



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

Juliano Ricardo da Silva

**Desenvolvimento de bancada automatizada para ensaios térmicos em
conversores de frequência aplicados em sistemas de refrigeração**

Florianópolis, SC
2023

Juliano Ricardo da Silva

**Desenvolvimento de bancada automatizada para ensaios térmicos em
conversores de frequência aplicados em sistemas de refrigeração**

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

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

Florianópolis, SC
2023

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

da Silva, Juliano Ricardo

Desenvolvimento de bancada automatizada para ensaios
térmicos em conversores de frequência aplicados em
sistemas de refrigeração / Juliano Ricardo da Silva ;
orientador, Rodolfo César Costa Flesch, coorientador, João
Paulo Zomer Machado, 2023.

90 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2.
Confiabilidade. 3. Ensaios térmicos. 4. Automação de
bancadas . 5. Controle de processos. I. Flesch, Rodolfo
César Costa. II. Machado, João Paulo Zomer. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

Juliano Ricardo da Silva

**Desenvolvimento de bancada automatizada para ensaios térmicos em
conversores de frequência aplicados em sistemas de refrigeração**

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

Florianópolis, 11 de dezembro de 2023.

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

Banca Examinadora:

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

João Paulo Zomer Machado, Me.
Supervisor
LIAE

Prof. Adriano Silva Martins Brandão, Dr.
Avaliador
UFSC/CTC/DAS

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

Este trabalho é dedicado aos meus familiares, amigos,
professores e à toda comunidade acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Selma e Daniel, e irmã, Ananda, por todo apoio, incentivo e amor dedicados a mim durante toda a minha vida. Os laços familiares foram reforçados mesmo com a distância física que nos separou durante esta etapa importante.

Em segundo, agradeço a todos os colegas e amigos que fiz durante o curso, especialmente, Cristian de Biasi, Guilherme Ludwig e Valdecir Hoffmann, os quais tive a sorte em conhecer e compartilhar inúmeros momentos de felicidade, apoio mútuo, preocupações e que me estenderam as mãos quando mais precisei deles. Minha adaptação a uma vida longe de casa e em um lugar até então desconhecido foi muito acelerada por vocês.

Também agradeço aos professores do Departamento de Automação e Sistemas (DAS) e da UFSC, pelas enormes contribuições acadêmicas que proporcionaram a mim com os inúmeros ensinamentos, desafios e fomento à aquisição e produção de cada vez mais conhecimento científico dedicado ao bem da humanidade.

É muito importante fazer um agradecimento aos colaboradores e órgãos relacionados à UFSC, pois sempre que precisei de ajuda com procedimentos burocráticos, acadêmicos e questões pessoais, não mediram esforços e sempre me atenderam com a maior simpatia, atenção e eficiência. As agências de fomento e fundações de apoio, em destaque, FEESC, Embrapii e CNPq, também merecem ser citadas, pois foram importantíssimas para o desenvolvimento de atividades extracurriculares e, consequentemente, maior aperfeiçoamento em minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço enormemente ao meu orientador, professor Rodolfo Flesch, pela oportunidade, generosidade e pelas sempre pertinentes sugestões e correções, à empresa Nidec pelo apoio e também ao meu supervisor João Zomer e aos demais colegas do Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE), pela recepionalidade, motivação e contribuições diárias. Tudo isso permitiu a realização deste trabalho.

"A learning experience is one of those things that says, 'You know that thing you just did? Don't do that.'"
(Adams, 2002)

DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 1 de dezembro de 2023.

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

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

João Paulo Zomer Machado
Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios

RESUMO

Um aspecto imprescindível na construção da confiabilidade de um produto é a caracterização de seu comportamento em diferentes condições operacionais para que, através disso, sejam estabelecidas as margens de segurança e os limites de operação recomendados. Nesse sentido, o ensaio ambiental é uma das ferramentas utilizadas pela indústria para avaliar se o produto, sob um determinado nível de estresse, executa suas funções adequadamente e também para medir sua confiabilidade. No contexto dos conversores de frequência, o aumento da densidade e complexidade das placas eletrônicas em conjunto com a operação em altas frequências, exige um aperfeiçoamento do projeto térmico destes produtos para atenuar os malefícios causados pelo estresse térmico, o qual é apontado como principal causador de falhas e diminuição da eficiência dos componentes eletrônicos. Atualmente, a Nidec realiza ensaios para avaliar o comportamento térmico dos componentes eletrônicos da placa de conversores de frequência, aplicados em refrigeração, em diferentes cenários operacionais para, com isso, estabelecer os níveis máximos de potência entregues pelo conversor dentro dos limites de temperatura dos componentes. Entretanto, pelo fato de ser realizado em malha aberta e por cada componente possuir uma dinâmica térmica própria, o ensaio leva muito tempo para ser realizado, pois não se consegue atingir os limites de temperatura dos componentes com tempos de acomodação similares. Portanto, o objetivo deste trabalho é, utilizando as ferramentas adequadas de instrumentação e controle, desenvolver uma bancada automatizada que diminua o tempo despendido nestes ensaios através do aquecimento mais rápido dos componentes, tornando-os mais eficientes e independentes da intervenção humana.

Palavras-chave: Confiabilidade. Bancada de ensaios. Controle e automação.

ABSTRACT

An essential aspect for assessing product reliability is characterizing its behaviour under different operating conditions in order to define safety margins and recommended operating limits. In this sense, environmental testing is one of the tools used to assess whether the product, under a given level of stress, performs its functions properly and also to measure reliability. In the context of frequency converters, the increased density and complexity of electronic boards, together with operation at high frequencies, require an improvement in the thermal design of these products in order to mitigate the harm caused by thermal stress, which has been identified as the main cause of failures and reduced efficiency in electronic components. Nidec currently carries out tests to evaluate the thermal behavior of electronic components on the board of frequency converters used in refrigeration, in different scenarios, in order to establish the maximum power levels delivered within the operating and temperature limits of the components. However, because the test is carried out in an open loop and because each component has its own thermal dynamics, it takes a long time to carry out the test, as it is not possible to reach the temperature limits of the components with similar settling times. Therefore, the aim of this work is, using appropriate instrumentation tools and control strategies, to develop an automated bench that increases the speed, through faster heating of the components, and efficiency of these thermal tests.

Keywords: Reliability. Automated bench. Control and automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Custo de mudanças nos estágios de desenvolvimento.	21
Figura 2 – Curva da banheira da confiabilidade.	22
Figura 3 – Árvore das cargas ambientais.	25
Figura 4 – Fontes de estresse em equipamentos eletrônicos.	28
Figura 5 – Dispositivos mais suscetíveis à falhas em equipamentos eletrônicos.	29
Figura 6 – Funcionamento do conversor de frequência.	33
Figura 7 – Motor BLDC de três fases.	36
Figura 8 – Estrutura do freio de histerese.	37
Figura 9 – Fonte TDK Lambda GEN600-1,3.	38
Figura 10 – Medidor de potência WT230.	39
Figura 11 – Agilent 34972A.	40
Figura 12 – Caixa de equalização utilizada para construção da estufa térmica. .	41
Figura 13 – Circuito para controle de temperatura do forno.	42
Figura 14 – Base mecânica.	43
Figura 15 – USB-NI 6341.	43
Figura 16 – Arquitetura da bancada de ensaios térmicos.	46
Figura 17 – Resposta ao degrau da estufa térmica em malha aberta.	48
Figura 18 – Relação estática entre os incrementos em MV e PV.	49
Figura 19 – Resposta ao degrau no ponto de operação.	50
Figura 20 – Comparação da respostas ao degrau do sistema em MA.	51
Figura 21 – Malha de controle de temperatura da estufa.	51
Figura 22 – Sinais da malha de controle de temperatura da estufa.	52
Figura 23 – Degraus de corrente e tensão aplicados ao freio.	54
Figura 24 – Respostas temporais das potências e das temperaturas.	55
Figura 25 – Relação da PV com MV para o termopar TP 1.	56
Figura 26 – Relação estática linear entre os incrementos de MV e PV para TP1.	57
Figura 27 – Respostas ao degrau de todos os modelos levantados.	58
Figura 28 – Comparação do modelo com as temperaturas medidas de TP1. . .	59
Figura 29 – Lugar das raízes do controlador.	61
Figura 30 – Respostas da malha de controle de TP1.	62
Figura 31 – Curvas térmicas obtidas no primeiro ensaio de malha fechada. . . .	63
Figura 32 – Desempenho do controlador para o primeiro ensaio.	64
Figura 33 – Desempenho do controlador para o segundo ensaio.	65
Figura 34 – Desempenho do controlador próximo ao ponto de operação.	66
Figura 35 – Curvas térmicas do ensaio em malha aberta.	66
Figura 36 – Resposta de TP1 em malha aberta.	67
Figura 37 – Temperaturas alcançadas com velocidade máxima de 4000 RPM: .	74

Figura 38 – Corrente do freio variável e velocidade de rotação 2000 RPM.	75
Figura 39 – Corrente do freio 150 mA e velocidade de rotação 3000 RPM.	76
Figura 40 – Corrente do freio 150 mA e velocidade de rotação variável.	77
Figura 41 – Corrente do freio 185 mA e velocidade de rotação variável.	78
Figura 42 – Corrente do freio 225 mA e velocidade de rotação variável.	79
Figura 43 – Corrente do freio 225 mA e velocidade de rotação variável.	80
Figura 44 – Corrente do freio 320 mA e velocidade de rotação 4000 RPM.	81
Figura 45 – Corrente do freio 320 mA e velocidade de rotação 3000 RPM.	82
Figura 46 – Fluxograma do ensaio térmico automatizado.	84
Figura 47 – VI do sistema de controle da temperatura da estufa.	86
Figura 48 – VI de controle do dinamômetro.	87
Figura 49 – VI do sistema de controle da temperatura do componente TP 1.	88
Figura 50 – VI de monitoramento das temperaturas dos termopares.	89
Figura 51 – VI de monitoramento das temperaturas do motor e do freio.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas freio AHB-1.	37
Tabela 2 – Especificações técnicas fonte GEN600-1,3.	38
Tabela 3 – Especificações técnicas do medidor de potência WT230.	39
Tabela 4 – Especificações técnicas da placa USB6341.	44
Tabela 5 – Parâmetros do controlador PI da estufa.	51
Tabela 6 – Parâmetros dos modelos de primeira ordem.	57
Tabela 7 – Parâmetros do controlador PI do ensaio térmico.	61
Tabela 8 – Limites de temperatura dos componentes.	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	CONFIABILIDADE DE PRODUTOS	20
2.2	ENSAIOS AMBIENTAIS	24
2.2.1	Tipos de estresses ambientais	24
2.2.2	Técnicas de ensaios	30
2.2.3	Ensaio térmico	31
2.3	COMPRESSOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL	31
2.4	CONVERSOR DE FREQUÊNCIA	32
2.5	AUTOMAÇÃO DE BANCADAS	33
3	BANCADA DE ENSAIOS TÉRMICOS	35
3.1	DINAMÔMETRO PARA ENSAIO DE MOTORES	35
3.1.1	Motor CC sem escovas	35
3.1.2	Freio de histerese	36
3.1.3	Fonte de alimentação programável	37
3.1.4	Conversor de frequência	38
3.2	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE SINAIS	38
3.2.1	Medidor de potência	39
3.2.2	Unidade de aquisição, comutação e registro de dados	40
3.3	ESTUFA TÉRMICA	41
3.3.1	Estrutura mecânica	42
3.3.2	Placa de Aquisição	42
3.4	RECURSOS DE SOFTWARE PARA CONTROLE SUPERVISÓRIO	44
3.5	BANCADA COMPLETA	45
4	AUTOMAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS TÉRMICOS	47
4.1	CONTROLE DE TEMPERATURA DA ESTUFA TÉRMICA	47
4.1.1	Levantamento do modelo dinâmico	47
4.1.2	Projeto do controlador	49
4.2	CONTROLE AUTOMÁTICO DO ENSAIO TÉRMICO	53
4.2.1	Levantamento do modelo dinâmico	53
4.2.2	Projeto do controlador	58
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68

6.1	CONCLUSÕES	68
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – CURVAS TÉRMICAS DOS COMPONENTES . . .	74
	APÊNDICE B – SOFTWARE PARA O ENSAIO TÉRMICO	84

1 INTRODUÇÃO

A refrigeração está presente em um grande número de aplicações, abrangendo processos domésticos, voltados ao condicionamento de ar para conforto térmico e conservação de alimentos, e industriais, principalmente, para refrigeração alimentícia e resfriamento. Existem quatro tecnologias principais de refrigeração (ou resfriamento): refrigeração por compressão de vapor, refrigeração por absorção, refrigeração por evaporação e refrigeração a gás. Kirkpatrick (2022) destaca que a refrigeração por compressão de vapor é a mais difundida nas aplicações domésticas, comerciais e industriais, pois apresenta vantagem econômica e também melhor desempenho quando comparada com as tecnologias supracitadas.

As aplicações para condicionamento de ar têm por objetivo manter um determinado nível de conforto térmico para pessoas ou equipamentos em um ambiente, tipicamente, na ordem de 20 °C a 30 °C. As aplicações para resfriamento visam manter a temperatura próxima ou abaixo de 0 °C. Dessa maneira, os sistemas de refrigeração por compressão de vapor usam a evaporação do líquido refrigerante ou fluido de trabalho para produzir um efeito de resfriamento líquido (KIRKPATRICK, 2022).

Historicamente, os primeiros sistemas de compressão a vapor foram comercializados no início do século XIX para uso em sistemas de refrigeração, os quais anteriormente utilizavam blocos de gelo. Em 1834, o americano Jacob Perkins (1766-1849), conhecido por ser o “pai da geladeira”, inventou o primeiro sistema de refrigeração por compressão de vapor. A partir disso, a adoção destes sistemas foi crescendo gradualmente, expandindo suas aplicações para conservação de alimentos e, após a substituição do uso de gases refrigerantes tóxicos para não-tóxicos ocorrida em meados do século XX, começaram a ser utilizados também para condicionamento de ar em ambiente doméstico (KIRKPATRICK, 2022).

Os principais tipos de compressores utilizados em sistemas de refrigeração por compressão de vapor são: alternativo, centrífugo, rotativo parafuso e de palhetas. Destes, o mais utilizado é o alternativo, cuja classificação é feita, principalmente, de acordo com o arranjo construtivo, sendo eles: aberto, semi-hermético e selado (hermético). Para este trabalho, foi utilizado o tipo selado, o qual possui uma construção muito similar ao semi-hermético, com a diferença que o motor e o compressor são selados juntos na mesma carcaça metálica, sendo impossível acessá-los de forma isolada. Este tipo de compressor é o mais utilizado em refrigeradores domésticos e condicionadores de ar até potências de ordem de 30 kW (STOECKER; JABARDO, 2018).

Do ponto de vista do controle de sistemas de refrigeração baseados em compressores herméticos, os modelos convencionais operam com velocidades fixas do motor que aciona o compressor segundo uma lógica de liga-desliga. Esse tipo de operação causa desperdício de energia devido ao baixo nível de eficiência energética,

pois o compressor opera somente em extremos, ou seja, com o máximo e o mínimo de sua velocidade e, conseqüentemente, capacidade. Portanto, ocorre que ou o compressor opera a plena carga ou está parado. Este tipo de controle mais simples pode ser conveniente para sistemas que trabalham com uma carga moderadamente constante, mas ineficiente em sistemas com flutuações rápidas de carga, pois causa paradas e partidas frequentes do motor, implicando esforços desnecessários no equipamento elétrico (MATOS, R. S., 2010). Esses esforços ocorrem pois, a cada partida, o motor precisa vencer a inércia do sistema mecânico e o diferencial de pressão imposto ao circuito pelo compressor em operação.

Considerando a necessidade do aumento da eficiência energética dos sistemas de refrigeração, foi introduzido no mercado o compressor de velocidade variável. Ele é projetado para permitir a operação, na maior parte do tempo, em velocidades mais baixas, de modo que o compressor opere em um nível inferior à sua capacidade máxima. Como consequência direta, é obtido um menor número de partidas e paradas do motor, o que se traduz em redução dos desgastes mecânicos causados por fricção, menor nível de ruído e, principalmente, uso de um controle mais sofisticado e adequado à demanda energética (OLIVEIRA, 2019).

O conversor de frequência, popularmente conhecido como inversor de frequência, é um equipamento eletrônico de chaveamento de potência que, entre outras finalidades, é muito utilizado para controlar a velocidade de motores elétricos. No caso do compressor de velocidade variável, também chamado compressor *inverter*, o conversor de frequência funciona como um sistema de acionamento do motor que permite alterar a frequência do sinal de saída e, conseqüentemente, controlar a velocidade de operação do motor. É importante ressaltar que o termo inversor se refere ao circuito que faz a conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), sendo este precedido por um filtro capacitivo da corrente contínua que vem do circuito retificador, o qual converte a corrente alternada da rede em corrente contínua, mas isso é visto em mais detalhes na seção 2.4. Apesar disso, neste trabalho, o conjunto formado pelo retificador, barramento CC e inversor de frequência é chamado apenas de conversor (ou inversor) de frequência.

Nas últimas décadas, o avanço da tecnologia de encapsulamento (miniaturização) dos componentes eletrônicos (semicondutores, circuitos integrados) resultou na criação de produtos cada vez mais complexos, traduzidos em placas de circuito impresso de maior densidade. Este fato vem exigindo mais atenção na etapa de projeto térmico dos conversores, pois, como corroborado por diversos estudos na literatura, os efeitos térmicos causados pelo ambiente ou pela condição de operação sobre os componentes eletrônicos do conversor de frequência em conjunto com as eventuais falhas de projeto e fabricação podem acarretar mau funcionamento e, menos comumente, falha completa do produto (CALLEGARI; GUSMAN, 2020).

Como os conversores (e os compressores) são utilizados nas mais diversas aplicações, variando ambiente, demandas de carga e modos de funcionamento, é muito importante levantar o comportamento dos componentes eletrônicos, os quais compõem estes produtos, em diferentes cenários. Para isso, a indústria utiliza ensaios ambientais que avaliam possíveis modos de falha causados por estresse e também ajudam a qualificar o desempenho do produto em distintas condições operacionais. A palavra estresse aqui empregada significa qualquer agente com tendência a induzir falhas e pode ser de diferentes naturezas, como elétrica, química, mecânica e térmica. Portanto, através desses ensaios, são estabelecidos as margens de segurança e os limites de operação recomendados, aumentando, também, o nível de confiabilidade do produto.

A Nidec Global Appliance, parte da Nidec Corporation, é responsável pela fabricação e comercialização das soluções de refrigeração da Embraco para uma variedade de aplicações, assim como motores para lavadoras de louça, máquinas de lavar e secadoras. Atualmente, possui um procedimento de ensaio térmico para avaliação do comportamento dos componentes eletrônicos do ponto de vista da temperatura em relação a determinadas condições de operação. Esse ensaio envolve a instrumentação com transdutores de temperatura (do tipo termopar) dos componentes da amostra do conversor de frequência (utilizado em um compressor hermético com velocidade variável) a ser estudada e, posteriormente, a aquisição dos valores de temperatura sob diferentes condições de carga através da variação da carga aplicada ao eixo do motor (simulando um sistema de refrigeração doméstico que utiliza um compressor hermético). Assim, o ensaio térmico, primeiramente, define uma condição de temperatura ambiente acima do normal (por exemplo, 60 °C) e depois aumenta gradativamente o nível de carga requerido ao conversor, causando o aquecimento dos componentes da placa. Isso é feito até que pelo menos um dos componentes atinja seu limite de temperatura e, neste momento, se registra o valor máximo da potência de entrada do conversor operando nessa condição.

Por ser feito em malha aberta, o ensaio atual consome muito tempo e isso ocorre porque os componentes possuem dinâmicas térmicas diferentes, ou seja, cada um deles leva um tempo diferente para assentar sua temperatura. Então, visando aumentar o nível de automação do ensaio e, conseqüentemente, torná-lo mais rápido e eficiente, a Nidec, em conjunto com o Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE), apontou a necessidade da implementação do controle em malha fechada para acelerar o aquecimento dos componentes e, conseqüentemente, encurtar o tempo de assentamento, abaixo dos valores limites de temperatura, de modo que seja possível estabelecer os patamares máximos de potência nos quais o conversor opera de forma confiável para as diferentes demandas de carga.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção, são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma bancada automatizada que permita realizar ensaios térmicos dos componentes da placa de um conversor de frequência utilizado em compressores herméticos com velocidade variável aplicados em sistemas de refrigeração.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral do trabalho é alcançado conforme o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- revisar a literatura de ensaios térmicos, automação de bancadas e estudos de confiabilidade e, com isso, levantar os requisitos necessários para a bancada automatizada de ensaios térmicos;
- implementar uma bancada que atenda às necessidades do ensaio térmico por meio da integração dos sistemas de aquisição, atuação e controle;
- realizar ensaios térmicos em malha aberta sob diferentes condições de operação para caracterizar as dinâmicas térmicas dos componentes;
- projetar, implementar e validar os sistemas de controle de temperatura da estufa e de aceleração do aquecimento dos componentes.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O documento está estruturado da maneira descrita a seguir.

No capítulo 2, é feita uma revisão da literatura sobre confiabilidade, ensaios ambientais, compressores de velocidade variável e conversores de frequência, explicitando as motivações e o contexto deste trabalho.

No capítulo 3, é detalhada a bancada de ensaios térmicos, apresentando as funções desempenhadas e as especificações técnicas dos principais equipamentos utilizados pelos sistemas de instrumentação, aquisição e controle.

No capítulo 4, são mostradas as etapas seguidas para identificação dos modelos que representam as dinâmicas térmicas da estufa e dos componentes da placa do conversor. Na sequência, são apresentados os projetos dos controladores.

No capítulo 5, são analisados os resultados dos ensaios em malha fechada do controlador de temperatura dos componentes da placa do conversor em diferentes

pontos de operação e também é feita uma comparação do sistema de controle em malha fechada com o sistema em malha aberta.

No capítulo 6, é feita uma recapitulação dos objetivos do PFC, comparando-os com os resultados obtidos. Além disso, são feitas algumas observações sobre pontos de melhoria e dadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, introduzindo alguns conceitos e fatos que são importantes para a compreensão plena deste trabalho. A seção 2.1 contextualiza brevemente o papel da confiabilidade para a fabricação de produtos de qualidade, ressaltando a importância financeira e prática de sua aplicação em todas as fases de desenvolvimento. Além disso, são apresentados aspectos técnicos importantes da confiabilidade, partindo de sua definição até o modelo de ciclo de vida do produto.

Inicialmente, na seção 2.2, o termo estresse é conceitualizado dentro do contexto da confiabilidade e são ressaltados os principais motivos para a realização de ensaios ambientais durante o desenvolvimento de um produto. Na subseção 2.2.1, são apresentados os principais tipos de estresses ambientais e são explicados como e porque são empregados nesses ensaios. Também é abordado em mais detalhes o estresse térmico, apontando-se os principais efeitos que causam no comportamento e desempenho dos equipamentos eletrônicos. A subseção 2.2.2 apresenta as principais técnicas de ensaios ambientais utilizadas na indústria eletrônica e esclarece como cada uma delas ajuda na melhoria da confiabilidade e na caracterização do desempenho do produto. Finalmente, a subseção 2.2.3 lista algumas recomendações e considerações, apontadas na literatura, que norteiam a realização de ensaios térmicos.

A seção 2.3 apresenta sucintamente o compressor de velocidade variável e a seção 2.4 explica os principais fundamentos do conversor de frequência. Concluindo a revisão, a seção 2.5 destaca a importância e, principalmente, as vantagens obtidas com a automação de ensaios.

2.1 CONFIABILIDADE DE PRODUTOS

Nas últimas décadas, ocorreu na indústria de produtos eletrônicos um avanço tecnológico significativo dos processos de manufatura. Um fator chave para isso foi a fabricação de componentes eletrônicos cada vez menores, chamada miniaturização, a qual acarretou no aumento da densidade de potência e também na diminuição da área de dissipação de calor dos componentes montados sobre uma placa de circuito impresso. Este fato realçou a importância das análises acerca do efeito do estresse térmico, pois a maior aproximação dos componentes também aumenta o aquecimento do meio ao redor destes, o que tende a deteriorar o processo de troca térmica.

A miniaturização também está intimamente relacionada à operação em frequências mais altas, como ocorre em um conversor de frequência, e isto também tende a gerar mais calor (OLIVEIRA, 2019). Industrialmente, este processo também impactou na utilização de sistemas de produção mais sofisticados, com vasta aplicação de linhas automatizadas para montagem dos produtos e prazos de entrega cada vez menores,

ou seja, houve um encurtamento do *time to market*, termo em inglês utilizado para definir o tempo transcorrido desde a concepção até o lançamento de um novo produto no mercado.

Neste quadro, a construção da confiabilidade desde as etapas mais incipientes de desenvolvimento do conversor de frequência é muito importante pois, como as temperaturas elevadas em componentes eletrônicos reduzem a confiabilidade do sistema, é premente assegurar o funcionamento deste sob condições nominais de operação, principalmente, em longos períodos. Isto é feito também pela melhoria do projeto de gerenciamento térmico, cuja função é garantir que a temperatura de um componente não ultrapasse os limites de operação estabelecidos em sua especificação (OLIVEIRA, 2019). Com isso, evitam-se condições de uso que superem os limites seguros de operação dos componentes e, conseqüentemente, do conversor de frequência.

O desenvolvimento de um produto tipicamente abarca as etapas de concepção, projeto, desenvolvimento, fabricação e entrega. É sabido que, a cada etapa de desenvolvimento, o custo com reparos e mudanças no projeto aumenta exponencialmente, como ilustrado na figura 1. Logo, é muito importante que possíveis erros de projeto sejam detectados muito antes da fabricação e, principalmente, da comercialização do produto, pois isto reduz custos associados à garantia, a consertos em campo, recall e retrabalho (NETO, 2014). Para isso, são aplicados processos de qualidade que buscam analisar e, posteriormente, qualificar a confiabilidade do produto, mas antes de apresentar como isso é feito, é necessário definir mais estritamente o conceito de confiabilidade.

Figura 1 – Custo de mudanças nos estágios de desenvolvimento.



Fonte: Adaptado de Wilde (2023).

