma tolerância, ambas definidas pelo operador do sistema.

Assim, utilizando essa estratégia, o controle proporcional foi implementado utilizando o programa *LabVIEW*, conforme o diagrama mostrado na Figura 37.

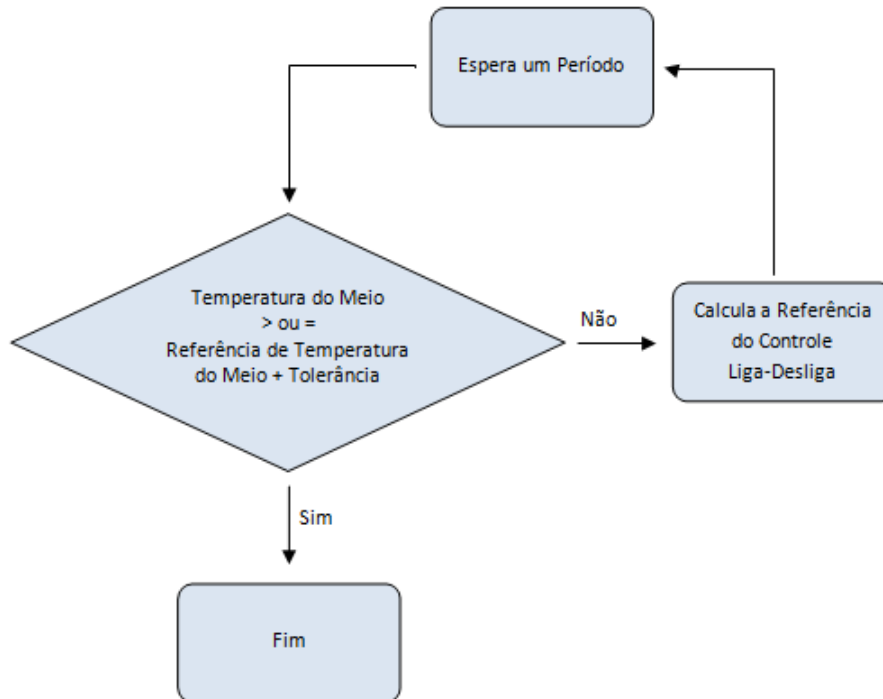


Figura 37 – Diagrama do controle proporcional que define a temperatura do fundo, referência para o controle Liga-Desliga.

O cálculo do controle é feito conforme a equação (4.2)

$$R_{Tf} = R_{Tm} + (R_{Tm} + M - T_m)K_p \quad (4.3)$$

Onde:

- R_{Tf} É referência para o controle liga-desliga (temperatura do fundo) [°C]
- R_{Tm} É referência para a temperatura do meio do compressor [°C]
- M É a margem usada no aquecimento [°C]
- T_m É a temperatura do meio do compressor [°C]

Note no diagrama da figura 37 que a condição de parada para o controle é que a temperatura do meio do compressor esteja maior que a temperatura da referência somada a uma tolerância previamente estabelecida. O cálculo do controle, por sua vez, é feito utilizando o valor da referência somado a uma margem.

4.5 Controle de Temperatura da Bobina

O objetivo deste subsistema é controlar a temperatura medida na bobina principal. O controle da temperatura da bobina será realizado utilizando a fonte de alimentação disponível para o projeto, conforme o esquema mostrado no capítulo 3. Devido a essa arquitetura e ao tempo de troca de mensagens entre o computador e a fonte, existe um atraso de aproximadamente 6 segundos no sistema de atuação.

Como a cada troca de valor de injeção CC a fonte tem que ser desconectada do compressor, durante o período de troca não existe uma tensão CC sobre o compressor. Isso faz a temperatura da bobina principal parar de subir, ou mesmo diminuir durante esse período.

Devido a essas características do sistema de atuação, optou-se por utilizar uma estratégia simples de controle para a temperatura da bobina principal.

Nessa estratégia, o sistema compara a temperatura atual da bobina principal com a temperatura definida como referência. Se a diferença entre elas for menor que uma diferença mínima definida pelo usuário do sistema, ela diminui o valor da tensão CC e a mantém por um período definido, se o novo valor estiver dentro dos limites permitidos pela fonte. Senão, se a diferença entre elas for maior que uma diferença máxima definida, ela aumenta o valor da tensão CC e a mantém por um período definido, se o novo valor estiver dentro dos limites permitidos pela fonte.

Desta forma, o sistema sempre tenta manter a temperatura da bobina principal em um intervalo [Referência - Diferença Máxima, Referência - Diferença Mínima]. As diferenças utilizadas neste trabalho foram [15,10] e o período de aplicação do sinal foi de 20 segundos, um tempo ao menos 3 vezes maior que o tempo que a fonte fica desconectada ao trocar o valor CC. Um diagrama da estratégia utilizada é mostrado na Figura 38.

4.6 Controle Para a Bancada de Ensaio de Capacidade de Elevação

O controle proposto neste trabalho tem como objetivo primário ser acoplado à bancada ensaio de capacidade de elevação. Para esta bancada, a especificação para o controle é que tanto a bobina quanto a carcaça do compressor atinjam uma mesma temperatura, para poder comparar com os resultados obtidos ao aquecer os compressores em um forno (onde o compressor é aquecido de maneira uniforme).

