

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC
ENGENHARIA MECATRÔNICA

DANIEL CRISTOVAM ALMEIDA CUNHA

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM FORNO DE CICLO
TÉRMICO PARA ENVELHECIMENTO DE CABOS ELÉTRICOS**

Uberlândia, MG
2023

DANIEL CRISTOVAM ALMEIDA CUNHA

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM FORNO DE CICLO
TÉRMICO PARA ENVELHECIMENTO DE CABOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro

Uberlândia, MG
2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972 Cunha, Daniel Cristovam Almeida, 1997-
2023 Desenvolvimento experimental de um forno de ciclo
térmico para envelhecimento de cabos elétricos [recurso
eletrônico] / Daniel Cristovam Almeida Cunha. - 2023.

Orientador: Alan Petrônio Pinheiro.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecatrônica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Mecatrônica. I. Pinheiro, Alan Petrônio, 1982-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Mecatrônica. III. Título.

CDU: 621.03

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica
Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP
38400-902
Telefone: (34) 2512-6771 - www.mecanica.ufu.br - mecatronica@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecatrônica				
Defesa de:	FEMEC42100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	05/07/2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:47
Matrícula do Discente:	11511EMT005				
Nome do Discente:	Daniel Cristovam Almeida Cunha				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento experimental de um forno de ciclo térmico para envelhecimento de cabos elétricos				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	(x) Sim () Não				

Reuniu-se de forma presencial, no Campus Santa Mônica, Bloco 3N - Anexo, Sala Vermelha, a Banca Examinadora, designada pelo docente orientador, assim composta: Prof. Dr. Carlos Alberto Gallo - FEMEC/UFU; Prof. Dr. Luciano José Arantes - FEMEC/UFU; e Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro - FEELT/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, e concedeu ao estudante a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do estudante e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Alan Petronio Pinheiro**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/07/2023, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciano José Arantes**,



Professor(a) do Magistério Superior, em 09/07/2023, às 13:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Gallo**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/07/2023, às 15:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4588363** e o código CRC **426C9CF0**.

Referência: Processo nº 23117.043470/2023-51

SEI nº 4588363

*Dedico este trabalho àqueles sonhadores que, como eu, acreditam num futuro de paz.
Em especial à minha mãe, que me ensinou o valor da esperança e trabalho duro.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me permitir sonhar e trabalhar pelos meus objetivos.

Agradeço também à minha família, sem a qual eu seria incapaz de chegar tão longe.

Em especial à minha mãe, que me concebeu e me apoia todos os dias ao longo de minha jornada. De quem recebi o amor, a força e a capacidade necessários para progredir. A quem admiro profundamente pela resiliência, sabedoria e fé.

Agradeço à minha namorada, Vitória, por transformar meus dias em alegria e me ensinar o amor ao próximo. Por me apoiar nos bons e maus momentos.

Aos amigos por todo o companheirismo, risadas e suporte. Aos colegas por partilhar o caminho e as tarefas.

Aos professores, pelos ensinamentos e orientações. Em particular, à Professora Doutora Dulce, que me mostrou a luz em um momento delicado de minha graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alan Petrônio, pela confiança e oportunidade.

Ao meu amigo Piero Martelli, que me encorajou a dar os primeiros passos para a execução do presente trabalho.

Ao meu colega Leandro Duarte por sua incomensurável contribuição, pelo apoio e companheirismo ao longo do tempo em que trabalhamos juntos.

Agradeço à Petrobras e à UFU pela bolsa concedida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Estendo os agradecimentos a todos que fizeram parte da minha jornada, seja positiva ou negativamente. Devo a vocês o que sou hoje.

“Nas grandes batalhas da vida,
o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

A indústria moderna está sujeita à competição global e esse cenário exige a mais alta eficiência das empresas. Um dos métodos utilizados nas fábricas para reduzir custos oriundos de paradas não programadas na produção é chamado de manutenção preditiva. O presente trabalho visa colaborar com as técnicas preditivas de desgaste em cabos elétricos de média tensão. Estudar a durabilidade e vida útil dos cabos condutores utilizados no meio industrial é justificado pela busca da racionalização do uso dos recursos materiais. Para a tarefa de coleta de dados de desgaste na camada isolante de cabos de transmissão é mister produzir amostras envelhecidas dos mesmos para que sejam analisadas. Seguindo esta linha foi, então, projetado um forno com capacidade para 40 amostras simultâneas que produz condições térmicas que aceleram o envelhecimento dos cabos. A câmara térmica demonstrou controlabilidade satisfatória, sendo versátil o suficiente para outras aplicações, em condições distintas das quais fora projetada para funcionar.

Palavras-chave: *cable-ageing*; Raspberry; forno; cabos elétricos.

ABSTRACT

Modern industry is subject to global competition and this scenario demands the highest efficiency from companies. One of the methods used in factories to reduce costs arising from unscheduled production stops is called predictive maintenance. The present work aims to collaborate with the predictive techniques of wear in medium voltage electrical cables. Studying the durability and useful life of conductor cables used in the industrial environment is justified by the search for rational use of material resources. For the task of collecting wear data on the insulating layer of transmission cables, it is necessary to produce aged samples of them to be analyzed. Following this line, an oven with a capacity for 40 simultaneous samples was designed, which produces thermal conditions that accelerate the aging of the cables. The thermal chamber demonstrated satisfactory controllability, being versatile enough for other applications, in different conditions from which it was designed to work.

Keywords: cable-ageing; Raspberry; oven; power cables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Disposição das camadas de um cabo de média tensão	6
Figura 2.2 – Resistência elétrica pelo tempo	13
Figura 2.3 – Peso pelo tempo	14
Figura 2.4 – Módulo da tensão pelo tempo	14
Figura 2.5 – Gráfico de resistência térmica derivado da propriedade resistência elétrica, com ponto final de 50%. temperaturas de teste 150, 130, 110 e 100°C, conforme Norma IEC 60216	15
Figura 2.6 – Modos de transferência de calor	16
Figura 2.7 – Raspberry Pi 3 B+	23
Figura 2.8 – Sensor RTD de platina	25
Figura 2.9 – Aplicação típica de um MAX31865 para Pt-100 de 3 fios	26
Figura 3.1 – Modelo 3D do forno	31
Figura 3.2 – Esboço 3D da estrutura do forno	33
Figura 3.3 – Representação da parede do forno por meio do modelo de circuito térmico	34
Figura 3.4 – Suporte de cabos	34
Figura 3.5 – Separador de cabos	35
Figura 3.6 – Diagrama elétrico do quadro de comando do forno	36
Figura 3.7 – Quadro de comando do forno	37
Figura 3.8 – Representação gráfica da resistência de aquecimento	38
Figura 3.9 – Conexão do módulo MAX31865 com o Raspberry	39
Figura 3.10–Algoritmo de controle do forno	41
Figura 3.11–Resposta ao acionamento da resistência inferior	43
Figura 3.12–Resposta ao acionamento da resistência intermediária	44
Figura 3.13–Resposta ao acionamento da resistência superior	45
Figura 3.14–Resposta ao acionamento de todas as resistências	46
Figura 4.1 – Comportamento de um controlador de temperatura <i>setpoint</i> -histerese	48
Figura 4.2 – Temperatura do forno após aplicação da lei de controle	49
Figura 4.3 – Resfriamento do forno	50
Figura 4.4 – Imagem térmica da janela de inspeção	51
Figura 4.5 – Imagem térmica da junta entre portas	51
Figura 4.6 – Imagem térmica da junção teto-parede	52
Figura A.1 – Portas de Entrada e Saída do Raspberry PI	65
Figura B.1 – Informações técnicas do Pt-100	66
Figura C.1 – Pinagem do MAX31865	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Isolantes elétricos e suas propriedades	7
Tabela 2.2 – Condutores elétricos e suas propriedades	7
Tabela 3.1 – Isolantes térmicos e suas propriedades	32
Tabela 3.2 – Tempo de envelhecimento equivalente	47
Tabela 4.1 – Tempo de aquecimento	49
Tabela 4.2 – Tempo de resfriamento	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CLP	Controlador Lógico Programável
EPR	Borracha Etileno-Propileno
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
HEPR	Composto termofixo extrudado a base de etilenopropileno de alto módulo
IEC	International Electrotechnical Commission
LRI	Laboratório de Redes Inteligentes
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PVC	Policloreto de Vinila
RTD	Detector de Temperatura por Resistência
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
XLPE	Polietileno Reticulado

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Letra grega Delta
ε	Letra grega Epsilon
μ	Letra grega Mu
σ	Letra grega Sigma
τ	Letra grega Tau
θ	Letra grega Theta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	CONVENÇÕES E LIMITAÇÕES	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	CABOS DE ENERGIA	5
2.1.1	Cabos de média tensão	5
2.2	ENVELHECIMENTO E DEGRADAÇÃO DE CABOS	8
2.2.1	Estado da arte	9
2.2.2	Procedimentos para envelhecimento térmico	11
2.2.2.1	Métodos de envelhecimento térmico acelerado	11
2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	15
2.3.1	Condução	16
2.3.2	Convecção	16
2.3.3	Radiação	17
2.4	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	18
2.4.1	Tração	18
2.4.2	Compressão	19
2.4.3	Flexão	20
2.4.4	Cisalhamento	20
2.5	CIRCUITOS ELÉTRICOS	21
2.5.1	Tensão	21
2.5.2	Corrente	21
2.5.3	Resistência	22
2.5.4	Potência	22
2.6	CONTROLE E AUTOMAÇÃO	23
2.6.1	Raspberry Pi	23
2.6.2	Pt-100	24
2.6.3	MAX31865	25
2.6.4	Protocolo SPI	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	LEVANTAMENTO DE PRÉ-REQUISITOS	29
3.1.1	Requisitos mecânicos	29
3.1.2	Arranjo das amostras	29
3.1.3	Controle de temperatura	30
3.2	MODELAGEM 3D	30
3.3	ESCOLHA DE MATERIAIS	31

3.4	FABRICAÇÃO	32
3.4.1	Estrutura	32
3.4.2	Isolamento térmico	33
3.4.3	Suporte e separador de cabos	34
3.5	ATUADORES E SENSORES	35
3.5.1	Quadro de comando	35
3.5.2	Resistências	37
3.5.3	Sensores de temperatura	38
3.6	CONTROLE E AUTOMAÇÃO	38
3.6.1	Conexão Raspberry – MAX31865	39
3.6.2	Algoritmo	40
3.7	LEVANTAMENTO DE CURVAS	42
3.7.1	Calibração dos sensores	42
3.7.2	Curvas de aquecimento	42
3.8	CRONOGRAMA DE ENVELHECIMENTO	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	RESULTADOS	48
4.2	AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA	48
4.3	CONTROLE DE TEMPERATURA	48
4.4	ISOLAMENTO TÉRMICO	50
4.5	DISCUSSÕES	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	CONCLUSÃO	53
5.2	TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICES	57
	APÊNDICE A Código de controle do forno	59
	ANEXOS	64
	ANEXO A GPIO do Raspberry PI	65
	ANEXO B Faixa de operação do Pt-100	66
	ANEXO C Pinagem do MAX31865	67

1 INTRODUÇÃO

A concorrência no cenário empresarial tem se acirrado ao longo do tempo trazendo maior necessidade por redução de custos na produção e maior eficiência em suas atividades (GRIFFIN, 2007). Essa conjuntura no âmbito industrial tem criado uma pressão para aumentar a disponibilidade e confiabilidade das máquinas e processos produtivos (EBELING, 2005). Pensando nisso, é importante destacar a evolução da Engenharia de Manutenção no decorrer do século XX e XXI, que contribuiu grandemente para diminuir os chamados lucros cessantes e as paradas não programadas das atividades industriais. Nesse processo de desenvolvimento de técnicas e boas práticas de gestão, foi concebida a ideia de indicadores de desempenho, que medem o resultado de uma empresa baseada em sua eficiência e eficácia (CHIAVENATO, 2004). No contexto específico da engenharia isso se exprime em diversos âmbitos, sendo um deles a manutenção preditiva. Isto é, um sistema que busca minimizar reparos não programados nas máquinas da empresa, maximizar lucros e garantir a durabilidade dos elementos da cadeia produtiva.

Seguindo a linha de raciocínio apresentada, um fator primordial para a manutenção preditiva é a capacidade de observar e medir os fenômenos de degradação que se deseja evitar. Essas informações obtidas pelas medições são utilizadas para orientar os responsáveis pela conservação do equipamento a respeito do estado da vida útil dos componentes da máquina. Dessa forma, quando limites pré-determinados de desgaste são atingidos programa-se uma parada nos processos produtivos da empresa a fim de substituir peças ou corrigir o defeito antes que uma eventual falha inesperada ocorra.

Essa parada programada insere inúmeras vantagens em comparação com as paradas não programadas. O primeiro ponto positivo é evitar que o desgaste de uma peça cause consequências em outros elementos daquele equipamento, levando até falhas catastróficas. Além disso, é importante ressaltar que, em atividades de gestão, o homem deve ser capaz de controlar tantos mais acontecimentos quanto possível (CLEGG; KORNBERGER; PITSIS, 2011), evitando que a falha da máquina ocorra em momentos indesejados, trazendo prejuízos como quebra de contratos, atraso em entregas e desperdício de matéria-prima.

Dito isso, é de suma importância a contribuição científica na análise de fenômenos de degradação nos mais diferentes materiais, descrição dos principais agentes estressores e suas consequências para as características de operação dos mesmos. No presente trabalho, foi desenvolvido e executado o projeto estrutural e de controle de uma câmara térmica que será utilizada para provocar o envelhecimento acelerado de cabos de média tensão com o objetivo de observar a degradação do material isolante destes. Essa deterioração da isolação é detectada através de alterações de propriedades mecânicas, químicas e elétricas do polímero utilizado no cabo.

"A quantidade de tempo disponível para testes geralmente é consideravelmente menor

do que a vida útil esperada do componente"(EBELING, 2005, p. 323, tradução nossa) ¹. Esse fato, descrito por Ebeling (2005), traduz os desafios para análise de falhas de equipamentos e respectivos trabalhos científicos decorrentes dessa prática. "Isso certamente é verdade para componentes altamente confiáveis, para os quais o teste em condições normais geraria poucas ou nenhuma falha dentro de um período de tempo razoável."(EBELING, 2005, p. 323, tradução nossa) ². Decorre disso a necessidade de desenvolver ferramentas capazes de acelerar o processo de deterioração dos componentes de forma controlada.

Conseqüentemente, foi projetada uma câmara térmica com o objetivo de produzir, de forma acelerada e em quantidade estatisticamente justificada, amostras de cabos cuja camada isolante apresenta propriedades equivalentes àquelas envelhecidas naturalmente por decorrência da aplicação de um carregamento nominal. No decurso do desenvolvimento desse trabalho buscou-se soluções afim de otimizar o consumo elétrico da câmara térmica, além de garantir que sua temperatura seja programável pelo operador – permitindo, portanto, que o ritmo de envelhecimento também seja controlado. Ademais, foram utilizadas diretrizes técnicas apresentadas nas normas disponíveis na literatura para orientar as decisões tomadas. O conhecimento adquirido a partir do estudo dessas amostras envelhecidas poderá ser utilizado para criação de um dispositivo capaz de identificar o estágio de desgaste dos cabos em tempo real e propiciar a manutenção preditiva desses elementos.

1.1 JUSTIFICATIVA

O grupo de pesquisadores do Laboratório de Redes Inteligentes (LRI) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) desenvolve tecnologias e trabalhos científicos acerca do tema de *smart grids*. Durante a execução de um desses projetos foi encontrada a necessidade de envelhecer cabos de energia elétrica de média tensão para adquirir dados quantitativos a respeito da vida útil desses ativos.

O envelhecimento desses condutores está associado à degradação do polímero que compõe a camada isolante e sua conseqüente perda de propriedades elétricas, químicas e mecânicas. O fenômeno descrito acontece naturalmente nos cabos elétricos ao longo da operação normal nas linhas de energia (ANDERS, 2005). Fabricantes renomados indicam em seu catálogo o tempo estimado durante o qual esses cabos podem ser utilizados sem intercorrências. Porém, essa estimativa não leva em conta condições específicas de operação desses elementos condutores onde estão instalados.

O objetivo da pesquisa desenvolvida no LRI era projetar um dispositivo capaz de mensurar em tempo real a degradação de cabos de média tensão, propiciando a manutenção preditiva desses elementos. Isto é, parâmetros elétricos sendo monitorados em tempo real produzindo

¹ "The amount of time available for testing is often considerably less than the expected lifetime of the component."

² "This is certainly true for highly reliable components, for which testing under normal conditions would generate few if any failures within a reasonable time period."

informação a respeito do verdadeiro estado de conservação dos cabos. Para que isso fosse possível, era imprescindível construir um equipamento capaz de acelerar o envelhecimento desses cabos para a análise das amostras em vários estágios de sua vida útil.

A equipe de pesquisadores do LRI optou pela técnica de envelhecimento térmico dos cabos elétricos, isto é, utilizar temperaturas acima da nominal de trabalho dos cabos para acelerar a degradação da camada isolante dos mesmos. Dessa maneira, identificou-se a possibilidade de construir uma câmara térmica com dimensões e características de operação que atendessem às demandas da pesquisa.

Foi definido que seria realizado o projeto de um forno elétrico resistivo automatizado de grande porte, que será descrito através do presente trabalho. Essa tarefa exige uma complexa gama de competências, desde o projeto estrutural e de isolamento térmico, teorias de transferência de calor até conhecimentos em automação, programação e projeto de sistemas de controle.

Portanto, esse texto almeja descrever as etapas de projeto, construção e operação de uma câmara térmica capaz de produzir ambiente estressor para cabos de energia elétrica com a finalidade de estudar a vida útil destes. Além disso, busca-se estabelecer metas de melhoria para o forno, que poderão ser implementadas por demais pesquisadores que se envolverem nessa tarefa.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma câmara térmica com dimensões apropriadas à demanda supracitada. Essa câmara térmica deve ser controlável e de fácil uso para os operadores. Em função desse objetivo principal, decorrem outros objetivos específicos:

- Levantar pré-requisitos de projeto;
- Criar um esboço 3D da estrutura do forno;
- Fazer o cálculo estrutural e térmico para definição final da geometria;
- Fazer conexões elétricas do forno;
- Fazer conexões de controle;
- Programar o controlador;
- Testar e validar o funcionamento da câmara térmica.

As características buscadas no projeto são:

- Robustez mecânica, de forma a garantir a durabilidade;

- Assertividade no desenho, para minimizar o retrabalho;
- Precisão no controle da temperatura;
- Fácil operabilidade;
- Flexibilidade na programação, permitindo outras aplicações para a câmara térmica no futuro.

1.3 CONVENÇÕES E LIMITAÇÕES

O presente trabalho teve como foco a entrega de uma câmara térmica funcional dentro de um cronograma e com racionalização do orçamento. Dito isso, é mister citar convenções adotadas para a execução do projeto:

- A inércia térmica provocada pela inserção e remoção dos cabos durante a operação foi considerada marginal, presupondo-se que o sistema de controle seja capaz de absorver essas variações;
- Os efeitos convectivos do meio externo foram estimados para condições ideais;
- O forno foi considerado hermético, para fins de cálculo;
- Os pré-requisitos escolhidos para a elaboração do forno foram baseados em premissas do projeto desenvolvido no LRI, na estrutura física do laboratório e também buscando flexibilidade para o uso futuro do forno.

Para além das convenções adotadas, é importante destacar limitações do trabalho, que devem ser sanadas em estudos futuros e novos projetos semelhantes:

- Necessário realizar simulação por elementos finitos para melhor compreensão da distribuição de temperatura no interior do forno;
- Simulação por elementos finitos para compreensão do aquecimento do cabo elétrico amostrado;
- Relação de compromisso entre número total de resistências e custo envolvido causou uma escolha sub-ótima em termos de distribuição de temperatura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No decorrer do presente capítulo serão demonstradas as bases teóricas sobre as quais foram edificadas as atividades abordadas nesse trabalho, as premissas utilizadas e os conceitos principais relativos à execução do projeto.