A confiabilidade foi definida por Leemis (1995, p. 2) como “a probabilidade de um item desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado

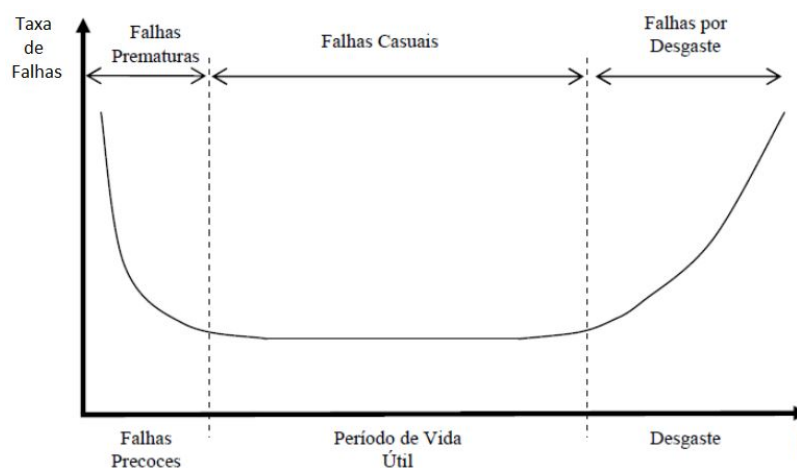
período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas”. Dessa forma, a confiabilidade está associada à operação bem sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas (FOGLIATTO; DUARTE, 2011). Em resumo, uma alta confiabilidade é refletida por uma taxa de falha baixa e uma alta taxa de falha reflete baixa confiabilidade (LUCA, 2004).

A análise de confiabilidade é importante para caracterizar, qualitativamente e quantitativamente, o ciclo de vida de um produto. Entretanto, como um produto é, muitas vezes, constituído por diversos componentes, é inviável analisar a confiabilidade de cada um desses para, então, computar a confiabilidade geral, pois isso leva tempo e incorre em custos que tipicamente são excessivos para a empresa. Por conta disso, a análise de confiabilidade é feita em termos probabilísticos, ou seja, a partir de amostragem. Desta maneira, busca-se indicar as taxas de falhas com relação a uma quantidade x de amostras e não individualmente. No trabalho de Nascimento Irias (2018), são destacados como principais indicadores indiretos da confiabilidade:

- Tempo médio para falha (MTTF, do inglês *mean time to failure*): é o tempo esperado antes da ocorrência da falha, ou seja, é o tempo médio que um item opera sem falhar;
- Tempo médio entre falhas (MTBF, do inglês *mean time between failures*): é o tempo médio entre a ocorrência de falhas sequenciais em itens de uma população.

Esses indicadores quantificam diferentes relações da taxa de falha com o ciclo de vida do produto e auxiliam no entendimento da *curva da banheira* da confiabilidade, mostrada na figura 2.

Figura 2 – Curva da banheira da confiabilidade.



Fonte: Adaptado de Melo Nogueira (2016).

A análise da curva da banheira é feita de forma tripartida: na primeira parte, chamada de mortalidade infantil, há um decrescimento na taxa de falha, sendo que a alta taxa de falhas no início significa a ocorrência de falhas prematuras, possivelmente causadas pelo uso de técnicas inadequadas de fabricação, trabalhos manuais ruins e controle de qualidade pobre (NASCIMENTO IRIAS, 2018). O período de mortalidade infantil é seguido pelo período de maturidade, que constitui a porção mais longa da curva, sendo caracterizado por uma taxa de falha constante, ou seja, há ocorrência de falhas com natureza aleatória e que, portanto, não dependem do tempo de utilização do produto. Um exemplo claro disso é o manuseio incorreto por parte do cliente ou a utilização do produto fora das características e condições de operação dimensionadas durante o projeto. A parte final da curva, chamada período de desgaste, possui uma taxa de falha crescente, o que significa que há ocorrência de falhas causadas por desgaste, ou seja, é uma deterioração natural do produto ocasionada pela utilização de longo prazo. Tipicamente, o desgaste é denotado pelo envelhecimento, corrosão, oxidação e até quebra do produto.

Para componentes eletrônicos, espera-se que o período de desgaste seja tão distante a ponto de não ser caracterizado adequadamente, o que enseja a realização de ensaios que forneçam mais rapidamente informações sobre a vida e desempenho do produto, em todo o seu ciclo de vida, em condições normais de uso. Isso é feito através da coleta e análise dos dados de desempenho dos produtos em níveis altos (ou acelerados) de estresse. Segundo Fogliatto e Duarte (2011), um mesmo produto pode apresentar desempenho distinto quando opera em ambientes de calor ou umidade intensos e quando opera em condições climáticas mais amenas. Com isso, a realização de ensaios de confiabilidade são parte importante para o levantamento do perfil de missão (do inglês *mission profile*) de um produto para conhecer mais profundamente o comportamento físico e, com isso, levantar melhores especificações técnicas dos componentes, possibilitando mudanças e correções no processo e projeto do produto (WANG; LISERRE; BLAABJERG, 2013).

Wang, Liserre e Blaabjerg (2013) também apontam que as indústrias vêm avançando no desenvolvimento da engenharia de confiabilidade através de uma mudança de paradigma que consiste em substituir os testes tradicionais de qualidade por uma filosofia de projeto para confiabilidade (DFR, do inglês *design for reliability*) visando garantir que um produto ou sistema atinja um determinado nível de confiabilidade. A DFR inclui a utilização de diversos tipos de ensaios de confiabilidade, dentre eles, os ensaios térmicos. Porém, antes de explicar em mais detalhes como são estes ensaios, é necessário revisar conceitos básicos sobre estresses ambientais e destacar a relação deles com os componentes eletrônicos.

2.2 ENSAIOS AMBIENTAIS

No campo da confiabilidade, a palavra estresse denota um agente capaz de induzir um produto à falhas por meio de um ou mais mecanismos. Logo, partindo da premissa de que cada componente possui uma resistência, ou seja, uma capacidade em operar sem falhas quando afetado por estresse, se estabelece que a falha em determinado ponto ocorre justamente quando o estresse imposto ao componente excede sua resistência (LUCA, 2004).

O ensaio ambiental visa adquirir dados para medir a confiabilidade e também avaliar se um dispositivo, atuando sob um nível de estresse, executa suas funções conforme o especificado (MATOS, P. C. de; CORRÊA, 2016). Estes ensaios ajudam a conhecer melhor as características do produto, não apenas com relação à confiabilidade, mas também para definir as condições de operação ideais e os limites mínimos e máximos em que conseguem operar adequadamente. Luca (2004) destaca as principais utilidades dos ensaios baseados em estresses ambientais:

- coletar informações sobre as falhas através do levantamento das características de confiabilidade, identificando os modos de falha do produto, ou seja, visualizando como os produtos falham e/ou operam de forma indesejável;
- caracterizar o ciclo de vida útil, isto é, registrar o comportamento temporal do produto, medindo o período em que funciona sem apresentar falha;
- garantir a confiabilidade e fortalecer a robustez do produto;
- fazer um rastreio (*screening*), ou seja, uma triagem para identificar e separar os produtos de má qualidade, impedindo que estes sejam comercializados. Isso diminui custos de operações e manutenção em campo.

Por fim, é importante ressaltar que os ensaios ambientais variam conforme o produto e levam sempre em consideração fatores como o tipo de estresse, os limites mínimos e máximos para aplicação do estresse, taxa de variação do estresse a ser aplicado e os objetivos do ensaio (LUCA, 2004).

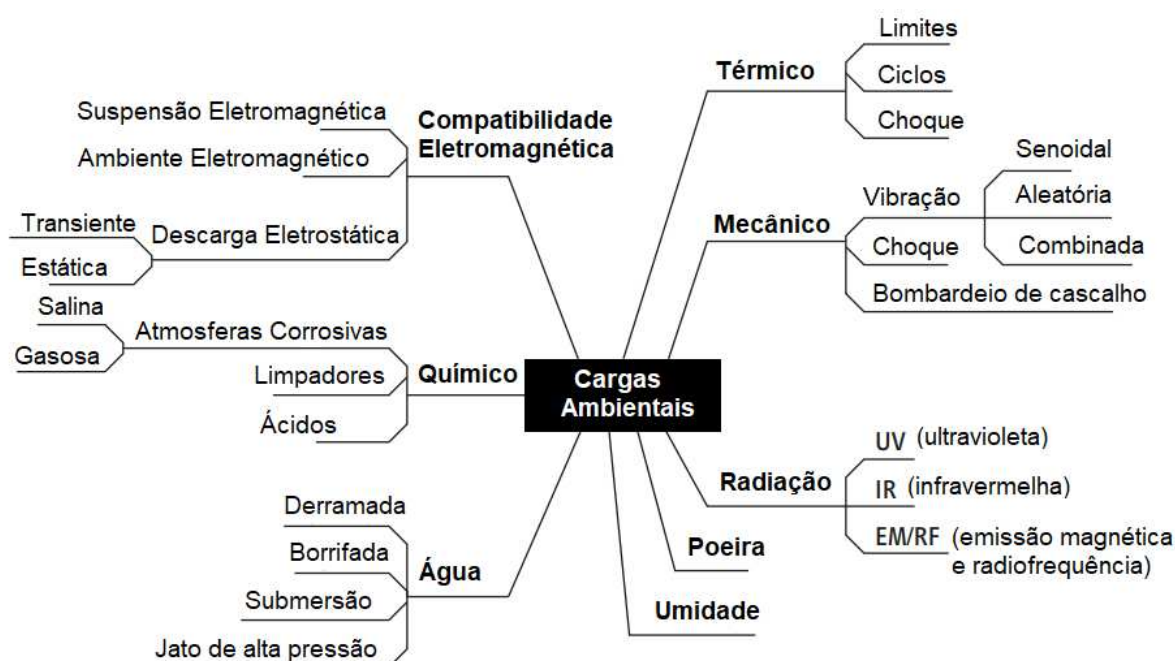
2.2.1 Tipos de estresses ambientais

Os estresses ambientais são classificados de acordo com a natureza físico-química, os mecanismos de falhas que provocam quando aplicados e a infraestrutura necessária para produzi-los. Nesse sentido, os ensaios ambientais avaliam o desempenho dos componentes quando afetados pelos estresses ambientais, pois estes, ao atingirem um determinado nível de intensidade, geralmente causam a deterioração do desempenho do produto e, no pior caso, precipitam a ocorrência de falhas, as quais

podem ser intermitentes e até catastróficas. Isso significa que cada tipo de estresse ambiental age e influencia de maneira diferente o comportamento do sistema (ou componente) em que foi aplicado. Logo, determinados estresses são mais perigosos ou influentes que outros dependendo do tipo e também do ambiente de utilização do produto. Por exemplo, um determinado componente pode ser muito tolerante a cargas mecânicas, como a vibração, mas vulnerável a um fator de estresse químico, como a corrosão.

A árvore de classificação das cargas (fatores) de estresses ambientais, mostrada na figura 3, considera como primeiro aspecto de definição o agente físico-químico protagonista e, na sequência, as formas ou mecanismos pelos quais ocorre. Por exemplo, o fator térmico consiste na ocorrência de fenômenos relacionados à temperatura e isso pode ocorrer de diferentes formas, por exemplo, através de ciclos térmicos (variação da temperatura dentro de um período de tempo), limites (temperaturas elevadas ou mínimas) e choque (variação brusca de uma temperatura muito quente para uma muito fria). Cada uma dessas formas desencadeiam reações diferentes no objeto (corpo) sobre o qual atua.

Figura 3 – Árvore das cargas ambientais.



Fonte: Adaptado de ZVEI (2013).

Segundo Luca (2004), os fatores de estresses mais utilizados nos ensaios ambientais de produtos eletrônicos são:

- Térmico:

- Alta temperatura: exposição do produto (ligado) a alta temperatura por um período prolongado, ensejando a ocorrência de fenômenos termoquímicos e físicos. Este estresse ambiental tipicamente gera falhas associadas à má-qualidade da matéria-prima, levando o produto a apresentar defeitos de fabricação (MATOS, P. C. de; CORRÊA, 2016).
 - Baixa temperatura: similar ao anterior, mas estudando os fenômenos surgentes pelo contraste de temperatura que ocorre com o aquecimento do produto (pelo fato de estar ligado) e a baixa temperatura ambiente criada artificialmente.
 - Ciclagem de temperatura: aplicação de uma sequência de ciclos térmicos, na qual se varia, em uma taxa constante, o valor da temperatura local do ambiente de ensaio (câmara climática). Essa ciclagem de temperatura tem o intuito de provocar um estresse pela expansão e contração do produto. É comum a exposição do produto a uma faixa ampla de temperaturas, indo de um valor mínimo ao máximo recomendado, mostrando como o produto se comporta quando está operando em seus limites.
 - Choque térmico: submete-se o produto aos extremos de temperatura de forma abrupta. Normalmente, isso é feito com a transferência, mecânica ou manual, do produto de um ambiente muito quente para um extremamente frio. É muito utilizado para expor falhas oriundas de matéria-prima com baixa qualidade.
- Mecânico:
 - Vibração aleatória: é realizada através da fixação do produto a uma unidade chamada agitador eletrodinâmico, na qual se produz uma ampla faixa de frequência (20 Hz a 2000 Hz). Isto causa excitações simultâneas do produto e, após um período de tempo, expõe defeitos mecânicos como, por exemplo, ressonâncias indesejadas, fadiga dos materiais de fixação e pontos de solda rompidos.
 - Vibração senoidal: similar ao anterior, mas a vibração é gerada por um agitador mecânico, no modo de frequência fixada, e por um agitador hidráulico, no modo de frequência variável, e tem formato senoidal, com faixa de frequência acima de 60 Hz a 500 Hz, respectivamente. É mais simples de provocar que a vibração aleatória, mas não é considerado um estresse efetivo para suscitação de falhas.
 - Poeira (sujeira): quando acumulada sobre a superfície de uma placa de circuito impresso, pode diminuir a rigidez elétrica da placa e, quando presente nas lâminas de um ventilador de resfriamento, atuar como um isolante térmico pelo fato

de obstruir o fluxo de ar, reduzindo a dissipação de calor dos componentes da placa e causando falhas térmicas nos sistemas (NASCIMENTO IRIAS, 2018).

- Umidade: os ensaios de umidade são realizados em uma câmara que controla a umidade relativa do ar a partir da medição de temperaturas de bulbo seco e molhado. Geralmente, expõe efeitos causados por corrosão e contaminação dos produtos. É muito importante também para medir o nível de revestimento e vedação do produto.
- Elétrico:
 - Ciclagem de potência: é realizado a partir do liga-desliga cíclico do produto em intervalos pré-determinados. É muito utilizado para simular as temperaturas de junção em semicondutores.
 - Marginalização de tensão: variação da tensão de alimentação acima dos valores nominais do produto. Este estresse ajuda a verificar a resistência a sobretensões e surtos elétricos que podem ocorrer durante a utilização do produto.

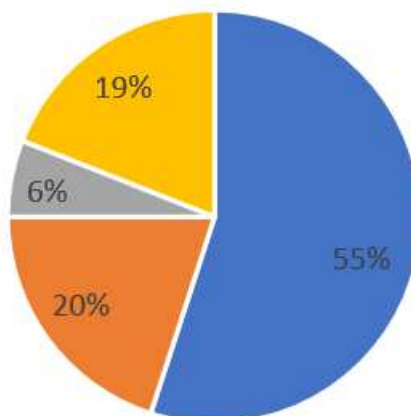
Não há uma padronização na maneira de utilizar os estresses ambientais para estudar o comportamento e também suscitar falhas em um produto. O porquê disto é justamente a variabilidade físico-química dos materiais utilizados para fabricar cada produto, além das distintas finalidades que cada um possui. Logo, há mecanismos de falhas diferentes ocasionados por estresses ambientais diferentes. Luca (2004) explica que a aplicação conjunta de mais de um tipo de estresse aumenta a probabilidade de encontrar uma quantidade maior de mecanismos de falhas. Todavia, isso é bastante caro e pode ser complicado de se implementar. Além disso, embora possa existir concomitantemente mais de um mecanismo de falha, há sempre um protagonismo de apenas um ou dois, os quais ajudam a estabelecer a confiabilidade do produto.

No âmbito dos equipamentos eletrônicos, foi observado que o estresse térmico é o principal gatilho para a degradação dos componentes destes produtos e, conseqüentemente, para a redução da eficiência energética, causando perdas econômicas e, no pior caso, falha do sistema (CALLEGARI; GUSMAN, 2020). Na figura 4 é possível visualizar a distribuição das principais fontes de estresse em equipamentos eletrônicos.

O efeito do calor excessivo (hipertermia) compromete a operação normal do equipamento e encurta a vida útil destes produtos. Por outro lado, temperaturas baixas (hipotermia) levam a um projeto superdimensionado do produto, o que é completamente irracional do ponto de vista econômico (DRAGOMIR; ADAM, 2014). Por isso que os ensaios térmicos são tão importantes, pois através deles é possível detectar e corrigir eventuais falhas de projeto ou desenvolvimento, muito antes dos produtos apresentarem defeitos após um longo período de operação.

Figura 4 – Fontes de estresse em equipamentos eletrônicos.

■ Temperatura Estacionária e Cíclica ■ Vibração/Choque
■ Contaminantes e Poeira ■ Umidade



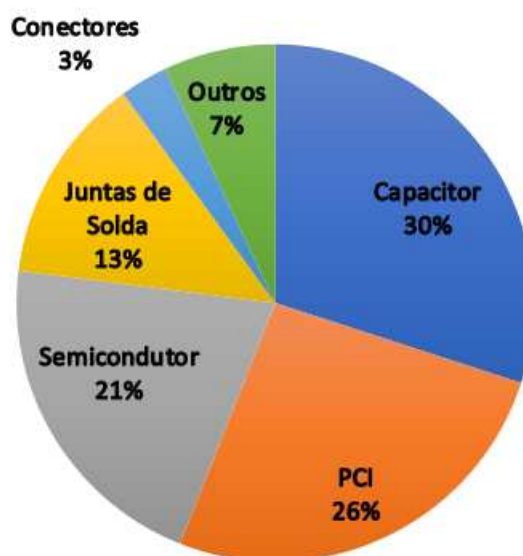
Fonte: Adaptado de Wang, Liserre e Blaabjerg (2013).

Os principais mecanismos de falhas em equipamentos e componentes eletrônicos provocados pelo estresse térmico são:

- **Eletromigração:** é o deslocamento dos átomos em um condutor ocasionado pela passagem da corrente elétrica. Nas placas eletrônicas, isso acontece porque há um aumento substancial da corrente elétrica do circuito causado pelo encapsulamento de alta densidade (miniaturização) dos componentes. Ademais, observou-se que o aumento na taxa de eletromigração tem relação direta com o aumento de temperatura dos componentes da placa (THADURI, 2013).
- **Fadiga térmica:** é o desenvolvimento de tensões e deformações no material do componente devido a imposição de gradientes de temperaturas resultantes da aplicação repetitiva de ciclos térmicos (BRANDIM, 2009). Em componentes eletrônicos isso se manifesta a partir de tensões no encapsulamento, seja plástico ou metálico, e também em suas interconexões devido a diferenças entre os coeficientes de expansão térmica (MATOS, P. C. de; CORRÊA, 2016).
- **Migração por estresse:** é a formação de espaços vazios (lacunas) que ocorrem na metalização de circuitos integrados. Isso é causado, principalmente, pelo aumento de temperatura e diferença do coeficiente de expansão térmica dos materiais que compõem cada componente. As consequências desse fenômeno são: rompimento de trilhas e falhas de circuito aberto (THADURI, 2013).

No estudo feito por Wang, Liserre e Blaabjerg (2013), os capacitores eletrolíticos e os semicondutores, principalmente, os dispositivos de chaveamento (transistores de potência), são apontados como os dispositivos mais vulneráveis aos constantes ciclos térmicos que ocorrem nos equipamentos eletrônicos durante um regime de operação normal, como ilustrado na figura 5.

Figura 5 – Dispositivos mais suscetíveis à falhas em equipamentos eletrônicos.



Fonte: Adaptado de Wang, Liserre e Blaabjerg (2013).

Como já foi dito, os gradientes de temperatura podem causar desconexões nas áreas de contato dos materiais que compõem esses dispositivos, além de outros problemas como:

- Desvio de parâmetros (*drift*): mudanças nos parâmetros elétricos (tensão, corrente, frequência) do componente, implicando em degradação e instabilidade operacional destes.
- Aumento da corrente de fuga: em semicondutores, o aumento da temperatura está diretamente relacionado ao aumento da corrente de fuga e, conseqüentemente, aumento da potência dissipada. Tudo isso acaba resultando no crescimento na temperatura de junção e, no pior caso, leva a uma falha no dispositivo (NASCIMENTO IRIAS, 2018).
- *Electrical overstress* (EOS): trata-se de qualquer estresse elétrico que suplante os limites, máximo e mínimo, de tensão de um dispositivo, levando-o à falha.

2.2.2 Técnicas de ensaios

Um produto robusto é aquele que funciona corretamente e não falha sob variações das condições do produto e da aplicação. Nesse sentido, o método de validação da robustez (RV, do inglês *robustness validation*) visa demonstrar que um produto desempenha a(s) sua(s) função(ões) prevista(s) com margem suficiente de acordo com a *mission profile* estabelecida para o seu tempo de vida especificado (ZVEI, 2013). Este método, referenciado em ZVEI (2013), é descrito para aplicações de desenvolvimento e qualificação de unidades de controle eletrônico em automóveis. Entretanto, ZVEI (2013) ressalta que o método é facilmente adaptável para uso em mecatrônica, sensores, atuadores e chaves eletrônicas.

Historicamente, o RV foi resultado da necessidade da indústria automobilística conhecer mais aprofundadamente as relações entre os modos de falhas, mecanismos de falhas e a *mission profile* relacionados aos módulos eletrônicos embarcados nos veículos. Gradualmente, buscou-se substituir o padrão de *test to pass*, utilizados em larga escala e nas fases finais do desenvolvimento, por uma metodologia de prevenção de falhas durante todo o ciclo de vida do produto, começando com a concepção do projeto e o levantamento de requisitos. Com isso, fabricante e consumidor obtêm dados de engenharia mais relevantes e conseguem atingir metas de melhoria da qualidade, redução de custos e encurtamento do time-to-market (ZVEI, 2013).

O processo de validação da robustez avalia a adequação de um produto para utilização no ambiente e nas condições de operação para as quais foi projetado. Isso é feito, primariamente, por meio de ensaios ambientais que mostram relações de causa e efeito de várias condições e fatores de estresse (cargas) que o produto experimentará durante seu ciclo de vida. Neste contexto, os ensaios ambientais acelerados por estresse são uma das ferramentas utilizadas para a aplicação da RV, pois, pelo fato de anteciparem a ocorrência de falhas nos componentes de um produto, permitem o conhecimento dos modos de falhas e as características de vida do produto.

Existem dois grupos de ensaios ambientais: os qualitativos e os quantitativos. Os qualitativos visam identificar os modos e mecanismos de falhas de um produto, permitindo a eliminação e correção dos defeitos inerentes do produto (NETO, 2014). Estes ensaios colhem dados que mostram se o produto atingiu (ou não) o desempenho projetado ou a vida pré-estabelecida (MELO NOGUEIRA, 2016). Os quantitativos levantam as características de vida de um componente, sistema ou produto dentro das condições normais de uso, provendo informações confiáveis, incluindo a probabilidade de falha de um produto nas condições ensaiadas. São muito utilizados quando existe a necessidade em medir a confiabilidade de um produto dentro de um período de tempo mais exíguo.

Concluindo, todas as técnicas de ensaios ambientais visam a melhoria e a garantia da confiabilidade. A melhoria se dá pelo aumento das margens de segurança

do produto através da eliminação das deficiências e erros de projeto, prolongando assim a vida útil. A garantia, por sua vez, é alcançada quando se elimina os produtos (componentes) defeituosos e se corrigem os processos da manufatura antes da comercialização e entrega, implicando assim na diminuição da taxa de falhas no período de vida inicial do produto.

2.2.3 Ensaios térmicos

A implementação de um ensaio térmico é realizada com o cumprimento de algumas tarefas que devem ser bem elaboradas para não levarem a erros de procedimento, pois isso poderia levar a resultados deturpados e, conseqüentemente, a uma tomada de decisão ruim por parte da empresa. Assim, apesar de não existirem receitas prontas, até por conta das características únicas de cada produto e processo de manufatura, há na literatura questões básicas que devem ser respondidas, pelo menos, como ponto de partida (DOD, 1995). São elas:

- Quais são os objetivos do ensaio?
- Quais equipamentos serão utilizados para a montagem da infraestrutura do ensaio? Como será feito o registro de dados e o controle das variáveis de interesse?
- Quais são os custos do ensaio? Como torná-lo mais economicamente eficiente?
- Quais são as garantias de que o ensaio está atingindo os objetivos definidos?
- Quais ações preventivas e corretivas serão tomadas? As falhas observadas estão dentro do esperado?

2.3 COMPRESSOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Os sistemas de refrigeração são vastamente utilizados para fins domésticos e industriais como, por exemplo, conforto térmico (ar condicionado), condicionamento térmico para conservação de produtos perecíveis (geladeiras, freezers), armazenamento por longo prazo (câmaras frias) e resfriamento rápido (túnel de congelamento). Como citado por Ávila (2011), esses sistemas representam uma grande parcela no consumo de energia do Brasil, sendo que em 2007 essa porcentagem chegava a um valor médio de 42% apenas no consumo doméstico, o qual representava cerca de 24% do consumo energético total no Brasil. Uma das principais razões para o alto consumo energético por parte dos sistemas de refrigeração apontada por Ávila (2011), é o modo de operação do componente mais crucial destes sistemas: o compressor.

O compressor é um dos elementos principais dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor e é o responsável por forçar a circulação do fluido refrigerante, permitindo, assim, a execução adequada do ciclo de refrigeração. Ele responde por

aproximadamente 80% da energia consumida nestes sistemas (LAGO, 2016). Segundo Ávila (2011), a maioria dos compressores presentes, principalmente, nas residências brasileiras possuíam, à época, um controle liga-desliga, no qual o compressor funciona com velocidade fixa independentemente da condição externa ou do carregamento térmico do sistema de refrigeração, elevando, assim, o consumo energético desses sistemas.

A premência na utilização mais consciente de energia e no desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, direcionou a indústria de refrigeração à realização de investimentos significativos em pesquisa e soluções que pretendam obter a maximização da eficiência energética. Isso se deu pelo estudo de novas alternativas de trocadores de calor, compressores e dispositivos de expansão para melhoramento do ciclo de refrigeração, permitindo, assim, a aplicação de técnicas de controle que os tornem mais eficientes (ÁVILA, 2011; LAGO, 2016).

