



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Projeto Integrador 2

Forno para Tratamento Térmico de Materiais

Autor: Forno S&A
Orientador: (Profº. Randher Viana)

Brasília, DF
2016



Forno S&A

Forno para Tratamento Térmico de Materiais

Relatório da disciplina de (Projeto Integrador 2).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: (Profº. Randher Viana)

Coorientador: (Profº Sébastien Roland, Profº Alex Reis)

Brasília, DF

2016

Forno S&A

Integrantes

Integrante	Matrícula	Engenharia
Alexandre de Sousa Ribeiro	13/0099716	Automotiva
Amanda Guimarães Ferreira	13/0020991	Energia
Brenda Tinoco Castro	11/0025679	Energia
Cristiano Costa de Sousa	10/0044320	Software
Danyara Torres Campos	13/0106941	Energia
Felipe Brito G. Barbosa	11/0011210	Automotiva
Filipe Augusto Valadares de Mattos	09/0006071	Energia
João Antônio Muniz Ruella	12/0014220	Automotiva
Leonardo Avelino de Lima Jacinto	10/0130291	Eletrônica
Luciano Henrique Nunes de Almeida	11/0063392	Software
Luiz Eduardo Rodrigues Silva	11/0150341	Eletrônica
Luiz Henrique Xavier	09/0010272	Energia
Mateus Borges Veras	15/0062877	Energia
Paulo Gabriel Cunha Martins	12/0131978	Aeroespacial
Raimundo Otávio Nogueira Dias	12/0040611	Energia

Resumo

Este documento, registra a ideia central do projeto “Fabricação de Forno para Tratamento Térmico” que consiste em projetar e construir um forno para a execução de tratamentos térmicos de até 1200 graus Celsius em amostras de aço, sendo executado de forma controlada. O forno tem por finalidade fins didáticos.

Palavras-chaves: Forno. Têmpera. Corpo de prova.

Abstract

This document records the central idea of the project “Oven Manufacturing Design for Heat Treatment” consisting in designing and building a furnace to perform heat treatments up to 1200 degrees Celsius in steel samples, performed in a controlled manner. The oven is intended for educational purposes.

Key-words: Oven. Quenching. Specimen.

Sumário

1	CONCEPÇÃO	11
1.1	Introdução	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Contextualização	11
1.3.1	Proposta	12
1.4	Tecnologias Existentes	12
1.4.1	Forno Mufla para Tratamento Térmico	12
1.4.1.1	Aplicações	13
1.4.1.2	Características	13
1.4.2	Forno para Laboratório	13
1.4.2.1	Aplicações	13
1.4.2.2	Características	14
1.4.3	Forno de Laboratório para Tratamentos Térmicos com gases	14
1.4.3.1	Aplicações	14
1.4.3.2	Características	14
1.5	Requisitos	15
1.5.1	Requisitos Operacionais	15
1.5.2	Requisitos Técnicos	15
1.6	Objetivo Geral	16
1.6.1	Objetivos Específicos	16
2	METODOLOGIA	19
2.1	Termo de Abertura do Projeto - TAP	19
2.2	Estrutura Analítica de Projeto - EAP	19
2.3	Gerenciamento	20
2.3.1	Comunicação do Grupo	20
2.3.2	Divisão dos Recursos Humanos	20
2.3.3	Custos	20
2.3.3.1	Orçamento	20
2.3.4	Mapa de Riscos	21
2.3.5	Cronograma	22
3	SOLUÇÃO PROPOSTA	25
3.1	Dimensionamento do Forno	25
3.1.1	Definindo alguns parâmetros de medida dentro do forno para definir os requisitos não funcionais	26

3.2	Cálculo da distribuição de temperatura no interior do forno	27
3.2.1	Cálculo das Potências dissipadas dentro do forno em cada seção	30
3.3	Sistema de Alimentação	32
3.3.1	Tipo de Alimentação	32
3.3.2	Sistema de Aquecimento	32
3.3.3	Cálculo de Potência e Tempo de Aquecimento	33
3.3.4	Dimensionamento da Resistência Elétrica	34
3.3.5	As resistências para aquecimento do forno	35
3.3.6	Distribuição das resistências no forno	36
3.3.7	Fabricação das espiras resistivas	40
3.3.8	Confecção das canaletas na parede do forno	41
3.3.9	Tratamento Térmico	43
3.3.10	Material Submetido ao Tratamento	45
4	RESULTADOS	49
4.1	Simulações	49
4.1.1	Simulação numérica em elementos finitos	49
4.1.2	Malha	50
4.1.3	Parte estacionária	51
4.1.4	Parte transiente	56
4.1.5	Resfriamento	57
4.1.6	Aquecimento	59
4.2	Métodos de Fabricação	61
4.3	Sistema de Controle	63
4.3.1	Sistema de Temperatura	66
4.3.2	Controle PID	67
4.3.3	Trava Eletrônica	68
4.3.4	LCD	69
4.3.5	Resultados	70
4.4	Arquitetura de Software	72
4.4.1	Metodologia de Desenvolvimento	72
4.4.2	Features	73
4.4.3	Requisitos Implementados (PC2)	74
4.4.3.1	Cadastro de Usuário	74
4.4.3.2	Login de Usuário	75
4.4.3.3	Início de Tratamento	75
4.4.3.4	Gráfico em Tempo Real	75
4.4.4	Plano de Teste de Software	76
4.5	Mudanças no Escopo	76
4.5.1	Estrutural	76

4.5.1.1	Isolamento Térmico	76
4.5.1.2	Cimento Refratário	77
4.5.2	Sistema de controle	77
4.5.2.1	Controlador PID	77
4.5.2.2	Microcontrolador	77
4.5.3	Sistema Web	78
4.5.3.1	Arquitetura de software	78
4.5.3.2	Integração	78
	Referências	79
	APÊNDICES	81
	APÊNDICE A – PRIMEIRO APÊNDICE	83
	APÊNDICE B – SEGUNDO APÊNDICE	85
	ANEXOS	87
	ANEXO A – PRIMEIRO ANEXO	89
	ANEXO B – SEGUNDO ANEXO	91

1 Concepção

1.1 Introdução

O tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos materiais sob condições controladas, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir-lhes características mecânicas e estruturais diferentes.

Os tratamentos mais usuais são o recozimento, a normalização, a têmpera, o revenido e o coalescimento. Esses tratamentos são influenciados por alguns fatores que são: o aquecimento, tempo de permanência em determinada temperatura, resfriamento e atmosfera de aquecimento, portanto cada tratamento específico necessita do controle desses fatores.

Portanto um forno de tratamento térmico é de fundamental importância para se realizar esses tratamentos, logo para que o tratamento seja satisfatório, o forno deve ser capaz de variar a temperatura e manter a temperatura de forma satisfatória, de acordo com o tratamento requerido, sem que a temperatura do ambiente externo seja elevado a condições insalubres.

1.2 Justificativa

Uma das atividades de grande importância na ciência dos materiais é o tratamento térmico, que de acordo com Tschiptschin é um ciclo de aquecimento e resfriamento realizado nos metais com o objetivo de alterar as suas propriedades físicas e mecânicas, sem mudar a forma do produto. O tratamento térmico acontece também inadvertidamente, como consequência de um processo de fabricação que cause aquecimento ou resfriamento no metal, como nos casos de soldagem e de forjamento. Esses tratamentos são utilizados em várias situações diferentes como na indústria para alterar características de fabricabilidade, como usinabilidade, estampabilidade ou restauração de ductilidade de metais, o meio acadêmico para o estudo das estruturas microcristalinas dos metais e sua influência nas propriedades do material, e no meio empreendedor como ferramenta para tratamento de vários produtos.

1.3 Contextualização

Um grupo de 15 pessoas de todas as engenharias (Aeroespacial, Automotiva, Eletrônica, Energia e Software) do campus foi montado visando o desenvolvimento de

um forno para tratamentos térmicos, desde a teoria até o produto final. Para tal, diversas reuniões presenciais foram realizadas, bem como a utilização de ferramentas de comunicação online e de armazenamento e compartilhamento de arquivos.

A escolha do tema, bem como das características do forno foram motivadas pela necessidade de ampliar a capacidade da Universidade de Brasília (UnB) de realizar experimentos acerca de materiais. Na idealização do forno, considerou-se a têmpera como a forma de verificação do funcionamento do forno e o aço o material que será tratado. Pretende-se, após a fabricação do forno, disponibilizá-lo para a UnB.

1.3.1 Proposta

Visa-se, ao final do projeto, a fabricação de um forno que possa ser utilizado para o tratamento térmico dos mais diversos materiais, sem que sua superfície externa apresente temperaturas maiores que 60°C e que seja capaz de elevar sua temperatura interna até 1200°C de forma controlada. A progressão da temperatura interna poderá ser definida pelo usuário para atender à sua necessidade.

1.4 Tecnologias Existentes

O mercado de fornos para tratamentos térmicos possui uma grande variedade de modelos e fabricantes devido às diferentes aplicações e a importância desses processos na indústria como um todo. Para atender as diferentes aplicações há um grande número de variações nas especificações. Para a realização desse projeto, nos baseamos em alguns modelos citados abaixo com finalidades semelhantes à aplicação do forno a ser projeto nesse trabalho.

1.4.1 Forno Mufla para Tratamento Térmico



Figura 1 – Imagem ilustrativa de forno para tratamento térmico.

1.4.1.1 Aplicações

Fornos de câmara para o recozimento, endurecimento, têmpera e envelhecimento (tratamentos térmicos de metalurgia) com circulação de ar.

1.4.1.2 Características

- Sensor de Temperatura;
- Isolamento Térmico: em fibra cerâmica pré-moldadas;
- Estrutura do Forno: totalmente em aço inoxidável com programador de temperatura digital micro processado com programação de rampas e set-point;
- Porta localizada na parte frontal com abertura lateral, para o lado esquerdo;
- Painel de controle montado com caixa metálica localizado na lateral do forno, separado do corpo do aquecimento;
- Chave geral (disjuntor), sinalizador de painel ligado e programador de tempo e temperatura;
- Modelos como capacidade entre 20 e 380 litros, potência de 11 a 35kW e temperatura máxima de até 800°C.

1.4.2 Forno para Laboratório

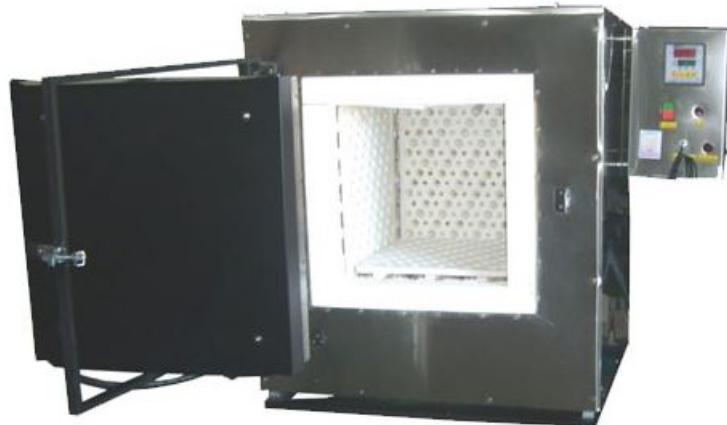


Figura 2 – Imagem ilustrativa de Forno para laboratório.

1.4.2.1 Aplicações

Forno dedicado à laboratórios de química, cerâmica e metalurgia.

1.4.2.2 Características

- Sensor de Temperatura e controlador de temperatura;
- Isolamento Térmico: fibra cerâmica pré-moldada e tijolos isolantes superleves;
- Controlador de Temperatura;
- Estrutura do Forno: Estrutura total em aço inoxidável;
- Aquecimento em todas as paredes e porta e sistema de Acionamento de Gás;
- Precisão de controle em um ponto de $\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- Modelos como capacidade entre 10 e 150 litros, potência de 8 a 18kW e temperatura máxima de até 1320°C .

1.4.3 Forno de Laboratório para Tratamentos Térmicos com gases



Figura 3 – Imagem ilustrativa de Forno de laboratório.

1.4.3.1 Aplicações

Forno dedicado à tratamentos térmicos de metalurgia com caixa de gases.

1.4.3.2 Características

- Caixa de aço inox para tratamento térmico com injeção de gás regulável para tratamentos especiais para todos os tipos de gases;
- Isolação térmica de fibra cerâmica pré - moldada e tijolos isolantes super leves;
- Estrutura total em aço inoxidável;
- Aquecimento em todas as paredes e porta para os fornos de 20 ou mais litros;
- Uniforme distribuição de temperatura;
- Controlador micro processado, PID, 10 rampas e 10 patamares;

- Termopar tipo “S”;
- Controle de segurança para excesso de temperatura e quebra de termopar;
- Opcional - Comunicação com o microcomputador, mais software gráfico;
- Modelos como capacidade entre 40 e 60 litros, potência de 14 a 16kW e temperatura máxima de até 1280°C.

1.5 Requisitos

1.5.1 Requisitos Operacionais

- A temperatura interna do forno será de até 1200°C;
- Temperatura externa máxima de 60°C;
- Obter dados do aquecimento;
- Tratamento térmico para aços;
- Materiais de pequeno porte;
- Cadastro de Usuários;
- Seletor de Temperatura;
- Iniciar Processo de Tratamento;
- Histórico de Sessão;
- Sistema de Segurança;
- Informações sobre os Processos;
- Sistema de Login;
- Variação da temperatura de aquecimento controlada.

1.5.2 Requisitos Técnicos

- Potencia fornecida de 3 KW;
- NR – 6;
- NR – 10;
- NR – 12;

- NR – 14;
- NR – 15;
- Valor das resistencias;
- Tijolos Refratários;
- Tijolos Refratários;
- Dimensionamento interno do forno;
- Isolamento com uma manta térmica;
- Limite das dimensões do aço que pode ser tratado no forno;
- Sistema de alimentação do forno por eletricidade;
- Sensor Termopar tipo K;
- Raspberry Pi 2;
- Circuito de condicionamento de sinal;
- Circuito de controle on/off;
- Django Framework;
- REST Framework;
- Linguagem de Programação Python;
- ReactJS.

1.6 Objetivo Geral

Projetar e construir um forno de tratamento térmico para experimentos acadêmicos.

1.6.1 Objetivos Específicos

- Temperatura do forno até 1200°C com controle liga/desliga;
- Camada externa com temperatura de até 60°C segundo recomendação da OSHA (Opational Safety and Health Administration – órgão americano de segurança do trabalhador);
- Variação da temperatura de $\pm 20^{\circ}\text{C}$;

- Interface web responsável para controle remoto e relatórios;
- Sistema de segurança.

2 Metodologia

Inicialmente foi feito um levamento bibliográfico sobre o funcionamento de um forno para tratamento térmico. O grupo foi dividido em pequenos times formados por 2, 3 ou 4 integrantes responsáveis por cada área específica do forno. Com isso foi feito um estudo específico de cada módulo para desenvolvimento do trabalho.

A metodologia utilizada será a Top/Down, em que consiste projetar o sistema em uma visão geral fragmentando-o até virar um bloco de menor hierarquia. Espera-se como resultado um passo a passo de cada etapa do projeto, com cada módulo bem detalhado até que se obtenham as especificações do sistema abordado.

2.1 Termo de Abertura do Projeto - TAP

O termo de abertura do projeto foi a primeira atividade feita em conjunto e teve como objetivo melhorar o planejamento do grupo, além de auxiliar na definição do escopo do projeto. No anexo A, encontra-se o modelo preenchido pelo grupo.

2.2 Estrutura Analítica de Projeto - EAP

A estrutura analítica do projeto foi definida baseada nos marcos principais e quais atividades deverão ser entregues. Conforme citado na metodologia Top/Down, as atividades foram divididas em módulos de entrega conforme figura abaixo:



Figura 4 – Estrutura Analítica do Projeto.

2.3 Gerenciamento

2.3.1 Comunicação do Grupo

A comunicação será feita por meio de ferramentas online como Whatsapp, Facebook, Google Drive, Dropbox e Skype. Além disso, todas às quartas de 16h às 18h e sextas de 14h às 18h de maneira presencial.

2.3.2 Divisão dos Recursos Humanos

A figura a seguir representa o organograma do projeto, no qual foi escolhido um gerente geral e em todos os subgrupos qualquer integrante tem autonomia para exercer o papel de líder.

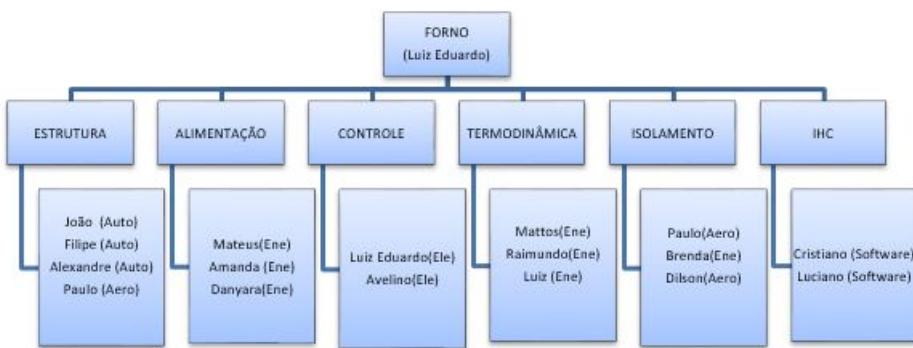


Figura 5 – Recursos Humanos do Projeto.

2.3.3 Custos

Foi feito um levantamento dos principais materiais que serão utilizados e a seguir temos uma planilha de custo inicial:

Produto	Preço unitário (R\$)	Quantidade (uni.)	Preço Total (R\$)	Observações
Chapa de aço carbono	237	1	237	1.2X3.0m 1.5mm de espessura
Refratário isolante	80	15	1200	dimensão: 6x15x35cm
Cantoneira	47	1	47	barra de 6m
Termopar	50	1	50	Tipo K (-100°C a 1200°C)
Vermiculita	10	1	10	5 litros
Resistências	8	30	240	Resistência por metro
		Total	1784	

Figura 6 – Custo do Projeto.

2.3.3.1 Orçamento

Para a aquisição dos produtos, foi feito uma arrecadação de R\$ 80,00 de cada integrante do grupo. Com este valor foi possível obter os principais materiais a serem

utilizados, porém para o ponto de controle 3 será feito mais uma arrecadação com o intuito de comprar os materiais que estão faltando.

Pagamento	
	1ª Parcela (R\$ 80,00)
Luiz Eduardo Rodrigues Silva – 11/0150341	80
Alexandre de Sousa Ribeiro – 13/0099716	80
João Antônio Muniz Ruella – 12/0014220	80
Felipe Brito G. Barbosa – 11/0011210	80
Mateus Borges Veras – 15/0062877	80
Amanda Guimarães Ferreira – 13/0020991	80
Cristiano Costa de Sousa – 10/44320	80
Luciano Henrique Nunes de Almeida – 11/0063392	80
Paulo Gabriel Cunha Martins – 12/0131978	80
Dilson Ferreira Souto Júnior – 12/0115514	80
Filipe Augusto Valadares de Mattos – 09/0006071	80
Raimundo Otávio Nogueira Dias – 12/0040611	80
Leonardo Avelino de Lima Jacinto – 10/0130291	80
Danyara Torres Campos – 13/0106941	80
Luiz Henrique Xavier – 09/0010272	80
Brenda Tinoco Castro - 11/0025679	80
Pago	1280
Valor total	1280
Falta	0
 BANCO	 560
 DINHEIRO	 720
 PLACA CERÂMICA	 435
FRETE DA PLACA	105
RESISTÊNCIA MATTOS	175
TERMOPAR + MÓDULO + TAXA	115
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS	90
2 MAX 6675 + FRETE	55
ARGAMASSA REFRATÁRIA	150
ALIMENTAÇÃO	125
 GASTO	 1250
 SALDO	 30

Figura 7 – Orçamento do Projeto.

2.3.4 Mapa de Riscos

O gerenciamento de riscos visa mapear as ameaças e oportunidades que podem influenciar no projeto, positivamente ou negativamente. Com isso, pretende-se propor alternativas que podem reduzir os impactos ocasionados por situações de alto risco, além de otimizar recursos como tempo e custo, caso aconteça alguma oportunidade.

Visando o gerenciamento de riscos, levou-se em consideração as categorias: C – custo; T – tempo e Q – qualidade. Para tal, também foram definidos cinco níveis de probabilidade de ocorrência e de severidade para se verificar em qual categoria o risco se encaixa.

Descrição do risco	Impacto	Consequências	Probabilidade	Severidade	Classificação do risco	Ação
Manuseio das resistências	Q.T	Dificuldade no encaixe nas canaletas e nas ligações para a conexão em série entre as paredes	1	4	Médio	Utilizar material correto e testar antes da definição
Tomada 20 A	C.Q.T	Não funcionamento do forno	1	3	Baixo	O uso só é permitido em tomadas que suportam mais que 15A
Isolamento total da parte interna	Q.T	Fuga de calor e superaquecimento externo	1	3	Baixo	Assegurar total conexão entre as paredes internas do forno
Contato entre as bobinas das resistências	C.Q.T	Curto circuito entre a resistência, diminuição na resistência interna do forno, aumento da corrente	2	2	Baixo	Verificar e garantir perfeito enrolamento da resistência
Danos a material de produção	C.Q.T	Gastos extras com reposição ou reparo de material	3	4	Médio	Buscar fornecedores confiáveis e atenção ao manusear equipamentos
Perda de dados de teste	T	Atraso do cronograma	1	2	Baixo	Realizar back-up e experimentos substitutos
Controle da corrente sobre a resistência	C.Q.T	Dano nos equipamentos ou mau funcionamento do equipamento	2	4	Médio	Disjuntor para proteção
Termopar incapaz de ler toda a faixa de valores	C.Q.T	Mau funcionamento do controle de temperatura do forno	1	4	Médio	Atentar as especificações do componente
Porta	C.Q.T	Fuga de calor e superaquecimento externo	2	2	Baixo	Assegurar total conexão entre as paredes internas do forno
Integração dos módulos	C.Q.T	Funcionamento parcial do forno	2	5	Médio	Terminar os módulos e não começar a integração próxima ao PC3
Falta de ferramenta	Q.T	Realização de adaptações	2	2	Baixo	Verificar com antecedência a necessidade e disponibilidade
Não envolvimento dos stakeholders no projeto	Q.T	Pessoas desmotivadas e/ou sobrecarregadas no projeto podem gerar deliverables sem qualidade ou atraso no cronograma	2	2	Baixo	Promover reuniões regulares para garantir a integração entre os membros
Energia Local	Q	Mau funcionamento do produto	2	2	Baixo	Garantir que o local onde será utilizado o forno tenha uma rede elétrica em funcionamento



Figura 8 – Mapa de Riscos.

