



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ABAETETUBA
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
LICENCIATURA EM FÍSICA

WESLEY RICHELEY DA CUNHA RAIOL

**CONSTRUÇÃO DE UM FORNO TUBULAR ELÉTRICO ALTERNATIVO E DE
BAIXO CUSTO**

ABAETETUBA– PA

2021

WESLEY RICHELEY DA CUNHA RAIOL

**CONSTRUÇÃO DE UM FORNO TUBULAR ELÉTRICO ALTERNATIVO E DE
BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, como requisito final para obtenção do título de Licenciado Pleno em Física, sob orientação do Prof. Dr. Gabriel Adolfo Cabrera Pasca.

ABAETETUBA– PA

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- R149c Raiol, Wesley Richeley da Cunha Raiol.
Construção de um Formo Tubular Elétrico e de Baixo Custo /
Wesley Richeley da Cunha Raiol Raiol. — 2021.
64 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Gabriel Adolfo Cabrera Pasca Pasca
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, Curso de Física,
Abaetetuba, 2021.
1. Construção de um Formo Tubular Elétrico e de Baixo Custo.
2. Wesley Richeley da Cunha Raiol. 3. Universidade Federal do
Pará - Campus de Abaetetuba. I. Título.

CDD 536.50287

WESLEY RICHELEY DA CUNHA RAIOL

**CONSTRUÇÃO DE UM FORNO TUBULAR ELÉTRICO ALTERNATIVO E DE
BAIXO CUSTO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado, para a obtenção do título de Licenciado Pleno em Física pelo corpo docente da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba.

Abaetetuba, 13 de Outubro de 2021.

CONCEITO: EXCELENTE

Orientador: Dr. Gabriel A. Cabrera Pasca
Docente Efetivo da UFPA

Examinador: Prof. Dr. José Francisco da Silva Costa
Docente Efetivo da UFPA

Examinador: Prof. Ms. Fabrício Augusto dos Santos Rodrigues
Docente Efetivo da UFPA

*À Deus e a minha família,
especialmente minha mãe Selma Cunha,
meus irmãos Wendey Raiol e Sinelma Karla,
meu amigo Bruno Maués e minha esposa
Regina Lobato.*

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pelo dom da vida e proteção na longa e árdua caminhada nas veredas do conhecimento.

Ao professor **Dr. Gabriel A. Cabrera Pasca** pela confiança no desenvolvimento deste trabalho, pela dedicação em minha orientação, por todo conhecimento repassado e nobre amizade.

Aos professores do curso de física, por todo conhecimento e dedicação empenhados durante todo período de formação, nesta tão querida **Universidade Federal do Pará-Campus de Abaetetuba**, especialmente aos professores, **JOSÉ FRANCISCO, MESSIAS COSTA, MARCOS ALAN e CLEIDILANE SENA**.

A todos os meus familiares e parentes, em especial à minha mãe **Selma Nazaré C. Raiol**, por toda educação, honestidade, coragem e amor, indispensáveis à formação de meu caráter.

Aos meus irmãos **Wendey Raiol e Sinelma Karla**, por todos os momentos em família e principalmente pelo apoio nos momentos mais difíceis de minha caminhada.

Ao meu cunhado **Bruno Maués**, pela amizade e consideração e por estar sempre presente em minha família.

A minha esposa **Regina Maria L. dos Santos**, pelo companheirismo, dedicação e apoio nos momentos mais difíceis de minha vida.

Aos meus avós tios e primos que sempre estão presentes em minha vida, em especial à minha avó **Raimunda Cesário da Cunha**, por contribuir imensamente em minha formação.

Aos colegas da turma de física 2013, pelos bons e inesquecíveis momentos vividos nestes quatro anos de curso, em especial aos meus amigos **Wenderson Cardoso Aires, Dhonata Oliveira, Luciano Quaresma, Romário Xavier, Assis Sacramento** que em todos os momentos do curso realizamos boas parcerias.

Ao engenheiro mestre **Bruno Santos Corrêa** pela imensa e voluntária ajuda no desenvolvimento deste trabalho, pelos dias e dias empenhados no laboratório da universidade e por todo conhecimento compartilhado.

A **Sra. Maria Dulcelina** e ao **Sr. Manoel Lobato**, genitores de minha esposa, pelo grandioso apoio em todos os momentos dessa caminhada, e principalmente por nossa amizade.

Obrigado!

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso consiste na construção de um forno tubular elétrico de baixo custo financeiro. O forno tem como características principais seu custo/benefício e sua temperatura de trabalho, podendo atingir dentro de uma margem de segurança 1000°C, sendo operado em rampas de temperatura, de acordo com as necessidades dos trabalhos executados. Outro grande diferencial na construção deste forno, além do custo/benefício, seu projeto permite que o mesmo seja operado nas posições vertical e horizontal. Com similar atividade de funcionamento, mas com custo/benefício muito abaixo dos fornos industriais e tradicionalmente comercializados, o forno tubular apresenta-se como alternativa para tratamentos térmicos em análises metálicas, calcinação de amostras, produção de óxidos e em inúmeros trabalhos onde se faz necessário uso gradual de temperatura. Foram utilizados para construção do forno controlador CONTEMP CTM 45, chaveamento, cabos de alimentação elétrica, sensor de temperatura (termopar do tipo K), relé de estado sólido (SSR), resistência de aquecimento (Nicromo V) e componentes eletroeletrônicos requeridos para a construção deste trabalho. Para reduzir o aquecimento térmico nas imediações da máquina, foi aplicando o isolamento térmico no cilindro de resistência (câmara de trabalho). Além disso, foram descritas características do equipamento, e dos circuitos de potência. Por fim, foi apresentada a conclusão, que destaca o trabalho como alternativa de baixo custo financeiro em comparação com fornos industrializados e de mesmo porte.

PALAVRAS-CHAVE: Forno tubular. Calcinação. Custo/benefício. Tratamento Térmico.

ABSTRACT

This course conclusion work consists in the construction of an electric tubular furnace with low financial cost. The kiln's main characteristics are its cost/benefit and its working temperature, which can reach within a safety margin of 1000°C, being operated in temperature ramps, according to the needs of the work carried out. Another great difference in the construction of this furnace, in addition to the cost/benefit, its design allows it to be operated in vertical and horizontal positions. With a similar operating activity, but with a cost/benefit far below industrial and traditionally marketed furnaces, the tubular furnace presents itself as an alternative for heat treatments in metal analysis, sample calcination, oxide production and in countless jobs where it is necessary gradual use of temperature. For the construction of the CONTEMP CTM 45 controller oven, switching, power supply cables, temperature sensor (type K thermocouple), solid state relay (SSR), heating resistance (Nicrome V) and electro-electronic components required for construction were used this work. In order to reduce the thermal heating in the vicinity of the machine, thermal insulation was applied to the resistance cylinder (work chamber). In addition, characteristics of the equipment and power circuits were described. Finally, the conclusion was presented, which highlights the work as an alternative of low financial cost compared to industrialized ovens of the same size.

Key words: Tubular oven. Calcination. Cost benefit. Heat treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração de funcionamento do forno elétrico a aquecimento direto.....	15
Figura 2: Ilustração de funcionamento do forno elétrico a aquecimento indireto.	16
Figura 3: Ilustração da configuração das linhas de campo magnético.....	17
Figura 4: Forno de indução a canal.	18
Figura 5: Forno de indução a cadinho.....	18
Figura 6: Forno a arco modelo AN9270	19
Figura 7: Refratário Tubular de Alumina.....	23
Figura 8: Ilustração do efeito Seebeck.	25
Figura 9: Ilustração do efeito Peltier.	26
Figura 10: Modelos de termopares tipo K.....	27
Figura 11: Relé de Estado Sólido Metaltex TSZC-40 ^a	29
Figura 12: Esquema de montagem do SSR.....	29
Figura 13: Controlador Contemp (CTM45).....	30
Figura 14: Entradas sinal (CTM45)	33
Figura 15: Saídas de sinal (CTM45)	34
Figura 16: Painel de Configuração (CTM45)	35
Figura 17: Aplicação Típica (CTM45).....	35
Figura 18: Controle Liga/Desliga.....	36
Figura 19: Rampas e Patamares	37
Figura 20: Ação de Controle PID	38
Figura 21: Diagrama de Blocos do Controle PID.	38
Figura 22: Armação da Carcaça	41
Figura 23: Recorte das Chapas.....	41
Figura 24: Chapas Fixadas.	42
Figura 25: Aplicação da base Primer	43
Figura 27: Cilindro de Alumínio.....	44
Figura 28: Isolante Termoelétrico Cerâmico	44
Figura 29: Resistência.....	45
Figura 30: Montagem da Resistência	46
Figura 31: Medida da Resistência	47

Figura 32: Esquema do Circuito.....	47
Figura 33: Circuito Montado.....	49
Figura 34: Termopar Montado	49
Figura 35: Forno montado	49
Figura 36: Teste de Aquecimento	50
Figura 37: Resistência Montada no Forno.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Carga específica superficial (W/cm ²)	21
Tabela 2: Resistência da liga de Nicromo em relação ao diâmetro do fio.	22
Tabela 3: Propriedades das resistências utilizadas em fornos.....	22
Tabela 4: Propriedades de isolantes utilizadas em fornos	24
Tabela 5: Alguns tipos de termopares.	28
Tabela 6: Entrada Universal CTM45....	33
Tabela 7: Instalação Elétrica nos Bornes (CTM45)	34
Tabela 8: Materiais.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 TRATAMENTO TÉRMICO.....	14
2.1.1 Fundamentos Básicos de Calcinação	14
2.2 FORNOS ELÉTRICOS	15
2.3 CLASSIFICAÇÕES DOS FORNOS ELÉTRICOS.....	16
2.3.1 Forno a Resistência.....	16
2.3.2 Forno a Indução.....	18
2.3.3 Forno a Arco	21
2.4 RESISTÊNCIA.....	22
2.4.1 Isolantes e Refratários.....	24
2.5 SENSOR DE TEMPERATURA	26
2.5.1 Termopares	26
2.5.2 Resistências Metálicas (RTDs)	30
2.6 RELÉ DE ESTADO SÓLIDO	30
2.7 CONTROLE.....	32
2.7.1 Controle Analógico	33
2.7.2 Controle Digital.....	33
2.7.3 Características do Controlador (CTM45).....	33
2.7.4 Especificações do Controlador (CTM45)	34
2.7.5 Instalação Elétrica do Controlador (CTM45).....	34
2.8 ESQUEMA DE LIGAÇÃO (CTM45): ENTRADAS E SAÍDAS	35
2.9 PAINEL DE OPERAÇÃO	36
2.10 APLICAÇÃO	37
2.11 TIPOS DE CONTROLE	37
2.12 ABORDAGEM MATEMÁTICA DO CONTROLADOR PID.....	40
3 MÉTODO DE EXECUÇÃO DO PROJETO.....	41
3.1 CARCAÇA E SUPORTE DO FORNO	42
3.2 CILINDRO DO FORNO.....	45
3.3. RESISTÊNCIA ELÉTRICA	47
3.4 CIRCUITO	49

3.5 MEDIÇÕES.....	52
4. CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS	
ANEXOS	

1 INTRODUÇÃO

As exigências do mercado refletem na indústria uma busca incessante por materiais mais resistentes, duráveis e que apresentem propriedades específicas e adequadas para cada tipo de aplicação. Mas essas características, certos materiais só apresentam após passarem por processos de tratamento térmico. Existe atualmente uma ampla gama de fornos elétricos, e para cada material a ser trabalhado recomenda-se um tipo específico de forno (CESTILE, 2012).

Levando em conta a classificação quanto aos tipos de fornos encontrados na indústria e em centros de pesquisas, algumas características são determinantes para uma breve distinção, as quais se pode destacar o porte (que varia de fornos muito pequenos de uso em laboratórios com capacidades ínfimas de amostras, até fornos gigantescos usados na indústria), a atmosfera (podendo ou não ser controlada) e a potência térmica, com grandes diferenças entre os empregados na indústria e os utilizados em laboratórios (ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013).

Sob a denominação de forno tubular são caracterizados os quais possuem câmaras de aquecimento geralmente em formato circular, que servem simultaneamente de tubo de trabalho (onde são armazenadas as amostras), e suporte da resistência calorífica. Logo, a câmara representa um componente com larga vantagem no funcionamento do forno, por alcançar elevada velocidade de aquecimento e melhor aproveitamento do fluxo de calor (ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013).

O presente trabalho é de extrema importância visar à construção de um forno tubular de baixo custo financeiro, e com vasta possibilidade de aplicação nas diversas atividades laboratoriais, especialmente nas que envolvam tratamentos térmicos em amostras, calcinação de amostras, produção de óxidos, dentre outros, incluindo também como grande diferencial, tratamentos que requeiram uma atmosfera gasosa controlada. Apresentando-o como alternativa de baixo custo em comparação aos fornos industrializados e de mesmo escalão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Desenvolver um forno tubular de resistência elétrica, para aplicação prática em laboratório, na realização de processos que requerem tratamentos térmicos, e com isso, utiliza-lo como instrumento alternativo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir um forno tubular elétrico, executado no laboratório da UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ- campus ABAETETUBA
- Apresentar o forno tubular como alternativa aos fornos industriais tradicionalmente comercializados, explicitando a relação de custo/benefício do mesmo.