A estratégia adotada para o controle de temperatura nesta bancada é, esperar o sistema de aquecimento da carcaça aquecer a carcaça até uma temperatura igual a referência somada a uma tolerância, para então, aquecer a bobina o mais rápido possível

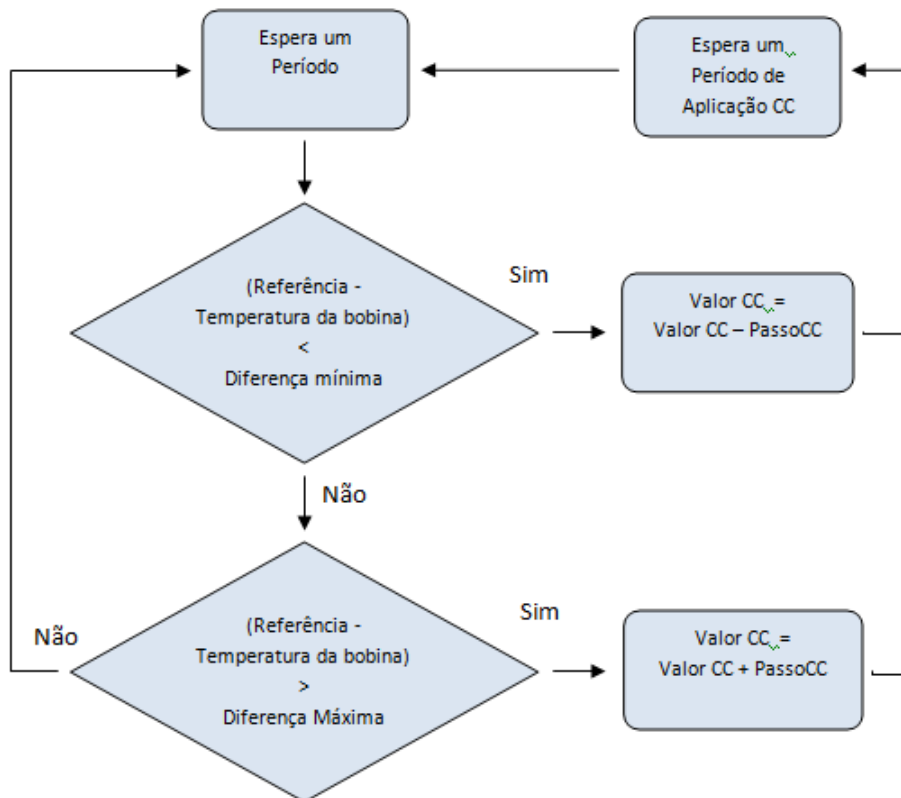


Figura 38 – Diagrama da estratégia de controle para a temperatura da bobina principal.

(etapa chamada de aquecimento super rápido), de forma a deixar ambas as variáveis na mesma temperatura para o ensaio de capacidade de elevação de pressão. Um diagrama da estratégia utilizada é mostrado na Figura 39.

Para atingir esse objetivo, o sistema analisa se a diferença entre a referência para a temperatura do compressor e o valor da temperatura do meio do compressor é menor do que a tolerância estabelecida. Se for, ele analisa se o controle da temperatura da carcaça do compressor ainda está atuando. Se ele estiver, o sistema espera um período e volta a analisar as temperaturas. Se ele não estiver mais atuando, significa que o meio do compressor atingiu a temperatura desejada. Neste momento é iniciado o aquecimento super rápido da bobina.

Na etapa de aquecimento rápido, o sistema testa se a diferença entre a temperatura da bobina e a referência é menor que a tolerância. Quando isso ocorrer, ela define o valor da tensão CC como o máximo valor definido pelo usuário até que a bobina principal atinja a temperatura esperada. Quando isso ocorrer, ela zera a tensão CC e o ciclo de aquecimento está terminado. Um diagrama da estratégia utilizada é mostrado na Figura 40.