2.3.5 Cronograma

O cronograma do projeto pode ser visualizado na figura a seguir.

	(1)	Nome	Duração	Ínicio	Fim
1		Separação das atividades para o segundo ponto de controle	4d?	13/09/2016	16/09/2016
2		▫ Simulação	28d?	16/09/2016	25/10/2016
3		Finalização do cad	5d?	16/09/2016	22/09/2016
4		Simulação Estática	6d?	23/09/2016	30/09/2016
5		Simulação Transiente	17d?	03/10/2016	25/10/2016
6		▫ espiras	17d?	15/09/2016	07/10/2016
7		Comprar das resistências	2d?	15/09/2016	16/09/2016
8		Dimensionamento e teste de enrolamento das espiras	4d?	19/09/2016	22/09/2016
9		Enrolar as 3 metros de espiras	8d?	26/09/2016	05/10/2016
10		Testar Espiras	3d?	05/10/2016	07/10/2016
11		▫ Placas Ceramicas	27d?	16/09/2016	24/10/2016
12		Usinagem das placas	6d?	16/09/2016	23/09/2016
13		Acabamento das placas	6d?	23/09/2016	30/09/2016
14		Montagem das Canaletas	10d?	30/09/2016	13/10/2016
15		Inserção de cimento na placa	6d?	13/10/2016	20/10/2016
16		Novo acabamento	3d?	20/10/2016	24/10/2016
17		▫ Montagem	6d?	24/10/2016	31/10/2016
18		Junção das Espiras com as placas	3d?	24/10/2016	26/10/2016
19		Teste de funcionamento	3d?	27/10/2016	31/10/2016
20		▫ Eletronica	36d?	12/09/2016	31/10/2016
21		Aquisição do termopar Max 6675	7d?	12/09/2016	20/09/2016
22		Implementação código da temperatura no Arduino	1d?	20/09/2016	20/09/2016
23		Implementação código do LCD	1d?	21/09/2016	21/09/2016
24		Verificar funcionamento do motor da trava	7d?	21/09/2016	29/09/2016

Figura 9 – Cronograma do Projeto (PC2).

25		Pesquisa sobre controle de potência	7d?	29/09/2016	07/10/2016
26		Simulação circuito detector de zero	3d?	07/10/2016	11/10/2016
27		Simulação circuito dimmer com triac	5d?	11/10/2016	17/10/2016
28		Aquisição do material do circuito de controle de potência	3d?	17/10/2016	19/10/2016
29		Implementação do código de controle no Arduino	3d?	19/10/2016	21/10/2016
30		Implementação detector de zero dimmer com triac	7d?	21/10/2016	31/10/2016
31		▫ Mudanças no escopo	1d?	12/09/2016	12/09/2016
32		Arquitetura de software	1d?	12/09/2016	12/09/2016
33		Requisitos	1d?	12/09/2016	12/09/2016
34		Integração	1d?	12/09/2016	12/09/2016
35		▫ Requisitos Implementados	1d?	12/09/2016	12/09/2016
36		Cadastro de usuário	1d?	12/09/2016	12/09/2016
37		Login de usuário	1d?	12/09/2016	12/09/2016
38		Início de tratamento	1d?	12/09/2016	12/09/2016
39		Gráfico em tempo real	1d?	12/09/2016	12/09/2016
40		Gerência de risco	1d?	12/09/2016	12/09/2016
41		Integração e Plano de Testes	1d?	31/10/2016	31/10/2016
42		Preparação do Relatório para o Ponto de Controle 2	7d?	24/10/2016	01/11/2016
43		Revisão do Relatório	2d	01/11/2016	02/11/2016
44		Entrega do Relatório	1d?	04/11/2016	04/11/2016
45		Apresentação do Ponto de Controle 2	1d?	11/11/2016	11/11/2016

Figura 10 – Cronograma do Projeto (PC2 - continuação).

		Nome	Duração	Ínicio	Fim
1		▣ Iniciação	11d?	12/08/2016	26/08/2016
2		Definição Temas	6d?	12/08/2016	19/08/2016
3		Definição Grupo	1d?	19/08/2016	19/08/2016
4		Definição do Escopo do Sistema	7d?	18/08/2016	26/08/2016
5		Requisitos	7d?	18/08/2016	26/08/2016
6		Orçar custo inicial	1d?	24/08/2016	24/08/2016
7		Definir Subsistemas	3d?	24/08/2016	26/08/2016
8		Elaborar Cronograma	1d?	26/08/2016	26/08/2016
9		▣ Elaboração	14d?	29/08/2016	15/09/2016
10		▣ Resistores	4d?	29/08/2016	01/09/2016
11		Equacionar Valor dos Resistores	4d?	29/08/2016	01/09/2016
12		Equacionar Potência Fornecida	4d?	29/08/2016	01/09/2016
13		Equacionar Potência Dissipada	4d?	29/08/2016	01/09/2016
14		Simular (ANSYS)	4d	29/08/2016	01/09/2016
15		▣ Isolamento	14d	29/08/2016	15/09/2016
16		Definir Tipo Material	8d	29/08/2016	07/09/2016
17		Orçar Custos	5d	29/08/2016	02/09/2016
18		Estudar Normas Técnicas	14d	29/08/2016	15/09/2016
19		▣ Corpo de Prova	4d	29/08/2016	01/09/2016
20		Definir Tamanho do Corpo de Prova	4d	29/08/2016	01/09/2016
21		Definir Tipo Material	2d	29/08/2016	30/08/2016
22		Definir Tipo de Tratamento	2d	29/08/2016	30/08/2016
23		Especificar	4d	29/08/2016	01/09/2016
24		▣ Estrutura	14d?	29/08/2016	15/09/2016
25		Definir Material	4d	29/08/2016	01/09/2016
26		Calcular Volume Interno	1d?	29/08/2016	29/08/2016
27		Calcular Volume Externo	1d?	31/08/2016	31/08/2016
28		Simulação	14d	29/08/2016	15/09/2016
29		▣ Sensores	9d	29/08/2016	08/09/2016
30		Definir Tipo de Sensor	4d	29/08/2016	01/09/2016
31		Definir Circuito de Obtenção de Dados do Sensor	1d	31/08/2016	31/08/2016
32		Simulação	7d	31/08/2016	08/09/2016
33		▣ Controle	4d	29/08/2016	01/09/2016
34		Definir Tipo de Controlador	4d	29/08/2016	01/09/2016
35		Projetar Diagrama de Blocos	4d	29/08/2016	01/09/2016
36		Simulação	4d	29/08/2016	01/09/2016
37		▣ Alientação	8d	29/08/2016	07/09/2016
38		Definir Fonte de Alimentação dos Resistores	2d	29/08/2016	30/08/2016
39		Especificar	4d	29/08/2016	01/09/2016
40		Projetar Circuito	8d	29/08/2016	07/09/2016
41		▣ Comunicação	4d	29/08/2016	01/09/2016
42		Definir Sistema de Comunicação	4d	29/08/2016	01/09/2016
43		▣ Arquitetura	8d	29/08/2016	07/09/2016
44		Definir Arquitetura Software/Hardware	4d	29/08/2016	01/09/2016
45		Definir Servidor	2d	29/08/2016	30/08/2016
46		Requisitos	8d	29/08/2016	07/09/2016
47		Redigir Termo de Abertura	5d	29/08/2016	02/09/2016
48		Redigir Relatório 1ª Entrega	3d	31/08/2016	02/09/2016
49		Entrega 1º Relatório	1d?	02/09/2016	02/09/2016
50		Ponto de Controle 1	1d?	09/09/2016	09/09/2016

Figura 11 – Cronograma do Projeto.

3 Solução Proposta

3.1 Dimensionamento do Forno

O forno de tratamento térmico possuirá um volume interno de aproximadamente 8 litros, pois o objetivo é fabricar um forno de tratamento para fins acadêmicos, com corpos de prova segundo a norma ABNT 10611 e componentes mecânicos de pequeno porte, como engrenagens.

A parte externa será composta por uma estrutura de aço carbono como um chassi de sustentação ao peso do forno bem como todo suporte para materiais elétricos/eletônicos, esse envoltório também será usado em formato de placas de para cobrir os tijolos expostos ao ambiente externo a fim de proteger contra choque mecânicos, conforme demonstrado no anexo b.

Os tijolos utilizados para tal construção possuem dimensões de $350 \times 150 \times 60$ (mm) e são próprios para suportar temperaturas superiores a $1200^{\circ}C$ conforme mostrado na tabela a seguir, concedida pela empresa fornecedora desse material.

características físicas típicas	D-1106	D-1208	D-1310	D-1412	D-1610
massa específica aparente (g/cm^3)	0,74	0,88	1,05	1,15	1,25
resistência à compressão a temperatura ambiente (Mpa)	1,5	2,0	4,5	5,3	4,0
Variação linear dimensional	Queimado a $1400^{\circ}C$ por 12 horas 1,5 %	Queimado a $1400^{\circ}C$ por 12 horas 2,0 %	Queimado a $1500^{\circ}C$ por 5 horas 2,0 %	Queimado a $1400^{\circ}C$ por 5 horas 0,8 %	Queimado a $1500^{\circ}C$ por 5 horas 0,9 %
Condutividade térmica ($W/K\cdot m$)	400 °C 0,26	400 °C 0,33	400 °C 0,38	400 °C 0,49	400 °C 0,41
Temp. máxima de uso	1400 °C	1400 °C	1400 °C	1400 °C	1600 °C
características químicas típicas					
Al ₂ O ₃ (%)	40	39	37	37	62
SiO ₂ (%)	58	59	61	58	34
Fe ₂ O ₃ (%)	1,2	1,0	1,4	1,3	1,4

Figura 12 – Características físicas e químicas do material.

3.1.1 Definindo alguns parâmetros de medida dentro do forno para definir os requisitos não funcionais

Como ponto de partida, foi considerado um forno pequeno para o tratamento térmico de um corpo de prova de aço. Este corpo de prova será submetido a uma temperatura de 1200°C , afim de se introduzir a martensita em sua estrutura, que é responsável pelo endurecimento e aumento da rigidez na estrutura do aço.

Para o forno térmico, será então calculado algumas propriedades técnicas de funcionamento do forno, a espessura do isolante térmico selecionado, a temperatura máxima de operação da parede interna, onde as resistências serão instaladas, a temperatura máxima nas paredes sem a fonte de calor instalada, ou seja, várias incógnitas muito importantes na hora da montagem do produto.

A seguir é apresentado em uma tabela algumas constantes consideradas para a primeira análise dessas propriedades. Na qual estão presentes alguns valores necessário para o cálculo das propriedades previstas no parágrafo anterior.

Placa Refratária	Aço	Ar	Áreas
$k_t = 0,27 \text{ W/mK}$	$k_a = 52 \text{ W/mK}$	$k = 0,023 \text{ W/mK}$	$A_1 = 360 \text{ cm}^2$
$\rho = 300 \text{ Kg/m}^3$	$\rho = 7800 \text{ Kg/m}^3$	$h = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$	$A_2 = 552 \text{ cm}^2$
$c = 2,52 \text{ KJ/m}^3\text{K}$	$L_a = 1 \text{ mm}$		$A_3 = 345 \text{ cm}^2$

Figura 13 – Tabela de propriedades técnicas.

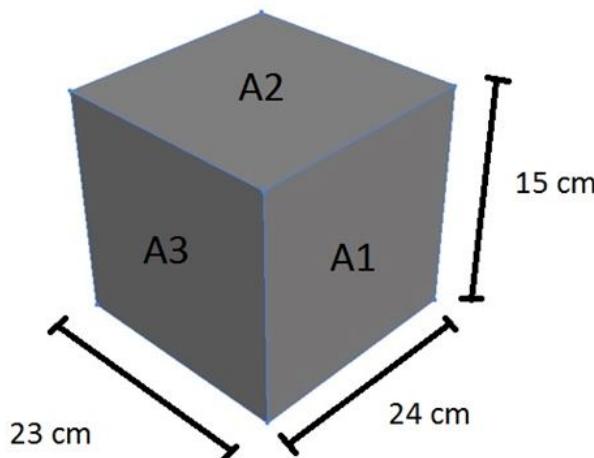


Figura 14 – Dados do Volume Interno do Forno.

A imagem acima retrada o dimensionamento interno escolhido pelo grupo de trabalho, onde A3 será a entrada do forno e terá área igual ao fundo, A1 e A2 são os lados, base e fundo respectivamente.

3.2 Cálculo da distribuição de temperatura no interior do forno

Nesta seção será tratado sobre os mecanismos básicos da condução de calor, convecção e condução. Estes ocorrem dentro do forno, através principalmente pela diferença de temperatura entre o interior do forno e o meio ambiente, que geram um fluxo de calor na direção do mais quente para o mais frio.

Nesta seção será tratado sobre os mecanismos básicos da condução de calor, convecção, condução e radiação. Estes ocorrem dentro do forno, através principalmente pela diferença de temperatura entre o interior do forno e o meio ambiente, que geram um fluxo de calor na direção do mais quente para o mais frio.

$$qk = \frac{T_1 - T_2}{Rk} \quad (\text{Fluxo de calor}) \quad (3.1)$$

$$Rk = \frac{L}{Ka} \quad (\text{Condução}) \quad (3.2)$$

$$Rk = \frac{1}{ha} \quad (\text{Convecção}) \quad (3.3)$$

$$ha = \frac{\epsilon * \sigma * (T^4 - Tamb^4)}{T - Tamb} \quad (\text{Coeficiente de Radiação}) \quad (3.4)$$

har = Coeficiente de convecção do ar

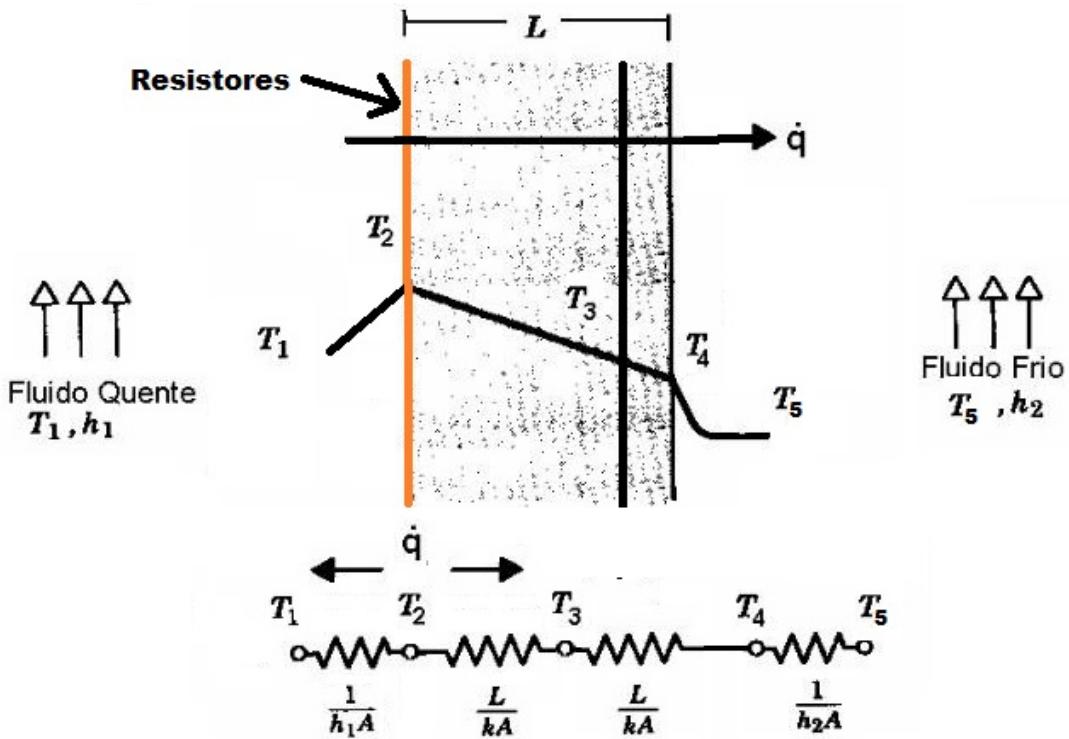


Figura 15 – Distribuição da temperatura ao longo de um material.

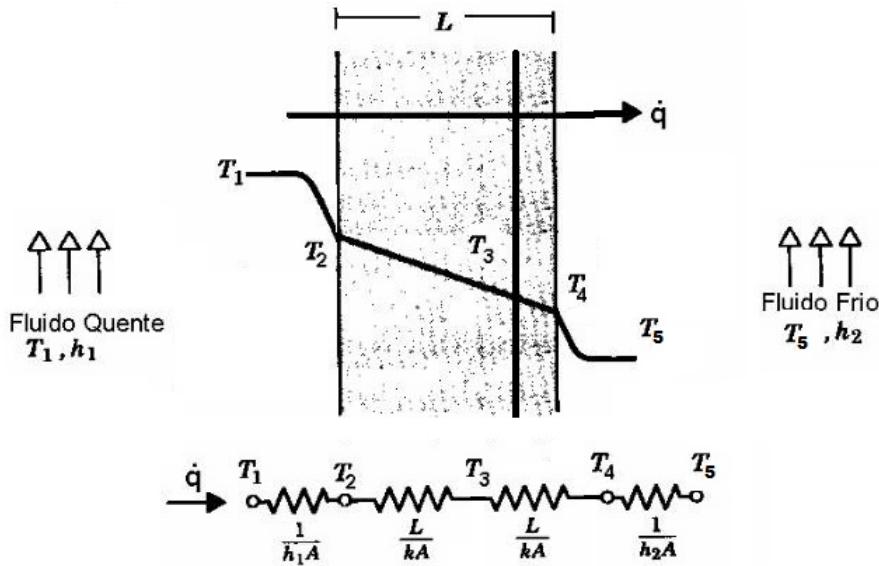


Figura 16 – Distribuição da temperatura ao longo da porta e do fundo.

Para o Cálculo do coeficiente de radiação, foi preciso fazer algumas considerações. É considerado que as resistências estão na sua temperatura de trabalho, um grau a mais que na temperatura ambiente enquanto que o meio está em sua temperatura ambiente inicial, ou seja, enquanto o ambiente estiver no máximo a $1200^{\circ}C$, as resistências estarão a $1201^{\circ}C$ e o meio a $27^{\circ}C$.

Além disso, este cálculo foi feito apenas para as resistências que possui a emissividade de 0,7, e não para o interior das placas refratárias, por essas possuírem um baixo valor de emissividade de 0,29, e ser necessário um processo iterativo de cálculo, a qual não se faz necessário para uma primeira estimativa.

Com isso, a partir da fórmula do coeficiente de radiação, foi calculado o seguinte valor para o coeficiente de radiação:

$$ha = 159 W/m^2 K$$

Com isso tudo esclarecido será calculado a temperatura nas paredes internas no forno e as espessuras da camada isolante do forno, considerando os materiais escolhidos (Tijolo refratário e o aço carbono).

Considerando o primeiro trecho, partindo do interior com $1200^{\circ}C$ até a parede interna com as resistências instaladas, a fórmula para o cálculo da temperatura, será apresentado logo a seguir.

Foi considerado as paredes laterais do forno, a base e o topo como tendo re-

sistências, a temperatura nessas paredes, em A1 e A2 será a seguinte.

$$T_1 = 1473K + \frac{qk}{har * A1}$$

$$T_2 = 1473K + \frac{qk}{har * A2}$$

Além disso foi considerado que as resistências estão igualmente espaçadas nas 4 paredes, ou seja, a potência também será dividida e sendo considerada como 750 W em A1 e A2.

$$T_1 = \frac{1473 + 750}{259 * 360 * 10^{-4}}$$

$$T_1 = 1553K = 1280^{\circ}C$$

$$T_2 = \frac{1473 + 750}{259 * 552 * 10^{-4}}$$

$$T_2 = 1525K = 1252^{\circ}C$$

As temperaturas nas superfícies A3 (forno e porta), serão consideradas, iguais as temperaturas de operação do forno, para se adquirir um sobre dimensionamento da espessura requerida para os tijolos refratários, então T3 será igual a 1200°C. Em outras palavras, foi considerado que não há problema algum de isolamento no fundo e na porta do forno, ou seja, nenhuma energia estaria se dissipando.

Com as temperaturas nas paredes bem definidas, é possível calcular a transferência de calor nos tijolos refratários e nas placas de aço carbono, considerando apenas o fenômeno da condução.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.5)$$

$$R = \frac{La}{Ka A} + \frac{Lt}{kt A} \quad (3.6)$$

A única variável são as áreas que dependem da seção analisada e a espessura do tijolo. Por vias de uma segurança maior nos cálculos, serão considerados a temperatura na placa externa igual a temperatura no meio ambiente de 27°C. A equação simplificada para obter Lt é a seguinte.

$$Ltx = \left(\Delta Tx - \frac{La}{Ka Ax} \frac{dQ}{dt} \right) \frac{kt Ax}{\frac{dQ}{dt}} \quad (3.7)$$

Os cálculos com os subscritos x, são correspondentes com as seções analisadas. Cada uma delas com uma área e diferença de temperaturas diferentes, e consequentemente terão espessuras requeridas diferentes. A Potência correspondente para cada seção

será novamente de 750 W devido a uma divisão homogênea dos resistores nas seções consideradas.

$$\frac{dQ}{dt} = 500W$$

	Seção 1	Seção 2	Seção 3
$\Delta T [K]$	1253	1225	1200
$A [cm^2]$	360	552	345
$L_t [mm]$	24,4	36,5	22,4

Figura 17 – Cálculo das variáveis de temperatura interna do forno.

As espessuras requeridas para o tijolo refratário selecionado, foram calculadas. Este caso não leva em conta a dissipação de calor entre os tijolos. Afim de se ter tal valor, seria necessária fazer uma análise mais apurada experimentalmente ou numericamente. Devido a todos os tipos de perdas de calor que possam ocorrer, é necessário um fator de segurança nessas espessuras obtidas.

