



Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Projeto Integrador de Engenharia 1

Forno para Cura de Materiais Compósitos

**Autor:Turma B
Orientador: Artur Bertoldi**

Brasília, DF

2018



Turma B

Forno para Cura de Materiais Compósitos

Trabalho final de Projeto Integrador de Engenharia
1 da Universidade de Brasília para
o Ponto de Controle 3.

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Artur Bertoldi

Brasília, DF
2018

Resumo

Um compósito consiste em um material multifásico feito naturalmente ou artificialmente. As fases de um compósito devem ser quimicamente distintas e devem estar separadas por interfaces diferentes. A maioria dos compósitos tem a função de melhorar características mecânicas de seus constituintes ao combiná-los, tais como rigidez, tenacidade, resistência nas condições ambientais e altas temperaturas.

O compósito a ser curado no seguinte trabalho é um compósito polimérico reforçado com fibra de carbono. Essa escolha se deve ao fato de que o carbono é um material cuja fibra tem alto desempenho e é o mais usado em compósitos avançados com matriz polimérica, isso é, que não contém fibra de vidro. Além disso, à temperatura ambiente as fibras de carbono não afetadas pela umidade ou por fatores como incidência solar, ventos, exposição à ácidos ou bases.

Como os compósitos tratam-se da união de materiais distintos, formando um produto final mais resistente em virtude da característica inerente de cada composto e da união resultante dos materiais. Este tipo de material é comumente utilizado na indústria aeroespacial, principalmente em carcaça de motores à jato, asas fixas e componentes de helicópteros (como asas, fuselagem, estabilizador e pá do leme), contudo esse tipo de fibra exigem um preparo maior para serem utilizadas e a curagem faz parte dessa série de preparos a fim de que a peça sofra uma fusão e seja essencialmente definida.

Palavras-chaves: Compósitos, forno, arduino, curagem, engenharia, aeroespacial, aeronáutica, fibra de carbono.

Conteúdo

1	Introdução	7
I	Planejamento do Projeto	9
2	Requisitos	10
2.1	Requisitos do sistema	10
2.1.1	Requisitos Funcionais	10
2.1.2	Requisitos Não Funcionais	10
2.2	Termo de Abertura do Projeto (TAP)	11
2.2.1	Descrição do projeto	11
2.2.2	Propósito e Justificativa	11
2.2.3	Objetivos	11
2.2.4	Requisitos de Alto Nível	12
2.2.5	Riscos de Alto Nível	12
2.3	Estrutura Analítica do Projeto (EAP)	13
3	Orçamento Final do Projeto	14
II	Cálculos de Dimensionamento e Controle	15
4	Introdução aos Cálculos	16
5	Distribuição Interna de Temperatura	16
5.1	Equação de Laplace	16
5.2	Método das Diferenças Finitas	17
5.3	Método de Gauss-Sidel	17
5.4	Critério de Sassenfeld	18
5.5	Resultados	19
6	Dimensionamento do Isolamento Térmico	20
7	Análise dos Números Relacionados as Resistências	21
8	Temperatura da Resistência	23
8.1	Potência nas paredes:	25

9 Definição do Sistema de Controle	26
9.1 Proportional–Integral–Derivative Controller (PID)	26
9.2 Ajustando as Variáveis do Controlador pelo Método de ström–Hägglund	27
III Definição dos Modelos Elétricos e Eletrônicos	28
10 Parte Eletrônica	29
10.1 Módulo de Eletrônica	29
10.2 Componentes Eletrônicos	29
10.3 Programação do Arduino	30
11 Parte Elétrica	34
11.1 Circuito Resistivo	35
11.2 Potência com PWM	36
IV Definição da Estrutura	37
12 Lista de Materiais	38
13 Procedimentos de Montagem	38
14 Vistas da Estrutura	40
V Conclusão	43
VI Anexos	46
15 Anexos Cálculo	47
15.1 Tabelas e Diagramas	47
15.2 Gráficos e Simulações	48
16 Anexos Eletrônica	51
16.1 Esquemáticos Eletrônicos	51
16.2 Relatórios de Teste das Resistências	55
17 Anexos Estrutura	57
VII Referência Bibliográfica	66

Conteúdo

1 Introdução

Denomina-se material compósito todo aquele composto que tem suas propriedades determinadas por duas ou mais fases quimicamente distintas que o constituem. A combinação de materiais é feita buscando unir as melhores qualidades de cada constituinte.

