



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA – CAMPUS I – JOÃO PESSOA
CENTRO DE TECNOLOGIA (CT)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARTHUR SENA E SILVA

**ANÁLISE E RESTAURAÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO DE PEQUENO
PORTE DO LABORATÓRIO DE TRATAMENTO TÉRMICO DO CENTRO DE
TECNOLOGIA DA UFPB**

João Pessoa – PB

2025

ARTHUR SENA E SILVA

**ANÁLISE E RESTAURAÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO DE PEQUENO
PORTE DO LABORATÓRIO DE TRATAMENTO TÉRMICO DO CENTRO DE
TECNOLOGIA DA UFPB**

Trabalho de conclusão de curso, submetido ao corpo docente do curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Pereira Leite

João Pessoa – PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S474a Sena, Arthur Silva.

ANÁLISE E RESTAURAÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO DE
PEQUENO PORTE DO LABORATÓRIO DE TRATAMENTO TÉRMICO DO
CENTRO DE TECNOLOGIA DA UFPB / Arthur Silva Sena. -
João Pessoa, 2025.
69 f. : il.

Orientação: JOÃO PEREIRA LEITE.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. RESTAURAÇÃO. 2. REDIMENSIONAMENTO. 3. FORNO
ELÉTRICO. I. LEITE, JOÃO PEREIRA. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

ARTHUR SENA E SILVA

**ANÁLISE E RESTAURAÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO DE PEQUENO PORTE
DO LABORATÓRIO DE TRATAMENTO TÉRMICO DO CENTRO DE
TECNOLOGIA DA UFPB**

Trabalho de Conclusão de Curso – T.C.C , apresentado pelo acadêmico, ARTHUR SENA E SILVA, submetido à **Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica** da Universidade Federal da Paraíba – UFPB – Campus I –. Apresentado em sessão pública realizada em 23/04/2025, obtendo o conceito **APROVADO** sob a avaliação da banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JOAO PEREIRA LEITE**
Data: 28/04/2025 14:46:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador – Professor Dr. João Pereira Leite
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente
 **JEAN PIERRE VERONESE**
Data: 28/04/2025 20:10:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Convidado – Professor Dr. Jean Pierre Veronese
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente
 **JOSINALDO PEREIRA LEITE**
Data: 29/04/2025 16:52:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Convidado – Professor Dr. Josinaldo Pereira Leite
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Dedico esse trabalho a Dona
Raimunda Gean Rodrigues Cunha, a
minha vó materna.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida e por tudo que ele tem me oferecido durante esses anos, e por todas as bênçãos, progressos e evoluções que ele tem me proporcionado.

A toda minha família, principalmente meus pais e meus avós, que sempre me incentivaram e me apoiaram nas pequenas e grandes decisões, e me guiaram nos devidos caminhos da disciplina e obediência.

Ao meu orientador Professor Dr. João Pereira Leite, pela atenção, paciência e orientação durante a composição deste trabalho.

*“O homem é livre para fazer o que quer, mas não
para querer o que quer”*

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo realizar a restauração de um forno elétrico utilizado para tratamentos térmicos laboratoriais, a fabricação de suas resistências elétricas e substituição de seus componentes danificados. A recuperação desse equipamento representa uma melhoria nos equipamentos do Laboratório de Tratamentos Térmicos da UFPB, fornecendo assim, mais uma ferramenta de apoio à aprendizagem aos discentes de Engenharia Mecânica. Foi destinado como base a esse projeto, um forno já inutilizado há vários anos. Após a identificação dos componentes defeituosos, deu-se início aos cálculos e a fabricação das resistências junto a pesquisa dos componentes em setores eletrônicos. A fabricação das resistências foi realizada a partir de uma liga ferrítica de ferro-cromo-alumínio (liga de FeCrAl), devido à sua alta resistividade e resistência a oxidação. O forno utiliza um controlador analógico e um sistema de controle automático de temperatura com um auxílio de um termopar. Além disso, foi necessário o estudo detalhado sobre a forma de funcionamento de resistências elétricas, bem como a seleção dos componentes danificados, seus modelos, suas especificações e propriedades que atendem às condições para a compra dos mesmos. Após a fabricação das resistências foi feita a substituição dos componentes danificados seguindo esquemas previamente elaborados. Em seguida, o forno foi acionado e realizados testes de temperatura e calibração do sistema de controle para verificar se os valores encontrados convergiam com os obtidos através dos cálculos. Por fim, foi analisado se a temperatura da câmara do forno atingiu os valores de especificação, se a corrente elétrica nas resistências foi compatível com o valor dimensionado, se a temperatura na parte externa do forno atendia às normas de segurança e se a velocidade de aquecimento era aceitável.

Palavras-chave: Restauração. Redimensionamento. Forno elétrico.

ABSTRACT

The present study aims to restore an electric furnace used for laboratory heat treatments, including the fabrication of its electric heating elements and the replacement of damaged components. The recovery of this equipment represents an improvement in the resources of the Heat Treatment Laboratory at UFPB, providing an additional learning tool for Mechanical Engineering students. The project was based on a furnace that had been out of use for several years. After identifying the defective components, calculations were carried out, and the heating elements were manufactured alongside a search for replacement parts in the electronics sector. The heating elements were made from a ferritic iron-chromium-aluminum alloy (FeCrAl alloy), due to its high electrical resistivity and oxidation resistance. The furnace operates using an analog controller and an automatic temperature control system aided by a thermocouple. Additionally, a detailed study of the operation of electric resistances was required, as well as the selection of the damaged components, including their models, specifications, and properties suitable for purchase. After manufacturing the resistances and replacing the faulty components, they were installed according to previously prepared diagrams. The furnace was then activated, and temperature tests and control system calibrations were performed to verify whether the measured values matched those obtained through calculations. Finally, it was checked whether the furnace chamber temperature met the specified values, if the electric current in the heating elements matched the designed value, whether the external temperature of the furnace complied with safety standards, and whether the heating rate was acceptable.

Keywords: Restoration. Redesign. Electric Furnace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito termopar.....	24
Figura 2 - Símbolos representativos para resistor.....	28
Figura 3 - Circuito de resistores ligados em série.....	29
Figura 4 - Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada.....	35
Figura 5 - Diagrama de um forno de resistencia eletrica	39
Figura 6 - Vida média de um resistor (h) em função da temperatura (°C).....	41
Figura 7 - Fluxograma da restauração do forno	43
Figura 8- Forno elétrico desativado	45
Figura 9 - Representação das medidas do forno.....	46
Figura 10 - Desenho da perspectiva posterior do forno e seus constituintes	47
Figura 11 - Esquematização do circuito elétrico do forno	48
Figura 12 - Temopar tipo K, instalado na centro da tampa frontal do forno	48
Figura 13 - Desenho da perspectiva posterior do forno e seus constituintes.....	51
Figura 14 - Isolamento do forno elétrico.....	521
Figura 15- Aspectos das resistências elétricas montadas em placa cerâmica interna do forno.....	56
Figura 16 – Teste de acionamento do forno elétrico	53
Figura 17 – Processo de fabricação das resistencias.....	526
Figura 18- Resistências fabricadas montados junto a placa refrataria.....	567
Figura 19 – Verificação da temperatura interna no forno após finalização de processo de restauração.....	58
Figura 20 – Verificação de corrente de fase do circuito elétrico.....	520
Figura 21- Controlador (chave fechada)	56
Figura 22 –Controlador (chave aberta)	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de termopar, temperatura de trabalho e suas ligas.....	24
Tabela 2 - Valores de temperatura máxima e diâmetro dos termopares.....	25
Tabela 3 - Composição química da liga de FeCrAl.....	42
Tabela 4 - Dimensões do forno.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Amplitudes de sinal senoidal da tensão elétrica	32
Gráfico 2 - Diagrama fasorial para tensão e corrente no circuito CA	34
Gráfico 3 - Curva para o intervalo diferencial do sinal de erro no controlador On/Off .	36
Gráfico 4 - Comportamento do forno elétrico, tempo versus temperatura	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Proriedades da liga de FeCrAl	42
Quadro 2 - Valores de resistência, tensão, corrente e potência	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	<i>American National Standard for Bibliographical References</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
RMS	<i>Root Mean Square</i> ou Raiz Média Quadrática
RPM	Rotações Por Minuto
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> ou Policloreto de polivinila
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
FEM	Força eletromotriz
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FP	Fator de Potência
LED	<i>Light Emitting Diode</i> ou Diodo Emissor de Luz
KP	Controlador Proporcional
KI	Controlador Integral
KI	Controlador Proporcional Integral
KD	Controlador Proporcional Derivativo
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

LISTA DE SÍMBOLOS

T1	Temperatura da Junta de Referência
T2	Temperatura da Junta de Medição
K	Coefficiente de Condutividade Térmica
R	Resistência Elétrica
Req	Resistência Equivalente
R20°C	Resistência na Temperatura Ambiente
Rm	Resistência na Temperatura de Medição
Nr	Número de Resistores
ρ	Resistividade
Cs	Carga Superficial
Ct	Fator de Correção de Temperatura
L	Comprimento
A	Área da Seção Transversal
D	Diâmetro
J	Densidade de Corrente
E	Campo Elétrico
I	Corrente Elétrica
If	Corrente de Fase
Vi	Tensão de Fonte
V	Tensão Elétrica
Vt	Tensão Total
Vcc	Tensão de Corrente Contínua
Vca	Tensão de Corrente Alternada
Vp	Valor de Pico
Vrms	Valor RMS
F	Frequência
Φ	Ângulo de Fase
θ	Defasagem
IP	Corrente de Pico
IL	Corrente de Linha
IF	Corrente de Fase
VP	Tensão de Pico
VL	Tensão de Linha
VF	Tensão de Fase
i	Tensão Alternada em Números Complexos

z	Corrente Alternada em Números Complexos
Z	Impedância em Números Complexos
Z_{eq}	Impedância Equivalente
Z_t	Módulo da Impedância
Y	Ligação em Estrela
Δ	Ligação em Triângulo
P	Potência Elétrica
PT	Potência Total
PR	Potência Real
POT	Potência Reativa Total
PQ	Potência Reativa
PS	Potência Aparente
PST	Potência Aparente Total
FP	Fator de Potência
FPT	Fator de Potência Total
UO	Sinal de entrada
ES	Sinal de saída
r	Raio
re	Raio médio ou espacial
L	Comprimento total do fio
L_p	Comprimento Separado Para os Terminais das Resistências
L_v	Comprimento de Uma Volta
H	Tamanho da Resistência Pronta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2.3 JUSTIFICATIVA.....	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 CALOR E TEMPERATURA	20
3.1.1 Energia Térmica (conservação e geração)	20
3.1.2 Efeito Joule	21
3.1.3 Transferência de calor.....	21
3.2 AFERIÇÃO DE TEMPERATURA	22
3.2.1 Termopar.....	23
3.2.2 Termopar tipo K	25
3.3 ISOLAMENTO TÉRMICO	25
3.3.1 Tipos de Isolamentos Térmicos.....	26
3.4 RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	27
3.4.1 Ligação de resistores em série.....	28
3.4.2 Variação da resistência elétrica em relação a temperatura	30
3.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA	31
3.6 - CORRENTE ALTERNADA.....	31
3.6.1 Lei de ohm para circuitos de corrente alternada	34
3.7 – SISTEMAS DE CONTROLE.....	35
3.7.1 Controlador on/off	35
3.7.2 Controlador de temperatura	36
3.8 – FORNOS INDUSTRIAIS ELÉTRICOS.....	36
3.8.1 Fornos a resistência elétrica	37
3.8.2 Fornos à resistência de aquecimento indireto	38
3.8.3 Resistores da Liga FeCrAl.	41
4. METODOLOGIA	42
4.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	44
4.2 DESCRIÇÃO DO FORNO A SER RESTAURADO	44
4.2.1 Sistema de controle de temperatura.....	47
5. RESULTADOS OBTIDOS	49

5.1 ESCOLHA DO MATERIAL DAS RESISTENCIAS	49
5.2 PROBLEMAS ENCONTRADOS	50
5.2.1 Análise do isolamento térmico	50
5.2.2 Análise do elemento de aquecimento	51
5.2.3 Ligamento do forno	52
5.3 ROTEIRO DE CÁLCULOS.....	53
5.3.1 Cálculo do comprimento dos resistores	53
5.3.2 Cálculo da resistência total do circuito	54
5.3.3 Cálculo da corrente e potência elétrica	55
5.4 FABRICAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS.....	55
5.5 MONTAGEM DO FORNO.....	57
5.6 TESTES DE FUNCIONAMENTO	57
5.6.1 Verificação e comportamento da temperatura	58
5.6.2 Comparativo entre a corrente elétrica dimensionada e a corrente elétrica real.	59
5.6.3 <i>Set point</i> do forno e tolerância.....	60
5.7 CUSTOS DE MONTAGEM	62
6. CONCLUSÃO.....	63
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63

1. INTRODUÇÃO

Os fornos elétricos industriais são utilizados nos tratamentos térmicos e fundição dos materiais amplamente aplicados na indústria metalúrgica, ou seja, são instrumentos utilizados para aquecer materiais a temperaturas controladas com o objetivo de alterar suas propriedades físicas, mecânicas ou químicas. Segundo Mamede (2003), eles podem ser classificados de acordo com o método utilizado para o seu aquecimento, sendo mais comuns os fornos a combustão ou elétricos. No âmbito acadêmico, essas máquinas são de grande importância para desenvolvimentos de pesquisas e atividades, além de aprimorar habilidades práticas de nível técnico para os alunos, pois eles não só se limitam ao conhecimento teórico.

Na Universidade Federal da Paraíba no Campus I, encontram-se alguns equipamentos defasados devido ao tempo e ao uso, sendo possível encontrar alguns deles no Laboratório de Tratamento Térmico no Centro de Tecnologia (CT). Dentre esses equipamentos, existem alguns fornos elétricos que são utilizados para processos de pesquisas e análises no campo da fundição e tratamentos térmicos de metais.