Além disso pode ser acrescentado algum material isolante entre os tijolos e as placas externas de aço, como a vermiculita. Por fim, também tem os sulcos que serão feitos nos tijolos para o encaixe das resistências, este fator acarretara uma perca de material refratário, sendo necessário por fins de segurança, um aumento das espessuras calculadas.

3.2.1 Cálculo das Potências dissipadas dentro do forno em cada seção

As áreas das seções do forno foram definidas anteriormente, o objetivo dessa seção é saber o valor quantitativo de potência dissipada dentro do forno afim de se ter uma distribuição mais homogênea possível de calor dentro do forno.

Um dado obtido anteriormente neste trabalho é o tamanho necessário de resistência dentro do forno para alimentar o forno com uma potência de 3kW. Esse valor era de 30,73 metros, porém depois de comprar essa resistência e medir o comprimento real para obtermos 3 kW em uma tomada qualquer de 220 V, o seu novo comprimento foi de 26 metros.

Com base nesse novo valor de comprimento, será realizado o cálculo dos comprimentos das resistências nas seções 1 e 2. Mas antes por proporção de área, será calculado as áreas superficiais de resistências, para que elas fiquem igualmente distribuídas nessas 2 seções.

Declarando as variáveis X1 e X2 como sendo essas áreas superficiais equivalentes de resistência instaladas nas seções 1 e 2 respectivamente, temos os seguintes valores para

X1 e X2.

$$At = 2\pi R * L \quad (3.8)$$

$$At = 2\pi * 0.9 * 10^{-3} * 26 = 1470,26\text{cm}^2$$

$$\frac{X1}{At} = \frac{2 * 360}{2 * 360 + 2 * 552}$$

$$X1 = 580,36\text{cm}^2$$

$$X2 = 889,89\text{cm}^2$$

Com esses valores podemos calcular os comprimentos dos fios localizados nas seções 1 e 2 da seguinte maneira.

$$Ly = \frac{Xy}{2\pi R} \quad (3.9)$$

$$L1 = 10,26m$$

$$L2 = 15,73m$$

Com esses valores, é possível calcular o valor das resistências nas seções 1 e 2, pois sabe se que 26 m equivale a 16Ω , portanto o fio deste projeto possui uma densidade resistiva de $0.6154\Omega/m$, resultando nos seguintes valores para R1 e R2.

$$R1 = 6,36\Omega$$

$$R2 = 9,75\Omega$$

Com o valor da corrente de $i = 13,63A$, é possível calcular a potência dissipada portanto nas seções 1 e 2.

$$Q = R * i^2 \quad (3.10)$$

$$Q1 = 1183,5W$$

$$Q2 = 1814,5W$$

Por fins de praticidade, será calculado o valor da potência dissipada pela resistência em apenas 1 parede de cada sessão e o seu comprimento, pois este dado será utilizado na simulação no ANSYS. Esses valores são os seguintes.

$$q1 = 586,12W$$

$$q2 = 899,16W$$

$$l1 = 5,13m$$

$$l2 = 7,87m$$

3.3 Sistema de Alimentação

3.3.1 Tipo de Alimentação

O sistema de aquecimento do forno para tratamento térmico pode ser por meio convectivo com queimadores de alta velocidade com ar quente através da queima de gás GLP ou gás natural, ou o aquecimento pode ser através de resistências elétricas de alta temperatura.

Os queimadores são convenientemente dispostos e aproximados para que possam atingir a taxa de temperatura adequada, porém há vários fatores que indisponibilizam essa tecnologia, já que não há um isolamento entre as chamas e o material a sofrer tratamento térmico, o controle da temperatura seria um grande desafio. A segurança é outro fator muito importante, visto que o seu uso torna o sistema quanto ao manuseio perigoso. O fator recurso financeiro também foi levantado em consideração, já que há uma indisponibilidade do recurso na Unidade Acadêmica de Ensino.

O aquecimento resistivo é largamente empregado devido ao baixo custo e à boa confiabilidade quando comparado a outros métodos de tratamento térmico localizado. Consiste de elementos resistivos convenientemente ajustados em torno do local a ser tratado; o conjunto é protegido por mantas cerâmicas, material de isolamento térmica capaz de manter a região tratada sob temperaturas de até $1200^{\circ}C$.

Como requisitos de segurança do sistema e da rede que conecta a tomada, o sistema será dimensionado para até 15 Amperes de corrente, pois de acordo com a NBR 14136, as tomadas domésticas devem operar a uma corrente de até 20 Amperes. Fazendo um fator de segurança de 5 Amperes evitamos vários problemas com a sobrecarga do circuito.

3.3.2 Sistema de Aquecimento

Para que o interior do forno de tratamento térmico atinja altas temperaturas, serão usados resistores para a geração de calor, os quais serão conectados a fonte de tensão a partir de um circuito de controle de corrente e estarão posicionados nas paredes internas do forno. Tais resistores se comportarão como fontes de calor para atmosfera interna do forno, e estarão dispostos de forma que tenha a maior área possível de contato para o ar e que exista um caminho livre para circulação e transferência do calor.

Pela lei de ohm ($V = RxI$), consegue-se garantir uma corrente constante e abaixo da estabelecida pela norma. Para que a temperatura seja controlada dentro do forno, será construído um circuito controlador, que fará uma flutuação entre na corrente, mantendo a temperatura dentro do forno com a menor flutuação possível.

3.3.3 Cálculo de Potência e Tempo de Aquecimento

Para alcançar a potência desejada de 3kW dimensionou-se as propriedades termodinâmicas no volume de controle do forno.

Para definir a Potência, julgou-se uma situação de alta quantidade de calor necessária para esquentar um corpo de prova cujo tamanho seja igual ao volume interno do forno e de temperatura de têmpera alta, próxima ao definido pelo escopo do projeto que é um forno que atinja 1200°C. O material escolhido foi o Aço rápido sinterizado ASP 2017. Segue abaixo a curva de transformação com resfriamento contínuo do aço citado [11].

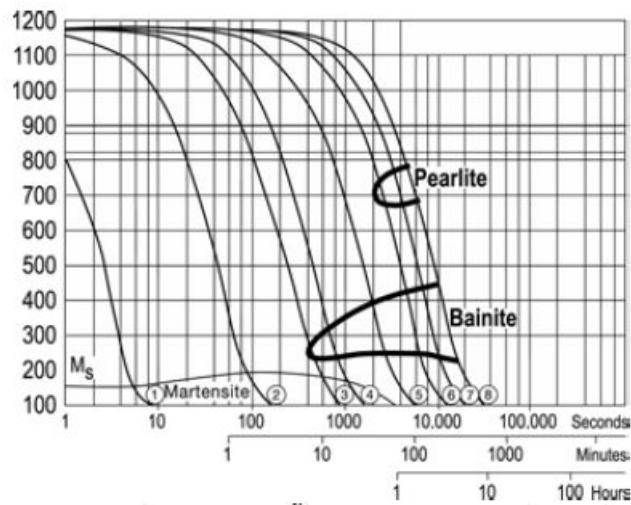


Figura 18 – Curva de transformação com resfriamento contínuo.

$$T_{temp} = 1180^{\circ}\text{C} \quad (3.11)$$

A quantidade de calor necessária para aquecer a têmpera do Aço rápido sinterizado ASP 2017 está diretamente relacionada às suas propriedades como $T_{temp} = 1180^{\circ}\text{C}$, sua massa específica $p = 8000\text{kg/m}^3$ e seu calor específico $c = 420\text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$ (Referência) não variando com a Temperatura, pela fórmula abaixo:

$$Q = \rho * V * c * (T_{temp} - T_{amb}) \quad (3.12)$$

Sendo V o volume de aproximadamente 8,28 litros, a $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$, substituindo na fórmula temos:

$$\begin{aligned} Q &= 8 * 10^3 * 8,28 * 10^{-3} * 420 * (1180 - 20) \\ Q &= 32,3\text{MJ} \end{aligned}$$

A partir dessa proposição e de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica para balanço de energia, e considerando o sistema adiabático de dentro do forno para o meio

externo, a quantidade de calor Q é igual ao trabalho elétrico W_{el} convertido em energia térmica no meio. Sendo assim o balanço de energia se dá como:

$$Q = W_{el} \quad (3.13)$$

Possuindo o W_{el} , conseguimos relacionar a Potência necessária para o forno, através da fórmula:

$$P = \frac{W_{el}}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Sendo P a potência e Δt o tempo em segundos.

Supondo uma Potência de 3kW, e achando o tempo necessário:

$$\Delta t = \frac{W_{el}}{P} = \frac{32,3 * 10^6}{3 * 10^3} = 10758s = 2,98h$$

Portanto, para aquecer um corpo de prova em uma situação de alta exigência do forno, o tempo de 3 horas é julgado aceitável para o projeto.

3.3.4 Dimensionamento da Resistência Elétrica

Para calcular a resistência foi utilizada a seguinte fórmula:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3.15)$$

Em que a tensão utilizada é de 220V e a potência é de 3kW. Feito os cálculos, a resistência encontrada foi de $16,13\Omega$. Estas serão as condições para calcular a corrente máxima, onde o forno chegará a temperaturas de $1200^\circ C$. Para o material foi escolhido o fio Kanthal A-1(Cr 22%, Al 5.8% e Fe 72.2%), levando em consideração a durabilidade e o alto desempenho desse material. Sabendo que o valor da resistência varia de acordo com a temperatura, é necessário converter essa resistência de acordo com a temperatura ambiente. Para valores de corrente e resistência, utilizou-se a temperatura de $20^\circ C$, da seguinte forma:

$$R_{20^\circ C} = \frac{R(T)}{C_T(T)} \quad (3.16)$$

Onde $R(T) = 16,13\Omega$ e $C_T(T) = 1,04$, que é o fator de conversão do material a $1200^\circ C$. Obtendo $R_{20^\circ C} = 15,5\Omega$.

Utilizando os fatores de conversão do material, é possível determinar a variação da resistência com o aumento da temperatura. A tabela a seguir apresenta esses valores:

Temperatura ($^\circ C$)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C _T	1	1,001	1,002	1,005	1,01	1,017	1,023	1,028	1,032	1,046	1,038	1,04	1,042	1,05
R (Ω)	15,52	15,53	15,54	15,59	15,67	15,78	15,87	15,95	16,01	16,07	16,1	16,13	16,16	16,29

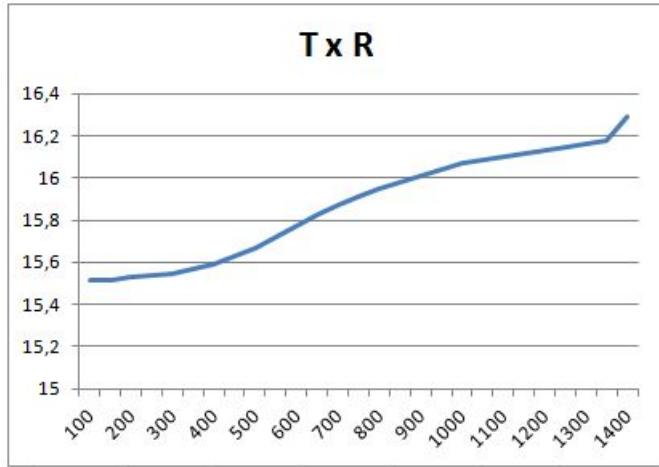


Figura 19 – Gráfico 1: Resistência em relação a temperatura

Observa-se a partir do gráfico acima, que a resistência aumenta com o aumento da temperatura, isso ocorre devido a degradação da mobilidade de elétrons com o aumento da temperatura.

A corrente máxima que passa através do fio é dada por:

$$I_{MÁX} = \frac{V}{R} \quad (3.17)$$

Utilizando $V = 220V$ e $R = 16,13\Omega$, obtém-se a corrente máxima de $13,64A$ que está dentro da faixa de segurança definida no projeto. Para escolher o fio mais apropriado que irá suportar essa corrente sem ser sobrecarregado foi calculada a superfície irradiante, que é calculada pela seguinte expressão:

$$S_i = \frac{I_{MÁX}^2 * C_T(T)}{\gamma} \quad (3.18)$$

Substituindo $I_{MÁX} = 13,64A$, $C_T(T) = 1,04$ e $\gamma = 2W/cm^2$ (capacidade de condução de corrente), tem-se $96,75cm^2/\Omega$. Pelas tabelas Kanthal, o fio mais apropriado, cuja superfície irradiante se encontra mais próxima desse valor, é o fio Kanthal A-1 com diâmetro 1,80mm e resistividade de $0,546\Omega/m$. O comprimento do fio é calculado pela expressão:

$$I = \frac{R_{20^\circ C}}{0,546} \quad (3.19)$$

O comprimento encontrado foi de 28,41m.

3.3.5 As resistências para aquecimento do forno

Após os cálculos do dimensionamento do sistema de alimentação, foi definido e justificado a escolha do fio Kanthal A-1 como o material da resistência a ser utilizado.

Buscou-se em seguida realizar a compra do mesmo para iniciar a montagem do forno. Dentre os orçamentos realizados, optamos por um em preço que se adaptaria com a forma de trabalho da equipe. Por exemplo, a compra de uma maior metragem de fio para se ter uma folga de trabalho e o mesmo não enrolado para economizar no gasto de mão de obra. A partir dessa definição, optamos pela compra online da loja de materiais elétricos Casa Ferreira, situada em São Paulo. A resistência Kanthal A-1 nesta loja é vendida por quilo, e esse quilo totalizava 55 metros de fio. Tendo estimado o uso de cerca de 28 metros, sobra uma quantidade interessante de fio do ponto de vista de folga de trabalho. Sem a mão de obra de enrolar o fio embutida, encontrou-se um valor bem abaixo dos orçados em Brasília. Com o frete, o quilo de Kanthal A-1 saiu a R\$ 174,73.

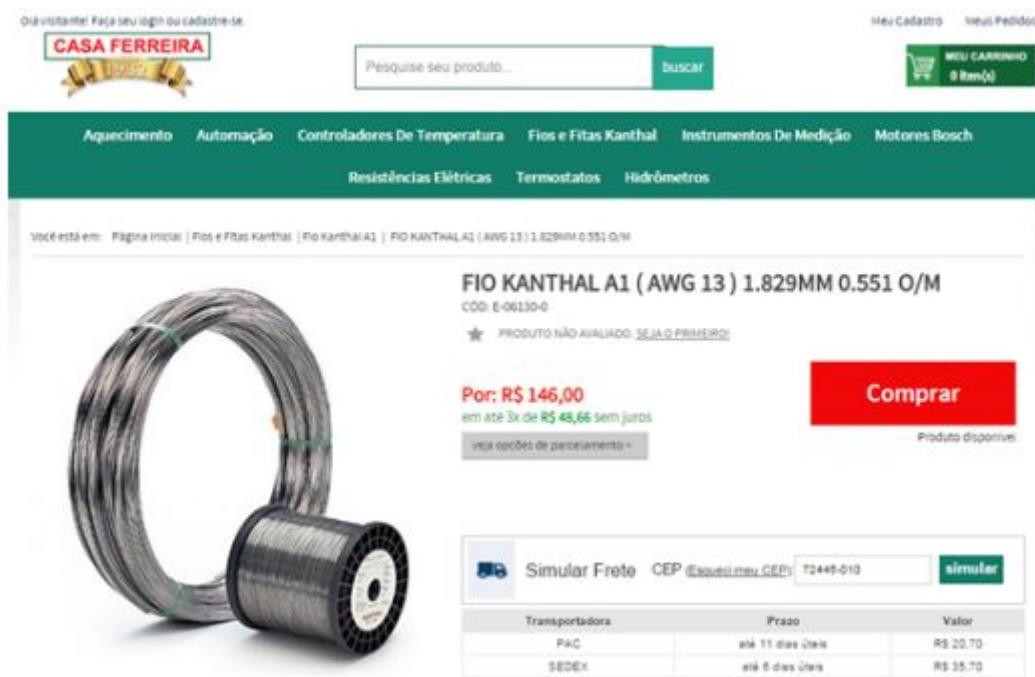


Figura 20 – Valor das Resistências

3.3.6 Distribuição das resistências no forno

Para alocar as resistências dentro do forno de forma segura utilizamos a área interna das paredes do forno temos 3 dimensões:

- Fundo e porta: $23 \times 15 \text{cm}^2$
- Laterais: $24 \times 15 \text{cm}^2$
- Teto e base: $24 \times 23 \text{cm}^2$

As paredes da porta e do fundo não foram usadas para colocar as resistências porque a porta terá muito esforço mecânico impossibilitando as conexões da resistências

além de diminuir a segurança do operador e o fundo será usado para colocar o termopar e será onde será ligada a alimentação das resistências. Para distribuição foi usado o espaço nas laterais no fundo e no teto.

Utilizamos uma distância mínima de 4 cm para a porta, 4 cm para a parede de fundo, e 2 cm de distância entre laterais e o fundo/topo. Assim a área que usamos usar para fazer as canaletas era:

- laterais: $11 \times 16 \text{ cm}^2$
- fundo/topo: $19 \times 16 \text{ cm}^2$

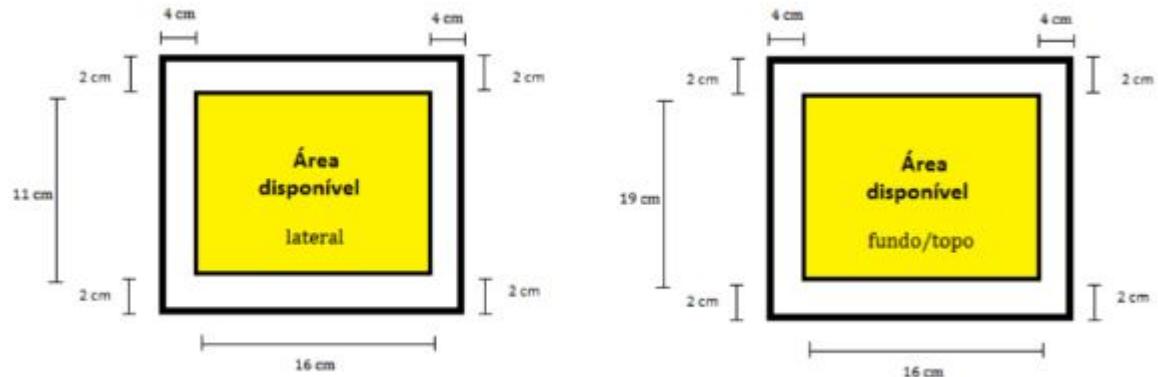
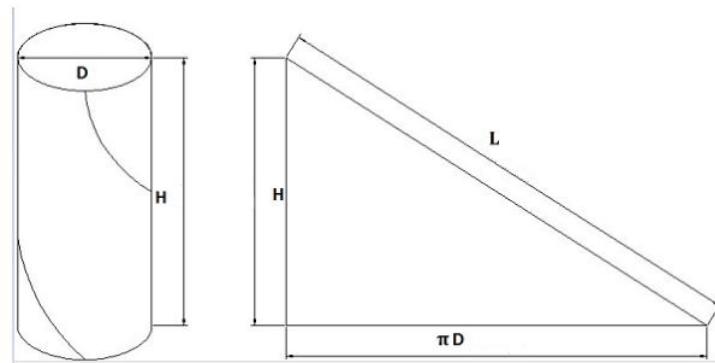


Figura 21 – Área do Forno

Para calcular a largura da espira que contém n bobinas da resistência Kanthal A-1 precisamos dimensionar os parâmetros da espira como na figura a seguir:



Para uma volta na bobina da resistência temos o diâmetro D da bobina, a altura H que corresponde a altura da espira e a largura do fio L. Abrindo a circunferência vemos que L é a hipotenusa do triângulo retângulo com H de um dos lados e a circunferência πD do outro. Logo para n bobinas considerando a circunferência πD como valor fixo e a

média da altura de cada bobina H/n como valor fixo bobina a fórmula para dimensionar as propriedades da bobina é:

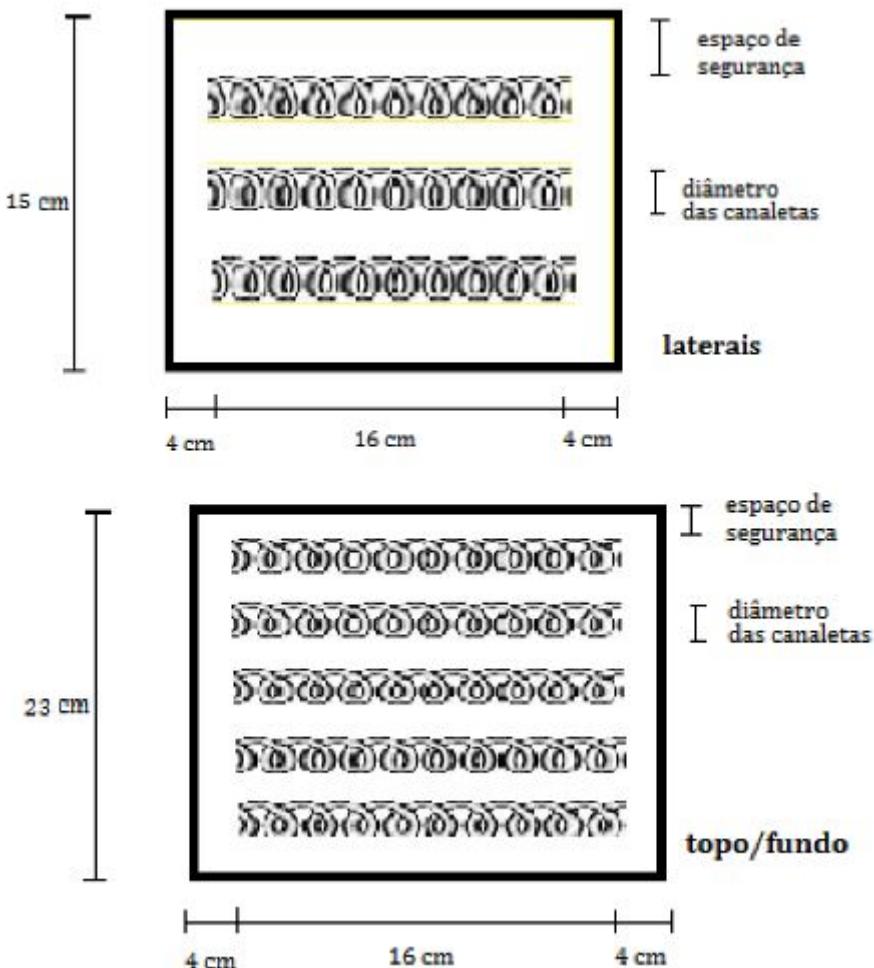
$$L = n * \sqrt{(\pi D)^2 + \left(\frac{H}{n}\right)^2} \quad (3.20)$$

Considerando a expressão da altura de uma bobina $H/n=h$ ou também chamado de “passo” e manejado as incógnitas temos uma expressão para o diâmetro da bobina:

$$L = \frac{H}{h} * \sqrt{(\pi D)^2 + (h)^2} \quad (3.21)$$

Onde H é o comprimento total da espira, h é o passo, D é o diâmetro da bobina (diâmetro interno + raio do fio) e L é o comprimento total do fio. Pelas medições precisávamos de uma resistência de $15,5\Omega$ (Ohm) o que dava uma média de 26 metros de comprimento de fio (L) usando o multímetro calibrado com o multímetro do laboratório de materiais da UnB gama.