“A palavra compósito no termo ‘materiais compósitos’ significa que dois ou mais materiais são combinados numa escala macroscópica para formar um terceiro material útil. A vantagem dos materiais compósitos é que, se bem projetados, eles exibem as melhores qualidades de seus componentes e frequentemente algumas qualidades que nenhum constituinte possui”. (Robert M. Jones, 1999).

Embora a combinação de materiais seja feita com o objetivo de melhorar o conjunto, muitas vezes esses arranjos têm características conflitantes, como isolamento ou condutibilidade térmica, logo, tem-se que selecionar as propriedades de acordo com a funcionalidade do objeto.

Este material, apesar de ser majoritariamente associado a algo sintético, possui muitos exemplos que estão presentes no corpo humano, como os ossos, que combinam a fluidez e resistência do colágeno com a rigidez e fragilidade da apatita, reunindo as melhores características de cada um deles.

Ademais, devido à, principalmente, melhora na resistência, diminuição no peso da estrutura, enfim, combinações benéficas entre os materiais, o investimento nos compósitos cresce continuamente. A indústria automotiva e a aeronáutica são duas das indústrias que mais se beneficiam deste produto.

Focando na indústria aeronáutica, tem-se que a presença de materiais compósitos na fuselagem diminui o peso da aeronave, o arrasto, e faz com que as partes não estejam tão vulneráveis à corrosão, colaborando para que esta possa transportar mais *payload*, melhore o desempenho e a durabilidade, respectivamente.

Embora as características positivas sejam muitas, algumas negativas ainda permanecem mesmo com a combinação. A fibra de carbono, compósito manipulado neste projeto, é um material frágil, ou seja, o limite elástico e a resistência máxima à tração são praticamente iguais, fazendo com que o material não deforme antes de romper. Essa propriedade é indesejada, visto que a deformação colabora para a detecção de falhas, e, caso a estrutura sofra uma colisão, o material absorva satisfatoriamente a energia e não estilhaça.

O processo de cura é uma parte essencial da fabricação de compósitos. No caso particular da fibra de carbono, e da resina epóxi, há a necessidade de uma

faixa de temperatura específica e da presença de vácuo. Pensando neste processo, foi escolhido o tema do Projeto.

Com o objetivo de facilitar o processo de cura para equipes de competição e pequenas empresas, posto que o calor favorece o cross-link da resina com a fibra de carbono, a fabricação de um forno para cura de fibra de carbono foi a solução ideal. Sendo assim, foi posta em prática a construção do mesmo a partir do conhecimento geral dos membros do grupo.

O objetivo primordial foi criar uma estrutura em que o processo fosse mais rápido e efetivo, levando o sistema a uma temperatura determinada pela resina utilizada através do aquecimento feito por resistências elétricas. Depois, com o estudo da situação e com o dimensionamento, foi calculada a distribuição de temperatura dentro do forno, quantas resistências seriam necessária, entre outros detalhes.

Dado que a proposta se baseava em atender as necessidades de equipes de competição e de empresas de pequeno porte, um requisito importante consistia no preço final do produto, visto que o custo não poderia ser muito elevado devido às condições financeiras de tais organizações.

Este documento apresenta todo escopo da construção do forno para cura de materiais compósitos, com foco na fibra de carbono, que permite a compreensão da área estrutural e de cálculo, assim como detalhes referentes aos componentes de eletrônica e de controle do sistema, que permitiram a escolha de temperatura, a temporização e o cuidadoso controle das resistências.

Parte I

Planejamento do Projeto

2 Requisitos

2.1 Requisitos do sistema

Os requisitos para a produção do sistema foram separados em Requisitos Funcionais, que são os serviços para o uso e interação direta do usuário, e Requisitos Não Funcionais, que não são identificados de primeira mão pelo usuário, porém são necessários para o funcionamento do forno.