No Laboratório de Tratamento Térmico (LTT), encontram-se diversos equipamentos utilizados em processos térmicos, sendo um deles selecionado como objeto de estudo deste trabalho. A estrutura desse forno é composta por uma câmara interna, revestimento externo com chapa metálica e um revestimento interno constituído por fibra cerâmica, placas refratárias e tijolos isolantes. O principal componente responsável pela geração de calor no interior do compartimento são as resistências elétricas.

Esses equipamentos têm uma vida útil consideravelmente alta, porém, ao longo do tempo, sofrem o efeito das condições severas de uso, comumente tem comprometimento de suas resistências elétricas, componentes eletrônicos e isolamento térmico. Em virtude disso, serão aplicados conhecimentos desenvolvidos durante o curso na área de manutenção, eletrotécnica, conformação e usinagem dos metais, sendo paralelamente relatado todos os processos utilizados durante a realização do presente trabalho com o intuito de prolongar a vida útil e tornar o equipamento funcional para a universidade e para os acadêmicos que necessitarem utilizar a máquina para realização de novos estudos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo realizar a recuperação de um forno mufla elétrico FNT-F1-monofásico por meio do desenvolvimento de atividades práticas manufatureiras, utilizando informações obtidas através de pesquisas bibliográficas e conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia Mecânica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um estudo sobre fornos elétricos para tratamento térmico, seus componentes e seu princípio de funcionamento;
- Mapear a situação atual dos sistemas de monitoramento e controle de carga e de isolamento térmico;
- Exibir os detalhes do projeto e fabricar novas resistências elétricas;
- Realizar a manutenção e montagem do forno, ligação do seu circuito elétrico e substituição dos componentes danificados;
- Validar o funcionamento do forno através de testes de funcionamento.

2.3 JUSTIFICATIVA

É essencial um graduando ter conhecimentos de projeto, fabricação, manutenção de máquinas e equipamentos industriais, pois isso irá ampliar seu conhecimento multidisciplinar em diversas áreas. Além disso, a reparação do forno representará uma grande contribuição para o Laboratório de Tratamentos Térmicos e para o curso de Engenharia Mecânica, visto que, o preço dessa máquina é elevado. Através desse trabalho, o laboratório terá mais um instrumento para o aprendizado dos estudantes, fortalecendo o portfólio da infraestrutura da Universidade Federal da Paraíba.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CALOR E TEMPERATURA

Segundo Halliday (2009), o calor pode ser definido como a energia térmica em trânsito entre dois sistemas ou corpos devido a uma diferença de temperatura entre eles, isto é, o calor é a energia transferida de um sistema para o ambiente ou vice-versa, devido a uma diferença de temperatura.

Já a temperatura é uma propriedade física da matéria relacionada ao estado térmico de um corpo, estando diretamente associada à energia cinética média das moléculas que compõem o material (HALLIDAY, 2009). A temperatura indica o nível de agitação das partículas, ou seja, quanto mais elevada for a temperatura, maior será a energia cinética média das partículas.

3.1.1 Energia Térmica (conservação e geração)

Incropera *et al.* (2008), define a energia térmica como a energia interna associada ao movimento microscópico das moléculas de um material. Essa energia interna é composta pela energia potencial associada às interações intermoleculares.

“A energia térmica é uma energia interna que consiste na energia cinética e na energia potencial associadas aos movimentos aleatórios dos átomos, moléculas e outros corpos microscópicos que existem no interior de um objeto” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009, p. 122).

A energia térmica é vista como uma parte da energia interna que pode ser alterada por meio de transferência de calor (condução, convecção ou radiação) ou pela realização de trabalho. A quantidade de energia térmica de um corpo está diretamente relacionada à sua temperatura e à natureza do material.

De acordo com o princípio da conservação da energia, a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante. Ele também assegura que a energia não pode ser criada nem eliminada, e sim, transformada. A energia térmica pode ser gerada a partir da conversão de outras formas de energia em calor.

O termo da geração de energia está associado à conversão de alguma outra forma de energia (química, elétrica, eletromagnética ou nuclear) em energia Térmica. Esse é um fenômeno volumétrico. Ou seja, ele ocorre no interior do volume de controle e é geralmente proporcional à magnitude desse volume. (INCROPERA *et al.*, 2008)

3.1.2 Efeito Joule

O efeito Joule é um exemplo de conversão da energia elétrica em térmica em um condutor que está conduzindo corrente elétrica. Esse aquecimento ocorre devido à resistência a passagem de corrente elétrica pelo material, ou seja, a corrente elétrica que percorre um material resistivo é transformada em calor, que surge devido ao trabalho realizado para transportar as cargas através do material (MORAIS, 2016).

A equação do efeito Joule, que quantifica a energia dissipada sob a forma de calor em um condutor elétrico, é expressa pela equação 1.

$$Q = I^2 * R * t \quad (1)$$

Onde:

Q = quantidade de calor gerada (J);

I = corrente elétrica (A);

R = resistência elétrica do material (Ω);

t = tempo de duração da corrente fluindo (s).

3.1.3 Transferência de calor

De acordo com Çengel (2006), a transferência de calor é definida como o processo pelo qual a energia térmica é trocada entre dois ou mais corpos ou substância devido a uma diferença de temperatura. Em outros termos, o calor flui naturalmente de uma região de maior temperatura para outra de menor temperatura. Segundo o autor, existem três principais mecanismos fundamentais pelos quais a transferência de calor pode ocorrer, sendo eles:

- **Condução térmica:** Transferência de calor dentro de um corpo ou entre corpos em contato direto, sem movimento macroscópico das moléculas. Acontece predominantemente em sólidos e é descrita pela Lei de Fourier. Ou seja, ocorre devido as atividades atômicas, os átomos dos materiais geram colisões entre esses, ocasionando a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas;
- **Convecção térmica:** Transferência de calor que ocorre em fluidos (líquidos ou gases) devido ao movimento macroscópico das moléculas, como correntes de ar ou circulação de água. Este mecanismo depende tanto da condução quanto do movimento do fluido e é descrito pela equação de Newton do resfriamento;
- **Radiação Térmica:** Transferência de calor que se dá através da emissão de ondas eletromagnéticas (radiação), sem a necessidade de um meio material. Todos os corpos emitem radiação térmica, e a quantidade emitida aumenta com a temperatura do corpo, sendo regida pela Lei de Stefan-Boltzmann.

A equação geral para a transferência de calor também está frequentemente relacionada à primeira lei da termodinâmica, que envolve a conservação de energia em sistemas fechados ou abertos. Seu estudo é de extrema importância para o engenheiro, visto que está presente em diversas áreas, como por exemplo, carga térmica de ambientes, seleção de isolamentos térmicos, controle de temperatura em equipamentos industriais e etc.

3.2 AFERIÇÃO DE TEMPERATURA

A medição de temperatura é de grande importância, pois permite o controle e o monitoramento de processos em atividades industriais que dependem de variações térmicas. Esses processos se destacam em eficiência da operação, segurança, controle de qualidade e desempenho de materiais (expansão térmica e degradação).

Existem instrumentos para essa atividade, a exemplo do termômetro, aparelho que utiliza uma grandeza física independente da temperatura para transformar o grau de intensidade do calor em uma quantidade mensurável. Resumidamente, é composto por um sensor e um mostrador contendo uma escala.

Os sensores desempenham um papel fundamental na conexão entre o ambiente físico e os sistemas de automação e controle, tornando possível que máquinas e dispositivos interpretem as condições ao seu redor. Sua principal função é fornecer dados precisos e confiáveis que auxiliam no monitoramento, na análise e no controle de processos (THOMAZINI, 2008). De acordo com o autor, os sensores podem ser classificados em diferentes categorias:

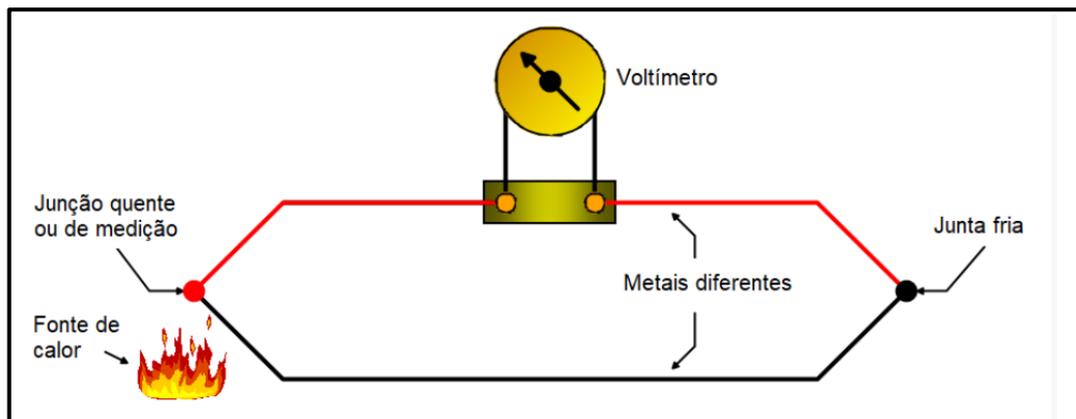
- Digitais: Só podem assumir dois valores de tensão na sua saída, um valor alto e um baixo ou na forma binária;
- Analógicos: Gera um sinal contínuo, proporcional à grandeza medida, e podem assumir qualquer valor no seu sinal de saída, contanto que esses valores estejam na sua faixa de operação.

3.2.1 Termopar

Termopares ou par termoelétricos são sensores de temperatura de simples concepção, com ampla faixa de medição, cuja construção se baseia na junção de dois condutores metálicos compostos de metais puros ou ligas metálicas. O princípio básico de funcionamento de um termopar está no fato de que dois fios metálicos, diferentes, quando unidos em suas extremidades e estas submetidas a diferentes temperaturas geram uma diferença de potencial.

A diz que a união de dois segmentos de metais em ambas as extremidades caracteriza o termopar. Fermo (2019) diz que a extremidade na qual a união é feita, atribui-se o nome de junta quente e essa extremidade é colocada em contato com o corpo cuja temperatura deseja-se medir, e a outra extremidade é denominada junta fria. Quando as extremidades são submetidas a uma diferença de temperatura, as diferentes composições ou materiais empregados na solda produzem uma movimentação ordenada de elétrons, obedecendo às leis da termoelétrica descobertas por T. J. Seebeck em 1821 segundo os princípios de funcionamento do termopar. O princípio de funcionamento de forma genérica pode ser demonstrado na figura 1.

Figura 1 - circuito termopar.



Fonte: AlfaComp (2020).

As combinações de materiais dos termopares variam de acordo com sua temperatura e são feitas de forma que esses garantam tensões de saída previsíveis e suportem a grandes variações de temperaturas. A tabela 1 apresenta os principais termopares, sua faixa de temperatura de trabalho e suas composições.

Tabela 1 - Tipos de termopar, temperatura de trabalho e suas ligas

NOME	CONSTITUIÇÃO	GAMA DE TEMPERATURA
B	Platina / 30% Ródio-platina	0 - 1800 °C
C	Tung-5% Rénio/ Tung-26% Rénio	0 - 2320 °C
E	Crome / Constantan	-270 - 1800 °C
G	Tugnésio / Tung - 26% Rénio	0 - 2300 °C
J	Ferro / constantan	-210 - 750 °C
K	Cromel / Alumel	-270 - 1370 °C
N	Nicrosil / Nisil	-270 - 1300 °C
R	Plátina / 13% Ródio-Plátina	-50 - 1750 °C
S	Plátina / 10% Ródio-Plátina	-50 - 1750 °C
T	Cobre / Constantan	-270 - 400 °C

Fonte: Balbinot; Brusamarello (2006)

A seleção do diâmetro dos termos elementos é feita de acordo com o limite superior da faixa da temperatura desejada. A tabela 2 mostra esses valores para termopares convencionais, com poços ou tubos de proteção com extremidade fechada.

Tabela 2 - Valores de temperatura máxima e diâmetro dos termopares

\emptyset Fio/ Tipo	8 AWG (\emptyset 3,26 mm)	14 AWG (\emptyset 1,63 mm)	20 AWG (\emptyset 0,81 mm)	24 AWG (\emptyset 0,51 mm)	28 AWG (\emptyset 0,33 mm)
J	760 °C	590 °C	480 °C	370 °C	370 °C
K	1260 °C	1090 °C	980 °C	870 °C	870 °C
E	870 °C	650 °C	540 °C	430 °C	430 °C
T	370 °C	370 °C	260 °C	200 °C	200 °C
R/S	200 °C	200 °C	200 °C	200 °C	200 °C
N	1260 °C	1090 °C	980 °C	980 °C	980 °C
Cx	472 °C	472 °C	472 °C	472 °C	472 °C

Fonte: ANSI MC 96.1 (1982)

3.2.2 Termopar tipo K

O termopar tipo K tem uma ampla faixa de temperatura de trabalho, que varia entre -270°C e 1372°C , estabilidade e durabilidade, além de possuir um ótimo custo benefício. Ele é constituído pelo elemento positivo Chrome (Níquel-Cromo) e o elemento negativo Alumel (Níquel-Alumínio) e apresenta elevada resistência à corrosão, sendo, por isso, altamente recomendado para utilização em ambientes oxidantes ou inertes. Em faixas de temperatura mais elevadas, esse material oferece uma rigidez mecânica superior aos termopares dos tipos S e R, além de apresentar uma vida útil mais longa em comparação ao tipo J. Entretanto, sua aplicação não é recomendada em atmosferas redutoras ou com presença de enxofre (MORAIS, 2016).

3.3 ISOLAMENTO TÉRMICO

O isolamento térmico é fundamental para minimizar perdas de calor em sistemas de aquecimento ou reduzir o ganho de calor em sistemas de refrigeração. Segundo Çengel (2006), o isolamento térmico refere-se aos materiais ou métodos utilizados para reduzir a taxa de transferência de calor entre dois sistemas ou entre um sistema e seu ambiente. O isolamento térmico, segundo o autor, funciona através de três mecanismos principais de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Materiais isolantes são projetados para reduzir a condução (limitando o movimento de calor através do material), diminuir a convecção (impedindo a movimentação do ar ou líquido) e, em alguns casos, reduzir a radiação térmica (por meio de superfícies reflexivas).