O principal exemplo disso foi o desenvolvimento dos compressores com velocidade variável. Afinal, como demonstrado por Qureshi e Tassou (1995), a maneira mais eficiente para controlar a capacidade de refrigeração do sistema se dá pela variação de velocidade do motor elétrico que aciona o compressor, ou seja, para uma condição de baixa carga, o sistema de refrigeração reduz a velocidade do motor, adaptando-se à carga, implicando redução de perdas por fricção, queda da razão de compressão e menos potência absorvida da rede (LAGO, 2016). Desta forma, se adéqua a capacidade de refrigeração do sistema à condição de carregamento térmico corrente. Outras vantagens desses compressores incluem um controle mais preciso da temperatura dos compartimentos refrigerados, menores níveis de ruído e redução no consumo de energia em até 40% quando comparados aos sistemas convencionais com velocidade fixa (OLIVEIRA, 2019).

2.4 CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

Apesar dos diferentes aspectos construtivos e operacionais, os CF têm em comum três partes principais: um circuito retificador de tensão (CA para CC), um circuito intermediário e um circuito inversor de tensão (CC para CA). Aqui, é importante apontar que, apesar do CF ser vulgarmente chamado de inversor de frequência, o termo tecnicamente mais correto é conversor de frequência, pois o termo inversor refere-se apenas ao circuito que converte CC em CA, sendo que o conversor de frequência faz a conversão da frequência de entrada para outra definida pelo operador.

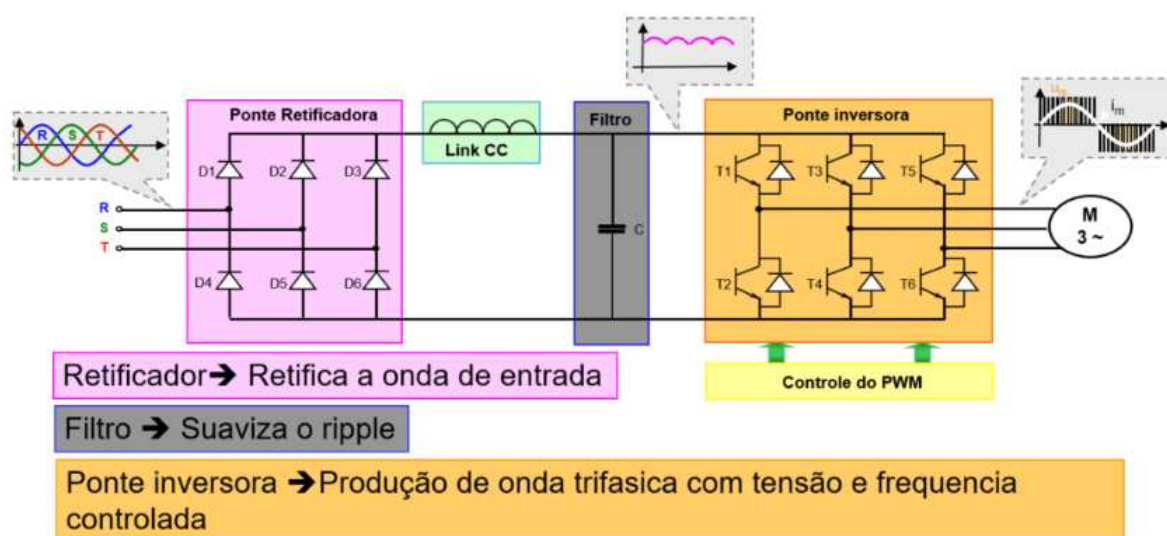
O circuito retificador de tensão geralmente é constituído por uma ponte de diodos (ponte retificadora) que transforma a tensão alternada da rede que alimenta o CF em tensão contínua. Como os diodos são semicondutores, a partir de uma sequência de chaveamentos para cada fase da tensão alternada, obtém-se uma forma de onda contendo apenas os semiciclos positivos das fases, ou seja, uma tensão

contínua pulsante. Esta tensão é denominada barramento CC e é filtrada por um banco de capacitores que diminuem a oscilação (efeito *ripple*) da onda retificada, tornando-a mais constante.

O barramento CC alimenta um circuito inversor formado por transistores de potência (IGBTs ou MOSFETs) que convertem a tensão CC em um sinal alternado com tensão e frequência variáveis. O controle do circuito inversor se dá pelo circuito de comando, de forma a obter um sistema de tensão alternada onde as frequências estão defasadas em 120° . Para isso, utiliza-se um microcontrolador que aciona um conjunto de seis transistores por um período de tempo e frequência determinados, através do método de modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *pulse width modulation*). Assim, a velocidade de rotação do motor aumenta ou diminui proporcionalmente à variação da razão cíclica do sinal PWM. Logo, quanto maior a frequência de chaveamento, mais senoidal será a forma de onda de saída e menores serão as pulsações de torques e as perdas (FRANCHI, 2009).

Os circuitos supracitados do CF estão ilustrados na figura 6.

Figura 6 – Funcionamento do conversor de frequência.



Fonte: Pedra (2020).

2.5 AUTOMAÇÃO DE BANCADAS

Como já foi citado, a indústria utiliza muitas técnicas de ensaios durante as etapas de desenvolvimento de um produto. Na área de refrigeração, por exemplo, é comum a realização de ensaios para avaliar o desempenho dos compressores em condições nominais de operação ou simplesmente para caracterizar o comportamento dos componentes de um sistema de refrigeração em diferentes cenários.

Como os procedimentos para o ensaio não podem ser feitos de maneira precária ou suscetível a falhas porque causam erros de avaliação e, conseqüentemente, afetam até mesmo na tomada de decisão da empresa, a qual pode realizar gastos desnecessários por conta de uma avaliação errada, é muito importante o investimento em bancadas de ensaio devidamente equipadas com sistemas capazes de monitorar e controlar as condições do ensaio da forma mais automatizada possível. Com isso, pretende-se realizar ensaios de forma automática e em tempo inferior à operação manual. Segundo Schmitz (2016), a automação dos ensaios traz como principais vantagens:

- resultados de ensaio independentes do operador, melhorando a repetibilidade;
- menores incertezas de medição obtidos por meio do uso de transmissores e sistemas de aquisição de dados;
- redução dos tempos de ensaio devido à utilização de atuadores e acionamentos mais rápidos e controlados automaticamente;
- geração de relatórios automática, impedindo erros no registro dos resultados.

3 BANCADA DE ENSAIOS TÉRMICOS

Este capítulo detalha os materiais utilizados para desenvolvimento da bancada de ensaio térmico. Na seção 3.1 são apresentados os componentes do dinamômetro através do qual são medidas as grandezas do motor elétrico em distintas condições operacionais. A seção 3.2 aborda os principais equipamentos de medição e aquisição de dados utilizados na bancada. A seção 3.3 apresenta a estrutura mecânica e também aborda os componentes de instrumentação e controle da estufa térmica desenvolvida para ensaiar o conversor. Na seção 3.4 é apresentado o ambiente de programação utilizado para implementar todas as rotinas de aquisição, controle e documentação dos dados dos ensaios térmicos. Finalmente, na seção 3.5 é apresentada a arquitetura geral da bancada de ensaio térmico.

3.1 DINAMÔMETRO PARA ENSAIO DE MOTORES

O desenvolvimento de motores elétricos geralmente inclui a realização de diversos tipos de ensaios que visam emular as condições de operação vigentes nas aplicações em que se empregam esses equipamentos. Nesse cenário, destacam-se os ensaios de motores com dinamômetros – sistemas formados por uma combinação de hardware e software que simula uma determinada carga – permitindo análises sobre seu funcionamento em determinada condição, o que inclui medições do torque e da frequência rotacional de operação (MACHADO, 2023). Esses dinamômetros possuem dois modos de operação: ativo (modo de acionamento) e passivo (modo absorção).

O dinamômetro em modo passivo opera a partir da geração de um torque de arrasto controlado. Este torque tem a função de restringir o movimento rotacional, sendo uma espécie de freio. O trabalho atual utilizará um dinamômetro em modo passivo para ensaio de motor de corrente contínua desenvolvido por Machado (2023). Desta maneira, serão reutilizados alguns equipamentos e infraestruturas voltadas à instrumentação e controle implementadas por Machado (2023).

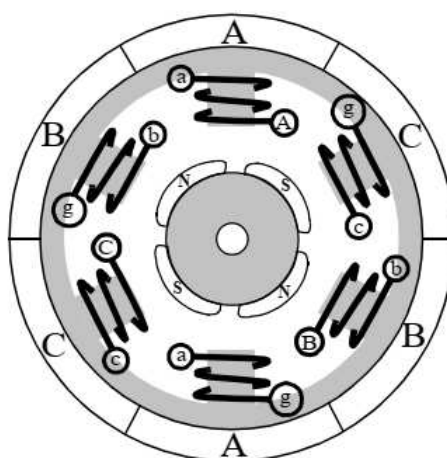
3.1.1 Motor CC sem escovas

Os motores de corrente contínua sem escovas (BLDC, do inglês *brushless direct current*) são uma classe de motor síncrono de corrente contínua cujo acionamento é realizado através da comutação de uma fonte de alimentação, energizando os enrolamentos da fase em função da posição do rotor (MACHADO, 2023).

Este trabalho utilizou um motor BLDC com dois pares de polos alocados no exterior do rotor. O arranjo construtivo do motor BLDC é mostrado na figura 7. Ademais, esse motor possui três enrolamentos conectados em uma ligação tipo estrela, na qual apenas duas fases são ligadas concomitantemente.

A comutação da alimentação nos enrolamentos das fases é feita por um conversor de frequência. No caso do motor supracitado, o conversor mede a posição do rotor pela técnica de controle de posição *sensorless*, na qual determina-se a posição através de medidas elétricas do motor, como tensão e corrente nos terminais. Assim, com esses valores, estima-se a posição do rotor a partir da variação da indutância no enrolamento, da estimação do fluxo magnético e da força contra-eletromotriz (FCEM) (SINGH, B.; SINGH, S., 2009).

Figura 7 – Motor BLDC de três fases.



Fonte: Retirado de Machado (2023).

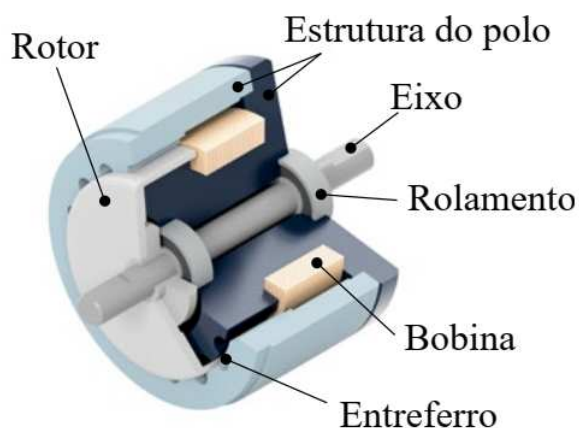
3.1.2 Freio de histerese

A aplicação da carga mecânica ao eixo do motor é feita através de um freio com controle elétrico de potência. O modelo utilizado é o freio de histerese AHB-1, da fabricante Magtrol, o qual possui um torque suave, de fácil controle e independente da velocidade angular.

Segundo Machado (2023), o efeito da histerese se dá pelo controle de torque através da utilização de um polo reticulado e um conjunto rotor/eixo fixados em conjunto, mas sem contato físico. Assim, à medida em que uma força magnetizante é aplicada sobre a estrutura do polo, o entreferro torna-se um concentrador de linhas de fluxo magnético e, com isso, causa uma limitação magnética no rotor e, conseqüentemente, há um efeito de frenagem no eixo do motor acoplado ao freio. O controle do torque é feito através do controle da corrente contínua que passa por uma bobina de campo presente no freio, a qual magnetiza a estrutura do polo. Assim, dentro de uma faixa especificada, quanto maior o valor da corrente elétrica aplicada ao freio, maior o efeito de frenagem.

A estrutura do freio de histerese e as especificações operacionais da fabricante para o modelo utilizado neste trabalho podem ser vistas na figura 8 e na tabela 1, respectivamente.

Figura 8 – Estrutura do freio de histerese.



Fonte: Retirado de Machado (2023).

Tabela 1 – Especificações técnicas freio AHB-1.

Especificação	Valor
Torque mínimo na corrente nominal	1 N.m
Velocidade angular máxima	25000 rpm
Momento de inércia externa	0,876 kg.cm ²
Alimentação	24 V
Corrente nominal	400 mA
Potência	9,6 W
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C

Fonte: Machado (2023).

3.1.3 Fonte de alimentação programável

Para acionar e controlar o freio, foi utilizada a fonte GEN600-1,3 da fabricante TDK-Lambda, mostrada pela figura 9, a qual possui faixa nominal de corrente compatível com o freio, alta resolução nas saídas de tensão e corrente, além de uma interface de comunicação com o computador através de um barramento de interface de uso geral (GPIB, do inglês *General Purpose Interface Bus*). As especificações técnicas da fabricante estão detalhadas na tabela 2 .

Figura 9 – Fonte TDK Lambda GEN600-1,3.



Fonte: Retirado de Lambda (2023).

Tabela 2 – Especificações técnicas fonte GEN600-1,3.

Especificação	Valor
Tensão de saída	0 V a 600 V
Corrente de saída	0 A a 1,3 A
Máxima potência	780 W
Pulsações e ruídos para tensão	≤ 60 Vrms
Resolução da tensão de saída	72 mV
Resolução da corrente de saída	320 μ A
Temperatura de trabalho	0 °C a 50 °C
Modo de trabalho	de tensão estável, tensão constante

Fonte: Lambda (2023).

3.1.4 Conversor de frequência

Para a realização deste trabalho, a empresa Nidec forneceu uma amostra do conversor de frequência utilizado em algumas linhas de compressores herméticos fabricados pela mesma empresa para aplicações de refrigeração doméstica e industrial. Contudo, ressalta-se que o escopo deste trabalho não abrange o sistema de refrigeração em si, ou seja, o conversor será ensaiado na bancada desenvolvida para ensaios térmicos em conjunto com os demais módulos da bancada, mas sem a presença do compressor e dos demais elementos de um sistema de refrigeração típico.

3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE SINAIS

A definição das condições operacionais do ensaio térmico prescinde da aquisição dos valores das variáveis de processo que se pretende controlar. Assim, é necessária a medição das grandezas elétricas relacionadas ao dinamômetro (motor e freio) e conversor, além das temperaturas relacionadas à estufa e aos componentes da placa do conversor de frequência sob ensaio. Para isso, foram utilizados equipamentos de medição específicos para instrumentação e controle, os quais são apresentados nas subseções 3.2.1 e 3.2.2 .

3.2.1 Medidor de potência

As medições das grandezas elétricas (tensão, corrente e potência) do motor e do conversor são feitas pelo medidor de potência digital WT230 da fabricante Yokogawa. Esse medidor possui baixa incerteza de medição e atende a uma vasta faixa de frequências, podendo medir sinais de CC e CA de 0,5 Hz a 100 kHz com uma incerteza de medição de até 0,2%. Além disso, tem uma alta velocidade de aquisição e um tamanho compacto, ideal para utilização em bancadas de ensaios de motores. Então, com o WT230 são medidas as correntes e as tensões das fases do motor ensaiado no dinamômetro, além das potências de entrada do conversor e do motor. Analogamente ao que ocorre para a fonte de corrente contínua utilizada para controlar o freio, o WT230 também se comunica com o computador através de uma interface GPIB, o que facilita enormemente o processo de automação dos ensaios.

Figura 10 – Medidor de potência WT230.



Fonte: Retirado de Yokogawa (2023).

As especificações técnicas do medidor de potência WT230 são apresentadas na tabela 3:

Tabela 3 – Especificações técnicas do medidor de potência WT230.

Especificação	Valor
Acurácia básica	0,1%
Entrada máxima com acurácia garantida	26 A
Tensão de base e acurácia de corrente	0,1 % (leitura) e +0,1% (de range)
Faixa de frequência	CC (0,5 Hz até 100 kHz)
Tempo de integração do temporizador	10000 horas máximas
Resolução	1 s
Taxa de comunicação serial (RS-232-C)	1200 a 9600 bps

Fonte: Yokogawa (2023).

3.2.2 Unidade de aquisição, comutação e registro de dados

Para realizar a aquisição dos valores de temperaturas dentro da estufa térmica, dos componentes do dinamômetro (realizada por sensores tipo Pt100) e dos componentes da placa do conversor de frequência (realizada por termopares tipo T) utilizou-se o *datalogger* 34972A da fabricante Keysight/Agilent em conjunto com o módulo multiplexador 34901A, o qual disponibiliza até 20 canais para medição de temperatura. A conexão do instrumento com o computador é feito via porta serial universal (USB, do inglês *Universal Serial Bus*). A figura 11 mostra a parte frontal, na qual o usuário realiza as configurações de medição e aquisição, e a parte traseira na qual se inserem os módulos multiplexadores que disponibilizam os canais para medição de temperatura.

Figura 11 – Agilent 34972A.



Fonte: Retirado de Agilent (2023a).

Machado (2023) destaca que a utilização deste módulo tem como vantagem a possibilidade de utilizar a técnica de medição de temperatura a 4 fios com Pt100 e fácil configuração para medição via termopares tipo T, com referência interna para a junta fria. Segundo a fabricante Agilent (2023b), os principais recursos oferecidos pelo 34972A são:

- mainframe de 3 slots com USB e LAN;
- oito módulos plug-in de comutação e controle diferentes;
- condicionamento integrado de sinais que mede termopares, termorresistores (RTD, do inglês *resistance temperature detector*) e termistores, tensão e corrente CC/CA, resistência, frequência e período;

3.3 ESTUFA TÉRMICA

Para realizar o ensaio térmico do conversor de frequência, primeiramente, é necessário colocá-lo em um ambiente com temperatura controlada e com bom isolamento térmico, de forma que seja possível estabelecer o patamar de temperatura que emulará o cenário de aplicação.

Nesse contexto, inicialmente, foi definida a utilização de uma estufa térmica industrial com controle de temperatura PID disponível no LIAE. Entretanto, como a montagem da bancada de ensaios térmicos inclui a realização de conexões entre o computador com as placas de aquisição e com os instrumentos de medição, os quais estão ligados aos componentes do conversor que está dentro da estufa em um local separado, seria necessário fazer o deslocamento desta estufa para este local e, por causa do tamanho/peso da estufa e do leiaute físico do laboratório, isto demandaria um significativo trabalho logístico. Por conta disso, optou-se por implementar artesanalmente uma estufa. Para isso, foi adaptada a estrutura de uma caixa de equalização disponível no LIAE mostrada na figura 12.

Figura 12 – Caixa de equalização utilizada para construção da estufa térmica.

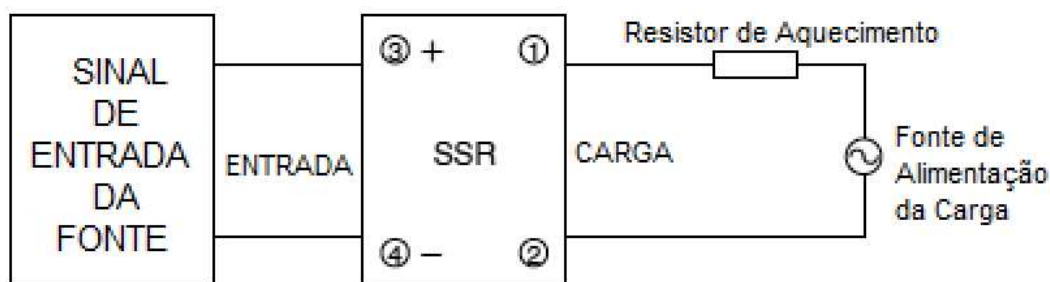


Fonte: Autoria própria.

Além da caixa de equalização, que serve como um invólucro hermético para a estufa, foi preciso definir o dispositivo responsável pelo aquecimento. A primeira alternativa foi a utilização de resistores de potência. Porém, para evitar a montagem de circuitos elétricos adicionais para controle de corrente, optou-se pelo uso de um resistor elétrico tubular tipo U, muito utilizado em fornos de padaria e em restaurantes e que atende aos requisitos de temperatura do ensaio térmico. Com isso, é possível

controlar, via software, a carga resistiva pelo envio de um sinal de tensão aos terminais 3 e 4 de um relé de estado sólido (SSR, do inglês *solid state relay*) que, nos terminais 1 e 2, chaveia o resistor de aquecimento à fonte de alimentação, como pode ser visto na figura 13.

Figura 13 – Circuito para controle de temperatura do forno.



Fonte: Adaptado de Industry (2023).

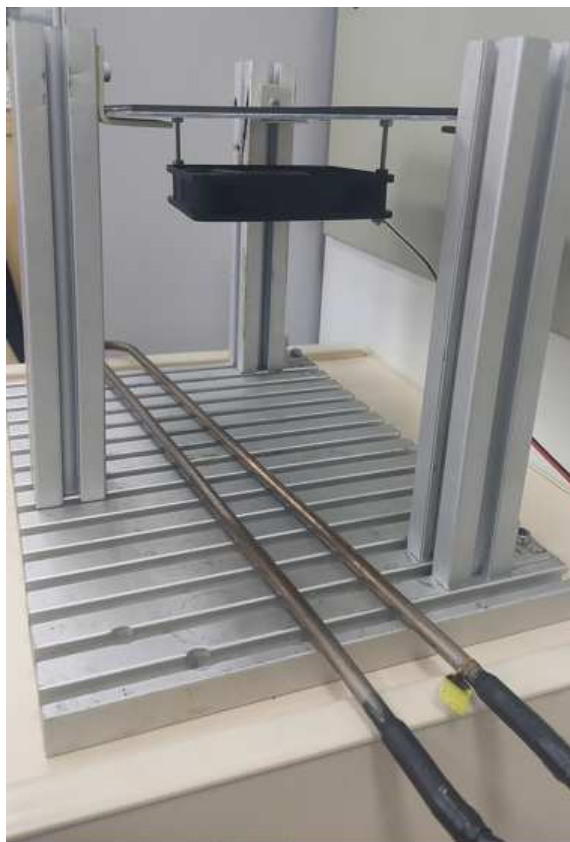
3.3.1 Estrutura mecânica

Outro ponto importante consistiu na construção de uma plataforma ajustável para colocar o conversor de frequência dentro da estufa térmica. Para isso, foram utilizados alguns perfis de alumínio disponíveis no laboratório. Logo, acima da base da estrutura coloca-se o resistor de aquecimento e, mais acima, fica a base para colocar o conversor. Além disso, seguindo as recomendações dadas pela Nidec, adicionou-se, sob a base na qual coloca-se o conversor, um pequeno ventilador para realizar a convecção forçada, como é mostrado na figura 14, melhorando a homogeneização térmica no interior da estufa. O ventilador foi retirado de uma fonte de computador e é alimentado externamente por uma fonte chaveada 12 V. A implementação do controle de temperatura da estufa térmica é mostrada na seção 4.1.

3.3.2 Placa de Aquisição

A placa de aquisição USB6341 da fabricante National Instruments disponibiliza canais de entrada/saída digitais e analógicas controláveis por software. Este trabalho a utilizou para o acionamento de dois relés de estado sólido: o primeiro para chaveamento do resistor de aquecimento da estufa térmica utilizando a técnica de PWM, ou seja, envia-se uma tensão para o relé durante um tempo determinado na programação, causando o aquecimento do resistor, e o segundo para acionar a solenoide que permite o resfriamento do freio de histerese com ar comprimido. A figura 15 e a tabela 4 mostram a placa de aquisição e as suas especificações técnicas, respectivamente.

Figura 14 – Base mecânica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – USB-NI 6341.



Fonte: Retirado de Instruments (2023).

Tabela 4 – Especificações técnicas da placa USB6341.

Especificação	Valor
Número máximo de canais de entradas analógica <i>single ended</i>	16
Resolução da entrada analógica	16 bits
Número de canais de saídas analógicas	2
Conector de barramento	USB 2.0
Máxima taxa de amostragem	500 kS/s
Máxima taxa de atualização	900 kS/s
Número de canais digitais bidirecionais	24
Número de contadores/temporizadores	4
Tamanho Buffer FIFO da entrada analógica	2047 amostras
Número máximo de canais de entradas analógicas diferenciais	8

Fonte: Instruments (2023).

3.4 RECURSOS DE SOFTWARE PARA CONTROLE SUPERVISÓRIO

A automação da bancada de ensaios térmicos utilizou, como base de implementação das funções de aquisição e controle, o software programável de instrumentação virtual Labview, da National Instruments. Dentre as inúmeras vantagens oferecidas pelo Labview, a que mais se destaca é a sua fácil integração e comunicação com os módulos físicos de aquisição e controle. Além disso, o Labview permite uma programação altamente modularizada, execução de lógicas paralelas e fácil expansão e escalonamento do código.

O ambiente de programação Labview possui duas telas principais de desenvolvimento: painel frontal e o diagrama de blocos. O painel frontal é a interface com o operador, ou seja, é o *front-end* da aplicação, pela qual é possível desenhar, monitorar e controlar os instrumentos através de comandos via teclado e mouse. O diagrama de blocos, por sua vez, é o *back-end*, ou seja, é onde são implementadas as lógicas de programação dos instrumentos virtuais.

Para este trabalho, o aplicativo para ensaio térmico foi desenvolvido de forma totalmente modularizada, ou seja, cada rotina e processo foi dividido de maneira que se possa testá-los independentemente dos demais, facilitando a manutenção do código. Assim, há rotinas e sub-rotinas voltadas somente para comunicação, outras para aquisição de sinais, salvamento e exportação de dados, sequências de execuções e controle.

O código da aplicação utiliza uma estrutura conhecida como *flat sequence*, própria da linguagem Labview, onde se estabelece em cada quadro de execução a sequência do programa. Assim, no primeiro frame, são instanciadas as comunicações e todas as variáveis. No frame do meio, está o loop principal, ou seja, é onde são executadas todas as rotinas de aquisição, controle e salvamento de dados. No frame

final está a paralisação e êxito do programa, o qual é ativado por um botão de *stop* disponibilizado no painel frontal. O apêndice B fornece maiores detalhes de implementação.

3.5 BANCADA COMPLETA

Agora que já foram apresentados todos os componentes da bancada de ensaios térmicos, é possível explicar, através do diagrama mostrado na figura 16, como se dá a integração entre todos eles. Salienta-se que o diagrama visa representar o arranjo, leia-se localização física e pontos de conexões, utilizados na bancada.