2.1 CABOS DE ENERGIA

Para compreender o trabalho desenvolvido é primordial que entendamos o básico sobre cabos de energia elétrica. Será importante fazer um recorte específico para o caso de estudo já que se trata de um tema complexo e heterogêneo. Dessa forma, trataremos brevemente a respeito de cabos utilizados na faixa de média tensão.

O primeiro passo dessa caminhada é conhecer a função para a qual esses elementos de condução elétrica foram desenvolvidos. Conforme [Yankovsky \(1970\)](#) a energia elétrica é produzida em usinas que convertem diferentes formas de energia em energia elétrica, tais como energia potencial gravitacional, energia eólica, energia térmica, energia nuclear etc. A partir do momento em que a energia é gerada, ela deve ser transmitida até as unidades consumidoras. Isso é feito através dos cabos de transmissão em um circuito fechado ([YANKOVSKY, 1970](#)). A etapa final desse processo é chamada de distribuição, onde a energia sai das subestações e chega até os consumidores finais.

Essa transmissão de energia pode ocorrer em alta, média ou baixa tensão com corrente alternada ou contínua ([YANKOVSKY, 1970](#)). O mais utilizado mundo afora é a transmissão em corrente alternada e a tensão escolhida depende majoritariamente das distâncias envolvidas, através de uma análise de custo benefício ([HEINHOLD, 1973](#)).

O presente trabalho se deu em torno da construção de uma câmara para envelhecimento térmico acelerado de cabos de média tensão utilizados na distribuição de energia em corrente alternada. Dessa forma, é necessário entender seu funcionamento básico e o que significa o envelhecimento desses elementos.

2.1.1 Cabos de média tensão

Os cabos de média tensão são aqueles que operam em faixas de 1 kV até 36,2 kV, de acordo com a NBR 14039 - Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV ([ABNT, 2004](#)). A construção desses cabos geralmente envolve 7 diferentes camadas ([HEINHOLD, 1973](#)). Sendo numeradas da seguinte forma:

1. Condutor;
2. Blindagem do condutor;

3. Isolação;
4. Blindagem da isolação;
5. Blindagem metálica;
6. Separador;
7. Cobertura.

A numeração cresce do elemento mais interno para o elemento mais externo. As camadas enumeradas ficam dispostas de acordo com a figura 2.1 a seguir:

Figura 2.1 – Disposição das camadas de um cabo de média tensão



Fonte: Compilação do autor, edição a partir da imagem disponível na internet. ¹

A imagem acima representa cabos de média tensão similares aos que serão submetidos às condições estressoras do forno. O objetivo desejado com o uso da câmara térmica é acelerar o envelhecimento do polímero da camada 3, a camada de isolação. Essa camada pode ser composta de diversos tipos de materiais, sendo alguns deles os seguintes:

- EPR - Borracha Etileno-Propileno;
- HEPR - Composto termofixo extrudado a base de etilenopropileno de alto módulo;
- PVC - Policloreto de vinila;
- XLPE - Polietileno reticulado.

¹ Disponível em: https://www.induscabos.com.br/wp-content/uploads/2013/10/catalogo_media_tensao_pdf.pdf. (Acesso em 15 de Janeiro de 2023)

Cada um desses materiais apresenta diferentes características, aplicações, benefícios e desvantagens. A tabela a seguir elenca a temperatura de trabalho e a rigidez dielétrica desses polímeros:

Tabela 2.1 – Isolantes elétricos e suas propriedades

Material	Temperatura de serviço	Rigidez dielétrica (kV/mm)
EPR	90°C	40 – 60
HEPR	90°C	40 – 60
PVC	70°C	25 – 50
XLPE	90°C	50 – 65

Fonte: Prysmian Group²

Já a camada 1, chamada de condutora, em geral é fabricada em cobre ou alumínio (HEINHOLD, 1973), sendo as opções mais disponíveis comercialmente. As diferenças entre os materiais promovem uma significativa variação do peso final do produto já que o cobre possui massa específica cerca de 3 vezes maior que a do alumínio (SHIGLEY, 1984). A tabela a seguir compara a massa específica e condutividade elétrica de 3 diferentes metais, sendo dois deles utilizados para a construção de cabos elétricos e o terceiro a título de comparação:

Tabela 2.2 – Condutores elétricos e suas propriedades

Material	Condutividade elétrica (S.m/mm ²)	Massa específica (kg/m ³)
Alumínio	34,2	2700
Cobre	61,7	8920
Ferro	10,2	7874

Fonte: University of Sheffield³

A escolha desses materiais depende da aplicação específica na indústria e deve ser determinada de acordo com os requisitos de projeto. Para a câmara térmica, foi avaliado um cenário em que serão amostrados simultaneamente 40 cabos de 3 metros de comprimento cada, cuja composição é a isolação em XLPE e a camada condutiva de cobre.

É preciso entender o papel da temperatura na degradação do XLPE, por ser o fator que justifica a construção de uma câmara térmica para envelhecimento dos cabos e estudo da sua vida útil. A temperatura de operação do cabo influencia na durabilidade do mesmo, sendo previsto na literatura que valores mais elevados de temperatura em relação ao especificado pelo fabricante induzem desgaste prematuro da camada de isolação (ANDERS, 2005).

É esse fenômeno que será explorado pela câmara térmica, de forma a possibilitar a pesquisa estabelecendo uma relação entre o desgaste da camada isolante e a vida útil restante dos

² Disponível em: https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Cabos_Energia_Construcao_Dimensionamento.pdf (Acesso em 04 de Junho de 2023)

³ Disponível em: <https://www.webelements.com/> (Acesso em 05 de Junho de 2023)

cabos. Destarte, cabos com vida útil estimada em 20 anos poderão sofrer desgaste equivalente em tempo menor e mais acessível aos pesquisadores do LRI.

Conhecendo o efeito da temperatura no polímero de isolamento do cabo, é importante discutir os fenômenos de transferência de calor envolvidos no processo para continuar para uma análise mais aprofundada do projeto. Partindo da premissa que precisaremos elevar a temperatura das amostras, iremos discutir os processos pelos quais essa tarefa pode ser cumprida.

2.2 ENVELHECIMENTO E DEGRADAÇÃO DE CABOS

Ao longo de sua vida útil, a isolamento de um cabo sofre degradação devido a inúmeros fatores de estresse, tanto de natureza ambiental (umidade, temperatura ambiente, radiação, etc) como de ordem operacional (esforço dielétrico devido à tensão aplicada e elevação de temperatura devido ao efeito Joule). Além destes, o cabo pode também estar sujeito a estresses mecânicos durante a sua instalação, gerando no mesmo pontos mais frágeis que, ao longo do tempo, tornam-se locais potencialmente mais propícios à ocorrência de falhas.

Analisando-se microscopicamente a isolamento de um cabo observa-se que, em sua estrutura, há regiões “vazias” (*voids*) na forma de pontos ou canais, cujo interior acaba sendo naturalmente preenchido por moléculas de gases, água ou mesmo outras substâncias durante o processo de produção do cabo. Quando este é colocado a operar e a isolamento fica então submetida à tensão aplicada (e ao campo elétrico decorrente da mesma) tais irregularidades, de pequenas dimensões e com menor permissividade e rigidez dielétrica do que as regiões vizinhas (formadas pelo isolante), ficam sujeitas a um estresse dielétrico bastante superior em comparação com os pontos adjacentes, favorecendo a ocorrência de ionização da substância que preenche tais regiões “vazias”. Decorre disso que descargas elétricas pontuais ocorrem nestes pontos podendo invadir as regiões vizinhas formadas pelo dielétrico, estabelecendo canais maiores de ocorrência de descarga que, por sua vez, podem gerar novos vazios e pontos de defeito no interior da isolamento. A degradação do cabo decorrente deste processo é definida como envelhecimento elétrico.

Por outro lado, a temperatura à qual a isolamento está submetida também afeta a taxa de envelhecimento. Nesse caso, o sobreaquecimento do cabo provoca reações químicas que alteram a sua estrutura elevando sua cristalinidade e progressivamente reduzindo o seu desempenho enquanto material dielétrico. Em resumo, o processo de degradação do XLPE em função do seu aquecimento ocorre de forma contínua e gradual, primeiramente aumentando o entrelaçamento da estrutura reticulada do XLPE (*cross-linking increase*), seguido por um processo de degradação por oxidação. Diferentes parâmetros podem ser empregados para se medir, qualitativamente, o envelhecimento sofrido pela isolamento, tais como: o seu fator de dissipação (tangente de delta), a medição da resistência de isolamento, o alongamento do isolante (utilizando-se camadas da isolamento devidamente extraídas do cabo) e a medição da atividade das descargas parciais, dentre outras possibilidades. Em quaisquer dessas alternativas, a relação entre o nível de degradação e o parâmetro medido não é linear e, muito menos, trivial. A variação das medições mostra

tendências, ou seja, a evolução da severidade da degradação, mas não os valores absolutos do dano acumulado ou da expectativa de vida restante.

Tal como amplamente mencionado na literatura, tem-se que a expectativa de vida útil da isolamento do cabo, quando operando permanentemente em sua temperatura nominal e sem a ação de estressores de natureza ambiental, varia entre 20 e 30 mil horas. A operação com correntes inferiores à nominal reduz a sua temperatura de operação e amplia o seu tempo de vida útil. Por outro lado, a presença de fatores de estresse externos como umidade, radiação, ambientes químicos, etc, reduz a sua expectativa de vida. Dessa forma, cada cabo, considerando as particularidades das condições em que opera, tem uma taxa de envelhecimento ao longo do tempo. Ou seja, não é possível correlacionar os valores dos parâmetros mensuráveis citados anteriormente com o tempo de operação ou de vida útil restante, visto que diferentes cabos, em seus respectivos ambientes e perfis de carga particulares, acumularam níveis de degradação distintos. Por outro lado, independentemente do tempo ou das condições em que tenha operado o nível de degradação acumulado refletirá nos valores medidos dos parâmetros supracitados.

Segundo a literatura pesquisada, os estresses decorrentes da tensão mecânica e temperatura são os mais determinantes no processo de degradação da isolamento. Além disso, ainda de acordo com essa mesma referência bibliográfica, que realizou testes térmicos acelerados de cabos em um forno, observou-se que os valores medidos do fator de dissipação variaram nitidamente com o tempo de teste, mostrando que a degradação da isolamento de fato estava em progressão no teste realizado (MUSTAFA; AFIA; TAMUS, 2020).

2.2.1 Estado da arte

Vários são os trabalhos apresentados com o intuito de se avaliar a vida útil de cabos isolados mediante estresse térmico. Alguns papers correlacionam a presença do estresse térmico e mecânico, outros relacionam o estresse térmico com o elétrico para o mesmo fim.

É sabido que a maioria dos cabos EPR apresentam uma temperatura máxima de trabalho de 105°C com a capacidade de operar a 140°C por um curto período de tempo. Em Cao e Grzybowski (2013), amostras de isolamento de um cabo EPR (classe 15kV) de 90 μm de espessura foram cortados. Isto posto, uma tensão em corrente alternada (CA) constante foi aplicada às amostras de cabo mediante a variação da temperatura de teste nas seguintes proporções: 105°C, 140°C, 165°C e 190°C. Dessa forma, os dados de tempo de quebra do isolamento foram coletados para extrapolar as características de vida útil das amostras de EPR testadas.

Com o intuito de propor cinéticas de envelhecimento para entender melhor as influências dos esforços elétricos e térmicos no material isolante, a fim de fornecer informações úteis para o projeto de cabos HVDC, implementou-se o experimento apresentado em Yahyaoui et al. (2021). Nesse trabalho, os testes foram conduzidos com amostras Rogowski feitas de isolamento XLPE com eletrodos semicondutores, envelhecidas por mais de 3 anos (1220 dias) em três temperaturas diferentes (70, 80 e 90°C) sob dois campos elétricos de corrente contínua (30 e 60 kV/mm). As

grandezas avaliadas foram o fator de perda dielétrica, resistividade de volume e acúmulo de carga espacial.

No que se refere ao estabelecimento de uma base teórica para a substituição de cabos, Lin e Cai (2020) enfoca o mecanismo de envelhecimento térmico do cabo. Com base no modelo de Arrhenius, o método de regressão não linear multivariada foi usado para processar os dados e o modelo de previsão de vida de envelhecimento térmico do cabo foi derivado. Do ponto de vista da operação real, a confiabilidade do modelo foi analisada. A metodologia adotada, como indicador de ponto de falha, consiste na propriedade de 50% de retenção de alongamento. O resultado indica que a vida útil do cabo a 90°C é de 32,2 anos o que vai ao encontro da indicação dos fabricantes, mostrando assim que o modelo desenvolvido apresenta respostas promissoras. Vale ressaltar que a métrica utilizada para o desenvolvimento experimental se ampara na IEC 60216-2, (IEC, 2005), e em Zhang, Bai e Ma (1992).

Em Alghamdi e Desuqi (2020) foi utilizada uma técnica padronizada de envelhecimento térmico acelerado, com aplicação do modelo de Arrhenius. Essa técnica é comumente usada em testes de vida acelerada para estabelecer uma relação tensão-tempo de vida e estimar a vida útil do cabo. Dois tipos de material de polietileno reticulado (XLPE) trabalhando em temperaturas elevadas entre 95 e 105°C foram selecionados para teste. Nesses processos de envelhecimento acelerado, é necessário que a isolação atinja um nível de degradação, considerado o fim da vida útil do material em avaliação. O critério de fim de vida (também chamado de ponto final) é definido como uma redução percentual do alongamento na ruptura, que é considerado neste estudo como 50% de retenção do alongamento na ruptura. O envelhecimento térmico foi realizado de acordo com (IEC, 2005), enquanto o alongamento à ruptura foi avaliado em vários estágios de envelhecimento. A incerteza na medição foi estimada. Os pontos de dados de curto prazo determinados pelo tratamento de envelhecimento são representados graficamente no gráfico de Arrhenius. A extrapolação desses dados foi usada para prever o desempenho a longo prazo e estimar a vida útil do cabo. Os resultados experimentais deste estudo mostram uma vida útil estimada do cabo entre 7 e 30 anos para temperaturas operacionais nominais entre 95 e 105°C.

Como a estimativa e previsão do tempo de vida de materiais/produtos consome muito tempo, é necessário recorrer a testes acelerados. Neste aspecto, em Boukezzi, Boubakeur e Lallouani (2009), o teste de envelhecimento térmico acelerado a ar foi realizado em quatro temperaturas diferentes. Devido a variações bastante coordenadas e correlacionadas com o tempo, as propriedades mecânicas foram escolhidas como um indicador significativo para determinar a vida útil do isolamento XLPE. O tempo de vida útil chega ao fim quando este parâmetro diminui para a metade de seu valor primário. Portanto, o teste de propriedades mecânicas no isolamento de XLPE foi feito, em diferentes estresses térmicos, para formular dois modelos: o modelo de Eyring e um novo modelo chamado modelo exponencial de potência. Este último apresenta boa precisão em temperaturas elevadas em comparação com outros modelos, como o modelo de Arrhenius.

Em Shwehdi, Morsy e Abugurain (2003) resultados preliminares de uma investigação abrangente de envelhecimento térmico em materiais de isolamento de cabos de média e alta tensão usando diferentes técnicas analíticas foram apresentados. Uma vez que a perda de peso é uma propriedade física significativa, que é considerada influenciada pela degradação térmica, este método foi adotado como um procedimento de diagnóstico para detectar o grau de envelhecimento.

Em Xiao-Kai et al. (2018), uma nova abordagem é proposta. Com base na análise de envelhecimento térmico acelerado de cabos de borracha de etileno-propileno (EPR), a relação teórica entre o alongamento na taxa de retenção de ruptura (EAB%) e a taxa de retenção de dureza foi deduzida dos princípios matemáticos do teste de dureza. A curva de relação é então comparada com os valores medidos, e o resultado mostra que há alto grau de coincidência entre a curva teórica e os valores medidos. Assim sendo, após pesquisar os dados experimentais de EAB% e taxa de retenção de dureza, combinando os "fatores de mudança de temperatura-tempo" com a equação de Arrhenius, o índice de término de vida útil por conta da taxa de retenção de dureza é analisado quando o EAB% é reduzido para 30%-50%. De acordo com a comparação dos valores teóricos com os resultados experimentais, a taxa de retenção de dureza reduzida para 10% foi proposta como o índice de terminação da vida útil do cabo EPR.

Mediante as discussões supracitadas, confirma-se a viabilidade de se acelerar o envelhecimento de cabos através de sua exposição a temperaturas acima do seu valor nominal. Dessa forma, adota-se tal estratégia no presente projeto, cujo procedimento de execução será detalhado próximo item.

2.2.2 Procedimentos para envelhecimento térmico

Este item discorre sobre a metodologia que será adotada para a realização do procedimento de envelhecimento térmico acelerado de cabos XLPE de média tensão. Para isso, será empregado um forno especialmente desenvolvido para este propósito. Dessa forma, o material isolante dos cabos será submetido a temperaturas mais elevadas que a nominal por estarem imersos em um meio aquecido.

Antes de começar o envelhecimento acelerado dos cabos é necessário definir métricas para determinar o grau de degradação do cabo em função da temperatura. Isso vai permitir gerar um cronograma de testes apropriado. A seção 2.2.2.1 descreve um dos métodos mais consolidados para relacionar a temperatura ao envelhecimento dos cabos. O cronograma de envelhecimento dos cabos é descrito na Seção 3.

2.2.2.1 Métodos de envelhecimento térmico acelerado

O princípio do método é realizar testes de envelhecimento a três ou mais temperaturas constantes em amostras adequadamente selecionadas (IEC, 2005). Os corpos de prova ensaiados são submetidos, em tempos fixos, a procedimentos de diagnóstico para detectar o grau de envelhecimento. Esses procedimentos consistem em medições de propriedades significativas

(usualmente elétricas, químico-físicas ou mecânicas), que são consideradas influenciadas por reações de degradação térmica. Tendo traçado as curvas de propriedade pelo tempo em diferentes temperaturas, os critérios de ponto final devem ser selecionados, ou seja, valores limite de variação de propriedade além dos quais o grau de deterioração é considerado para reduzir a capacidade de isolamento para suportar as tensões reais de serviço. As curvas de resistência térmica dos materiais testados podem então ser plotadas, uma para cada ponto final da propriedade selecionado. Eles são obtidos como as linhas de regressão dos pontos experimentais que representam o logaritmo do tempo até o ponto final, ou seja, tempos de falha t_L , pelo recíproco da temperatura absoluta T , de acordo com o modelo de vida:

$$\log t_L = a + b/T \quad (2.1)$$

onde a e b são parâmetros, o primeiro depende da seleção do ponto final e o segundo está relacionado à energia de ativação do processo de envelhecimento (IEC, 2005). A Norma IEC 60216 estabelece três índices para fornecer a caracterização da resistência térmica em forma numérica abreviada: T_I (índice de temperatura), que é a temperatura em °C derivada da relação de resistência térmica (Equação 2.1) em um determinado momento, normalmente 20000 h; T_C , o limite inferior de confiança de 95% de T_I ; HIC (intervalo de meia vida), que é o intervalo de temperatura em °C que expressa a metade do tempo até o ponto final obtido na temperatura correspondente a T_I .