Em termos práticos, o isolamento é essencial para melhorar a eficiência energética de edifícios, tubulações, tanques de armazenamento e outros equipamentos industriais. Dentre as principais características que o tornam eficaz em reduzir a transferência de calor estão: baixa condutividade térmica, baixa densidade, resistência à umidade, estabilidade térmica, durabilidade, baixa inflamabilidade e facilidade de instalação.

3.3.1 Tipos de Isolamentos Térmicos

Segundo Matthew (2010), os tipos de isolamentos térmicos podem ser classificados de acordo com o material utilizado e são divididos em três categorias principais:

- **Materiais inorgânicos:** são de origem mineral ou metálica (como lã de vidro ou rochosa e fibra cerâmica), geralmente possuem uma alta resistência ao fogo e à temperatura, sendo amplamente usados em ambientes residenciais quanto industriais;
- **Materiais Orgânicos:** Geralmente derivados de plantas ou animais, e costumam ser ecologicamente sustentáveis. São biodegradáveis e têm baixo impacto ambiental. Alguns exemplos variam como celulose, lã de ovelha e fibra de coco;
- **Materiais Sintéticos:** Produzidos quimicamente, muitas vezes extraído a partir do petróleo, e são amplamente utilizados devido à sua versatilidade, leveza e bom desempenho térmico. Esses materiais são mais popularmente conhecidos como poliuretano (PU), poliestireno expandido (EPS) ou conhecido popularmente como isopor.

3.3.2 Manta de fibra cerâmica

Esse tipo de isolamento térmico é utilizado em aplicações que apresentam altas temperaturas, sendo composto por fibras inorgânicas que apresentam diâmetros microscópicos. De acordo com Vasconcelos (2017), as propriedades mecânicas de um isolamento variam com a composição básica, densidade, diâmetro da fibra, orientação, tipo e quantidade do material fibroso, que aumenta o poder de coesão, e com a temperatura à qual é realizada a avaliação

Uma grande vantagem da fibra cerâmica é que possuem alta resistência a corrosão; leveza; alto grau de pureza; excelente resistência ao manuseio e ao choque térmico. As mantas são fabricadas a partir de sílica e alumina, e são amplamente utilizadas em tubulações, caldeiras, reatores e isolamento térmico complementar para fornos de tratamentos térmicos.

3.3.3 Tijolos Refratários

Os tijolos refratários podem ser classificados conforme sua resistência à temperatura e propriedades mecânicas. A sua composição varia de acordo com o tipo de aplicação, mas, de maneira geral, incluem componentes como alumina, sílica ou magnésita que são os elementos principais. Outros com constituintes são inseridos como forma de aditivos, como argila ou cimento refratário, além de suplementos químicos ou minerais. Suas vantagens variam entre alta resiliência e flexibilidade, e são importantes durante o processo de instalação e montagem do revestimento. Essas características permitem a realização de intervenções de manutenção em tempos reduzidos, aumentando a disponibilidade do equipamento para a produção (SILVA, D. G M., & VASCONCELOS, W. L. 2017).

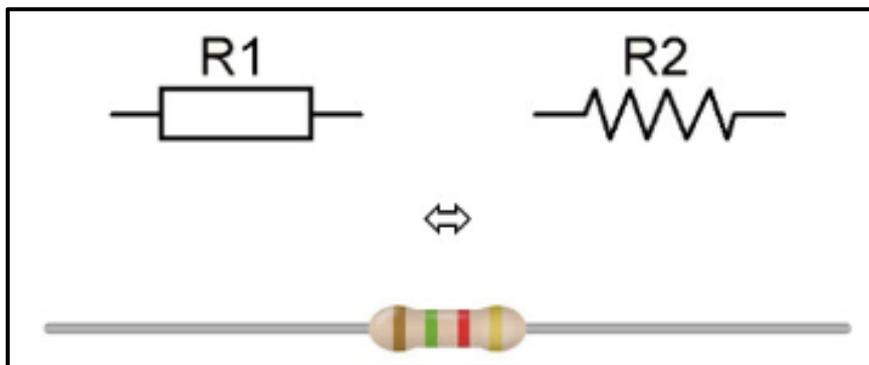
3.4 RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Boylestad (2006) define a resistência elétrica como a oposição que um material oferece à passagem da corrente elétrica. Assim sendo, essa resistência depende das propriedades do material, como a resistividade, que define o quanto o material resiste ao fluxo de corrente elétrica, além de fatores como o comprimento e a área transversal do condutor.

A resistência de um material depende também de sua natureza, dimensões e temperatura, no qual durante a passagem da corrente elétrica, parte da energia dos elétrons é repassada aos átomos devido ao choque entre eles, que vibram com mais intensidade, ocasionando o aumento da temperatura do material (MARKUS, 2019).

O elemento que é adicionado à resistência ao circuito é chamado de resistor, representado na figura 2.

Figura 2 - símbolos representativos para resistor



Fonte: Blog ptribotics (2024)

A relação que existe entre tensão, corrente e resistência elétrica é denominada Primeira lei de Ohm, e sua expressão pode ser representada matematicamente pela equação 2.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Onde:

V – Tensão elétrica (V);

I – Corrente elétrica (A);

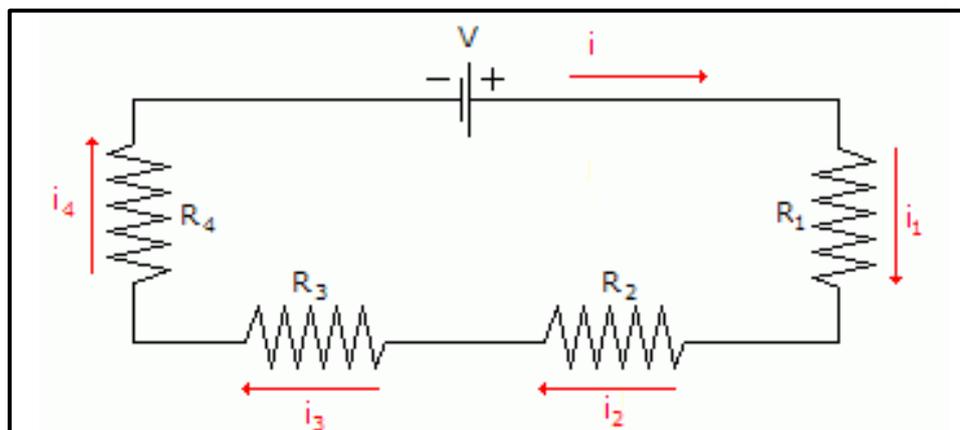
R – Resistencia elétrica (Ω).

3.4.1 Ligação de resistores em série

Uma ligação em série de resistores ocorre quando dois ou mais resistores estão conectados de maneira que a corrente que passa por um resistor também flui pelos outros, sem ramificações ou divisões. Na configuração em série, a corrente elétrica é a mesma em todos os resistores, pois há apenas um caminho para a corrente percorrer (BOYLESTAD, 2006).

A figura 3 detalha a representação de um circuito onde existem três resistores ligados em série, nela os nós são representados por letras.

Figura 3 - Circuito de resistores ligados em série



Fonte: Adaptado de SADIKU; ALEXANDER (2013).

O circuito da figura 3 pode ser representado pelas equações 3 e 4:

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_n \quad (3)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (4)$$

Onde:

- I_T = Corrente elétrica total do circuito (A);
- I_n = Corrente elétrica dos resistores (A);
- V_T = Tensão total do circuito (V);
- V_n = Tensão nos resistores (V).

A resistência equivalente (R_{eq}) do circuito apresentado na figura 3 pode ser definida como a resistência única que pode substituir um conjunto de resistores conectados em série ou em paralelo sem alterar o comportamento do sistema em termos de corrente e tensão, isto é, a resistência equivalente representa uma simplificação do circuito.

Desse modo, a resistência equivalente do circuito da figura 3 é obtida através da soma das resistências dos “n” resistores, como é mostrado na equação 4.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots + R_n \quad (4)$$

Onde:

- R_{eq} = resistência equivalente (Ω).

3.4.2 Variação da resistência elétrica em relação a temperatura

Nos metais, a resistência elétrica, na maioria dos casos, aumenta com a elevação da temperatura, pois, em temperaturas mais altas, os átomos vibram mais intensivamente, aumentando a probabilidade de colisões com os elétrons que estão se movendo através do material. Essas colisões dificultam os movimentos dos elétrons, aumentando a resistência (GRIFFITHS, 2013). A relação entre a resistência e temperatura em metais pode ser expressa pela fórmula demonstrada na equação 5.

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (5)$$

Onde:

- R_t = resistência na temperatura de medição (Ω);
- R_0 = resistência na temperatura de referência t_0 (Ω);
- α = coeficiente de temperatura de resistência do material.

Para a obtenção do valor da resistência na temperatura ambiente, em caso de um material aquecido, também pode-se utilizar a equação 6.

$$R_{22^\circ C} = \frac{R_t}{C_t} \quad (6)$$

Onde:

- $R_{22^\circ C}$ = resistência na temperatura ambiente (Ω);
- C_t = Fator de conversão adimensional.

3.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica (ρ), segundo Halliday (2008), é uma propriedade intrínseca de um material que quantifica o quanto ele resiste ao fluxo de corrente elétrica. A resistividade depende da natureza do material e da temperatura, além de demonstrar qual é densidade de corrente (J) quando é aplicado um campo elétrico (E) sobre o material. Diferentemente da tensão, corrente e resistência, que são grandezas macroscópicas lidas através de um instrumento, a resistividade e o campo elétrico já são grandezas microscópicas, relacionada à propriedade elétrica do material.

Portanto, a resistividade é uma medida de como os portadores de carga elétrica são impedidos de se mover pelo material. Materiais com alta resistividade são maus condutores (como isolantes), enquanto materiais com baixa resistividade são bons condutores (como metais). A unidade de resistividade no Sistema Internacional (SI) é o ohm-metro ($\Omega \cdot m$). Sua fórmula matemática pode ser representada pela equação 7:

$$\rho = R * \frac{A}{L} \quad (7)$$

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (7)$$

Onde:

- ρ = resistividade do material ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);
- R = Resistencia elétrica do condutor (Ω);
- A = área da seção transversal (mm^2);
- L = comprimento do fio (m).

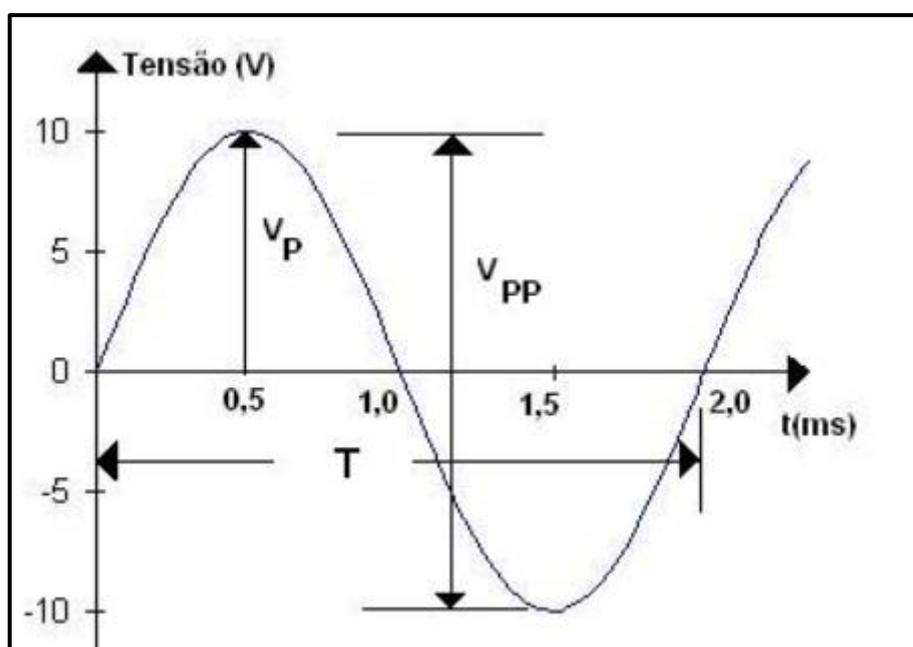
3.6 - CORRENTE ALTERNADA

De acordo com Markus (1971), a corrente elétrica alternada (CA) é uma corrente que muda de direção periodicamente, diferente da corrente contínua (CC), que flui em uma única direção. Em um circuito de CA, a tensão e a corrente podem variar de forma senoidal ao longo do tempo, como por exemplo, as ondas senoidais, quadradas, triangulares, dentre outras, o que permite a transmissão eficiente de energia elétrica em

grandes distâncias, como a que recebemos na rede elétrica em nosso país, que utiliza nas linhas de transmissão uma onda elétrica alternada de formato senoidal.

Assim sendo, a representação de uma onda senoidal de uma corrente alternada varia com o tempo, onde a polaridade desses valores sofre inversão como uma onda senoidal. No gráfico 1, há a representação de um gráfico tensão x tempo. A onda alterna entre valores positivos e negativos, indicando as duas direções da corrente. O pico positivo e negativo representa a máxima e mínima amplitude respectivamente, enquanto a média em torno de zero indica a ausência de polaridade em um ciclo completo.

Gráfico 1 - Amplitudes de sinal senoidal da tensão elétrica



Fonte: Portal dos Eletrodomésticos (2012).

Onde:

- V_p = Valor de pico (valor entre o ponto inicial e ponto máximo ou mínimo);
- V_{pp} = Valor de pico a pico (amplitude total);
- T = Período em segundos.

A função que descreve a forma de uma onda de tensão alternada (CA) no gráfico de tensão versus o tempo (gráfico 1) é uma função senoidal, que pode ser expressa na equação 8.

$$V(t) = V_{m\acute{a}x} * \text{sen}(\omega * t) \quad (8)$$

Onde:

- $V(t)$ = tensão em função do tempo(V);
- $V_{máx}$ = amplitude máxima da tensão(V);
- ω = frequência angular relacionada à frequência da corrente alternada).