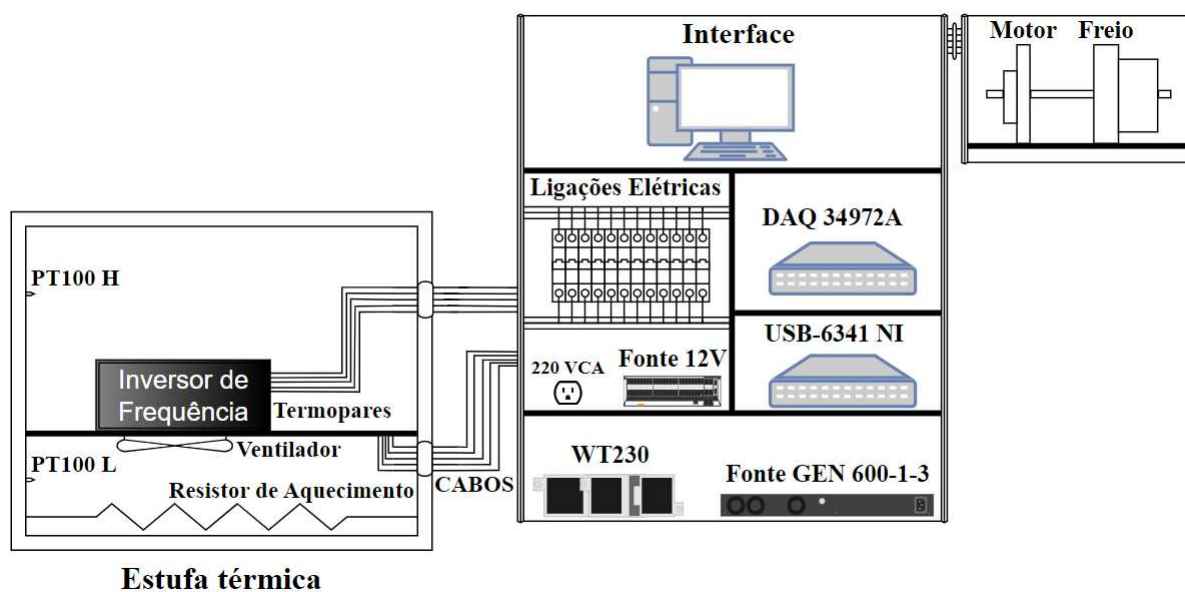
Começando pela estufa térmica, há em sua base um resistor de aquecimento com dimensão um pouco menor que o comprimento da estufa, cujas dimensões são 62 cm × 52 cm × 40 cm (comprimento, altura e largura). O invólucro de plástico contendo o conversor é colocado em cima da base vista na figura 3.3.1. Para adquirir um valor médio de temperatura dentro da estufa, foram utilizados dois Pt100, um alocado próximo à tampa da estufa e outro próximo ao resistor de aquecimento. Um fato importante a ser ressaltado é que, por conta da espessura dos cabos de extensão utilizados para conectar os termopares do conversor ao módulo de aquisição, foi necessário realizar um furo adicional na parte superior da carcaça da estufa. Com isso, separam-se os cabos relacionados ao controle de temperatura da estufa destes termopares.

Na parte central do diagrama está o raque utilizado para alocação dos equipamentos e montagens dos circuitos elétricos, possuindo a seguinte disposição:

- Patamar superior: o computador com o aplicativo de ensaio térmico em execução no Labview.
- Patamar intermediário (lado esquerdo): as fontes de alimentação e os disjuntores;
- Patamar intermediário (lado direito) e final: os instrumentos de aquisição de dados e a fonte de CC para controle do freio.

Finalmente, há a bancada de ensaios do motor BLDC, o dinamômetro supracitado, onde estão montados o conjunto motor-freio de histerese, a mangueira de resfriamento por ar comprimido e também os sensores de temperatura Pt100 supracitados.

Figura 16 – Arquitetura da bancada de ensaios térmicos.



Fonte: Autoria própria.

4 AUTOMAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS TÉRMICOS

Este capítulo detalha os métodos empregados para implementação das malhas de controle utilizadas para automatizar a bancada de ensaios térmicos. Na seção 4.1, é demonstrada a identificação do modelo dinâmico da estufa térmica, a partir do qual estimou-se uma função de transferência e, posteriormente, projetou-se um controle de temperatura do tipo proporcional integral (PI).

Na seção 4.2, é detalhado em 4.2.1, o levantamento dos modelos dinâmicos que correlacionam as temperaturas dos componentes da placa do conversor de frequência com a corrente enviada ao freio de histerese. Afinal, pretende-se acelerar o aquecimento destes componentes, até os respectivos limites de temperaturas, através do aumento da carga imposta ao motor. Finalmente, em 4.2.2, é abordado o projeto do controlador de temperatura dos componentes.

4.1 CONTROLE DE TEMPERATURA DA ESTUFA TÉRMICA

Antes de iniciar o levantamento do modelo dinâmico da estufa, foi realizado um teste preliminar visando conhecer os limites de operação do resistor de aquecimento. Para isso, a carga resistiva foi colocada dentro da estufa (fechada) e conectada à rede elétrica. A temperatura dentro da estufa foi medida por um sensor Pt100 preso na parede da estufa em uma posição latitudinal ligeiramente superior àquela do resistor, como ilustrado na figura 16.

A temperatura dentro da estufa, após quase três horas de teste, assentou em 111 °C. Portanto, como os ensaios térmicos são realizados dentro da faixa de 50 °C a 75 °C, constatou-se que o resistor atende com folga os requisitos da bancada. Na sequência, em 4.1.1 são apresentadas as etapas seguidas para levantar o modelo dinâmico e em 4.1.2 é mostrada a parametrização do sistema de controle de temperatura da estufa térmica.

4.1.1 Levantamento do modelo dinâmico

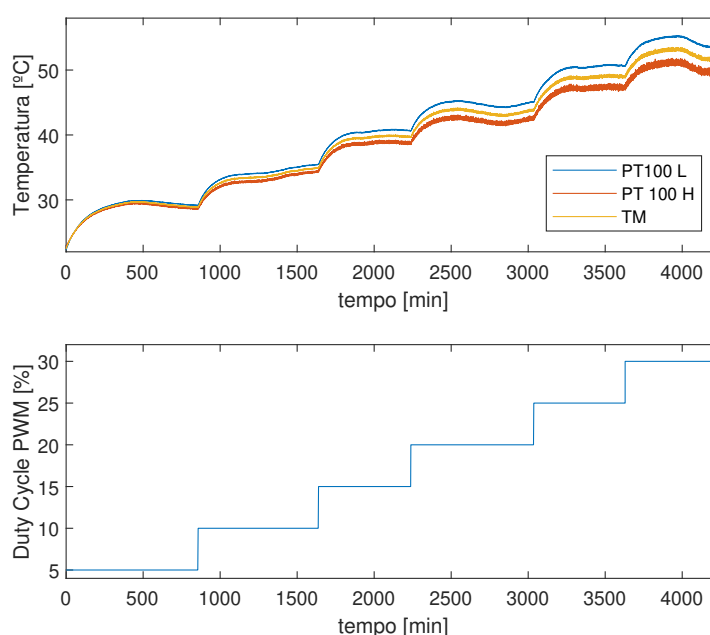
O controle de temperatura da estufa térmica foi feito mediante o envio de um sinal de tensão, por parte da placa USB-NI 6341, ao relé de estado sólido que chaveia o resistor de aquecimento à rede elétrica, como foi mostrado na figura 13. Assim, a identificação do modelo térmico da estufa foi feita através da resposta ao degrau, na qual a variável manipulada (MV, do inglês *manipulated variable*) é a porcentagem da razão cíclica do sinal PWM enviado pela placa de aquisição e a variável de processo (PV, do inglês *process variable*) é a temperatura da estufa.

Um aspecto importante a se ressaltar é a presença de dois sensores Pt100 na estufa, novamente, como ilustrado pela figura 16. Isso foi necessário pois, como a

posição da placa do conversor está à meia altura da estufa, além de também existir um gradiente de temperatura (aproximadamente 3°C) entre as partes superior (tampa da estufa) e inferior da estufa, a temperatura a ser controlada é a média (TM) das duas temperaturas medidas pelos sensores Pt100 (Pt100L na parte inferior e Pt100H na parte superior).

Partindo para o levantamento do modelo, foram aplicados seis degraus de incremento da razão cíclica do sinal PWM, esperando-se então que a temperatura da estufa assentasse (atingisse o ponto de equilíbrio) em cada um deles. Esta etapa foi bastante demorada, haja vista que os tempos para assentamento das temperaturas foram bem longos. É importante relatar que foi necessário fazer um isolamento térmico da estufa (através de espuma e fitas adesivas) para impedir variação térmica causada pela diminuição da temperatura ambiente. A figura 17 mostra o resultado do ensaio após mais de 70 horas.

Figura 17 – Resposta ao degrau da estufa térmica em malha aberta.

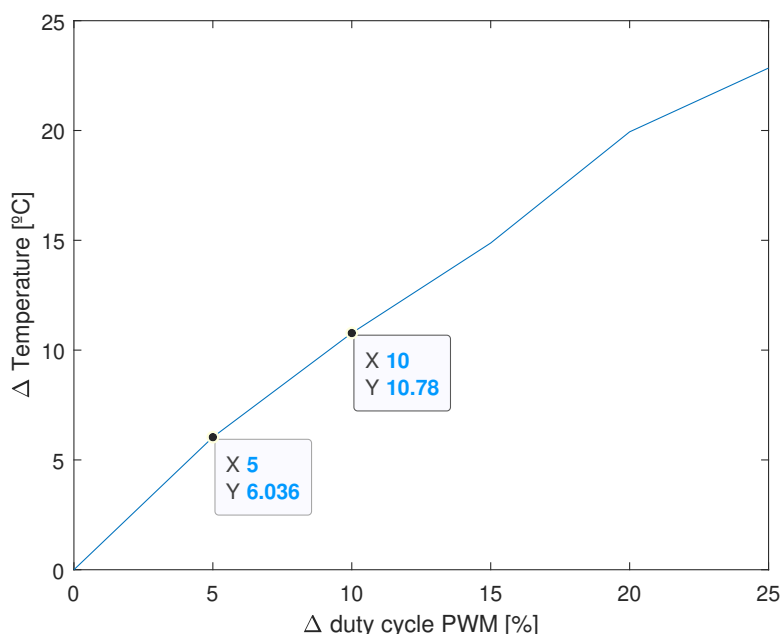


Fonte: Autoria própria.

Portanto, nota-se que há um comportamento bastante linear da relação entre MV e PV, dispensando a realização de mais degraus de MV para atingir temperaturas de até 75°C , pois isso tomaria muito tempo. A figura 18 mostra a relação estática entre MV e PV, reforçando a linearidade supracitada.

Para projetar o controlador linear usando técnicas de controle clássico, é necessário estimar um modelo dinâmico que caracterize o comportamento térmico da estufa. Então, escolheu-se um ponto de operação de 35°C a 40°C , mas sabe-se que

Figura 18 – Relação estática entre os incrementos em MV e PV.



Fonte: Autoria própria.

este controlador funcionará bem nas proximidades do ponto de operação escolhido por causa da linearidade. Na figura 19, é possível visualizar na figura 19a a resposta ao degrau no ponto de operação e na figura 19b apenas a variação (incremento) nos valores de PV e MV, respectivamente.

Para obter o modelo dinâmico foram utilizados os valores incrementais. Então, após por meio da ferramenta *System Identification* do Matlab, levantou-se o modelo dinâmico no domínio no domínio s , descrito pela equação (1):

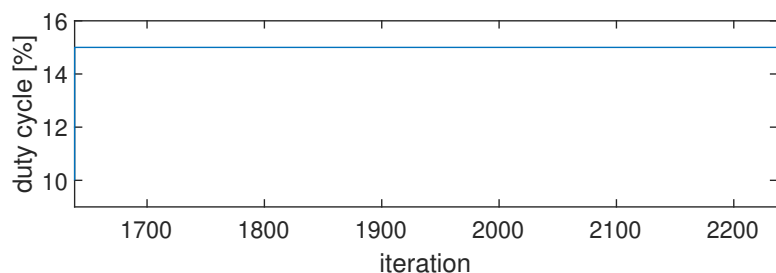
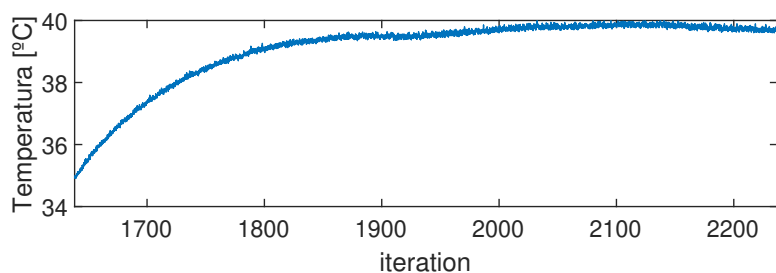
$$P = \frac{0,9729}{5211s + 1} \quad (1)$$

Como resultado, constatou-se que a constante de tempo (τ) de malha aberta do modelo é de 5211 s (≈ 87 min), sendo bem próxima ao valor do ensaio realizado em campo ($\tau \approx 86.5$ min). Na figura 20, é apresentada a comparação entre as respostas ao degrau no ponto de operação do modelo com os dados medidos em campo.

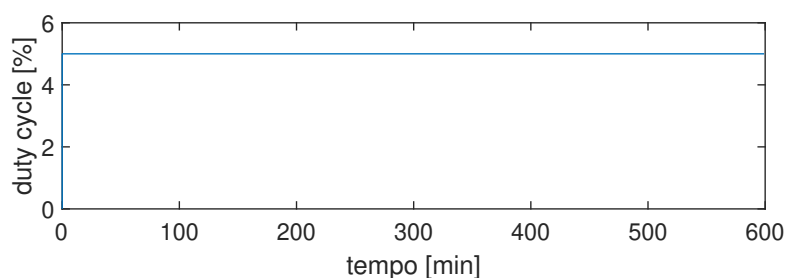
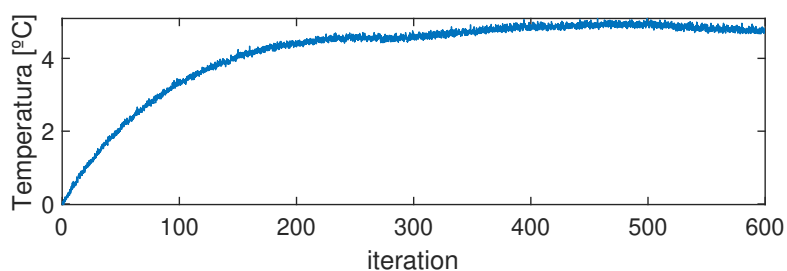
4.1.2 Projeto do controlador

A partir do modelo de primeira ordem (um polo e nenhum zero) utilizado para representar o comportamento dinâmico da estufa térmica, é possível utilizar um controlador PI (proporcional-integral) para atender aos dois principais requisitos de controle: seguimento de referência e rejeição da perturbação, ambos com erro nulo em regime permanente. A perturbação em si não é um parâmetro tão importante, pois o ensaio

Figura 19 – Resposta ao degrau no ponto de operação.



(a) Dados não incrementais.



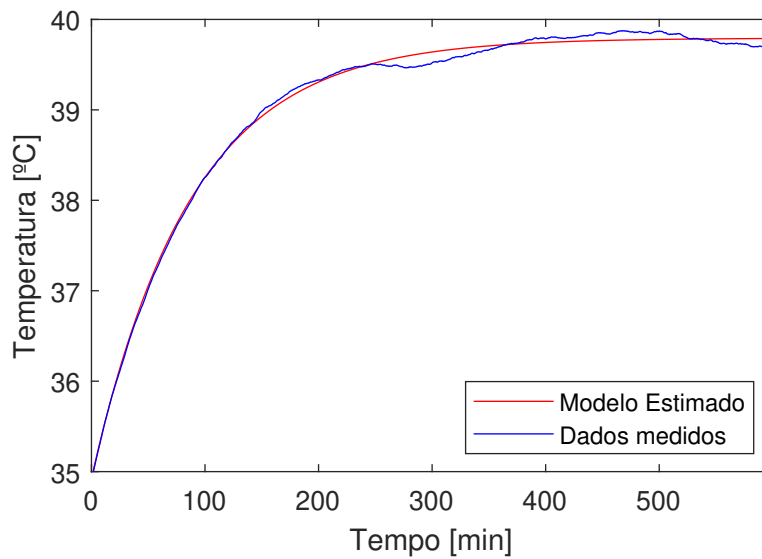
(b) Dados incrementais.

Fonte: Autoria própria.

térmico é feito em ambiente controlado e, de forma geral, não haverá perturbação (como a abertura da estufa) que possa atrapalhar a resposta do sistema de controle.

Como o foco do trabalho não está no controle de temperatura da estufa, sendo esta etapa apenas um complemento para viabilizar a realização do ensaio no LIAE, ajustou-se brevemente um controlador PI através da ferramenta *PID Tuner*, do Matlab, visando atender uma resposta temporal, $t_{5\%}$, que é o tempo que a PV leva para entrar, pela última vez, dentro de uma faixa de 5% de seu valor em regime permanente, aproximadamente cinco vezes mais rápida que o constante de tempo de malha aberta.

Figura 20 – Comparação da respostas ao degrau do sistema em MA.



Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros e a expressão do controlador PI são mostrados na tabela 5 e na equação (2).

Tabela 5 – Parâmetros do controlador PI da estufa.

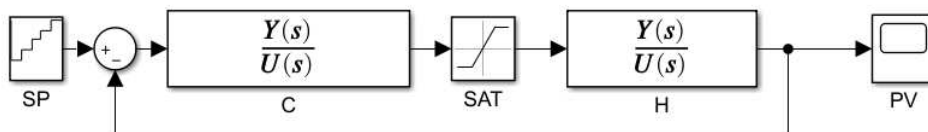
Ganho proporcional (Kp)	Tempo de integração (Ti)
39,605	877,0432

Fonte: Autoria própria.

$$C = \frac{39,6(s + 0,00114)}{s} \tag{2}$$

Uma lembrança importante é a presença de um saturador na malha de controle, para limitar o valor de MV dentro da faixa da razão cíclica do sinal PWM (1 % a 99.9%). Na figura 21 é mostrada a malha de controle da estufa.

Figura 21 – Malha de controle de temperatura da estufa.

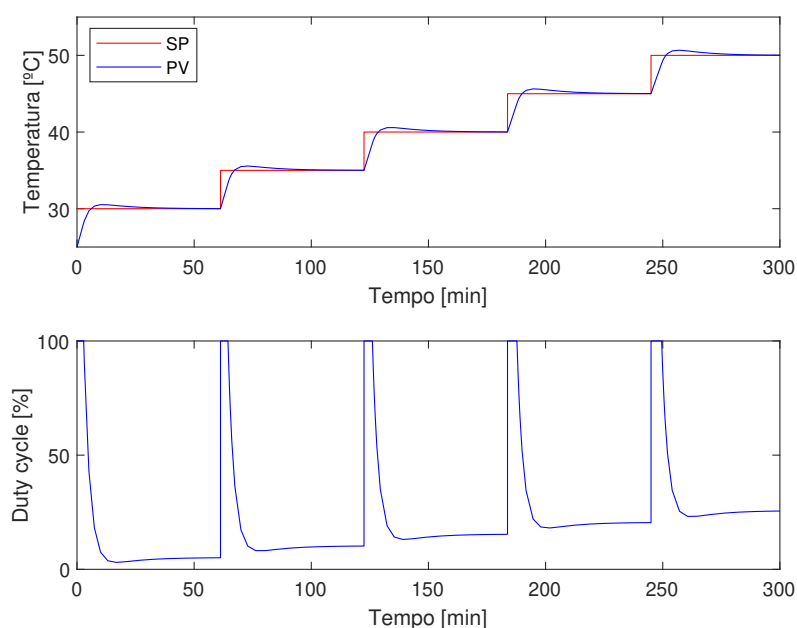


Fonte: Autoria própria.

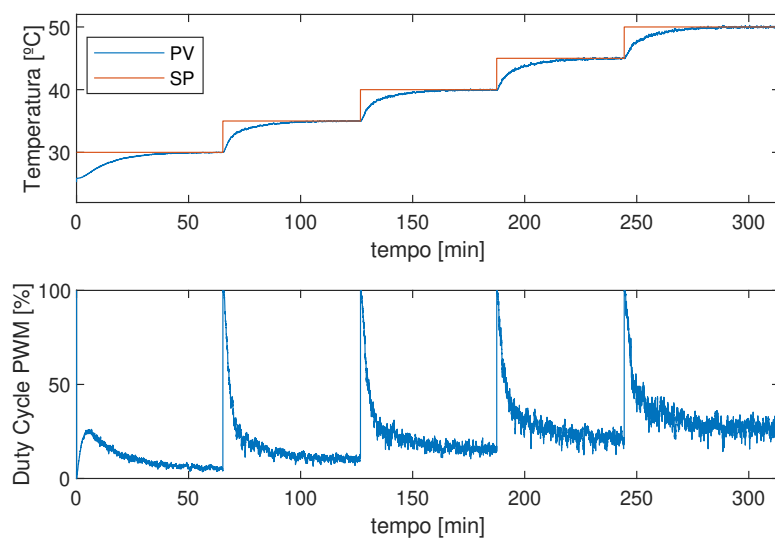
No Simulink, foram colhidas as respostas temporais do sistema de controle para uma sequência de referências de temperatura, como pode ser visto na figura 22a. Com isso, tem-se que o $t_{5\%}$ em malha fechada foi de aproximadamente 1070 segundos (próximo a 18 min) e tempo de acomodação aproximadamente 31 minutos, com sobressinal inferior a 10%.

Após a devida implementação do controlador no Labview, foi realizado o mesmo ensaio, cuja resposta é mostrada na figura 22b.

Figura 22 – Sinais da malha de controle de temperatura da estufa.



(a) Em ambiente simulado.



(b) Em ambiente real.

Fonte: Autoria própria.

Assim, constatou-se que, no sistema real, o controlador possui uma variação bem maior no sinal de controle (MV), causados pela presença de ruídos e tempo de amostragem. Entretanto, o comportamento dele é bem similar ao encontrado em ambiente de simulação. Outro aspecto interessante, é notar que, diferentemente do caso simulado, não há sobressinal no valor de PV em ambiente real, além do $t_{5\%}$ ser bem maior. A causa disso, provavelmente, relaciona-se com erros de modelagem da estufa térmica, presença de ruídos de medição e possíveis atrasos ou pequenos erros no envio do sinal de MV para o atuador devido a aspectos operacionais e de integração entre hardware/software. Apesar disso, o tempo de acomodação atingido em campo é bastante próximo ao simulado, sendo aproximadamente 32 minutos.

Conclui-se que o controle de temperatura PI da estufa térmica funciona adequadamente e atende aos requisitos do trabalho, sendo bastante flexível para futuras mudanças na parametrização do controlador e demais adequações. Novamente, a estufa térmica é responsável por estabelecer o patamar de temperatura inicial do ensaio, simulando uma condição de operação do conversor em um local cuja temperatura ambiente é bastante elevada. Com isso, consegue-se aquecer os componentes da placa do conversor com maior rapidez e agilidade, como apresentado na seção 4.2.

4.2 CONTROLE AUTOMÁTICO DO ENSAIO TÉRMICO

Esta seção mostra todo o projeto do controlador automático que visa acelerar o aquecimento dos componentes da placa do conversor. Primeiramente, em 4.2.1, é feita uma contextualização do processo de levantamento do modelo dinâmico que parte dos resultados colhidos nos ensaios térmicos esmiuçados no Apêndice A. Com isso, semelhantemente ao que foi feito para estufa, levantou-se diversos modelos a partir do método de resposta ao degrau, ressaltando o comportamento dinâmico dos componentes dentro do ponto de operação desejado. A seção 4.2.2 detalha o projeto do controlador, realizado através do método analítico do lugar das raízes, explicitando os parâmetros utilizados e os resultados colhidos em ambiente de simulação.

4.2.1 Levantamento do modelo dinâmico

Como mostrado no apêndice A, a condição de ensaio com temperatura ambiente de 70 °C na estufa, com velocidade de rotação do motor em 3000 RPM e corrente do freio em 320 mA, permite aquecer os componentes da placa do conversor a limites mais próximos dos reais. Esta condição respeita os limites de segurança de operação do dinamômetro, ou seja, mantém as temperaturas dos enrolamentos e bobinas do motor abaixo de 100 °C e trabalha com a corrente aplicada ao freio dentro da faixa 0 mA a 320 mA. Por esses motivos, são utilizados limites virtuais de temperatura para projetar e validar o controlador, pois, com a infraestrutura utilizada, não é possível levar

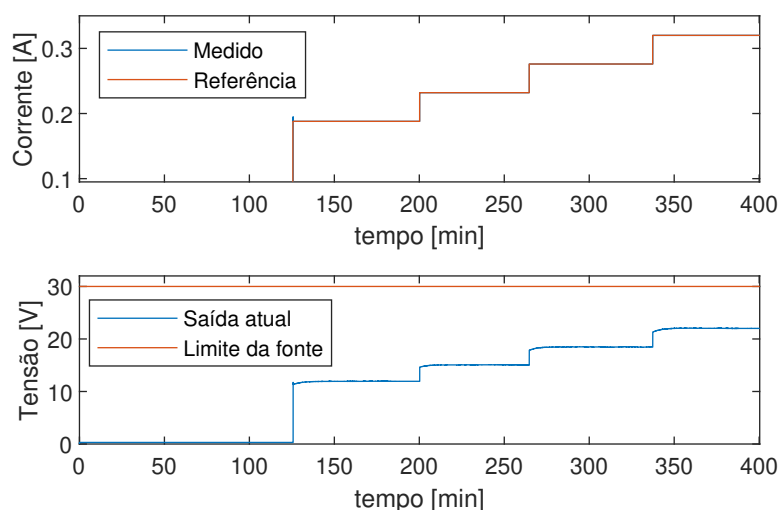
as temperaturas dos componentes aos respectivos limites máximos especificados pela Nidec.

A principal conclusão retirada dos ensaios em malha aberta é a relação entre o aumento da corrente aplicada ao freio com o crescimento das temperaturas dos componentes da placa do conversor. Isso faz sentido com a operação do conversor pois, o aumento da corrente do freio causa uma restrição maior ao movimento de rotação do motor, fazendo com que este perca velocidade e, com isso, o controlador interno do conversor manda sinais de corrente e tensão de maior magnitude para fazer com que a velocidade de referência seja atingida, causando um aquecimento maior dos componentes da placa.