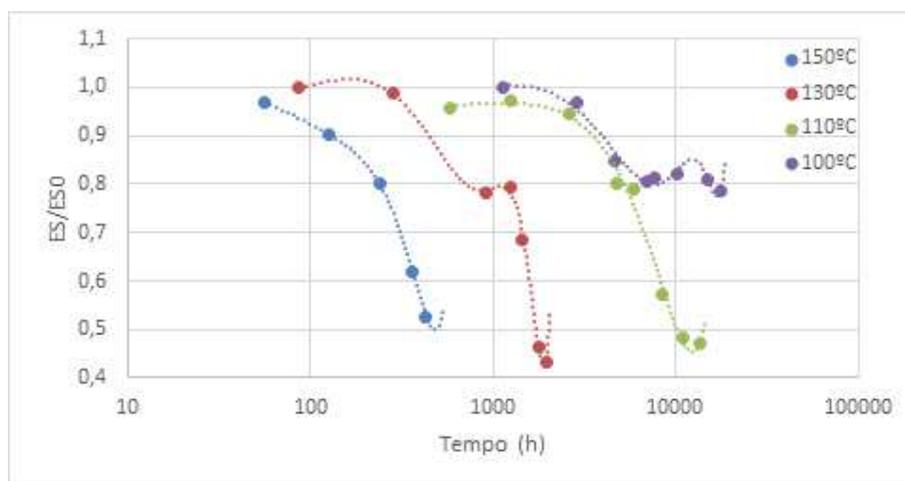
De acordo com esta abordagem, considera-se que o grau real de degradação do material é revelado por procedimentos de diagnóstico, embora as relações íntimas entre essas propriedades e as reações de envelhecimento sejam desconhecidas. A norma IEC 60216 estabelece pontos finais e propriedades recomendadas para que muitas curvas e índices de resistência térmica possam ser obtidos para cada material estudado. No entanto, essas curvas e índices podem diferir notavelmente e podem não fornecer informações sobre o estado real de envelhecimento, fornecendo assim curvas de vida que podem não ser consistentes com a falha em condições de serviço. Além disso, a inclinação, o índice de temperatura e até a linearidade do gráfico de resistência dependem da seleção da propriedade de referência e dos critérios de falha (ALGHAMDI; DESUQI, 2020). O objetivo dos testes de envelhecimento deve ser a escolha de propriedades e pontos finais capazes de caracterizar materiais isolantes por critérios de acordo com as tensões reais esperadas nas operações de serviço.

Uma vez que os cabos são submetidos principalmente em serviço a tensões elétricas, térmicas e mecânicas, as propriedades selecionadas para os testes de envelhecimento realizados em modelos de cabo XLPE foram resistência elétrica, peso e módulo da resistência à tração. As temperaturas de teste foram 150, 130, 110 e 100°C. A necessidade de produzir um gráfico de resistência térmica único e significativo, relacionado à falha real, leva a selecionar a resistência elétrica como a propriedade de referência na qual se baseia a caracterização da resistência térmica. De fato, foi demonstrado (ALGHAMDI; DESUQI, 2020; IEC, 2005) que uma diminuição efetiva

da resistência elétrica pode ser considerada como um índice de mudanças químico-físicas e, em geral, de degradação que estimula o início e o crescimento de arvores elétricas até a quebra quando a tensão aumenta. As outras propriedades medidas para avaliação do envelhecimento térmico (por exemplo, peso e módulo de tração) devem então ser referidas, para seleção do ponto final, à resistência elétrica.

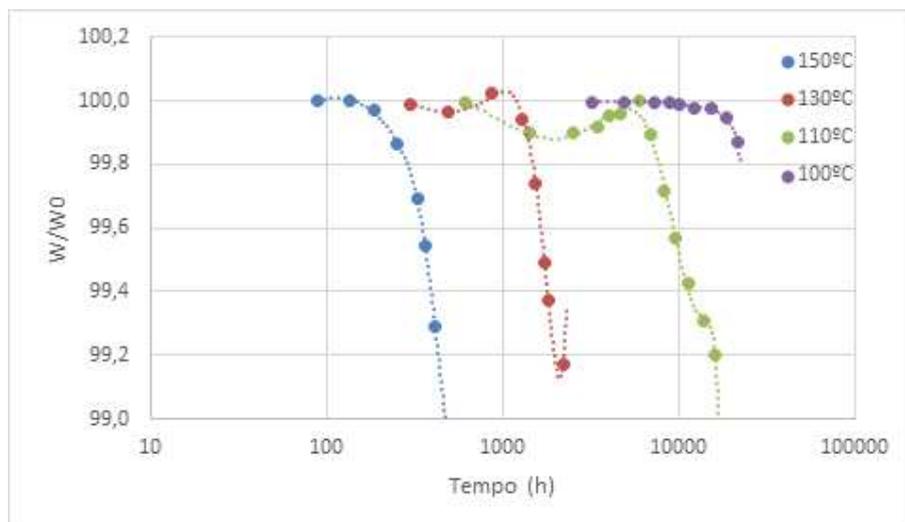
As figuras 2.2, 2.3 e 2.4 mostram as curvas de propriedades em relação ao tempo para resistência elétrica, peso e módulo da tração, respectivamente (os valores das propriedades referem-se aos iniciais, ou seja, ES_0 , W_0 e TM_0 , medidos após o pré-tratamento, e o os intervalos de confiança são calculados com 95% de probabilidade). Como pode ser visto, as propriedades testadas apresentam uma queda acentuada na faixa de temperatura de 150 a 110°C. Pelo contrário, a 100°C a diminuição é pequena e não monotônica, dentro dos tempos extrapolados pelo gráfico de resistência térmica obtido a partir de testes de vida a 110, 130 e 150°C. Este comportamento mostra uma tendência para uma curvatura ascendente da curva de resistência térmica e poderia mesmo levar a supor a existência de um limiar térmico próximo de 100°C, de acordo com modelos de vida não lineares propostos por alguns autores (ALGHAMDI; DESUQI, 2020).

Figura 2.2 – Resistência elétrica pelo tempo



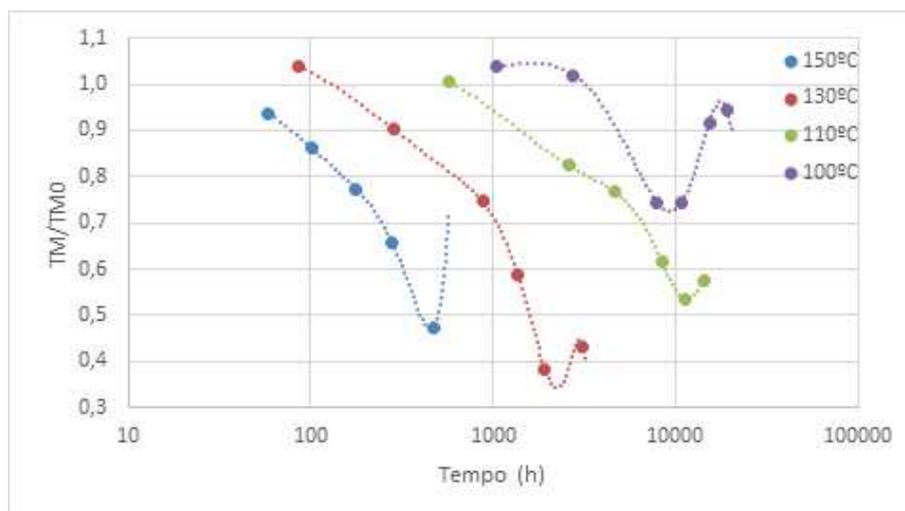
Fonte: Alghamdi e Desuqi (2020), adaptado pelo autor.

Figura 2.3 – Peso pelo tempo



Fonte: Alghamdi e Desuqi (2020), adaptado pelo autor.

Figura 2.4 – Módulo da tensão pelo tempo

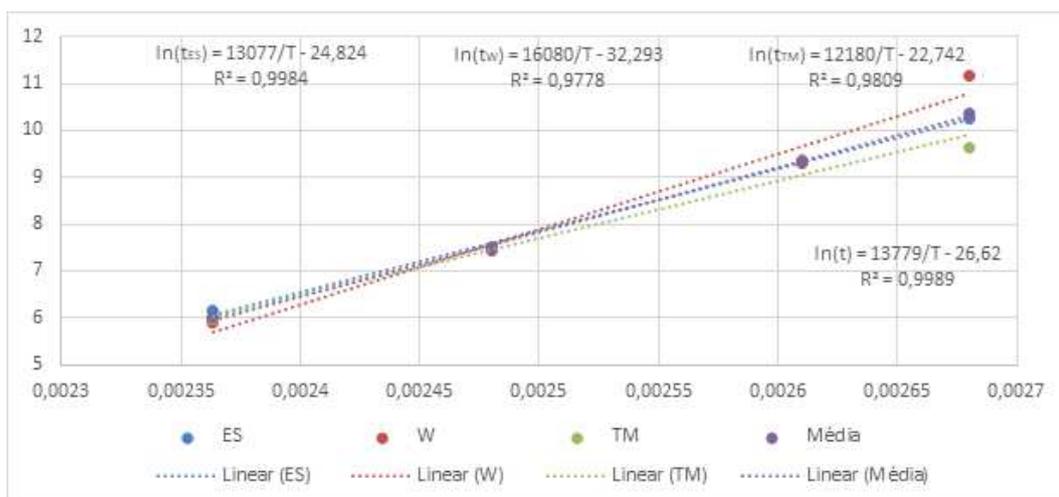


Fonte: Alghamdi e Desuqi (2020), adaptado pelo autor.

A partir destes resultados podem ser obtidos vários gráficos de resistência térmica, de acordo com a norma IEC 60216. No entanto, se apenas uma curva de vida de referência, realmente relacionada à falha, tiver que ser selecionada da ampla gama de possíveis gráficos de resistência térmica, a seleção como um ponto final de referência de um valor incluído na faixa de 40-60% de diminuição da resistência elétrica pode ser um critério de falha apropriado. Com base nessas premissas pode-se observar que na faixa de temperatura de 150 a 100°C, uma diminuição da resistência elétrica para 50% do valor inicial proporciona índices de resistência térmica próximos aos obtidos pela mesma queda percentual do módulo de tração e uma diminuição de 0,5% do peso. Portanto, fazendo referência ao ponto final de 50% da resistência elétrica, pode ser obtido um gráfico de resistência térmica único, representativo das três propriedades selecionadas e capaz de fornecer índices de resistência térmica que podem ser realmente correlacionados com a

degradação e perda de confiabilidade do cabo em condições de serviço. Com base neste critério de falha, o índice de temperatura médio T_I , dos modelos de cabo XLPE testados resulta em 101,2°C, enquanto $T_c = 98,7$ e $HIC = 7,8$ (b, a inclinação da linha de resistência é 5502 e a, a interceptação ordenada é -10,403). A figura 2.5 mostra os gráficos de resistência térmica assim obtidos:

Figura 2.5 – Gráfico de resistência térmica derivado da propriedade resistência elétrica, com ponto final de 50%. temperaturas de teste 150, 130, 110 e 100°C, conforme Norma IEC 60216



Fonte: Própria.

A regressão linear dos pontos médios mostrados na figura 2.5 resulta na seguinte relação:

$$\ln t = \frac{13779 - 26,62T}{T} \tag{2.2}$$

Ou ainda:

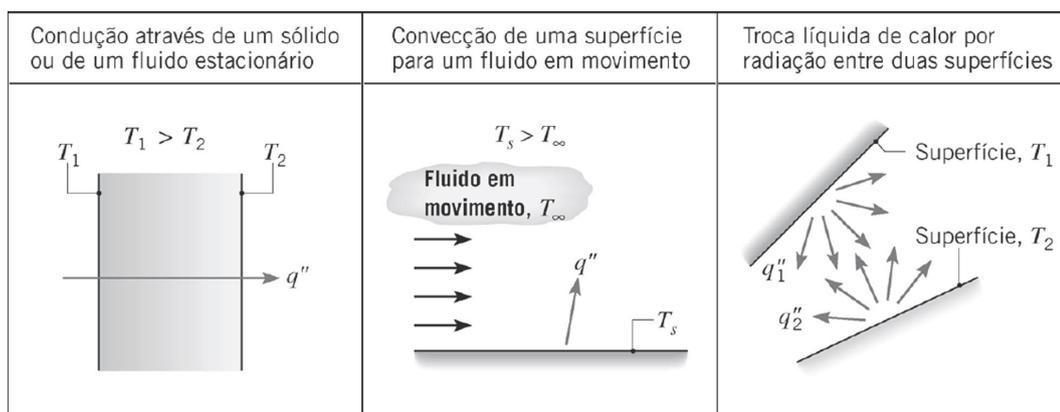
$$t = e^{-26,62} * e^{\frac{13779}{T}} = 2,7484 * 10^{-12} * e^{\frac{13779}{T}} \tag{2.3}$$

Onde, T é a temperatura em kelvin e t é a idade equivalente do cabo.

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é uma área da ciência que se concentra em compreender as trocas de energia térmica entre corpos. Existem três mecanismos conhecidos para a transferência de calor: condução, convecção e radiação (INCROPERA; DEWITT, 2003). Destes, a convecção e a radiação serão de extrema importância para o desenvolvimento da câmara térmica.

Figura 2.6 – Modos de transferência de calor



Fonte: Incropera e DeWitt (2003), p. 1

2.3.1 Condução

A condução térmica é um dos três mecanismos de transferência de calor, sendo considerado o mais importante em sólidos. Ela é definida como a transferência de energia térmica entre átomos no interior de um material, de acordo com Incropera e DeWitt (2003). É importante destacar que esse processo é mais efetivo em materiais sólidos, devido à maior estabilidade da posição dos átomos neste estado físico.

A principal descrição matemática para a condução de calor é a Lei de Fourier. Ela é dada por:

$$Q = \frac{-k * A * \Delta T}{\Delta x} \quad (2.4)$$

onde:

- Q é a quantidade de calor transferido (em joules);
- k é a constante de condução térmica (em $W/(m * K)$);
- A é a área da superfície de transferência de calor (em metros quadrados);
- ΔT é a diferença de temperatura entre as faces opostas da superfície (em kelvin);
- Δx é a distância térmica (em metros).

2.3.2 Convecção

A convecção é a principal forma de transferência de temperatura em fluidos. Quando o fluido tem gradientes de temperatura, correntes convectivas são formadas, induzindo a movimentação global do mesmo (INCROPERA; DEWITT, 2003). Essas correntes de convecção

permitem que o calor seja transferido de áreas quentes para áreas frias, ajudando a equilibrar as temperaturas e a promover uma distribuição uniforme do calor ao longo do fluido.

A fórmula para a convecção é dada por:

$$Q = h * A * \Delta T \quad (2.5)$$

onde:

- Q é a quantidade de calor transferido (em joules);
- h é a constante de transferência de calor convectivo (em $W/(m^2 * K)$);
- A é a área da superfície de transferência de calor (em metros quadrados);
- ΔT é a diferença de temperatura entre o fluido e a superfície (em kelvin).

A constante de transferência de calor convectivo (h) representa a eficiência da convecção em transferir calor da superfície para o fluido. Ela depende de vários fatores, como a velocidade do fluido, a viscosidade, a densidade, a condutividade térmica e outros.

2.3.3 Radiação

A radiação térmica é o processo de transferência de calor entre dois corpos que não estão em contato direto. A troca de calor ocorre por meio de radiação eletromagnética e é capaz de transferir energia a grandes distâncias (INCROPERA; DEWITT, 2003). Por exemplo, a transferência de calor entre o Sol e a Terra é realizada por meio de radiação térmica.

Nesse processo, o calor é transferido do corpo mais quente para o mais frio e vice-versa. A transferência total de calor entre os corpos é determinada pela diferença de temperatura entre eles e pela área de superfície envolvida nessa troca. É importante destacar que estamos interessados na transferência líquida de calor entre esses corpos.

A fórmula da radiação térmica é dada por:

$$Q = \varepsilon * \sigma * A * (\Delta T)^4 \quad (2.6)$$

onde:

- Q é a quantidade de calor transferido (em joules);
- ε é o fator de emissividade, que representa a eficiência do corpo em emitir radiação térmica (valor entre 0 e 1);
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} W/(m^2 * K^4)$);

- A é a área da superfície do corpo (em metros quadrados);
- ΔT é a diferença de temperatura entre os corpos (em kelvin);

A fórmula acima representa a quantidade de calor transferido por radiação térmica entre dois corpos com superfícies ideais (placas planas com temperaturas conhecidas). No entanto, a forma real da superfície, a presença de obstáculos entre os corpos, e outros fatores podem afetar a quantidade total de calor transferido.

2.4 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Um outro elemento central para o desenvolvimento do projeto recai sobre a resistência dos materiais. Essa área da engenharia é responsável por embasar, do ponto de vista teórico, as escolhas de materiais e geometrias para atender às necessidades mecânicas de um componente ou equipamento.

Os fenômenos que ocorrem em elementos estruturais, como tração, flexão, torção, compressão e cisalhamento, merecem destaque porque influenciam diretamente na eficiência e segurança de um componente mecânico. Essas denominações descrevem os diferentes tipos de estresse mecânico aos quais os elementos de máquinas podem ser submetidos.

Cada material apresenta diferentes resistências a esses tipos de estresse e a escolha do mesmo é feita pelo projetista de acordo com as necessidades do projeto (SHIGLEY, 1984). Além da resistência mecânica, determinada pelo material, é preciso também levar em conta os esforços envolvidos de acordo com a geometria do projeto e as características da operação, já que as abordagens para estruturas estáticas e dinâmicas são diferentes (RICARDO, 1977). Adicionalmente, a natureza dos esforços, se repetitivos ou esporádicos, deve ser considerada.

2.4.1 Tração

A tração é um tipo de esforço mecânico que ocorre quando há uma força externa atuando sobre um material, causando o seu alongamento ou esticamento no sentido da força aplicada (JONES; ASHBY, 2019). Um exemplo clássico de tração é o cabo de aço que é utilizado para sustentar uma ponte, sendo submetido a uma força tracionante.

Cada material apresenta uma resistência única à tração, que pode ser determinada através de ensaios padronizados de tração. Estes resultados são registrados em tabelas e estão disponíveis para os principais materiais utilizados na indústria, como concreto, madeira, aço, metais, cerâmicas e polímeros. A fórmula para tração é dada pela equação de Hooke, que estabelece uma relação linear entre a deformação e a tensão aplicada a um material elástico:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.7)$$

onde:

- σ é a tensão (em pascais);
- E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young (em pascais);
- ε é a deformação ou alongamento (em porcentagem ou em radianos).

Essa equação se aplica a comportamentos elásticos, que são aqueles em que o material retorna à sua forma original após a remoção da tensão. Para materiais plásticos, que são aqueles que não retornam à sua forma original após a remoção da tensão, a fórmula para tração é dada por equações mais complexas que levam em conta a formação de vazios e a deformação plástica.

2.4.2 Compressão

Em contraste com a tração, a compressão é o tipo de estresse mecânico que age sobre o material ao comprimi-lo (JONES; ASHBY, 2019). É importante destacar que alguns materiais, como o aço, apresentam valores equivalentes de módulo de resistência à compressão e à tração, enquanto outros, como o concreto, apresentam diferenças significativas nesses valores. Para se determinar a resistência a esse tipo de estresse é possível realizar ensaios de compressão, que fornecem informações valiosas sobre o comportamento dos materiais quando submetidos a essa carga. A fórmula para compressão é semelhante à fórmula para tração, pois também se baseia na equação de Hooke:

$$\sigma = -E * \varepsilon \quad (2.8)$$

onde:

- σ é a tensão (em pascais);
- E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young (em pascais);
- ε é a deformação ou alongamento (em porcentagem ou em radianos).

A diferença entre a fórmula para tração e a fórmula para compressão está na direção da tensão. Assim como na tração, a fórmula para compressão também se aplica a materiais elásticos. Para materiais plásticos, as equações são mais complexas e incluem a consideração da deformação plástica.