Já a função da corrente alternada (CA) é bem semelhante à função da tensão demonstrada anteriormente, sendo descrita na equação 9:

$$I(t) = I_{máx} * \text{sen}(\omega t + \phi)] \quad (9)$$

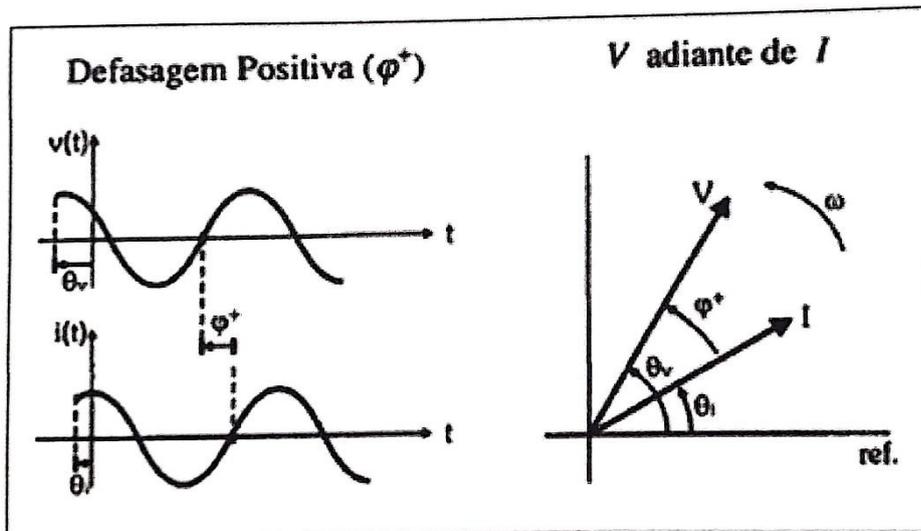
Onde:

- $I(t)$ = corrente em função do tempo (A);
- $I_{máx}$ = amplitude máxima da corrente (A);
- ϕ = ângulo de fase (indica o deslocamento da onda de corrente em relação à onda de tensão (Graus).

O conhecimento sobre o ângulo de fase é crucial em circuitos de corrente alternada (CA) porque ele influencia a relação entre a corrente e a tensão, impactando o fator de potência do circuito. O fator de potência indica o quão eficientemente a energia é transmitida e utilizada em sistemas elétricos.

Se a corrente e a tensão estão fora de fase (ângulo de fase diferente de zero), parte da energia pode ser desperdiçada em forma de calor. Diante disso, compreender o ângulo de fase ajuda a projetar sistemas elétricos mais eficientes e a reduzir perdas energéticas. A ilustração que melhor representa o ângulo formado entre essas duas grandezas é demonstrada no gráfico 2.

Gráfico 2 - Diagrama fasorial para tensão e corrente no circuito.



Fonte: Markus, (2009).

3.6.1 Lei de ohm para circuitos de corrente alternada

Svoboda (2007) explica que, na corrente alternada, a resistência à passagem da corrente elétrica deixa de ser chamada de resistência elétrica e passa a ser chamada de impedância elétrica (\check{Z}), pois, além da resistência, também se considera os efeitos de capacitores e indutores, que também introduzem reatância. A impedância \check{Z} , em ohm (Ω), é um número complexo que caracteriza um dispositivo ou circuito e reflete tanto a posição total que ela impõe à passagem de corrente alternada, quanto à defasagem total entre a tensão e a corrente. A equação 10 representa como a impedância se relaciona com os valores de tensão, corrente e os ângulos de fase.

$$\check{Z} = \frac{V \angle \phi_V}{I \angle \phi_I} = \frac{V}{I} \angle (\phi_V - \phi_I) = Z \angle \theta \quad (10)$$

Onde:

\check{Z} = impedância (Ω);

Z = módulo de impedância (Ω);

ϕ = Ângulo de fase (graus);

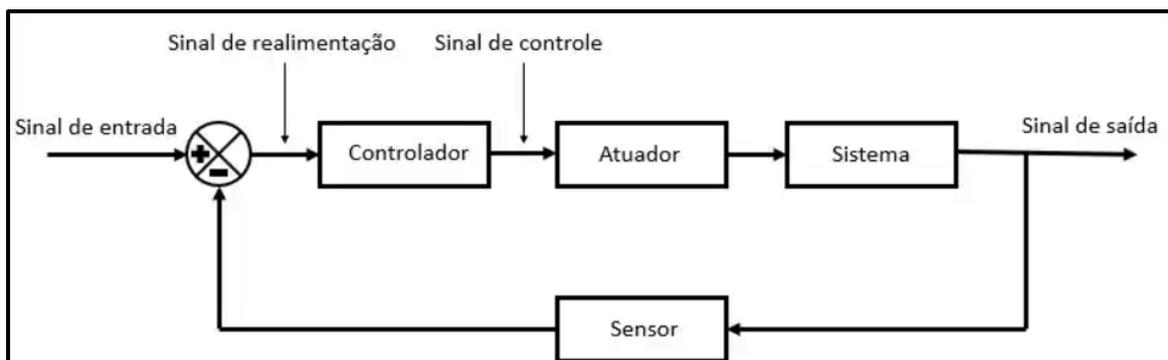
θ = Fase de impedância (graus).

3.7 – SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle são necessários para monitorar, regular e ajustar o comportamento de outros sistemas ou processos para atingir objetivos específicos. Eles desempenham um papel crucial em muitas das engenharias, na automação e no dia a dia. “A variável controlada é a grandeza ou a condição que é medida e controlada. O sinal de controle ou variável manipulada é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador de modo que afete o valor da variável controlada.” (Ogata, 2011, p. 73).

Os sistemas de controle se dividem em dois tipos: malha aberta e fechada. Sendo o primeiro utilizado em sistemas sem monitoração dos dados da saída, só ocorre o ajuste da entrada. Já no sistema de malha fechada, os dados da saída são constantemente monitorados, garantindo que o foco pré-determinado ao equipamento seja atingido mesmo na presença de distúrbios ou variações. O diagrama de bloco apresentado na figura 4 demonstra o sistema de malha fechada.

Figura 44 - Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada



Fonte: Próprio autor (2025)

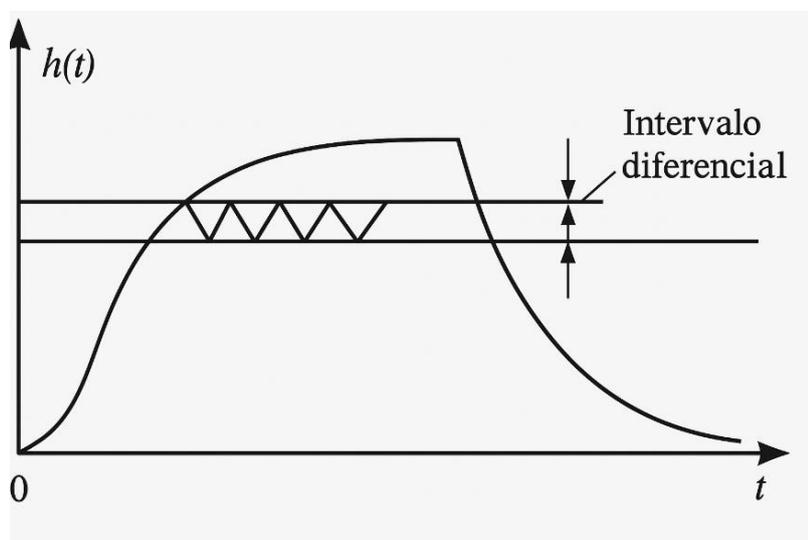
O controlador determinado para o sistema de malha fechada possui diversos tipos, como o *On/off*, proporcional, integral, derivativo e integral-derivativo.

3.7.1 Controlador on/off

Os controladores operam em uma lógica binária, estando o atuador completamente ligado (*on*) ou completamente desligado (*off*), dependendo da condição do sistema em relação ao ponto de ajuste. O seu funcionamento ocorre com a comparação dos dados saída do sistema (*feedback*) com os dados do valor desejado (conhecido como *setpoint*). Caso o valor de saída seja menor que o *setpoint*, o drive aciona o atuador, caso contrário, é desligado.

“O intervalo no qual o sinal de erro atuante deve varia antes de ocorrer a comutação, é denominado de intervalo diferencial” (Ogata, 2001, p. 131). Nesse sentido, o intervalo diferencial determina a amplitude da oscilação do sinal de saída, podendo reduzi-la.

Gráfico 3 - Curva para o intervalo diferencial do sinal de erro no controlador On/Off.



Fonte: Ogata, (2022), p. 20.

3.7.2 Controlador de temperatura

Como já foi mencionado neste trabalho, o controle de temperatura é essencial nos processos e aparelhos bastante conhecidos, como o termostato, servem para controlar a temperatura de forma automática, garantindo que a variável de processos atinja os valores determinados. A ação desse controle ocorrerá quando o controlador receber o sinal de um sensor que informa o valor da temperatura do processo e o compara ao valor da temperatura desejada. A partir dessa comparação, ele produzirá um sinal de saída mais próximo ao informado na sua entrada e o enviará para o elemento de aquecimento ou resfriamento do sistema.

3.8 – FORNOS INDUSTRIAIS ELÉTRICOS

Os fornos elétricos geram calor através do efeito Joule ao terem seu circuito resistivo percorrido por corrente elétrica. Consequentemente, seus elementos são projetados para suportar altas temperaturas e resistir à oxidação e corrosão. Seus

principais componentes se dividem através dos elementos resistivos, câmara de aquecimento, isolamento térmico, sistema de controle de temperatura, painel de controle e o tipo de atmosfera.

A câmara de aquecimento é a área termicamente isolada do forno, onde o material é colocado e sempre é revestida com o isolamento térmico para evitar a perda de calor, podendo ser composto por matérias refratárias para suportar altas temperaturas e reduzindo a transferência de calor para o ambiente externo.

Sua distribuição de calor gerado ocorre através da condução, devido aos materiais adjacentes, convecção caso tenha movimentação de ar, e radiação em razão das ondas de calor que irradiam diretamente para o material.

Além disso, esses equipamentos têm sido projetados de formas distintas ao longo dos anos, uma vez que apresentam elevada potência, o que, de certa forma, preocupa tanto as concessionárias de energia elétrica quanto as empresas que os utilizam, devido ao seu alto consumo energético. Essa preocupação ocorre “tanto pela capacidade do seu sistema supridor, como pela possibilidade de perturbação no seu próprio sistema” (MAMEDE FILHO, 2007)

Os fornos elétricos estão divididos em dois grupos distintos, cada um com suas características de processamento e operação, nos quais se distinguem em fornos a resistência elétrica e de indução eletromagnética.

3.8.1 Fornos a resistência elétrica

São denominados dessa forma, pois o mecanismo de aquecimento desse tipo de forno é formado por resistências elétricas. O calor na câmara é gerado através da passagem de corrente elétrica por esses elementos. Além de possuir boa resistividade elétrica, o material que compõe esses resistores suporta correntes elevadas e altas temperaturas.

Filho (2007), estabelece que os fornos que usam resistência elétrica, não provocam grandes oscilações nas tensão das redes de alimentação, diferentemente dos fornos a arco, assim auxiliam na melhoria do fator de potência do sistema que está sendo

suprido. Esses equipamentos podem haver dois tipos dependendo do tipo aquecimento, podendo ser direto ou indireto.

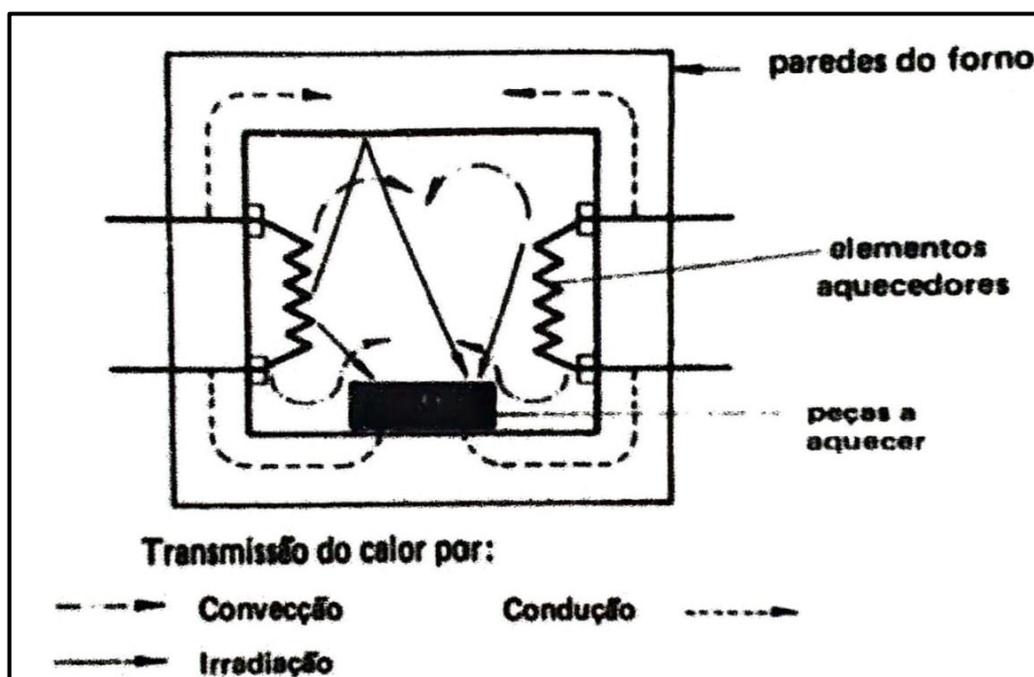
3.8.2 Fornos à resistência de aquecimento indireto

Os fornos a arco elétrico são os mais utilizados em grandes siderúrgicas, em suas aciarias, onde ocorre a fundição de metais em grande volume. Já os fornos resistivos são os mais encontrados nas universidades para realizar pesquisas e estudos afins, com intuito de realizar tratamentos térmicos e dependendo do material a ser tratado, pode ser realizado um processo de fundição. Conforme dito por Filho (2007) o dimensionamento dos resistores do forno, devem obedecer a algumas prescrições básicas. Algumas delas são:

- Ter uma elevada temperatura de fusão;
- Boa resistividade;
- Alto grau de dureza em temperaturas elevadas;
- Baixa condutividade térmica;
- Resistência à corrosão na temperatura de operação;

A figura 5 mostra o comportamento dos tipos de conduções térmicas do forno de aquecimento a resistência elétrica.