Para tanto, este trabalho encontra-se dividido em quatro sessões. A primeira corresponde à introdução, na qual se faz uma abordagem clara e objetiva da relevância do estudo e seus objetivos a serem alcançados. A segunda sessão nos apresenta o referencial teórico para dar embasamento à pesquisa, com os conceitos básicos sobre os principais tipos de tratamento térmico para caracterização de amostras desenvolvida em laboratórios e indústrias, a calcinação. Além de abordar os principais tipos de fornos elétricos, utilizados na indústria e em centros de pesquisas, bem como seus componentes. Na terceira sessão estão presentes as descrições da execução do trabalho. Por fim, a última sessão apresenta os resultados alcançados com suas respectivas conclusões e possíveis aplicações como alternativa à realização de diversos trabalhos que necessitem de tratamentos térmicos, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TRATAMENTO TÉRMICO

2.1.1 Fundamentos Básicos de Calcinação

De modo geral, o tratamento térmico pode ser basicamente definido como sendo uma operação ou conjunto de operações realizadas em determinados materiais, na sua maioria metais, com intuito de alterar suas propriedades físicas e mecânicas sem que se altere a forma e o estado do produto final. Tais operações conferem aos materiais, características como

dureza, elasticidade, segregação de substâncias indesejáveis em amostras, como água e/ou gases, e resistência a tração (SENAI, 1997).

Tecnicamente o conceito prático de calcinação tem sido largamente empregado, descrevendo em inúmeras vezes, o tratamento térmico aplicado a quaisquer substâncias sólidas, visando dentre outros, a decomposição térmica de substâncias e produção de óxidos (LUZ, 2010).

Calcinação é o tratamento térmico que, especialmente carbonatos e hidratos são submetidos, com intuito de remover CO₂, água e outros gases ligados a essas substâncias. A calcinação é um processo endotérmico, que é usada majoritariamente na produção de óxidos (LUZ, 2010). Como mostra a reação química descrita na equação abaixo:



Como visto na (Equação 1), a cal é um dos produtos que pode ser obtido pela calcinação do calcário (rocha contendo mais de 30% de CaCO₃), liberando CO₂ (gás carbônico). Nesta equação, tem-se o calor necessário para decompor 1 mol de CaCO₃, tendo como produtos, 1 mol de CaO e 1 mol de CO₂. Por se tratar de uma reação tipicamente endotérmica, a mesma é favorecida pelas altas temperaturas (SOARES, 2007).

A calcinação é de suma importância para indústria produtora de cal, em centros de pesquisas, dentre outros. Dada sua simplicidade de operação, a calcinação pode ser realizada em diversos tipos de fornos, tais como: forno de cuba, intermitente ou contínuo, forno rotativo (TRAJANO, 1969).

2.1.2 Fundamentos Básicos de Sinterização

A sinterização é um processo aplicado principalmente em pós, cristalinos ou não, onde os mesmos são compactados e tratados em processos de temperatura inferior a sua temperatura de fusão. Este processo cria uma alteração na estrutura microscópica do elemento base. Isto ocorre devido a um ou mais métodos chamados mecanismos de transporte, estes podem ser consecutivos ou concorrentes cuja finalidade é obter uma peça sólida e sem defeitos. Os processos utilizados no desenvolvimento de peças e componentes de cerâmica industrial, ou metálicas, envolvem tecnologias avançadas misturadas à antigas técnicas e conhecimentos adquiridos ao longo do tempo, devido método usar os materiais geralmente em pó, a sinterização também é bastante conhecida como metalurgia do pó. É um procedimento que envolve altas temperaturas, deste modo, podem variar entre 1200 a 2200 °

C. A massa crua, quando constituída de apenas um componente, é aquecida até 80% da temperatura considerada “temperatura de fusão” do material, conservando assim a matéria prima em estado sólido – chamado de sintetização de fase sólida (MACÉA).

2.2 FORNOS ELÉTRICOS

Os fornos elétricos são uns dos equipamentos resistivos mais conhecidos e utilizados na indústria e em centros de pesquisas, dada sua versatilidade e eficiência energética, podem ser empregados nos mais variados trabalhos. Um forno elétrico é constituído basicamente de uma câmara de aquecimento (confeccionada basicamente a partir de material refratário), um conjunto de resistências elétricas (cujas quais determinaram os valores adequados de temperatura, específicos para cada trabalho) e uma carcaça metálica ou cerâmica (constituída tipicamente de material isolante térmico) (GUERRA, 2006).

Diante do proposto no presente trabalho, cabe destacar o forno tubular, que dentre os mais variados tipos de equipamentos eletrotérmicos, é projetado para transferir um fluxo de calor constante, de tal forma que se forem mantidas as condições adequadas de operação, também serão mantidas constantes as temperaturas de trabalho. Obtendo assim um fluxo de calor capaz de suprir a execução de uma tarefa, conferindo uma maior eficiência de operação (REIS, 2012).

Existem duas principais propriedades que devem ser observadas nos materiais a serem trabalhados. A capacidade calorífica, que serve de indicativo da capacidade de um material absorver calor de sua vizinhança, ela pode ser entendida como a quantidade de energia capaz de produzir um aumento unitário de temperatura (CALLISTER, 2002). Em termos matemáticos é descrita na (Equação 2). Outra é a condutividade térmica, que se caracteriza pelo transporte de energia cinética das partículas de regiões de altas temperaturas, para partículas vizinhas em regiões de baixas temperaturas (BARROSA, 2004). Definida matematicamente na (Equação 3). Que é a equação de Fourier.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (2)$$

Onde:

C : capacidade calorífica (calor específico);

dQ : energia exigida para produzir uma variação de temperatura;

dT : variação de temperatura;

$$q = -kA \frac{dT}{dX} \quad (3)$$

Onde:

$\frac{dT}{dX}$: Gradiente de temperatura na seção;

A : Área da seção por onde o calor flui por condução;

k : Condutividade térmica do material;

2.3 CLASSIFICAÇÕES DOS FORNOS ELÉTRICOS

Os fornos elétricos industriais e laboratoriais podem ser classificados basicamente em três tipos, a resistência elétrica, a indução e fornos a arco (CESTILE, 2012).

2.3.1 Forno a Resistência

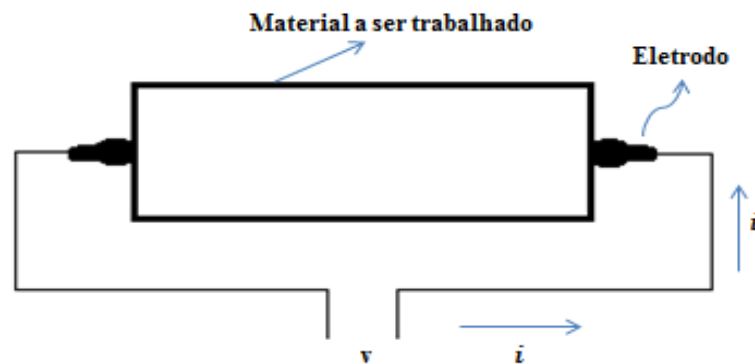
Classificamos basicamente fornos a resistência, como sendo aqueles que utilizam na fonte térmica, o calor gerado pelo efeito Joule resultante da corrente elétrica que atravessa uma determinada resistência. Esses equipamentos apresentam uma grande eficiência de trabalho por não provocarem oscilações na tensão da rede que os alimenta, representando assim um melhor rendimento do fator de potência. O forno é composto por materiais específicos que variam de acordo com as necessidades de aplicações nos processos industriais, bem como o tipo de aquecimento, podendo ser direto ou indireto (MAMEDE, 1997).

Forno a Resistência de Aquecimento Direto

O processo de aquecimento, nesse tipo de forno, ocorre por meio de eletrodos acoplados diretamente no material a ser trabalhado, por onde passará uma corrente elétrica.

Esse método é bastante específico, podendo ser utilizado no aquecimento de água para produção de vapor, em fornos a arco e na manutenção de temperatura no processo de têmpera dos aços (MAMEDE, 1997).

Figura 1: Ilustração de funcionamento do forno elétrico a aquecimento direto.



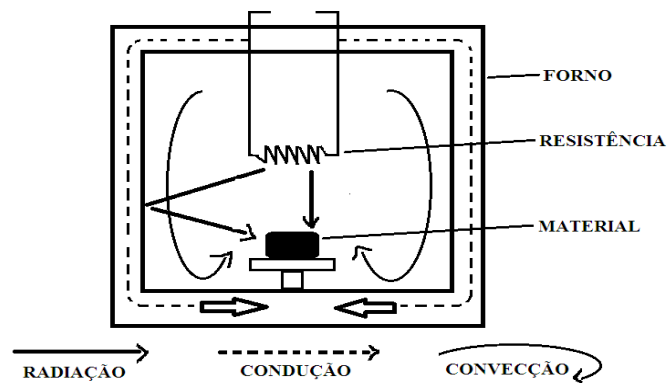
Fonte: adaptada de (MAMEDE, 1997 p. 355).

A (Figura) 1 demonstra o esquema de funcionamento básico do forno à resistência de aquecimento direto, onde uma corrente elétrica de intensidade I , originária da DDP (diferença de potencial) de intensidade V na fonte de alimentação, percorre o circuito atravessando o material que está diretamente conectado aos eletrodos, ocorrendo assim o aquecimento do material.

Forno a Resistência de Aquecimento Indireto

É o tipo mais comum de forno a resistência elétrica empregado na indústria e centros de pesquisas. Na indústria destaca-se seu emprego na fusão de metais, na secagem de produtos farmacêuticos, no tratamento térmico de metais, dentre outros. O material a ser trabalhado nesse tipo de forno permanecerá contido numa câmara isolada, e o calor será transferido da resistência elétrica para o respectivo material por meio dos fenômenos térmicos de condução, convecção e irradiação (MAMEDE, 1997).

Figura 2: Ilustração de funcionamento do forno elétrico a aquecimento indireto.



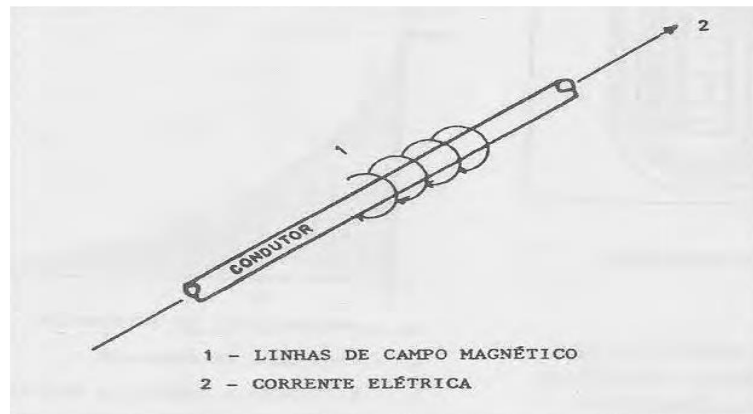
Fonte: adaptada de MAMEDE, 1997.

No processo de aquecimento indireto, como ilustrado na (Figura 2), que é o tipo de forno objeto desta pesquisa, a câmara é aquecida, e o material não entra em contato direto com a resistência (fonte de calor), ocorrendo então a transferência de calor por condução, convecção e irradiação.

2.3.2 Forno a Indução

Para melhor entender o funcionamento de um forno indutor, devemos conhecer seu princípio de aquecimento, onde o calor no sistema é gerado pela indução eletromagnética. Basicamente a indução eletromagnética se dá quando um condutor, percorrido por uma corrente elétrica I , fica circundado por um campo magnético B , cuja intensidade será proporcional à corrente elétrica e a configuração das linhas de campo magnético dependeram do sentido da corrente e da forma geométrica do condutor. Por outro lado, todo condutor elétrico quando exposto a um campo magnético externo, o mesmo é percorrido por correntes chamadas de correntes induzidas, e como todo condutor ao ser percorrido por corrente elétrica, se aquece por efeito Joule. A este fenômeno damos o nome de aquecimento por indução eletromagnética (NETO, 1989).

Figura 3: Ilustração da configuração das linhas de campo magnético

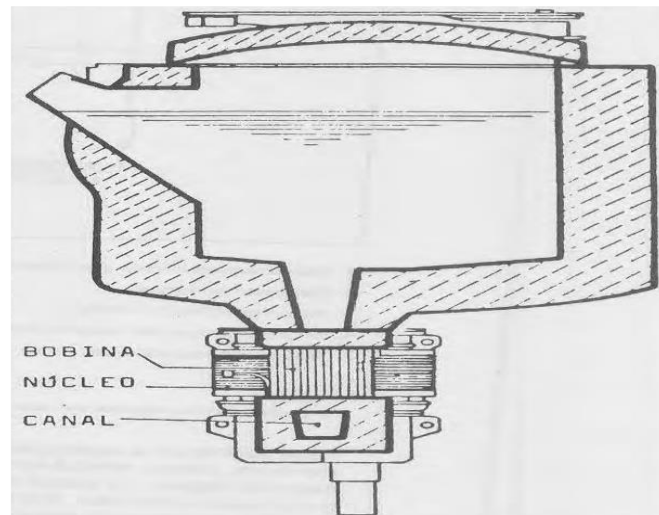


Fonte: adaptada de NETO p. 7, 1989.

A (Figura 3) demonstra basicamente o surgimento de linhas de campo magnético circular (círculos 1), devido condutor linear ser atravessado por uma corrente elétrica (seta 2).

Os fornos a indução eletromagnética, largamente empregados na indústria brasileira, são usados para fundir metais ferrosos e não ferrosos, bem como para manter constantes determinadas temperaturas de operações com metais em estado líquido. O emprego dessa tecnologia é responsável por grande parte da energia elétrica consumida por esse tipo de aquecimento. Podem-se classificar basicamente os fornos a indução em dois tipos: fornos a canal (apresentam em sua estrutura um núcleo magnético), fornos a cadinho (não apresentam núcleo magnético em sua estrutura) (NETO, 1989).