2.4.3 Flexão

A flexão é um fenômeno que ocorre quando uma força é aplicada transversalmente em uma viga, causando uma deformação que resulta na compressão em um lado e tração no lado oposto da viga (JONES; ASHBY, 2019). Esse tipo de esforço é comum em estruturas como pontes e arcos, e é importante que sejam levados em consideração na escolha dos materiais e projeto da estrutura para garantir sua segurança e desempenho adequado. A equação da flexão é dada pela seguinte relação:

$$M = \frac{W * L^2}{8} * \frac{y}{L} \quad (2.9)$$

onde:

- M é o momento fletor (em newton-metros);
- W é a carga aplicada (em newtons);
- L é o comprimento da barra (em metros);
- y é a deflexão da barra (em metros).

Esta equação se aplica comportamentos elásticos, que são aqueles em que o material retorna à sua forma original após a remoção da tensão. Para barras plásticas, que são aquelas que não retornam à sua forma original após a remoção da tensão, a equação da flexão é dada por equações mais complexas que levam em conta a deformação plástica.

2.4.4 Cisalhamento

Cisalhamento é uma forma de estresse que age sobre a peça, gerando uma força cortante que tende a separá-la em duas partes (SHIGLEY, 1984). É importante que os projetistas conheçam as características dos materiais quanto à resistência a esse tipo de esforço, pois ele pode ser um fator crítico em algumas aplicações. A equação do cisalhamento é dada pela seguinte relação linear:

$$T = \frac{V * Q}{I} \quad (2.10)$$

onde:

- T é a intensidade de cisalhamento (em newtons);
- V é a força de cisalhamento (em newtons);
- Q é a área da seção transversal (em metros quadrados);

- I é o momento de inércia da seção transversal (em metros quadrados).

Esta equação se aplica a comportamentos elásticos, que são aqueles em que o material retorna à sua forma original após a remoção da tensão. Para materiais plásticos, que são aqueles que não retornam à sua forma original após a remoção da tensão, a equação do cisalhamento é dada por equações mais complexas que levam em conta a deformação plástica.

2.5 CIRCUITOS ELÉTRICOS

Para compreendermos o funcionamento adequado de um forno elétrico é importante conhecer a teoria a respeito de circuitos elétricos e seus componentes. O campo da ciência que estuda esses fenômenos é abrangente e devemos fazer um recorte para os principais elementos que serão utilizados. A energia elétrica é essencial para o funcionamento de diversos equipamentos e sistemas (NAHVI; EDMINISTER, 2005), incluindo o forno elétrico, como resistores e outros dispositivos eletrônicos. É papel do projetista selecionar os componentes adequadamente e aplicar as leis físicas e normas técnicas para garantir a segurança e eficiência das máquinas.

2.5.1 Tensão

A tensão elétrica, também conhecida como diferença de potencial, é uma medida da energia elétrica por unidade de carga que é necessária para mover cargas elétricas através de um circuito elétrico (YANKOVSKY, 1970). É a força que impulsiona os elétrons em um condutor, permitindo que eles realizem trabalho, como iluminar uma lâmpada ou mover um motor elétrico. A tensão elétrica é dada em volt (V) e pode ser medida com o auxílio de um multímetro. É uma grandeza fundamental no estudo da eletricidade e é crucial para o funcionamento de inúmeros dispositivos elétricos e eletrônicos.

2.5.2 Corrente

A corrente elétrica, por sua vez, é o fluxo ordenado de elétrons através de um material condutor sob a influência de uma diferença de potencial elétrico (NAHVI; EDMINISTER, 2005). Ela é medida em ampere (A) e pode ser calculada utilizando a Lei de Ohm, que estabelece que a corrente elétrica é igual à razão entre a tensão elétrica aplicada e a resistência elétrica do circuito (YANKOVSKY, 1970). A corrente elétrica é um conceito fundamental para o funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos, como motores, transformadores e lâmpadas. Ela também é utilizada na medição de grandezas elétricas e na análise e projeto de circuitos. O entendimento da corrente elétrica é essencial para garantir a segurança e eficiência na utilização de equipamentos elétricos.

2.5.3 Resistência

A resistência elétrica é uma medida da dificuldade que um material oferece à passagem de corrente elétrica (NAHVI; EDMINISTER, 2005). Ela é determinada pela natureza do material, sua geometria e temperatura. A unidade de medida da resistência elétrica é o Ohm. A Lei de Ohm correlaciona as grandezas tensão elétrica, corrente e resistência (NAHVI; EDMINISTER, 2005). A equação descrita é dada a seguir:

$$V = R * I \quad (2.11)$$

onde:

- V é a tensão elétrica (em volt);
- R é a resistência elétrica (em ohm);
- I é a corrente elétrica (em ampere).

2.5.4 Potência

A potência elétrica é a quantidade de energia elétrica convertida em um determinado intervalo de tempo (NAHVI; EDMINISTER, 2005). Ela é medida em watt (W) e pode ser calculada utilizando a Lei de Ohm, que estabelece que a potência elétrica é igual ao produto da corrente elétrica pela tensão elétrica (YANKOVSKY, 1970). A potência elétrica é um conceito importante para a compreensão do funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos, como lâmpadas, motores e aquecedores. Ela também é utilizada na medição de grandezas elétricas e na análise e projeto de circuitos elétricos e eletrônicos. Para o caso do forno, sabemos que a potência elétrica será dissipada na forma de calor por meio do Efeito Joule. A equação que descreve a potência é dada a seguir:

$$P = V * I \quad (2.12)$$

onde:

- P é a potência elétrica (em watt);
- V é a tensão elétrica (em volt);
- I é a corrente elétrica (em ampere).

2.6 CONTROLE E AUTOMAÇÃO

As técnicas de controle automático se referem às ferramentas utilizadas por engenheiros para controlar uma variável de maneira a corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado. Em outras palavras, um processo pode ser controlado automaticamente utilizando sistemas de controle em malha fechada que comparam o valor mensurado do sinal de controle com o *setpoint* desejado pelo operador daquele sistema. Conforme Ogata (2010), "A abordagem básica para o projeto de qualquer sistema de controle prático envolve, necessariamente, procedimentos de tentativa-e-erro.", e é por meio das teorias desenvolvidas nessa área do conhecimento que se pode orientar as tentativas de forma a otimizar o trabalho do projetista.

Já a automação é o nome que se dá ao uso de instrumentos e ferramentas para tornar uma tarefa executada pela máquina idealmente independente de assistência humana (GROOVER, 2010). Ou seja, é por meio da automação e instrumentação que se criam sistemas de controle capazes de tomar decisões ou executar tarefas repetitivas sem que haja um operador humano executando cada uma dessas funções.

Para essa tarefa é importante a presença de sensores, que traduzem o mundo físico em sinais que podem ser compreendidos pela máquina, a presença de atuadores, capazes de interferir no processo, um sistema de controle, que é responsável por comandar os atuadores tomando decisões baseadas nas leituras dos sensores (GROOVER, 2010). É evidente que esse sistema também requer uma interface homem-máquina, que seja capaz de receber comandos humanos e também fazer a função de comunicar as informações sobre o processo observado.

2.6.1 Raspberry Pi

O Raspberry Pi é um computador de placa única, desenvolvido no Reino Unido, que oferece versatilidade e capacidade de realizar uma ampla gama de tarefas. Este dispositivo possui diferentes versões, que se diferenciam por suas especificações de *hardware*, como a quantidade de memória RAM e portas USB.

Figura 2.7 – Raspberry Pi 3 B+



Fonte: Autodesk, 2018. ⁴

O Raspberry Pi é capaz de atuar como um Controlador Lógico Programável (CLP), permitindo a criação de programas em diversas linguagens de programação (MCMANUS; COOK, 2013). Além disso, é fácil de ser conectado a outros dispositivos, como monitores, teclados e internet, tornando-o ainda mais versátil.

Algumas das vantagens do uso do Raspberry Pi incluem seu baixo consumo de energia em comparação a outros computadores, a falta de partes móveis, o tamanho compacto e a possibilidade de expansão com outros dispositivos. Além disso, ele é capaz de alcançar boas resoluções para vídeos e imagens, e ainda é acessível tanto para uso pessoal quanto para uso comercial devido a seu baixo custo. Para instalar e configurar um Raspberry Pi basta seguir os passos a seguir:

1. Preparar um cartão SD, com pelo menos 8 GB de espaço, para instalar o sistema operacional do Raspberry Pi. Isso inclui formatar o mesmo antes do passo seguinte;
2. Baixar o sistema operacional chamado de "Raspberry Pi OS", conhecido como raspbian, no site oficial da Raspberry Pi Foundation. Escolhendo a versão de acordo com a necessidade da aplicação;
3. Instalar o sistema operacional no cartão SD usando algum *software* de instalação;
4. Conectar periféricos desejados, como tela, teclado e *mouse*;
5. Com todos os periféricos conectados, inserir o cartão SD no slot correspondente no *hardware*;
6. Conectar o cabo de alimentação ao Raspberry Pi para que o sistema operacional seja inicializado.

2.6.2 Pt-100

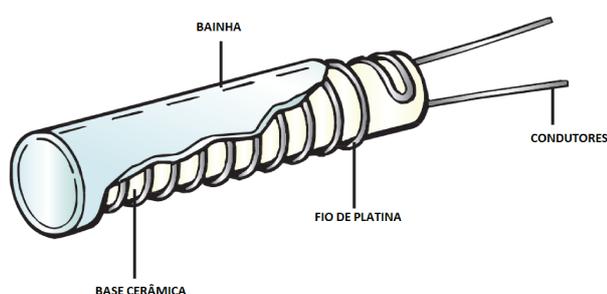
O Pt-100 é um sensor de temperatura amplamente utilizado para monitorar processos industriais. Seu princípio de funcionamento é a variação da resistência elétrica do fio de platina em seu interior de acordo com a temperatura (FIALHO, 2009). Essa classe de sensores é chamada de Detector de Temperatura por Resistência (em inglês: *Resistance Temperature Detector - RTD*) por causa de seu princípio de funcionamento.

O Pt-100 leva esse nome porque o material que o compõe é a platina e ele apresenta uma resistência de 100 ohms à temperatura de 0 grau Celsius. Sua faixa de operação é de -200°C até 850°C, o que o torna valioso em diferentes aplicações na indústria, além de sua precisão e estabilidade de longo prazo.

⁴ Disponível em: <https://www.autodesk.com/community/gallery/project/124986/raspberry-pi-3-bplus> (Acesso em 15 de Fevereiro de 2023)

A utilização de RTD's em circuitos digitais exige um dispositivo capaz de converter o sinal elétrico de resistência em uma informação digital que possa ser processada pelo computador (FIALHO, 2009). Existem opções comerciais de baixo custo e boa confiabilidade que podem ser escolhidas pelo projetista a fim de realizar essa tarefa.

Figura 2.8 – Sensor RTD de platina



Fonte: Compilação do autor, edição a partir da imagem disponível na internet.⁵

2.6.3 MAX31865

O MAX31865 é um conversor RTD – Digital da Maxim Integrated capaz de converter o sinal de um termorresistor em um sinal digital. Esse módulo é capaz de interpretar o valor de resistência elétrica de um RTD de platina cuja resistência a 0°C esteja na faixa de 100 a 1000 ohms além de ser capaz de interpretar sinais de sensores com 2, 3 ou 4 fios. Para que o módulo seja capaz de se comunicar com RTD's de 2, 3 ou 4 fios é necessário fazer configurações específicas em seu módulo, adicionando ou removendo conexões elétricas de acordo com a necessidade.

O MAX31865 é amplamente utilizado em aplicações industriais que requerem medição precisa de temperatura, como controle de processo, monitoramento de temperatura em equipamentos eletrônicos e sistemas de aquecimento e refrigeração. O dispositivo é projetado para facilitar o uso, com interfaces de comunicação simples através do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI), além de suportar recursos de detecção de falhas para ajudar a garantir a integridade dos dados de temperatura medidos.

⁵ Disponível em: https://www.tc.co.uk/resistance_thermometers/platinum-resistance-thermometers-pt100.html (Acesso em 15 de Fevereiro de 2023)

4. SS – *Slave Select*: É uma linha de seleção do escravo controlada pelo mestre. Permite ao mestre escolher o escravo com o qual deseja se comunicar em um barramento com vários escravos.

A transferência de dados no SPI ocorre em um formato full-duplex, o que significa que a comunicação pode ocorrer em ambos os sentidos simultaneamente. O mestre envia os dados através da linha MOSI enquanto recebe os dados do escravo através da linha MISO.

O SPI é conhecido por sua simplicidade e alta velocidade de transferência de dados. Além disso, oferece flexibilidade na configuração dos parâmetros de comunicação, como a taxa de clock, a ordem dos bits e o modo de transferência. Ele é comumente utilizado por dispositivos como microcontroladores, sensores, memórias flash, conversores analógico-digitais, displays, entre outros. No entanto, o SPI também possui algumas limitações, como o fato de não ser um protocolo de comunicação em rede e não possuir um esquema de endereçamento incorporado.

Em resumo, o Protocolo de Comunicação Serial Peripheral Interface (SPI) é um método confiável e eficiente de comunicação serial entre dispositivos digitais. Sua simplicidade, velocidade e flexibilidade o tornam uma escolha popular em uma ampla gama de aplicações eletrônicas, proporcionando uma comunicação eficiente e confiável entre dispositivos mestre e escravo.

3 METODOLOGIA

A partir dos princípios teóricos observados no capítulo anterior, é de suma importância registrar que o forno se trata de uma caixa, por suposição hermética, que é capaz de garantir um isolamento térmico suficiente para que as resistências aqueçam o interior do mesmo até temperaturas desejadas. De antemão, é possível perceber que existem 3 frentes de trabalho essenciais:

- Estrutural;
- Térmica;
- Controle e Automação.

Cada uma dessas etapas dependerá de análise mais profunda ou superficial de acordo com o grau de otimização que se queira nesses aspectos. Dito isso, o andamento do projeto foi dividido nas seguintes etapas de execução:

1. Levantamento de pré-requisitos;
2. Projeto estrutural;
3. Cálculo térmico;
4. Projeto elétrico;
5. Instrumentação;
6. Projeto de controle;
7. Calibração;
8. Programação;
9. Validação final.

É importante salientar que se busca um forno capaz de executar ensaios térmicos em amostras de cabos elétricos e esse tipo de experimento depende de normatizações, parâmetros adequados além de boas práticas científicas e metodológicas. É necessário buscar a capacidade de atingir a temperatura escolhida pelo operador, a estabilidade de temperatura, independência da temperatura externa, registro em tempo real das temperaturas internas, automatização para manutenção da temperatura escolhida, mesclando essas características com eficiência energética.

3.1 LEVANTAMENTO DE PRÉ-REQUISITOS

Nessa etapa foi fundamental buscar na literatura acadêmica os parâmetros adequados para ensaios térmicos de envelhecimento de cabos elétricos. Além dos resultados obtidos por outros pesquisadores em estudos similares, é importante também levar em consideração as normas que discorrem sobre o tema.

A Comissão Eletrotécnica Internacional (em inglês: International Electrotechnical Commission - IEC) dispõe sobre fornos de envelhecimento térmico de cabos no documento IEC 60216-4-1 - Ageing ovens – Single-chamber ovens (IEC, 2006) e dita algumas regras que foram usadas como diretrizes para o presente trabalho.

3.1.1 Requisitos mecânicos

A construção do forno deve ser feita com materiais capazes de suportar operações contínuas a qualquer temperatura de ensaio. Ademais, a disposição dos componentes elétricos e auxiliares deve ser planejada para facilitar a manutenção.

A escolha dos materiais também deve ser cuidadosa, a fim de evitar reações com as amostras e possíveis fontes de contaminação. O aço ou ligas de alumínio são recomendados, enquanto o cobre e outros materiais que podem liberar compostos voláteis devem ser evitados.

O interior do forno precisa ser construído com materiais não absorventes, resistentes à corrosão e de fácil higienização. Além disso, as juntas internas devem ser devidamente vedadas.

As portas e janelas de inspeção precisam ter uma boa vedação para minimizar a perda de calor, trocas gasosas e contaminação. Dessa forma os resultados dos ensaios térmicos de envelhecimento de cabos elétricos serão mais precisos e confiáveis.

3.1.2 Arranjo das amostras

O dimensionamento do forno é uma etapa importante para garantir o sucesso do ensaio térmico de envelhecimento de cabos elétricos. A norma IEC 60216-4-1 (IEC, 2006) especifica os parâmetros relevantes para o dimensionamento do forno, incluindo a disposição das amostras. De acordo com o documento, as amostras devem ser dispostas de forma que não toquem umas nas outras, não ocupem mais de 25% da área transversal útil e nem mais de 10% do volume total da câmara.

Com base nessas premissas e nas especificações do projeto, foi calculado o volume e a área interna da câmara de ensaio. O forno deve ser projetado para comportar 40 amostras de cabos de 28,4 mm de diâmetro externo e 3 metros de comprimento. A área interna do mesmo deve ser 4 vezes maior que a área ocupada pelos cabos, o que equivale a uma área mínima de 0,10135531 m². Para uma geometria quadrada, o forno deve ter no mínimo 31,84 cm de lado na área útil.

Considerando ainda o comprimento de 3 metros dos cabos e a necessidade de suspensão de uma das extremidades, as dimensões mínimas do forno são 32 x 32 x 300 cm. Essas questões serão discutidas de maneira mais incisiva em tópicos posteriores.

3.1.3 Controle de temperatura

A câmara do forno deve contar com, no mínimo, dois sensores de temperatura de alta precisão, com uma incerteza máxima admissível de 1 K em relação a um terceiro instrumento de medição. É recomendável o uso de termorresistências em vez de termopares para o controle de temperatura, pois oferecem uma medição mais precisa e confiável. Além disso, é fundamental implementar um sistema de segurança que possa desativar automaticamente os elementos de aquecimento do forno em caso de temperatura acima do limite estabelecido.

A escolha da temperatura de operação do forno deve ser feita pelo usuário antes de ligá-lo. Isso exige um sistema flexível e confiável que possa operar em uma ampla faixa de temperatura, mantendo sua precisão mesmo após exposição a temperaturas elevadas.

3.2 MODELAGEM 3D

A modelagem 3D do forno deve levar em consideração as exigências estabelecidas na seção 3.1, além de valorizar aspectos econômicos e práticos. Ademais, o projeto deve priorizar o aquecimento dos cabos através da convecção, aquecendo o ar para que este, por sua vez, aqueça o cabo. Dessa forma, é possível minimizar os efeitos da radiação térmica entre as resistências e as amostras ensaiadas, evitando também os pontos de máxima temperatura nas proximidades da resistência elétrica.

Com base nesses critérios, foi determinada a dimensão da câmara interna do forno, com largura de 93,5 cm, profundidade de 87,5 cm e altura de 3,25 m, conforme a figura 3.1. Para garantir uma distribuição eficiente dos elementos aquecedores, foram projetados nichos na câmara interna, distribuídos próximo ao piso, em uma altura intermediária e no terço superior.

Figura 3.1 – Modelo 3D do forno



Fonte: Própria

A fim de facilitar a manipulação dos cabos durante os ensaios, a parte frontal do forno foi projetada para permitir uma remoção completa. Essa parte foi seccionada em três portas, sendo duas inferiores removíveis e uma superior com dobradiça e janela de observação.

Para garantir o correto posicionamento dos cabos durante o ensaio, foram incluídos um suporte no teto e um "separador" no piso, ambos projetados sob medida. Além disso, é importante destacar que a estrutura da câmara deve ser capaz suportar o peso exercido pelos cabos.