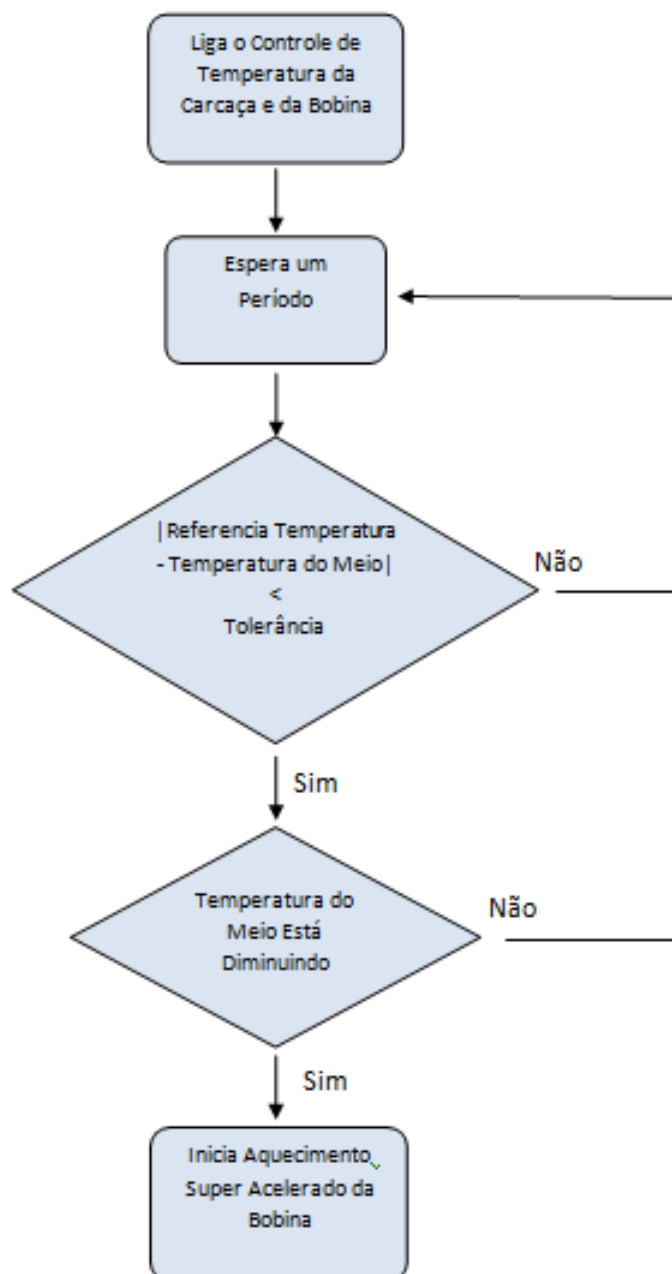


Figura 39 – Diagrama do controle para a bancada de ensaio de elevação de capacidade de elevação.

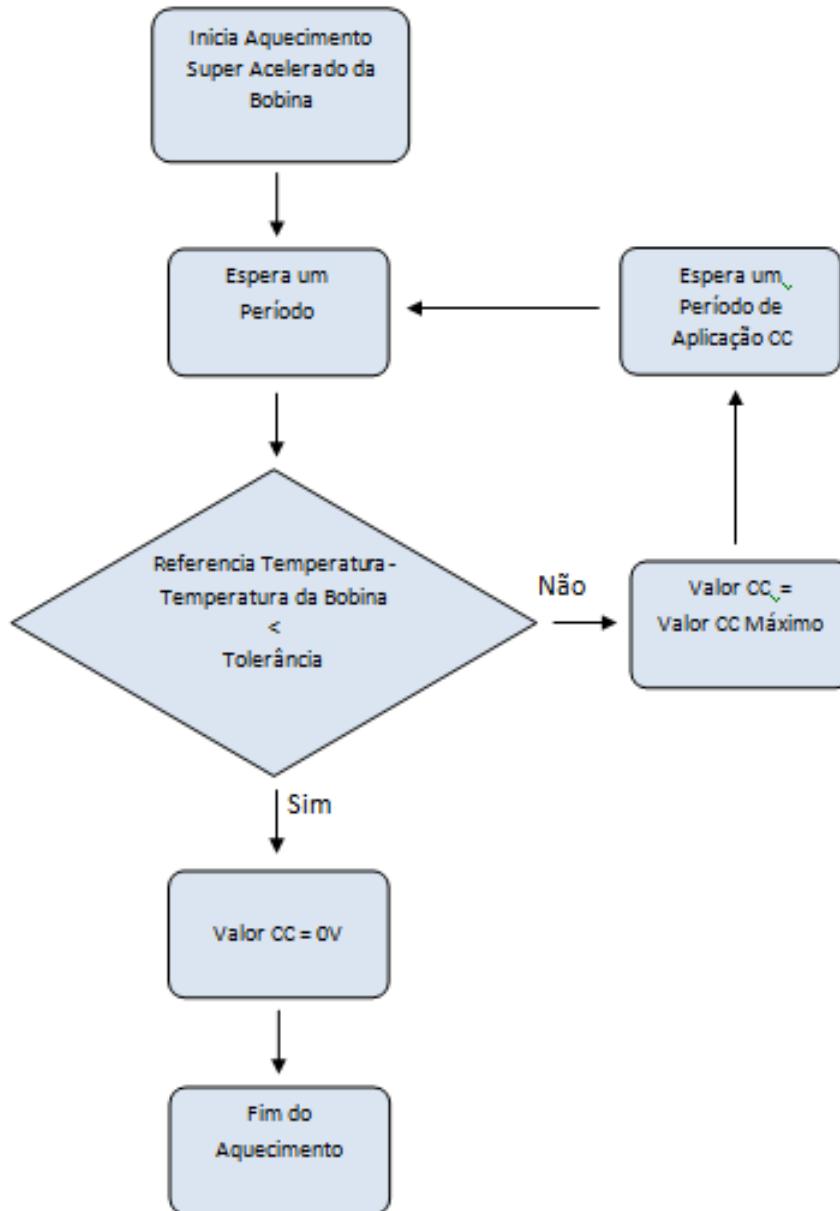


Figura 40 – Diagrama da etapa de aquecimento super rápido da bobina.