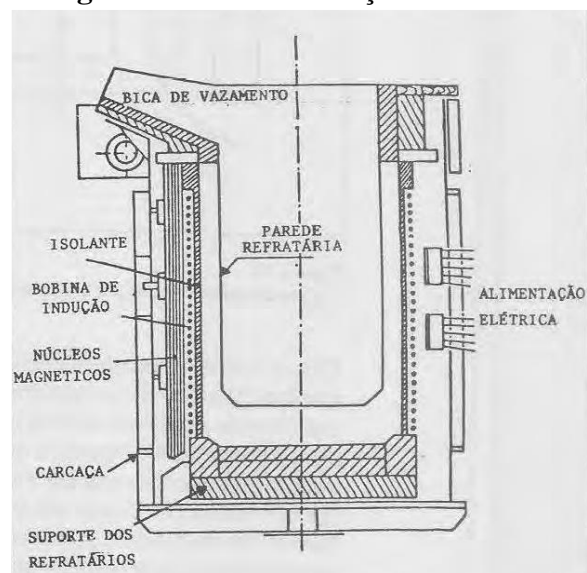
Figura 4: Forno de indução a canal.



Fonte: adaptada de NETO p. 11, 1989.

A (Figura 4) ilustra esquematicamente um forno de indução a canal, composto essencialmente por um reservatório de metal líquido que se comunica com as duas extremidades do canal, um canal de metal líquido que apresenta formato curvo e uma bobina indutora enrolada em torno de um núcleo magnético.

Figura 5: Forno de indução a cadinho.



Fonte: adaptada de NETO p. 15, 1989.

O forno a cadinho demonstrado na Figura 5 é constituído basicamente por uma bobina indutora que apresenta em sua área interna um cadinho de material refratário, onde se deposita o material metálico a ser trabalhado.

2.3.3 Forno a Arco

Largamente empregado na indústria siderúrgica (para fusão de ferro e aço, como também em outras ligas metálicas), em centros de pesquisas (para tratamentos térmicos específicos), os fornos a arco utilizam-se de propriedades do arco elétrico para produzirem a fusão de metais, que geralmente ficam depositados numa espécie de cuba térmica constituída de material refratário. O fenômeno de arco elétrico está associado diretamente à passagem de corrente entre dois eletrodos, apresentando frequentemente o ar como meio ionizado. Existem três diferentes tipos de fornos a arco utilizados na indústria, que são: arco submerso, arco direto e arco indireto (MAMEDE, 1997).

Figura 6: Forno a arco modelo AN9270



Fonte: adaptada de ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013 p. 2.

Na (Figura 6) destaca-se a vista geral de um forno a arco e sua respectiva fonte de corrente, com vasta aplicação em atividades industriais e laboratoriais, este forno é, algumas vezes, a melhor opção quando se trata de metais com alto ponto de fusão.

2.4 RESISTÊNCIA

Para que se construa um forno ideal e que atinja temperatura de operação desejada, deve ser levado em consideração o material constituinte da resistência, bem como o valor da resistência necessário. Para isso, devem ser observadas condições como, ter elevado ponto de fusão (25% superior à do material a ser trabalhado), ser resistente à corrosão, elevada resistividade e elevado grau de dureza quando exposto a altas temperaturas (CESTILE, 2012).

Existem materiais que cumprem adequadamente as condições supracitadas, cujos quais, são largamente empregados na fabricação de fornos a resistência elétrica. Dentre eles, destacam-se:

- Nicromo V (80% Ni, 20% Cr);
- Cromax (30% Ni, 20% Cr, 50% Fe);
- Kantal (Cr, Al, Co, Fe);

Estes materiais são encontrados geralmente em forma de fios ou fitas dispostos em espiral. Outro fator importante que se deve levar em consideração na escolha da resistência é a carga específica superficial, ela representa a taxa de transferência de potência irradiada por unidade superficial, sua unidade é dada em W/cm^2 (CESTILE, 2012).

Tabela 1: Carga específica superficial (W/cm^2)

Tipo de liga	Temperatura ($^{\circ}C$)						
	600	700	800	900	1000	1100	1200
80%Ni – 20%Cr	5,0	3,2	2,2	1,5	1,1	0,9	-
30%Ni – 20%Cr	4,6	3,0	2,0	1,4	1,0	0,8	-
20%Cr – 5%Al	8,0	5,8	4,3	3,1	2,2	1,3	-
Cr-Al-Co	3,9	3,5	3,0	2,4	1,5	-	0,8

Fonte: Adaptada de CESTILE p. 333, 2012.

Na (Tabela 1) pode-se observar a carga específica para algumas ligas que geralmente são usadas na construção de resistências de fornos elétricos, com destaque para o Nicromo V (80%Ni – 20%Cr), que é material utilizado para confecção da resistência do forno objeto desta pesquisa.

Tabela 2: Resistência da liga de Nicromo em relação ao diâmetro do fio.

Diâmetro do fio (mm)	Resistência (Ω/m) (80%Ni – 20%Cr)
3,251	0,13025
2,591	0,20506
2,057	0,32515
1,626	0,52102
1,295	0,82020
1,016	1,33210
0,813	2,08340
0,6426	3,3368
0,5105	5,2791
0,4038	8,4322

Fonte: Adaptada de CESTILE p. 334, 2012.

Apresentam-se na (Tabela 2) os diâmetros e resistências de alguns fios de Nicromo frequentemente utilizados na construção dos fornos elétricos. A seguir exibe-se uma tabela com as principais propriedades físico-químicas de alguns materiais utilizados nas resistências.

Tabela 3: Propriedades das resistências utilizadas em fornos.

Material	Composição	Resistividade($\Omega\text{-mm}^2/m$)	Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)
Nicromo	Ni-Fe-Cr	1,1221	1.350
Nicromo V	Ni-Cr	1,0806	1.400
Cromax	Fe-Ni-Cr	0,9975	1.380
Nirex	Ni-Cr-Fe	0,9809	1.395
Nilvar	Fe-Ni	0,8046	1.425
Bronze comercial	Cu-Zn	0,0415	1.040
Ni puro	Ni	0,0997	1.450
Platina	Pt	0,1060	1.773
Aço	Fe	0,0999	1.535
Zinco	Zn	0,0592	419
Molibdênio	Mo	0,0569	2.625
Tungstênio	W	0,0552	3.410
Alumínio	Al	0,0267	660
Ouro	Au	0,0242	1.063
Cobre	Cu	0,0172	1.083

Prata | Ag | 0,0163 | 960
 Fonte: Adaptada de CESTILE p. 336, 2012.

Segundo (Cestile, 2012), para que se atinja uma melhor eficiência de operação num forno elétrico, deve-se utilizar uma quantidade adequada de fio resistor na confecção da resistência. Logo, de acordo com a conveniência, para cada tipo de forno pode-se encontrar o comprimento de fio adequado, como sugere a (Equação 4).

$$Lf = \frac{Rf}{Ru} \quad (4)$$

Onde:

Lf : comprimento do fio (m);

Rf : resistência do fio (Ω);

Ru : resistência por unidade do fio resistor (Ω/m);

2.4.1 Isolantes e Refratários

Tão importante como os materiais que compõem o sistema de resistências de um forno, são os elementos que proporcionam o isolamento térmico do mesmo. Aplicados à maioria dos equipamentos eletrotérmicos, os isolantes e refratários, apresentam propriedades específicas como, a capacidade para resistirem a altíssimas temperaturas sem se fundir ou decompor-se. Dentre os usos mais comuns estão os revestimentos de fornos industriais usados no refino de metais, na produção de energia e tratamentos térmicos especiais (CALLISTER, 2002).

Para se obter um resultado satisfatório quanto ao uso de um refratário, propriedades básicas como composição e porosidade devem ser observadas, e aplicadas de acordo com as necessidades de cada trabalho. Os refratários podem ser considerados de forma geral como argila refratária, sílica, básica, e refratários especiais (CESTILE, 2012).

Com base em suas composições químicas, os refratários podem ser classificados em ácido (como os de sílica, semi sílica, alumino silicatos), básico (Magnesita, cromo-magnesita, Magnesita-cromita) e neutro (alumina, cromo, argila refratária). Os refratários de alumina consistem em óxidos de alumínio apresentando poucos resíduos de impurezas, logo são

conhecidos como alumina pura, ou seja, apresentam grau de pureza em torno de 99,3% a 99,7%, e por serem quimicamente mais estáveis que outros tipos de óxidos, são mais adequados para construção de refratários (como cadinhos e tubos), usados em fornos (UNEP, 2006).

Figura 7: Refratário Tubular de Alumina.



Fonte: Adaptada de Guangdong China.

Na (Figura 7) apresenta-se o tipo de refratário tubular muito utilizado na construção de fornos tubulares para indústria e centros de pesquisas, ressalta-se a aplicação do mesmo neste trabalho, uma vez que oferece rendimento adequado às atividades propostas.

De acordo com a NBR 9575/2010, o isolamento térmico é o conjunto de medidas aplicadas ao sistema de aquecimento controlado, capazes de diminuir o gradiente de temperatura que atua sobre um corpo, de modo a protegê-lo dos efeitos indesejáveis, quando exposto ao calor excessivo.

Segundo Catai, Penteadó e Dalbello (2006), a lã de vidro é obtida através da sílica e sódio juntados pela ação de resinas sintéticas e tratados especificamente em alto forno. É encontrada comercialmente em forma de manta, largamente empregada na fabricação de fornos e equipamentos que operem em elevadas temperaturas, apresentando maior aplicação em sistemas de construção a seco. A tabela abaixo apresenta a densidade e condutibilidade térmica para os três tipos de mantas mais utilizadas no isolamento térmico de fornos.

Tabela 4: Propriedades de isolantes utilizadas em fornos.

Material Isolante	Densidade (kg/m³)	Condutibilidade de Térmica (Kcal/m.h.°C)
Lã de Vidro	200	0,037
Lã de Rocha	180	0,031
Algodão (tecido)	81	0,048

Fonte: Adaptada de Lopes, 2004.

Na (Tabela 4) pode-se observar a densidade x condutibilidade térmica de materiais isolantes térmicos que geralmente são usados na construção de fornos elétricos para indústrias e laboratórios.

No trabalho foram usados manta de vidro (como isolamento térmico do cilindro do forno) e tubo refratário (usado simultaneamente como suporte da resistência calorífica e câmara de aquecimento).

2.5 SENSOR DE TEMPERATURA

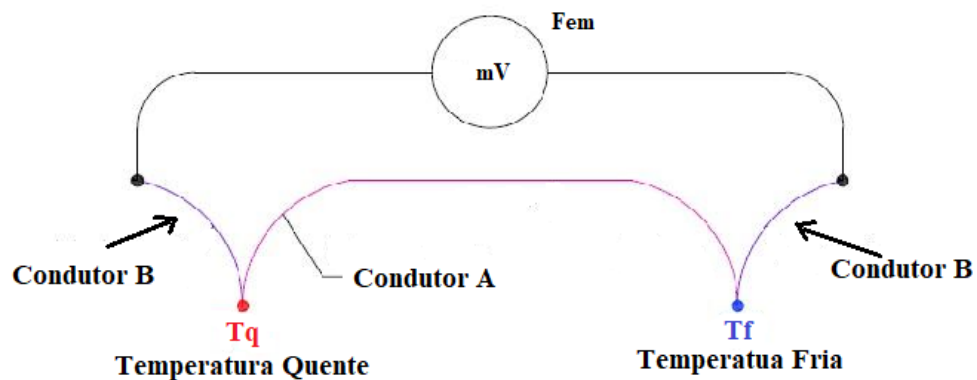
A temperatura é fisicamente, a medida da energia cinética de uma amostra expressa em unidades de graus em uma escala padrão. Os sensores compõem uma parte fundamental no sistema de medição, uma vez que determinaram a temperatura usada na aquisição de dados, os modelos mais utilizados são resistências metálicas (RTDs) e termopares (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

2.5.1 Termopares

Esse tipo de sensor é constituído basicamente por dois metais distintos, apresentando como característica principal a produção de tensão elétrica oriunda da diferença de temperatura nos pontos de união entre esses metais. Sua utilização é bastante vantajosa, uma vez que apresenta alto nível de confiabilidade e baixo custo. Os termopares obedecem a um princípio de funcionamento que está intimamente relacionado a três fenômenos: os efeitos Seebeck, Peltier e Thomson (COCOTA JÚNIOR, 2005).

Em 1821, Tomas Johan Seebeck descobriu ao observar dois condutores metálicos distintos que formavam um circuito fechado, quando aplicado uma diferença de temperatura nas duas extremidades, surge então uma força eletromotriz que gera uma corrente elétrica que se mantém no circuito enquanto existir a diferença de temperatura nas extremidades dos condutores. Ao abrir o circuito, ele pôde observar a presença de uma tenção elétrica entre os terminais deste circuito, esse fenômeno e conhecido como efeito Seebeck (COCOTA JÚNIOR, 2005).

Figura 8: Ilustração do efeito Seebeck.

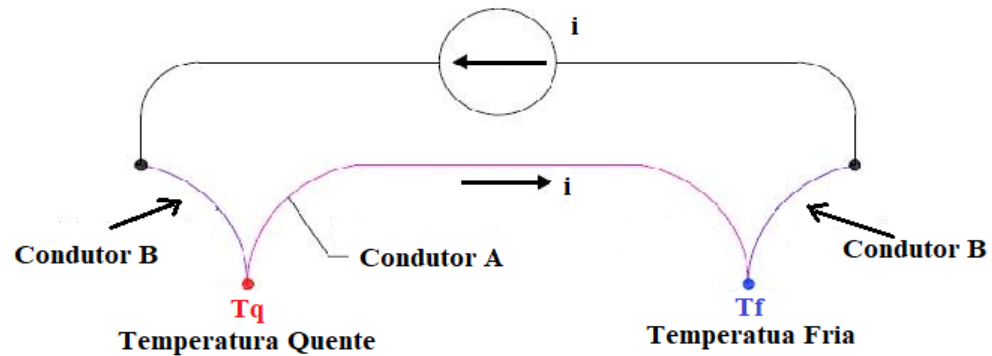


Fonte: Adaptada de MOURA, 2010.