Desta maneira, pretende-se acelerar o aquecimento dos componentes com dinâmicas térmicas mais lentas através do controle da corrente aplicada ao freio. Porém, por se tratar de um sistema com múltiplas entradas (temperaturas dos componentes) e apenas um sinal de controle (corrente aplicada ao freio), a estratégia de controle implementada partiu do levantamento dos modelos dinâmicos de cada componente, os quais representam o comportamento térmico de cada um próximo ao ponto de operação, neste caso, a temperatura limite de cada um.

Com a condição de ensaio definida (temperatura da estufa em 70 °C e velocidade do motor em 3000 RPM), foram aplicados degraus de corrente de iguais amplitudes dentro da faixa de 188 mA a 320 mA, como mostrado pela figura 23.

Figura 23 – Degraus de corrente e tensão aplicados ao freio.

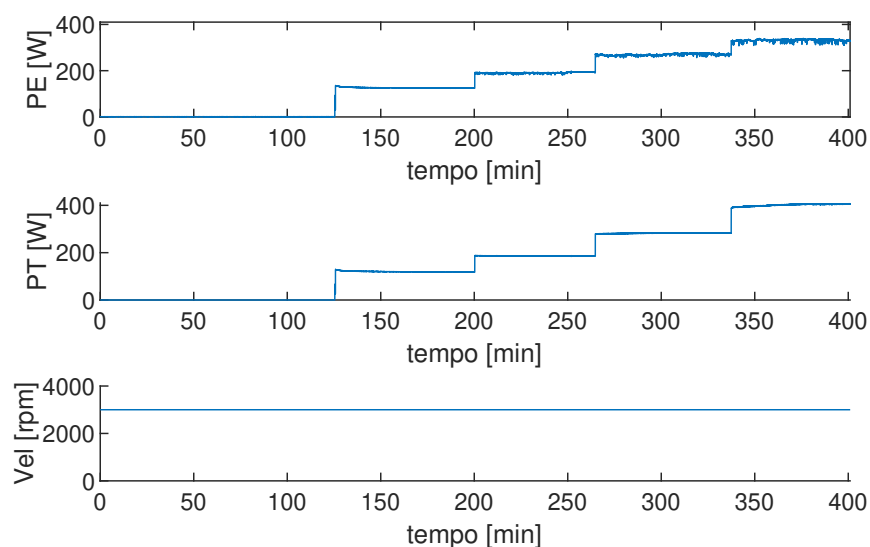


Fonte: Autoria própria.

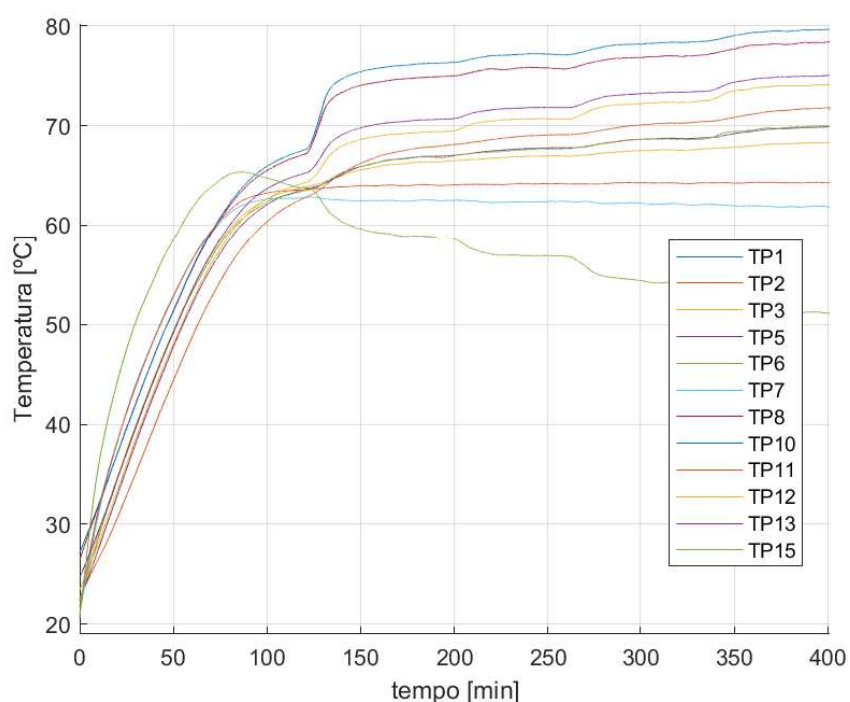
A figura 24a mostra o crescimento das potências na entrada do inversor (PE) e do motor (PT) conforme o aumento da corrente aplicada ao freio. A potência máxima atingida foi de quase 400 W. Além disso, mostra o degrau de velocidade do motor

em 3000 RPM. As curvas térmicas dos componentes, apresentadas na figura 24b, indicam comportamentos dinâmicos bem distintos, com a maioria aparentando certa linearidade, com exceção de alguns. Isto é importante porque serão levantados modelos dinâmicos apenas dos componentes com comportamentos mais lineares, pois pretende-se aplicar ferramentas de controle linear clássico.

Figura 24 – Respostas temporais das potências e das temperaturas.



(a) Referência de velocidade e comportamento de PT e PE.

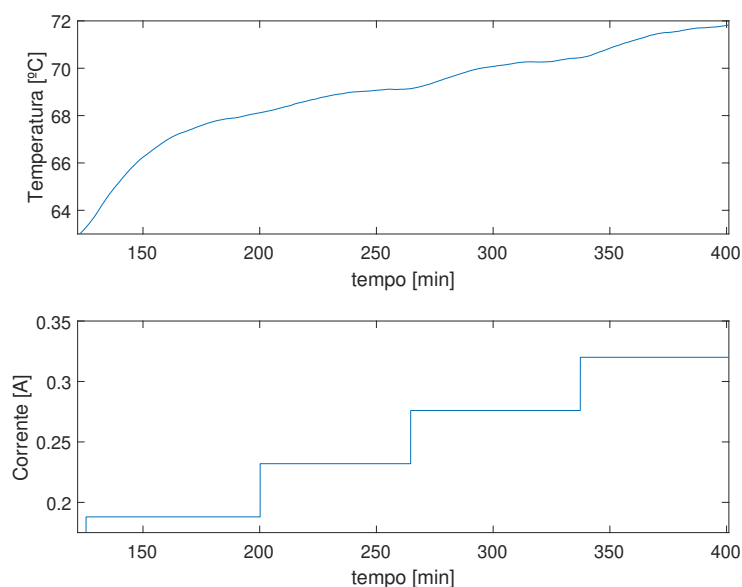


(b) Temperaturas dos termopares.

Fonte: Autoria própria.

Com as curvas térmicas obtidas, separou-se os dados que relacionam a temperatura de cada componente de acordo com os degraus de corrente aplicados ao freio. A figura 25 mostra esta relação para o termopar TP 1, o qual mede a temperatura do capacitor eletrolítico C011.

Figura 25 – Relação da PV com MV para o termopar TP 1.



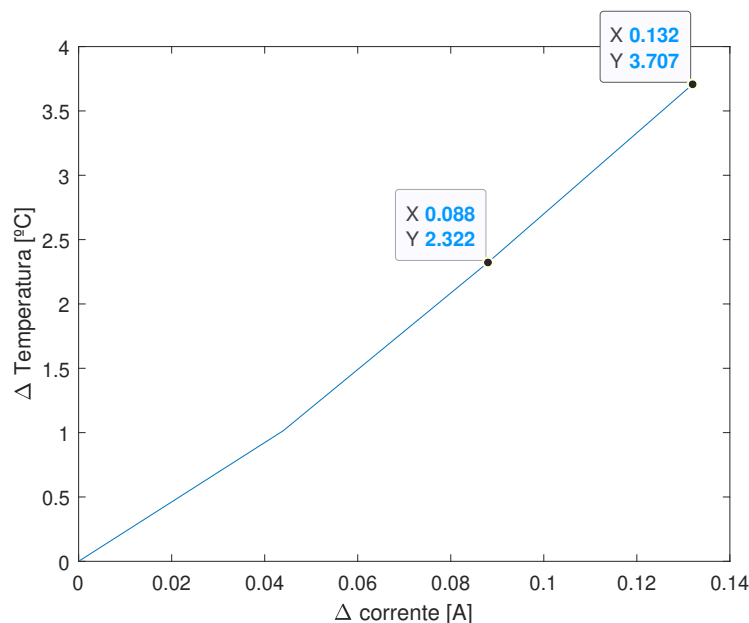
Fonte: Autoria própria.

Analogamente ao que foi feito para o controle da estufa, estabeleceu-se uma relação estática entre os incrementos da corrente do freio e os incrementos na temperatura do componente de interesse, como ilustrado pela figura 26. Assim, a estimação de cada um dos modelos através da ferramenta *System Identification*, do Matlab, considerou um ponto de operação próximo ao limite de temperatura do componente, o que ocorre quando aplica-se o degrau de corrente mais elevada ao freio de histerese (276 mA para 320 mA), resultando em um aumento da temperatura do componente até o seu limite virtual.

Finalmente, foram levantados modelos dinâmicos de primeira ordem (1 polo e nenhum zero) apenas dos componentes com comportamentos aproximadamente lineares. Logo, componentes instrumentados com os termopares TP7, TP11 e TP15 não foram considerados neste processo. Os dois primeiros por não apresentarem mudanças incrementais na PV com o aumento de MV e o último por não ter uma relação direta e linear com MV.

Os parâmetros dos modelos estimados nos pontos de operação de cada componente, os quais podem ser vistos na tabela 6, corroboram o fato de que os componentes maiores em tamanho, como é o caso dos capacitores eletrolíticos e do indutor,

Figura 26 – Relação estática linear entre os incrementos de MV e PV para TP1.



Fonte: Autoria própria.

possuem constantes de tempo muito superiores aos componentes menores. Portanto, estes componentes maiores levam mais tempo para serem aquecidos.

Tabela 6 – Parâmetros dos modelos de primeira ordem.

Modelo	Ganho estático (K_e)	Constante de tempo (τ)
M_{TP1}	38,22	2169
M_{TP2}	38,02	2149
M_{TP3}	19,99	2970
M_{TP5}	27,27	1619
M_{TP6}	28,92	1403
M_{TP8}	26,75	1156
M_{TP10}	25,77	1147
M_{TP12}	34,55	881,1
M_{TP13}	34,48	916,6

Fonte: Autoria própria.

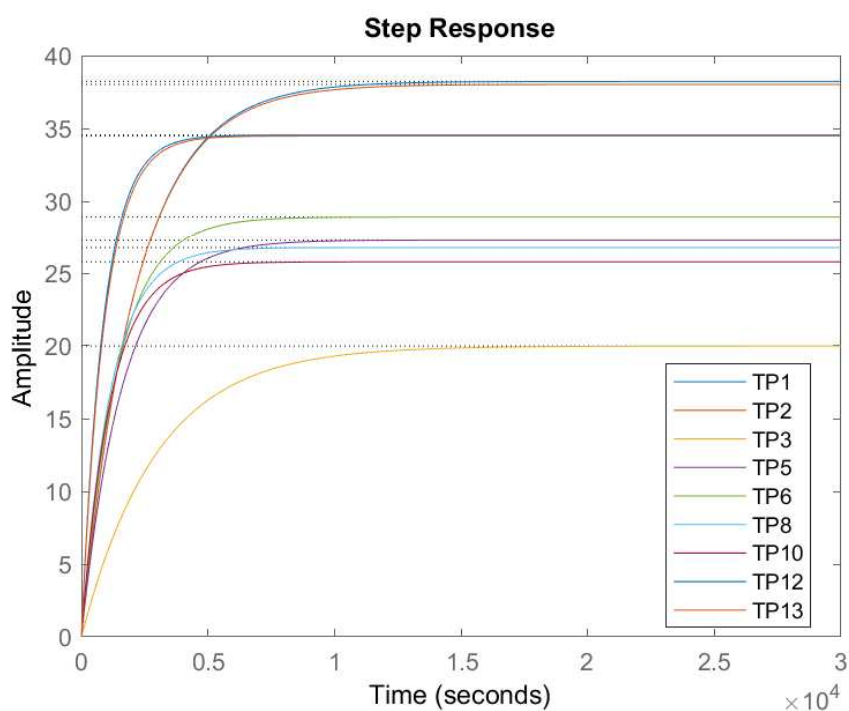
Para acelerar, através do controlador de temperatura, o aquecimento dos componentes da placa do conversor, não é conveniente utilizar como base o modelo com a maior constante de tempo, pois isto pode criar uma distorção no controle, ou seja, os componentes que aquecem mais rapidamente podem atingir os limites de temperatura muito antes dos componentes mais lentos, criando um cenário pouco verossímil de uma aplicação real, na qual espera-se que os componentes atinjam os seus limites de temperatura em tempos não muito distantes. Assim, para este trabalho, optou-se por

utilizar o modelo M_{TP1} , mostrado na equação (3), que representa o comportamento térmico do capacitor eletrolítico.

$$P = \frac{38,22}{2169s + 1} \quad (3)$$

A figura 27 mostra as respostas ao degrau de todos os modelos. É importante notar que os componentes mais rápidos possuem dinâmicas temporais muito similares, ou sejam, atingem as temperaturas limites em tempos próximos. Os componentes mais lentos, por outro lado, possuem tempos de assentamento bem diferentes.

Figura 27 – Respostas ao degrau de todos os modelos levantados.



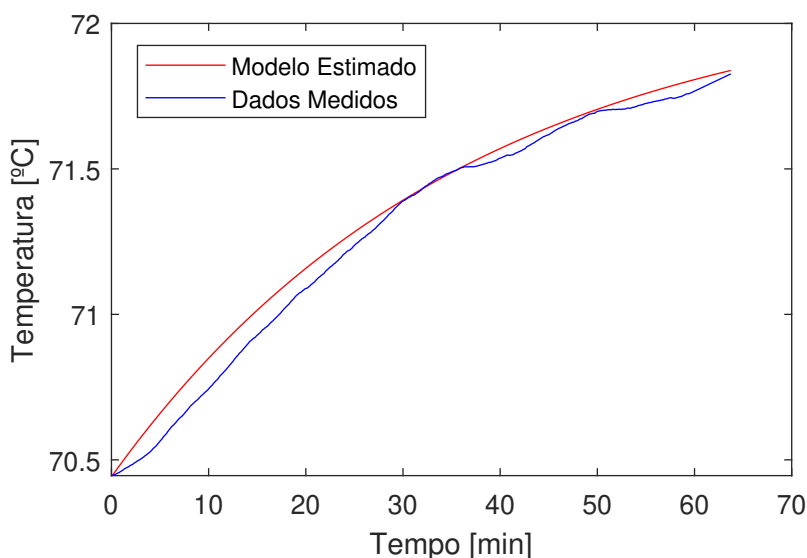
Fonte: Autoria própria.

A figura 28 compara a resposta do modelo no ponto de operação com os dados obtidos durante o levantamento.

4.2.2 Projeto do controlador

Para projetar o controlador, primeiramente, é preciso definir os requisitos de projeto, ou seja, as características que a resposta do controlador deverá atender. Para o sistema de controle atual, não é interessante um sobressinal grande, pois como a referência se trata do limite de temperatura do componente, não se deve ultrapassar este valor de forma agressiva. Assim, definiu-se que a resposta de malha fechada

Figura 28 – Comparação do modelo com as temperaturas medidas de TP1.



Fonte: Autoria própria.

deve possuir sobressinal menor igual 5% e o tempo para que o valor da saída fique dentro de uma faixa de 5% de erro (critério $t_{5\%}$) deve ser duas vezes mais rápido que a constante de tempo de malha aberta, o que resulta em $t_{5\%}$ de 1084,5 segundos (aproximadamente 18 minutos).

Para atingir tais requisitos de controle, pressupõe-se um sistema de segunda ordem dominante e, com isso, serão encontrados os polos desejados para o lugar das raízes. Conforme as especificações definidas para o controle, tem-se que o sobressinal (pico) deve ser menor que 5%. Portanto, o fator de amortecimento (ξ) do sistema é calculado da seguinte forma:

$$0,05 < \exp\left(\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \implies \ln(0,05) < \frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \implies \ln(0,05)^2 < \frac{(-\pi)^2(\xi)^2}{1-\xi^2} \implies \xi \approx 0,7.$$

A frequência natural será:

$$\omega_n = \frac{3}{\xi \cdot t_{5\%}} = \frac{3}{0,7 \cdot 1084,5} = 0,004 \text{ rad/s.}$$

Agora, é possível encontrar os polos de malha fechada, os quais asseguram as características desejadas e que irão corresponder ao lugar das raízes desejado:

$$s_d = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -0,0027 \pm j0,0029.$$

O controlador final deverá rejeitar a perturbação e seguir referência com erro nulo em regime permanente. Para isso, utiliza-se um integrador, ou seja, um polo em

zero. Portanto, o controlador terá a forma:

$$C(s) = K_C \frac{N_C}{s D_C}. \quad (4)$$

A malha de controle atual possuirá uma estrutura similar mostrada na figura 21. Com isso, a função de transferência de malha fechada da saída em relação à referência é:

$$H_r = \frac{CP}{1 + CP}$$

Analisando o denominador da função de transferência de malha fechada da saída em relação a entrada na forma mônica é:

$$1 + CP = 0. \implies 1 + \left(\frac{0,0176}{(s + 0,00046104)} \right) \left(K_C \frac{N_C}{s D_C} \right) = 0. \quad (5)$$

Portanto, o somatório de fases será:

$$K > 0 \implies \sum (\varphi_{\text{Conhecida}} + \varphi_{\text{Desconhecida}}) = -180^\circ. \quad (6)$$

Após calcular as fases conhecidas dos polos ($s = -0,00046104$, $s = 0$), a fase desconhecida é:

$$\varphi_{\text{Desconhecida}} = -\varphi_{\text{Conhecida}} - 180 = -(-262,1107) - 180 \approx 82,11. \quad (7)$$

Como a fase é muito próxima de noventa graus, podemos alocar um zero a direita do S_d para contribuir com a fase faltante e a FT do controlador deverá possuir a seguinte forma:

$$C(s) = K_C \frac{(s + \text{zero})}{s}. \quad (8)$$

A localização do zero foi calculada da seguinte maneira:

$$z = 0,0027 + \frac{0,0029}{\tan(82,11)} \approx 0,003168. \quad (9)$$

O cálculo de K_C é feito mediante a condição de módulo do LR, de forma que

$$\left| 1 + K_C \frac{0,0176 * (s + 0,003168)}{s(s + 0,00046104)} \right|_{s = s_d} = 0,$$

resultando em $K_C = 0,2878$. Com isso, o controlador será:

$$C = \frac{0,28783(s + 0,003168)}{s}.$$

Para realizar a implementação do controlador PI na forma comercial em software (Labview), é preciso extrair os parâmetros ganho proporcional (K_p) e tempo de integração (T_i). Este controlador possui a forma:

$$C = Kp(1 + \frac{1}{Ti.s}) = \frac{Kp.s + \frac{Kp}{Ti}}{s} \tag{10}$$

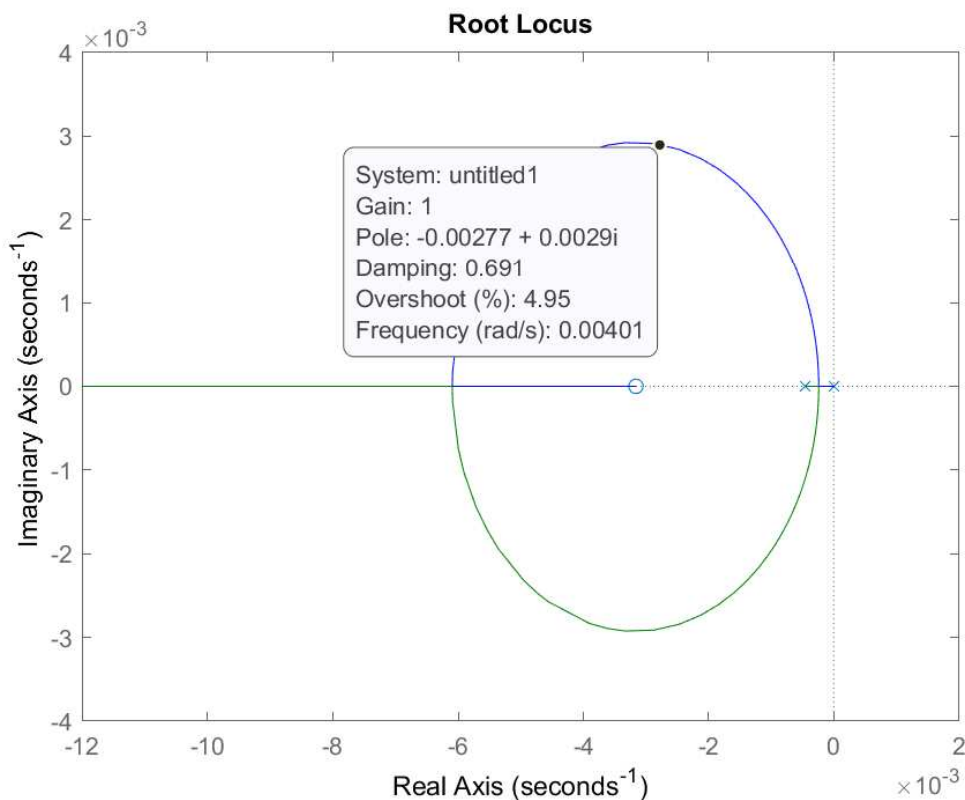
Após algumas manipulações matemáticas, extraiu-se os parâmetros do controlador, os quais são mostrados na tabela 7. Na figura 29 é possível visualizar o gráfico de lugar das raízes (LR), onde nota-se que os polos de malha fechada passam pelo local desejado com amplitude unitária.

Tabela 7 – Parâmetros do controlador PI do ensaio térmico.

Ganho proporcional (Kp)	Tempo de integração (Ti)
0,2878	315,65

Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – Lugar das raízes do controlador.

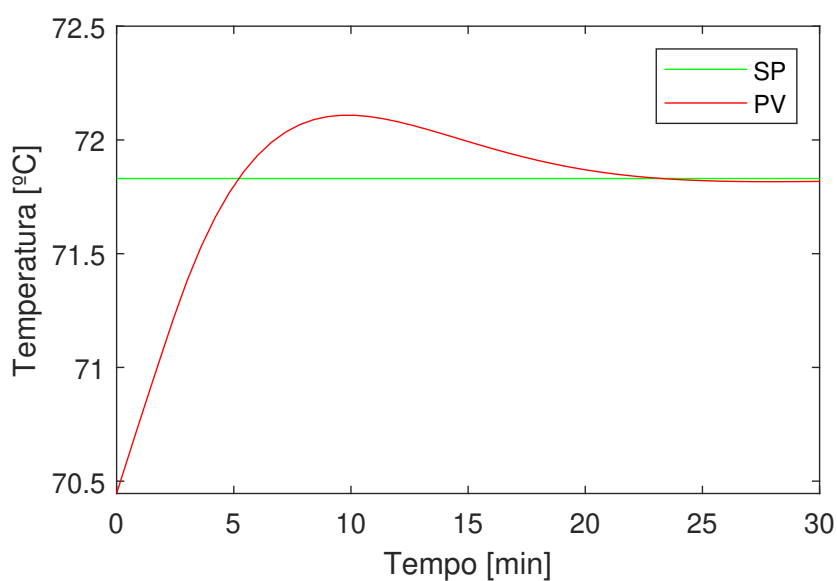


Fonte: Autoria própria.

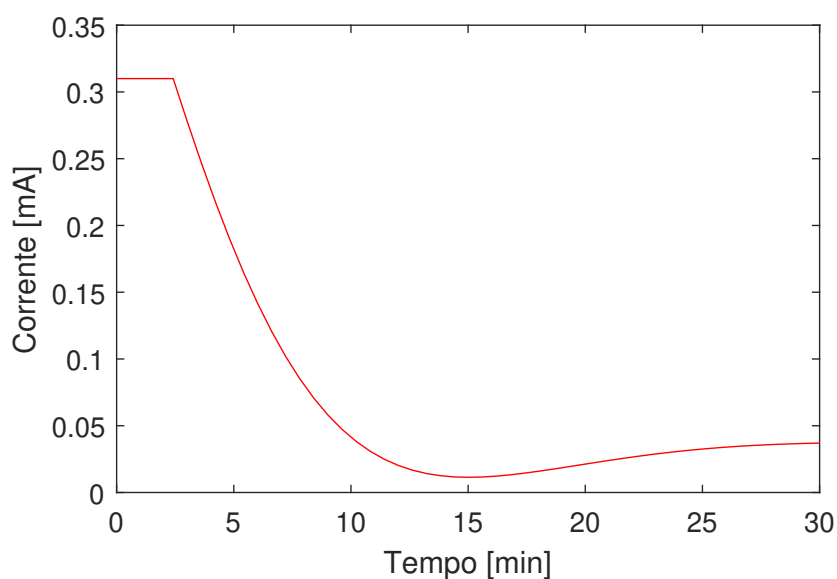
A figura 30 mostra os resultados, em ambiente de simulação, do controlador projetado em malha fechada. Assim, pela figura 30a, é possível analisar que, para uma referência de aproximadamente 71.8 °C, a resposta do controlador apresenta um

pequeno sobressinal e um tempo de 5% dentro do projetado, ou seja, próximo dos 18 minutos. Agora, analisando o sinal de controle mostrado na figura 30b, devido à saturação de MV (corrente aplicada ao freio) dentro da faixa de 0 mA a 310 mA, nota-se que, inicialmente, o controlador envia o nível máximo de corrente ao freio e, com a diminuição do erro do controlador, MV vai baixando até um pequeno patamar, que permite manter a temperatura de referência sem erro de seguimento.

Figura 30 – Respostas da malha de controle de TP1.



(a) Seguimento de referência.



(b) Sinal de controle.

Fonte: Autoria própria.