5 Avaliação do Sistema e Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos controles implementados conforme o conteúdo apresentado no capítulo 4.

Todos os testes foram realizados utilizando os seguinte parâmetros de controle:

- $R_{T_m} = 60^\circ\text{C}$ temperatura de referencia escolhida;
- $M = 3.5^\circ\text{C}$ a margem definida;
- $\epsilon = 1^\circ\text{C}$ tolerância do controle;
- $\Delta = 5^\circ\text{C}$ a histerese do controle;

Além desses parâmetros, o tempo mínimo para uma etapa de aquecimento foi definido como 15 segundos, o tempo máximo para uma etapa de aquecimento como 60 segundos, passo do controle da injeção CC como 5 V e os limites de injeção CC como $[0, 40]$ V.

Primeiramente foi realizado um teste utilizando somente o controle de temperatura da carcaça. O resultado do teste é mostrado na Figura 43.

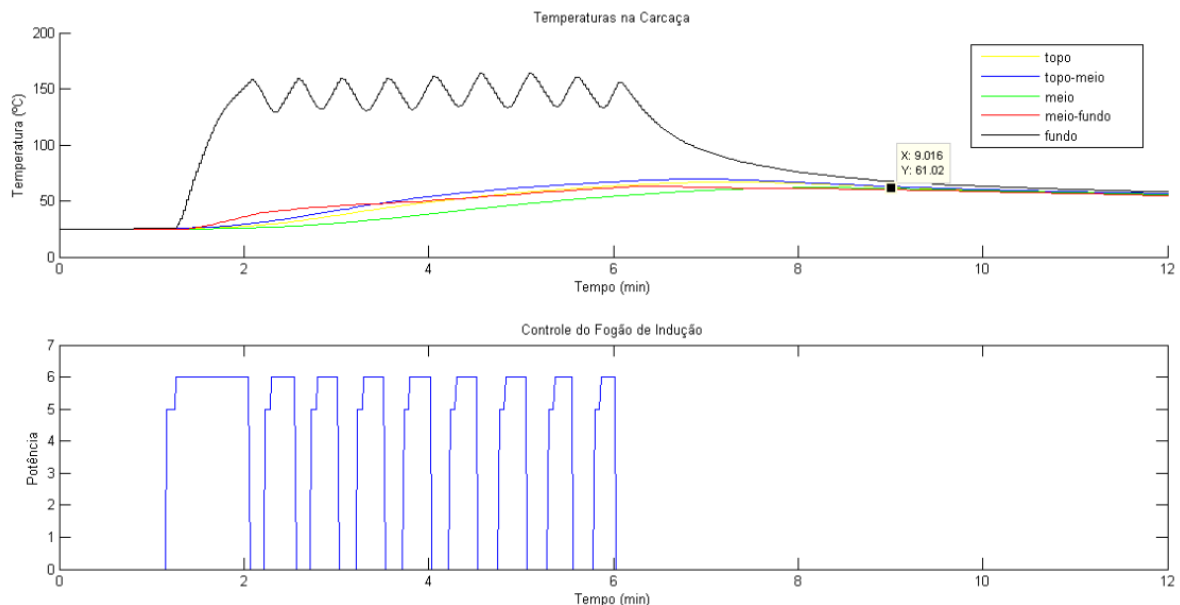


Figura 41 – Gráfico do teste final do controle da carcaça, com uma referência de temperatura da carcaça de 60°C

Neste teste pode ser observado que o sistema alcança a temperatura desejada em 9,02 minutos. O controle teve início aos 1,15 min, assim o tempo de resposta de

assentamento foi de aproximadamente 8 min. Este tempo, embora maior que o esperado pelo controle projetado, que é de 5 min, ainda é muito menor que o tempo de aquecimento em operação normal do compressor, que pode chegar a mais de 3 horas. O sobressinal da resposta foi de apenas $0,82^{\circ}\text{C}$, abaixo da margem estabelecida de $3,5^{\circ}\text{C}$. Assim, o sistema de controle para a temperatura da carcaça, quando utilizado de maneira isolada, foi considerado satisfatório para este projeto, visto que conseguiu aquecer a carcaça do compressor em menos de 10 minutos.