Com o diâmetro da espira sendo o mínimo desejável para não se aprofundar muito na parede e ao mesmo tempo não ser pequeno ao ponto de diminuir a quantidade de resistência no área da parede vimos que o diâmetro seria por volta de 1,5 cm e com um espaço de segurança de no mínimo 2 cm entre uma canaleta e outra temos:



Com 5 canaletas no topo e no fundo e 3 canaletas nas laterais totalizando 16 canaletas com $H = 16\text{cm}$ cada. O total de altura da espira é 288 cm.

Com $L = 26$ metros e $H = 2,88$ metros, podemos decidir o diâmetro D e o passo h para a melhor distribuição no forno. Fazendo $h = 0,5\text{mm}$ entre uma bobina e outra temos uma grande folga entre as bobinas e precisaríamos de um diâmetro da bobina de 1,43 cm, o que é bem razoável para fazer uma canaleta na parede de 5 cm.

Para enrolar as resistências nas especificações dimensionadas usamos um molde de ferro como diâmetro externo e no galpão da FGA (Faculdade Gama) realizamos o procedimento de construção da espira com a barra de ferro de diâmetro igual a 1,4 cm, tornando a medida do diâmetro externo da espira igual ao diâmetro da canaleta $D = 1,56\text{cm}$ (diâmetro interno + 2 * espessura do fio de 0,18cm).

Assim obtemos as medidas oficiais da parede do forno utilizando:

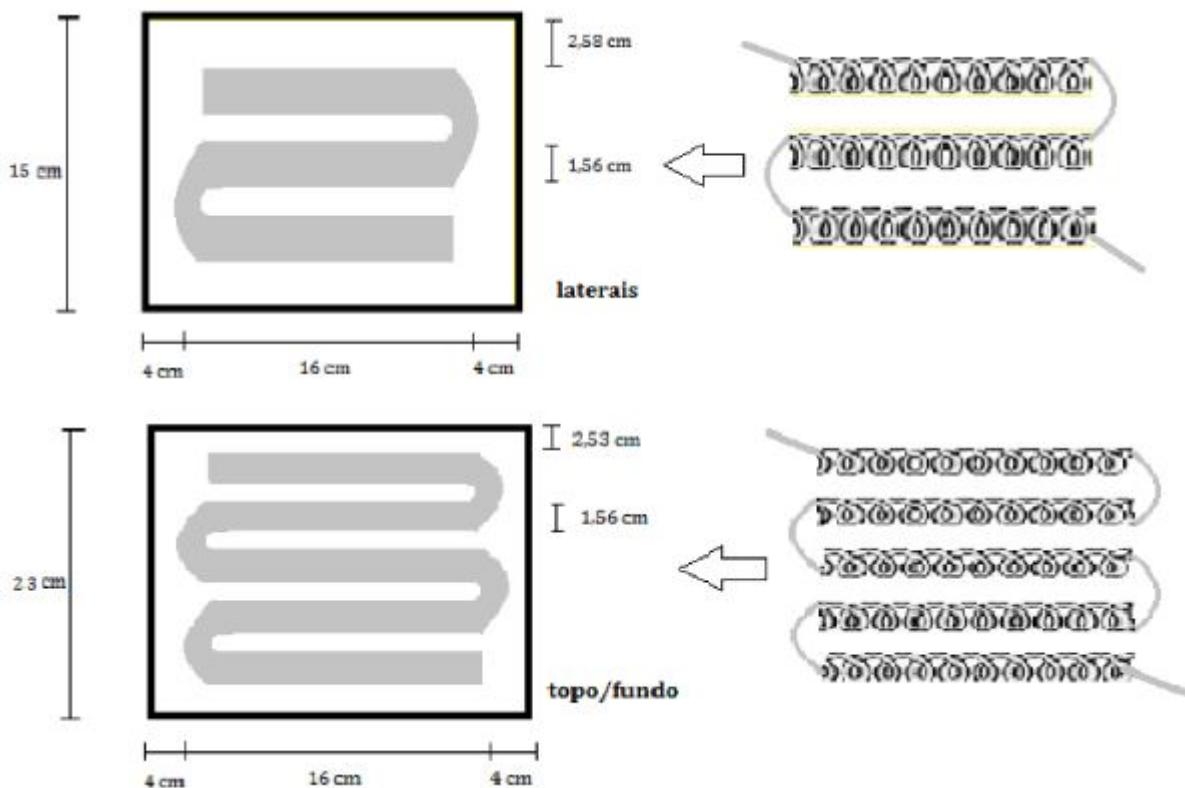
- o diâmetro das canaletas D;
- o número de espaços n(entre o topo e o fundo e entre as canaletas);
- a altura h da parede.

Diâmetro das canaletas = 1,56 cm

- espaço de segurança nas laterais é $\frac{h-3*D}{n} = \frac{15-3*1,56}{4} = 2,58\text{cm}$
- espaço de segurança no fundo/topo é $\frac{h-5*D}{n} = \frac{23-5*1,56}{6} = 2,58\text{cm}$

Os dois espaços de segurança são maiores que 2 cm deixando as resistências bem distribuídas dentro do forno de forma segura e homogênea já que ficarão todas dispostas simetricamente nas paredes em relação às bordas. As ligações entre uma canaleta a outra serão feitas por um fio não bobinado de resistência aumentando no cálculo do L final cerca de 50 cm de fio (+ 0.25Ω).

Cada parede tem sua própria espira de resistência, logo as quatro paredes serão ligadas em série e as ligações serão fixadas na parede.



3.3.7 Fabricação das espiras resistivas

Para enrolar as resistências com o material disponível, foi feito um sistema com um cabo de aço de 3,13 metros e diâmetro 1,4cm e dois alicates de pressão. O diâmetro do aço foi o molde para o diâmetro interno da espira. Um alicate de pressão fixou a ponta da resistência no cabo, e outro alicate foi utilizado para girar a barra de aço enquanto o operador tensionava o fio, como no figura abaixo:



O fio tinha o tamanho L de 28 m e 18Ω , a barra tinha a comprimento H de 3,13 m. Com isso conseguimos enrolar a espira de tamanho suficiente para o projeto:

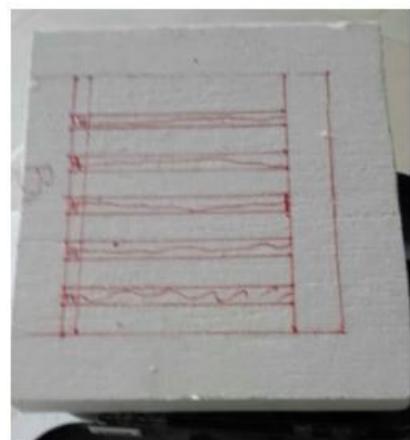


Para a resistência necessária ($15,5\Omega$) com fator de segurança prático dimensionamos em média 1 Ohm para cada canaleta e recortamos a resistência de cada parede:



3.3.8 Confecção das canaletas na parede do forno

Para garantir o aquecimento do forno não basta enrolar a espira de resistências, mas precisamos também confeccionar as canaletas em que elas estarão dispostas. Para isso utilizamos o material refratário de 5 cm de espessura e após o lixamento para manter a parede uniforme desenhamos o caminho a ser percorrido pelas canaletas:



Após todas as marcações concluídas, fizemos as perfurações usando uma furadeira de impacto, tomando o cuidado para perfurar em diagonal nas laterais e no topo para evitar que as canaletas caiam utilizando não somente a pressão, mas também a gravidade para mantê-las dentro da parede como nas figuras:



Ajustando os detalhes mais refinados da canaleta com a lixa e o estilete:



Em testes realizados observamos que a resistência aquecida queima o material refratário. Para resolver o problema revestimos as paredes com cimento, aumentando a pressão quem cima das resistências a serem posicionadas e protegendo a parede do forno de danos causados pela resistência:



Após a secagem e a instalação das resistências nas canaletas ligadas em série fizemos o circuito de alimentação com as resistências em série direto na tensão da tomada utilizando um fio com capacidade para 3 kW e uma tomada de capacidade de até 20 A. testamos por fim a corrente que passa no sistema com o alicate de medição.



O resultado foi 13,8 A, onde para potência de 3kW é necessário teoricamente uma corrente de 13,6 A, mostrando assim bons resultados práticos. A resistência na teoria tende a aumentar suavemente levando o forno a uma potência um pouco mais baixa a 1200 graus porém com pouca variação como pode ser visto no gráfico TxR. A potência a temperatura ambiente é $p_{20^{\circ}C} = \frac{V^2}{R}$ sendo aproximadamente $R = 15,8\Omega$, $p_{20^{\circ}C} = 3063,3W$.

Para temperaturas a $1200^{\circ}C$ onde aproximadamente $R = 16,2\Omega$:

$$p_{20^{\circ}C} = \frac{V^2}{R} = \frac{220^2}{16,4} = 2951,2W \quad (3.22)$$

Uma diferença desprezível que é possível graças às propriedades do fio que não se alteram bruscamente com o aumento da temperatura.

3.3.9 Tratamento Térmico

Um exemplo de tratamento térmico muito usado na industria é o processo de têmpera, que consiste no submeter o aço a uma temperatura em média $50^{\circ}C$ acima da zona crítica de austenitização para o aços até 0,8% de carbono e $50^{\circ}C$ acima do limite inferior da zona crítica de austenitização para o aços acima de 0,8% de carbono A zona crítica de austenitização varia com o aumento da composição de carbono no aço como na figura abaixo:

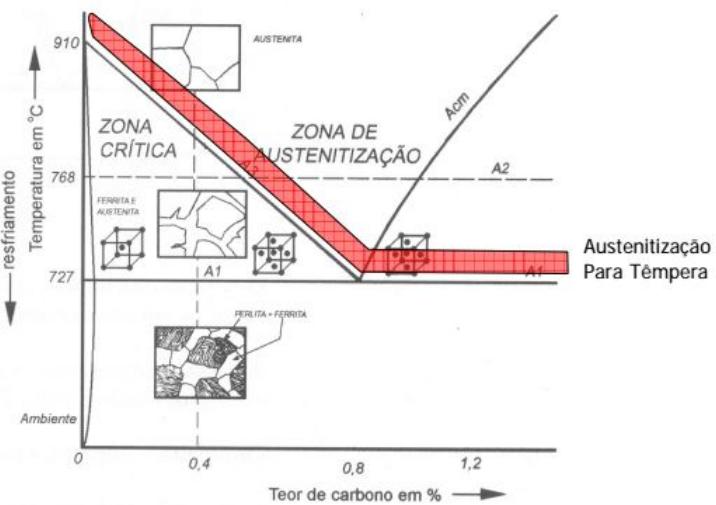


Figura 22 – Zona de Austenitização para Têmpera. Fonte: Tschiptschin

Após manter o aço por um tempo na zona crítica representada pela área vermelha do gráfico, ele muda sua estrutura cristalina para a austenítica ou “austenítica + cementita” que a altas temperaturas substitui qualquer estrutura existente no corpo de prova anteriormente. Após esse processo o aço é resfriado bruscamente em água passando de temperaturas entre 780 a 900°C à temperatura ambiente de forma rápida com o objetivo de obter a estrutura Martensítica do aço que tem características duras e frágeis e evitando estruturas mais moles como ferrita, bainita e perlita:

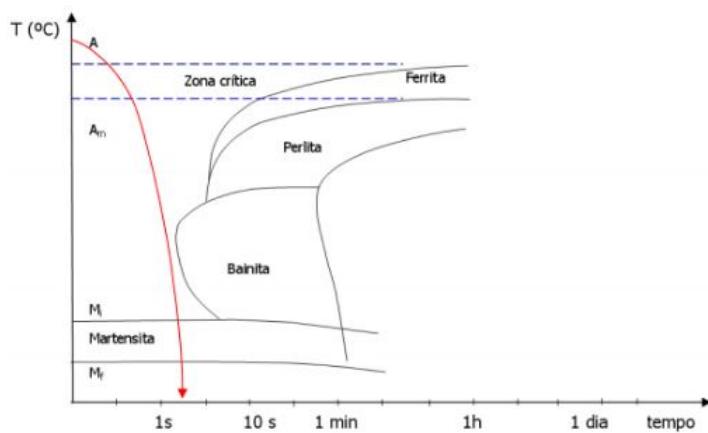


Figura 23 – Resfriamento de temperatura para o processo de têmpera. Fonte: Tschiptschin.

O tempo de formação de Martensita é diferente na superfície e no centro do corpo de prova, devido ao contato direto da superfície com o meio refrigerante, levando o tempo da temperização no centro do corpo de prova a ser até 10 vezes maior que na superfície.

Essa variação temporal pode gerar diferenças na estrutura do material, e isso deve ser considerado dependendo do objetivo do operador.

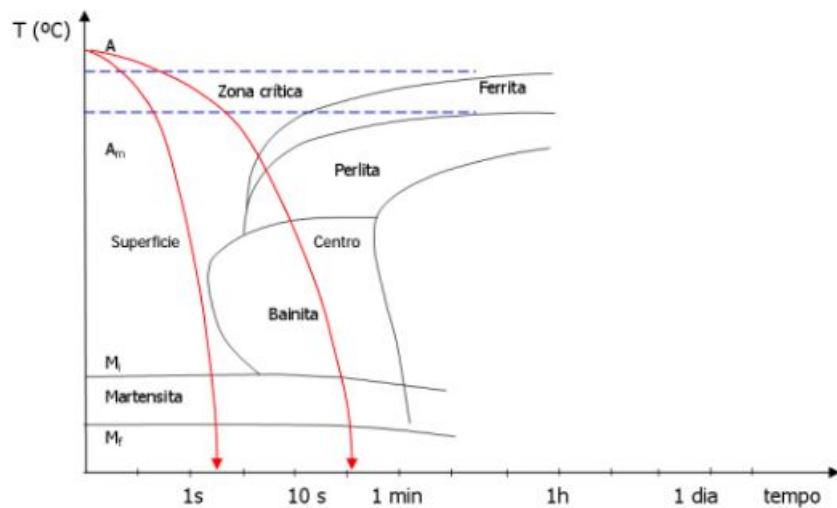


Figura 24 – Resfriamento na superfície no centro do corpo de prova. Fonte: Tschiptschin.

3.3.10 Material Submetido ao Tratamento

O aço é definido no Brasil pela NBR 6215:2011 como uma liga ferrosa passível de deformação plástica que, em geral, apresenta teor de carbono entre 0,008% e 2,0% na sua forma combinada e, ou, dissolvida e que pode conter elementos de liga adicionados, ou residuais.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, por intermédio da norma NBR NM 87:2000 classifica os aços-carbono comuns e os de baixo teor em liga segundo os critérios adotados pela AISI (American Iron and Steel Institute) e SAE (Society of Automotives Engineers).

SAE/AISI	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
1020	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050
1025	0,22° – 0,28	0,30 – 0,60	0,030	0,050
1030	0,28 – 0,34	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1035	0,32 – 0,38	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1040	0,37 – 0,44	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1050	0,48 – 0,55	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1060	0,55 – 0,65	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1070	0,65 – 0,75	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1080	0,75 – 0,88	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1090	0,85 – 0,98	0,60 – 0,90	0,030	0,050
1095	0,90 – 1,03	0,30 – 0,50	0,030	0,050

Figura 25 – Composição química de aços Sae 10XX. Fonte: ABNT/SAE J403, 1995.

Aços-Carbo no ABNT (SAE/AISI)	Temperatura de Austenitização °C	Ciclo de Resfriamento de Até °C	Esfriamento para Tempera	Faixa de Dureza (Brinell)	
1020	855° - 900°	855°	700°	Água	111 - 149
1025	855° - 900°	855°	700°	Água	111 - 149
1030	840° - 885°	840°	650°	Água	126 - 197
1035	855° - 900°	840°	650°	Água	137 - 207
1040	790° - 870°	790°	650°	Água	137 - 207
1045	790° - 870°	790°	650°	Água	156 - 217
1050	790° - 870°	790°	650°	Água	156 - 217
1060	790° - 840°	790°	650°	Óleo	156 - 217
1070	790° - 840°	790°	650°	Óleo	167 - 229
1080	790° - 840°	790°	650°	Óleo	167 - 229
1090	790° - 830°	790°	650°	Óleo	167 - 229
1095	790° - 830°	790°	650°	Óleo	167 - 229

Figura 26 – Características de tratamento térmico de aços-carbono simples. Fonte: ABNT/SAE J403, 1995.

Aços são considerados bons para serem temperados a partir de 40% de carbono em sua composição, pois possuem resistência suficiente ao desgaste a abrasão e boa tenacidade.

Para o trabalho foi escolhido o corpo de prova SAE 1045, que é considerado aço de médio teor de carbono, por questões de preço, disponibilidade, esfriamento em água facilitado e faixa de dureza próxima à aços com maior porcentagem de carbono. São aços que possuem boa conformabilidade à frio e razoável resistência mecânica com acabamento laminado, trefilado ou retificado.

Para que seja realizados tratamentos térmicos, é necessário ter conhecimento sobre a curva TTT (tempo-temperatura-transformação) do material, que relaciona as variáveis da micro estrutura com o tempo e a temperatura.

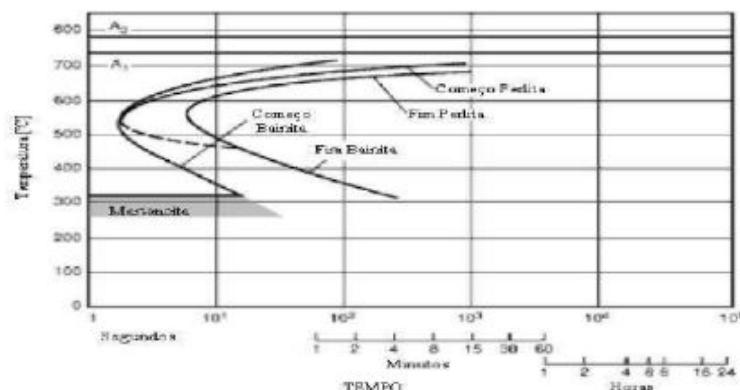


Figura 27 – Diagrama TTT do aço SAE 1045. Fonte: DOMINGUES et.al 2010.

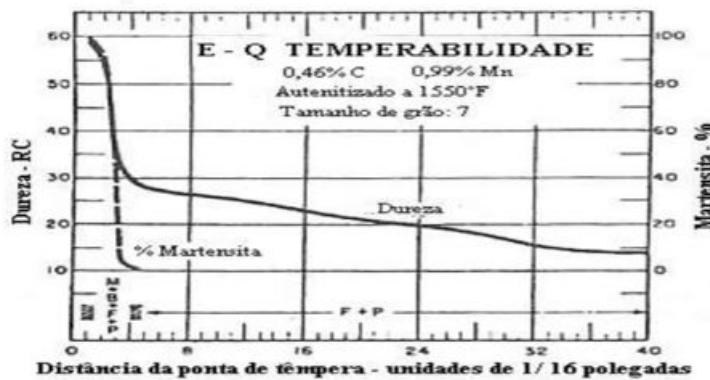


Figura 28 – Curva de temperabilidade do aço SAE 1045. Fonte: MARTINS, 2002.

O aço Sae 1045 costuma ter no máximo seção transversal de no máximo 60mm. Para seções transversais maiores, o material não apresenta boa reação à têmpera e sua dureza diminui sensivelmente. O aço SAE 1045 deve ser aquecido entre 820°C e 840°C em média, por 10 minutos por milímetro, para que haja maior elevação da ductilidade e resistência assim como evitar trincamentos.

O processo de têmpera é completo após a técnica de resfriamento do material, após a temperatura de austenitização, no qual objetiva-se a formação de constituintes resultantes como cementita, ferrita e principalmente martensita, fase metaestável supersaturada de carbono e, portanto de alta dureza. O rápido processo de troca de ambiente de alto calor para um ambiente de baixo calor (até um segundo) permite a formação de martensita.

Agitação	Severidade de Têmpera			
	Ar	Óleo	Água	Salmoura
Nenhuma	0,02 0,30	0,25 – 0,30	0,90 – 1,00	2,00
Fraca	-	0,30 – 0,35	1,00 – 1,10	2,00 – 2,20
Moderada	-	0,35 – 0,40	1,20 – 1,30	-
Boa	-	0,40 – 0,50	1,40 – 1,50	-
Forte	-	0,50 – 0,80	1,60 – 2,00	-
Violenta	0,08	0,80 – 1,10	4,00	5,00

Figura 29 – Valores de H (coeficientes de severidade de têmpera) para diferentes meios de têmpera. FONTE: SCHEIDEMANTEL, 2014

A variação da taxa de resfriamento entre água e salmoura é de 27,6% até 110% e a diminuição do tempo de resfriamento é de 7,8% até 63,3% em relação à agitação. Ar

e óleo possui uma severidade muito baixa de tempera e salmoura possui uma severidade mais alta que o ideal. Dessa forma o resultado de témpera com resfriamento em água gera um aumento de 20% de martensita na estrutura do aço em relação à tratamento com salmoura. (CARVALHO, 2004)

4 Resultados

4.1 Simulações

4.1.1 Simulação numérica em elementos finitos

Para validarmos a estrutura e observarmos como o forno reagiria com temperatura fizemos uma análise numérica em elementos finitos no qual utilizamos o Software ANSYS na plataforma Steady-State Thermal e Transient Thermal. Estas plataformas nos apresentaram resultados através de gráficos, que utilizamos antes da montagem para termos uma noção do dimensionamento do forno e após utilizamos estes mesmos resultados para evitar erros futuros que possam vir a ocorrer no desenvolvimento do produto.