2.1.1 Requisitos Funcionais

- RF01 O sistema deve ser capaz de controlar a intensidade de calor;
- RF02 O usuário deve ser capaz de definir a temperatura interna que o forno irá se manter;
- RF03 O forno deve ter um contador que o faça ficar ligado na temperatura selecionada pelo usuário durante o tempo selecionado pelo mesmo;
- RF04 O forno deve conter um display que informe a temperatura e o tempo de funcionamento do forno;
- RF05 O forno deve gerar um relatório em txt após o término do processo demonstrando o histórico da temperatura;
- RF06 O produto deve conter um manual de instruções de uso.

2.1.2 Requisitos Não Funcionais

- RNF01 Utilização de materiais de baixo valor para facilitar a venda para empresas juniores;
- RNF02 A estrutura deve ser de madeira;
- RNF03 O forno deve ter dimensões internas de 550mm x 550mm x 550mm para ter fácil manuseio e não demorar muito para aquecer;
- RNF04 A estrutura deve resistir a temperatura de 150 °C;
- RNF05 O forno deve conter isolamento térmico interior para evitar a perda de calor;
- RNF06 O forno deve conter isolamento térmico exterior para não transferir muito calor para a área externa;
- RNF07 As mantas internas e externas também serão utilizadas para proteger a madeira;
- RNF08 O projeto deve ter uma caixa de madeira independente do forno para guardar os componentes eletrônicos e deixar fixado o display;
- RNF09 A estrutura deve conter uma prateleira para colocar o material compósito;
- RNF10 O forno dispõe de 4 resistências retas que dissipam 155W a uma corrente de 220V cada;
- RNF11 O forno contém dois termômetros;
- RNF12 Deve conter um cooler de 12 volts (V);

RNF13 Deve conter uma fonte de 12 volts (V);
RNF14 Dispõe de um Arduino Uno para automação do sistema;
RNF15 Deve conter um regulador de tensão;
RNF16 Deve conter display;
RNF17 Deve conter um teclado numérico;
RNF18 O forno deve manter sua temperatura interna constante;

2.2 Termo de Abertura do Projeto (TAP)

2.2.1 Descrição do projeto

O projeto consiste na confecção de um forno para curagem de materiais compósitos de pequeno porte de forma a facilitar e diminuir o tempo de seu preparo pelas equipes de competição da UnB, a fim de desempenharem de forma mais satisfatória suas atividades.

2.2.2 Propósito e Justificativa

Atualmente, as equipes de competições da Universidade de Brasília (UnB) deparam-se com problemas relacionados a curagem de materiais compósitos, especialmente em relação ao tempo de preparo e a acessibilidade a fornos de baixo custo e apropriados ao escopo da equipe. Nesse sentido, o projeto propõem-se a desenvolver uma solução viável para o público-alvo citado, tendo como objetivo fornecer um produto que auxilie na boa performance do tempo de curagem de materiais compósitos de pequeno porte, além de substanciar às equipes uma solução viável e de baixo custo.

2.2.3 Objetivos

Realizar a fabricação de um produto que atenda e possa ser comercializado para as Equipes de competição da UnB, podendo o mesmo facilitar o trabalho com materiais compósitos, tendo como as principais características os seguintes pontos.

- Realizar a cura dos principais materiais compósitos utilizados pelas equipes;
- Diminuir o tempo de cura do material;
- Facilitar o manuseio de materiais compósitos;
- Valor final acessível.

2.2.4 Requisitos de Alto Nível

A solução, em alto nível, deverá seguir as seguintes diretrizes.

- O produto deverá final ser capaz de manter a temperatura interna a 70 a 100 graus Celsius por um período de 4 a 7 horas;
- Deverá apresentar uma interface para o manuseio de temperatura e tempo de curagem dos materiais;
- O produto final deverá apresentar baixo custo de fabricação e manutenção.