O segundo teste realizado utilizou somente o controle de temperatura da bobina. O resultado do teste é mostrado na Figura 43. Neste teste pode ser observado que o o sistema

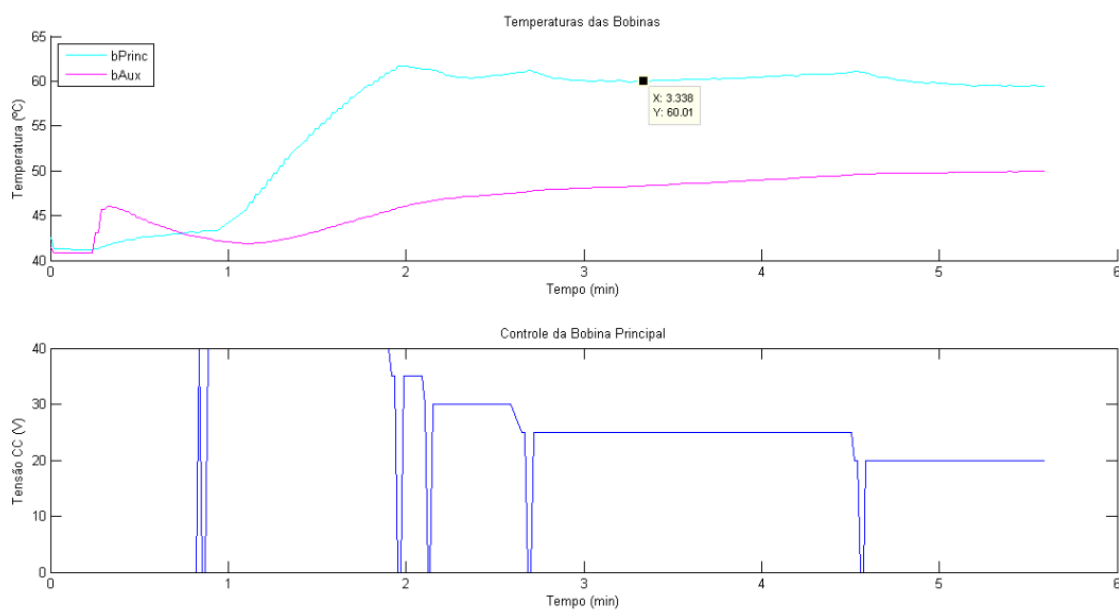


Figura 42 – Gráfico do teste final do controle da temperatura da bobina, com uma referência de temperatura da bobina de 60°C

alcança a temperatura desejada em 1,82 minutos. O controle teve início aos 0,82min, assim o tempo de assentamento do sistema foi de aproximadamente 1 min. Nota-se que o tempo que assentamento do sistema de controle de temperatura da carcaça é muito maior que para o controle da bobina. O valor da temperatura, após atingir o valor desejado, variou apenas $0,65^{\circ}\text{C}$ acima da tolerância. Este resultado mostra que o sistema de controle da temperatura da bobina quando utilizado isoladamente é considerado satisfatório.

Por fim, o controle específico para a bancada de ensaios de elevação de pressão foi testado, utilizando em conjunto o sistema de controle de temperatura da carcaça e da bobina. O resultado do teste para as temperaturas da carcaça é mostrado na Figura 43.

Novamente o sistema atende aos requisitos em relação a temperatura da carcaça. Neste teste o meio da carcaça atinge temperatura desejada em 10 min. O sobressinal da resposta novamente foi de apenas $0,82^{\circ}\text{C}$, abaixo da margem estabelecida de $3,5^{\circ}\text{C}$.

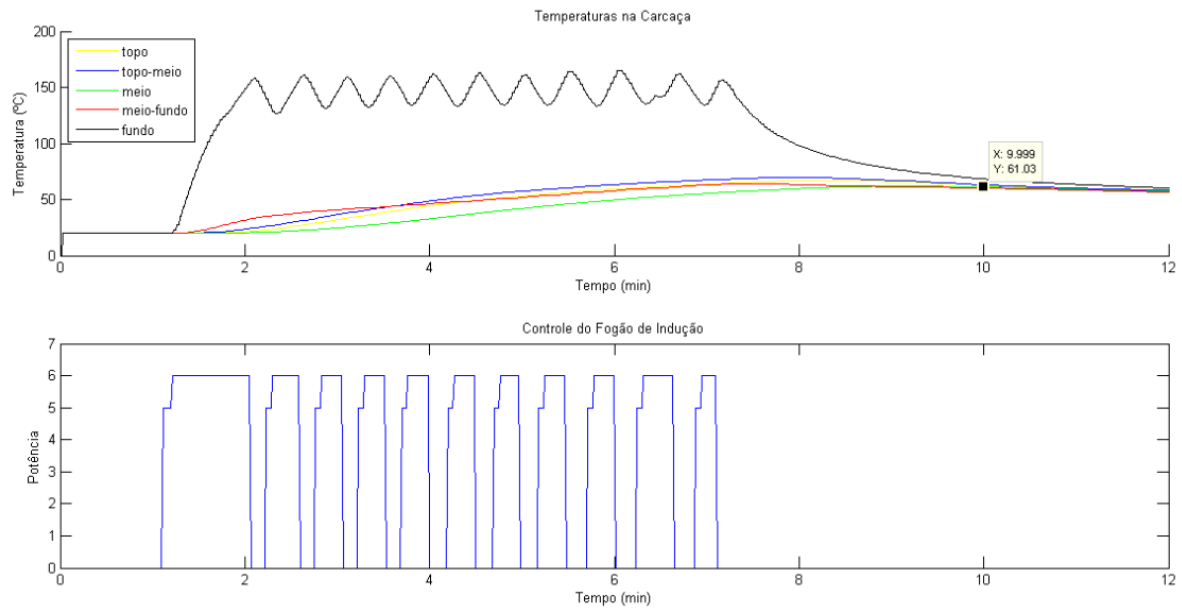


Figura 43 – Gráfico das temperaturas da carcaça, utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C