3.3 ESCOLHA DE MATERIAIS

Considerando uma temperatura de operação que pode assumir valores de até 180°C, levando em conta a carga de todos os cabos e o isolamento dessa câmara interna em relação ao meio externo foi escolhido o aço como material estrutural e de revestimento interno e externo do forno. Porém, como o aço é um excelente condutor de calor e o objetivo de eficiência energética é fundamental para garantir o êxito do projeto, é necessário inserir uma camada intermediária de material isolante térmico. A tabela a seguir apresenta diferentes isolantes térmicos e suas características físicas:

Tabela 3.1 – Isolantes térmicos e suas propriedades

Material	Densidade [kg/m ³]	Condutividade Térmica [W/(m*K)]	Operação [°C]
Cortiça	110	0,039	-180 – +120
Lã de vidro	10 – 100	0,056 – 0,065	-70 – +450
Lã de rocha	32 – 160	0,030 – 0,041	-250 – +750
Espuma de PU	30 – 80	0,023	-50 – +80

Fonte: U.S. Department of Energy ¹

Para que seja determinado qual material isolante será utilizado é necessário partir da temperatura desejada de trabalho e também da temperatura externa. Utilizou-se o valor de 25°C para o ambiente e 140°C para temperatura interna. Essas premissas sugerem que os materiais mais adequados para esta aplicação são a lã de rocha e a lã de vidro. Porém, como o custo de aplicação de ambas é similar podemos livremente optar pela opção mais robusta que é a lã de rocha. Sua condutividade térmica é estimada entre 0,030 e 0,041 watts por metro-kelvin ($W/m.K$), o que caracteriza um excelente isolante térmico.

3.4 FABRICAÇÃO

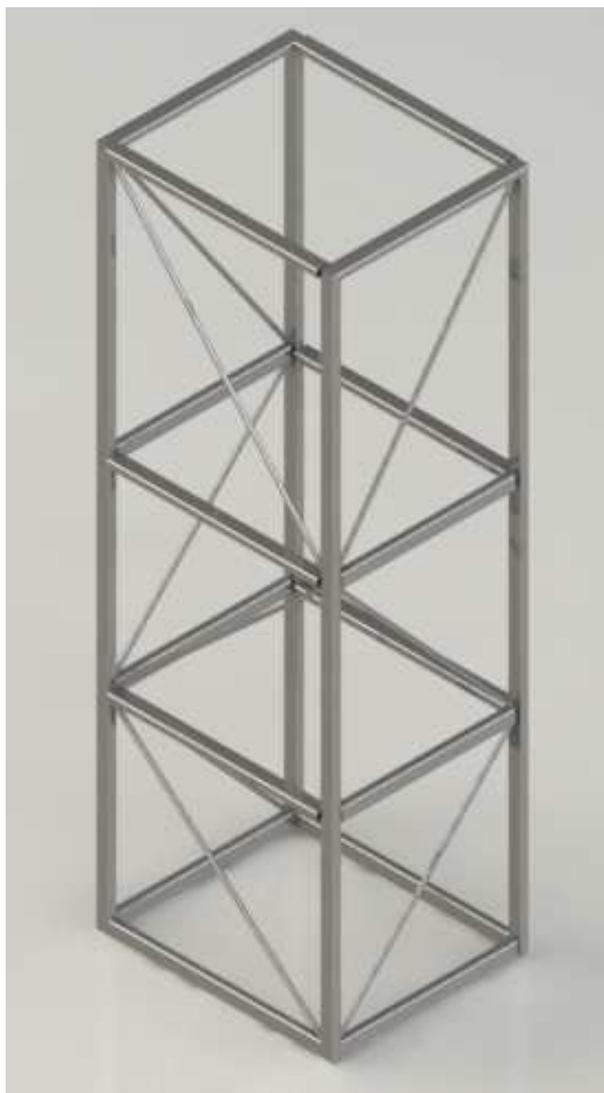
O forno foi projetado e construído com materiais de alta qualidade, incluindo uma estrutura em aço resistente, revestimento interno e externo em chapas de aço de 1 mm de espessura para garantir a durabilidade e isolamento térmico de lã de rocha com 2 polegadas de largura. Para assegurar a execução precisa do projeto mecânico e elétrico, foi contratada uma empresa especializada. Com o sucesso da construção o forno foi entregue no LRI, na Universidade Federal de Uberlândia, no dia 23 de maio de 2022.

3.4.1 Estrutura

A estrutura do forno será responsável por garantir a sustentação do mesmo além de suportar a carga adicional promovida pelos cabos durante os ensaios. A estrutura foi projetada com tubos retangulares de aço na bitola de 90 x 40 mm e espessura de 1,5 mm. A disposição dos tubos retangulares está demonstrada na figura a seguir:

¹ Disponível em: <https://www.energy.gov/energysaver/insulation-materials> (Acesso em 17 de Fevereiro de 2023)

Figura 3.2 – Esboço 3D da estrutura do forno

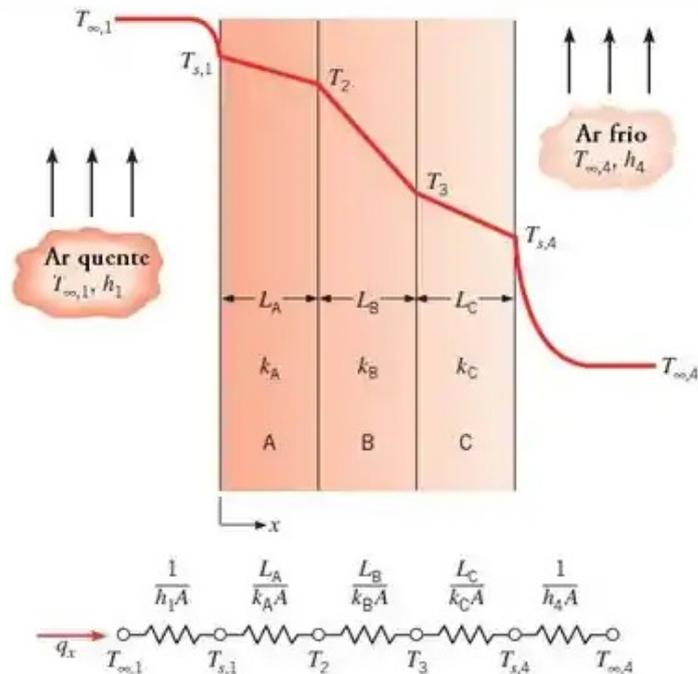


Fonte: Própria

3.4.2 Isolamento térmico

De acordo com a geometria indicada no item 3.2 foi proposta a camada de isolamento de lã de rocha em 2 polegadas (múltiplo dos valores encontrados comercialmente). Utilizando as equações de transferência de calor, foi possível estimar a potência mínima necessária para que o forno permaneça à temperatura desejada.

Figura 3.3 – Representação da parede do forno por meio do modelo de circuito térmico



Fonte: Compilação do autor, edição a partir da imagem disponível na internet. ²

3.4.3 Suporte e separador de cabos

A imagem abaixo é uma foto tirada do suporte de cabos que fica no teto do forno. Os cabos são pendurados por meio de ganchos nas barras.

Figura 3.4 – Suporte de cabos



Fonte: Própria

Já na extremidade livre dos cabos existe um separador, fabricado com canaletas de aço e lajotas refratárias. Essa construção existe para impedir o contato dos cabos com as paredes

² Disponível em: <https://app.respondeai.com.br/aprender/topico/135/1506/teoria/1436> (Acesso em 01 de Junho de 2023)

do forno, resistências e separá-los uns dos outros. A imagem 3.5 é uma foto do separador já instalado no forno.

Figura 3.5 – Separador de cabos



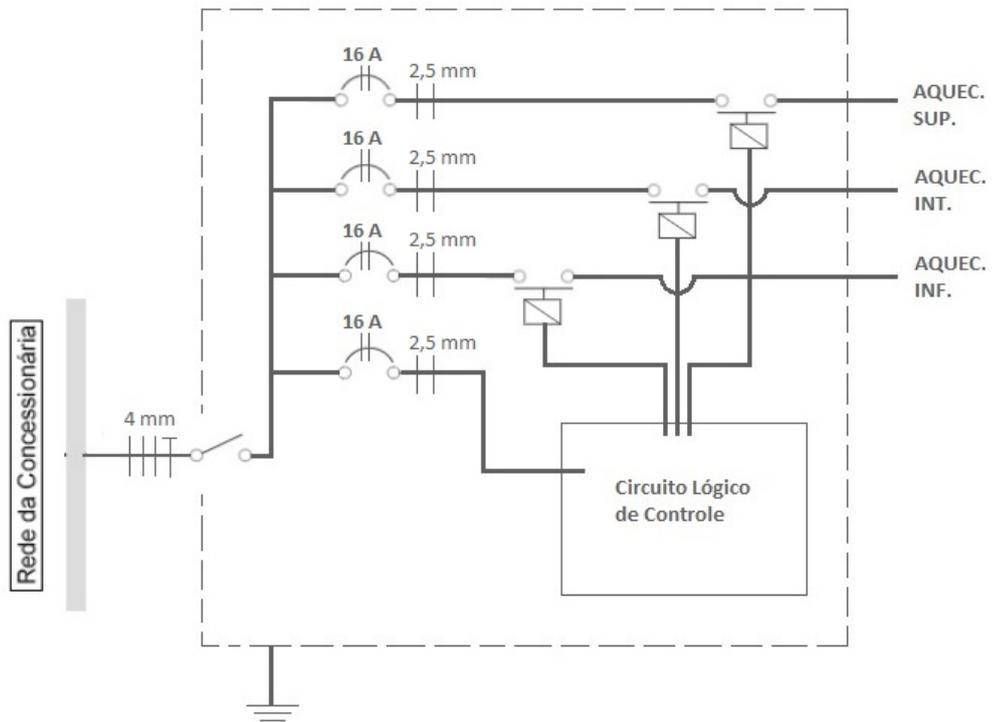
Fonte: Própria

3.5 ATUADORES E SENSORES

3.5.1 Quadro de comando

O forno recebe alimentação trifásica proveniente da rede da UFU, essa energia chega ao quadro de comando que separa as fases duas a duas em disjuntores conforme o esquema elétrico a seguir:

Figura 3.6 – Diagrama elétrico do quadro de comando do forno



Fonte: Própria

O diagrama acima é representação técnica do quadro de comando instalado no forno, de acordo com a figura a seguir:

Figura 3.7 – Quadro de comando do forno



Fonte: Própria

3.5.2 Resistências

Conforme projeto, o forno recebeu 6 resistências, acionadas aos pares, de 1500 W cada e de dimensões que seguem:

- Comprimento total - 50 cm;
- Comprimento útil - 40 cm;
- Largura - 5,2 cm;
- Espessura - 3,4 cm.

Figura 3.8 – Representação gráfica da resistência de aquecimento



Fonte: Própria

A resistência é controlada por contadores Siemens que são acionados por relés de 24 V. Por sua vez, esses relés são acionados pelo Raspberry através de um módulo relé com optoacopladores. Esse módulo relé é alimentado diretamente pelas portas do Raspberry. Os relés que acionam o contator são de 24 volts e são alimentados por uma fonte de 24 volts responsável por alimentar todo o circuito de controle e luzes de sinalização.

Partindo da potência necessária para a manutenção da temperatura interna e aplicando um fator de segurança de 2, optamos por preencher o forno com 6 resistências elétricas de 1500 W cada, totalizando 9000 W de potência. Essas resistências serão acionadas por meio de contadores e esses serão controlados por meio de um Raspberry Pi 3 B+.

3.5.3 Sensores de temperatura

Já os sensores de temperatura escolhidos para a faixa de operação são Pt-100 de 3 fios. Os mesmos usam módulos MAX31865 para se comunicar através do protocolo de comunicação SPI. Esses módulos fazem a transdução do valor de resistência do Pt-100 à determinada temperatura e convertem em sinal legível pelo Raspberry. Além disso, através da biblioteca `adafruit_max31865` é possível converter diretamente o resultado em graus Celsius, além de se determinar o tipo de termorresistência utilizado (Pt-100 ou Pt-1000), *offset* desejado e outros parâmetros.

3.6 CONTROLE E AUTOMAÇÃO

O controle do forno é feito através de um código utilizando a linguagem Python no Raspberry que recebe os dados dos Pt-100 através do módulo MAX31865, a temperatura lida é

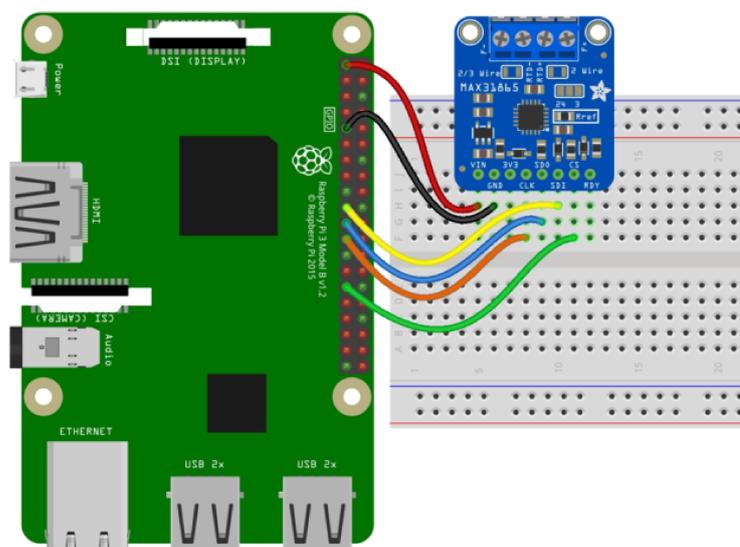
então comparada com a temperatura desejada, escolhida pelo usuário do forno, e o código toma a decisão de acionar ou não os relés. A princípio, essa decisão automatizada depende da etapa de levantamento de curvas de aquecimento do forno. Com essas informações disponíveis será possível propor um controlador capaz de obter desempenho adequado.

O resultado esperado para o forno é de boa distribuição da temperatura na câmara interna, quantidade razoável de acionamentos dos componentes eletromecânicos e replicabilidade de resultados. Isso depende de sensores confiáveis, atuadores em bom estado e um código robusto o suficiente para operar em diferentes condições ambientais.

3.6.1 Conexão Raspberry – MAX31865

Para que o Raspberry possa adquirir as leituras de temperatura provenientes dos Pt-100 é necessário um dispositivo capaz de converter o sinal analógico em digital e comunicar através de um protocolo aceito pela plataforma. Uma opção adequada é a utilização de um módulo chamado de MAX31865. A conexão elétrica entre os dois componentes é ilustrada a seguir:

Figura 3.9 – Conexão do módulo MAX31865 com o Raspberry



Fonte: Compilação do autor, edição a partir da imagem disponível na internet.³

A imagem 3.9 é uma representação das seguintes ligações:

- VIN ao pino Pi 3V3;
- GND ao pino Pi GND;
- SDI ao pino Pi MOSI;

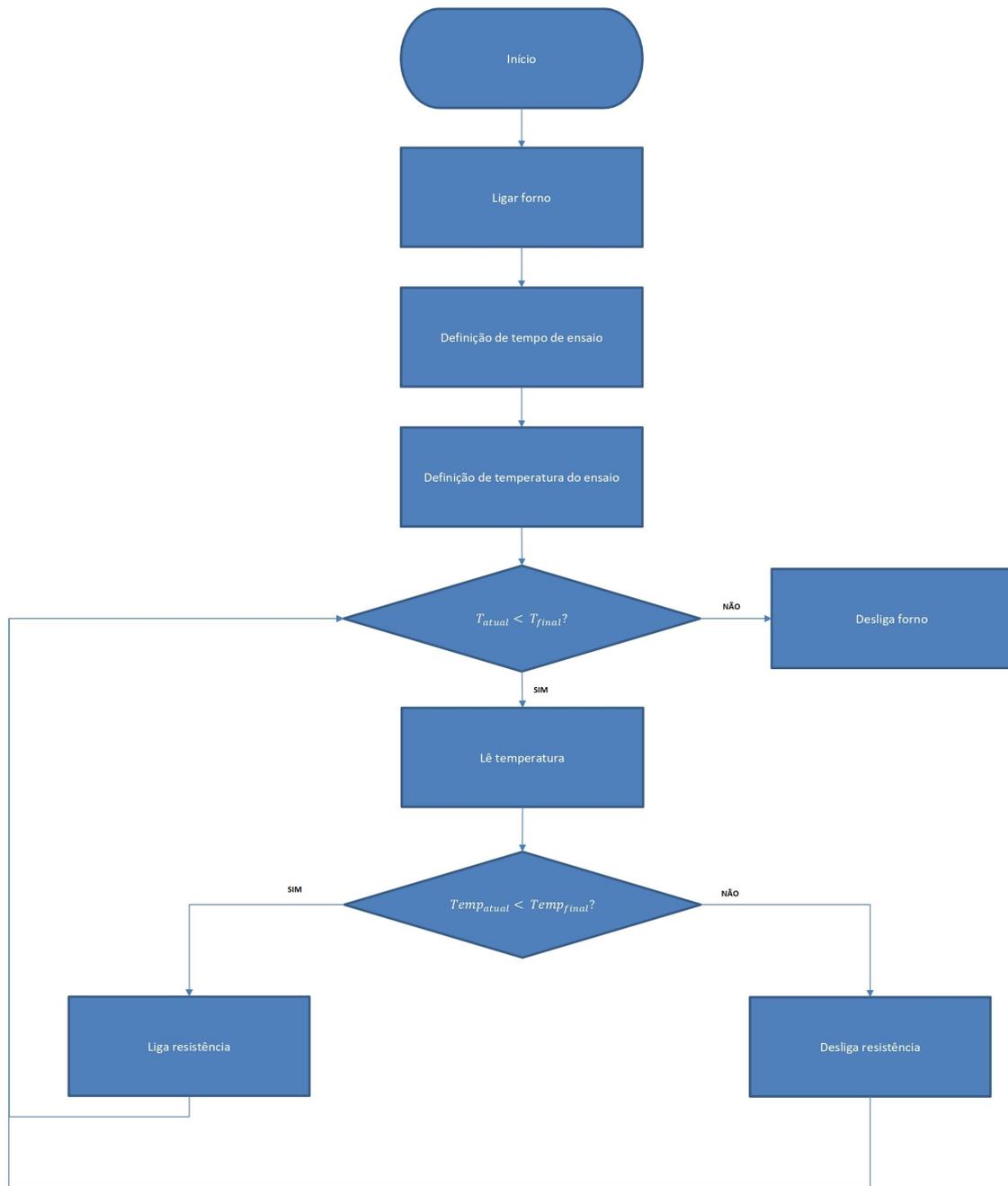
³ Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/python-circuitpython#step-2999056> (Acesso em 30 de Março de 2023)

- SDO ao pino Pi MISO;
- CLK ao pino Pi SCLK;
- CS ao pino Pi GPIO5 (Usar qualquer GPIO livre).

3.6.2 Algoritmo

O algoritmo de tomada de decisão segue o modelo representado no fluxograma da imagem 3.10. Ao ligar o forno é solicitado ao usuário que se defina o tempo durante o qual ocorrerá o ensaio, em seguida é necessário definir a temperatura do ensaio. A partir do momento em que são definidos esses parâmetros a lei de controle entra em ação. O algoritmo entra em laço que só é interrompido quando o tempo de ensaio é atingido. Durante o laço a temperatura é checada constantemente para a tomada de decisão de ligar ou desligar a resistência de aquecimento.

Figura 3.10 – Algoritmo de controle do forno



Fonte: Própria.

Conforme o código em Python, que pode ser consultado no Apêndice A, o Raspberry que controla o forno foi programado realizar as leituras de temperatura e tomadas de decisão. A temperatura que provoca acionamento da resistência é dada por *setpoint* acrescida de um valor de histerese, também definida pelo usuário. Já o desligamento da resistência ocorre quando o valor medido pelo Pt-100 é o *setpoint* menos o valor de histerese. Além disso, é possível observar no código que a leitura mostrada na tela para o usuário é uma média móvel de 10 leituras, facilitando o acompanhamento da tendência e suavizando oscilações que ocorrem ao longo do tempo.