A seguir será apresentado todo o processo em etapas a ser realizado nesta análise numérica computacional, no qual procuramos o dimensionamento com as certas aproximações da realidade para que se tenha um projeto de engenharia bem estruturado.

- Modelagem (Pré-Processamento)

- Análise (Pré-Processamento)

- Processamento de dados (Processamento)

- Interpretação e Utilização (Pós-Processamento)

Para iniciarmos fizemos um CAD(Computer Aided Design) do modelo do forno para que possamos ver o dimensionamento das dimensões e que possa ser colocado no software para as suas devidas análises. Na realização das análises foi determinado os tipos de materiais utilizados para que possamos incluir no programa e este fazer o estudo com estas informações.

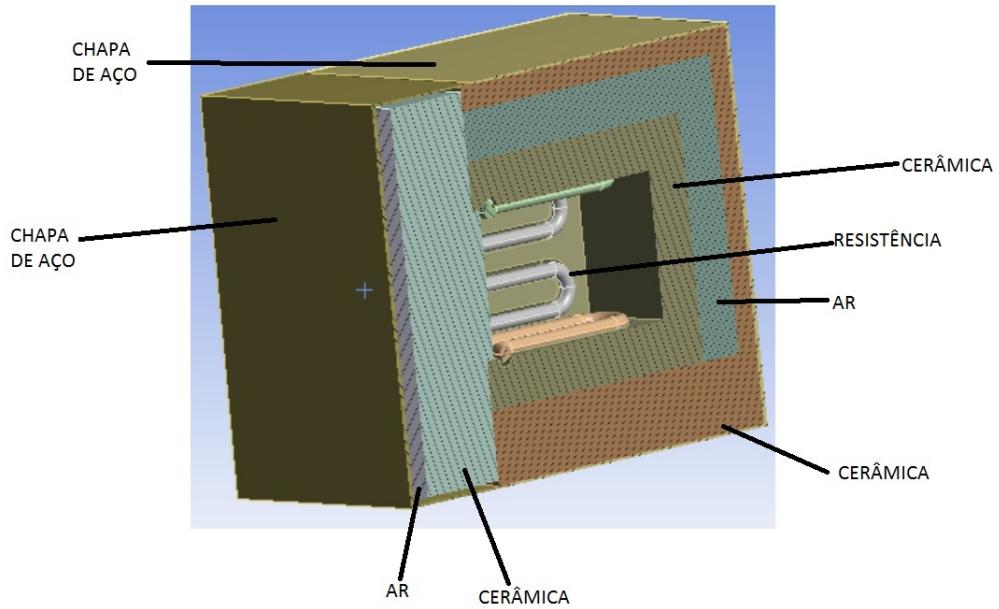


Figura 30 – Corte transversal da extrutura

4.1.2 Malha

Nesta etapa fizemos a discretização da malha para fazer as interações e com o conhecimento adquirido no qual procuramos ter uma melhor interação nodal.

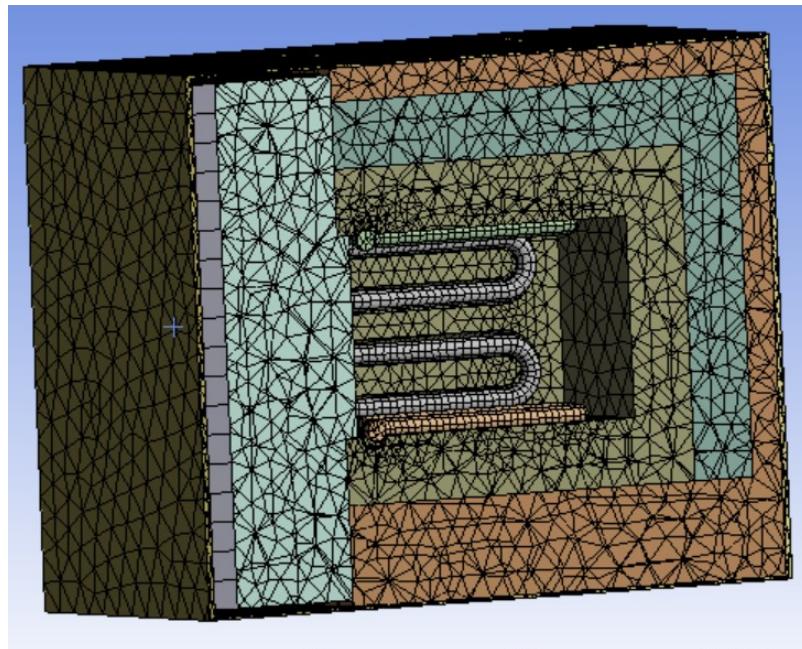


Figura 31 – Malha da Geometria

Essa interação maior foi procurado nos contatos. Para que possamos nós aproximar mais dos resultados reais. Como podemos ver na imagem mais aproximada, nos contatos

de geometrias procuramos ter uma aproximação das nodais de um contato de material diferente com o outro, com isto aumentado a interação dos elementos.

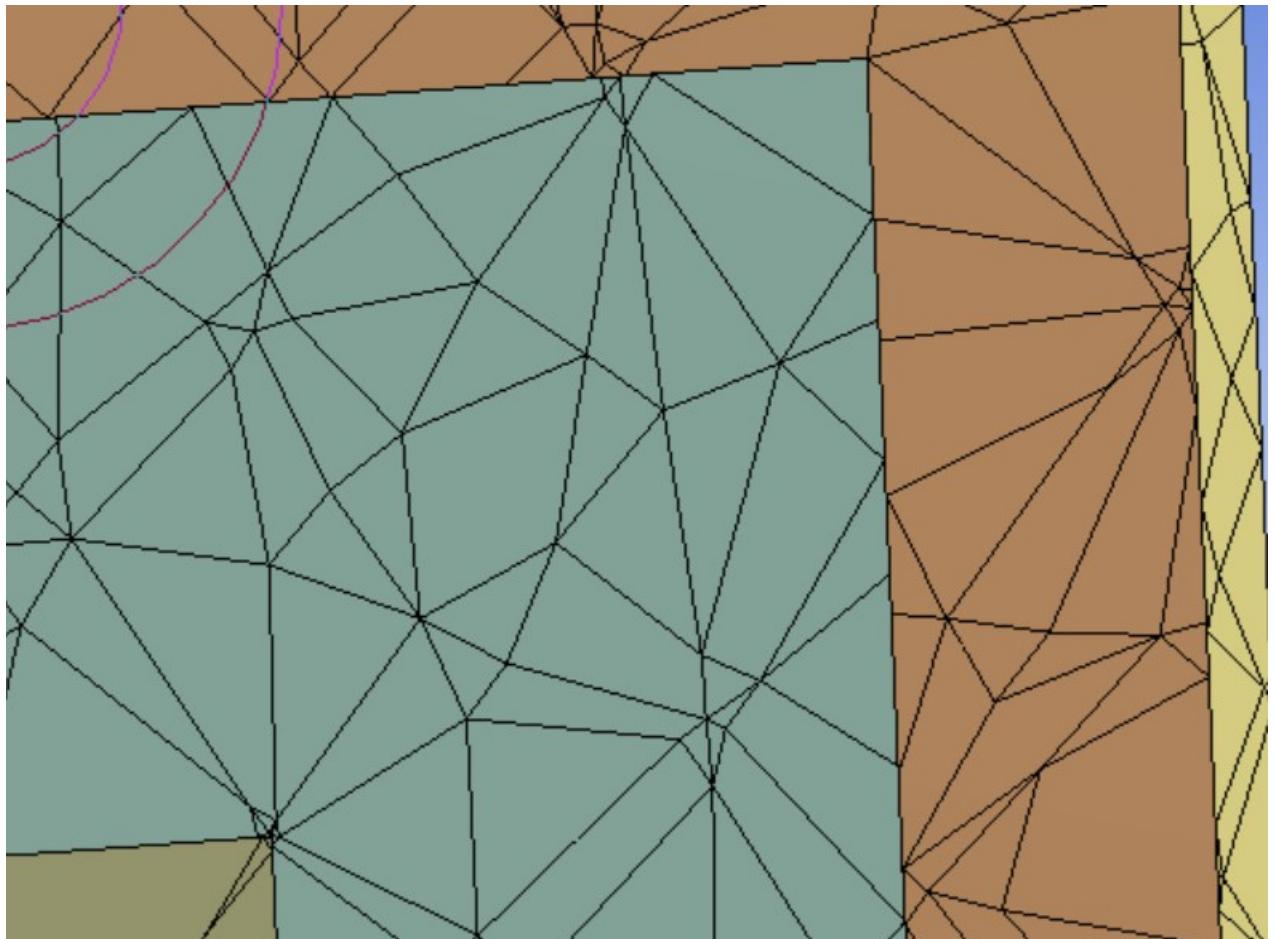


Figura 32 – Zoom da malha na seção transversal

4.1.3 Parte estacionária

Para a validação da estrutura, procuramos demonstrar a qual temperatura o forno chegaria externamente quando estivesse em sua máxima temperatura, fizemos um teste estático de temperatura pelo software. Nesta analise realizamos algumas etapas que serão demonstradas a seguir.

Após a realização da malha foi realizado a etapa da entrada de dados no qual primeiramente utilizamos uma ferramenta no qual simula um gerador de calor que no programa se chama “Internal Heat Generation”. Este valor foi gerado através do dado da potência do forno de 3000 W, ele é dado em W/m^3 , e foi calculado dividindo-se a potência das resistências consideradas (embaixo e encima 1814,5 W e nas laterais 1183,5 W) pelo volume das espiras consideradas das seções consideradas, portanto foi utilizado dois valores diferentes pois as espiras superior e inferior são maiores que as laterais.

Afim de se ter a simulação funcionando na sua temperatura máxima de operação,

foi necessário fazer uma amostragem de dados da temperatura, assim como da taxa de aquecimento interna do forno. Esses dados se fazem necessários apenas para ajudar no processo de interpolação interna, os seus valores reais serão obtidos na simulação transiente.

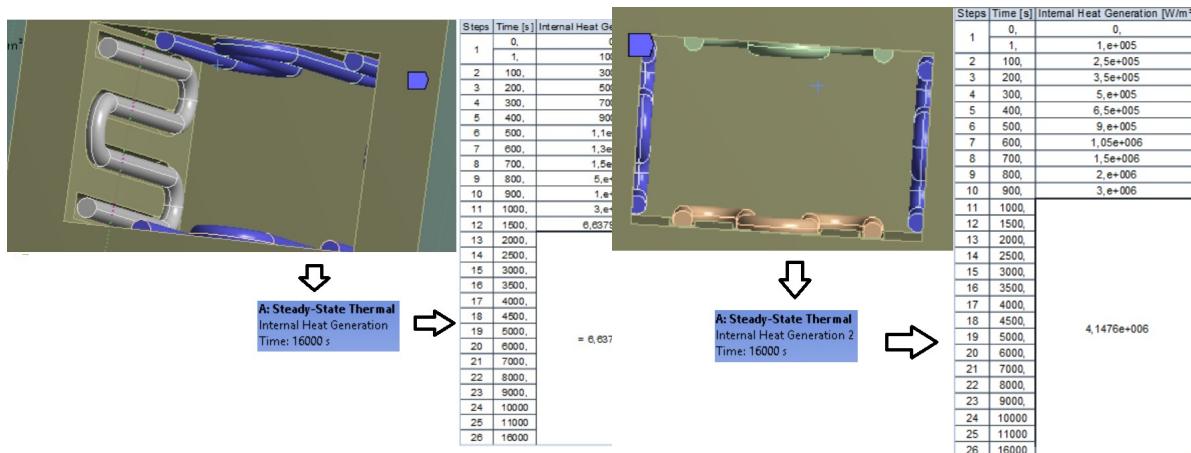


Figura 33 – Dados inseridos para transferência de calor dos resistores

Após isto foi inserido a temperatura das espiras no qual gostaríamos de que ela em seu maior range de temperatura alcance os 1200°C. Nas espiras também foi adicionado a emissividade do material das espiras das resistências.

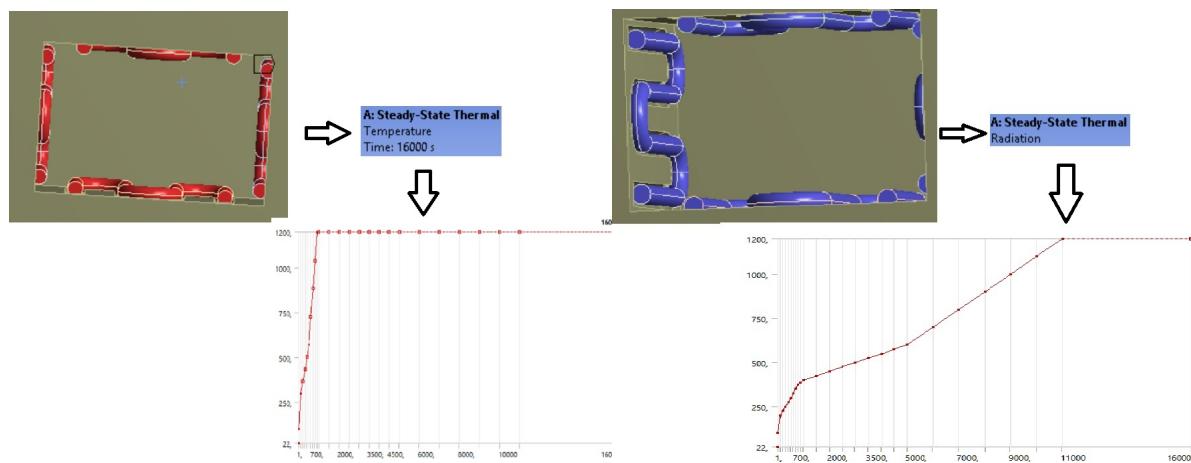


Figura 34 – Dados da utilizados na resistência

No interior foi colocado a convecção, este dado encontrado nas informações do fabricante, e a emissividade no interior do forno.

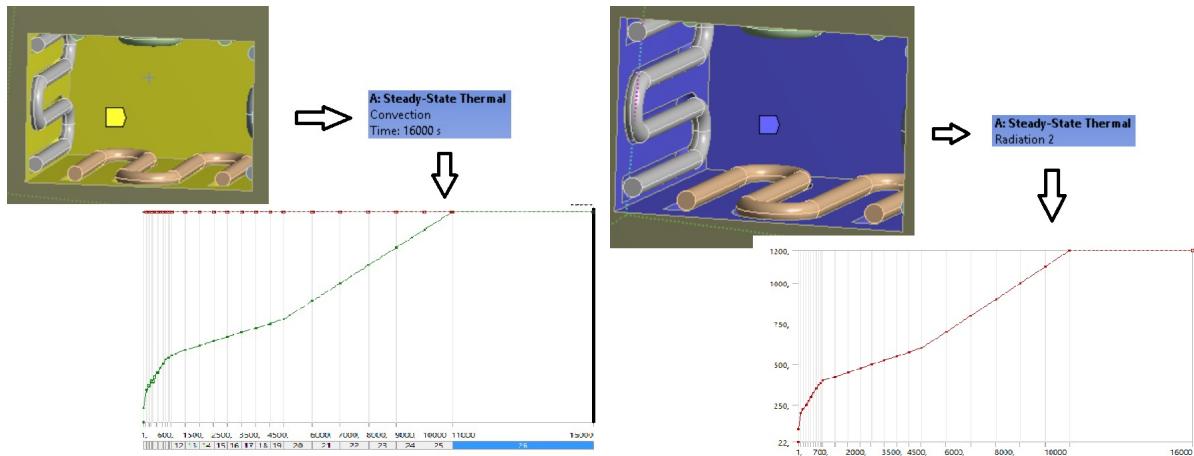


Figura 35 – Dados utilizados nas placas refratarias internas

Externamente foi colocado também o a convecção e a radiação.

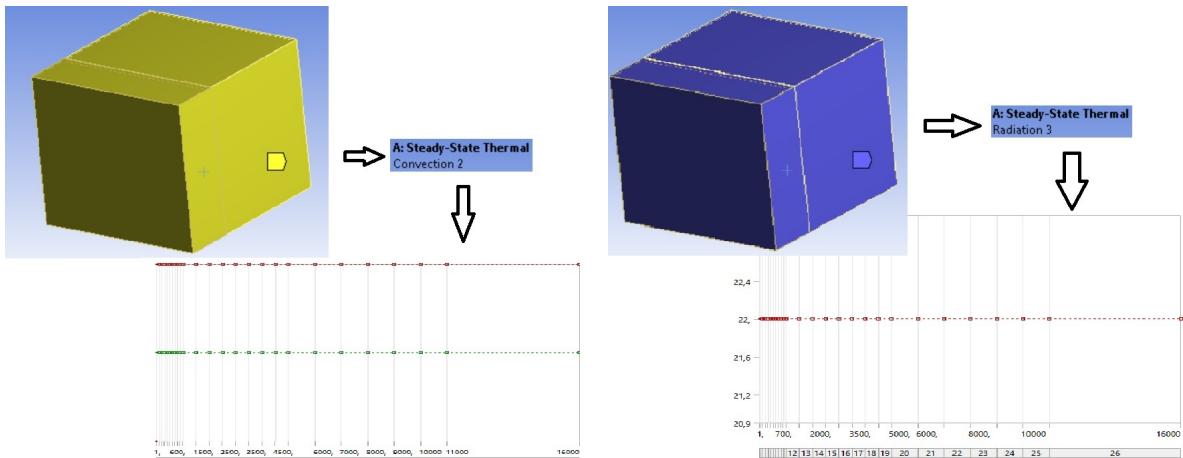


Figura 36 – Dados inseridos na face exterior do forno

A convergência de malha favorece no aumento dos nós e com isto aumentando a interação dos nodais e com isto aproximando o resultado analítico da realidade. Mas isto não garante que ocorra o resultado real. A convergência ajuda também a melhorar a linearidade da solução, através do modelo de Newton-Raphson.

Para melhorar os resultados obtidos foi realizado uma convergência do resultado de temperatura que nos deu este gráfico. Está convergência aumentou o numero de nodais e elementos de analise, e observando a tabela a seguir vemos também a porcentagem de melhoria com a novo numero de interações.

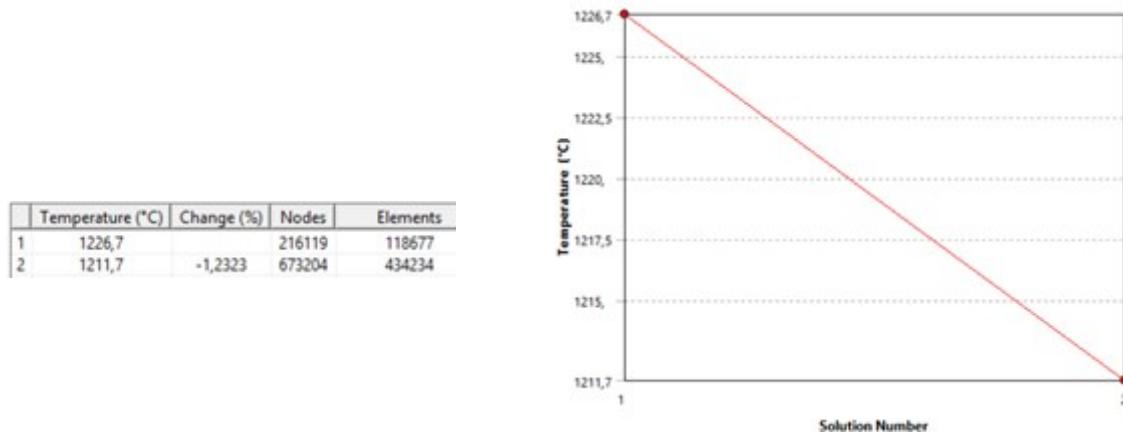


Figura 37 – Tabela e gráfico de número de soluções de convergência de malha

Estes são os resultados encontrados da analise. Foi retirado a temperatura em alguns pontos aleatórios. Nesta primeira imagem podemos observar a parte externa do forno no qual procuramos encontrar as temperaturas decididas no inicio do projeto.

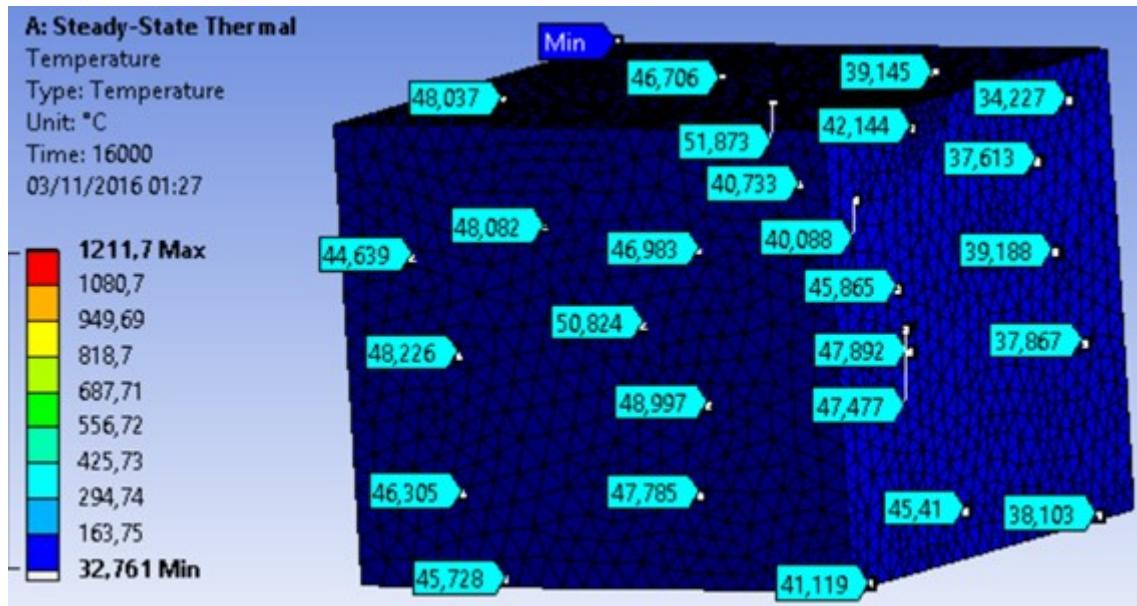


Figura 38 – Gráfico de temperatura externa

Nesta imagem retiramos a porta completa para demonstrarmos os resultados internos do forno como podemos observar encontramos 1200 o C nas resistências e internamente vemos que nas paredes se aproximam deste portanto demonstrando todo o calor dissipado.