Na Figura 44 são mostradas simultaneamente a temperatura de fundo e sua referência. Note que a referência se mantém saturada em 150°C durante boa parte do teste. As temperaturas são próximas durante todo o tempo em que o controle de temperatura da carcaça está funcionando, só se distanciando no momento em que o controle de temperatura da carcaça é desligado, após 8,45 minutos do início do teste. A Figura 45 mostra a evolução

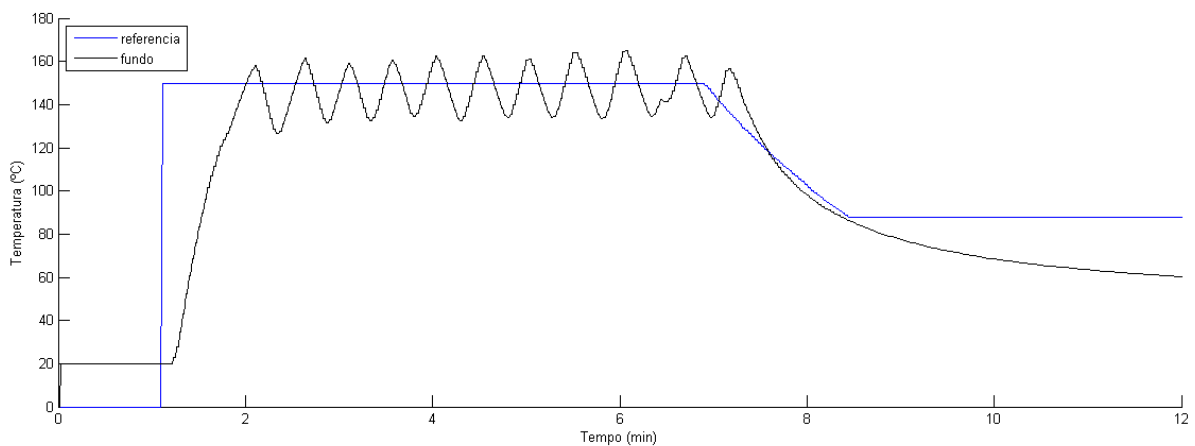


Figura 44 – Gráfico das temperaturas do fundo e da referência para o controle liga-desliga, utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C

da temperatura da bobina ao longo do teste. Note que no momento que a temperatura da bobina começa a se distanciar da temperatura da carcaça, o sistema de controle age de maneira a manter a distancia pré estabelecida para o teste, dentro do intervalo de $[10,15]^{\circ}\text{C}$ abaixo da temperatura da carcaça do compressor. Por fim, a Figura 46 mostra

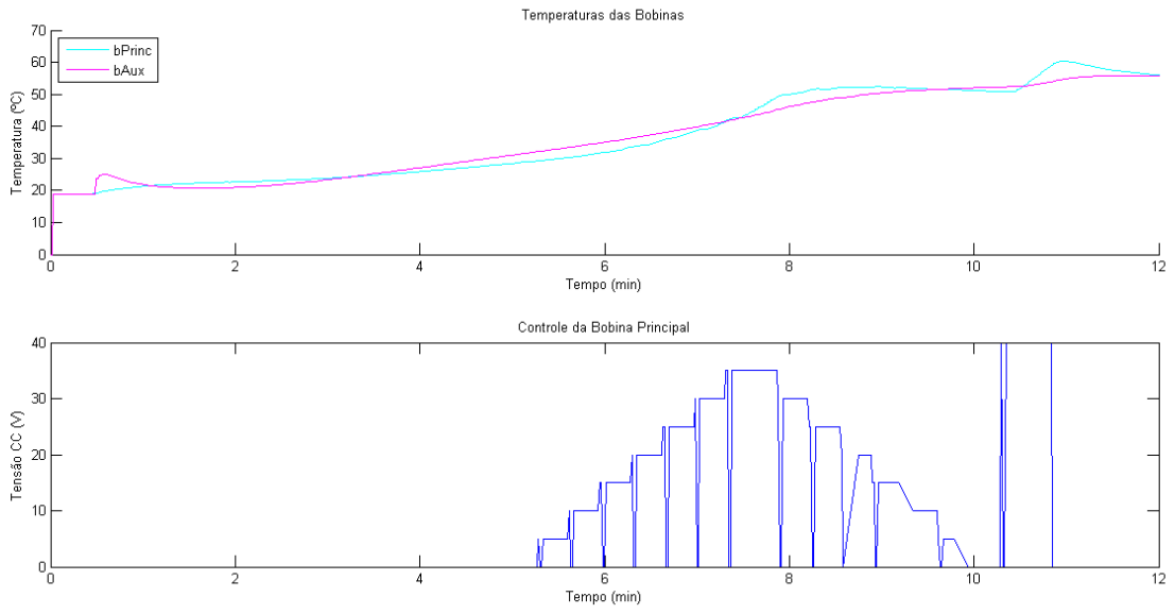


Figura 45 – Gráfico das temperaturas da bobina utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C

o ponto exato em que, tanto a bobina quanto a carcaça, atingem a mesma temperatura. Conforme o ponto destacado na imagem, isso ocorre após 10,92 minutos do início do teste e 9,91 minutos depois do início da atuação do controle. A temperatura no ponto é de 59,41°C, ou seja, o erro está dentro da tolerância de 1°C.