3.7 LEVANTAMENTO DE CURVAS

Essa etapa do projeto é relativa ao controle do forno. Para isso foram feitos o levantamento das curvas de aquecimento e resfriamento do forno para validar a operação do mesmo e entender a dinâmica real de funcionamento da planta a fim de propor um controlador capaz de obter a performance desejada.

3.7.1 Calibração dos sensores

Antes de realizar o levantamento das curvas de aquecimento e resfriamento do forno é preciso garantir que as leituras são confiáveis e que os sensores estão calibrados. Verificou-se a precisão e exatidão dos Pt-100 instalados e foi feita a calibração dos mesmos. O processo começou com a verificação dos sensores Pt-100 instalados na planta, utilizando um termômetro químico preenchido por álcool como referência de temperatura. A aferição foi feita por meio de comparações realizadas em banhos térmicos de água, permitindo estimar o erro de cada Pt-100 ao longo da faixa de temperatura de 3°C a 94°C.

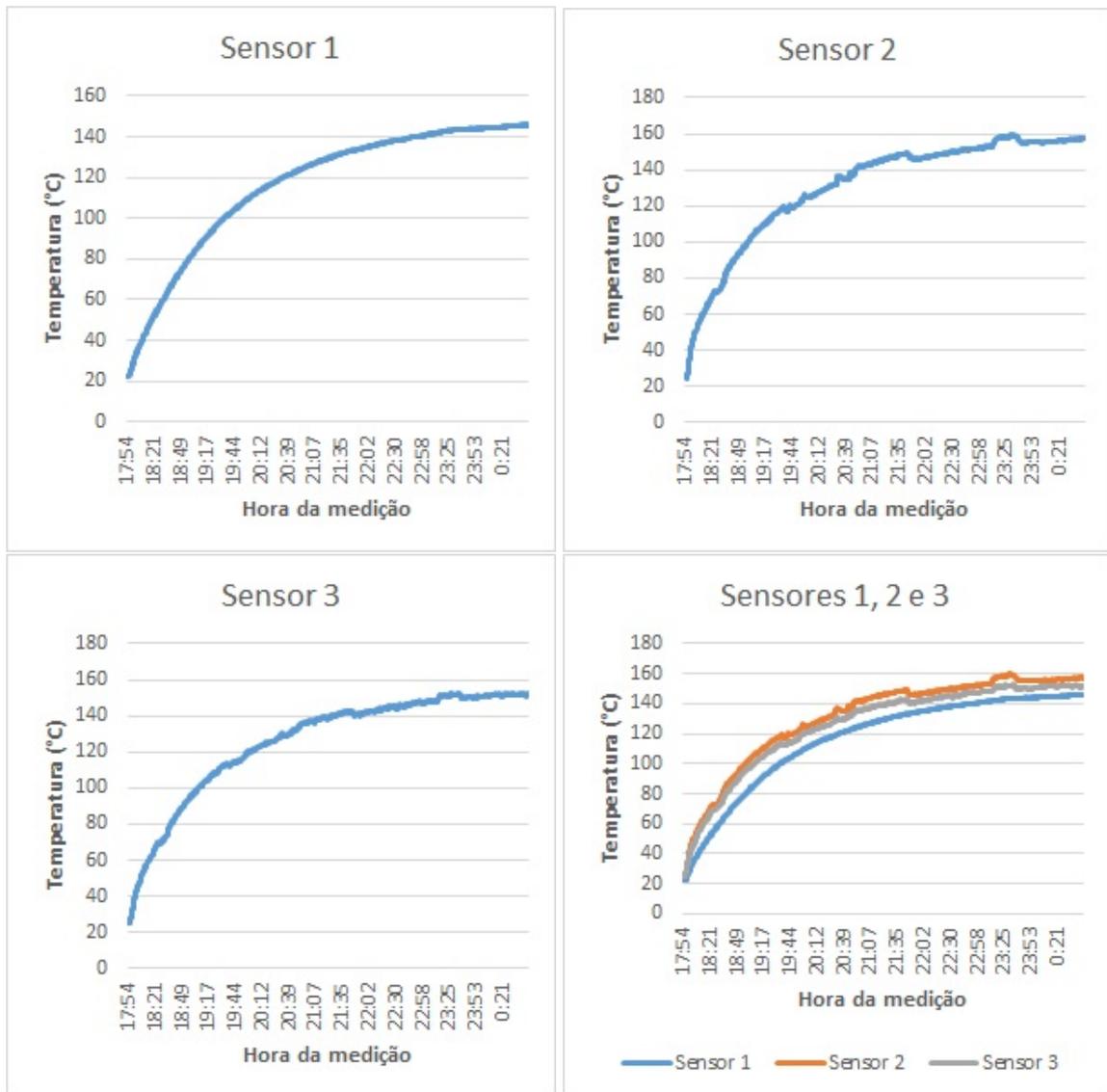
Por meio da obtenção de curvas de calibração, o erro foi corrigido em tempo real pelo uso de uma equação de regressão linear para cada Pt-100, no código em Python. Com essa calibração, buscou-se minimizar erros potenciais causados por falhas nos módulos MAX31865, comprimento dos fios, ou até mesmo pelos próprios sensores Pt-100.

3.7.2 Curvas de aquecimento

O levantamento da dinâmica do sistema exige encontrar a resposta da planta para uma entrada degrau, isto é, como o forno se comporta ao acionar cada resistência em potência máxima. Por esse motivo foram realizados ensaios de aquecimento determinados de acordo com a seguinte metodologia: mediu-se a resposta de cada um dos sensores à atuação de cada par de resistências atuando isoladamente. Além disso, mediu-se a resposta dos sensores 1, 2 e 3 ao acionamento dos 3 pares de resistências simultaneamente. Esses testes ofereceram as seguintes respostas:

Ao acionar somente o par resistivo inferior obtivemos as seguintes curvas de resposta de cada sensor:

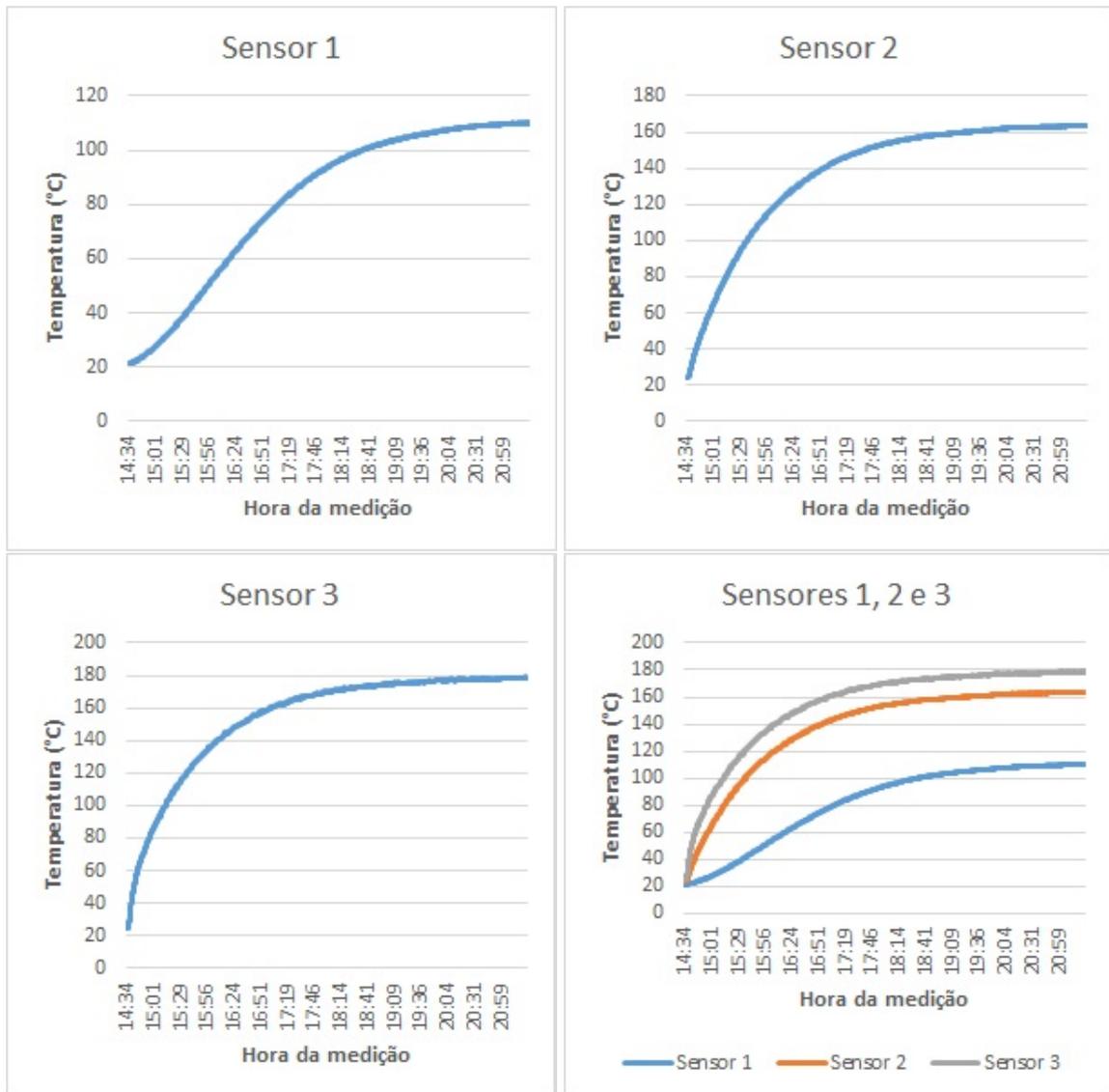
Figura 3.11 – Resposta ao acionamento da resistência inferior



Fonte: Própria

Para o acionamento apenas do par resistivo intermediário podemos ver a resposta de cada sensor e na quarta imagem dos 3 sensores em um mesmo gráfico.

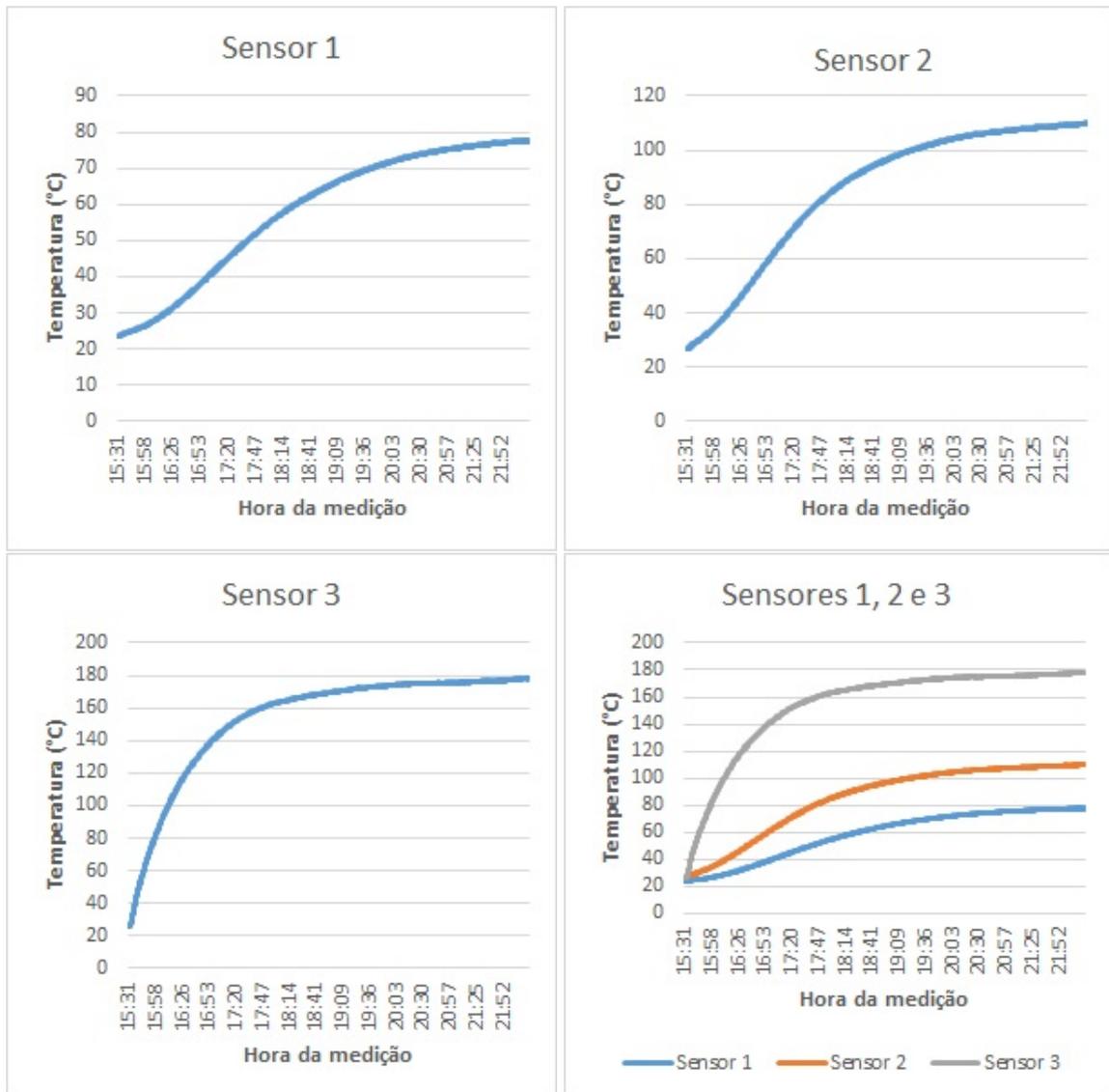
Figura 3.12 – Resposta ao acionamento da resistência intermediária



Fonte: Própria

Para o acionamento apenas do par resistivo superior podemos ver a resposta de cada sensor e na quarta imagem dos 3 sensores em um mesmo gráfico.

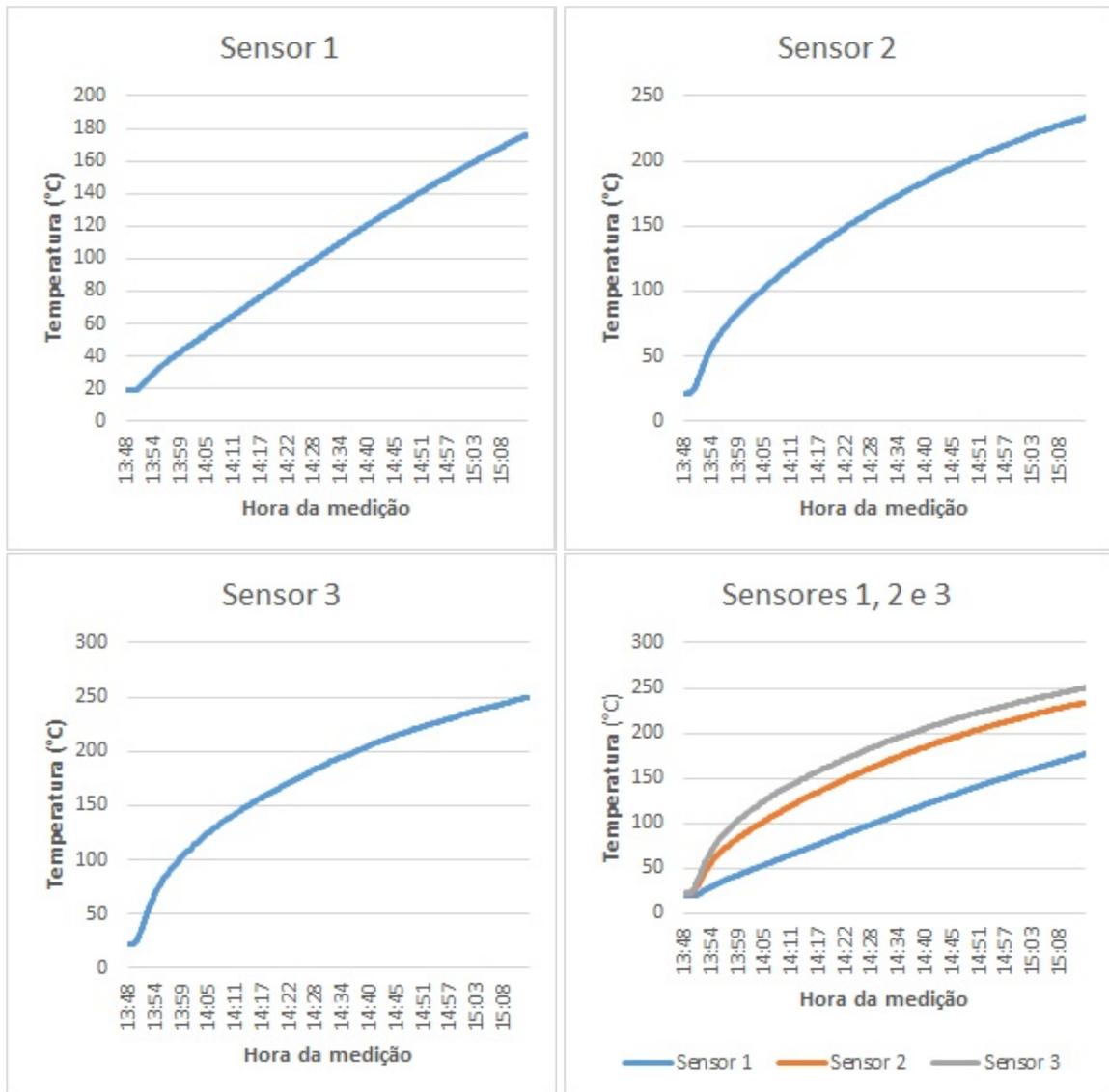
Figura 3.13 – Resposta ao acionamento da resistência superior



Fonte: Própria

Para o acionamento dos 3 pares resistivos podemos ver a resposta de cada sensor e na quarta imagem dos 3 sensores em um mesmo gráfico.

Figura 3.14 – Resposta ao acionamento de todas as resistências



Fonte: Própria

3.8 CRONOGRAMA DE ENVELHECIMENTO

De posse da equação 2.3 podemos ter uma visão mais concreta do ritmo de aceleração do envelhecimento e por conseguinte calcular o tempo necessário para que o cabo chegue no ponto máximo admitido das propriedades selecionadas ao aplicar uma certa temperatura. Ou seja, o tempo t necessário para chegar em 100% de envelhecimento quando submetido a uma temperatura T .

Tomando como base uma idade média esperada de 20000 horas, temos que, segundo a equação 2.3, a temperatura média do cabo deve ser de 104,11°C. Com isso, podemos derivar a equação 3.1 definida como a velocidade de aceleração do envelhecimento (FAA). FAA = 2 para uma temperatura T significa que o cabo nesta temperatura está envelhecendo duas vezes mais rápido, ou ainda, a vida útil esperada dele caiu para 10000 horas.

$$FAA = \frac{e^{-26,62} * e^{\frac{13779}{T}}}{e^{-26,62} * e^{\frac{13779}{104,11+273,15}}} = 7,27982179 * 10^{15} * e^{\frac{-13779}{T}} \quad (3.1)$$

Para a temperatura de envelhecimento de 140°C, temos que o $FAA_{140^{\circ}C} = 23,5867$. Assim para um dado percentual de envelhecimento, por exemplo 20%, o tempo do envelhecimento acelerado é dado por $t_{equivalente} = \frac{0,2 * 20000}{FAA_{140^{\circ}C}} = 169,58$ horas.