Na (Figura 8) ilustra-se o efeito Seebeck, onde dois metais diferentes, condutor (A) e condutor (B), que formam um circuito fechado, experimentam uma diferença de temperatura em suas extremidades, temperatura quente (T_q) e temperatura fria (T_f), produzem uma força eletromotriz (F_{em}). Ao abrir este circuito pôde-se observar uma tenção elétrica (mV) entre os terminais.

Jean Charles Athanase Peltier em 1834, observou que ao aplicar uma tensão em um circuito elétrico fechado, produzindo assim um gradiente de temperatura, gera uma corrente elétrica que percorre um corpo formado por um conjunto de condutores ou semicondutores distintos. Além disso, quando se inverte a corrente que percorre esse circuito, os pontos de união dos condutores que se esquentam e esfriam também se invertem. Esse fenômeno é conhecido como efeito Peltier, que é o fenômeno inverso ao efeito Seebeck (ALMEIDA, 2013).

Figura 9: Ilustração do efeito Peltier.



Fonte: Adaptada de MOURA, 2010.

A (Figura 9) apresenta o efeito Peltier, que é o efeito inverso ao Seebeck, ao se aplicar uma tensão num circuito fechado formado por condutores ou semicondutores (A) e (B), surge então uma corrente elétrica (i) que percorre o circuito, uma das uniões se esquenta (T_q) e a outra se esfria (T_f).

Willian Thomson descobriu em 1854, que uma corrente elétrica constante ao atravessar um condutor homogêneo, mantendo-se constante o gradiente de temperatura, e não considerando se a corrente é induzida pelo próprio termopar ou externamente, cria o efeito de emissão ou absorção reversível de calor. Esse efeito é conhecido como efeito Thomson (OLIVEIRA, 2008).

Os termopares são instrumentos relativamente baratos, quando se leva em consideração suas aplicações numa vasta gama de temperatura, e no seguimento comercial especializado, podem ser encontrados em várias formas e modelos, específicos para tipo de trabalho (GRUPO ECIL).

A escolha de cada tipo de material empregado numa pesquisa, determinará o quão fiel serão os resultados. Por esse motivo deve-se levar em consideração o tipo de termopar a ser utilizado, considerando-se a temperatura aplicada ao processo, características físicas do ambiente, precisão do equipamento e seu custo benefício (OLIVEIRA, 2008). Os tipos mais comuns de termopares são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 5: Alguns tipos de termopares.

TIPOS	MATERIAL POSITIVO	MATERIAL NEGATIVO
E	Cromel	Constantan
J	Ferro	Constantan
K	Cromel	Alumel
N	Nicrosil	Nisil
R	Platina 13% Ródio	Platina
S	Platina 10% Ródio	Platina
T	Cobre	Constantan

Fonte: Adaptada de OLIVEIRA, 2008 p. 15

Na (Tabela 5) são apresentados os tipos mais comuns de termopares utilizados em centros de pesquisas e na indústria, destaca-se o termopar do tipo K, que é o material usado neste trabalho.

Devido sua resistência a oxidação, o termopar do tipo K pode ser empregado em temperaturas superiores a 600°C, podendo também ser usado em atmosferas inertes e oxidantes, não recomendado para atmosferas redutoras e sulfurosas. Constituído basicamente por dois metais, o Cromel (Ni90% e Cr10%) como elemento positivo e o Alumel (Ni95,4%; Mn1,8%; Si1,6%; Al1,2%) como elemento negativo. Sua faixa de utilização compreende temperaturas entre -270°C a 1200°C (OLIVEIRA, 2008).

Figura 10: Modelos de termopares tipo K.

Fonte: Adaptada de GRUPO ECIL.

Na (Figura 10) são apresentados termopares convencionais simples da série CS, em (a) CS-10 com fios sem isoladores, (b) CS-11 com fio isolador único, (c) CS-12 fios com isoladores individuais e (d) CS-13 fios com tubo capilar.

2.5.2 Resistências Metálicas (RTDs)

Basicamente um RTD é um dispositivo constituído de filmes de metal, geralmente de platina, ou bobinas, que ao sofrerem aquecimento, sua resistência aumenta proporcionalmente com o aumento da temperatura. A resistência diminui ao ponto em que a temperatura do sistema diminui, quando uma determinada corrente elétrica percorre um RTD, é gerada uma tensão, que ao ser aferida, pode-se determinar sua resistência e com isso sua temperatura. Geralmente quando um RTD registra 0°C, sua resistência é de 100Ω, podendo medir temperaturas em torno de 850°C (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

2.6 RELÉ DE ESTADO SÓLIDO

O relé é um dispositivo capaz de comandar circuitos elétricos de saída através de um circuito de entrada, onde se destacam dois tipos de relés, o relé eletromecânico e relé de estado sólido. Relé de Estado Sólido (SSR), sigla do inglês (*Solid State Relay* - SSR), amplamente utilizado no chaveamento de cargas indutivas e resistivas, com inúmeras vantagens sobre os relés mecânicos. Com uma longa vida útil de operações, uma alta velocidade de resposta e basicamente sem desgastes mecânico, fazem do relé de estado sólido uma opção vantajosa em operações nas quais se tornam imprescindíveis equipamentos de alta precisão (METALTEX).

Figura 11: Relé de Estado Sólido Metaltex TSZC-40A

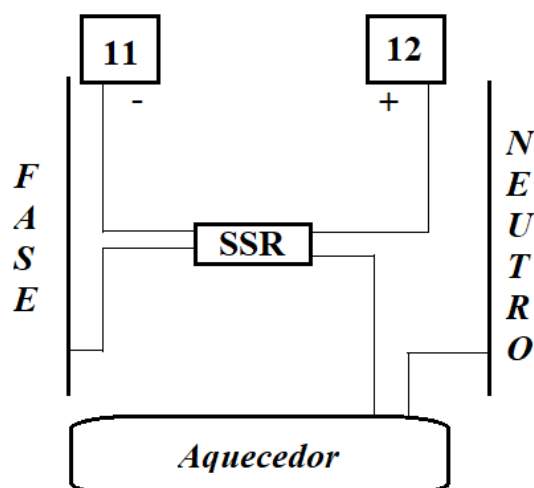


Fonte: Adaptada de METALTEX.

Na (Figura 11), apresenta-se um relé de estado sólido da marca METALTEX, com corrente de saída de 40 ampéres, monofásico, entrada de corrente alternada e circuito de proteção interna, amplamente utilizado em processos que requeiram alta precisão no controle de alimentação.

Na figura seguinte vemos esquematicamente a montagem de um relé de estado sólido no circuito de um aquecedor, onde exerce a saída de controle de pulso.

Figura 12: Esquema de montagem do SSR



Fonte: Adaptada de CONTEMP.

2.7 CONTROLE

Bem antes do emprego de tecnologias em processos de automação industrial, pessoas se encarregavam de realizar determinados processos, a essa ação humana de ajustes é chamada de sistema de controle manual. Da mesma forma que nos processos onde não há intervenção humana nos ajustes de controle, damos o nome de sistemas de controle automático, esses processos utilizam dois tipos de tecnologias da eletrônica, as eletrônicas analógica e digital. A utilização de um controle consiste basicamente em manter as variáveis de um processo em valores desejados para o sistema (FUENTES, 2016).

Os controladores CTM Contemp, apresentam entrada analógica e configurável por software, permitindo assim a conexão de diversas variedades de sensores e outros equipamentos eletroeletrônicos. Apresentam também, três saídas configuráveis e que permitem o controle e registro de vários processos e equipamentos. As configurações podem ser acessadas pelo conjunto de quatro teclas dispostas na face do equipamento, com interface simples de configurar várias funções relacionadas ao processo de controle. Este sistema permite que operações matemáticas e algoritmos de controle sejam implementados em 32 bits e ponto flutuante, garantindo melhor confiabilidade no emprego desse produto (CONTENP).

Na (Figura 13), apresenta-se o controlador Contemp modelo CTM45, que é o equipamento usado nesse trabalho, devido o mesmo suprir adequadamente as necessidades de controle para realização das atividades que serão desenvolvidas nas análises térmicas.

Figura 13: Controlador Contemp (CTM45).



Fonte: Adaptada de CONTEMP

2.7.1 Controle Analógico

Esse tipo de controle apresenta uma alta velocidade de ação por conta da própria natureza analógica dos sinais envolvidos no processo. Com uma tecnologia baseada nos amplificadores de sinais operacionais, e apesar de simples, apresentam grande versatilidade de operações que vão desde um comparador, até um controlador proporcional integral derivativo (PID) (FUENTES, 2016).

2.7.2 Controle Digital

Já os equipamentos que utilizam a tecnologia de entrada digital, são implementados por microprocessadores ou microcontroladores e memórias. Esse sistema utiliza-se de conversões de sinais para produção de informação, por exemplo, conversões de sinais elétricos analógicos em informações digitais (Conversão A/D), as informações são processadas com utilização de hardware e um software específicos, produzindo as informações de controle digital, que novamente serão traduzidas em sinais analógicos (Conversão D/A) (FUENTES, 2016).

2.7.3 Características do Controlador (CTM45)

O controle de temperatura pode ser descrito como sendo o controle de um processo de transferência de calor. A utilização de microcontroladores de temperaturas em fornos elétricos pode representar, em termos de economia e precisão, um excelente exemplo de aplicação desse produto (MELO, 1985).

Segundo (CONTEMP), as principais características do controlador digital microprocessado CTM45 são:

- Entrada universal configurável através do teclado;
- Saída de controle do tipo: relé, analógica ou pulso (PWM);
- Duas saídas de alarme configuráveis;
- Programação de Rampas e Patamares com 63 segmentos em até 32 programas;
- Retransmissão da Leitura (PV);
- Auto-Sintonia dos parâmetros PID;

- Soft-Start Programável;
- Auto-Calibração permanente;
- Alimentação universal

2.7.4 Especificações do Controlador (CTM45)

Tabela 6: Entrada Universal CTM45

Tipo	Faixa	Impedância	Norma
Tensão	0 a 5V; 1 a 5V; 0 a 10V	>1,5M Ω	-
Corrente	0 a 20mA; 4 a 20mA	=100 Ω	-
PT100	-200 a 530°C	>10M Ω	ASTM E1137
S	0 a 1760°C	>10M Ω	ASTM E230
K	-100 a 1300°C	>10M Ω	ASTM E230
J	-50 a 800°C	>10M Ω	ASTM E230

Fonte: Adaptada de CONTEMP.

Na (Tabela 6) estão presentes as especificações de entrada universal do CTM45, como Tipo (tensão, corrente e modelos de termopares), Faixa de operações, Impedância em (Ω) e as Normas. Esse equipamento apresenta uma precisão de (+/- 0,3%) do fundo de escala a 25°C, com resolução de (16 bits), amostragem de (5 por segundo) e estabilidade térmica de (50ppm).

2.7.5 Instalação Elétrica do Controlador (CTM45)

As ligações com o controlador podem ser feitas por meio de bornes do tipo parafusado, permitindo o uso de terminais ou condutores elétricos com secção transversal compreendida entre 0,18mm² (AWG24) e 1,5mm² (AWG16). Na tabela seguinte são apresentados os bornes e suas respectivas funções.

Tabela 7: Instalação Elétrica nos Bornes (CTM45).

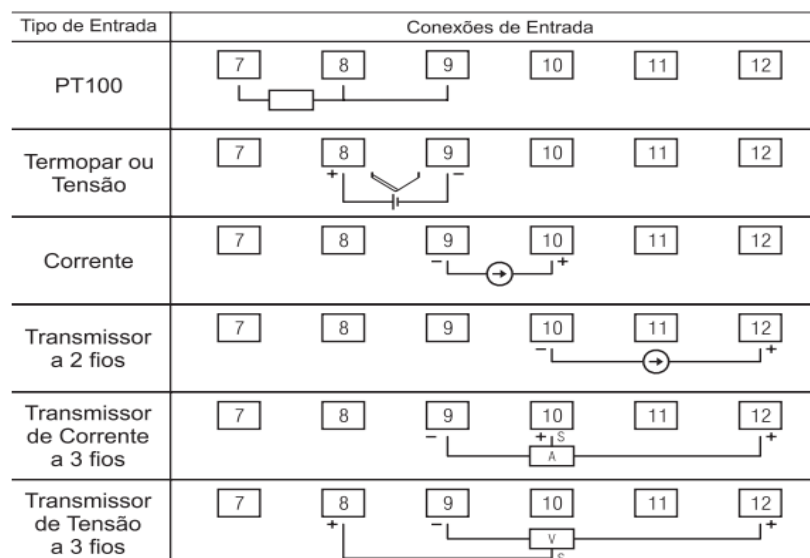
Nome	Bornes	Descrição
AL 1	1 e 2	Saída de Alarme 1
C/ AL 2	3 e 4	Saída de Controle ou de Alarme 2
Power AC/DC	5 e 6	Entrada de Alimentação
Sensores	7,8,9 e 10	Sensores de temperatura, tensão e corrente
C/ PV	11 e 12	Saída Controle ou retransmissão

Fonte: Adaptada de CONTEMP.