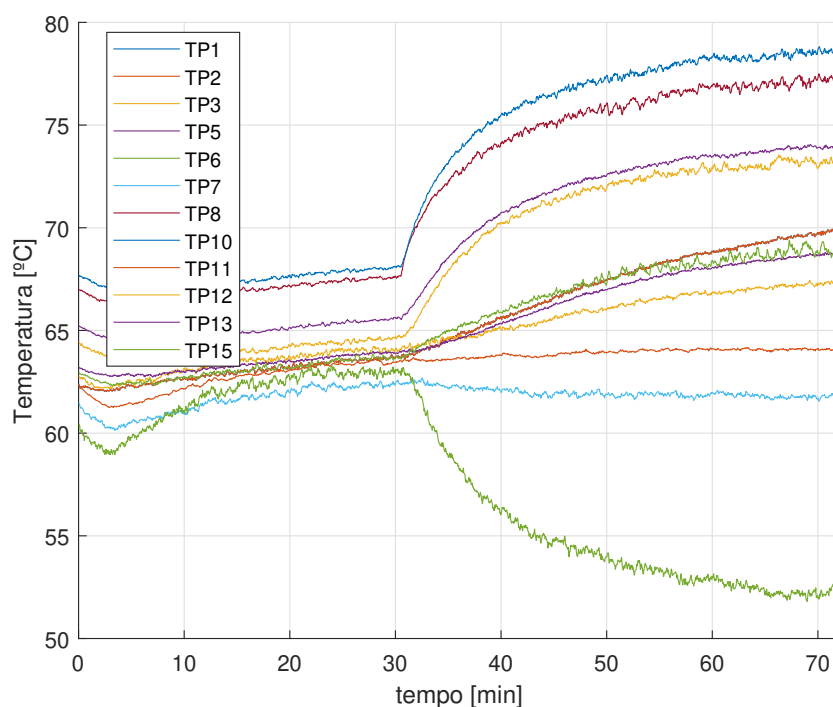
Na sequência, o capítulo 5 mostra os resultados do sistema de controle em malha fechada obtidos em campo.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

Este capítulo mostra os resultados dos ensaios de controle de temperatura do capacitor eletrolítico, representado por TP1, em malha fechada. Assim, a partir do controlador projetado em 4.2.2, foram conduzidos alguns ensaios visando medir o desempenho do controlador em diferentes cenários e compará-lo com a resposta obtida em malha aberta, na qual mantém-se um valor constante da corrente aplicada ao freio. A condição de ensaio utilizada é a mesma que foi seguida para o levantamento do modelo, ou seja, temperatura da estufa em 70 °C e velocidade de rotação do motor igual a 3000 RPM.

O primeiro ensaio realizado consistiu na aplicação de um degrau de temperatura igual ao valor limite, ou seja, após a temperatura da estufa assentar em 70 °C e as temperaturas dos componentes estagnarem nos valores iniciais do ensaio, o motor foi acionado e, logo na sequência, o controle automático passou a atuar. Aqui, ressalta-se que, em software, tudo isso é feito automaticamente, ou seja, sem intervenção do operador. A figura 31 mostra as mudanças nas curvas térmicas dos componentes, explicitando a não linearidade de alguns deles, como já foi explicado anteriormente. Entretanto, a maioria apresenta um comportamento linear e, mais importante, não ultrapassa os limites estabelecidos.

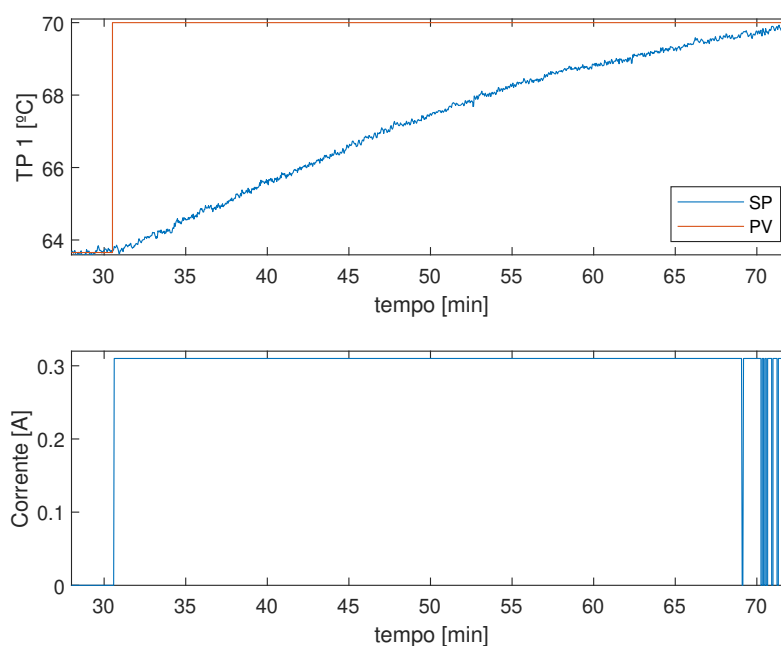
Figura 31 – Curvas térmicas obtidas no primeiro ensaio de malha fechada.



Fonte: Autoria própria.

Focando apenas no comportamento dinâmico do componente controlado, mostrado na figura 32, é possível notar que o componente atinge o valor de referência (limite de temperatura) com um $t_{5\%}$ de aproximadamente 38 min. O sinal de controle, por sua vez, apresenta um comportamento bem agressivo, ou seja, atua com o máximo de corrente aplicada ao freio, sendo nula quando o valor de referência é atingido.

Figura 32 – Desempenho do controlador para o primeiro ensaio.



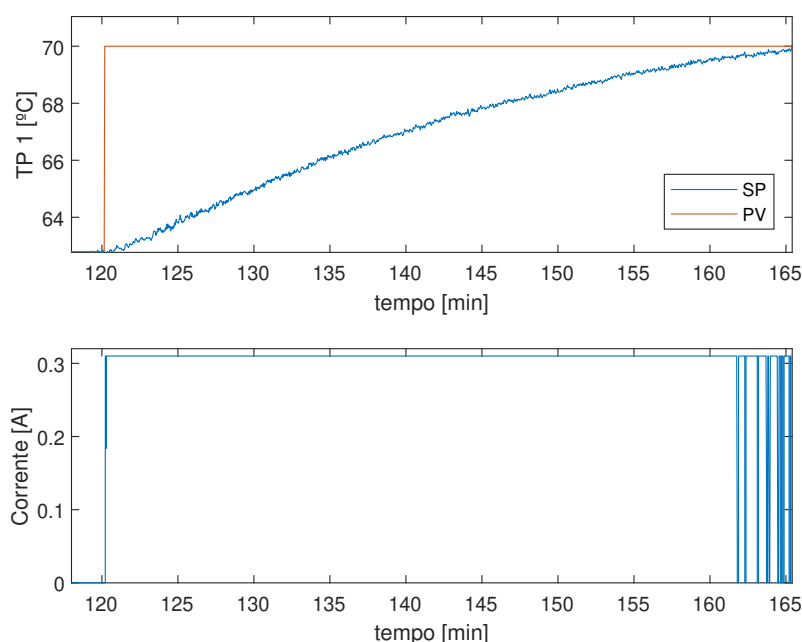
Fonte: Autoria própria.

Este comportamento está de acordo com o esperado pois, diferentemente da simulação, na qual aplicava-se um degrau de baixa amplitude, a aplicação do degrau de amplitude muito maior naturalmente implica na piora do desempenho do controlador, com um tempo de assentamento maior.

O segundo ensaio conduzido, cujos resultados são mostrados na figura 33, ratifica as respostas do sistema de controle obtidas anteriormente, sendo que o $t_{5\%}$ ficou na ordem de 40 min. Este aumento está relacionado com a maior amplitude do degrau de referência.

Para medir o desempenho do controlador considerando degraus de referência com menor amplitude, aplicados ao redor do ponto de operação, realizou-se um ensaio na qual foi aumentado o valor da referência de temperatura até o limite. A figura 34 mostra que, em todos os degraus de referência, o controlador atendeu aos requisitos de controle, principalmente, em relação ao sobressinal inferior a 5%. O primeiro degrau (67.3 °C a 68.6 °C) resulta em um $t_{5\%}$ de aproximadamente 13 min, ou seja, um resultado melhor do que o projetado (18 min). O próximo degrau (68.6 °C a 69.9 °C) teve

Figura 33 – Desempenho do controlador para o segundo ensaio.



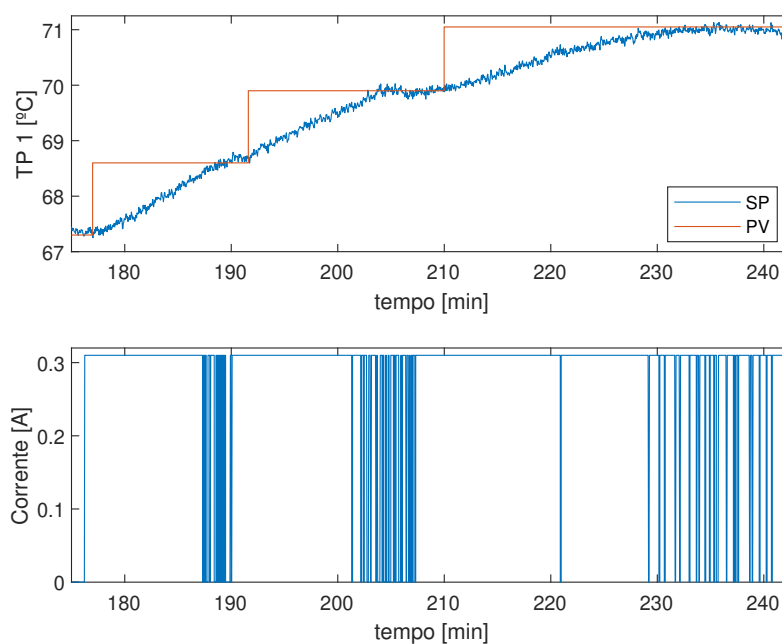
Fonte: Autoria própria.

um resultado muito similar com $t_{5\%}$ de 15 minutos. Por último, aplicou-se um degrau de referência bem próximo do ponto de operação utilizado para levantar o modelo dinâmico, ou seja, 69.9°C a 71.05°C . Aqui, o sistema de controle levou mais tempo para atingir a referência, com um $t_{5\%}$ de 20 min, muito próximo do valor projetado.

Com os resultados de malha fechada obtidos, partiu-se para um ensaio de malha aberta que visa demonstrar o aumento significativo de tempo para assentamento da temperatura dos componentes. Para isso, foi considerada a seguinte condição de ensaio: corrente aplicada ao freio fixa de 210 mA, velocidade de rotação de 3000 RPM e temperatura da estufa em 70°C . A figura 35 apresenta as curvas térmicas de todos os componentes da placa.

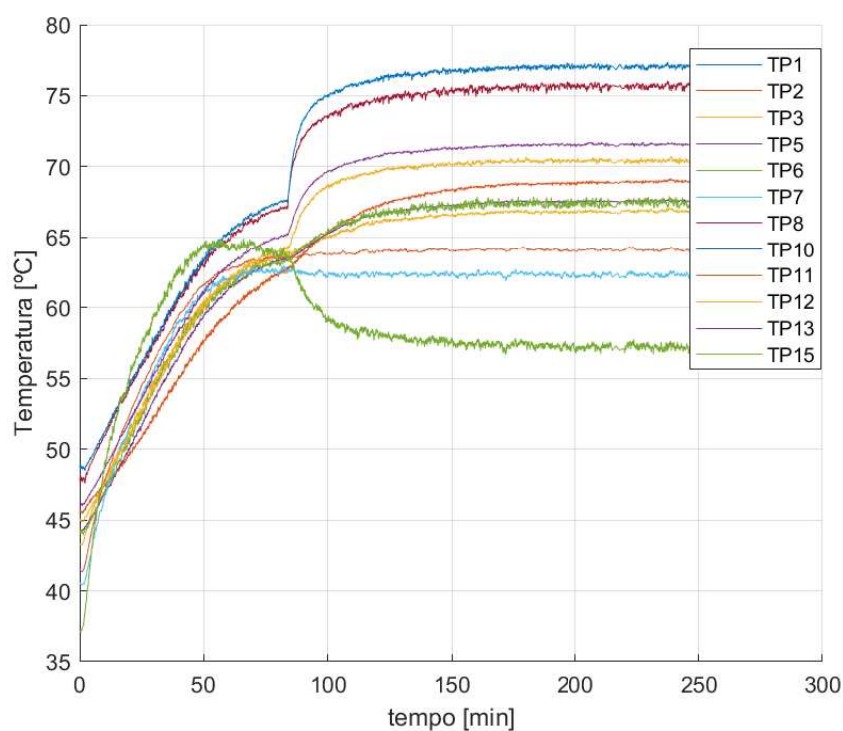
Como é possível confirmar pela figura 36, aplicando-se uma corrente fixa de 210 mA e partindo do mesmo valor inicial de TP1 utilizado nos ensaios de malha fechada, a temperatura do capacitor demora muito mais tempo para assentar (uma hora e meia aproximadamente) e não atinge o valor limite de 70°C . Desta maneira, fica evidente a vantagem de se utilizar sistema de controle em malha fechada que, automaticamente, ajusta o valor da corrente aplicada ao freio para acelerar o aquecimento do componente até seu limite de temperatura, encerrando o ensaio quando a condição é atingida.

Figura 34 – Desempenho do controlador próximo ao ponto de operação.



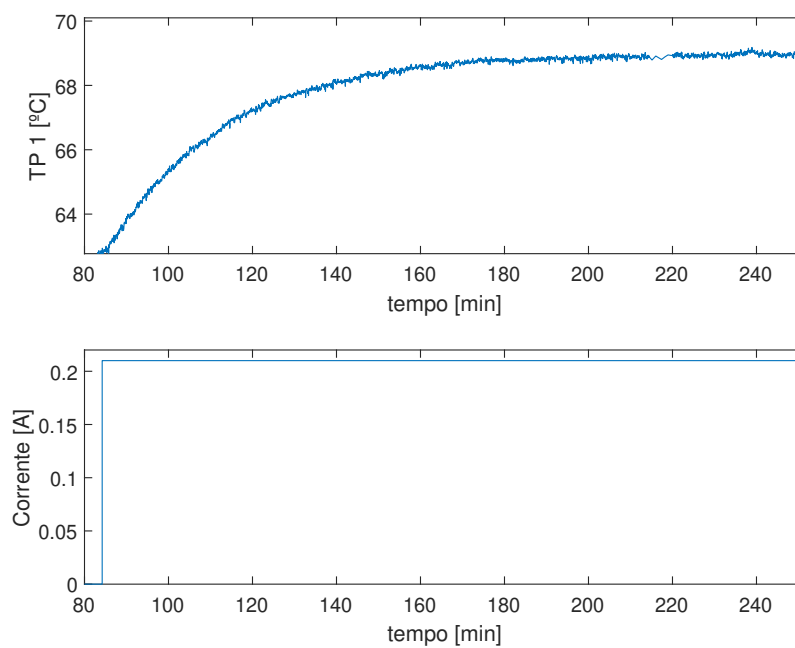
Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Curvas térmicas do ensaio em malha aberta.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Resposta de TP1 em malha aberta.



Fonte: Autoria própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho atual apresentou todas as metodologias, implementações e resultados obtidos com a bancada automatizada para ensaios térmicos. Essa bancada é composta por diversos sistemas responsáveis pela aquisição, tratamento e controle das variáveis de processo, integradas através de um software que permite o controle supervisionado do ensaio. Este capítulo, inicialmente, faz uma recapitulação dos objetivos e das etapas de desenvolvimento realizadas, discorrendo sobre os resultados atingidos, finalizando com algumas sugestões de melhorias, modificações e ampliações do atual trabalho para a continuidade.

6.1 CONCLUSÕES

A partir da definição do tema e dos objetivos do trabalho, foi realizada uma revisão da literatura versando sobre confiabilidade, ensaios ambientais e automação de bancadas. Esses tópicos foram as motivações que formaram as bases teóricas para as etapas seguintes. Com isso, ficou comprovada a importância do trabalho para, não somente atender a uma demanda externa da empresa, mas para colocar em prática os conhecimentos em instrumentação, controle e programação adquiridos durante a graduação.

Com a base formada, a próxima etapa tratou da implementação de uma bancada de ensaios térmicos, o que envolveu montagens mecânicas e elétricas, configuração dos sistemas de aquisição e dos equipamentos de medição, desenvolvimento de uma estufa térmica com controle PI, instrumentação da amostra do conversor de frequência e, finalmente, a integração de todos os sistemas por meio de uma aplicação virtual desenvolvida em Labview.

Com o setup da bancada de ensaios térmicos pronto, realizou-se um estudo exploratório visando a caracterização das dinâmicas térmicas dos componentes da placa do conversor em diferentes cenários. Este estudo foi necessário para definir a condição de ensaio ideal para desenvolver um sistema de controle em malha fechada que diminuísse o tempo de aquecimento dos componentes. Nesse sentido, o controlador projetado para esta tarefa, de fato, diminuiu o tempo do ensaio em comparação com resultado obtido em malha aberta e, mais importante do que isso, com o controlador implementado, realizou-se a automação completa do ensaio, diminuindo ao máximo a intervenção humana.

Portanto, os objetivos traçados no início foram cumpridos e agora é possível melhorar as respostas dos controladores e reduzir ainda mais o tempo dos ensaios através de algumas sugestões dadas a seguir.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização deste trabalho, foram realizadas algumas tarefas voltadas apenas à montagem do aparato experimental, no caso, bancada de ensaios, além de montagens mecânicas e elétricas. Isto consumiu bastante tempo do cronograma e, por conta do tempo limitado disponível para a realização do trabalho, acabou não sobrando um tempo razoável para a implementação, testes e refinamento dos sistemas de controle. Desta maneira, alguns pontos de melhoria abrangendo desde a montagem do aparato experimental até a implementação de controladores são sugeridos a seguir.

- Refazer a instrumentação da placa do conversor de frequência utilizando colas e fixadores específicos para termopares. Isto pode diminuir a flutuação e o ruído dos sinais de temperaturas medidos e, com isso, melhorar a resposta do controlador.
- Realizar novos levantamentos dos modelos térmicos dos componentes e estudar melhor a relação entre a corrente aplicada ao freio com as temperaturas dos componentes.
- Implementar um controle baseado na alteração da tensão de entrada do conversor de frequência ao invés de apenas manipular a carga aplicada ao motor. Isto pode aumentar a eficiência do sistema de controle e atuar de maneira mais direta sobre as temperaturas dos componentes da placa.
- Testar novas estratégias de controle, em especial controle preditivo baseado em modelo (MPC, do inglês *model predictive control*), que tem a capacidade de considerar as restrições operacionais diretamente na formulação do problema de controle.

REFERÊNCIAS

AGILENT. **34972A Stacked - New 34972A stacked front to back**. 2023a. Disponível em: https://about.keysight.com/en/newsroom/imagelibrary/library/34972A_images/.

https://about.keysight.com/en/newsroom/imagelibrary/library/34972A_images/.

AGILENT. **34972A Unidade de aquisição, comutação e registro de dados LXI**. 2023b. Disponível em: <https://www.keysight.com/br/pt/product/34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit.html>.

ÁVILA, Álvaro Flávio Santos de. **Monitoramento e Controle de Câmaras de Refrigeração via Velocidade Variável do Compressor**. 2011. Tese de doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Engenharia Elétrica. UFMG.

BRANDIM, A.S. Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga térmica. *In: REVISTA Matéria v14*. Brasil: [s.n.], 2009. P. 747–758.

CALLEGARI, J. M. S.; GUSMAN, L.S. Detection of Stressed Electronic Components in PV Inverter using Thermal Imaging. *In: IEEE Latin America Transactions vol. 18*. Brasil: [s.n.], 2020. P. 1760–1767.

DRAGOMIR, Alin; ADAM, Maricel. About Thermal Stresses Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment. *In: INTERNATIONAL Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2014)*. Iasi, Romênia: [s.n.], 2014. P. 289–293.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; DUARTE, José Luis Ribeiro. **Confiabilidade e manutenção industrial**. [S.l.]: Elsevier Editora Ltda, 2011. 1ª Edição, p. 57–68.

FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações**. [S.l.]: Editora Érica, 2009. 2ª Edição, 192p.

INDUSTRY, Panasonic. **SSR, Phototriac Coupler and AQ-H Application Example**. 2023. Disponível em: https://www3.panasonic.biz/ac/e/control/relay/solid-state/app_circuits/index.jsp.

INSTRUMENTS, National. **USB-6341**. 2023. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/model/usb-6341.html>.

KIRKPATRICK, A. **Introduction to Refrigeration and Air Conditioning Systems: Theory and Applications**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2022. (Synthesis Lectures on Mechanical Engineering). ISBN 9783031795794. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=kYJyEAAAQBAJ>.

LAGO, Taynara Geysa Silva do. **Estudo experimental e controle de um sistema de refrigeração com compressor de velocidade variável e válvula de expansão eletrônica**. 2016. Diss. mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Engenharia Mecânica. UNICAMP.

LAMBDA, TDK. **GEN 600-1.3: 0-600V, 0-1.3A**. 2023. Disponível em: <https://www.genesysdcstore.com/products/gen-750-600-1-3>.

LEEMIS, Lawrence Mark. **Reliability: probalistic models and statistical methods**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1995. 1ª Edição, 435p.

LUCA, Luciana Veloso de. **Recomendações para a implementação de ensaios de estresse térmico voltados à confiabilidade de hardwares eletrônicos**. 2004. Diss. mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Metrologia Científica e Industrial. UFSC.

MACHADO, João Paulo Zomer. **Análise experimental do efeito de estratégias de controle em características de resposta de motores de corrente contínua sem escovas**. 2023. Diss. mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia de Automação e Sistemas. UFSC.

MATOS, Priscila Custódio de; CORRÊA, Valesca Alves. **Revista de Tecnologias**. [S.l.]: FATEC Ourinhos, 2016. v. v.9, p. 57–68.

MATOS, Rudmar Serafim. **Notas de aula de refrigeração**. [S.l.]: Universidade Federal do Paraná, mai. 2010.

MELO NOGUEIRA, Renan de. **Metodologia para Ensaios de Vida Aceleerada dos Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica em Instalações de Baixa Tensão do Espírito Santo**. 2016. Monog. de graduação – Universidade Federal do Espírito Santo, Engenharia Elétrica. UFES.

NASCIMENTO IRIAS, Nayara Grazielle do. **Avaliação de técnicas de prognósticos de falhas em conversores de frequência instalados em ambientes hostis**. 2018. Diss. mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Engenharia Elétrica. UFMG.

NETO, Antônio Miguel Salla. **Planejamento e Execução de Ensaios de Confiabilidade de Componentes Eletromecânicos**. 2014. Monog. de graduação – Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia de Controle e Automação. UFSC.

OLIVEIRA, Thyane Fuhrmann Gonçalves de. **Análise de alternativas de gerenciamento térmico para o inversor de frequência de um compressor de capacidade variável**. 2019. Diss. mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia Mecânica. UFSC.

PEDRA, Camilo. **Inversor de frequência: o que é e como funciona?** 2020. Disponível em: <https://blog.se.com/br/automacao-industrial/2020/10/22/o-que-e-um-inversor-de-frequencia-e-como-escolher-a-melhor-opcao/>.

QURESHI, T. Q.; TASSOU, S.A. Variable-speed capacity control in refrigeration systems. *In: APPLIED Thermal Engineering*. Middlesex, UK: [s.n.], 1995. P. 103–113.

SCHMITZ, Rafael Berti. **Desenvolvimento de bancada automatizada para controle de pressões em compressores de refrigeração**. 2016. Diss. mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia Mecânica. UFSC.

SINGH, Bhim; SINGH, Sanjeev. **State-of-Art on Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives**. [S./]: *Journal of power electronics* v.9, p1-17, jan. 2009.

STOECKER, Wilbert F; JABARDO, José Maria Saiz. **Refrigeração industrial**. [S./]: Editora Edgard Blücher Ltda, 2018. 3ª Edição, p. 57–68.

THADURI, Adithya. Reliability prediction of semiconductor devices using modified physics of failure approach. *In: INTERNATIONAL Journal of System Assurance Engineering and Management*. Mumbai, India: [s.n.], 2013. P. 33–47.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-344A**: Military Handbook: Environmental Stress Screening of Electronic Equipment. [S./], 1995.

WANG, Huai; LISERRE, Marco; BLAABJERG, Frede. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 7, n. 2, p. 17–26, jun. 2013. DOI: 10.1109/mie.2013.2252958. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/mie.2013.2252958>.

WILDE. **What is Design for Reliability?** 2023. Disponível em: <https://www.wilderisk.co.uk/about/blog/what-is-design-for-reliability/>.

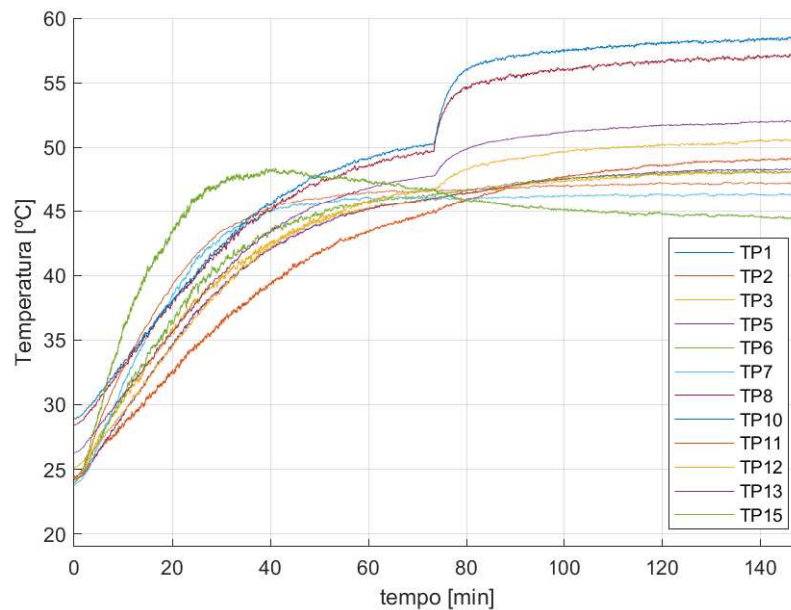
YOKOGAWA. **WT210/WT230 Digital Power Meters**. 2023. Disponível em: https://tmi.yokogawa.com/br/solutions/discontinued/wt210wt230-digital-power-meters/#Documentos-e-Downloads___downloads_4.

ZVEI. **Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules**. 2013. Disponível em: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2013/Oktober/Handbook_for_Robustness_Validation_of_Automotive_Electrical/Robust-Validation-EE-Modules.pdf.