Separamos o envelhecimento dos cabos em 5 níveis. Aplicando a temperatura de 140°C os tempos esperados para chegar no envelhecimento equivalente programado são mostrados na tabela a seguir:

Tabela 3.2 – Tempo de envelhecimento equivalente

Percentual de envelhecimento	Idade equivalente (horas)	Tempo de envelhecimento a 140°C (horas)
20%	4000	169,58
40%	8000	339,17
60%	12000	508,76
80%	16000	678,34
100%	20000	847,93

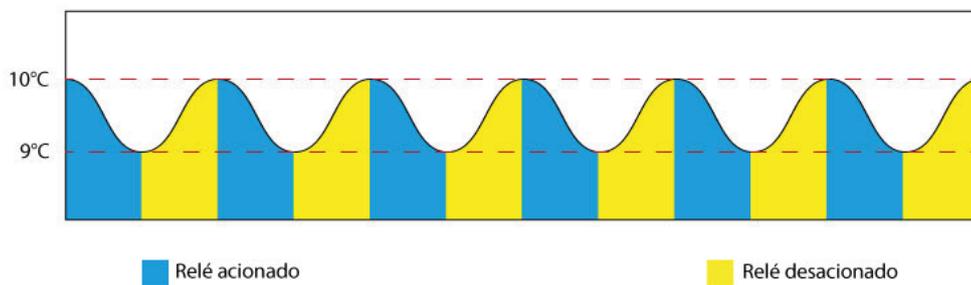
Fonte: Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS

O controle escolhido para o forno é através do modelo *setpoint*-histerese. É o modelo que permitiu a entrega do forno no prazo adequado, além de ter assegurado desempenho considerado adequado de acordo com os requisitos do projeto. A imagem a seguir demonstra como se comporta um controlador de temperatura que opere com as mesmas características adotadas para o forno:

Figura 4.1 – Comportamento de um controlador de temperatura *setpoint*-histerese



Fonte: Blog Ageon, 2022.¹

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA

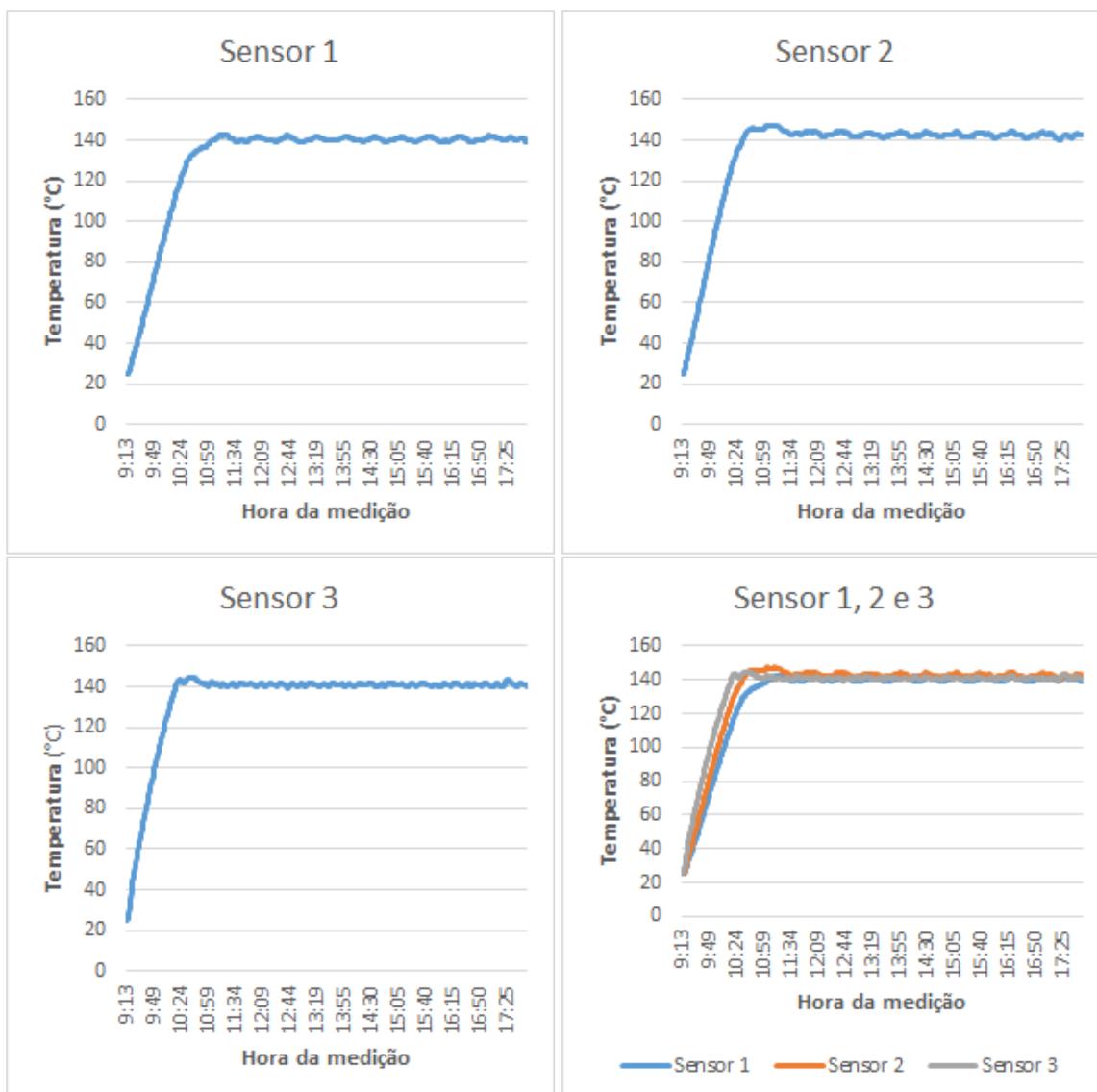
A aquisição de dados de temperatura é efetuada com o auxílio do código desenvolvido, que emprega uma média móvel simples para suavizar as variações nas leituras dos sensores. Dessa forma, são minimizadas as oscilações causadas por pequenos desvios momentâneos. Além disso, a temperatura é registrada em um arquivo .txt a cada minuto, e estes dados são utilizados para criar um gráfico em tempo real do histórico de temperatura. Essas informações serão de utilidade para a pesquisa de envelhecimento acelerado de cabos de média tensão, para a qual o forno foi desenvolvido.

4.3 CONTROLE DE TEMPERATURA

Os resultados de temperatura para o forno quando o *setpoint* é definido em 140°C são demonstrados nas figuras a seguir:

¹ Disponível em: <https://blog.ageon.com.br/setpoint-e-histerese-em-controladores-de-temperatura-e-como-configurar/> (Acesso em 11 de Abril de 2023)

Figura 4.2 – Temperatura do forno após aplicação da lei de controle



Fonte: Própria

Já a tabela a seguir contém os dados relativos a três ensaios de aquecimento completo do forno, realizados em dias distintos. As coletas de tempo se iniciam à temperatura ambiente no momento em que as resistências são acionadas pela primeira vez, até que o forno atinja a temperatura de 140°C.

Tabela 4.1 – Tempo de aquecimento

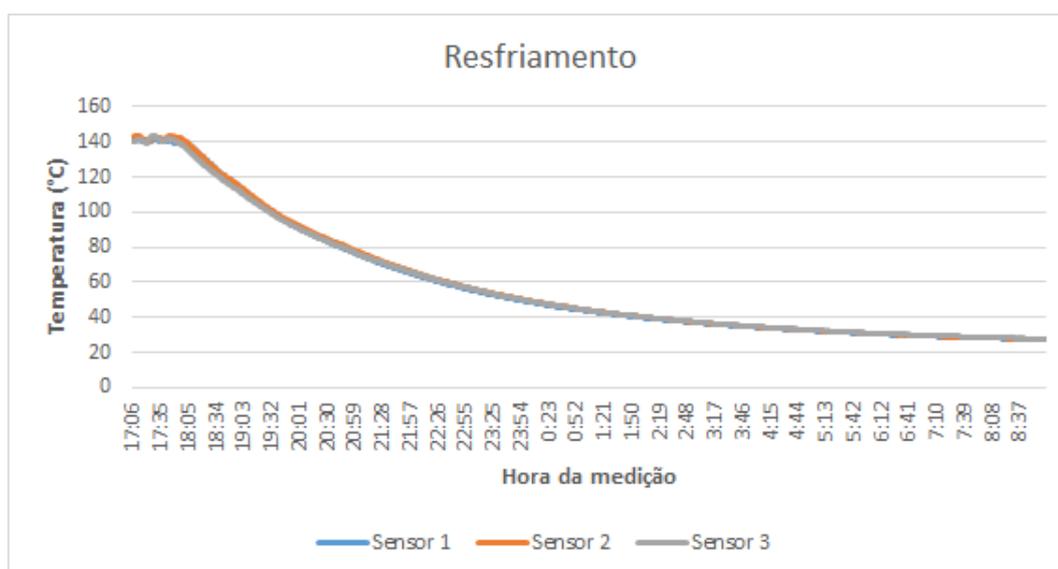
Ensaio	Tempo (min)
1	106
2	104
3	109
Média	106 ± 1,87

Fonte: Própria

4.4 ISOLAMENTO TÉRMICO

O gráfico a seguir demonstra o resfriamento do forno a partir do momento em que o controlador é desligado e sua temperatura resfria naturalmente desde 140°C até a temperatura ambiente:

Figura 4.3 – Resfriamento do forno



Fonte: Própria

A tabela seguinte é análoga à tabela do item anterior, porém é relativa ao resfriamento do forno a partir do momento em que é desligado o controlador. O tempo é contabilizado a partir do momento em que as resistências são desligadas, até que o forno atinja temperatura média de 30°C.

Tabela 4.2 – Tempo de resfriamento

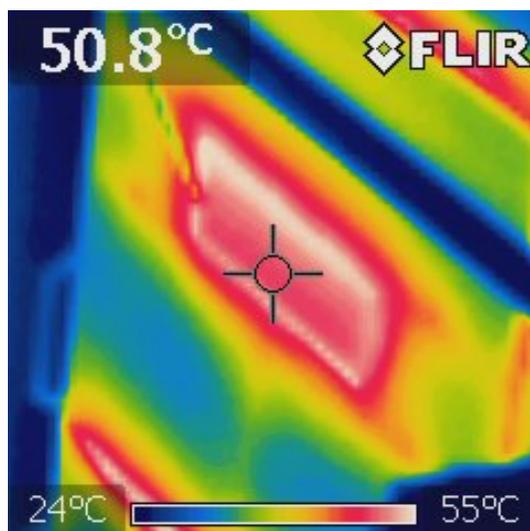
Ensaio	Tempo (min)
1	757
2	770
3	763
Média	$763 \pm 5,21$

Fonte: Própria

As imagens a seguir foram feitas com o uso de uma câmera termográfica da marca FLIR modelo TG-165X, capaz de medir a temperatura do objeto e gerar uma imagem que indica a temperatura de cada parte do elemento retratado através de uma escala de cores. Essa câmera é capaz de realizar esse trabalho porque registra a radiação infravermelha, que é emitida pelo objeto monitorado de acordo com a temperatura em cada ponto do mesmo.

De acordo com a imagem a seguir, a janela de inspeção atinge a temperatura de 50,8°C quando o forno está em uma temperatura interna de 140°C.

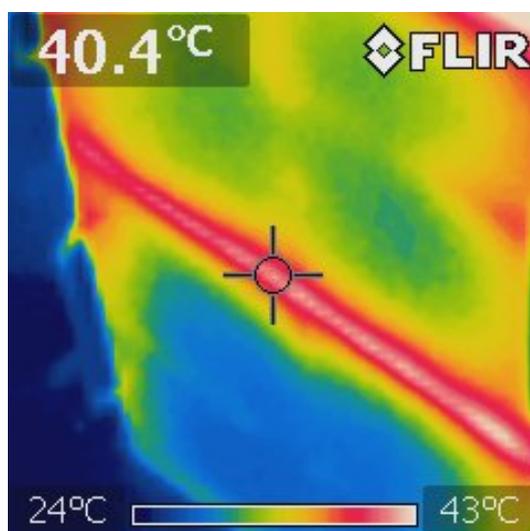
Figura 4.4 – Imagem térmica da janela de inspeção



Fonte: Própria

De acordo com a imagem a seguir, a junção entre as portas do forno atinge a temperatura de 40,4°C quando o forno está em uma temperatura interna de 140°C.

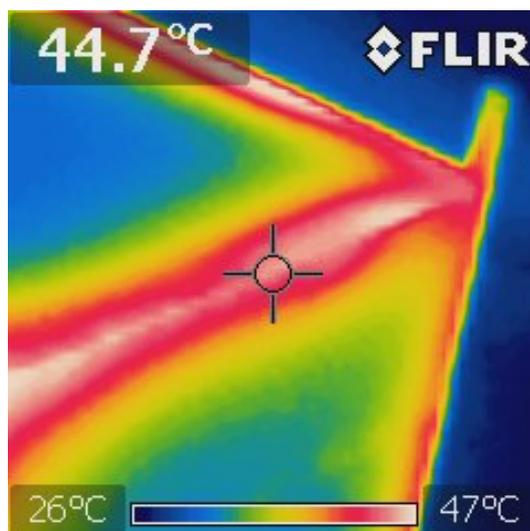
Figura 4.5 – Imagem térmica da junta entre portas



Fonte: Própria

De acordo com a imagem a seguir, o local onde a parede lateral do forno se encontra com o teto do mesmo atinge a temperatura de 44,7°C quando o forno está em uma temperatura interna de 140°C.

Figura 4.6 – Imagem térmica da junção teto-parede



Fonte: Própria

4.5 DISCUSSÕES

O forno foi testado por 30 dias ininterruptos para que o desempenho do mesmo fosse avaliado ao longo do tempo e em diversas faixas de temperatura. Foram observadas características de repetibilidade nos testes o que levou a uma aprovação do projeto por parte dos gestores do LRI.

O forno produz cerca de 30 acionamentos de relé por hora, distribuídos entre os 3 relés diferentes. Além disso, consome em média 2500 W para manter o forno a uma temperatura constante de 140°C. Por fim, quando o forno está em potência máxima cada fase elétrica admite a passagem de 26 A de corrente. O tempo de aquecimento do forno foi estimado em 1 hora e 46 minutos, já o resfriamento leva, aproximadamente, 12 horas e 43 minutos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desafio de estudar a vida útil de cabos elétricos de média tensão exige técnicas apuradas de medição do estado de conservação dos mesmos através de diversos parâmetros elétricos e mecânicos. Certamente, esse estudo exige a capacidade de envelhecer os cabos tanto quanto seja necessário em um espaço de tempo considerado viável pela equipe de pesquisadores.

A tarefa de envelhecer cabos elétricos pode ser efetivada através de diversos métodos, como o envelhecimento por raios ultravioleta, envelhecimento por temperatura elevada, passagem de corrente, estresse mecânico. No presente trabalho foi proposta a execução de um forno capaz de produzir condições térmicas adequadas para o envelhecimento acelerado de cabos de média tensão.

Essa técnica encontra respaldo econômico pelo fato de ser uma das estratégias que permite o maior número de amostras simultâneas. Além do quesito econômico, leva-se em conta que uma pesquisa robusta requer um número estatisticamente relevante de amostras a fim de validar o fenômeno observado. Com esse grande número de amostras a estratégia que permita envelhecimento simultâneo de mais unidades leva vantagem em detrimento das técnicas que aceleram o envelhecimento de apenas um cabo por vez.

O forno foi projetado, construído, equipado e testado. Os resultados desse trabalho indicam que os objetivos foram concluídos de forma satisfatória e sugerem melhorias que podem ser implementadas oportunamente.

5.1 CONCLUSÃO

Para o envelhecimento térmico é importante garantir altas temperaturas – em relação à temperatura normal de uso dos cabos – e longo tempo de exposição. Isso exige a construção de uma câmara térmica, com bom isolamento e flexibilidade de *setpoint*. A construção do forno descrito no presente trabalho demonstra a importância das diferentes competências de engenharia aplicadas.

O forno recebeu 40 amostras de cabos XLPE de cobre e foi colocado em funcionamento. Foi observada estabilidade mecânica satisfatória, capaz de suportar a carga dos cabos mesmo em temperaturas acima de 140°C, ainda contando com versatilidade para cabos de diferentes dimensões em relação ao que foi previsto durante a etapa de levantamento de pré-requisitos de projeto.

Do ponto de vista térmico, o forno apresentou isolamento adequado nas paredes com perda de calor maior nas frestas entre as portas e nas junções entre parede e teto do mesmo, conforme demonstrado nas imagens realizadas com câmera termográfica. Esse fato ocasiona maior consumo de energia elétrica para manutenção da temperatura, mas sem comprometer o desempenho dos ensaios desejados.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Observando o resultado obtido e os dados coletados é possível propor alguns focos de estudo para melhorias de desempenho em trabalhos futuros:

- Incorporar espuma isolante ou borracha resistente à temperatura a fim de garantir melhor vedação do forno, impedindo o ar quente de escapar pelas frestas;
- Estudos mais aprofundados em elementos finitos para melhorar a distribuição geométrica das resistências no interior do forno;
- Aproveitar os dados obtidos para projetar um controlador PID, capaz de minimizar o erro entre temperatura medida e *setpoint*;
- Criar interface gráfica, facilitando o uso por operadores não treinados.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kv a 36,2 kv*. Rio de Janeiro, 2004. 65 p.
- ALGHAMDI, A. S.; DESUQI, R. K. A study of expected lifetime of xlpe insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing. *Heliyon*, 2020.
- ANDERS, G. J. *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*. 1. ed. Hoboken: IEEE Press, 2005.
- BOUKEZZI, L.; BOUBAKEUR, A.; LALLOUANI, M. Life time estimation with different models of xlpe insulation cables under thermal aging. In: . [S.l.: s.n.], 2009.
- CAO, L.; GRZYBOWSKI, S. Life-time characteristics of epr cable insulation under electrical and thermal stresses. *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, p. 632–635, 2013.
- CHIAVENATO, I. *Introdução à Teoria Geral da Administração: uma visão abrangente da moderna administração das organizações*. 3. ed. São Paulo: Elsevier Editora Ltda., 2004.
- CLEGG, S.; KORNBERGER, M.; PITSIS, T. *Administração e organizações: uma introdução à teoria e à prática*. 2. ed. São Paulo: ARTMED EDITORA S.A., 2011.
- EBELING, C. E. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. 1. ed. United States of America: Waveland Press, Inc., 2005.
- FIALHO, A. B. *Instrumentação industrial: Conceitos, aplicações e análises*. 7. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.
- FRENZEL, L. E. *Principles of Electronic Communication Systems*. 4. ed. Galveston: McGraw Hill, 2015.
- GRIFFIN, R. W. *Introdução à Administração*. 1. ed. São Paulo: Editora Ática, 2007.
- GROOVER, M. P. *Automação Industrial e Sistemas de Manufatura*. 3. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2010.
- HEINHOLD, L. *Cables y conductores para transporte de energía*. 2. ed. Madrid: Dossat S.A., 1973.
- IEC. *IEC 60216-2:2005: Electrical insulating materials - thermal endurance properties - part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials - choice of test criteria*. Geneva, 2005. 25 p.
- IEC. *IEC 60216-4-1: Ageing ovens - single-chamber ovens*. Geneva, 2006. 24 p.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 5. ed. São Paulo: LTC, 2003.
- JONES, D. R. H.; ASHBY, M. F. *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*. 5. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2019.

LIN, J.; CAI, L. Research on the thermal aging life prediction of xlpe cable. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1570, p. 012050, 06 2020.

MCMANUS, S.; COOK, M. *Raspberry Pi For Dummies*. 1. ed. Manchester: John Wiley & Sons, 2013.

MUSTAFA, E.; AFIA, R. S. A.; TAMUS, Z. Ádám. Condition monitoring uncertainties and thermal - radiation multistress accelerated aging tests for nuclear power plant cables: A review. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, v. 1, p. 64, 2020.

NAHVI, M.; EDMINISTER, J. A. *Teoria e Problemas de Circuitos Eléctricos*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

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

RICARDO, O. G. *Introdução à Resistência dos Materiais*. 1. ed. Campinas: Editora da Universidade de Campinas, 1977.