2.2.5 Riscos de Alto Nível

Risco	Impacto	Ação preventiva	Ação corretiva
Desinteresse e abandono por alunos da turma.	Sobrecarga da equipe.	Tentar manter a comunicação de forma a motivar a turma.	Revisão de projeto e datas de entregas.
Problema de comunicação.	Problemas de gerenciamento e planejamento do cronograma de atividades.	Controle da comunicação entre as partes, alertando e evidenciando possíveis dificuldades.	Criar novos meios de comunicação de fácil acesso aos participantes do projeto de forma a manter todos integrados de suas respectivas tarefas.
Produto não atende necessidade do cliente e/ou interessados.	Baixa adesão de usuários.	Realização de pesquisa de campo e avaliar métricas essenciais para decisões importantes.	Afinar produto referente ao valor de produto passado pelo cliente e/ou interessados.
Falta de recurso monetário para a realização do projeto.	Impossibilidade de executar e produzir o produto esperado.	Comunicar antecipadamente com todos os integrantes do projeto para dividir igualmente os gastos de produção e planejamento.	Procura por patrocínio da comunidade acadêmica, empresas e equipes para realização do projeto.

Figura 1: Riscos de Alto Nível

2.3 Estrutura Analítica do Projeto (EAP)

Abaixo está a EAP, que tem como objetivo principal, subdividir os trabalhos em tópicos menores, que facilitem a execução do projeto como um todo.

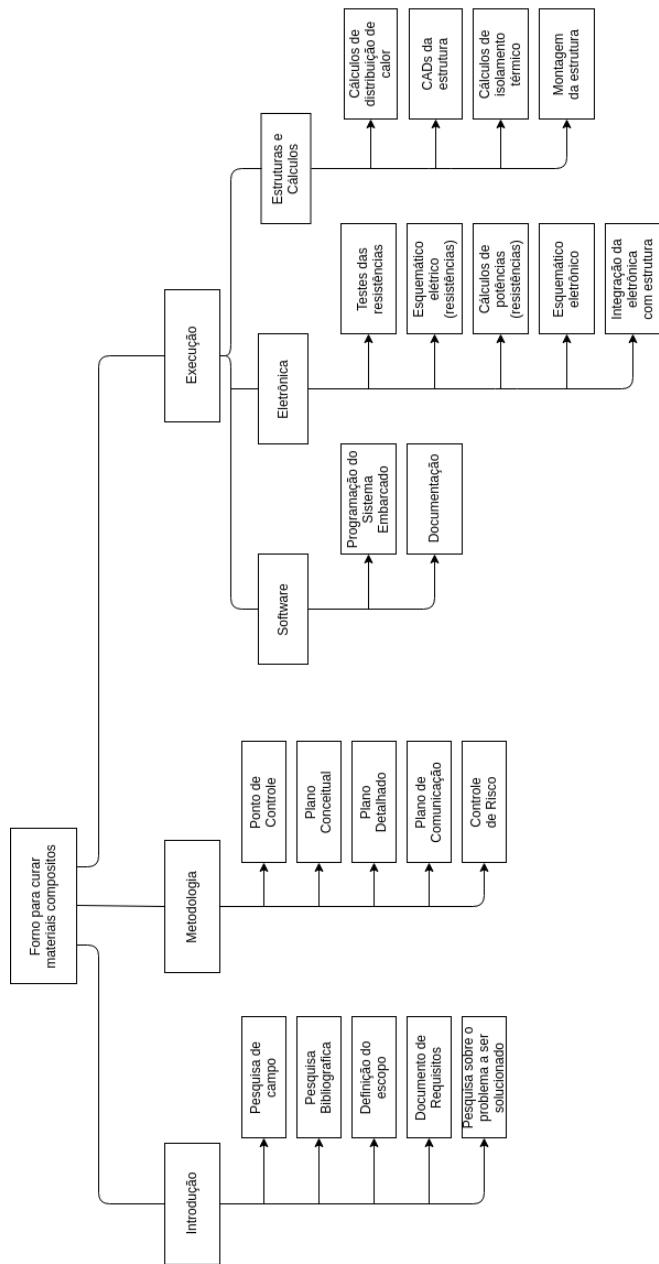


Figura 2: EAP

3 Orçamento Final do Projeto

Segue a imagem do orçamento final do projeto, que reflete em fim os custos da construção do protótipo