Figura 55 - Diagrama de um forno de resistência elétrica.



Fonte: Di Stasi, (1981), p. 306.

Os resistores elétricos são formados por fios ou fitas na forma de espiral. Em alguns casos enrolados em volta de tubos de material isolante e a depender da potência do forno utilizam rede de alimentação monofásica ou trifásica. O material que irá compor as resistências deve ser escolhido com alguns critérios necessários para a sua fabricação. Dentre os tópicos a serem analisados, estão:

- Escolha do material do fio resistor;
- Determinação da potência desejada para o forno;
- Disposição das resistências ao redor da câmara;
- Cálculo do diâmetro e comprimento do fio resistor;

Antes de projetar as resistências, deve-se primeiro determinar a temperatura máxima de operação que é requerida para o projeto, assim como a potência máxima do forno.

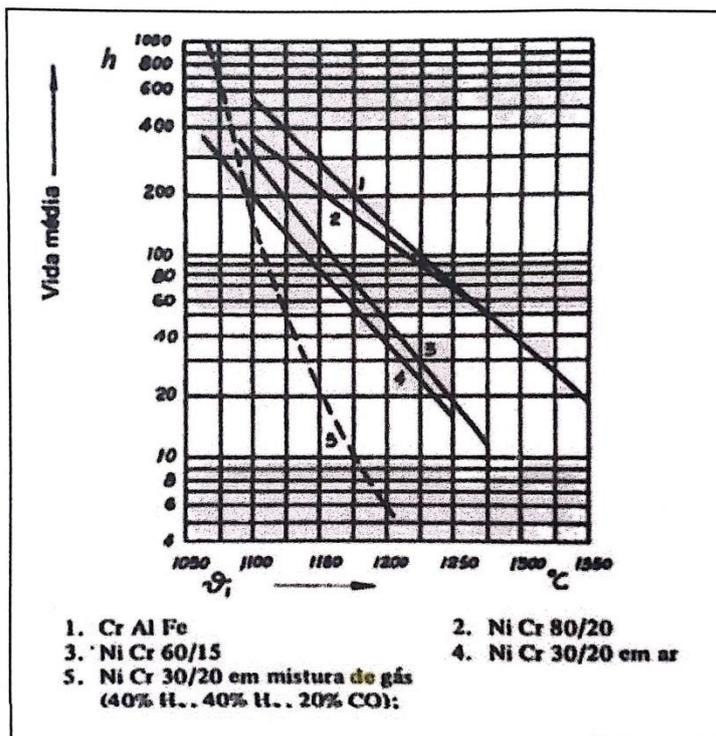
Os resistores devem ser montados de forma que promova uma distribuição equilibrada no interior da câmara, assegurando que a transferência de calor para a carga ocorra de forma eficiente. Os materiais que apresentam boa resistividade para esse tipo de aplicação podem variar entre nicromo (80%Ni – 20%Cr), cromax (30%Ni – 20%Cr – 50%Fe) e Kanthal (Fe – Cr – Al), (SOUZA, 2018).

Um ponto a ser analisado no momento da escolha do diâmetro do fio da resistência é a carga específica superficial. Segundo Filho (2007), por uma questão financeira, é necessário avaliar a carga específica superficial do fio, a escolha de seções menores resulta em uma quantidade menor de material, porém diminui a vida útil do elemento.

Di Stasi (1981), afirma que os valores para a carga superficial admissível utilizados no projeto de elementos de aquecimento, são os fornecidos pelos fabricantes das ligas. Ou seja, a área superficial do elemento de aquecimento, assim como sua temperatura de trabalho, exerce influência sobre a durabilidade das resistências. Para os materiais metálicos, o aumento da temperatura gera uma redução na sua resistência mecânica.

As flutuações bruscas de temperatura também diminuem a vida útil das resistências, é recomendado a utilização de um sistema de controle para limitar o valor da temperatura e possibilitar uma variação gradativa durante o aquecimento. A figura 6 mostra um gráfico com valores de vida útil em função da temperatura de trabalho para os elementos de aquecimento dos fornos a resistência.

Figura 6 - vida média de um resistor (h) em função da temperatura (°C)



Fonte: Di Stasi, (1981), p.230.

3.8.3 Resistores da Liga FeCrAl.

O Kanthal é uma liga metálica formada por ferro (Fe), Cromo (Cr), e alumínio (Al), conhecida por sua excelente resistência elétrica e estabilidade térmica, sendo amplamente utilizada em aplicações de aquecimento, especialmente em condições de alta temperatura e foi desenvolvido por Hans von Kantzow em 1916, engenheiro sueco e pioneiro em materiais avançados.

Desde a sua criação, essas ligas tornaram-se referência em elementos de aquecimento resistivo, sendo aplicado em indústrias metalúrgicas, cerâmicas e de eletrodomésticos. Suas propriedades incluem além da alta resistência elétrica, e resistência a oxidação, boa estabilidade térmica e boa durabilidade.

Além disso, existe variações de liga, algumas delas com otimizações para condições específicas, como é o caso do Kanthal A-1, que pode suportar temperaturas de até 1400°C, sendo de maior aplicação nos fornos industriais. A tabela 3, detalha a composição nominal da liga. Vale ressaltar que a composição real pode variar para atender à resistência elétrica padrão e às tolerâncias dimensionais.

Tabela 3 - Composição química da liga de FeCrAl

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Al%	Fe%
Comp. química nominal					5,8	Bal.
Mín	-			20,5	-	
Max	0,08	0,7	0,4	23,5	-	

Fonte: Adaptado da Kanthal®, (2025).

O quadro 1 detalha propriedades da liga FeCrAl.

Quadro 1 - Propriedades da liga de FeCrAl.

Densidade	7,1 g/cm ³
Ponto de fusão aproximado	1510 °C
Resistividade a 20 °C	1,46 Ω.mm ² /m
Condutividade térmica a 20 °C	13 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Máxima temperatura de operação	1400 °C

Fonte: Adaptado da Kanthal®, (2025).

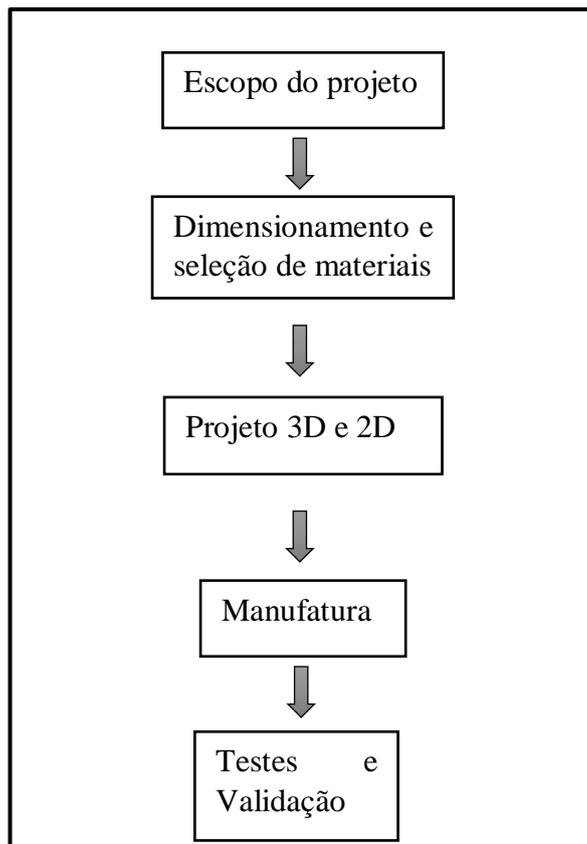
4. METODOLOGIA

Na metodologia será descrito de forma clara e detalhada, como a pesquisa foi realizada para atingir os objetivos propostos, além de servir como guia para que seja possível a compreensão dos procedimentos adotados, e caso algum próximo deseje replicar o estudo.

O estudo foi definido como sendo uma pesquisa aplicada, pois tem como intuito a busca de conhecimento para a realização de uma aplicação prática e solução de um problema específico. Analisando-se através de uma perspectiva objetiva, o trabalho foi classificado como uma pesquisa exploratória, pois seu propósito é proporcionar maior familiaridade com o problema, utilizando para isso, procedimentos de pesquisa bibliográfica. Quanto à abordagem do problema, foi classificado como quantitativo, já que se utiliza cálculos para obter dados e desenvolver um projeto.

Para se ter uma melhor noção dos procedimentos tomados, é possível verificar através da figura 7, um fluxograma com detalhes da fase do projeto.

Figura 7 - Fluxograma da restauração do forno



Fonte: Autor próprio (2025)

No escopo do projeto se definiu quais atividades serão realizadas e quais são os requisitos técnicos, no qual condizem com os objetivos citados inicialmente. A etapa do dimensionamento e seleção dos materiais envolve os cálculos necessários para fazer a restauração. Ou seja, serão necessários estudos e análises para se verificar quais peças deverão ser substituídas e o impacto de sua alteração, uma vez que não se tem peças de reposição específicas para o equipamento devido o mesmo ser um equipamento antigo.

O projeto 3D e 2D será feito com o intuito de se obter uma prévia e de se ter uma noção de como irá ficar o projeto final. Também tem como objetivo servir como indicativo para deixar o trabalho teórico mais próximo do real.

A manufatura será a parte mais prática do projeto, ou seja, corresponderá à construção e confecção das peças. Além disso, é nessa fase que ocorre a montagem dos isolamentos térmicos, resistores e fechamento do circuito.

Por fim, é na fase final que ocorre os teste e validação, onde serão verificados se os resultados condizem com os cálculos realizados e os objetivos planejados.

4.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica direcionada para o estudo de: fornos elétricos à resistência; do seu princípio de funcionamento; e de suas partes constituintes. Em seguida como mostra o fluxograma da figura 7, foi realizado a escolha do material de fabricação das resistências; elaboração de cálculos; detalhamento do projeto; dimensionamento dos materiais e desenho técnico.

Para a escolha do material das resistências e substituição dos componentes danificados foi necessário: análise de gráficos, consultas em tabelas e busca em catálogos de fabricantes. Através de um roteiro de cálculos, foram definidos valores para o dimensionamento do elemento de aquecimento. O detalhamento do projeto contou com esquemas elétricos e desenhos técnicos, possibilitando a análise da disposição dos componentes, verificação das dimensões, comportamento térmico temporal e visualização das formas construtivas.

A seguir, será mostrado nos seguintes tópicos, a descrição do forno, referência do fabricante, partes constituintes da estrutura, circuito elétrico, sistema de controle de temperatura e análise dos componentes do forno.

4.2 DESCRIÇÃO DO FORNO A SER RESTAURADO

O forno a ser restaurado é comumente conhecido como forno mufla, amplamente utilizado em laboratórios, indústrias e instituições de pesquisas. O equipamento pertence ao laboratório de Tratamentos Térmicos da UFPB, e encontrava-se desativado devido à problemas elétricos e estruturais que causaram sua inutilização ao longo do tempo, e infelizmente sua condição foi se deteriorando, com o surgimento de mais avarias.

O forno tem como modelo dito, “Forno mufla FNT-F-M”, possui um volume original de 1,8L (litros), com capacidade de atingir 1200 °C (graus Celsius). Suas informações técnicas elétricas têm como valores a tensão e corrente máxima de 220V (volts) e 10A (amperes) respectivamente, sua ligação é monofásica, e possui uma potência de 2200W (Watts).

A figura 8 mostra o modelo do forno mufla FNT-F-M estudado.

Figura 8- Forno elétrico desativado

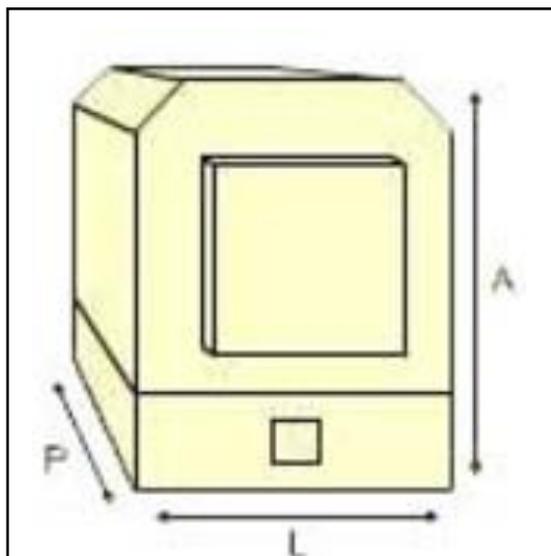


Fonte: Autor próprio (2025)

O forno é formado por uma carcaça externa composta por chapas metálicas, isolamento térmico constituído por fibra cerâmica, tijolos e placas refratárias a base de alumina, além do sistema elétrico que possui como elemento principal, as resistências elétricas no formato helicoidal.

A figura 9 mostra uma esquematização do forno com uma vista em perspectiva, e a tabela 4 contém as dimensões do mesmo, em largura, profundidade e altura.

Figura 9 - Representação das medidas do forno



Fonte: Autor próprio (2025)

Tabela 4 - Dimensões do forno

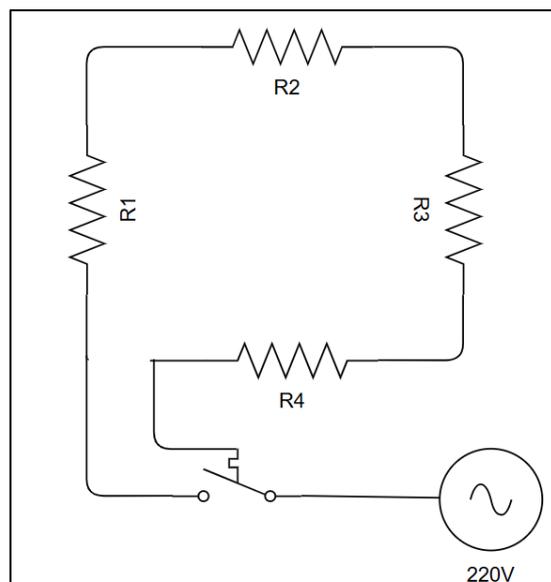
	Largura	Profundidade	Altura
Dimensões Internas	12 cm	15 cm	10 cm
Dimensões externas	42 cm	53 cm	51,5 cm

Fonte: Autor proprio

O circuito elétrico do forno encontra-se montado junto ao seu suporte metálico e a estrutura de placas e tijolos refratários. O circuito originalmente possui 32 resistores de fios espiralizado ligados em série, embutidos em placas refratarias. O circuito também conta com uma chave interruptora, fusíveis e um potenciômetro existente no controlador analógico, localizado na parte frontal do equipamento, que determinara a temperatura final do forno.