2.8 ESQUEMA DE LIGAÇÃO (CTM45): ENTRADAS E SAÍDAS

Entradas

Nas entradas de ligação do controlador, podem ser conectados inúmeros tipos de fontes de sinais, como mostra o esquema abaixo.

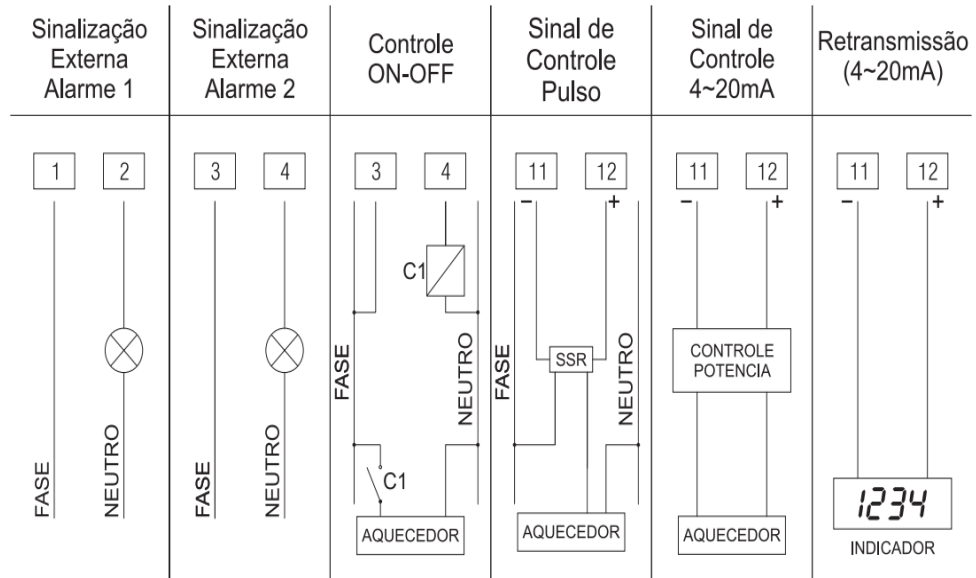
Figura 14: Entradas de sinal (CTM45)

Fonte: Adaptada de CONTEMP

Saídas

Segue abaixo um esquema com exemplos de ligações das saídas, alguns ligados a relés de estado sólido (SSR), controle de potência e indicador.

Figura 15: Saídas de sinal (CTM45)

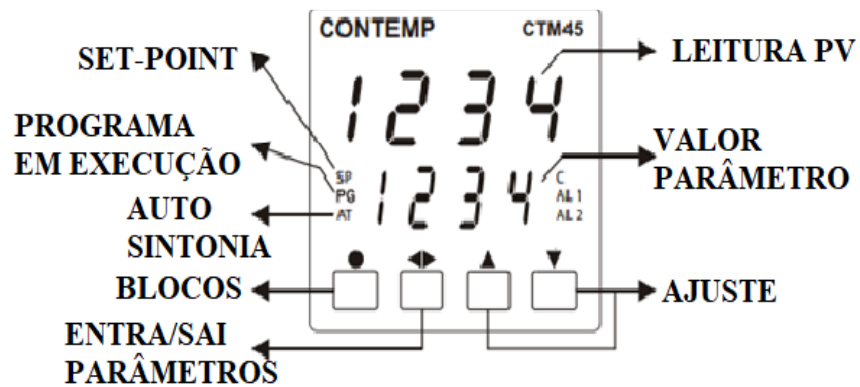


Fonte: Adaptada de CONTEMP

2.9 PAINEL DE OPERAÇÃO

Na figura seguinte são apresentadas as informações de configurações disponíveis no painel do controlador.

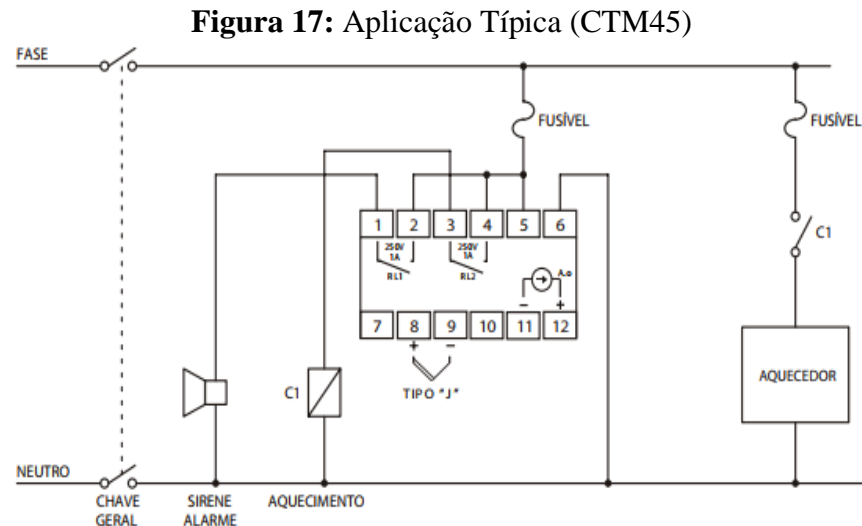
Figura 16: Painel de Configuração (CTM45)



Fonte: Adaptada de CONTEMP

2.10 APLICAÇÃO

Na figura abaixo apresenta-se um exemplo típico de aplicação deste equipamento no controle de um forno elétrico composto por um aquecedor, alarme, fusíveis de segurança, chaveamento e sensor de temperatura.



Fonte: Adaptada de CONTEMP

2.11 TIPOS DE CONTROLE

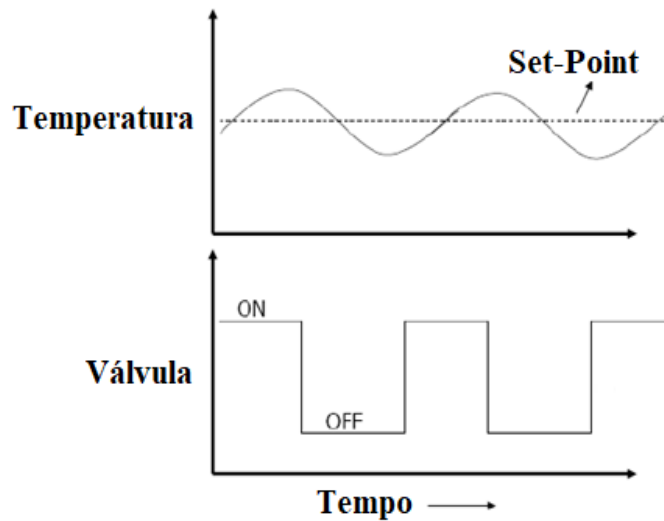
Um controlador apresenta como principal característica, a capacidade pela qual ele mantém controlada a variável, num valor pré-determinado. E de acordo com a necessidade de cada trabalho, podemos apontar os controles do tipo Liga/Desliga, Rampas/Patamares e Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (MELO, 1985).

Controle Liga/Desliga

Trata-se de uma estratégia bastante simples e de vasta aplicação prática, como por exemplo em compressores, geladeiras e bombas. Esse controle é melhor relacionado a trabalhos que permitam uma grande oscilação do valor da variável a ser controlada. Pode-se destacar que nesta estratégia de controle, o sinal que é aplicado ao processo apresenta um determinado valor fixo, ou um valor nulo, onde a ação aplicada fará o ligamento (ON) e

desligamento (OF) do elemento atuante no processo. Conforme o valor desejado de operação, o controle liga (ON) / desliga (OF), fornece dois valores distintos de variáveis manipuladas (MELO, 1985).

Figura 18: Controle Liga/Desliga

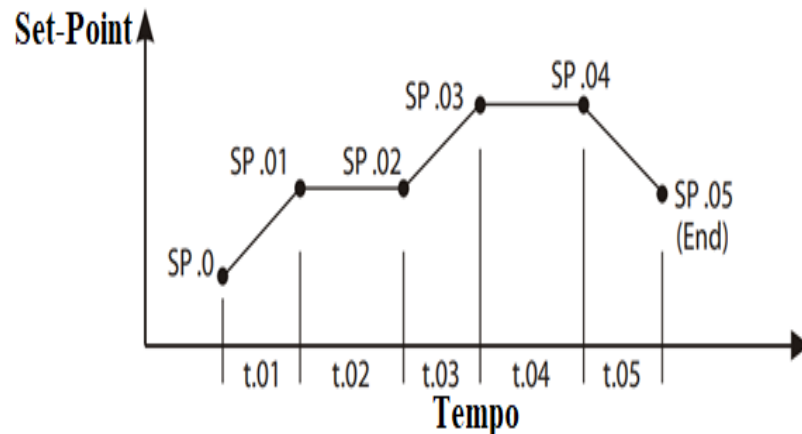


Fonte: Adaptada de FUENTES, 2016.

A (Figura 18) apresenta a variação de temperatura no processo de aquecimento por chama, e respectivamente o controle de combustível por válvula.

Controle de Rampas e Patamares

Nesse processo deve-se configurar o parâmetro Pg.oP=YES, no bloco de configurações, para habilitar o bloco de programas, caso haja saídas de alarmes, as saídas deveram ser configuradas no bloco de configurações. Por fim, traçar o perfil técnico desejado como o exemplo da figura abaixo (CONTEMP).

Figura 19: Rampas e Patamares

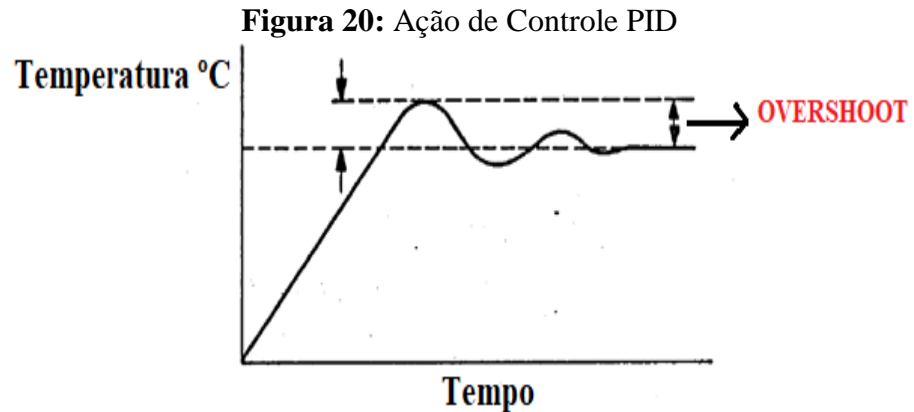
Fonte: Adaptada de CONTEMP.

A (Figura 19) apresenta um exemplo de rampas e patamares com set-point de 5 seguimentos, SP.0, SP.01, SP.02, SP.03, SP.04 e SP.05, e suas respectivas temperaturas, t.01, t.02, t.03, t.04, t.05.

Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

O controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o tipo de controle mais utilizado em processos industriais no mundo todo, sua popularidade se dá em parte ao seu desempenho com ampla gama de combinações de funcionamento, além disso, permite que o operador desfrute de uma plataforma simples e objetiva (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Esse controle de processo é uma combinação de outros três tipos de controles, o proporcional, integral e derivativo. Sendo que o erro é aplicado ao sinal de entrada, onde o sinal do amplificador junta-se ao integrador e o diferenciador. Pode-se dizer que a ação do integral está intimamente relacionada à precisão do sistema, sendo responsável pelo erro nulo em regime permanente. Já a ação derivativa tende a aumentar a estabilidade relativa em todo sistema, a medida que torna a resposta do processo mais rápida, proporcionado pelo seu efeito antecipatório (COUTO, 2006).

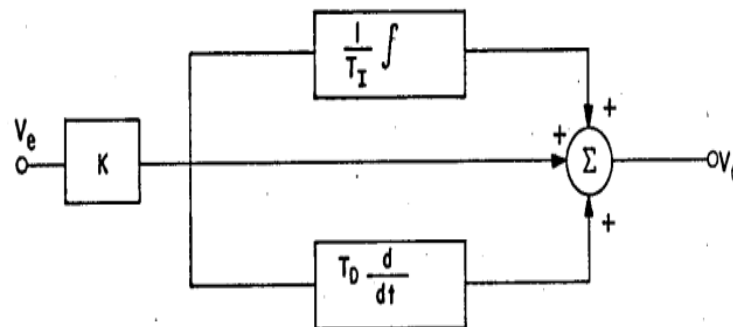


Fonte: Adaptada de MELO, 1985.

A (Figura 20) mostra a curva típica de estabilização no controle de temperatura PID, destacando o overshoot no set-point de temperatura.

Segundo MELO (1985, p.52) o controlador PID é soma dos elementos de controle proporcional, integral e derivativo. Como sugere o diagrama de blocos da figura seguinte.

Figura 21: Diagrama de Blocos do Controle PID.



Fonte: Adaptada de MELO, 1985.

Na (Figura 21) (V_e) é o erro ou desvio, (V_c) sinal de saída do controlador.