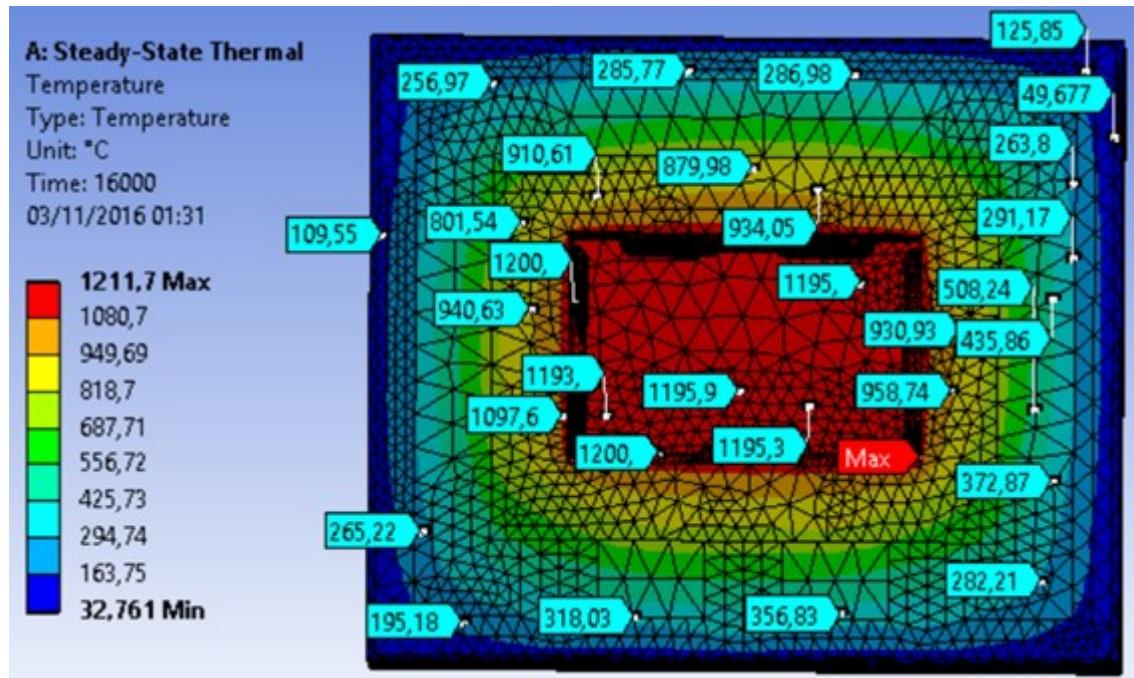


Figura 39 – Gráfico demonstrativo do interior do forno

Este próxima imagem foi feito um corte simétrico lateral do forno para apresentação lateral:

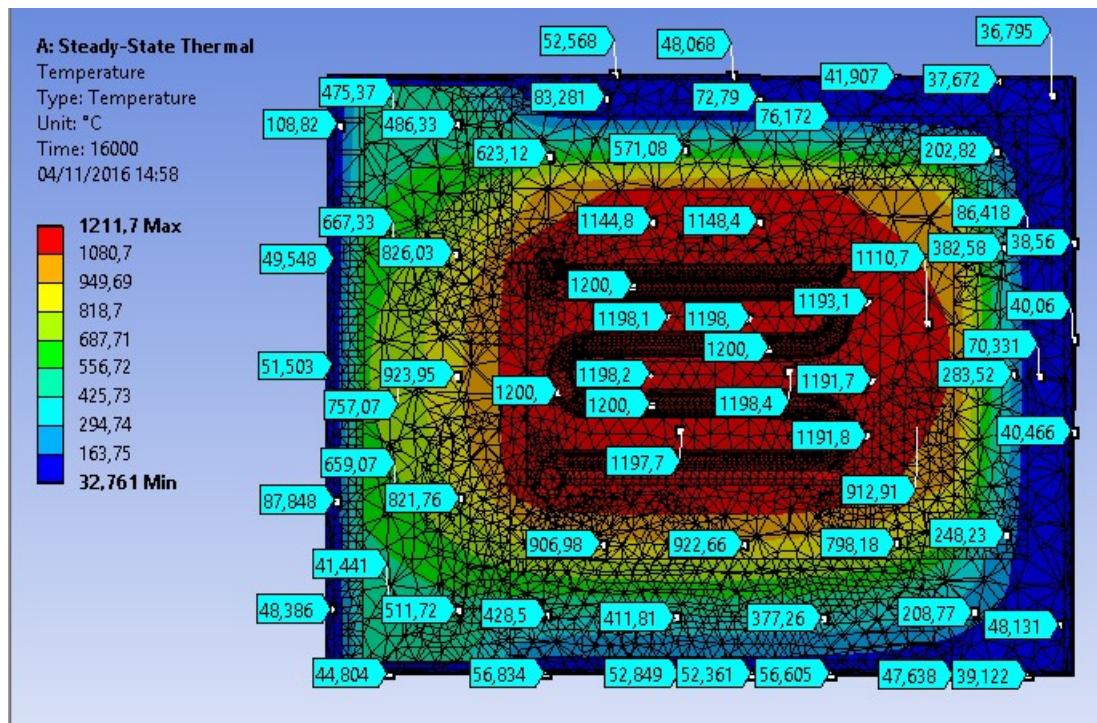


Figura 40 – Gráfico do corte simétrico lateral do forno

4.1.4 Parte transiente

Para a parte transiente, foi considerado o regime de aquecimento e de esfriamento do forno, com o objetivo de quantificar o tempo necessário para o aquecimento do forno a partir da temperatura ambiente até a sua temperatura máxima de operação 1200°C, assim como o seu esfriamento a partir da sua temperatura máxima, até a sua temperatura ambiente internamente.

O procedimento para a simulação de aquecimento, foi semelhante a do regime permanente, contudo não foi necessário a utilização de uma curva estimada de aquecimento, pois este é o objetivo final desta simulação, obter a curva de aquecimento para qualquer ponto interno do forno.

Os resultados apresentados nesta parte, foram realizados sobre uma geometria mais simplificada apresentada logo a seguir, em comparação ao caso passado. Neste caso há também um bloco de ar no interior para simular o comportamento do ar com a transferência de calor.

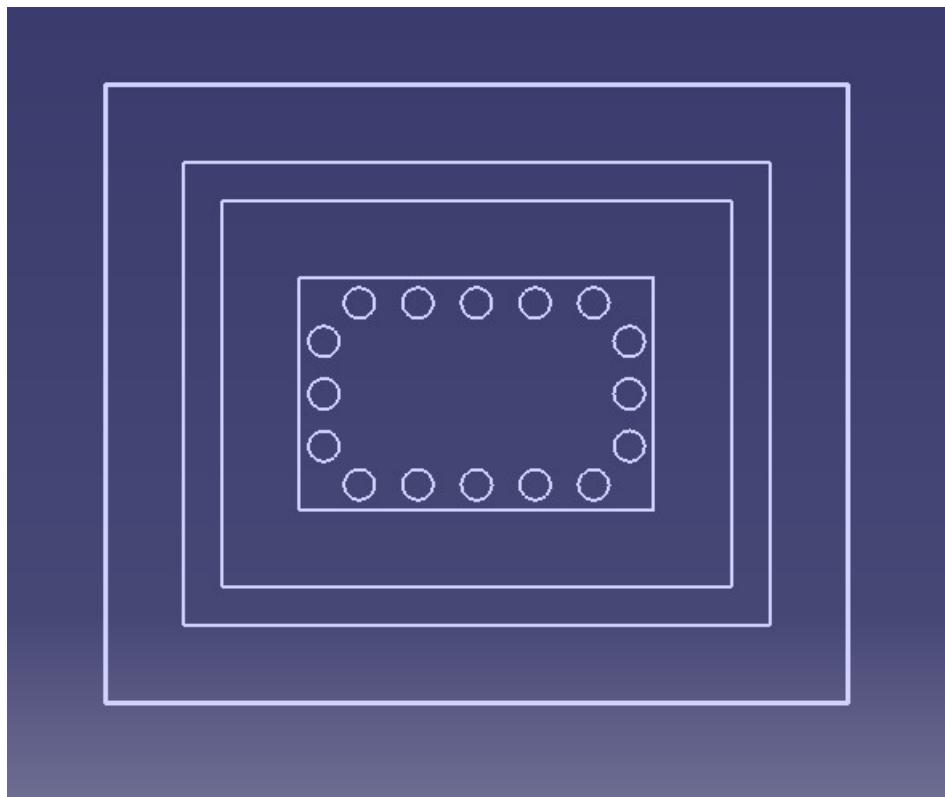


Figura 41 – Seção transversal da estrutura simplificada

Observa-se também que esta geometria possui um formato diferente do caso anterior, que possui a geometria oficial de construção, mas isso será atualizado e os resultados serão postados para o ponto de controle 3. Este caso possui 25 mm de ar e a segunda camada de refratário é de 50 mm.

4.1.5 Resfriamento

Abaixo encontram-se alguns resultados para a simulação do resfriamento do forno, para tal aproximação deste comportamento, como pode ser visto na figura abaixo, foi considerado a temperatura do forno todo de 1200°C, e a partir do tempo inicial, apenas os meios de condução, radiação e convecção agiram sobre a geometria.

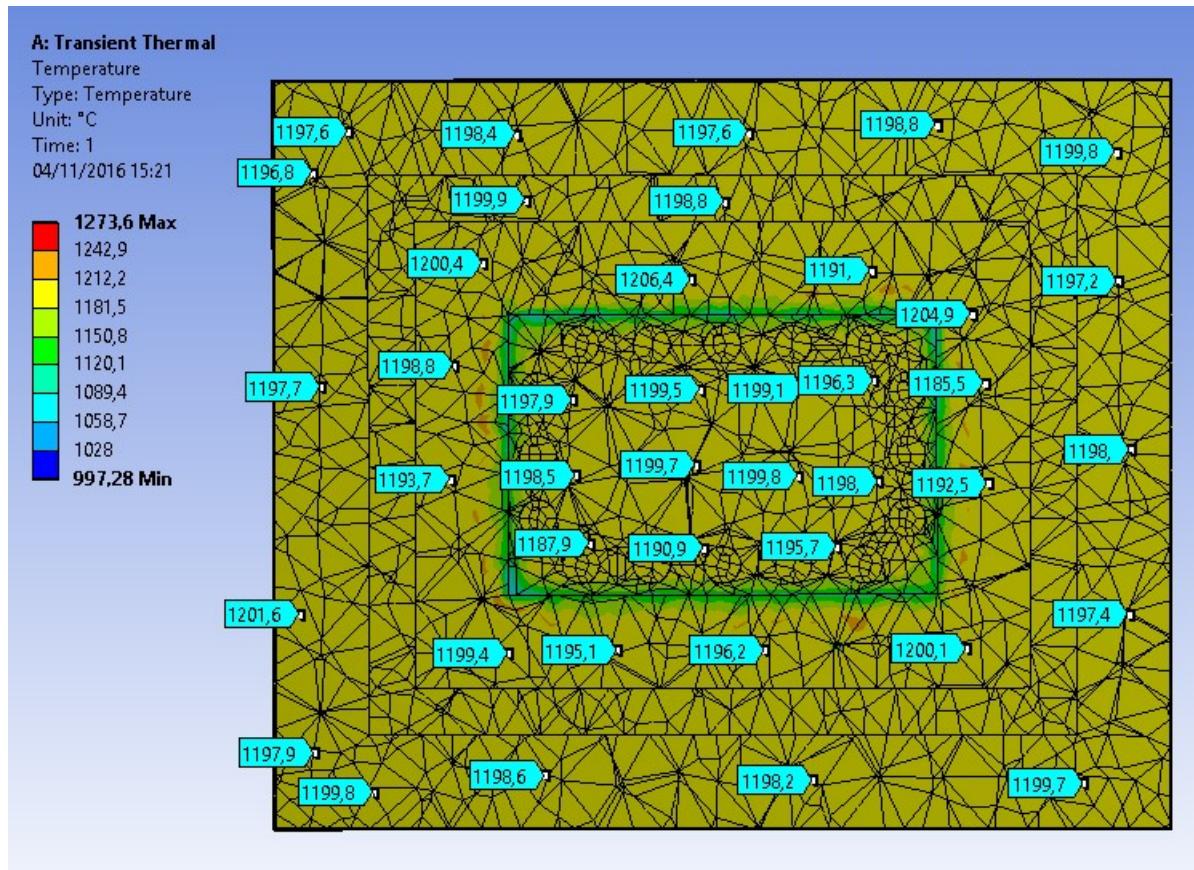


Figura 42 – Gráfico de temperatura inicial no regime transiente

Foi simulado para este forno, o período de uma hora, ou seja, o resultado presente na figura abaixo representa o estado do forno mantido em repouso, com as resistências desligadas e com a porta fechada após 3600 segundos, é visto que a temperatura média interna do forno é de 128°C.

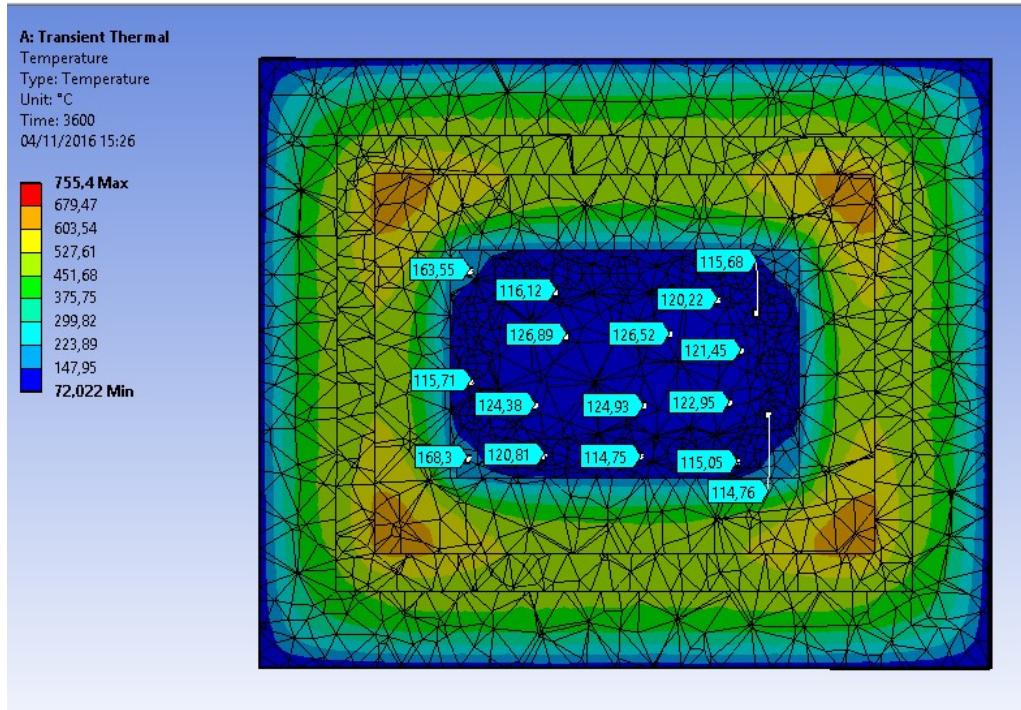


Figura 43 – Gráfico de temperatura final no regime transiente

Com base no resultado acima, foi obtido a temperatura central do forno, de todas as iterações produzidas pelo "Transient Thermal ANSYS", e plotadas no gráfico abaixo para o período de resfriamento após 1 hora em repouso.

A partir destes dados foi feito a interpolação por uma função Gaussiana de quinta ordem, apresentada a seguir, representada pela curva vermelha, e extrapolada para obter o tempo necessário de repouso do forno. A temperatura ambiente considerada foi de 22°C, e para atingir este tempo, foi necessário 8100 segundos ou 2 horas e 15 minutos.

$$T(t) = 204e^{-\frac{(t+8.753)^2}{87.32}} - 1029e^{-\frac{(t+574.3)^2}{861}} + 2,435 * 10.^7 e^{-\frac{(t+8110)^2}{2591}} + 554,9e^{-\frac{(t+5999)^2}{7877}} \quad (4.1)$$

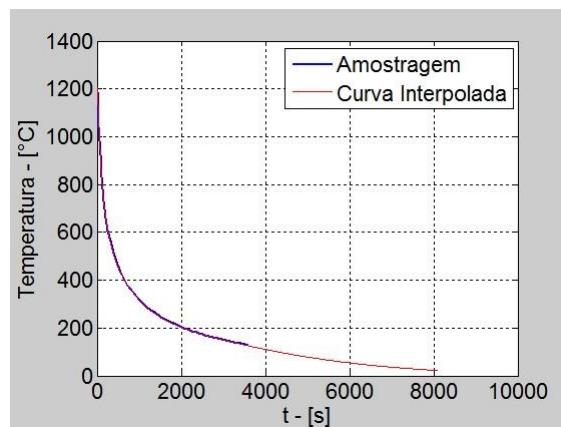


Figura 44 – Gráfico de resfriamento do ar no ponto central do forno

4.1.6 Aquecimento

Este modelo foi simulado de forma semelhante ao caso anterior, porém neste caso estamos aquecendo o forno a partir da temperatura ambiente até a temperatura de 1200°C. Para isso, foi considerado a temperatura constante dos resistores em 1200°C e um fluxo de calor saindo das resistências equivalentes a 3 kW.

Além disso as condições de transferências de calor (condução, radiação e convecção) também foram consideradas, tanto para o interior do forno, quanto para o exterior. Abaixo apresentam-se as distribuições de temperatura em um corte longitudinal e transversal do forno.

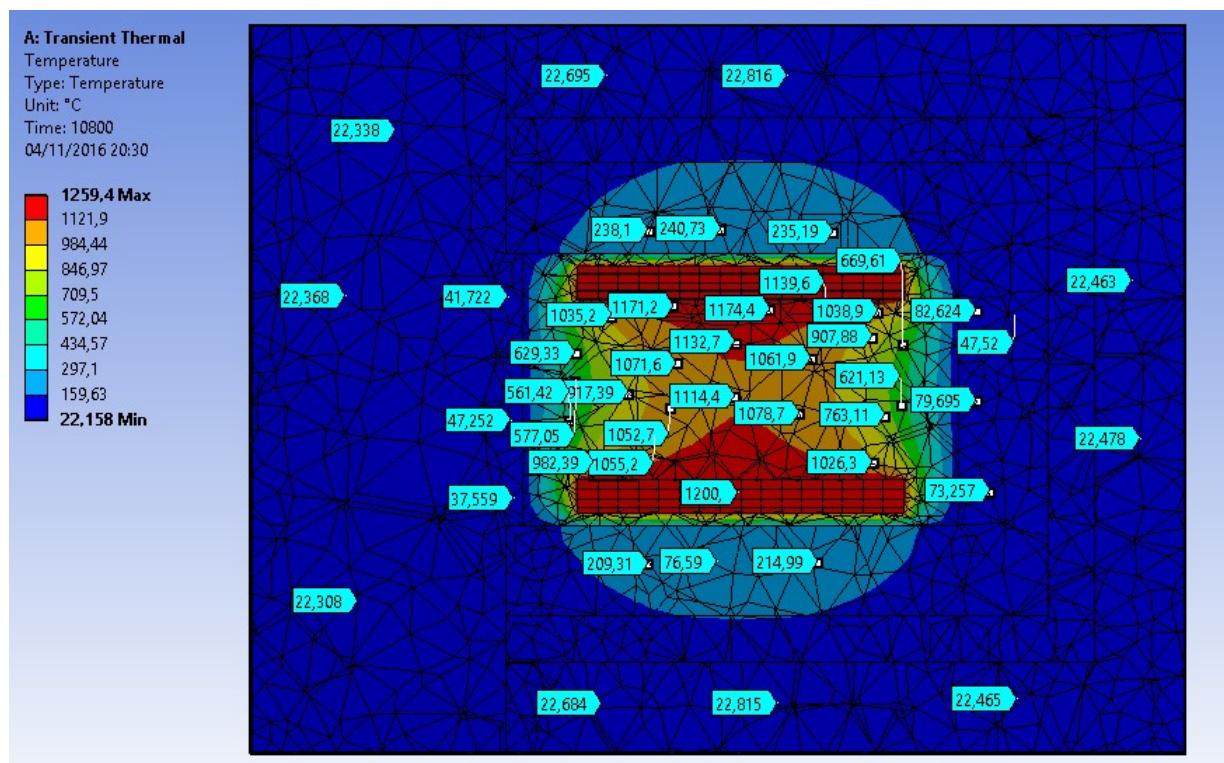


Figura 45 – Distribuição de temperatura ao longo do corte longitudinal do forno

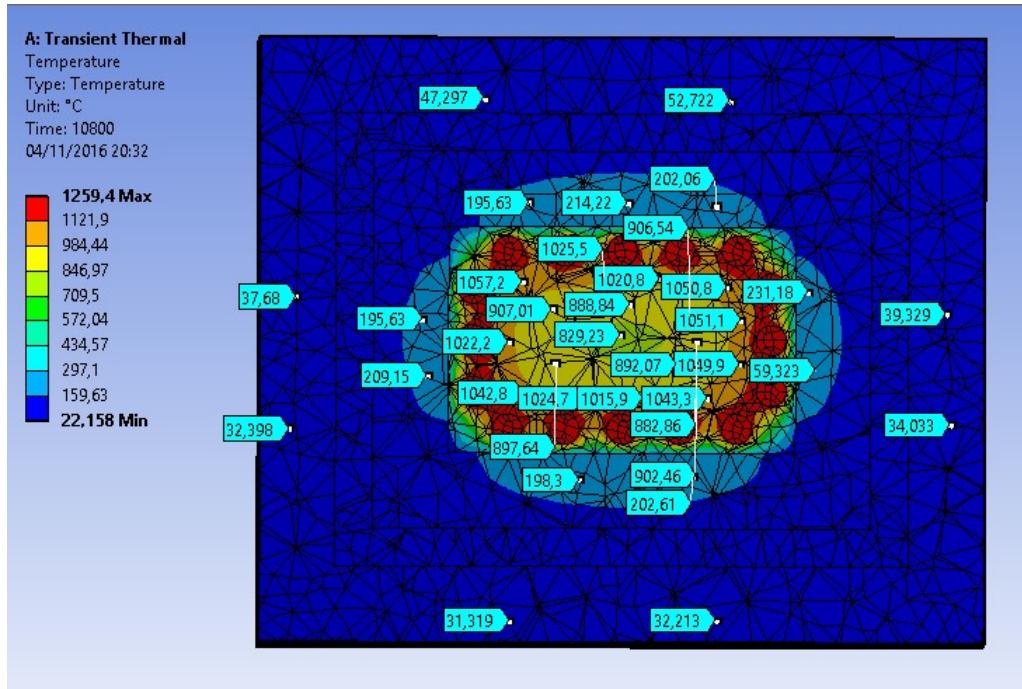


Figura 46 – Distribuição de temperatura ao longo do corte transversal do forno

A partir dos resultados acima, foram obtido a temperatura central do forno, de todas as iterações produzidas pelo "Transient Thermal ANSYS", e plotadas no gráfico abaixo para o período de aquecimento de 3 horas, porém foi feito o estudo de forma gráfica de apenas 3282 segundos, pois este entra se em equilíbrio em apenas 412 segundos.