A figura 10, mostra uma esquematização do circuito resistivo e o tipo de ligação dos resistores, feito com o auxílio de uma ferramenta chamada PSIM software.

Figura 10 - Esquematização do circuito elétrico do forno



Fonte: Autor próprio (2025)

A chave de acionamento do circuito de resistências, responsável pelo aquecimento do forno ficara aberta em dois casos, se o forno estiver desligado ou se for acionado pelo termostato, caso a temperatura ultrapasse o estabelecido pelo operador.

4.2.1 Sistema de controle de temperatura

O sistema de controle do forno é do tipo malha fechada, seu objetivo é estabilizar a temperatura do forno em um valor pré-estabelecido pelo operador do equipamento, se adequando e reagindo a perturbações externas de forma automática. Esse controle pode ocorrer na seguinte ordem:

Na 1^o etapa, um termopar mede a temperatura dentro da câmara do forno e produz um sinal analógico proporcional a essa variável de processo. Na 2^o fase, o conversor analógico-digital do controlador de temperatura transforma o sinal analógico do termopar em um sinal digital, esse é comparado com um valor de referência pré-estabelecido pelo usuário, e o desvio entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de saída do controlador. Assim ocorrendo, no 3^o estágio, ele é amplificado para então poder ser enviado para um contator (dispositivo de manobra do sistema). E por fim, conforme o valor de saída, o contator libera ou restringe a passagem de corrente elétrica para o elemento de aquecimento, controlando assim a temperatura do forno.

O controlador de temperatura do forno, possui uma escala que vai de 0 a 1200°C, admitindo sinal de entrada de termopares do tipo k. Sua tensão de alimentação é de 110/220 Vca, com frequência de 50/60 Hz. Ele conta com um dispositivo mostrador que indica quando a temperatura programada foi atingida. O seu chaveamento ocorre através de relés com saída de 250 Vca e corrente até 10A.

Figura 11 - Controlador de temperatura



Fonte: Autor Próprio (2025)

É possível verificar pela figura 11 que o acionamento inicial do forno é feito através de um interruptor no qual fica do lado esquerdo do controlador. Após feito o ligamento, o botão na cor vermelha aciona um LED para indicar que o equipamento está em funcionamento.

Foi determinado que o sensor de temperatura danificado seria substituído por outro com as mesmas especificações, visto que a temperatura máxima de operação do forno está dentro de medição (-270 a 1200°C) do termopar tipo k, e que esse também satisfaz a entrada de sinal do controlador de temperatura, como apresentado na figura 12.

Figura 12- Termopar tipo K, instalado na centro da tampa frontal do forno



Fonte: Autor próprio (2025)

O termopar tipo K é recomendado para ambientes inertes ou oxidantes. Como a câmara do forno, e por isso decidiu-se optar por sua utilização, já que suporta trabalhar com um intervalo adequado a utilização do forno, e ser compatível com o controlador de temperatura instalado.

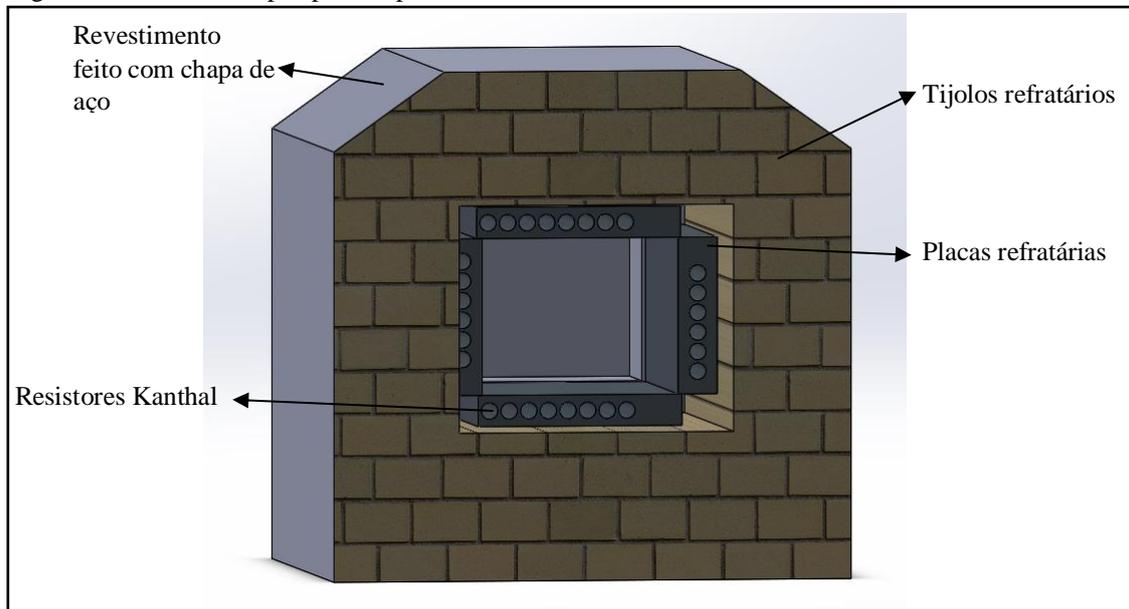
5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 ESCOLHA DO MATERIAL DAS RESISTENCIAS

O material das resistências deve suportar a temperatura máxima do forno (1200°C) e a sua potência máxima (2,2Kw), segundo as especificações do fabricante. Além dessas propriedades o resistor deve apresentar alta resistividade, boa dissipação térmica e baixa reatividade química à oxidação. À vista disso, o material escolhido para a fabricação das novas resistências foi o Kanthal A-1, visto que essa liga atende a todas as especificações do projeto.

A figura 13 mostra as dimensões da câmara interna do forno e sua esquematização, desenho no qual foi realizado no SolidWorks, tomando como base as dimensões originais do forno.

Figura 13 - Desenho da perspectiva posterior do forno e seus constituintes.



Fonte: Proprio Autor (2025)

5.2 PROBLEMAS ENCONTRADOS

Os danos que impossibilitavam o funcionamento do equipamento, diferenciavam-se em elétricos e estruturais, que comprometiam tanto a ligação elétrica, quanto o isolamento térmico, sendo eles:

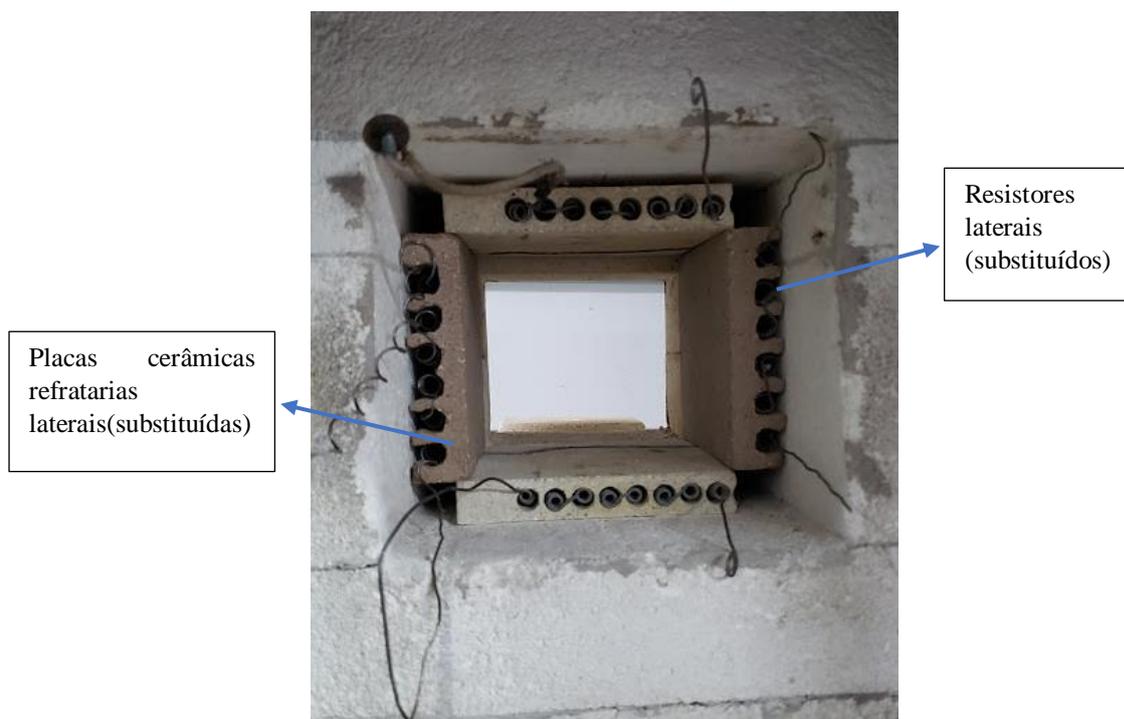
- Ligações elétricas rompidas;
- Componentes elétricos danificados;
- Resistências elétricas queimadas;
- Tijolos refratários danificados.

5.2.1 Análise do isolamento térmico

A figura 14 mostra o isolamento térmico que compõe as paredes do forno, ele é formado por tijolos refratários. A parede mais interna (cerâmica) do forno possui uma

maior resistência a temperatura, e no qual onde se encontra os resistores, pois são elas que vão ser submetidas a temperatura extrema. Vale ressaltar que as telas refratárias laterais também foram trocadas com material composto por alumina, componente que se assemelha as propriedades do tijolo refratário do forno. Além disso foram adquiridos conectores e cabos para a ligação do circuito elétrico, e isoladores cerâmicos para evitar que os fios das resistências não entrem em contato com a parte metálica da carcaça do forno.

Figura 14 – Isolamento do forno elétrico



Fonte: Autor próprio (2025)

5.2.2 Análise do elemento de aquecimento

O elemento de aquecimento do forno é formado por resistências idênticas, posicionadas em rasgos realizados em uma das superfícies dos tijolos refratários, como mostra na figura 15. Foram feitas medições constatando-se que cada mola possui 24 espiras, e um passo de 6,25 mm, e um comprimento de 150 mm.

Figura 15 – Aspectos das resistências elétricas montadas em placa cerâmica interna do forno.



Fonte: Autor próprio (2025)

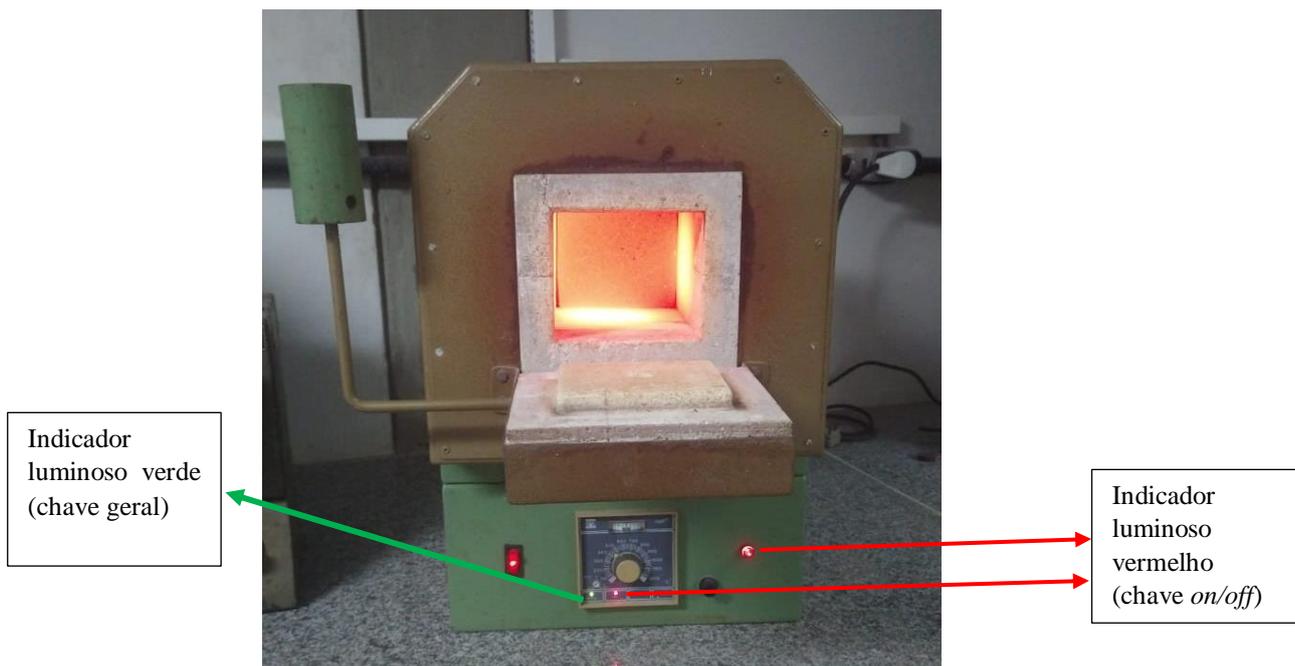
As placas cerâmicas laterais do forno se constatou que existiam resistências elétricas danificadas (no formato de espiras), e também que em cada uma dessas placas haviam 8 resistências, totalizando 32 nas quatro placas que revestem o interior do forno. Na configuração do novo projeto foi definido nas paredes laterais (posicionadas verticalmente) possuíriam 6 resistências elétricas enquanto as que estão posicionadas horizontalmente possuíriam 8, totalizando 28 resistências. Essa alteração de 32 para 28 resistências foi realizada para facilitar o processo de confecção das novas placas, onde seriam montadas as resistências.

Foi verificado o isolante térmico na figura 15, e observado alguns danos na placa refrataria, causados pelos resistores, como trincamentos, ocasionando uma fragilização e diminuição da vida útil do isolamento térmico e conseqüentemente sua eficiência, no qual a parede mais prejudicada foram as das laterais, e feita a substituição.