Material	Valor unitário (R\$)	Quantidade (un)	Valor total (R\$)
Parafuso AA	0.12	37	4.44
Madeira	91.14	1	91.14
Dobradiça	2.79	1	2.79
Arduino Uno	100	1	100
Fios para eletrônica (metros)	0.77	3	2.31
Tela LCD	23	1	23
Módulo Relé	6.55	1	6.55
Buzzer	3	1	3
Placa de prototipagem	14.84	1	14.84
Leds vermelhos	0.99	3	2.97
Leds verdes	0.99	3	2.97
Cooler 12V	8.72	1	8.72
Sensores de temperatura	13.15	2	26.3
Fonte 5V	18.32	1	18.32
Potenciômetro	1.22	2	2.44
Regulador de tensão	4	1	4
Módulo SD para Arduino	7.66	1	7.66
Fechadura da porta	8	1	8
Teclado	30.53	1	30.53
Manta térmica	30	1	30
Chapa de aço 500x500x4,75mm	76.06	1	76.06
Puxador porta	3.99	1	3.99
Borracha para isolar a porta	12	1	12
Conectores resistência	0.67	6	4.02
Resistência churrasqueira	28.5	4	114
TOTAIS			600.05

Figura 3: Orçamento Final do Projeto

Parte II

**Cálculos de Dimensionamento e
Controle**

4 Introdução aos Cálculos

Com o objetivo de dimensionar o projeto e permitir que a estufa cumpra da melhor forma possível os objetivos almejados, foram realizadas uma série de cálculos, que visaram dar as informações necessárias para validar a confiabilidade do produto.

Também foram realizados cálculos para garantir a segurança do usuário e para, junto as pesquisas executadas, garantir que o produto final seja capaz de executar todos os processos requisitados de forma adequada.

5 Distribuição Interna de Temperatura

As medidas internas do forno ficaram definidas em 55cm x 55cm x 55cm o que nos dá um volume (V) de:

$$V = 166375 \text{ cm}^3 \quad (1)$$

Já a equação que descreve a transferência de calor em um determinado volume de controle pode ser descrita por:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (2)$$

5.1 Equação de Laplace

Para se encontrar a distribuição final de temperaturas dentro do corpo, ou seja, saber a distribuição de temperatura interna do corpo quando $t \rightarrow \infty$ e assumindo que estamos olhando para uma secção transversal do corpo, afim de tornar o problema bidimensional, a equação acima pode ser simplificada até que possamos obter a equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

Definindo as condições de contorno como sendo idênticas em todas as paredes, tem-se então:

$$T(55, y) = T(0, y) = T(x, 55) = T(x, 0) = T_{\text{parede}} \quad (4)$$

5.2 Método das Diferenças Finitas

O método das diferenças finitas é um método prático e eficiente para a solução de sistemas de equações diferenciais parciais, fornecendo em muitos casos resultados tão satisfatórios quanto o método dos elementos finitos[1].

Usando esse método então, pode-se assumir que o valor da temperatura em cada ponto do corpo pode ser aproximada pela média ponderada das temperaturas dos pontos ao redor, ao se separar um conjunto de pontos internos ao sistema, no qual todos sejam equidistantes de todos seus vizinhos, podemos então aproximar a temperatura nas coordenadas i,j por[2]:

$$T_{i,j} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{4} \quad (5)$$

Considerando então que com os dados das condições de fronteira já podemos conhecer alguns dos valores de $T_{i,j}$, podemos montar um sistema de equações em forma matricial que corresponda ao comportamento da temperatura interna da estufa. Se gerarmos uma estrutura de 50×50 pontos, e adicionarmos as condições de fronteira, o que gera um sistema com 2500 variáveis, que colocado em forma matricial nos dá uma matriz de dimensões 2500×2500 que precisa ser solucionada para encontrarmos o valor da temperatura em cada um dos pontos escolhidos.