Vale ressaltar que este equilíbrio em 412 segundos é apenas de um ponto central do ar no forno, e não significa portanto que toda a temperatura está em equilíbrio após este período. A partir destes dados foi feito a interpolação por uma função exponencial de segunda ordem apresentadas a seguir, como é apresentado na figura abaixo.

$$Tf(t) = 1119e^{-1,39 \cdot 10^{-6} \cdot t} + -1193e^{-0,01673 \cdot t} \quad (4.2)$$

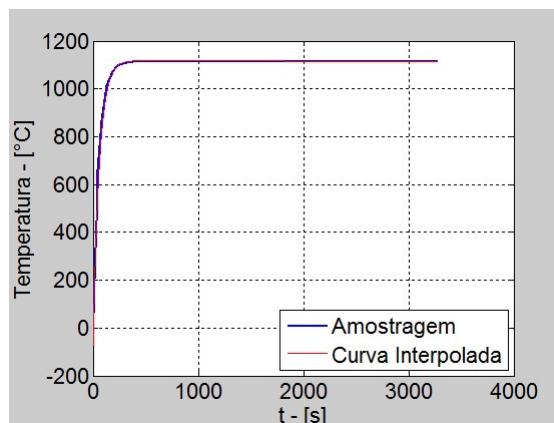


Figura 47 – Gráfico de aquecimento do ar no ponto central do forno

4.2 Métodos de Fabricação

A estrutura do projeto foi pensada para se obter a menor perda de calor durante o funcionamento do forno, uma variável crítica do projeto, bem como facilidade de fabricação, montagem dos elementos e custo associado.

Portanto uma pesquisa foi realizada pelo grupo elegendo os melhores materiais de acordo com as características do projeto.

Materiais	Descrição de uso	Ilustração
Placas de fibra cerâmica	As placas usadas para se fabricar as paredes internas (espessura de 50mm) e externa (espessura de 25 mm) do forno são de fibra cerâmica e possuem temperatura de trabalho de 1260°C.	
Cimento refratário	Possui temperatura de até 1400°C para trabalho.	

As placas de fibra cerâmicas foram medidas e cortadas de acordo com as dimensões especificadas no projeto segundo a tabela abaixo:

Descrição	Dimensões para produção do forno	Fotos
Placas laterais de revestimento interno do forno	Duas placas com 150 x 310 x 50 mm	
Placas de topo e chão de revestimento interno do forno	Duas placas com 330 x 310 x 50 mm	
Placa de fundo no revestimento interno do forno	Uma placa 230 x 150 x 50 mm	
Placa de topo e chao de revestimento externo do forno	Duas placas com 480 x 435 x 25 mm	
Placas laterais de revestimento externo do forno	Duas placas com 480 x 350 x 25 mm	
Placa de fundo do revestimento externo do forno	Uma placa com 430 x 350 x 25 mm	

4.3 Sistema de Controle

Para que o forno possa aquecer de maneira controlada, um circuito eletrônico de potência foi desenvolvido para controlar a energia vinda da tomada de 220 V de corrente alternada. O diagrama do sistema pode ser visto na Figura .

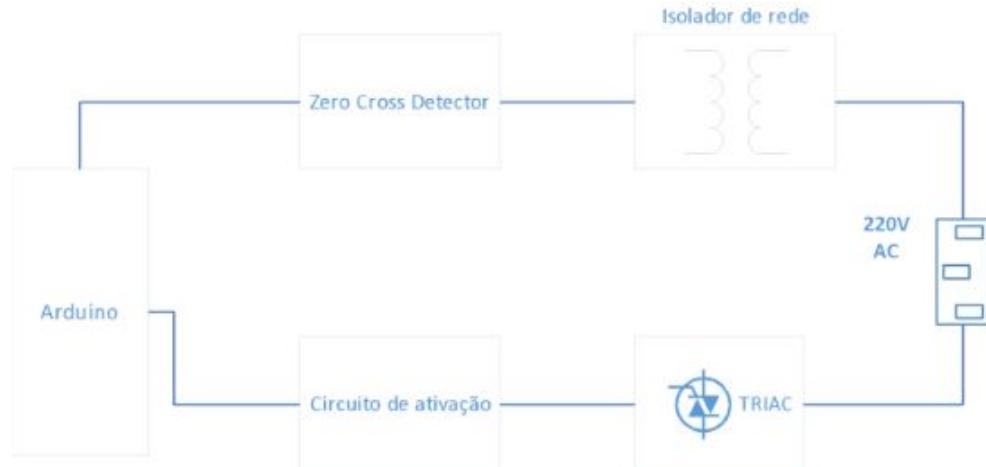


Figura 48 – Diagrama do circuito de potência

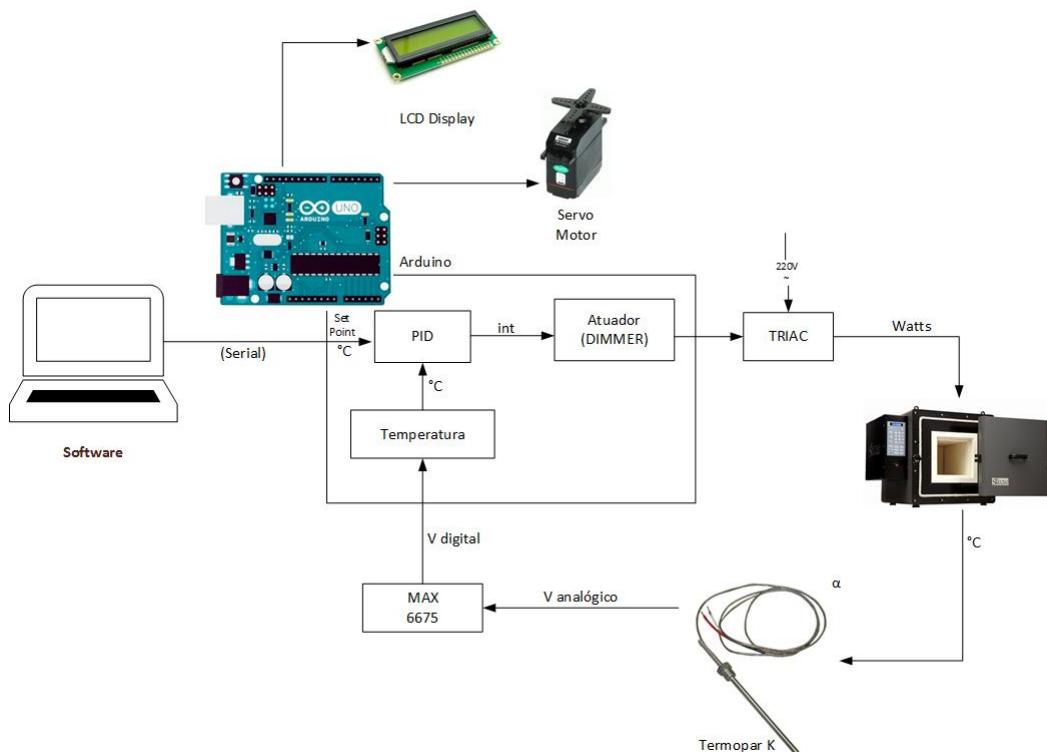


Figura 49 – Sistema de controle de temperatura do forno

Basicamente, o sistema é ligado à um isolador de rede por motivos de segurança que irá diminuir a tensão/corrente e irá se conectar ao detector de passagem por zero.

Esse circuito de detecção é responsável por gerar sinais no momento em que a rede cruzar o zero como mostra a Figura by [??](#). Pelo fato da rede ser de 60Hz, os cruzamentos serão detectados a cada 8.33ms. Esse sinal é então enviado ao microcontrolador arduino, que irá gerar interrupções durante cada recebimento de cruzamento por zero, e posteriormente, irá executar as funções de tratamento adequada.

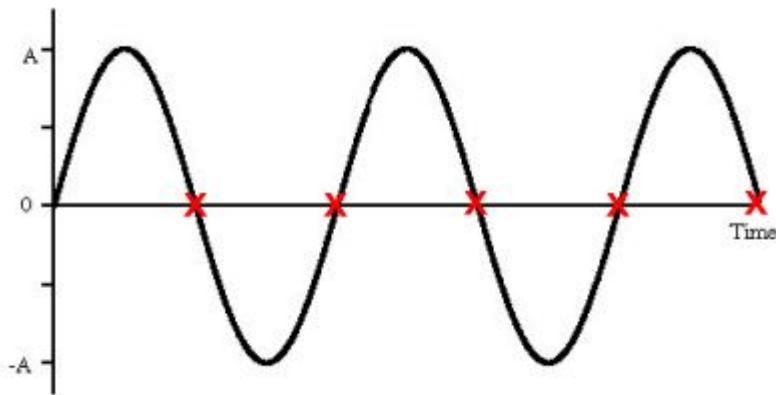


Figura 50 – Rede AC mostrando os momentos de cruzamento por zero.

O arduino irá então, enviar sinais para o circuito de ativação durante tempos precisamente calculados (da ordem de milisegundos, o que é totalmente factível para o arduino, que tem como processador o ATMEGA328 trabalhando a 16MHz).

O circuito de ativação, acionado pelo arduino, irá então produzir uma corrente de gate necessário para a ativação do triac no tempo calculado. O triac funciona conforme figura by [??](#). Ao detectar a passagem por zero, o arduino irá enviar o sinal para disparar no tempo certo o triac, sendo assim possível controlar a fase de acionamento desse dispositivo. Uma vez acionado, ele só é desligado quando a rede cruza o zero novamente.

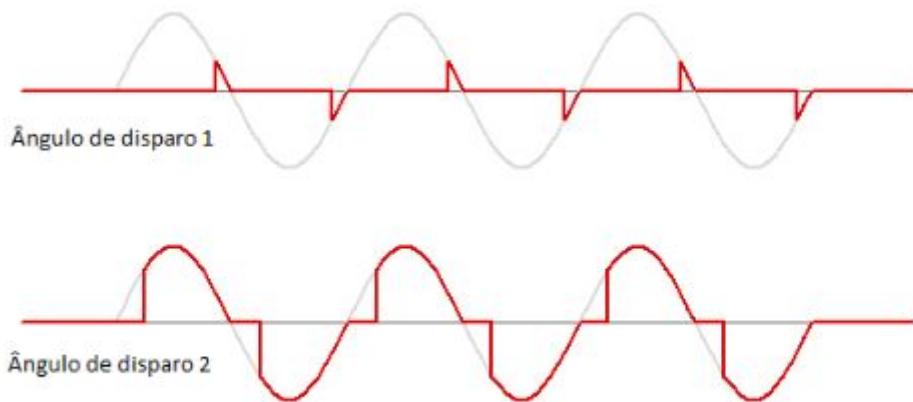


Figura 51 – Diferentes ângulos de disparo do triac.

O forno foi projetado para funcionar até 14A quando ligado em sua potência

máxima. Portanto, foi escolhido o triac BTA41-600b da ST Microelectronics, que suporta correntes de até 40A e transientes de até 400A, dando uma boa margem de segurança para o equipamento.

A figura by ?? mostra o circuito completo. Como pode-se ver um transformador 220-18V AC foi utilizado para isolar o circuito da rede. O circuito de detecção por zero é realizado por uma ponte de diodo que irá retificar o sinal, e estará assim, ligando o led contido no optoacoplador 4N25. Esse led polariza o transistor e assim, o arduino consegue detectar os pulsos gerados durante as passagens por zero da rede.

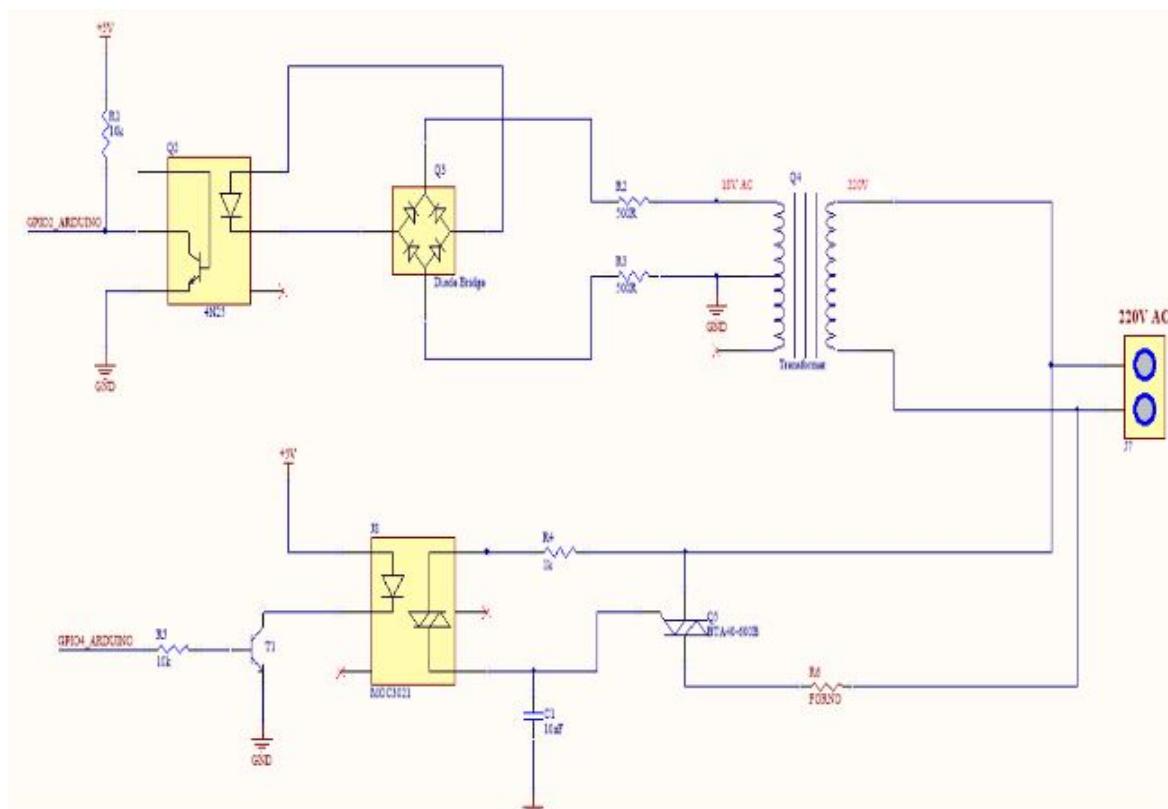


Figura 52 – Circuito completo de controle.

O arduíno envia através do GPIO4 ARDUINO, localizado na parte inferior da figura, os disparos do triac. O MOC3021 é um CI optoacoplador que possui um led e um DIAC. O objetivo desse CI é isolar o arduíno da rede elétrica. Ao mandar um pulso para o transistor T1, esse polariza e deixa passar corrente elétrica, o que liga o LED contido no MOC3021. Esse LED polariza o DIAC contido no CI, que deixa passar uma pequena corrente vinda da rede elétrica. Ao passar a corrente, o TRIAC é ligado, deixando a corrente AC vinda da rede entrar em contato com o forno até o próximo cruzamento por zero. O capacitor C1 é responsável por filtrar eventuais ruídos da rede.

4.3.1 Sistema de Temperatura

O módulo da temperatura é formado por um termopar tipo K que possui faixa de atuação de -270°C à 1230°C . Para cada valor de temperatura é gerado uma diferença de potencial de acordo com o anexo 1. Conforme apresentado no diagrama, é necessário um circuito condicionador de sinal, e foi escolhido para isso o CI MAX 6675, que irá amplificar e converter o valor analógico do termopar em um valor digital para leitura da temperatura no Arduíno, além de ser o circuito responsável pela compensação de junção fria, processo necessário para retirar a temperatura ambiente do cálculo da temperatura lida pelo termopar.

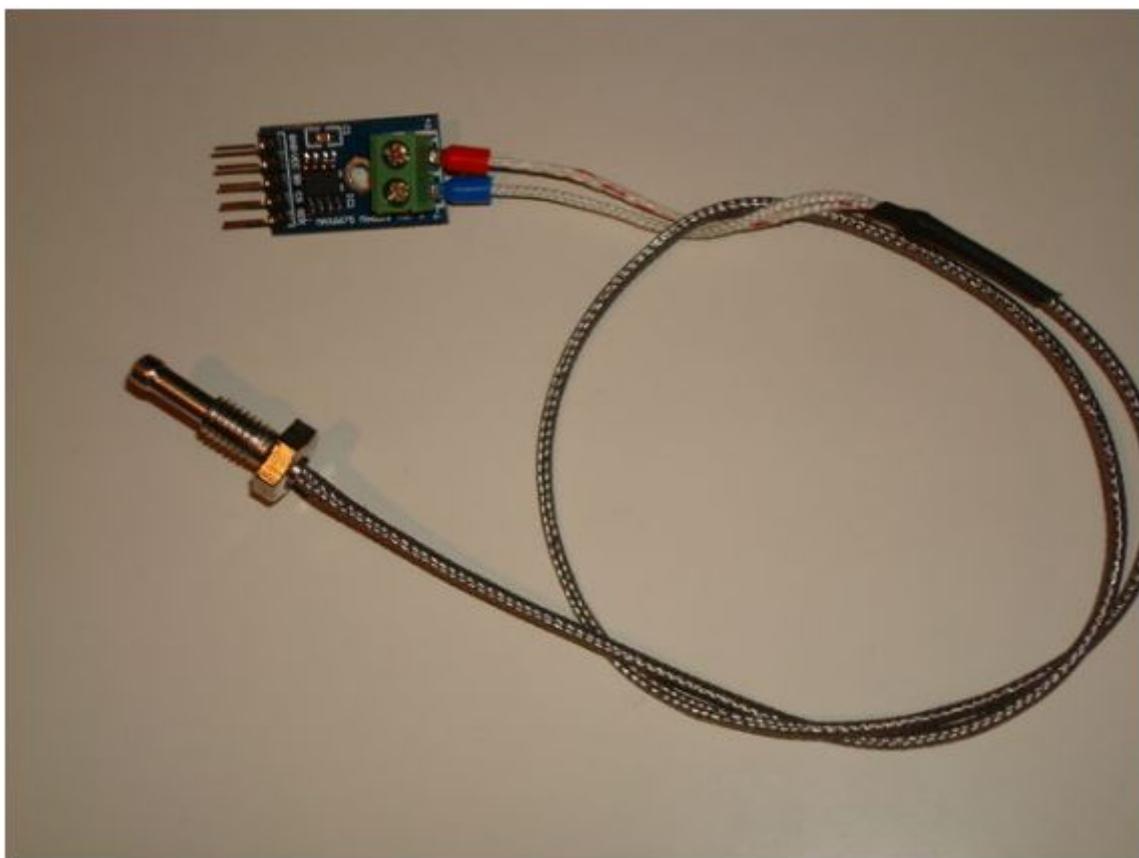


Figura 53 – Termopar com módulo de aquisição de dados.

Para leitura dos dados da temperatura, utiliza-se a biblioteca max6675.h do Arduíno para fazer a comunicação entre o microcontrolador e o termopar através do protocolo SPI (Serial Peripheral Interface). Esse tipo de protocolo é utilizado para a comunicação entre um microntrolador, denominado como mestre, e um ou mais periféricos, denominados como escravos. No ci MAX 6675 o pino SCK deve receber o clock de sincronismo com o Arduíno, o de SO é o pino responsável por enviar os dados de leitura do termopar para o Arduíno e o pino CS indica quando o Arduíno irá requisitar a comunicação com o MAX 6675.

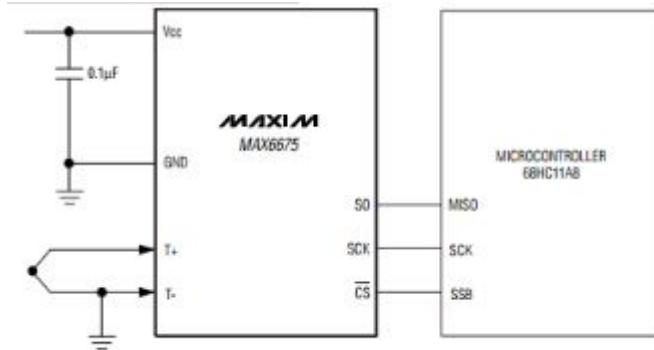


Figura 54 – Datasheet MAX 6675.

4.3.2 Controle PID

Para fazer o controle da temperatura interna do forno será utilizado um controlador PID discreto implementado dentro do Arduíno. O controlador PID é composto por três formas de atuação: proporcional, integral e derivativa. A ação proporcional é responsável por gerar uma resposta mais rápida ao sistema, muitas vezes, quando grande demais, gera instabilidade já que a medida que aumentamos o tempo de resposta da saída aumentamos também o erro do sistema. A ação integral é a correção de erros estacionários que ocorrem ao longo do tempo, nota-se que esta ação não pode ser empregada separada de uma ação proporcional. Por fim, a ação derivativa, assim como a ação integral, não pode ser aplicada separadamente da ação proporcional e tem como objetivo eliminar as variações da saída. Ao juntar as três ações podemos definir um sinal PID como:

$$u(t) = K_p * E(t) + K_i * \int E(t)dt + K_d * \frac{dE(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Onde:

- K_p : Coeficiente da ação proporcional;
- K_i : Coeficiente da ação integral;
- K_d : Coeficiente da ação derivativa;
- $E(t)$: Sinal de erro na entrada do controlador no instante t ;
- $u(t)$: Sinal de controle.