5.2.3 Ligamento do forno

Inicialmente foi feito o ligamento do equipamento e averiguado se todos indicadores luminosos estavam acionados. Além disso, a câmara interna emite luz devido a radiação, após um determinado tempo acionado, esse comportamento pode ser verificado visivelmente como mostra na figura 16. Um dos indicadores luminosos é da chave *on/off*, de cor vermelha, que indica se as resistências elétricas estão ou não desligadas, ou seja, se existe a passagem de corrente elétrica através das resistências. O led verde indicaria se a chave do circuito geral está ligada.

Figura 16 – Teste de acionamento do forno elétrico.



Fonte: Autor próprio (2025)

5.3 ROTEIRO DE CÁLCULOS

Segundo a referência do fabricante, o forno foi projetado para ser ligado em uma rede monofásica com tensão de 220V. Através dos cálculos foram definidos valores para a fabricação de novas resistências, tendo sido usada a equação da lei de Hooke para definir tais parâmetros. Vale ressaltar que a quantidade de resistências foi alterada de 32 para 28, o que pode comprometer a velocidade de aquecimento do forno e sua capacidade de atingir a temperatura máxima especificada pelo fabricante.

5.3.1 Cálculo do comprimento dos resistores

Para se determinar o comprimento do fio Kanthal a ser comprado tomou-se como base o comprimento de 1 mola, e multiplicado pelo valor total de 28 resistores. No qual o comprimento de uma mola helicoidal foi descrito pela equação 10:

$$L = N * \sqrt{(\pi D)^2 + p^2} \quad (10)$$

Onde:

- p = passo da mola (mm);
- N = número de espiras;
- D = diâmetro da mola (mm);
- L = comprimento do fio (mm).

Conforme já apresentado anteriormente, para a confecção das novas resistências usou-se como diâmetro o valor de 9,8mm, 24 espiras, e um comprimento de mola de 150 mm. O passo foi o valor de comprimento de mola (150mm) dividido pela quantidade de espiras (24), que resulta em um valor de 6,25 mm.

$$L = 24 * \sqrt{(11\pi)^2 + 6,25^2}$$

$$L = 678,46mm$$

Ou seja, cada mola helicoidal terá 0,688 metros, ou seja, as 28 molas helicoidais terão um comprimento de 19,26 metros. Vale ressaltar que cada mola tem uma adição de 10 mm para realizar uma ligação entre uma mola e outra. Por segurança foi feita uma compra de 30 metros de fio, para posteriormente realizada a fabricação das resistências.

5.3.2 Cálculo da resistência total do circuito

Para o cálculo da resistência foram utilizados os valores do comprimento total do fio, a área da seção transversal e a resistividade do material. Os valores da resistividade podem ser encontrados em fichas técnicas do fabricante podendo variar entre 1,35 a 1,50 $\mu\Omega \cdot m$ (microohms por metro), tendo sido adotado um valor intermediário desse intervalo, de 1,45 microohms por metro. Assim sendo o cálculo seguirá o formato da equação 7, descrita anteriormente.

$$R = \rho * \frac{L}{\pi r^2} \quad (7)$$

$$R = 0,00000145\Omega \cdot m * \frac{19,28m}{0,00000113m}$$

$$R = 24,72 \Omega$$

5.3.3 Cálculo da corrente e potência elétrica

Com base na primeira lei de ohm, já apresentada anteriormente na equação 2, a corrente foi definida pelos valores de tensão da rede e a resistência encontrada.

$$I = \frac{220v}{24,72 \Omega} = 8,9A$$

Com o valor da corrente e tensão, já foi possível calcular a potência elétrica do circuito, em watts.

$$P = V * I = 8,9A * 220v = 1957,92W$$

Os resultados da resistência, tensão, corrente e potência elétrica ficaram definidos no quadro 2.

Quadro 2 - Valores de resistência, tensão, corrente e potência elétrica.

Resistencia	24,72 Ω
Tensão	220V
Corrente	8,9A
Potência	1957,92W

Fonte: Autor próprio (2025)

5.4 FABRICAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS

Para a fabricação das resistências foi utilizado um torno mecânico horizontal. O processo consistiu em enrolar o fio de Kanthal sobre um varão de aço 1045, com um

diâmetro de meia polegada e 2 metros de comprimento, processo semelhante ao de fabricação de molas usando esse tipo de equipamento.

A escolha do diâmetro da haste de aço foi realizada com base no diâmetro interno da espiral e na variação dimensional provocada pela resiliência do material. Após a remoção da carga aplicada durante o processo de conformação, a recuperação elástica faz com que o fio tente retornar à sua forma original, resultando em um aumento no diâmetro interno da espiral.

A força que o torno emprega no giro, faz com que o fio se adapte no formato espiral. Para conduzir o fio durante o processo, foi utilizada uma guia, uma ferramenta improvisada pelo torneiro mecânico. O processo foi realizado à temperatura ambiente e é apresentado na figura 17.

Figura 17- Processo de fabricação das resistências.



Fonte: Autor próprio (2025)

Durante a fabricação foi realizado um aquecimento no material com um auxílio de um maçarico para aliviar a tensão e facilitar na hora de esticar a mola, no passo que foi desejado. Assim que confeccionada, foi feita a montagem das mesmas dentro dos tijolos refratários como mostra na figura 18.

Figura 18 – Resistências fabricadas montadas junto a placa refrataria.



Fonte: Autor próprio (2025)

5.5 MONTAGEM DO FORNO

Após a fabricação das resistências e aquisição dos novos componentes para substituir os que apresentavam defeitos, deu-se início a montagem do forno. Inicialmente, foram colocadas as placas refratarias e as resistências. Com a estrutura da câmara montada, partiu-se para o isolamento térmico. Sendo colocado primeiro os tijolos refratários e em seguida a manta de fibra cerâmica, por fim, o sistema foi isolado com a colocação da tampa do forno.

Por ser um equipamento que se conecta em uma rede monofásica, diferente das maiorias dos tipos de fornos que são trifásicos, a montagem de seu circuito elétrico é menos complexa quando comparado aos demais. Após esses procedimentos, a fase final foi a conexão do termopar junto ao circuito eletrônico, pois ele será o sensor que irá definir a faixa de temperatura no qual o equipamento irá trabalhar.

5.6 TESTES DE FUNCIONAMENTO

5.6.1 Verificação e comportamento da temperatura

Para se verificar o pleno funcionamento do forno, foram utilizados alguns instrumentos de medição, como por exemplo pirômetros ou termômetros digitais infravermelhos para verificar a temperatura interna e externa do forno, como mostra na figura 19.

Figura 19 – Verificação da temperatura interna no forno após finalização de processo de restauração.



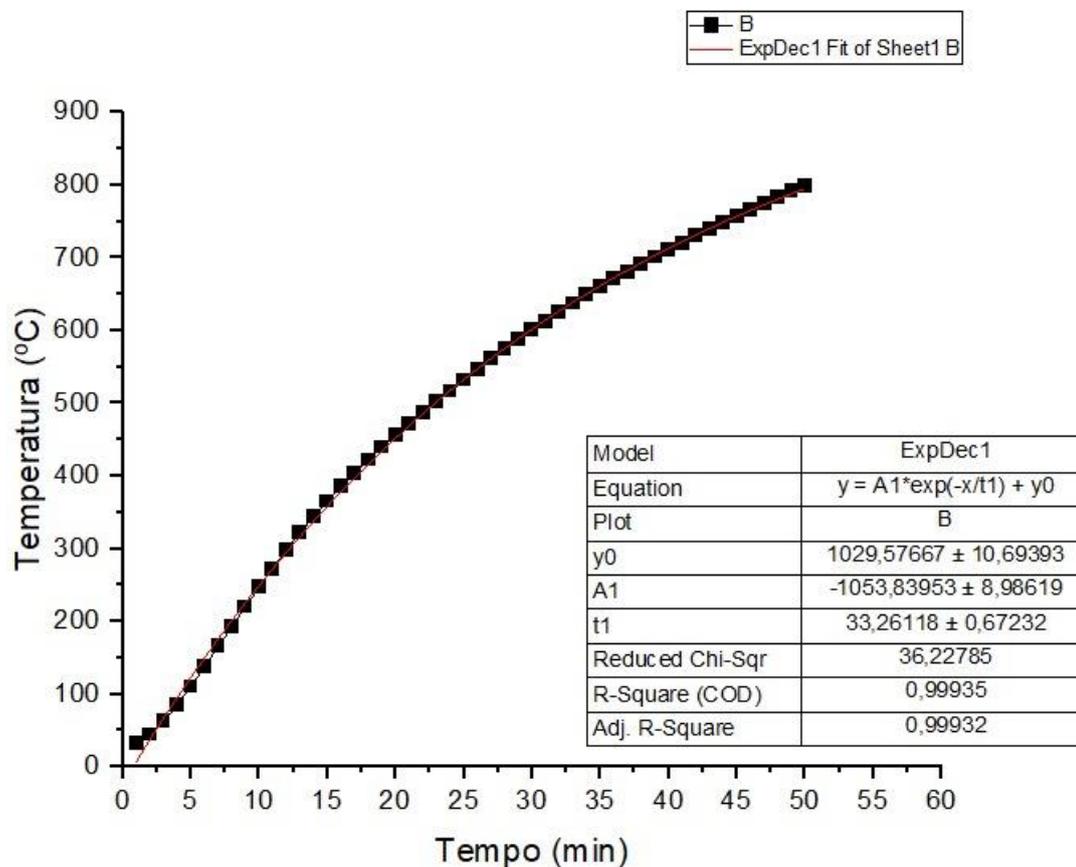
Fonte: Autor próprio (2025)

Também foi realizada uma análise do comportamento do forno, relacionando-se tempo e temperatura durante o seu aquecimento. Para isso foi utilizado um cronômetro e um termômetro digital que captou em tempo real a temperatura no interior do forno. Posteriormente utilizou-se um software para elaboração de um gráfico relacionado tempo e temperatura do forno, ou seja, sua curva de aquecimento, conforme apresentado no gráfico 5.

O gráfico mostra a função da curva, e a variação de temperatura em um espaço tempo de sessenta minutos. Da análise desse gráfico é possível se notar que o mesmo, partindo da temperatura ambiente, atingiu a temperatura de 800°C em pouco mais de 1

hora de funcionamento, o que é satisfatório para um forno laboratorial, que pode levar horas para atingir esse patamar.

Gráfico 5 - Comportamento do forno tempo versus temperatura.



Fonte: Autor próprio (2025)

5.6.2 Comparativo entre a corrente elétrica dimensionada e a corrente elétrica real.

Para conferir os cálculos realizados em relação a corrente e resistência elétrica, mostrados no quadro 2, foi utilizado um alicate amperímetro da marca ANENG, modelo ST194. O cabo de alimentação do forno foi seccionado e o alicate foi colocado no fio elétrico correspondente à fase do circuito, e assim analisar se os valores foram próximos ou condizentes com os cálculos realizados.

O valor aferido pelo equipamento pode ser verificado na figura 20. Valor esse próximo ao valor teórico calculado que foi de 8,9A e ao especificado no projeto original do fabricante, que foi de 10A. Vale ressaltar que o valor encontrado nos cálculos e na aferição do alicate amperímetro foi um pouco abaixo do previsto, porém, mesmo assim,

o tempo de aquecimento do forno foi bastante satisfatório quando comparados a outros fornos do mesmo laboratório, que para atingirem esse patamar de temperatura ultrapassam o valor obtido no forno restaurado.

Figura 20 - Verificação de corrente de fase do circuito elétrico



Fonte: Autor próprio (2025).

Com esse valor de corrente elétrica, o forno está alcançando uma potência de 2.046W, o que é bastante satisfatório pois esse valor se aproxima dos 2.200W especificados pelo fabricante.

5.6.3 Set point do forno e tolerância.

Também foi possível verificar o funcionamento do controlador de temperatura, que possui uma escala de 5 °C, no qual foi possível verificar o quanto a temperatura se aproxima e o quanto se distancia do set point (valor programado no controlador), em uma faixa de 30 °C positivos ou negativos a partir da temperatura determinada pelo operador.

Ou seja, quando o ponteiro vermelho entra no intervalo do limite de controle representado em verde na figura 21 o circuito elétrico das resistências é automaticamente aberto e o fluxo de corrente elétrica é interrompido. A temperatura ainda se eleva por uns 5 minutos por conta da inércia térmica, para assim poder decair. Quando a linha vermelha antecede a faixa verde, a chave é fechada e o forno volta a aquecer, e sinal luminoso é indicado pelo LED P1, como mostra na figura 21.

Figura 21 - controlador (chave fechada)



Fonte: Autor próprio (2025)

Na figura 21, é possível observar uma tolerância aceitável de ± 30 C, e após a restauração, esse valor oscilou entre ± 10 C, demonstrando a boa resposta do controlador à variações de temperatura, como mostra na figura 22.

Figura 22- controlador (chave P1 aberta)



Fonte: Autor próprio (2025)

5.7 CUSTOS DE MONTAGEM

O Forno mufla FNT-F-M atualmente pode variar entre os valores de R\$ 8.500,00 a R\$ 12.000,00. Os valores que foram gastos na restauração, foram em média R\$400,00 isso se aproxima de 3,5% do valor total desse equipamento, demonstrando que foi possível desenvolver soluções e alternativas diversas para a sua restauração com um orçamento reduzido.

6. CONCLUSÃO

A elaboração deste trabalho englobou as atividades de projeto, fabricação e manutenção de máquinas, favorecendo a prática dos conhecimentos adquiridos pelo estudante durante seu curso. Em sua concepção, foram utilizados conhecimentos nas áreas de transferência de calor, eletrotécnica, instrumentação, metrologia, processos de fabricação, entre outros.

Com a inspeção do forno e de suas partes constituintes, foi possível verificar que as resistências elétricas, assim como outros elementos, estavam danificadas e deveriam ser substituídos. O projeto dos elementos de aquecimento levou em consideração a potência necessária para o forno, a temperatura máxima de trabalho, as propriedades do material, o tipo de ligação das resistências elétricas, o valor da resistência necessária e o local onde elas seriam montadas.