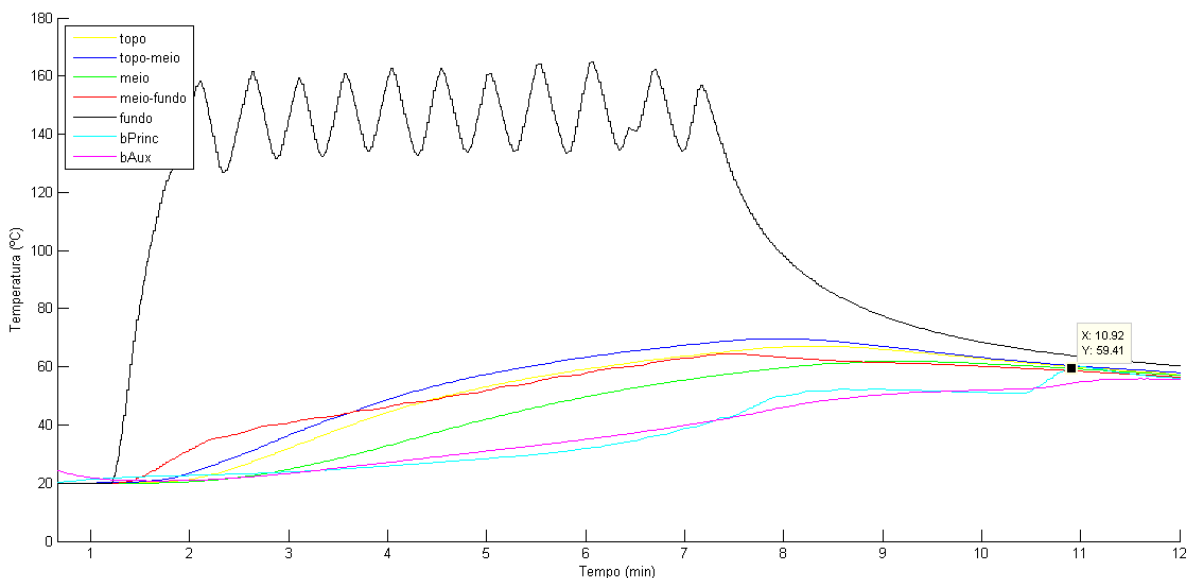


Figura 46 – Gráfico do instante em que a bobina e carcaça atingem a mesma temperatura utilizando o controle final, com uma referência de temperatura de 60°C

Dessa forma, o sistema operando com controle específico para a bancada de ensaios de elevação de pressão foi testado, utilizando em conjunto o sistema de controle

de temperatura da carcaça e da bobina. Seu desempenho foi avaliado e considerado satisfatório.

6 Considerações Finais

No decorrer deste projeto de final de curso foi desenvolvido um sistema de controle de temperaturas de compressores para bancadas automatizadas de ensaios. Esse sistema tornou possível o aquecimento de compressores em um tempo muito inferior aos obtidos com sistemas desenvolvidos anteriormente.

A implementação desse sistema permitiu que uma nova técnica de aquecimento de compressores, utilizando um fogão de indução, fosse estudada parcialmente. Aprimoramentos que não puderam ser explorados nesta etapa do projeto serão apresentados como sugestões de trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

Durante a realização do levantamento bibliográfico, pôde-se entender sobre os sistemas de refrigeração. Foram encontradas inúmeras pesquisas no que tange a aceleração de ensaios de desempenho desses sistemas. As técnicas focadas no aquecimento utilizando a alimentação do compressor têm tempo de aquecimento demasiadamente grande para serem utilizadas em ensaios mais rápidos, como os de capacidade de elevação de pressão. Concluiu-se, dessa forma, que utilizando essas técnicas não seria possível aquecer os compressores de uma maneira rápida o suficiente para a realização destes ensaios.

Neste trabalho foi possível desenvolver um sistema capaz de aquecer o compressor às mesmas temperaturas que com os métodos tradicionais, porém em um tempo extremamente reduzido. Cabe ressaltar que ainda são necessários estudos de como as estratégias de aquecimento desenvolvidas neste trabalho afetam os resultados dos ensaios de desempenho.

Após a implementação do sistema de acordo com a arquitetura desenvolvida, foi possível realizar ensaios e avaliar o desempenho do sistema. Todos os ensaios apresentaram resultados dentro do esperado, validando assim a arquitetura. Há ainda avanços a serem atingidos, como o melhor controle da temperatura da bobina principal, ou o uso de técnicas mais avançadas de controle de modo a reduzir ainda mais o tempo de aquecimento.