SHIGLEY, J. E. *Elementos de Máquinas I*. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984.

SHWEHDI, M.; MORSY, M.; ABUGURAIN, A. Thermal aging tests on xlpe and pvc cable insulation materials of saudi arabia. In: . [S.l.: s.n.], 2003. p. 176 – 180. ISBN 0-7803-7910-1.

XIAO-KAI, M.; PEI-JIE, H.; XINYUAN, L.; TAO, J. The aging degree analysis of epr cable insulation based on hardness retention rate measurement. *Journal of Electrical & Electronic Systems*, v. 07, 01 2018.

YAHYAOU, H.; CASTELLON, J.; AGNEL, S.; HASCOAT, A.; FRELIN, W.; MOREAU, C.; HONDAA, P.; ROUX, D. I.; ERIKSSON, V.; ANDERSSON, C. J. Behavior of xlpe for hvdc cables under thermo-electrical stress: Experimental study and ageing kinetics proposal. *Energies*, v. 14, n. 21, 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/21/7344>>.

YANKOVSKY, G. *Basic Electrical Engineering*. 2. ed. Moscou: MIR Publishers, 1970.

ZHANG, Y. S.; BAI, Y.; MA, Y. X. Comparison of reliability of conventional and rapid aging methods for insulating materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, p. 1159–1165, 1992.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Código de controle do forno

```
# Temperatura alvo
temperatura = 140
histerese = 0.5

# Controle de tempo
TEMPO_SALVAMENTO = 60 # 1 minuto
TEMPO_ENSAIO = int(60 * 60 * 0.001) # 6 horas
TEMPO_ATUALIZACAO = 0.01 # Tempo de leitura do sensor e salvamento no buffer

arquivo_de_registro = 'ensaio.csv'

# Importar bibliotecas
from datetime import datetime

from tkinter import *
from tkinter import messagebox
from tkinter import font

import time
from turtle import delay
import board
import digitalio
import adafruit_max31865

import numpy as np

# Correção das leituras dos PT-100
def calibracao_sensor1(X):
    return 0.9988 * X + 4.141

def calibracao_sensor2(X):
    return 1.0003 * X + 2.2327

def calibracao_sensor3(X):
    return 0.9804 * X + 2.9019

top = Tk()

# Cria os objetos sensor, comunicação com o barramento SPI padrão
spi = board.SPI()

cs1 = digitalio.DigitalInOut(board.D17) # Chip select sensor 1
cs2 = digitalio.DigitalInOut(board.D22) # Chip select sensor 2
cs3 = digitalio.DigitalInOut(board.D27) # Chip select sensor 3

sensor1 = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs1, rtd_nominal=100, wires=3)
sensor2 = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs2, rtd_nominal=100, wires=3)
sensor3 = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs3, rtd_nominal=100, wires=3)

# Define GPIO dos reles
rele1 = 14
rele2 = 3
rele3 = 2

# Define biblioteca da GPIO
import RPi.GPIO as GPIO
GPIO.setwarnings(False)
GPIO.setmode(GPIO.BCM)

GPIO.setup(rele1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(rele2, GPIO.OUT)
GPIO.setup(rele3, GPIO.OUT)

#Pinos em estado alto para desligar os reles
GPIO.output(rele1, 1)
GPIO.output(rele2, 1)
GPIO.output(rele3, 1)

#Armazena o estado do rele
b1=b2=b3=1
```

```
cor_botao1=cor_botao2=cor_botao3 = 'red'

temperatura1 = StringVar()
temperatura2 = StringVar()
temperatura3 = StringVar()
tempo_ensaio = StringVar()

top.geometry("240x320")

top.title("LRI")

top.configure(background='white')

helv36 = font.Font(family='Helvetica', size=16, weight='bold')

# 1: Desliga
# 0: Liga
# 2: Inverte (padrão)
def chamada_botao_1(comando = 2):

    global b1
    global cor_botao1

    if comando == 2:

        b1 = not b1
        GPIO.output(rele1, b1)
        if b1 == 1:
            cor_botao1 = 'red'
        elif b1 == 0:
            cor_botao1 = 'green'
        desenha_botao1()

    if comando != 2:

        b1 = comando
        GPIO.output(rele1, b1)
        if b1 == 1:
            cor_botao1 = 'red'
        elif b1 == 0:
            cor_botao1 = 'green'
        desenha_botao1()

# 1: Desliga
# 0: Liga
# 2: Inverte (padrão)
def chamada_botao_2(comando = 2):
    global b2
    global cor_botao2

    if comando == 2:

        b2 = not b2
        GPIO.output(rele2, b2)
        if b2 == 1:
            cor_botao2 = 'red'
        elif b2 == 0:
            cor_botao2 = 'green'
        desenha_botao2()

    if comando != 2:

        b2 = comando
        GPIO.output(rele2, b2)
        if b2 == 1:
            cor_botao2 = 'red'
        elif b2 == 0:
            cor_botao2 = 'green'
        desenha_botao2()

# 1: Desliga
# 0: Liga
# 2: Inverte (padrão)
def chamada_botao_3(comando = 2):
```

```

global b3
global cor_botao3

if comando == 2:

    b3 = not b3
    GPIO.output(rele3, b3)
    if b3 == 1:
        cor_botao3 = 'red'
    elif b3 == 0:
        cor_botao3 = 'green'
    desenha_botao3()

if comando != 2:

    b3 = comando
    GPIO.output(rele3, b3)
    if b3 == 1:
        cor_botao3 = 'red'
    elif b3 == 0:
        cor_botao3 = 'green'
    desenha_botao3()

# Define Our Images
on = PhotoImage(file = "images/switch-on.png")
off = PhotoImage(file = "images/switch-off.png")

A = Button(top, text = "RELE 1", command = chamada_botao_1, font = helv36, fg=cor_botao1,
background='white', activebackground='white', borderwidth=0, highlightthickness=0, padx=0, pady=0)
B = Button(top, text = "RELE 2", command = chamada_botao_2, font = helv36, fg=cor_botao2,
background='white', activebackground='white', borderwidth=0, highlightthickness=0, padx=0, pady=0)
C = Button(top, text = "RELE 3", command = chamada_botao_3, font = helv36, fg=cor_botao3,
background='white', activebackground='white', borderwidth=0, highlightthickness=0, padx=0, pady=0)

E = Label(top, text = "Atuador 1", bg='white')
E.place(x = 30,y = 155)

F = Label(top, text = "Atuador 2", bg='white')
F.place(x = 30,y = 95)

G = Label(top, text = "Atuador 3", bg='white')
G.place(x = 30,y = 35)

H = Label(top, text = "Tempo restante: ", bg='white')
H.place(x = 30,y = 220)

def desenha_botao1():
    global cor_botao1
    if cor_botao1 == 'red':
        A.config(image = off)
    else:
        A.config(image = on)
    #A.config(width="8",height="2")
    A.place(x = 110,y = 150)

def desenha_botao2():
    global cor_botao2
    if cor_botao2 == 'red':
        B.config(image = off)
    else:
        B.config(image = on)
    #B.config(width="8",height="2")
    B.place(x = 110,y = 90)

def desenha_botao3():
    global cor_botao3
    if cor_botao3 == 'red':
        C.config(image = off)
    else:
        C.config(image = on)
    #C.config(width="8",height="2")
    C.place(x = 110,y = 30)

def desenha_temperatural():

```

```

D = Label(top, textvariable = temperatura1, bg='white')

D.config(width="8",height="2")

D.place(x = 150,y = 150)

def desenha_temperatura2():

    D = Label(top, textvariable = temperatura2, bg='white')

    D.config(width="8",height="2")

    D.place(x = 150,y = 90)

def desenha_temperatura3():

    D = Label(top, textvariable = temperatura3, bg='white')

    D.config(width="8",height="2")

    D.place(x = 150,y = 30)

def desenha_tempo_restante():

    D = Label(top, textvariable = tempo_ensaio, bg='white')

    D.config(width="8",height="2")

    D.place(x = 150,y = 210)

#Desenha botoes
desenha_botao1()
desenha_botao2()
desenha_botao3()
desenha_temperatura1()
desenha_temperatura2()
desenha_temperatura3()
desenha_tempo_restante()

tempo_inicio_ensaio = time.time()

tempo_final_ensaio = tempo_inicio_ensaio + TEMPO_ENSAIO

tempo_salvamento_aux = time.time()

tempo_ensaio_aux = time.time()

tempo_atualizacao_aux = time.time()

chamada_botao_1(1)
chamada_botao_2(1)
chamada_botao_3(1)

T1 = np.zeros(10)
T2 = np.zeros(10)
T3 = np.zeros(10)

flag_travamento = 3

while True:
    tempo_atual = time.time()

    if (tempo_atual - tempo_atualizacao_aux) > TEMPO_ATUALIZACAO:
        tempo_atualizacao_aux = tempo_atual

        T1 = np.roll(T1, 1)
        T2 = np.roll(T2, 1)
        T3 = np.roll(T3, 1)

        T1[0] = calibracao_sensor1(sensor1.temperature)
        T2[0] = calibracao_sensor2(sensor2.temperature)
        T3[0] = calibracao_sensor3(sensor3.temperature)

        temperatura1.set("#50-9-2f36".format(T1[0]))

```

```

temperatura1.set("{0:0.3f}C".format(T1.mean()))
temperatura2.set("{0:0.3f}C".format(T2.mean()))
temperatura3.set("{0:0.3f}C".format(T3.mean()))

tempo_restante = tempo_final_ensaio - time.time()
tempo_restante_h = int(tempo_restante/60/60)
tempo_restante_m = int((tempo_restante - tempo_restante_h * 60 * 60) / 60)
tempo_restante_s = int((tempo_restante - tempo_restante_h * 60 * 60 - tempo_restante_m * 60))

tempo_ensaio.set("{}: {}: {}".format(tempo_restante_h, tempo_restante_m, tempo_restante_s))

if flag_travamento == 0:
    if (T1.std() == 0) or (T2.std() == 0) or (T3.std() == 0):
        print('Sensor travado!\n', T1.std(), T2.std(), T3.std())
        chamada_botao_1(1)
        chamada_botao_2(1)
        chamada_botao_3(1)

        exit()
    else:
        flag_travamento = flag_travamento - 1

if (tempo_atual - tempo_salvamento_aux) > TEMPO_SALVAMENTO:
    tempo_salvamento_aux = tempo_atual

    string = str(datetime.now()) + ",{0:0.3f},".format(T1.mean()) + "{0:0.3f},".format(T2.mean()) + "
{0:0.3f}".format(T3.mean()) + '\n'
    with open('ensaios/'+aquivo_de_registro, 'a') as f:
        f.write(string)

if (tempo_atual - tempo_ensaio_aux) >= TEMPO_ENSAIO:
    chamada_botao_1(1)
    chamada_botao_2(1)
    chamada_botao_3(1)

    #exit()

top.update()

if (tempo_atual - tempo_ensaio_aux) < TEMPO_ENSAIO:

    if (float("{0:0.3f}".format(T1.mean())) > temperatura + histerese):

        #GPIO.output(rele1, 1) DESLIGA
        chamada_botao_1(1)

    if (float("{0:0.3f}".format(T1.mean())) < temperatura - histerese):

        #GPIO.output(rele1, 0) LIGA
        chamada_botao_1(0)

    if (float("{0:0.3f}".format(T2.mean())) > temperatura + histerese):

        #GPIO.output(rele2, 1) DESLIGA
        chamada_botao_2(1)

    if (float("{0:0.3f}".format(T2.mean())) < temperatura - histerese):

        #GPIO.output(rele2, 0) LIGA
        chamada_botao_2(0)

    if (float("{0:0.3f}".format(T3.mean())) > temperatura + histerese):

        #GPIO.output(rele3, 1) DESLIGA
        chamada_botao_3(1)

    elif (float("{0:0.3f}".format(T3.mean())) < temperatura - histerese):

        #GPIO.output(rele3, 0) LIGA
        chamada_botao_3(0)

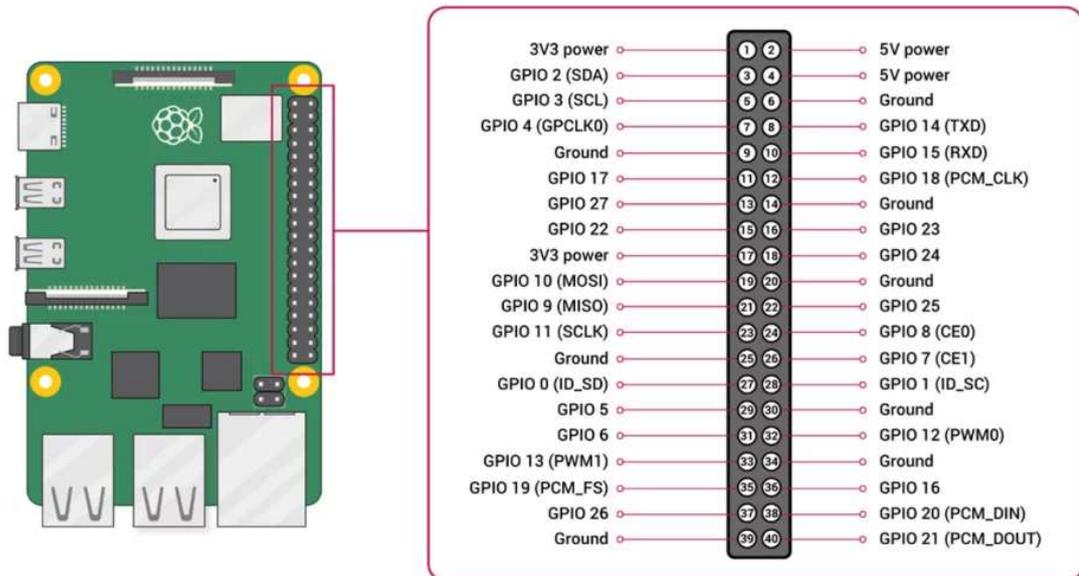
top.mainloop()

```

ANEXOS

ANEXO A – GPIO do Raspberry PI

Figura A.1 – Portas de Entrada e Saída do Raspberry PI



Fonte: BLOG EletroGate, 2022¹.

¹ Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/introducao-as-gpio-do-raspberry-pi-3-b/> (Acesso em 27 de Abril de 2023)

ANEXO B – Faixa de operação do Pt-100

Figura B.1 – Informações técnicas do Pt-100

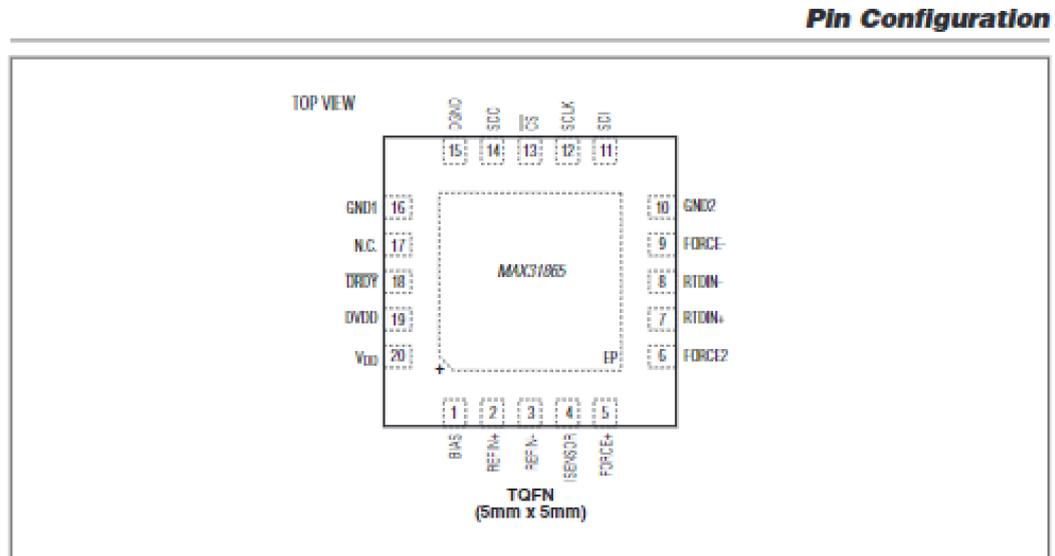
Technical Data			
Standard sensor		Common data for both types	
Measuring range	-50...205°C	Case material	Acid-proof, stainless steel AISI 316 Ti (W 1.4571)
Ambient temperature	-50...205°C	Case dimensions	ø5.8 mm x 60 mm
Marking label	-30...105°C	Time constant $\tau_{0,5}$	See table
Pressure range	≤ 25 bar (water flow 3m/sec.)	Accuracy	DIN/EN/IEC 60751
Humidity	< 98% RH, condensing	1/1 DIN B	±(0.3 + 0.005 x t) °C
Protection class	IP 65	1/3 DIN B	±1/3 x (0.3 + 0.005 x t) °C
Cable type	High-flexible silicone, grey	1/6 DIN B	±1/6 x (0.3 + 0.005 x t) °C
Wires	4 (2 x Red, 2 x white)	Vibrations	Lloyds Register, test 2
Length	up to 99.99 metres	Mechanical tolerances	ISO 2768-m
Air sensor		Disposal of product and packing	
Measuring range	-50...205°C	According to national laws or by returning to Baumer	
Ambient temperature	-50...205°C		
Marking label	-30...105°C		
Environment	Non-aggressive air		
Air gap	8 holes, ø3 mm		
Humidity	< 98% RH, condensing		
Protection class	IP 65		
Cable type	High-flexible silicone, grey		
Wires	4 (2 x Red, 2 x white)		
Length	up to 99.99 metres		

Fonte: Alldatasheet, 2022¹.

¹ Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1491698/IVO/PT1000.html> (Acesso em 28 de Abril de 2023)

ANEXO C – Pinagem do MAX31865

Figura C.1 – Pinagem do MAX31865



Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	BIAS	Bias Voltage Output (V_{BIAS})
2	REFIN+	Positive Reference Voltage Input. Connect to BIAS. Connect the reference resistor between REFIN+ and REFIN-.
3	REFIN-	Negative Reference Voltage Input. Connect the reference resistor between REFIN+ and REFIN-.
4	ISENSOR	Low Side of R_{REF} . Connect to REFIN-.
5	FORCE+	High-Side RTD Drive. Connect to FORCE2 when using the 3-wire connection configuration. Protected to +50V.
6	FORCE2	Positive Input Used in 3-Wire Only. When in the 3-wire connection configuration, connect to FORCE+. When in the 2-wire or 4-wire connection configuration, connect to ground. Protected to +50V.
7	RTDIN+	Positive RTD Input. Protected to +50V.
8	RTDIN-	Negative RTD Input. Protected to +50V.
9	FORCE-	Low-Side RTD Return. Protected to +50V.
10	GND2	Analog Ground. Connect to GND1.
11	SDI	Serial-Data Input
12	SCLK	Serial-Data Clock Input
13	\overline{CS}	Active-Low Chip Select. Set \overline{CS} low to enable the serial interface.
14	SDO	Serial-Data Output
15	DGND	Digital Ground
16	GND1	Analog Ground. Connect to GND2.
17	N.C.	Do Not Connect
18	\overline{DRDY}	Active-Low Push-Pull Data-Ready Output. \overline{DRDY} goes low when a new conversion result is available in the data register. When a read-operation of an RTD resistance data register occurs, \overline{DRDY} returns high.
19	DVDD	Digital Supply Voltage Input. Connect to a 3.3V power supply. Bypass to DGND with a 0.1 μ F bypass capacitor.
20	VDD	Analog Supply Voltage Input. Connect to a 3.3V power supply. Bypass to GND1 with a 0.1 μ F bypass capacitor.
—	EP	Exposed Pad (Bottom Side of Package). Connect to GND1.

Fonte: Alldatasheet, 2022¹.

¹ Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/492628/MAXIM/MAX31865.html> (Acesso em 28 de Abril de 2023)