Após a manufatura das resistências elétricas e substituição dos componentes danificados, foram realizados testes e aferições. Em seguida, foi realizada uma análise dos resultados e verificado se os valores encontrados convergiram com aqueles obtidos através dos cálculos. Os testes também indicaram o funcionamento do sistema de controle da temperatura. O trabalho atendeu a recuperação do equipamento, sendo comprovado seu pleno funcionamento através de testes e validações.

Por fim, o objetivo do trabalho foi alcançado, tendo o forno sido restaurado e os testes validados, comprovando que o forno está alcançando a temperatura informada no seu controlador, podendo assim ser utilizado nas atividades estudantis e consequentemente melhorando a estrutura do Laboratório de Tratamentos Térmicos da Universidade Federal da Paraíba.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a eficiência do isolamento térmico, a partir de simulações de transferência de calor com o uso do software Ansys.
- Realizar a inspeção periódica dos elementos de aquecimento, visando identificar com antecedência possíveis mudanças no seu estado físico que exijam a sua substituição, evitando assim estragos maiores ao forno.

REFERÊNCIAS

ALFA COMP. Tipos de Termopares. 2024. Disponível em: <<https://alfacomp.net/produto/termopar/>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Temperature measurement thermocouples. ANSI-MC 96.1.** 1982.

ARAÚJO, Tiago Souza Silva. *Recondicionamento e controle de uma estufa de secagem de sólidos*. 2018. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, 2018. Disponível em: https://www2.ufrb.edu.br/bcet/components/com_chronoforms5/chronoforms/uploads/tcc/20190610202159_2018.2_TCC_Tiago_Souza_Silva_Arajo_-_

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dispositivo de manobra e controle de baixa tensão. ABNT NBR IEC 60947-4.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Isolantes térmicos com mantas de fibra cerâmica. ABNT NBR 9688.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalações elétricas de baixa tensão. NBR 5410.** Rio de Janeiro, 2008.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. **Instrumentação e fundamentos de medidas.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2010.

DE PÁDUA, C. G.; MEDRANO, R. E. **Construção de forno para crescimento de monocristais de cobre.** Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina – PR, v. 10, n. 4, p. 225–228, 1989.

DI STASI, L. **Fornos elétricos.** Trad. Leonardo T. Leme. São Paulo: Hemus, 1981.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física. Vol. 3: eletromagnetismo.** 8. ed. Tradução e revisão técnica de Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2009.

HOMIS. **Pirômetros infravermelho.** Disponível em: <<https://www.homis.com.br/piometro-infravermelho/termometro-infravermelho-hte-467a>>. Acesso em: 20 abr. 2024.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Tradução de Eduardo M. Queiroz; Leonardo P. Pessoa. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2008.

KANTHAL. **The Kanthal history**. Disponível em: <<http://kanthal.com/en/about-us/kanthal-products-and-services/the-kanthal-history/>>. Acesso em: 12 fev. 2025.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 2007.

MARKUS, Otávio. **Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2009.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. Revisão técnica: Antônio Emílio Angueth de A.; Ivan José da Silva Lopes; tradução: Ariette Smille Marques, et al. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Tradução de Heloísa C. de Souza. Revisão técnica: Eduardo Assun Tannuri. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

PT ROBOTICS COMPONENTES ELETRÔNICOS. Resistores. 2024. Disponível em: <<https://www.ptrobotics.com>>. Acesso em: 16 nov. 2024.

PT ROBOTICS COMPONENTES ELETRÔNICOS. Resistores. 2024. Disponível em: <<https://www.ptrobotics.com>>. Acesso em: 16 nov. 2024.

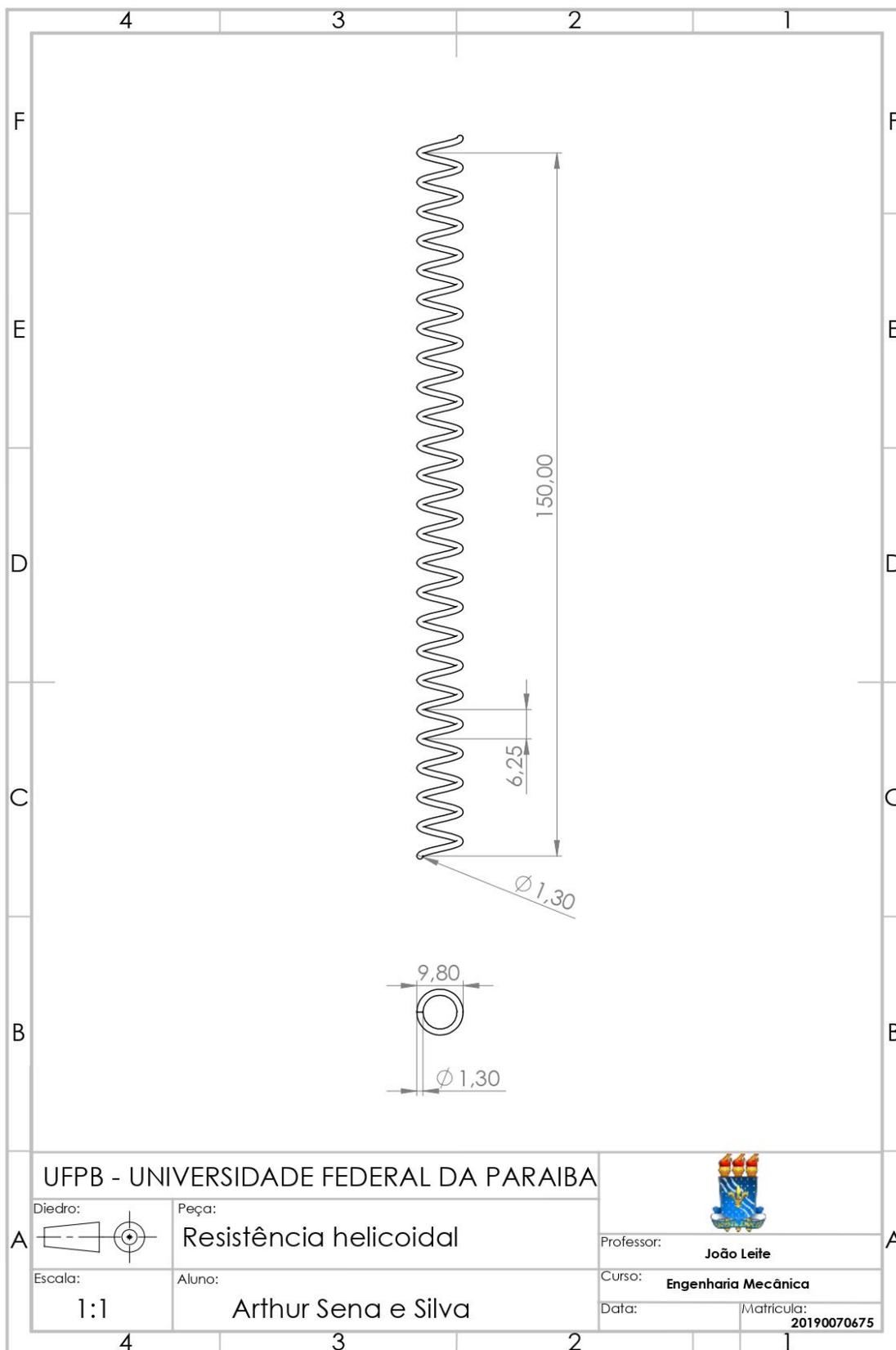
REFRATIL. **Produtos refratários e Isolantes Térmicos**. Disponível em: <<http://www.refratil.com.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2025.

SANDVIK. **The Kanthal Handbook, Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces**. Disponível em: <https://www.kanthal.com/globalassets/documents/resistance-heating-systems/heating-elements/metallic-heating-elements/kaoh1-b-eng_2011-t09.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2025.

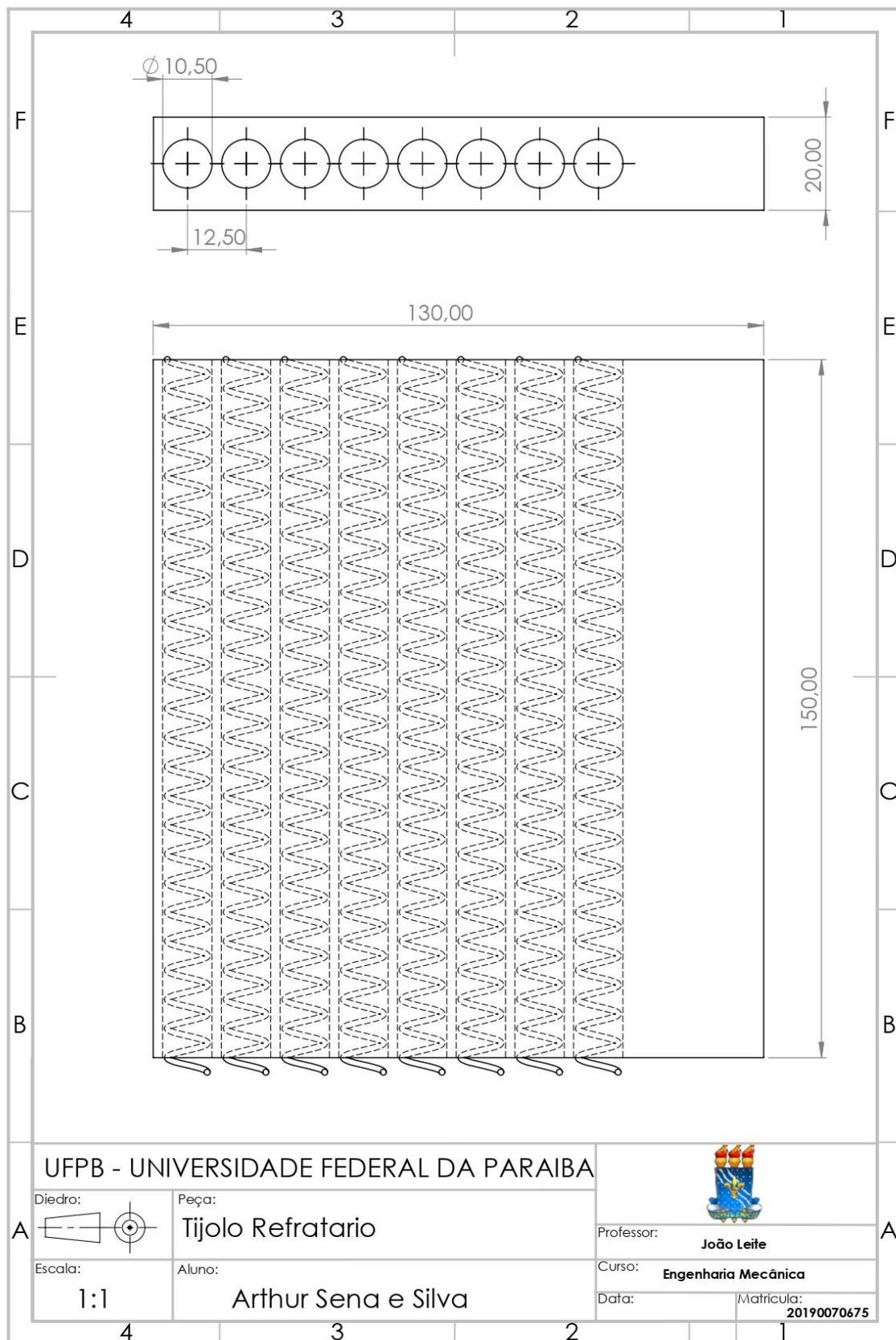
SUPERSTEL. **Fios e fitas de kanthal-Al**. Disponível em: <<http://www.superstel.com.br/liguei-cromo/#produtos/fios-e-fitas/cromo-aluminio-ferro/kanthal-al/>>. Acesso em: 08 jan. 2025.

SILVA, D. G. M.; VASCONCELOS, W. L. *Isolante térmico fibroso: motivos de sua utilização como revestimentos de trabalho em equipamentos industriais que operam em altas temperaturas – revisão da literatura – parte I*. Cerâmica, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 281–294, jul./set. 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/3WW9Tj7HxnJZnXCJ5JBT5zF/>>. Acesso em: 16 abr. 2025

APENDICE A – DESENHO DA RESISTÊNCIA HELICOIDAL



APENDICE B – DESENHO DO TIJOLO REFRACTORIO INTERNO



ANEXO A – Folha de catálogo para o pirômetro a laser HTE – 467A

Termômetro Infravermelho – 2.200°C com Emissividade Ajustável USB trava gatilho e memória – HTE-467^a

Característica:



- Tempo de amostragem mais rápido (150ms) com precisão de 1%
- Alta proporção de distância do alvo (50:1)
- Ampla faixa de temperatura
- Unidades selecionáveis de temperatura
- Trava do gatilho
- Registro de máxima, mínima, diferença (DIF) e média (AVG)
- Alarme para limite superior e inferior
- Emissividade digitalmente ajustável de 0,10 a 1,0
- Compatível com todos os termopares tipo K

Termômetro Infravermelho de até 2.200°C Emissividade Ajustável USB Memória Interna Alta Precisão com Trava de Gatilho Função Alarme - Display Retro iluminado - Laser Duplo - HTE-467A

O Termômetro Infravermelho HTE-447A oferece leituras mais rápidas com medições de -50°C a 2.200°C, fáceis e precisas para a maioria das medições de temperatura de superfície com **dois pontos de laser**. Os dois pontos de laser convergem em um único ponto quando a unidade está na distância otimizada com relação ao objeto medido.

Especificações:

Faixa de temperatura IR	-50°C ~ 2200°C (-58°F ~ 3992°F)
Tempo de resposta	Inferior a 150ms
Resolução	0,1°C (até 1000°C) / 1°C (acima de 1000°C)
Precisão básica (IR)	± 1% de leitura
Resolução óptica	50:01
Emissividade	Ajustável de 0,10 a 1,0
Faixa de temperatura (tipo K)	-50°C ~ 1370°C (-58°F ~ 2498°F)
Precisão básica (tipo K)	± 1,5% de leitura
Memória de leitura	99 posições
Dimensões	204 x 155 x 52mm (A x L x P)
Peso	320g