Para implementação do PID em um microcontrolador, nota-se pelos sistemas anteriores que precisamos de um controlador digital e para isso o PID deve ser implementado

de maneira numérica. Sabendo que as amostras já estarão espaçadas de um mesmo intervalo de tempo muito próximo de zero, pode-se aproximar a integral da equação 1 para uma soma dos dois últimos valores de erro e a derivada para uma subtração. Com isso, a equação discreta do PID que será implementada no Arduíno é:

$$u(t) = K_p * E(n) + K_i * [E(n) + E(n - 1)] + Kd * [E(n) - E(n - 1)] \quad (4.4)$$

O valor de temperatura recebido via serial pela aplicação web é denominado como set point e comparada com o valor de temperatura mais recente lido pelo termopar chamado de variável de controle. A diferença entre esses dois sinais é chamada de erro, pois é o quanto que falta para a temperatura do nosso sistema, o forno, ser igual a temperatura desejada pelo usuário. Com isso o controlador PID tem a função de tornar o sinal de erro igual a zero.

Através do sinal de erro o controlador PID gera um sinal de controle para o atuador, circuito responsável pelo disparo do dimmer, que consequentemente irá gerar uma ação, seja ela aumentar ou diminuir a potência do forno, que fará o sinal de erro tender a zero.

4.3.3 Trava Eletrônica

O forno será provido de uma trava controlada eletronicamente por software. Para isso foi escolhido o servo motor TOWER PRO MG995, com possibilidade de movimentação de 180 graus, com torque de 15KG/cm quando alimentado com 5V. Os testes mostraram que a sua funcionalidade é bem simples, bastando um simples sinal PWM como sinal de controle para a angulação do motor. O circuito está na Figura ??:

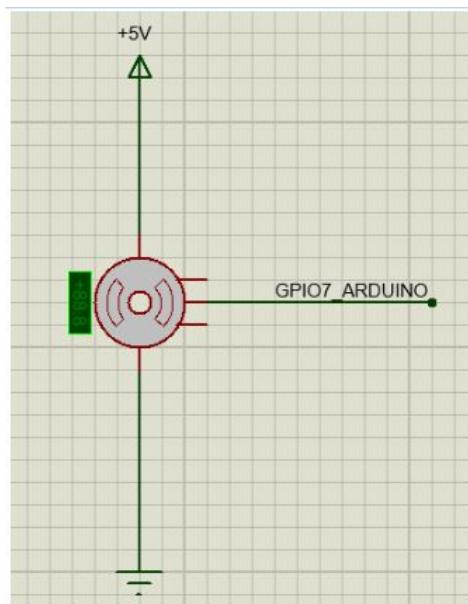


Figura 55 – Controle do Servo Motor para trava eletrônica.

4.3.4 LCD

O display de LCD 16x02 foi escolhido como interface do forno, para mostrar a temperatura em tempo real em frente ao forno.

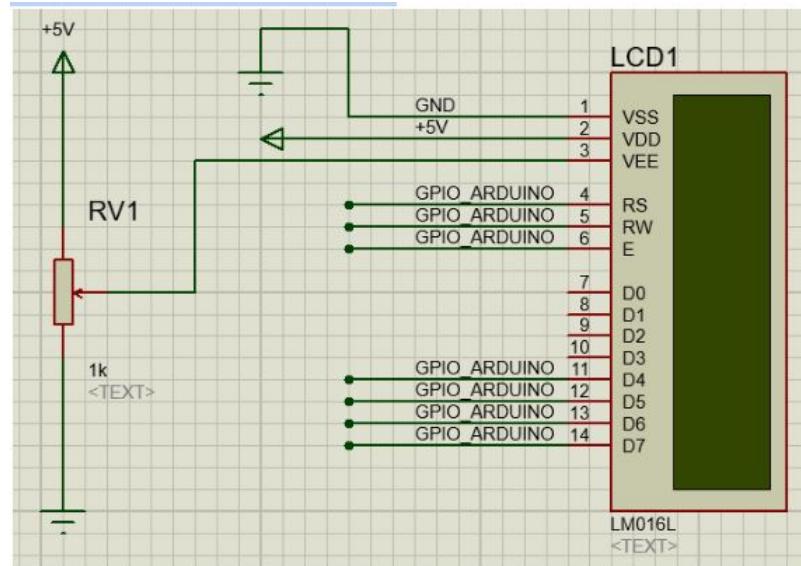


Figura 56 – Controle do Display de LCD.

O circuito está na figura by [??](#). Os pinos de escrita e dados são ligados ao arduíno. O potênciômetro é responsável por controlar a luz de fundo do display. A figura by [??](#) mostra o display de LCD em funcionamento:



Figura 57 – Display em Funcionamento.

4.3.5 Resultados

Para o teste do controle de potência foi utilizado uma lâmpada incandescente com resistência de 90Ω . Inicialmente foi feito um código, Anexo 1, para reconhecer o cruzamento com zero da rede elétrica e contar quantas vezes isso ocorre por segundo. Para isso, ativa-se uma interrupção no pino 2 do Arduíno e toda vez que esse valor for igual a zero incrementa na variável pulsos. Como esse cruzamento acontece 1 vez a cada meio ciclo e temos uma frequência da senóide da rede elétrica de 60 Hz, o valor reconhecido pelo Arduíno deve ser de 120 conforme imagem abaixo:

```
COM3 (Arduino/Genuino Uno)
120
121
120
120
120
120
120
120
120
120
121
120
```

Figura 58 – Contagem dos cruzamentos por zero de uma rede elétrica de 60 Hz.

Ao reconhecer o pulso, deve-se mandar um sinal de ativação do TRIAC de acordo com a quantidade de potência que se deseja inserir na carga, para isso foi feito o código conforme Anexo 2. A tabela a seguir foi feita de acordo com a porcentagem de corrente que se desejava passar para a lâmpada, controlando em qual o ângulo de disparo do triac, e foi medida a tensão de saída da carga:

Potência (%)	Tensão (VRMS)
0	2.6
10	10.3
20	30.5
30	59.7
40	92.6
50	125.8
60	159.2
70	185.2
80	204
90	214

Figura 59 – Relação entre porcentagem da potência desejada e a tensão RMS medida na carga.



Figura 60 – Luminosidade da lâmpada x tensão de saída.

Para leitura dos valores de temperatura do termopar foi considerado um delay de 1s, conforme mostra o código no Anexo 3, entre as amostras coletadas e apresentado os valores no monitor do Arduíno. Para variar a temperatura foi utilizado um isqueiro próximo ao termopar e visto a temperatura medida.

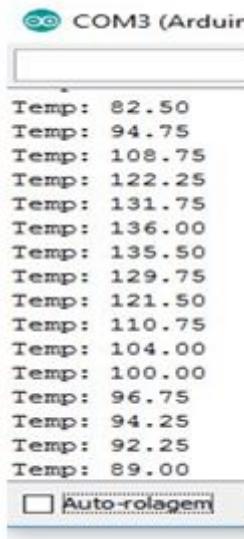


Figura 61 – Teste da temperatura.

4.4 Arquitetura de Software

Para a construção da aplicação proposta foi definido a implementação de um sistema web ao qual ficarão dispostas todas as funcionalidades. Este sistema terá como servidor a Raspberry Pi e múltiplos usuários poderão se conectar e visualizar o processo de têmpera.

Com isso, a implementação deste sistema utilizará das seguintes tecnologias:

- Linguagem de Programação Python - linguagem de programação de alto nível, multiparadigma, interpretada e de tipagem dinâmica e forte;
- Django Framework - framework para desenvolvimento web, escrito em Python, open source, que utiliza o padrão model-template-view. (MTV), utiliza por padrão banco de dados Sqlite3;
- ReactJS - biblioteca open source de JavaScript fornecendo uma visão para os dados processados em HTML. Utiliza-se do conceito de componentes, aos quais permite uma modularização da página web, diminuindo assim sua interdependência e aumentando o reuso.

4.4.1 Metodologia de Desenvolvimento

A metodologia do projeto de software do forno deverá seguir as seguintes práticas:

- Elicitação de requisitos: Serão utilizados métodos de brainstorming e prototipação rápida para aquisição de novas features. Cada feature nova será escrita em um

cartão com uma linguagem simples para que qualquer pessoa, sendo desenvolvedora ou não, consiga entender do que se trata. Em cada cartão haverá também valor de prioridade e critérios de aceitação para que o seja validada.

- Cartões: os cartões seguem dois modelos. O primeiro, criado em 2001 por uma equipe de desenvolvedores da empresa Connextra. Deve possuir título auto explicativo e a descrição seguindo o formato “Como <papel>, gostaria que <desejo/meta>, de modo que <benefício>”. O segundo é o modelo dos três C’s que foi idealizado por Ron Jeffries também em 2001. Além de conter a descrição do cartão no formato acima, juntamente com o valor de prioridade, ainda há espaços para conversação entre desenvolvedores e clientes e, por fim, os critérios de aceitação que é a confirmação de que o que foi desenvolvido está de acordo com o descrito.
- Kanban: ferramenta para indicar o andamento do fluxo do processo de desenvolvimento do software, permite um controle detalhado de em qual etapa se encontra a funcionalidade que esteja sendo desenvolvida. Constitui de um quadro com 4 colunas em geral: Backlog - onde ficam as funcionalidades à serem desenvolvidas; A fazer (To do) - selecionadas as funcionalidades definidas para aquela determinada Sprint, elas são colocadas nesta coluna; Em desenvolvimento (Doing) - funcionalidade em desenvolvimento; Concluída (Done) - após a finalização do desenvolvimento da funcionalidade, esta é posta nesta coluna. Assim sendo, esta ferramenta permite uma visualização melhor do fluxo de trabalho no desenvolvimento da aplicação.
- Sprints: é um período de tempo variável entre uma semana a um mês onde as funcionalidades escolhidas são desenvolvidas. No início de cada sprint, uma sprint planning meeting é realizada informalmente para se fazer uma retrospectiva da sprint que passou e planejamento da próxima que está começando.

4.4.2 Features

As features do sistema de controle do forno térmico serão descritas pela matriz Feature e Benefício (FAB) ([SAFE, 2015](#)). Elas descrevem os requisitos funcionais do sistema proposto.

Features	Benefícios
Cadastro de Usuários	Possibilitar o cadastro de quem poderá utilizar o forno.
Sistema de Login	Garantir a segurança do sistema, identificando o usuário que utilizará o forno.
Seletor de Temperatura	Possibilitar ao usuário escolher a temperatura desejada para a realização do experimento.
Cronômetro	Informa o tempo decorrido do experimento, o tempo esperado para término e o tempo restante para chegar no esperado.
Gráfico de Temperatura	Apresentar ao usuário em tempo real a variação de temperatura ocorrida dentro do forno.
Iniciar Processo de Têmpera	Permitir ao usuário iniciar o processo ao que se dará o experimento.
Histórico de Sessão	Salvar relatório dos experimentos anteriormente realizados, e apresentá-los caso solicitados.
Sistema de Segurança	Dispor de um botão-emergência ao qual deverá interromper o processo imediatamente.
Informações	Mostrar informações sobre o processo à de têmpera, assim como as informações necessárias para realização do experimento.
NBRs	Apresentar ao usuário as normas relacionadas ao procedimento e materiais.
Estatísticas	Por meio dos dados de experimentos anteriores, apresentar estatísticas sobre a utilização do forno.

Tabela 1 – Matriz de Features

4.4.3 Requisitos Implementados (PC2)

4.4.3.1 Cadastro de Usuário

O sistema de cadastro de usuário que foi implementado necessita das seguintes informações:

- User - é uma chave estrangeira da model de usuários padrão do Django. Possui dados de username, que será a matrícula do usuário, e-mail e senha, que irá variar entre 6 e 16 caracteres.

- Nome - primeiro nome do usuário, terá tamanho máximo de 50 caracteres e será obrigatório seu preenchimento;
- Sobrenome - sobrenome do usuário, terá tamanho máximo de 50 caracteres e será obrigatório seu preenchimento;
- Data de Criação - data ao qual o usuário foi cadastrado, seu preenchimento é automático e pegará a hora e a data atual do sistema;
- Matrícula - matrícula do usuário cadastrado, terá tamanho máximo de 10 caracteres e será obrigatório seu preenchimento;

4.4.3.2 Login de Usuário

Utilizando bibliotecas especiais da tecnologia utilizada, foi implementado o sistema de login/logout e permissões ao qual o usuário irá dispor para o manuseio do sistema e do forno. Os dados necessários para efetuar o login será a matrícula e senha cadastrada.

4.4.3.3 Início de Tratamento

Após o usuário estar autenticado será apresentada a opção de início da realização do experimento, nesta tela será definido os alunos participantes, descrição do material que será tratado, o tempo necessário, a temperatura máxima e o botão de início. Para fim de relatório, o sistema registrará o horário de início e fim do experimento, ou seja, o horário ao qual foi ligado e desligado o forno, e as informações do professor/técnico responsável que estará logado no sistema.

O comando enviado ao arduino será uma string com x caracteres, onde os dois primeiros caracteres definirão o que será acionado. Os dispositivos que serão acionados ao apertar o botão de início serão a corrente que passará pelos resistores para o aquecimento do forno e a trava de segurança da porta por parte de um servomotor. O Arduido, por sua vez, enviará de volta para o servidor uma string com x caracteres informando o valor da corrente e da temperatura, bem como se a porta está trancada.

4.4.3.4 Gráfico em Tempo Real

Iniciado o experimento, o sistema redireciona o usuário para a página de acompanhamento, onde trará as informações de tempo decorrido, temperatura atual do forno por meio de gráfico em tempo real. Este gráfico é responsável por apresentar as informações de temperatura capturada pelo termopar pelo tempo decorrido. Esta página de acompanhado também irá dispor de um botão de segurança para a interrupção do experimento e desligamento do forno.

4.4.4 Plano de Teste de Software

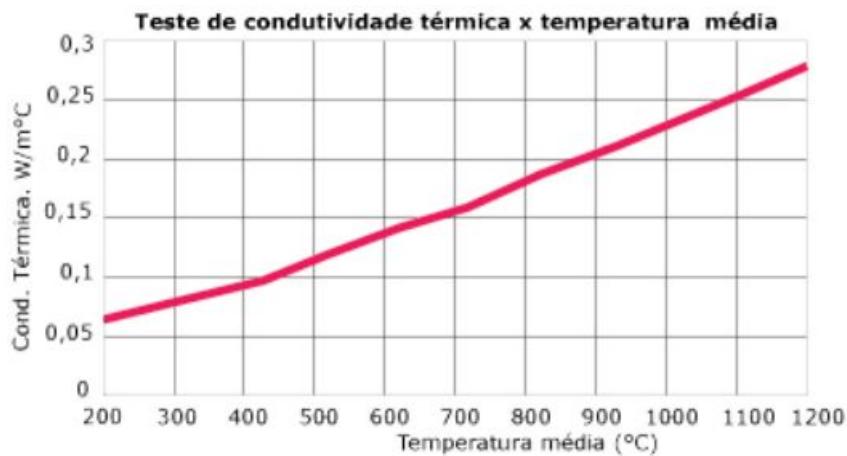
O Plano de Teste de Software é apresentado no Anexo 4.

4.5 Mudanças no Escopo

4.5.1 Estrutural

4.5.1.1 Isolamento Térmico

Na parte estrutural foi a escolhido a utilização das placas cerâmicas no lugar dos tijolos refratários, pela melhor qualidade no isolamento térmico, diminuição de custo e fácil usinabilidade. As características da placa e a sua curva de condutividade térmica estão mostradas abaixo.



Características:

- Composição: Alumina, Sílica e ligantes
- Temperatura de trabalho: 1260°C
- Ponto de fusão: 1750°C
- Cor padrão: Branca
- Densidade: 300Kg/m³
- Rigidez dielétrica: 29V/mm

O custo associado a estrutura do forno foi minimizada, pois os tijolos teriam um custo de R\$ 1080,00. Já com as placas refratárias, esse custo foi reduzido pela metade, conforme mostrado no orçamento do fornecedor.

Orçamento: 083174												
Cliente: ALEXANDRE DE SOUSA RIBEIRO CNPJ: 00.903.442/0781-84 Endereço: RUA SQN 202 - ASA NORTE - CEP:70832-070 - BRASILIA - DF Data do cadastro: 16/09/16 Fone: (61) 99107-1309					Inscrição Estadual: ISENTO Pedido do Cliente n°.: Email Alexandre Contato: SR ALEXANDRE Vendedor: CLAUDIA C. DEL VALLE DE ALMEIDA							
Código: 30816												
Sep.	Quantid.	UM	Part Number	Código	Descrição do Produto	NCM	% ICMS	% IPF	Valor ICMS ST	Entrega	Preço Unitário	Preço Total
1	1,00	pc	122032050	8025	PLACA DE FIBRA CERAMICA 1250°C COM DENS 320KG/M3 - 50 X 600 X 1200MM	8806.90.10	4,00	0,00	0,00	Imediata	270,00	270,00
2	1,00	pc	122032025	8024	PLACA DE FIBRA CERAMICA 1250°C COM DENS 320KG/M3 - 25 X 600 X 1200MM	8806.90.10	4,00	0,00	0,00	Imediata	135,00	135,00
3	10,00	m²		8457	CORDA (GAXETA) QUADRADO 3/8 POL - FIBRA CERAMICA + SS, 1250°C DENS. 500 KG/M3	8806.90.10	4,00	0,00	0,00	Imediata	2,90	29,00
Observações: ser ate 2/10/2016										Sub-total: 434,00 IPF: 0,00 ICMS ST: 0,00 Frete/Seguro: 0,00 TOTAL R\$ 434,00		

Uma gaxeta para vedação da porta do forno também foi comprada, assim terá uma garantia de menor perda de calor pela mesma.

4.5.1.2 Cimento Refratário

Foi usado para se unir as placas a fim de garantir um isolamento mais satisfatório, e também foi usado como uma camada interna nas placas do forno, pois garante uma resistência mecânica melhor, e o mais importante, resolve o problema de super aquecimento das placas devido ao contato direto com as resistências. De acordo como fornecedor, esse cimento resiste até uma temperatura de 1400°C, que o torna ideal para o uso. O custo associado a essa mudança foi de 150 R\$, que não foi adicional, pois já iria ser usado para se unir os tijolos especificados no ponto de controle anterior.

4.5.2 Sistema de controle

4.5.2.1 Controlador PID

O controlador inicial sugerido foi o ON/OFF, já que não sabíamos como fazer o controle da corrente que atua sobre a resistência do forno, sendo assim seria feito o controle da temperatura de uma maneira bruta. Porém foi verificado a possibilidade de controlar a potência do forno com o circuito de disparo do dimmer controlando a fase da tensão AC e posteriormente a parcela dessa que atuará sobre a resistência, controlando a temperatura do forno de maneira mais precisa e suave. Esse circuito é chamado de atuador no sistema de controle já que ele irá controlar o comportamento do sistema, o forno. Com a presença de um atuador o controle da solução proposta será feito por um PID já que este é mais seguro, preciso e eficiente do que o controlador ON/OFF.

4.5.2.2 Microcontrolador

Como o circuito que controla a potência do forno é feito no Arduíno, já que este possui saída PWM e permite enviar diferentes sinais de controle, foi unificado todos os códigos, incluindo leitura de temperatura, comunicação com aplicação web e controlador PID, para serem feitos no ambiente do Arduíno. Com isso, a Raspberry Pi não será mais utilizada.

4.5.3 Sistema Web

4.5.3.1 Arquitetura de software

A mudança mais significativa do projeto da aplicação web foi a remoção da ferramenta Django REST Framework (DRF). Esse framework é muito útil para criar APIs (Application Programming Interface) que aceitam requisições de outras aplicações qualquer. A princípio, a ideia de adicionar o DRF era apenas a de incorporar uma nova ferramenta para aumento do escopo do projeto, contudo esta adição não iria agregar valor algum ao produto final. A API que seria criada também não seria útil para nenhuma outra aplicação, pois o produto final ficaria restrito apenas a uma rede local.

Como não há valor agregado, a decisão feita por parte dos desenvolvedores foi de descartar seu uso para evitar um possível overhead por desconhecimento da ferramenta e de sua correta implementação.

4.5.3.2 Integração

Como houve mudança na sistema de controle, a integração com este sistema também mudará. Para se comunicar com o Arduino, utilizaremos a biblioteca python chamada pyserial, que faz comunicação com qualquer dispositivo que esteja ligado em uma porta serial. Como o Arduino utilizará uma porta USB (Universal Serial Bus) como fonte de energia para ser ligado, será possível então enviar e receber dados por este meio de transmissão.

Referências

- ARRUDA, M. B. B. Como fazer referências: bibliográficas, eletrônicas e demais formas de documentos. 2007. Disponível em: <<http://bu.ufsc.br/frameref.html>>. Nenhuma citação no texto.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: Informação e documentação — referências. Rio de Janeiro, 2000. Nenhuma citação no texto.
- BORDALO, S. N.; FERZIGER, J. H.; KLINE, S. J. The development of zonal models for turbulence. In: Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering. [S.l.: s.n.], 1989. v. 1, p. 41–44. Nenhuma citação no texto.
- CLARK, J. A. Private communication. University of Michigan, 1986. Nenhuma citação no texto.
- COIMBRA, A. L. Lessons of continuum mechanics. São Paulo, Brazil, p. 428, 1978. Nenhuma citação no texto.
- INMETRO. Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia. Rio de Janeiro, Brasil, 2013. 75 p. Nenhuma citação no texto.
- SAFE. Scaled Agile Framework 4.0 - Scaled Agile Inc. 2015. Disponível em: <<http://www.scaledagileframework.com/features-and-capabilities>>. Citado na página 73.
- SOVIERO, P. A. O.; LAVAGNA, L. G. M. A numerical model for thin airfoils in unsteady motion. In: Journal of the Brazilian Societyt Mechanical Sciences. [S.l.: s.n.], 1997. v. 19, n. 3, p. 332–340. Nenhuma citação no texto.
- SPARROW, E. M. Forced convection heat transfer in a duct having spanwise-periodic rectangular protuberances. In: Numerical Heat Transfer. [S.l.: s.n.], 1980. v. 3, p. 149–167. Nenhuma citação no texto.