APÊNDICE A – CURVAS TÉRMICAS DOS COMPONENTES

Este apêndice mostra os resultados dos ensaios térmicos em malha aberta, ou seja, sem um controlador. Assim, são apresentadas as curvas térmicas dos componentes da placa do conversor obtidas em diferentes condições de ensaio (recomendadas pela Nidec), a partir da variação dos parâmetros: temperatura da estufa, corrente aplicada ao freio de histerese e velocidade de rotação do motor. Neste contexto, o primeiro ensaio considera a temperatura da estufa em 50 °C e sem carga aplicada ao motor, ou seja, freio desligado. A figura 37 mostra que, até uma hora e quinze minutos de ensaio, as curvas térmicas dos componentes evoluem apenas devido ao aquecimento da estufa. Depois, as temperaturas crescem devido ao acionamento do motor.

Figura 37 – Temperaturas alcançadas com velocidade máxima de 4000 RPM:



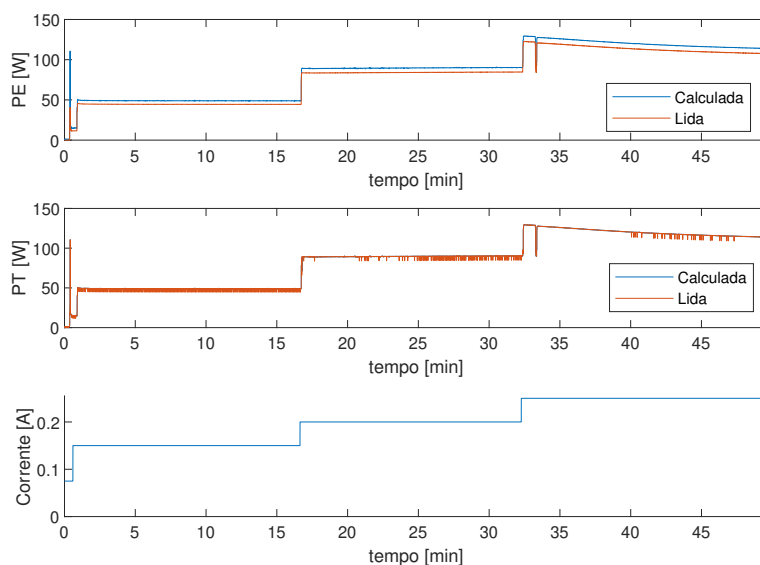
Fonte: Autoria própria.

Os componentes mais aquecidos, como mostra a figura 37, foram TP 10 com 58.29 °C e TP 11 com 57.08 °C, sendo estes um indutor e um capacitor, ambos dispositivos de montagem em superfície (SMD, do inglês *surface-mount device*), ou seja, possuem um tamanho menor. Ademais, nessa condição, nota-se que as temperaturas ficaram distantes dos limites de temperatura dos componentes.

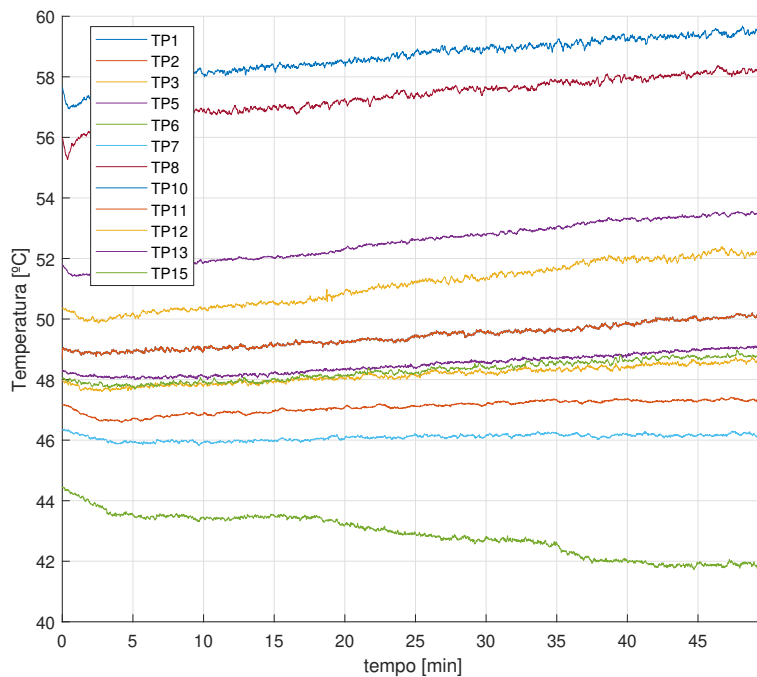
Na próxima condição de ensaio, cujos resultados são ilustrados na figura 38, injetou-se uma corrente do freio de 150 mA, depois 200 mA e, por último, 220 mA. A velocidade de rotação foi mantida fixa em 2000 RPM. Novamente, os componentes mais aquecidos foram os mesmos do ensaio anterior, com a diferença que as temperaturas de ambos aumentaram aproximadamente 1 °C.

Com relação às potências, na entrada do conversor de frequência alcançou-se, para a condição de carga mais exigente, um patamar de potência (PE) na ordem de 115W. A potência do motor (PT) ficou em um patamar próximo. Ressalta-se que a temperatura da estufa neste ensaio permaneceu em 50 °C.

Figura 38 – Corrente do freio variável e velocidade de rotação 2000 RPM.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.

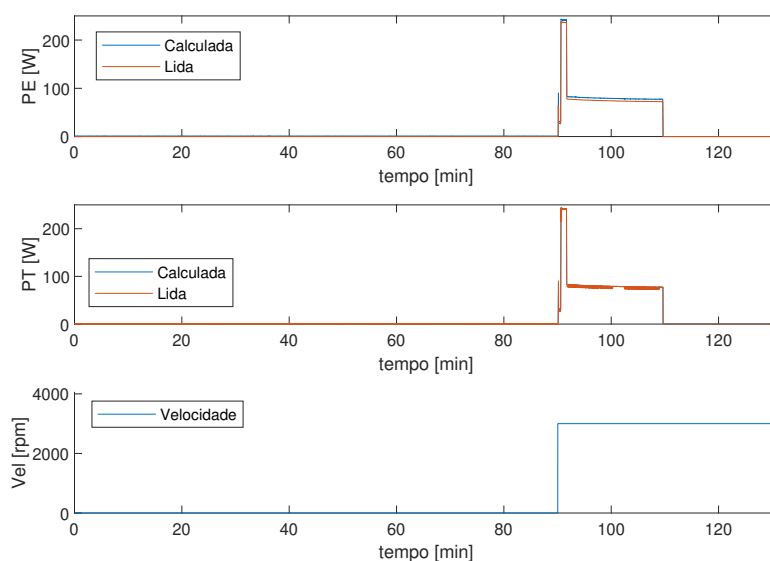


(b) Curvas térmicas dos componentes.

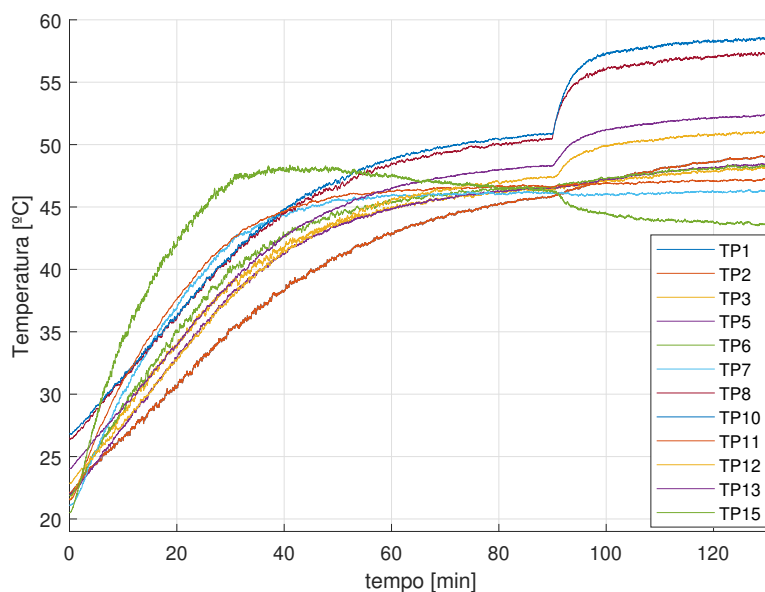
Fonte: Autoria própria.

Visando explorar a relação do aumento da velocidade com um valor fixo de carga no freio, ensaiou-se o conversor na condição de velocidade de rotação do motor em 3000 RPM e a corrente do freio em 150 mA. Como mostra a figura 39, as temperaturas alcançadas ficaram em patamares similares ao ensaio anterior, o que indica que o fator mais preponderante para um maior aquecimento dos componentes refere-se ao aumento da corrente aplicada ao freio, ou seja, à maior demanda energética.

Figura 39 – Corrente do freio 150 mA e velocidade de rotação 3000 RPM.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.



(b) Curvas térmicas dos componentes.

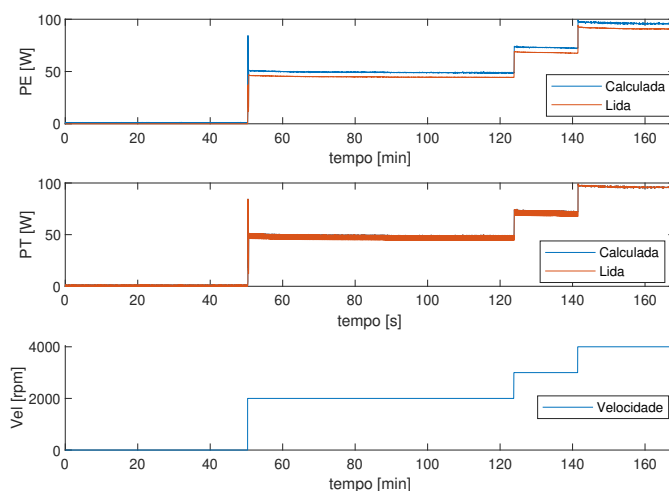
Fonte: Autoria própria.

A recomendação inicial de temperatura da estufa era de 60 °C, porém, os pri-

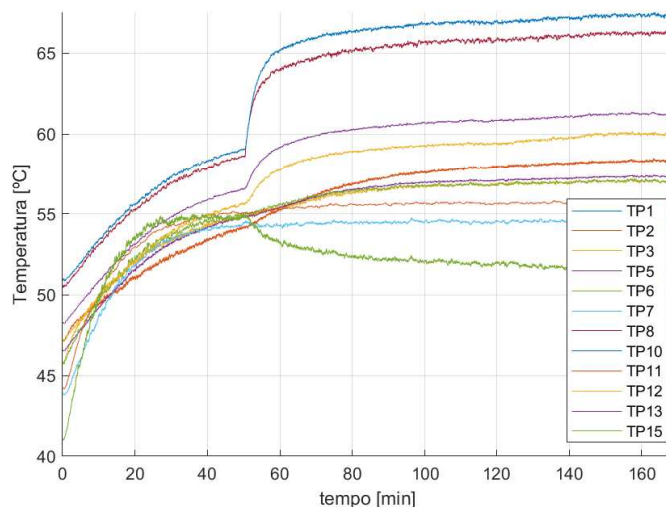
meiros ensaios foram feitos em uma temperatura menor, pois, como não se conhecia exatamente o comportamento térmico dos componentes, preferiu-se realizar ensaios com temperaturas mais distantes dos limites de operação dos componentes.

Com a temperatura da estufa medindo 60 °C, é possível ver, pela figura 40, o resultado do ensaio considerando uma corrente de 150 mA e velocidade de rotação variável. Pelo fato da estufa estar mais quente, nota-se todas as temperaturas dos componentes subiram, com exceção do dissipador, o qual possui um efeito de aquecimento mais lento conforme as temperaturas dos demais componentes aumentam. Novamente, os componentes mais aquecidos foram os mesmos dos outros ensaios, mas medindo 66 °C a 67 °C, respectivamente.

Figura 40 – Corrente do freio 150 mA e velocidade de rotação variável.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.

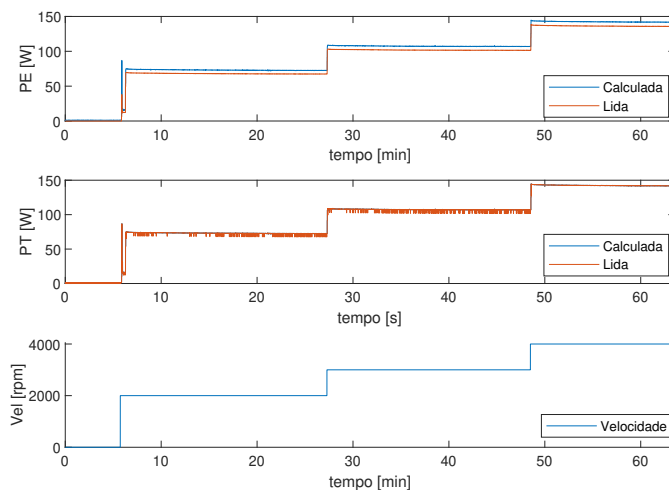


(b) Curvas térmicas dos componentes.

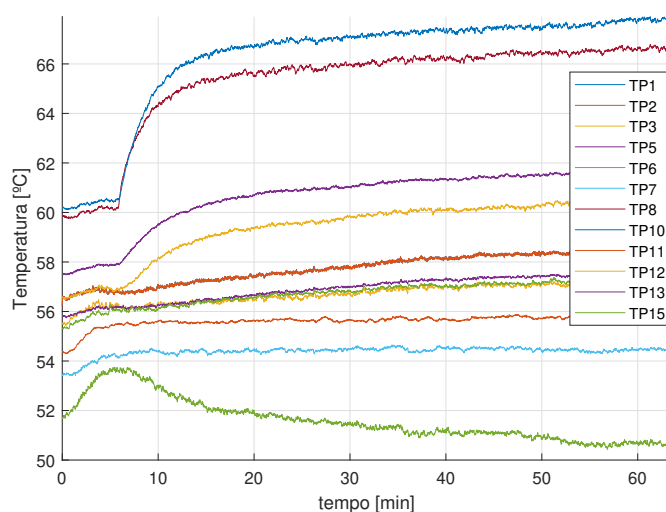
Fonte: Autoria própria.

Agora, realizando o mesmo ensaio mas com aumento de 35 mA na corrente, como pode ser visto na figura 41, as temperaturas não mudaram muito de patamar, apesar das potências terem crescido por volta de 50 W.

Figura 41 – Corrente do freio 185 mA e velocidade de rotação variável.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.

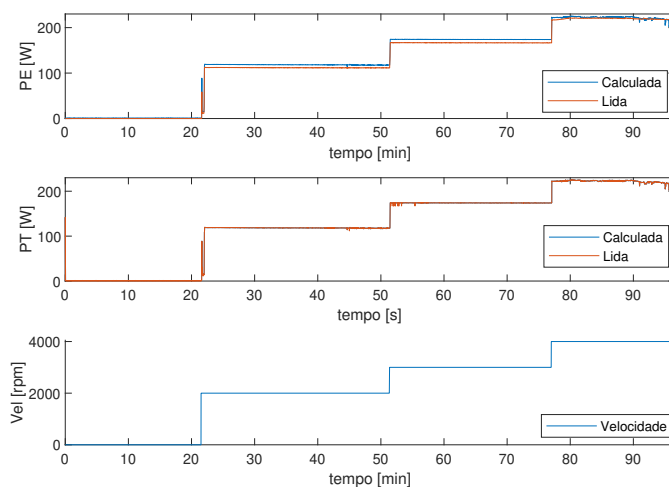


(b) Curvas térmicas dos componentes.

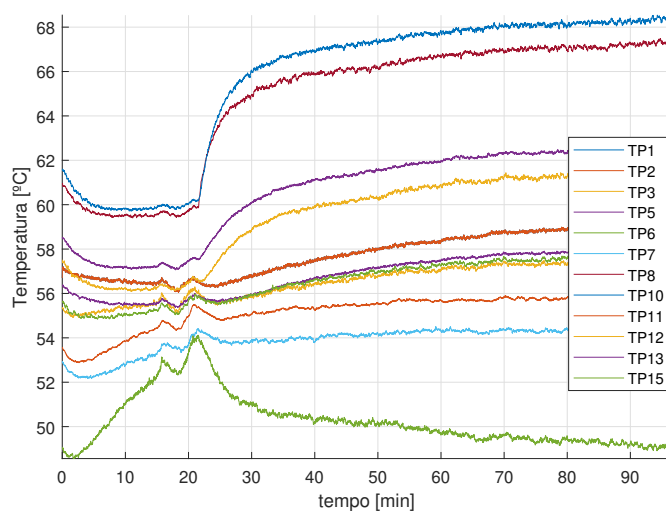
Fonte: Autoria própria.

Finalmente, para um maior nível de corrente, novamente, houve um aumento na potência de 50 W, chegando ao patamar acima de 200 W, como ilustrado na figura 42, e também com crescimento nas temperaturas dos componentes. Os mais quentes chegaram a 67,31 SI e 68,48 °C. Este resultado reforça o efeito de aquecimento causado pelo maior nível de carga mecânica aplicada ao eixo do motor, mais do que a velocidade em que este opera. Entretanto, as temperaturas dos componentes permaneceram bem distantes dos valores limites passados pela Nidec.

Figura 42 – Corrente do freio 225 mA e velocidade de rotação variável.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.



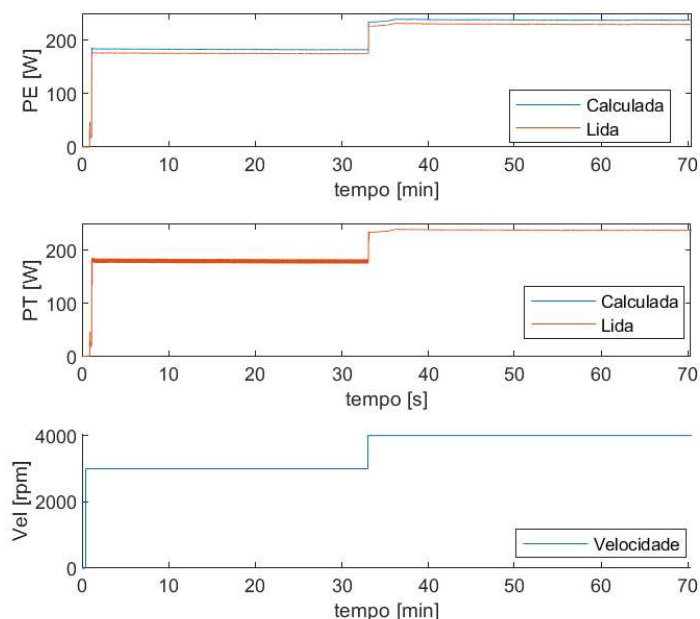
(b) Curvas térmicas dos componentes.

Fonte: Autoria própria.

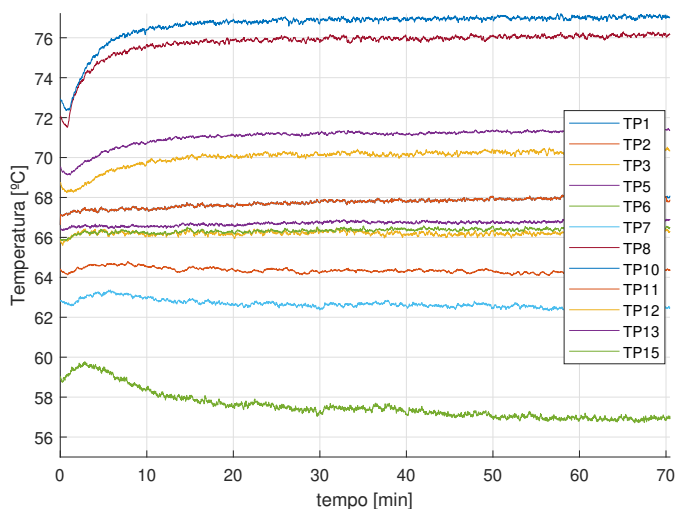
Buscando aproximar ainda mais dos limites de temperaturas dos componentes, foram realizados ensaios com a temperatura da estufa medindo 70°C . Neste cenário, aplicou-se um degrau de corrente de 225 mA e variou-se a velocidade, em sequência, 3000 RPM e 4000 RPM, como ilustrado na figura 43. Agora, é possível notar um aumento significativo nas temperaturas dos componentes, apesar de não se notar um crescimento nas temperaturas quando há um incremento na velocidade. Os componentes mais quentes chegaram a $76,19^{\circ}\text{C}$ e $77,07^{\circ}\text{C}$.

Visando investigar se haveria um crescimento da temperatura com aumento da demanda energética, foram aplicados os valores máximos recomendados de corrente fornecida pela fonte (320 mA) e velocidade máxima para este motor (4000 RPM). Os

Figura 43 – Corrente do freio 225 mA e velocidade de rotação variável.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.



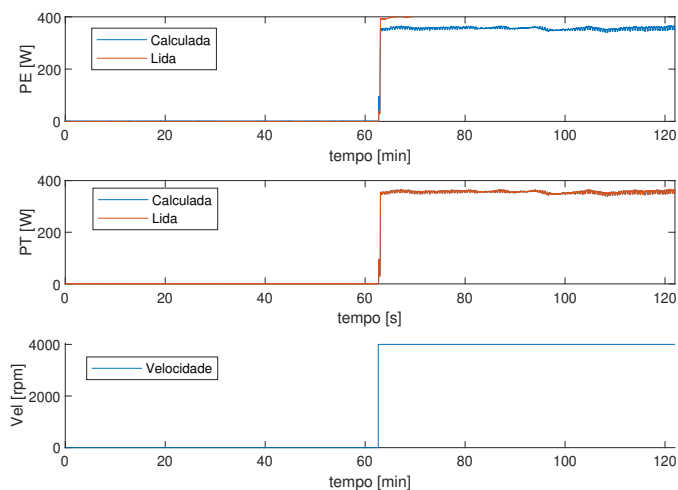
(b) Curvas térmicas dos componentes.

Fonte: Autoria própria.

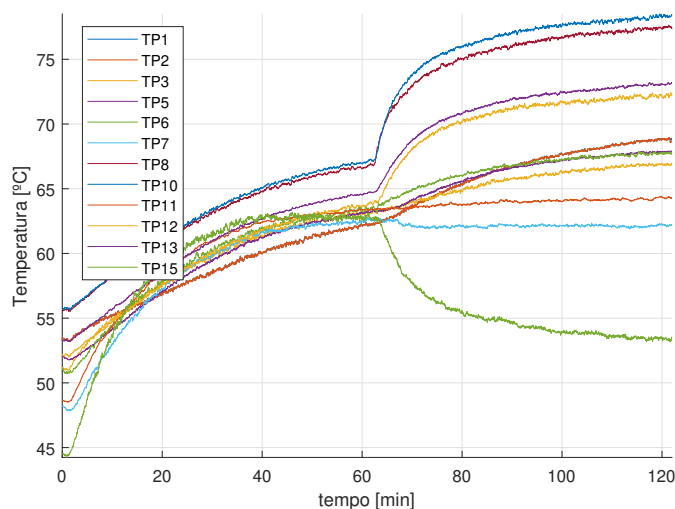
resultados, apresentados pela figura 44, indicam que conseguiu-se um leve aumento nas temperaturas dos componentes, chegando ao máximo de 78,46 °C. Entretanto, durante o ensaio, acompanhou-se a velocidade real de rotação do motor medida pelo conversor de frequência a qual, quando aplicado o freio, caiu drasticamente de 4000 RPM para menos de 3000 RPM, aumentando muito lentamente. Aqui, lembrou-se da informação dada pela Nidec, que ressalta a incapacidade do conversor entregar determinado nível de potência, devido a limites de segurança internos (de corrente e

tensão) gravados em software. Assim sendo, estabeleceu-se que a condição máxima de operação da bancada é: temperatura da estufa em 70 °C, velocidade de rotação igual a 3000 RPM e corrente máxima aplicada ao freio de 320 mA.

Figura 44 – Corrente do freio 320 mA e velocidade de rotação 4000 RPM.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.



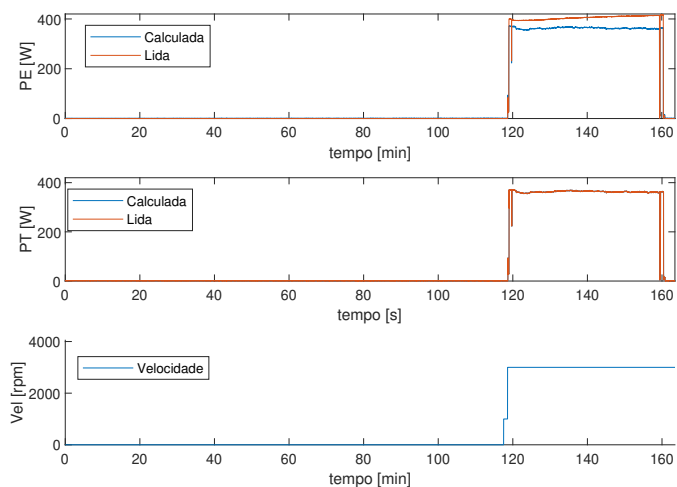
(b) Curvas térmicas dos componentes.

Fonte: Autoria própria.

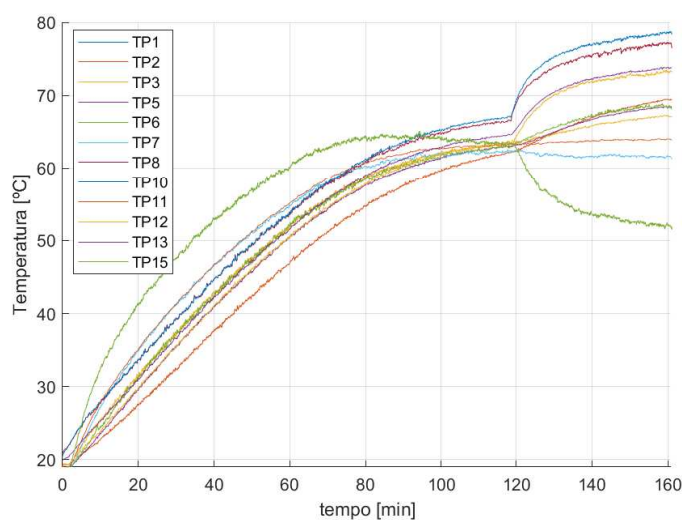
A figura 45 mostra os resultados alcançados nesta condição máxima de operação, sendo estes bem similares ao ensaio anterior. Entretanto, houve um aquecimento muito menor dos enrolamentos e bobinas do motor e o controlador interno de velocidade do conversor de frequência consegue manter a saída bem mais próxima à referência.