2.12 ABORDAGEM MATEMÁTICA DO CONTROLADOR PID

Segundo MATAS (2012, p.22) a relação de entrada e saída de um controlador proporcional (P) pode ser dado pela (Equação 5).

$$U(t) = K(p)e(t) \quad (5)$$

Onde:

$U(t)$: Valor aplicado na planta;

$K(p)$: Constante do proporcional;

$e(t)$: erro da entrada pela saída;

Segundo Couto (2006) o integrador (I) de um circuito que executa a ação matemática de integração, pode ser apresentado como somatório dos produtos dos valores instantâneos de entrada, por pequenos intervalos de tempo. E a lei matemática que define essa relação no controlador proporcional- integral (PI), é dada pela (Equação 06).

$$U(t) = K(p)e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (6)$$

Onde:

$U(t)$: Valor aplicado na planta;

$K(p)$: Constante do proporcional;

$e(t)$: erro da entrada pela saída;

Ki : constante do integrador;

Segundo MATAS (2012, p.23) o controlador derivativo (D) tem como função principal reduzir o erro entre a saída e o valor de referência, essa relação pode ser definida pela (Equação 7).

$$U(t) = K(p)e(t) + K(d) \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Onde:

$U(t)$: Valor aplicado na planta;

$K(p)$: Constante do proporcional;

$e(t)$: erro da entrada pela saída;

Kd : constante do derivativo;

3 MÉTODO DE EXECUÇÃO DO PROJETO

Esta etapa do trabalho foi desenvolvida com base nos recursos tecnológicos já apresentados, foram projetados a construção da carcaça do forno (incluindo toda fuselagem metálica utilizada), a montagem dos circuitos eletroeletrônicos, e a caracterização do forno.

3.1 CARÇAÇA E SUPORTE DO FORNO

Para construção da carcaça e suporte do forno foram utilizados, chapa galvanizada, vara de metalon na bitola (40x20 mm), cilindro de alumínio, parafusos de aço, chapa circular de ferro (para o suporte rotativo do forno), eletrodos para soldagem (E 6013-2,5 mm), todos os materiais foram adquiridos numa loja de ferro velho localizada na rua Lauro Sodré na cidade de Abaetetuba-PA. Os materiais, valores e quantidades estão expostos na tabela seguinte.

Tabela 8: Materiais

Material	Medidas (m)	Quantidades	Valores (R\$)
Metalon (40x20 mm)	4	1e ½	60,00
Chapa Galvanizada	1,0x0,4x0,002	2	20,00
Cilindro de Alumínio	0,25x0,17x0,004	1	30,00
Parafusos de Aço	0,1	2	2,00
Chapa Circular de Ferro	0,3	1	15,00
Eletrodos p/ Soldagem (E 6013)	0,28x0,0025	20	35,00
Primer Branco	900ml	1	40,00
Primer Cinza	900ml	1	35,00
Cabos Elétricos	10	-	60,00
Tinta Automotiva Metálico	900ml	1	70,00
Arrebites e Parafusos	-	22	10,00
-	-	TOTAL	377,00

Fonte: Próprio Autor.

Na fase de usinagem da armação do forno, foram cortadas 05 (cinco) peças de metalon (40x20 mm), com 48 cm de comprimento, para servirem de travessas e (02) duas peças de 160 cm para as laterais. Após a soldagem das peças, a estrutura ficou com 160 cm de altura e 52 cm de largura, como apresentado na figura abaixo.

Figura 22: Armação da Carcaça
(a) (b)

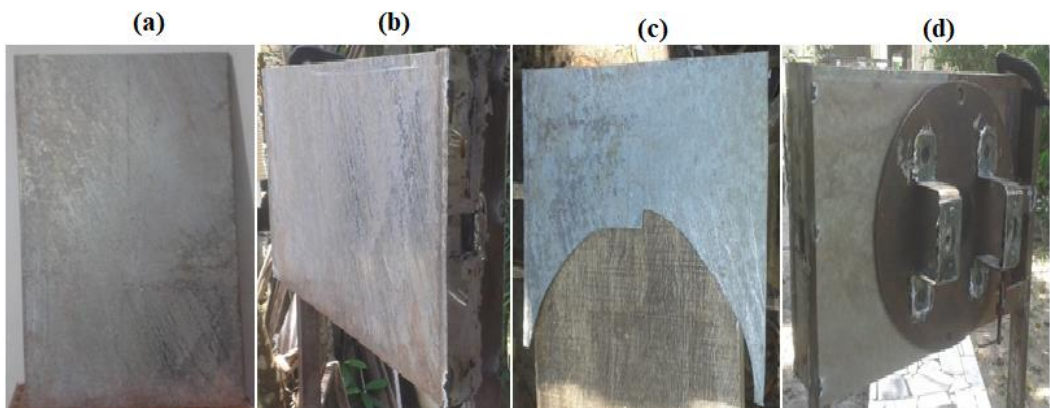


Fonte: Próprio Autor.

A (Figura 22) mostra em (a) uma vista geral da parte frontal da armação, já com o disco e cilindro do forno, em (b) a parte superior traseira e (c) parte superior em perfil.

Após a soldagem das peças da armação, foi dado início ao chapeamento da parte superior, afim de proteger dos efeitos indesejáveis do calor, tanto o operador, quanto os equipamentos eletroeletrônicos que compõem o painel de controle localizado na parte traseira do forno. Para isso, foram utilizadas (02) duas chapas galvanizadas de 52 cm x 40 cm e 02 mm de espessura. As chapas foram soldadas na estrutura, de modo a forrarem a armação nas duas faces (frontal e traseira), sendo uma delas vasada (frontal), para deixar livre o disco de rotação do forno. A figura 23 mostra esse processo.

Figura 23: Recorte das Chapas.



Fonte: Próprio Autor.

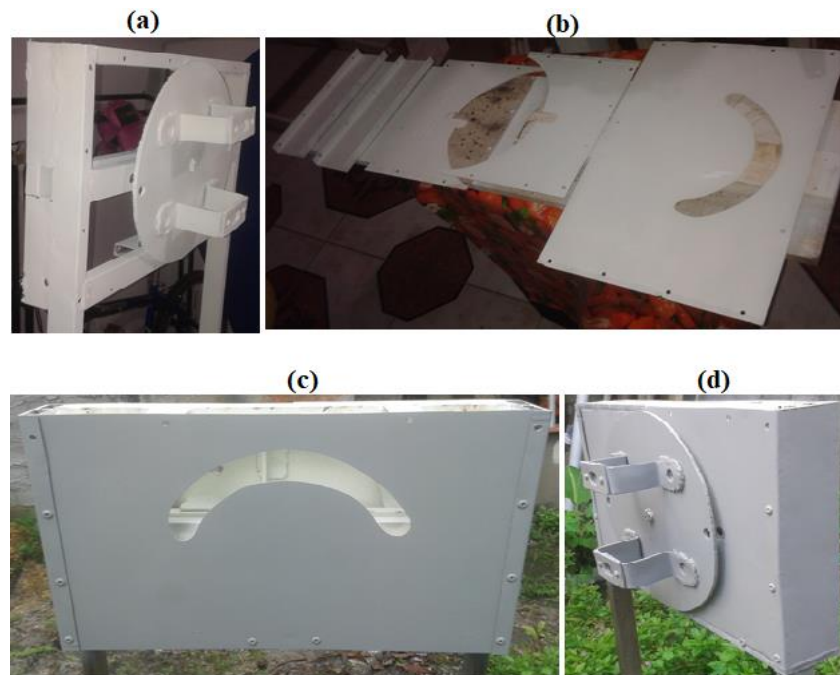
A (Figura 23) apresenta em (a) uma das chapas já nas dimensões adequadas, em (b) essa mesma chapa soldada na face traseira, em (c) uma chapa moldada e (d) essa chapa fixa na face frontal, juntamente com o disco de rotação e o suporte do cilindro. A figura seguinte mostra a fuselagem toda fixada na armação.

Figura 24: Chapas Fixadas.



Fonte: Próprio Autor.

Com a parte da fuselagem terminada, foi dado início à pintura do equipamento, primeiramente foi realizada uma limpeza com solvente Thinner (B52 900 ml, da marca Veloz) em toda superfície a ser pintada, para remover qualquer resíduo indesejado no processo. Em seguida as partes metálicas foram pintadas, com o auxílio de uma bomba manual, base primer universal branco 900 ml da marca OPEX, para parte interna dos metais e base primer universal cinza 900 ml (aparelho automotivo) da marca OPEX na parte externa, ressalta-se que ao término da usinagem da carcaça, será executada a pintura geral do equipamento com tinta automotiva METÁLICO CINTILANTE da marca VELOZ.

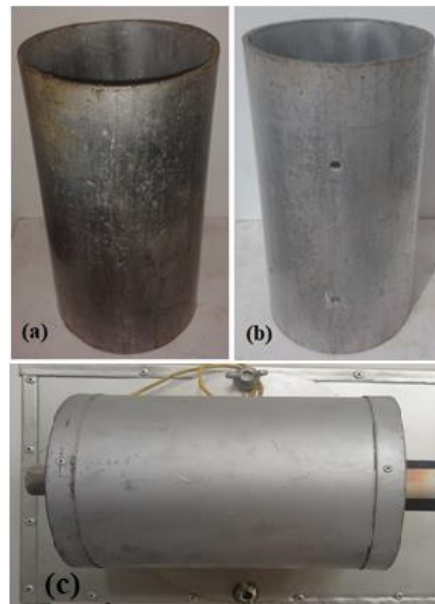
Figura 25: Aplicação da base Primer

Fonte: Próprio Autor.

Na (Figura 25) em (a) armação pintada, (b) chapas internas pintadas, (c) e (d) chapas externas montadas e pintadas. E mais adiante será apresentado o forno montado e com toda pintura finalizada.

3.2 CILINDRO DO FORNO

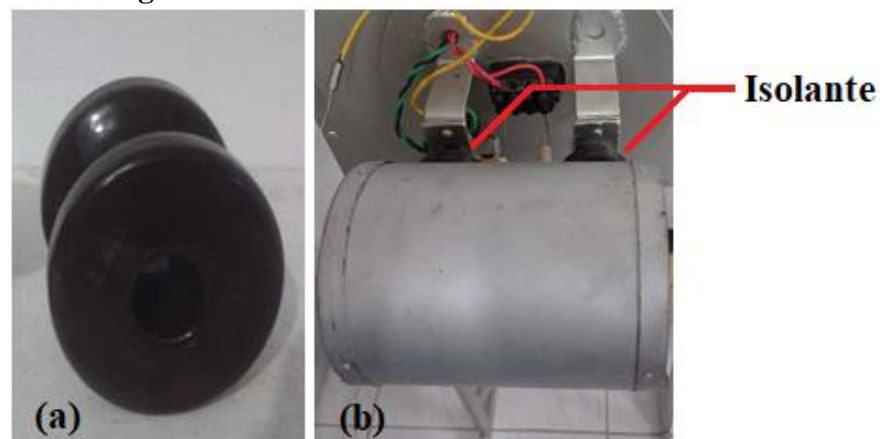
Para confecção do forno, foi usado um cilindro de alumínio de 25 cm de comprimento, 17 cm de diâmetro e 4 mm de espessura. Utilizado para conter em seu interior o sistema de aquecimento, formado pela resistência elétrica e o tubo refratário de alumina (tubo de trabalho), bem como o isolamento térmico, composto por uma manta térmica (lã de vidro).

Figura 27: Cilindro de Alumínio.

Fonte: Próprio Autor.

Na (Figura 27) estão presentes em (a) o cilindro antes de ser perfurado, (b) o cilindro perfurado para acoplamento dos parafusos de aço, que permitiram a fixação do mesmo no suporte e (c) o cilindro já fixado no suporte.

Como um dos pré-requisitos para utilização desse equipamento é o trabalho, em alguns casos com elevadas temperaturas, foi aplicado nas conexões do cilindro, o isolamento térmico, por meio de isolante cerâmico (com a finalidade de diminuir a condução térmica do cilindro para as peças metálicas da fuselagem), assim como para a fixação do mesmo, foram utilizados (02) dois parafusos de aço, para suportarem as altas temperaturas, sem oxidar.

Figura 28: Isolante Termoelétrico Cerâmico

Fonte: Próprio Autor.

Esse isolante termoelétrico mostrado na (Figura 28), é amplamente empregado em instalações elétricas primárias de baixa tensão. Em (a) apresenta-se o isolante e (b) o mesmo isolante fixado ao suporte do forno.

3.3. RESISTÊNCIA ELÉTRICA

O aquecimento do forno é alcançado por meio de uma resistência elétrica acoplada no interior do cilindro. Esse sistema de aquecimento é formado por uma resistência elétrica (constituída de um fio extenso de Nicromo V), um tubo refratário de alumina (que serve simultaneamente de suporte da resistência elétrica e área de trabalho), e uma malha de lã de vidro enrolada na resistência, de modo a preencher todos os espaços internos do cilindro de alumínio, com isso proporcionando o isolamento térmico e reduzindo o gradiente de temperatura externo que atua no sistema, protegendo os equipamentos e operadores dos efeitos nocivos das altas temperaturas.

Figura 29: Resistência.



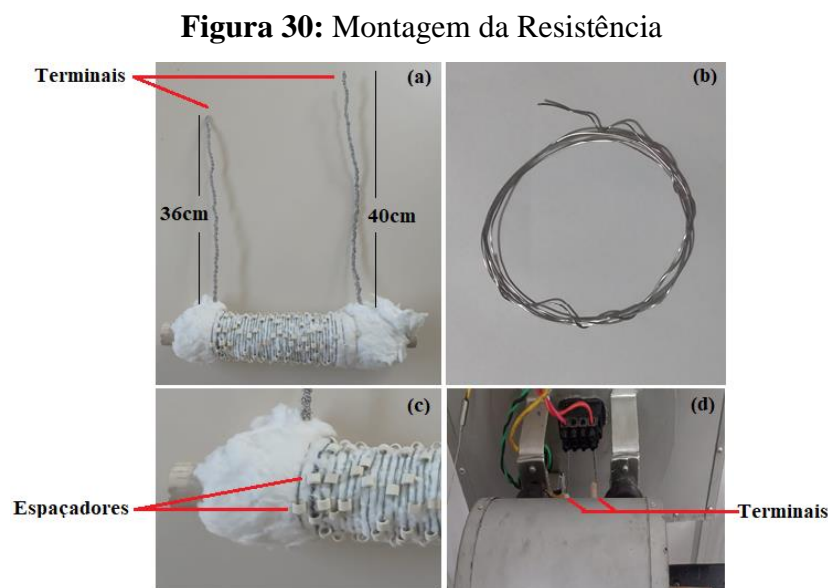
Fonte: Próprio Autor.