Durante todo o período de realização de desenvolvimento utilizou-se conhecimentos obtidos na graduação. Além do conhecimento já existente, obteve-se contato com sistemas de refrigeração e aprofundou-se na área de instrumentação. Levando-se em consideração esses aspectos, conclui-se que a disciplina Projeto de Fim de Curso atingiu plenamente seu objetivo.

6.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Durante a realização deste trabalho foram vislumbradas oportunidades de melhoria. Aquelas que não puderam ser exploradas são apresentadas na sequência como sugestões para trabalhos futuros.

Para entender como esse sistema de aquecimento afeta o resultado dos ensaios de desempenho, sugere-se utilizar o sistema em compressores com características de desempenho já conhecidas, realizar os ensaios de desempenho novamente e comparar os resultados.

Para melhorar o tempo de assentamento do sistema, sugere-se o uso de técnicas de controle mais avançadas, especialmente aquelas que compensam atrasos de transporte, como os controladores preditivos (MPC) e os compensadores de atraso de transporte (DTC).

Para diminuir os atrasos nos sistema de atuação e melhorar o tempo de resposta do sistema, também é sugerido o uso de equipamentos mais apropriados para o sistema, como uma fonte de alimentação capaz de mudar o valor de injeção CC enquanto alimenta o compressor.

Referências

- 1 EMBRACO. *Entendendo o conceito de refrigeração*. 2013. <<http://www.clubedarefrigeracao.com.br/downloads/entendendo-o-conceito-de-refrigeracao>>.
- 2 POLETTO, E. L. Aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores herméticos visando reduzir incertezas de medição. Florianópolis, SC, 2006.
- 3 SCUSSEL, J. N. Propostas de ações para reduzir o tempo demandado por ensaio de desempenho de compressores heméticos. Florianópolis, SC, 2006.
- 4 THOMAZINI, J. C. Desenvolvimento de recursos para aumentar a produtividade de uma bancada de ensaios de partida e tombamento de compressores de refrigeração. 2013.
- 5 PACHECO, A. *Desenvolvimento de Sistema para Medir Resistência de Enrolamento em Motores de Compressores Energizados*. 2007. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial)-Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- 6 CORAL, R. *CENTRO TECNOLÓGICO PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- 7 ZANOL, M. G. Concepção de arquitetura para aquisição de dados e controle de bancada para teste de compressores. 2015.
- 8 SILVEIRA, A. N. Diminuição do tempo de transitório em ensaios de desempenho de compressores utilizando injeção de corrente contínua. Florianópolis, SC, 2010.
- 9 JOFFILY, L. d. A. L.; PIMENTA, J. M. D. Avaliação de desempenho e simulação de compressores de refrigeração por meio de um ciclo superaquecido alternativo.
- 10 IBGE. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. 2013.
- 11 STANDARDIZATION, I. O. F. *ISO 917 - Testing of refrigerant compressors*. 2. ed. Switzerland. 1989.
- 12 LIMA, L. C. d. A. Controle da alimentação elétrica para redução do tempo demandado por ensaios de desempenho de compressores e avaliação da influência da qualidade da energia elétrica nos resultados dos ensaios. 2010.
- 13 SILVA, J. G. da. *Introdução à Tecnologia da Refrigeração e da Climatização*. [S.l.]: Artliber, 2010.
- 14 DOSSAT, R. J. Princípios de refrigeração. 1ª edição. Hemus Editora, 2004.
- 15 STOECKER, W. F. Refrigeração industrial/wf stoecker e jm saiz jabardo-sp: Ed. Blucher, 2ª edição, 2002.
- 16 JABARDO, J.; STOECKER, W. *Refrigeração Industrial*. [S.l.]: Editora Edgar Blücher LTAD. São Paulo, 2002.

- 17 BOLES, M. A.; ÇENGEL, Y. A. Termodinâmica. 5ª edição, Editora McGraw-Hill Inc, 2006.
- 18 BIM, E. Máquinas elétricas e acionamento. *Campinas: Campus*, 2009.
- 19 FITZGERALD, A. JR, CK e Kusko. A., "Máquinas Elétricas" 3 Edição. [S.l.]: McGraw-Hill, 1971.
- 20 PENZ, C. A. Procedimentos para prover confiabilidade ao uso de inteligência artificial em ensaios de desempenho de compressores herméticos de refrigeração. Florianópolis, SC, 2011.
- 21 STANDARD, A. Ansi/ashrae 23: Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors and condensing units. *Atlanta, EUA*, 2005.
- 22 STUMBERGER, G. et al. Prevention of iron core saturation in multi-winding transformers for dc-dc converters. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 46, n. 2, p. 582–585, 2010.
- 23 FIALHO, A. B. *Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises*. [S.l.]: Editora Érica, 2002.
- 24 IEC, D. 751. *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Messwiderstände*, 1990.
- 25 MOREIRA, L. Medição de temperatura usando-se termopar. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 5, p. 51–53, 2002.
- 26 KEYSIGHT, T. C. *Agilent 34970A/34972A User's Guide*. 2014. <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/34972-90001.pdf>>.