A conclusão tirada após a realização destes ensaios, é de que, com as condições máximas de operação do dinamômetro, ou seja, máxima velocidade de rotação

Figura 45 – Corrente do freio 320 mA e velocidade de rotação 3000 RPM.



(a) Potências medidas na entrada do conversor e no motor.



(b) Curvas térmicas dos componentes.

Fonte: Autoria própria.

do motor e máxima corrente aplicada ao freio de histerese, as temperaturas alcançadas ficaram, apesar de mais próximas, ainda distantes dos limites reais passados pela Nidec. Assim, para fazer o controle, serão utilizados limites de temperatura mais baixos que os reais, visando fazer uma prova de conceito do sistema de controle em malha fechada que visa acelerar o aquecimento dos componentes. Os novos limites são mostrados na tabela 8:

Tabela 8 – Limites de temperatura dos componentes.

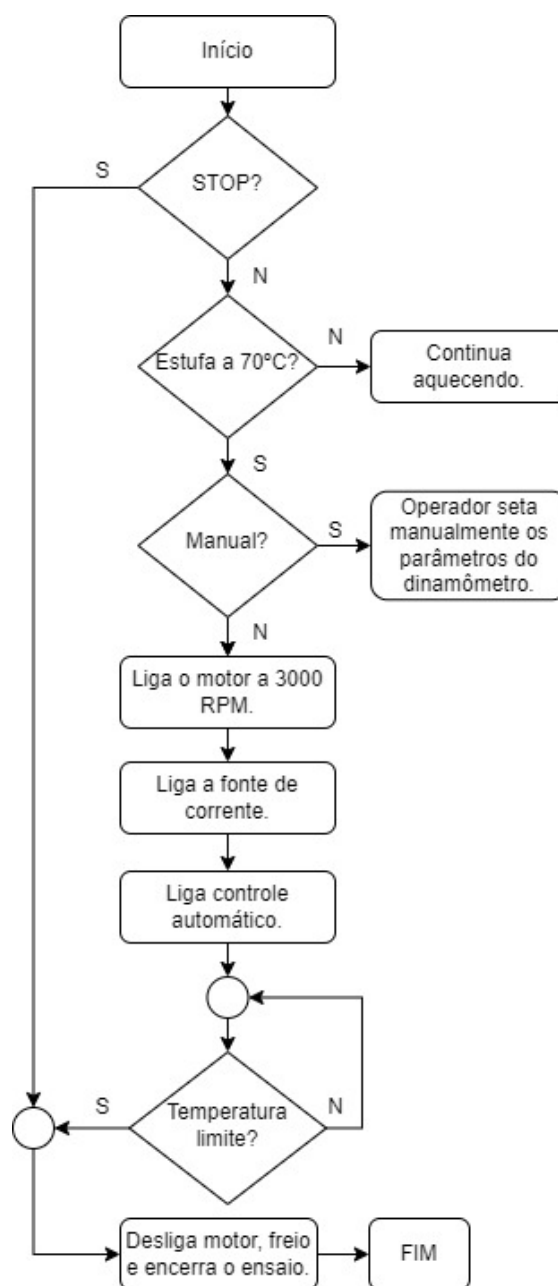
Termopar	Componente	Limite Real [°C]	Limites Máximos [°C]	Novos Limites [°C]
1	Capacitor	95	71,05	70
2	Capacitor	95	71,03	70
3	Choke	110	67,9	68
5	Capacitor	95	69,37	68
6	Fusível	115	69,52	69
7	Conector	115	62,10	63
8	CI SMPS	115	77,65	76
10	Indutor	100	79,07	78
11	Capacitor	95	64,07	65
12	Capacitor	95	73,67	73
13	Microcontrolador	95	74,46	74
15	Dissipador	80	60,10	80

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – SOFTWARE PARA O ENSAIO TÉRMICO

Como já citado, utilizou-se o software Labview para implementar as malhas de controle e as rotinas de aquisição, tratamento e exportação dos dados colhidos durante o ensaio. Este apêndice mostra o painel frontal e explica o funcionamento de cada um dos instrumentos virtuais desenvolvidos. Porém, antes de apresentá-los, é necessário explicar a sequência de funcionamento do ensaio, o que será feito através do fluxograma mostrado pela figura 46.

Figura 46 – Fluxograma do ensaio térmico automatizado.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, é feita a comunicação com todos os equipamentos da bancada e são setadas todas as variáveis utilizadas na aplicação. Neste caso, o motor, o freio e o resistor de aquecimento da estufa estão desligados, a princípio. A condição que permite a continuação do ensaio é o status de falso do botão de STOP. Portanto, se o STOP estiver desacionado, a aplicação verifica a temperatura da estufa e, se for menor que 70 °C, ativa o sistema de controle da temperatura da estufa.

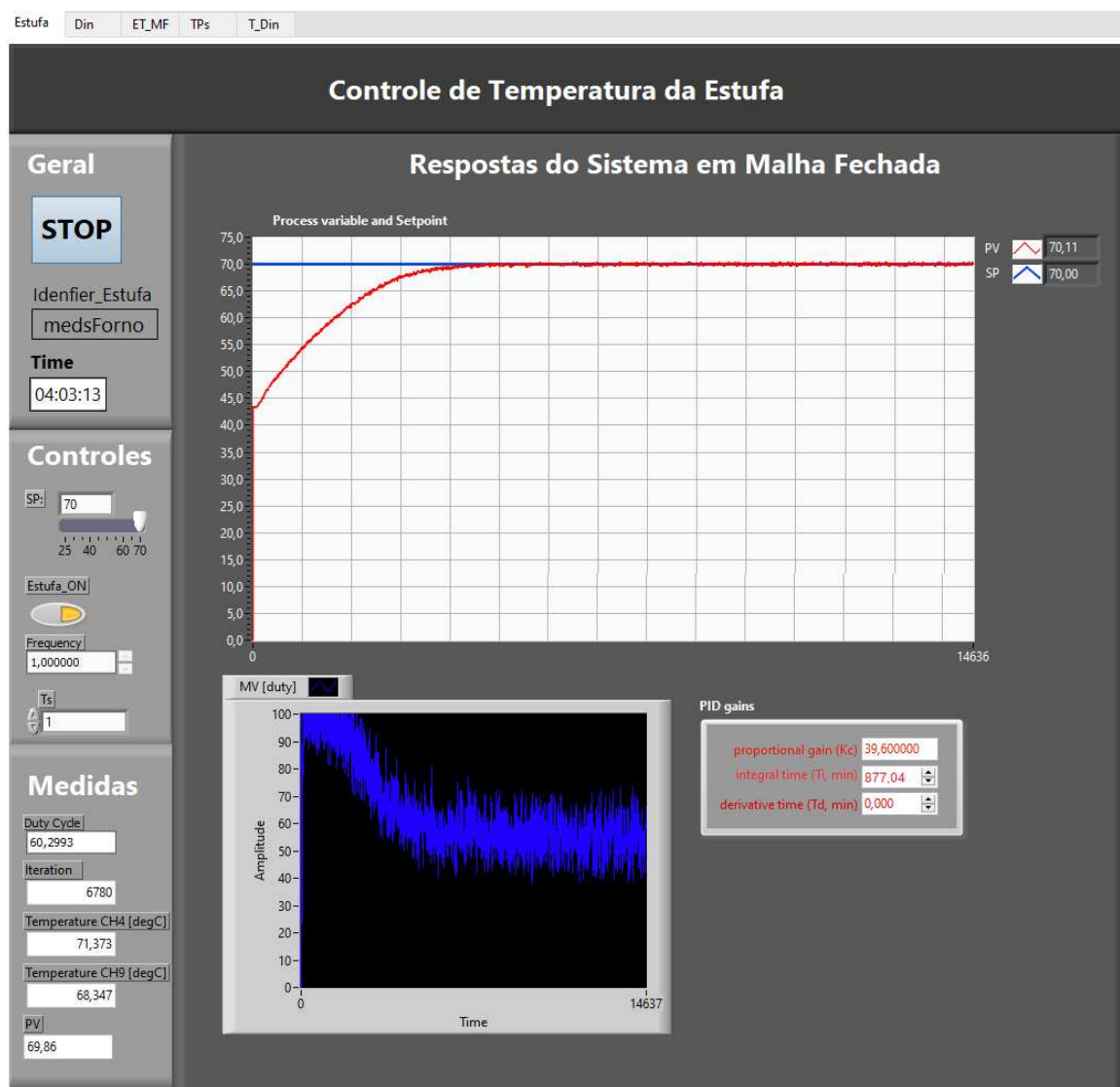
Quando a temperatura da estufa atinge o valor desejado, se o botão Manual estiver acionado, o operador consegue, manualmente, alterar os parâmetros do dinamômetro, o que significa controlar o motor e o freio. Caso o Manual esteja desligado, a aplicação define as condições do ensaio, acionando o motor com velocidade de rotação em 3000 RPM e ligando a fonte de corrente. Com isso, o sistema de controle que acelera o aquecimento dos componentes passa a atuar diretamente, controlando a corrente aplicada ao freio. O ensaio é encerrado quando a temperatura limite do componente é atingida ou quando o botão de STOP é ligado. Este encerramento consiste nos passos: parar o motor, desligar a fonte de corrente, desligar o ar comprimido para resfriamento do freio e parar de executar a aplicação.

A aplicação desenvolvida em Labview visa otimizar a operação do ensaio térmico e torná-la a mais intuitiva e de rápida assimilação. Sendo assim, como ilustrado pela figura 47, os diferentes módulos (instrumentos virtuais) foram separados por abas, cujas funções são explicadas sucintamente a seguir:

- **aba estufa:** esta aba, mostrada na figura 47, permite a parametrização do sistema de controle de temperatura da estufa, bem como a supervisão do sinal de controle e da variável de processo.
- **aba din:** esta aba mostra, em tempo real, as medidas elétricas do dinamômetro. Além disso, possui os módulos para controle manual da fonte de corrente e também de comando/parametrização/comunicação com o conversor de frequência. A figura 48 mostra a atuação desta aba em tempo de execução.
- **aba ET_{MF} :** é similar à aba estufa, mas com a diferença que trata-se do sistema de controle de temperatura dos componentes da placa. Além disso, é possível escolher modo de controle manual ou automático, como pode ser visto na figura 49.
- **aba TPs:** ilustrada pela figura 50, é possível, através desta aba, monitorar as temperaturas de todos os componentes instrumentados da placa do conversor. Em cada um dos gráficos, está presente o limite de temperatura máximo de cada um deles.
- **aba T_{din} :** esta aba foi implementada pela necessidade de monitorar as temperaturas das bobinas e da carcaça do motor, além da temperatura do freio de histerese.

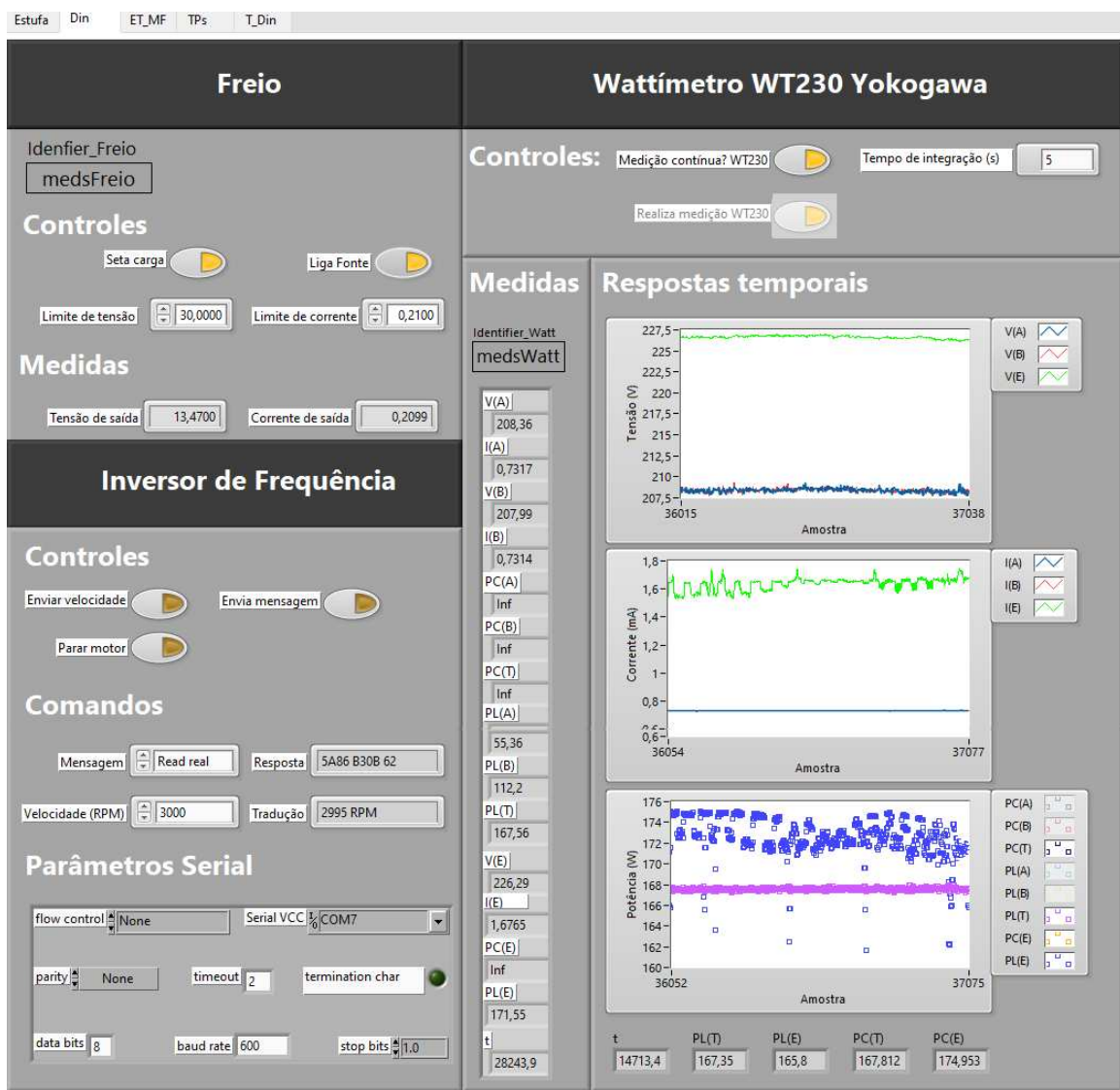
Com isso, é possível visualizar o comportamento térmico do dinamômetro com a variação da corrente aplicada ao freio. Novamente, isto é mais uma rotina de segurança utilizada, inicialmente, para definir o condição de ensaio ideal. A figura 51 mostra o comportamento das temperaturas do dinamômetro durante um ensaio.

Figura 47 – VI do sistema de controle da temperatura da estufa.



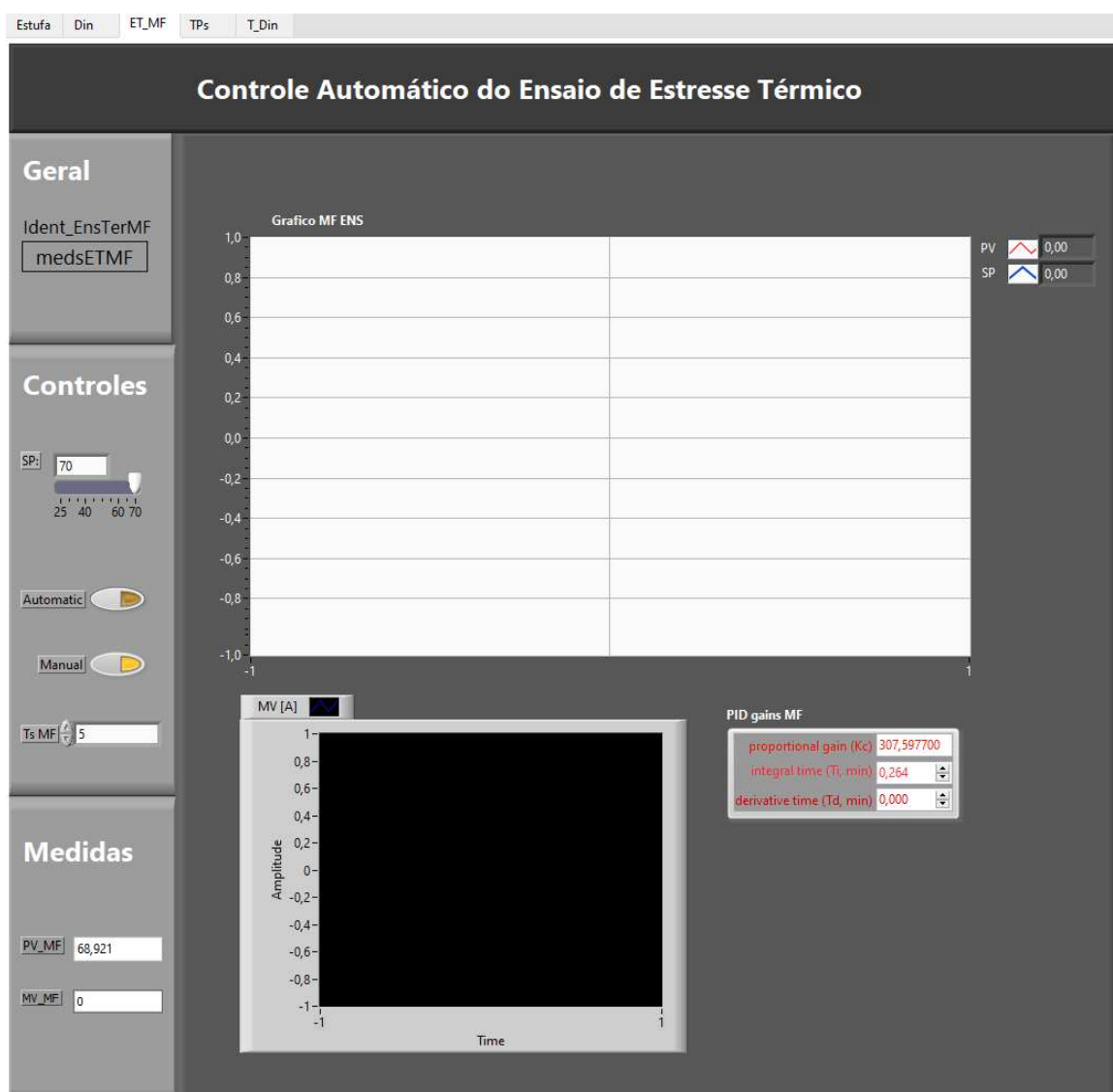
Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – VI de controle do dinamômetro.



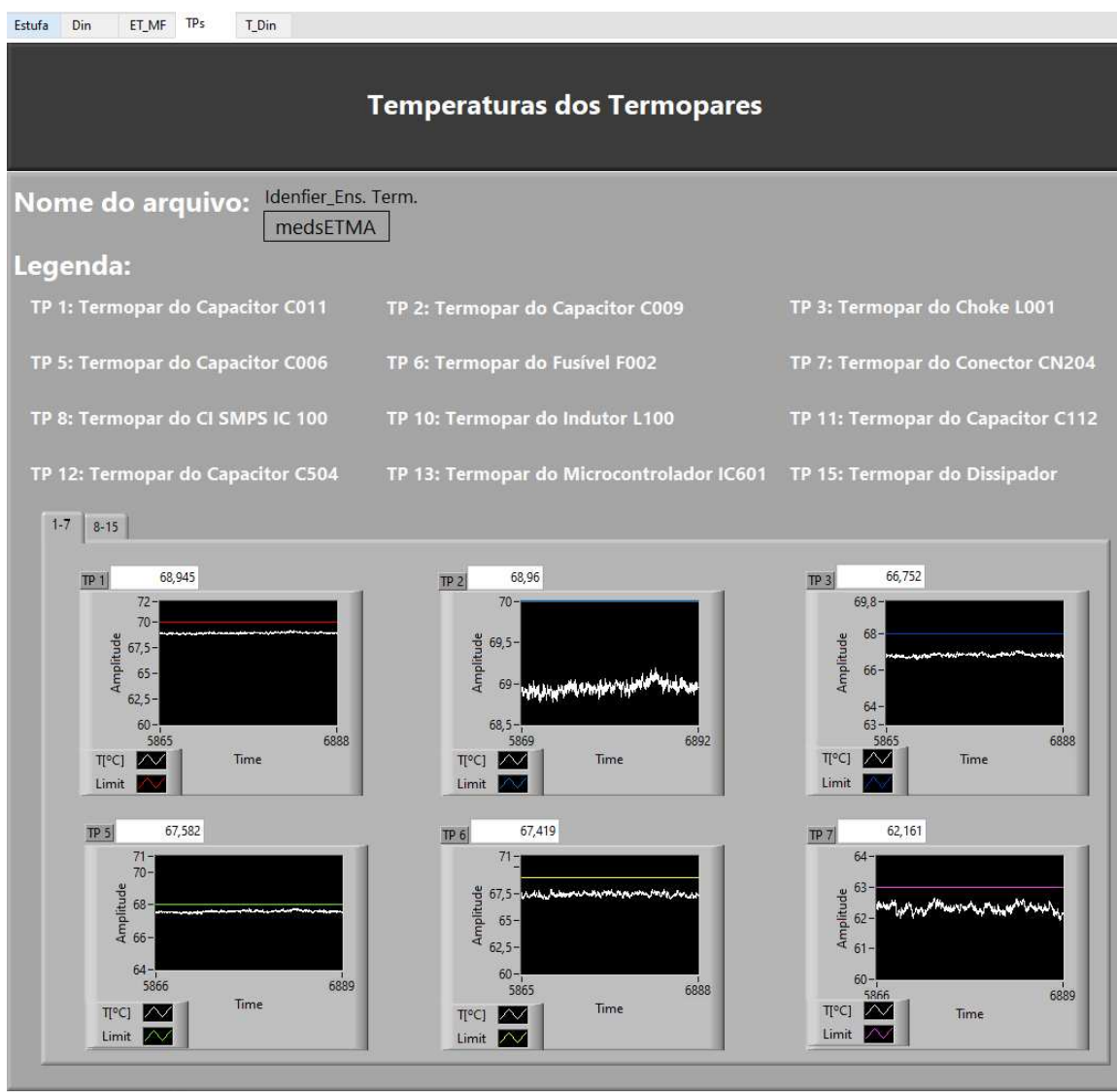
Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – VI do sistema de controle da temperatura do componente TP 1.



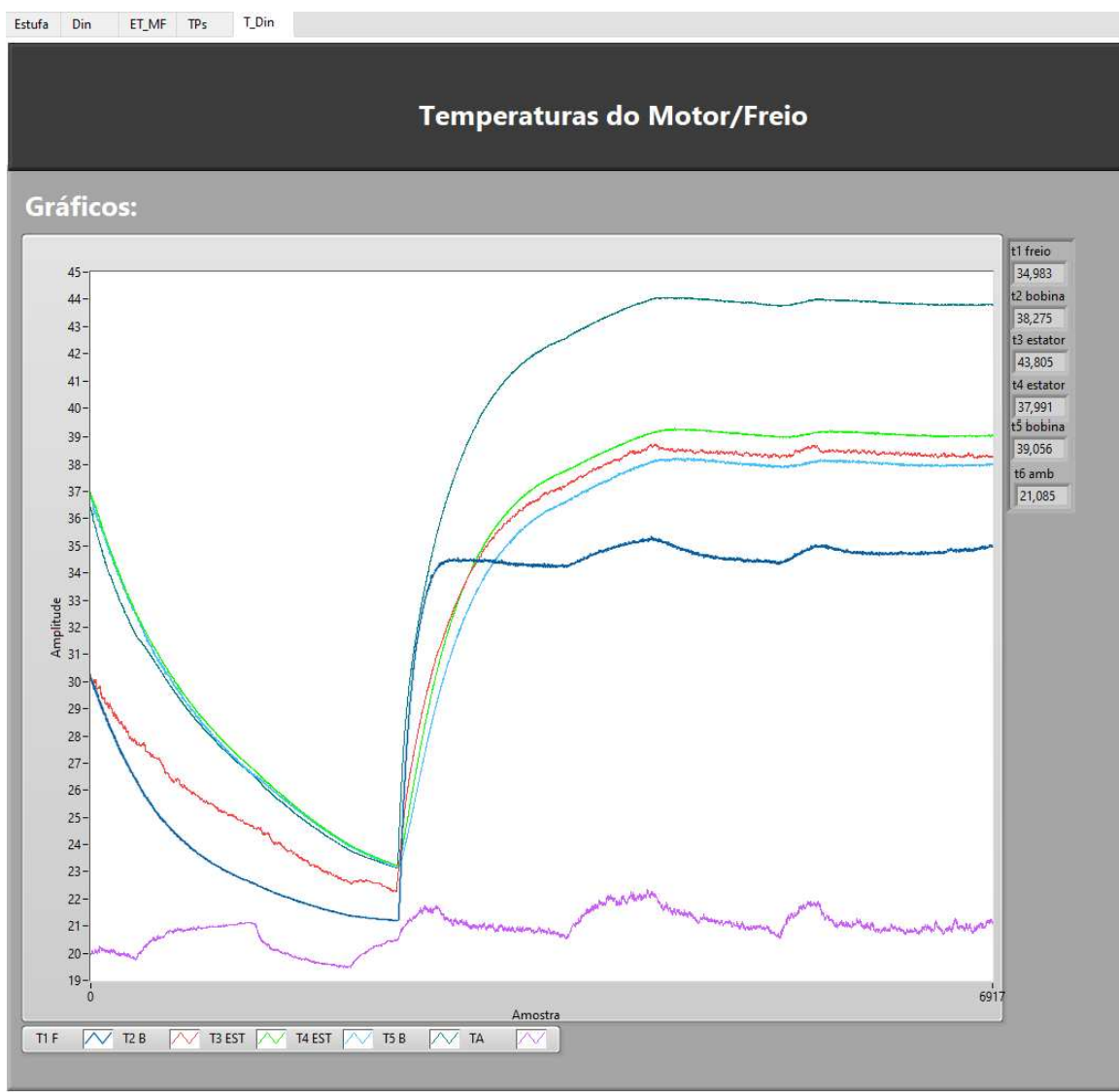
Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – VI de monitoramento das temperaturas dos termopares.



Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – VI de monitoramento das temperaturas do motor e do freio.



Fonte: Autoria própria.