A (Figura 29) mostra o protótipo da resistência montado no período de testes.

Para confecção da resistência foram usados 11,75 metros de fio Nicromo V (composto por 80% Ni, 20% Cr; Resistência elétrica de $2,08340 \Omega/m$; Diâmetro de 0,813 mm; Ponto de Fusão de $1.400^{\circ}C$), um tubo refratário de alumina para altas temperaturas com 36 cm de

comprimento, diâmetro externo de 31,6 mm, diâmetro interno de 25,6 mm e espessura de 3 mm. Inicialmente foram determinadas a quantidade de 11,75 m do fio de Nicromo V para confecção da resistência elétrica, a resistência equivalente total obtida foi de $24,5 \Omega$. Feito isso, foram determinadas as distâncias nos pontos de entrada e saída das correntes, de modo a proporcionar um espaço para a conexão dos mesmos nos terminais isolantes do circuito.

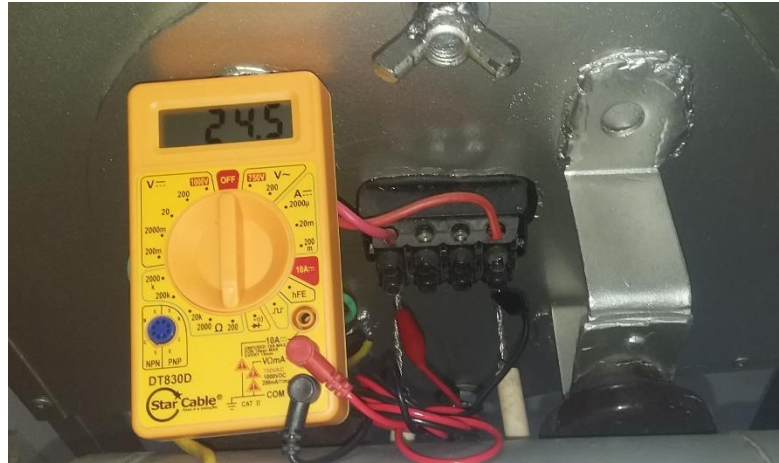
Após a determinação das medidas, foi dado início ao enrolamento do fio no tubo, com a utilização de anéis espaçadores de alumina, para evitar o contato entre as partes do condutor. Ao término da primeira camada de fio enrolado, foi usado um pedaço de lã isolante, para evitar o contato entre os fios das camadas seguintes, foram montadas um total de 3 camadas de fio enrolado, com uma distância média de 0,5 cm entre cada passada de fio. Como mostra a figura seguinte.



Fonte: Próprio Autor.

Na (Figura 30) é apresentado em (a) a resistência elétrica já montada no tubo de alumina, (b) uma amostra do fio de Nicromo V utilizado nesse processo, (c) anéis espaçadores de alumina com média de distância de 0,5 cm entre os fios e (d) pontos de entrada e saída já conectados ao terminal isolante do circuito.

Figura 31: Medida da Resistência.



Fonte: Próprio Autor.

A (Figura 31) mostra a medida da resistência elétrica do forno, aferida após a montagem do circuito de aquecimento no cilindro, por um multímetro da marca STAR CABLE modelo DT830D.

3.3.1. POTÊNCIA ELÉTRICA

Com base nos valores conhecidos de tensão U (na fonte de alimentação do circuito), resistência equivalente total R , diâmetro D e área A do fio, encontramos a potência elétrica P do sistema, para um comprimento $L=11,75$ m. Como demonstrado nas equações seguintes.

$$A = \pi r^2 \quad (8)$$

Onde;

π : 3,14;

r : 0,4065 mm;

Logo;

$$A = 3,14 \times (0,4065)^2$$

$$A = 0,52 \text{ mm}^2$$

De acordo com essas medidas, determinaremos a resistência ôhmica, para comparar com o valor da literatura.

$$R_o = \frac{R_{eq}}{L} \quad (9)$$

Onde;

R_o : Resistência ôhmica em Ω/m ;

R_{eq} : Resistência Equivalente Total em Ω ;

L : comprimento total do fio Nicromo V em m;

Logo o valor será:

$$R_o = 24,5/11,75$$

$$R_o = 2,08 \Omega/m$$

Esse resultado está de acordo com o valor encontrado na literatura, conforme apresentado na (Tabela 2).

Uma vez conhecida a tensão na alimentação do circuito e a resistência, determinaremos a corrente elétrica I pela lei de ohm.

$$I = \frac{U}{R} \quad (10)$$

Onde;

I : corrente em A;

U : tensão em V;

R : resistência em Ω ;

Logo o valor será:

$$I = 110/24,5$$

$$I = 4,5 \text{ A}$$

Portanto a potência elétrica do sistema é dada por:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (11)$$

Onde;

P: Potência em W;

U²: Quadrado da tensão;

R: Resistência em Ω ;

Logo o valor será:

$$P = (110)^2 / 24,5$$

$$P = 494 \text{ W}$$

3.3.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Em um condutor qualquer, sua resistência elétrica depende de alguns fatores, somados as mudanças causadas pela variação de temperatura, que são: o comprimento do condutor, a área de sua seção transversal e um parâmetro importante, denominado de resistência específica do material, comumente chamada de resistividade. Sabemos que a resistência de um material aumenta, com o aumento da temperatura e se esse aumento ocorrer sem muitas variações, podemos dizer que a resistividade aumenta de modo linear. Utilizando a equação empírica abaixo, podemos determinar a resistividade do material Nicromo V (resistência do forno) a uma temperatura de 1000°C, essa temperatura é a referência máxima de trabalho.

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (12)$$

Onde;

ρ_0 : Resistividade do metal a 25°C ($1,1 \times 10^{-6} \Omega/m$);

ρ : Resistividade a 1000°C;

α : 0,00013 (coeficiente térmico do Nicromo);

T₀: Temperatura inicial (25°C);

T: Temperatura final (1000°C);

Logo o valor será:

$$\rho = 1,1 \times 10^{-6} \times (1 + 0,00013 \times 975)$$

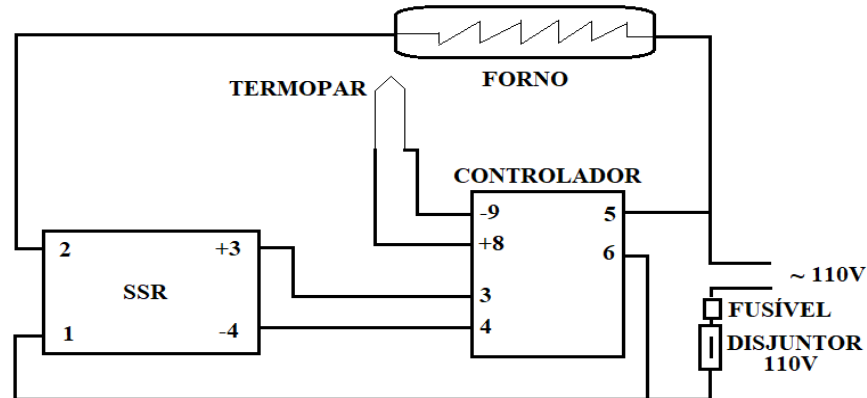
$$\rho = 1,4 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$$

Com base nesses resultados, podemos observar que ao aumentar o valor da temperatura, a resistividade final do metal também aumentou, mostrando que o sistema de aquecimento do forno atende as necessidades.

3.4 CIRCUITO

O circuito foi montado num gabinete metálico acoplado na parte traseira do forno, é composto por um relé de estado sólido (SSR) da marca METALTEX modelo TSZC-40A, um controlador CONTEMP modelo CTM45, um disjuntor elétrico duplo de 110V, um fusível de segurança, um LED de luz verde que indica estado de operação e cabos elétricos. Como mostrado no esquema seguinte.

Figura 32: Esquema do Circuito

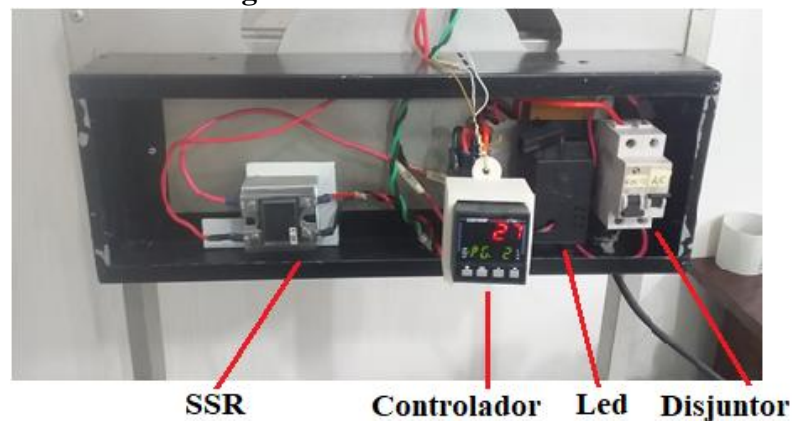


Fonte: Próprio Autor.

Após a fixação do gabinete e seguindo a montagem do esquema acima, foram escolhidos os locais de colocação dos equipamentos, iniciando pelo disjuntor elétrico de 110V, que foi estrategicamente colocado na entrada da fiação de alimentação do circuito e posterior ao fusível de segurança, esse registro duplo executa duas funções: como chaveamento elétrico (para energizar o sistema) e no controle dos pulsos elétricos direcionados ao forno (Liga/Desliga). O controlador foi posicionado ao centro do painel a uma distância segura do relé, uma vez que este se aquece quando em funcionamento.

No controlador as ligações foram feitas da seguinte maneira, os bornes (5 e 6) são para alimentação na fonte de tensão 110V- 220V, os bornes (3 e 4) são ligados respectivamente nos bornes (+3 e -4) do relé de estado sólido, e o termopar foi ligado aos bornes (+8 e-9) no controlador. O relé de estado sólido (SSR) METALTEX, foi fixado ao dissipador térmico de alumínio a esquerda do gabinete, esse dissipador foi confeccionado a partir de um perfil de alumínio adaptado. Na união entre relé e dissipador, foi aplicado uma pasta térmica afim de formar uma junta que facilitará a troca de calor, o borne (2) saída de sinal (OUTPUT) foi conectado diretamente ao forno, o borne (1) ligado a fase, os bornes (+3 e -4) que são as entradas de sinais (INPUT), foram ligados ao controlador. O circuito montado é apresentado na figura seguinte.

Figura 33: Circuito Montado



Fonte: Próprio Autor.

A (Figura 33) apresenta todos os componentes montados no painel, com exceção do termopar, que é montado no cilindro de aquecimento, como mostra a figura seguinte.

Figura 34: Termopar Montado



Fonte: Próprio Autor.

Na (Figura 34) podemos observar o termopar instalado no circuito e acoplado ao suporte metálico na entrada do tubo de aquecimento.

Figura 35: Forno montado



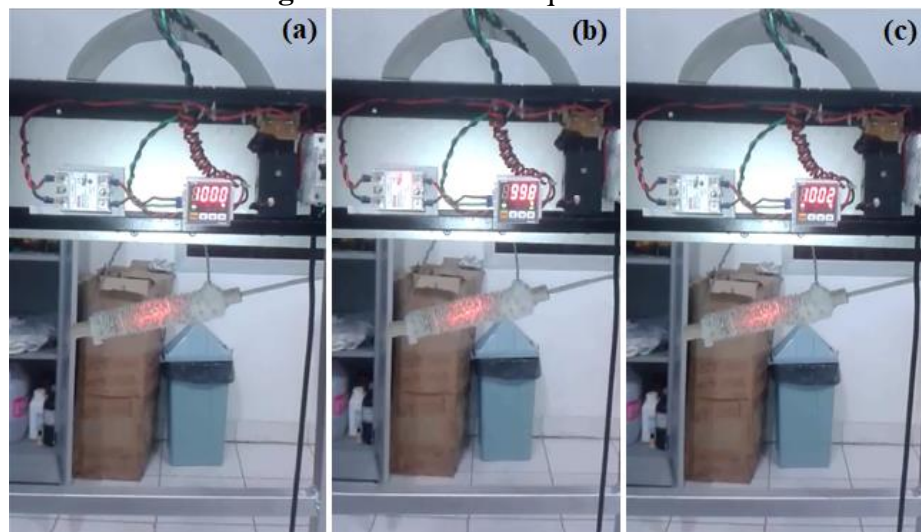
Fonte: Próprio Autor.

Observa-se na (Figura 35) em (a) visão geral e frontal do forno, (b) visão geral e traseira do forno, com todo circuito eletroeletrônico montado.

3.5 MEDIÇÕES

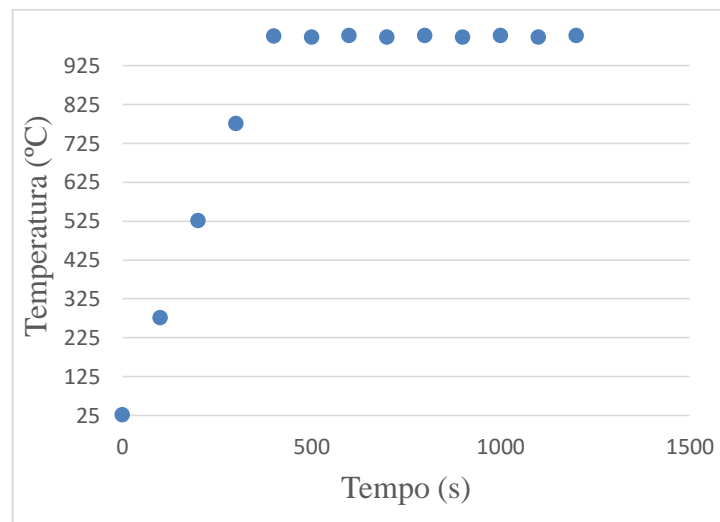
Ao término do processo de montagem do forno, foram realizados testes de aquecimento. Esses testes serviram para conferir se o forno atende aos requisitos de operações propostos. Para isso foi programado no controlador CONTEMP, dois tipos de patamares com controle ON/OFF: (P1) com setpoint de 25°C a 1000°C (essa temperatura inicial foi aceita com base na temperatura do ambiente), em rampas de aquecimento, levando aproximadamente 400 segundos para atingir a temperatura desejada, e outro (P2) após alcançar a temperatura de setpoint predeterminada, o controle de temperatura constante será feito admitindo um pulso de corrente elétrica intermitente (Controle Liga/Desliga), que manterá a temperatura (+/-2°C) em torno 1000°C. Como mostrado na imagem a seguir.

Figura 36: Teste de Aquecimento



Fonte: Próprio Autor.

A (Figura 36) mostra o processo de aquecimento, onde a resistência foi fixada frontalmente abaixo do cilindro do forno e conectada ao termopar, para aferição dos dados de temperatura. Observa-se em (a) o valor alcançado de temperatura setpoint predeterminada no primeiro patamar de 1000°C, e (b) e (c) o controle de temperatura em torno de 1000°C, com variação de (+/- 2°C). Ressalta-se que este teste foi executado nas condições normais de temperatura e pressão (CNTPs).

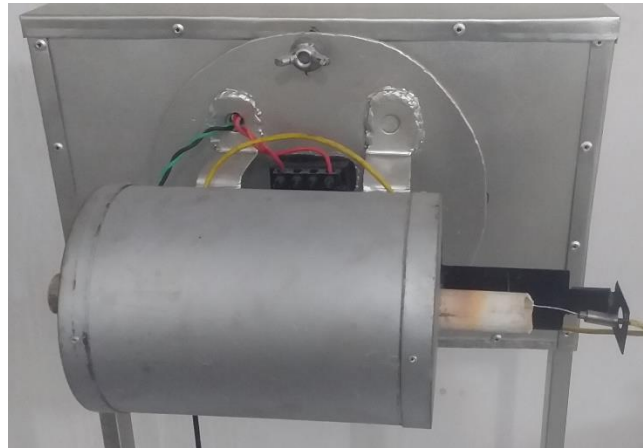
Gráfico 1: Aquecimento com step de 1000°C.

Fonte: Próprio Autor.

O (Gráfico 1) com valores de aquecimento para o step de 1000°C, após atingir esse valor, o controle ficou em valores constantes.

O segundo teste foi executado com a resistência já montada no núcleo do cilindro, com o forno resfriado e em temperatura ambiente (em torno de 25°C). Configurado para um setpoint de 450°C, executando um patamar de temperatura análogo ao primeiro teste, controle ON/OFF, onde ao se atingir o setpoint programado, o controle ficará em torno da temperatura alvo. Ressalta-se que este teste foi executado nas condições normais de temperatura e pressão (CNTPs).

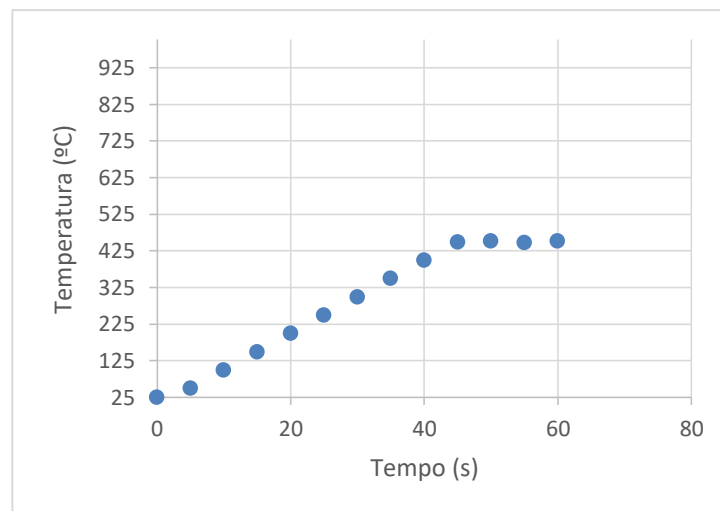
Figura 37: Resistência Montada no Forno.



Fonte: Próprio Autor.

Na (Figura 37) apresenta-se a resistência elétrica montada no cilindro do forno para execução dos testes de aquecimento.

Gráfico 2: Aquecimento com step de 450°C.



Fonte: Próprio Autor.

No (Gráfico 2) pode-se observar os resultados obtidos para o step de 450°C.

Em comparação com os resultados apresentados, pode-se observar que para um valor de setpoint diferente, ambos apresentam uma flutuação de temperatura semelhante ao atingirem o valor desejado. Outra observação para esses gráficos, é que para um valor de setpoint menor, o sistema de aquecimento também apresenta um tempo de subida menor. Para o setpoint de 1000°C o tempo de subida foi de 400 s, já para o setpoint de 450°C foi de 45 s.

Essa diferença se deve pelo fato de no segundo teste, setpoint de 450°C, a resistência estava posicionada no centro do cilindro de aquecimento, mantendo-se totalmente isolada termicamente, e isso pode representar fisicamente um melhor rendimento na taxa de transferência de potência térmica irradiada. E o gradiente de temperatura externo ao cilindro do forno, no segundo teste, pôde ser controlado, devido atuação do sistema de isolamento térmico do cilindro, representando um valor de aproximadamente 25°C enquanto o forno estava desligado (temperatura do ambiente), e 55°C quando o forno atingiu os valores máximos de aquecimento.

Outro ponto importante a ser analisado pelos gráficos, é o fato da temperatura do sistema ser praticamente linear em relação ao tempo, isso pode proporcionar ao sistema uma variação constante de temperatura durante o processo de aquecimento até que seja atingido o setpoint, refletindo numa melhor eficiência de aquecimento, principalmente nos instantes iniciais das operações. Esses resultados demonstram que a aplicação desse forno pode representar um importante avanço no desenvolvimento de trabalhos alternativos e que garantam resultados satisfatórios.

4. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho de conclusão de curso exigiu do autor uma grande quantidade de pesquisas e inúmeros levantamentos acerca dos equipamentos a serem utilizados, tanto no circuito de controle, quanto na confecção do forno e resistência elétrica. Com base nos conhecimentos acumulados ao longo do curso, foi possível confeccionar um circuito de controle que fosse capaz de suprir as necessidades de alguns tipos de trabalhos realizados nesta universidade, igualmente para a construção do forno e sistema de aquecimento. Nesse processo ocorreram grandes dificuldades, como a incompatibilidade do antigo controlador AUTONICS com o relé de estado sólido (SSR), tal problema foi sanado com a substituição do mesmo pelo controlador CONTEMP CTM 45, que acabou por ser uma escolha assertiva, uma vez que com o antigo controlador não era possível configurar os patamares e rampas de operações.

Após a montagem do forno, foram feitas medições com controle ON/OFF, aquecendo até 1000°C e 450°C, afim de se obter os padrões de aquecimento que atendam aos requisitos do projeto. No entanto, essas medições exigiram um tempo muito grande, uma vez que se teve

que esperar o sistema esfriar para que pudessem ser realizadas novas medições (a cada medição executada, o sistema leva em média duas horas para retornar a temperatura ambiente). Outra grande dificuldade encontrada no projeto, se dá pela forma de aquisição dos dados de temperaturas lidos pelos sensores (termopares), onde o processo conta com a intervenção do operador para aferição e controle das medições, esta intervenção humana fará com que os resultados estejam mais suscetíveis a erros. No entanto pode-se apontar como sugestões de trabalhos futuros: 1) A implantação de um Software de leitura e controle de dados, como por exemplo o Arduino, que é uma plataforma de prototipagem de computação capaz de interagir com o ambiente por meio de Hardware e Software, podendo ser conectado a um computador para recebimento ou envio de dados; 2) O uso, quando necessário, de uma atmosfera de trabalho controlada por gases inertes, cujo método protege o material a ser trabalhado dos efeitos indesejáveis da oxidação, pôr exemplo, esse processo pode ser conseguido por meio da aplicação de um tubo de quartzo introduzido na câmara de aquecimento e adaptado ao sistema de injeção de gases;

Com base nos resultados e nos elementos aqui expostos, o forno tubular objeto desta pesquisa, mostrou-se eficiente para operações simples de controle de temperatura, com aplicações semelhantes as desenvolvidas pelos fornos tradicionalmente comercializados, mas com pequeno custo financeiro, como exposto na (Tabela 8). Acreditamos que a conclusão desse trabalho, possa representar um avanço no desenvolvimento de trabalhos alternativos, contribuindo positivamente para o crescimento e desenvolvimento de pesquisas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ayrton G. **Adega climatizada para vinhos utilizando a célula de Peltier**, 2013, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior em Engenharia da Computação. Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2013.

ALMEIDA, Bruno Vidal de. **Refratários magnesianos de panela de aciaria: redução da oxidação inicial, formação da fase espinélio $MgAl_2O_4$ e resistência ao dano por choque térmico**, 2016, Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de Lorena, Lorena 2016.

ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, Disponível em: <<http://www.analogica.com.br/arquivos/nt-012-forno-a-arco-voltaico-de-usolaboratorial-rev0.pdf>> Acesso em: 20 de agosto. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10237: MATERIAIS REFRAATÓRIOS – CLASSIFICAÇÃO**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575: IMPERMEABILIZAÇÃO – SELEÇÃO E PROJETO**. Rio de Janeiro, 2010.

BARROSA, Marcelo Rosário. **Princípios Fundamentais de Transferência de Calor**, 2004, Graduação (Departamento de Engenharia Naval e Oceânica).

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio Janeiro: LTC, 2002.

CATAI, Rodrigo Eduardo. PENTEADO, André Padilha. DALBELLO, Paula Ferraretto. **Materiais, Técnicas e Processos para Isolamento Acústico**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2006. Foz do Iguaçu-PR, Brasil. Disponível em: <<http://www.ceap.br/material/MAT12032009181855.pdf>>. Acesso em: 01 de setembro. 2019.
 CESTILE, Marlon, **Materiais elétricos: Compêndio de trabalhos, fornos elétricos**, 2012, volume 4, Unioeste, 2012.

COCOTA JÚNIOR, José A. N. **Sistema de monitoramento de temperatura e umidade, e proposta de controle por condicionamento do ar em museus**, 2005, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

CONTEMP Medições, Controle e Monitoramento de Processos Industriais, disponível em: <<http://www.contemp.com.br/manualdeinstrucoes/>> Acesso em: 07 de janeiro. 2021

COUTO, Gustavo R. **Modelagem e desenvolvimento de controles de sistema termo-hidráulico, e interfaces para a aquisição e controle de dados**, 2006, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

FUENTES, Rodrigo C. **Apostila de automação industrial**, 2016, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

GRUPO ECIL, Disponível em: <http://www.ecil.com.br/temperaturaindustrial/pirometria/termopares/termopar-tipo-k/> Acesso em: 05 de agosto. 2019.

GUERRA, Leonardo N. A. **Uso de compensador PID no controle da taxa de variação de temperatura em um forno elétrico a resistência**, 2006, Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

LUZ, Adão Benvido da. **Tratamento de Minérios 5ª Edição**, 2010 Eng. de Minas/UFPE, Dr. Engenharia Mineral/USP, Pesquisador Titular do CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - MCT Rio de Janeiro 2010.

MAMEDE, Filho João. **Instalações Elétricas Industriais 6ª Edição**. Rio Janeiro: LTC, 1997.

MATAS, Alexandre L. **Sintonia de controladores PID, com controle adaptativo por modelo de referência (MRAC) aplicado a um motor de corrente contínua**, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior em Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MELO, Rosecléa L. O. **Implementação de controle digital PID com microcomputador**, 1985, Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

METALTEX – Componentes Eletrônicos, disponível em: <http://www.metaltex.com.br/componenteseletronicos/> Acesso em: 08 de julho. 2021.

NATIONAL INSTRUMENTS Disponível em: <http://www.ni.com/whitepaper/3782/pt/> Acesso em: 10 de agosto. 2019.

NETO, Antônio Klein. **Manual de Conservação de Energia elétrica**, Rio de Janeiro 1989, (Fornos Elétricos a Indução) – Rio de Janeiro: Procel, 1989.

OLIVEIRA, Murilo T. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados via USB utilizando termopares**, 2008, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

REIS, José Carlos Dias. **Medidas do Coeficiente de Transferência de Calor em Fornos Combinados**, 2012, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Biológicos – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul – SP, 2012.

SENAI, APOSTILA, Disponível em
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFI3sAC/fornos-eletricos-industriais>> Acesso em: 26 ago. 2019.

SOARES, B.D. Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica, 2007, Dissertação de Mestrado pela Faculdade de Engenharia Química – Universidade Federal de Uberlândia-MG, 2007.

Termopar Tipo k, disponível em: <
<http://www.ecil.com.br/temperaturaindustrial/termopares/termopar-tipo-k/>> Acesso em: 15 de setembro. 2019.

TRAJANO, R.B. “Curso de Metalurgia Extrativa Geral”. PUC/RJ, 1969.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Furnaces and Refractories. 2006.