A distância de cada ponto para seus vizinhos então corresponderá a $55/49 = 1,122\text{cm}$ dentro do sistema. Dado ao número de variáveis envolvidas no sistema de equações(2500) métodos como a Eliminação Gaussiana que funcionam em complexidade $O(n^3)$ se tornam inviáveis já que levariam cerca de 4^1 horas para processar um estado e poder mostrar apenas uma solução.

Assim sendo, é necessário procurar um método mais eficiente computacionalmente, para conseguirmos determinar a solução da equação de maneira eficiente para as várias situações de contorno possíveis.

5.3 Método de Gauss-Sidel

O Método de Gauss-Siedel é uma versão melhorada do método de Gauss-Jacobi, sendo ambos métodos iterativos para a solução de sistemas de equações lineares. E com complexidade assintótica muito menor que o método do Escalonamento. O método consiste em organizar as equações de forma que um "chute" inicial gere uma saída mais próxima da solução real do sistema, assim a saída pode ser novamente iterada infinitamente, para criar soluções ainda mais

¹valor pode ser estimando considerando que um computador executa 10^6 operações em 1 segundo

próximas. O método pode ser enunciado então na seguinte forma algébrica(onde a_{ij} , são as posições da matriz das equações e T_i do vetor solução):

$$a_{11}x_1^{(k+1)} + a_{12}x_2^{(k)} + \cdots + a_{1n}x_n^{(k)} = T_1 \quad (6)$$

$$a_{21}x_1^{(k+1)} + a_{22}x_2^{(k+1)} + \cdots + a_{2n}x_n^{(k)} = T_2$$

$$\dots \quad \dots \quad \ddots \quad \dots$$

$$a_{n1}x_1^{(k+1)} + a_{n2}x_2^{(k+1)} + \cdots + a_{nn}x_n^{(k+1)} = T_n$$

5.4 Critério de Sassenfeld

Por não ser um método de solução direta, nem sempre é possível convergir à solução, portanto se faz necessário demonstrar que a matriz dos sistemas lineares é bem configurada, ao ponto de permitir o uso desse método. Para garantir que o método de Gauss-Sidel funcione, é necessário que a versão matricial do sistema obedeça o Critério de Sassenfeld que pode ser estabelecido da seguinte maneira:

$$\beta_1 = \frac{|a_{12}| + \cdots + |a_{1n}|}{|a_{11}|} \quad (7)$$

$$\beta_s = \frac{|a_{s1}|\beta_1 + \cdots + |a_{ss-1}|\beta_{ss-1} + |a_{ss+1}| + \cdots + |a_{sn}|}{|a_{ss}|}$$

$$\max_{\forall s} \beta_s < 1$$

Finalmente, nos resta então, apenas mostrar que o sistema de equações é bem comportado a ponto de obedecer o critério, e assim podemos finalmente resolver a equação de Laplace.

Ao observar o sistema de equações escrito em sua forma matricial, podemos notar algumas coisas. A primeira delas é que, em toda a diagonal principal o valor absoluto termos é 4, e por outro lado, a soma máxima de todos os elementos que não pertencem a diagonal principal em qualquer coluna, será também 4. Além disso, nunca haverá mais de dois termos com valores diferentes de 0 nem a esquerda, nem a direita da diagonal principal, por último, nota-se que o β_1 sempre será < 1 assim sendo para todas as linhas consecutivas temos que:

$$\beta_s = \frac{|a_{s1}|\beta_1 + \cdots + |a_{ss-1}|\beta_{ss-1} + |a_{ss+1}| + \cdots + |a_{sn}|}{|a_{ss}|}, e \quad \beta_{ss} < 1; \forall (sn < ss) \quad (8)$$

Como no ponto aonde temos a maior soma possível há dois números à esquerda e dois a direita da diagonal principal,e sendo todos eles iguais a 1, no caso mais extremo teremos

$$\beta_s = \frac{\gamma + \zeta + 1 + 1}{4}, com \quad \gamma, \zeta < 1,$$

o que implica com certeza em

$$\max_{\forall s} \beta_s < 1$$

Assim podemos garantir que o método converge e pode ser usado para a solução da Equação Inicial.

5.5 Resultados

Por fim, ao resolvemos a equação de Laplace,pelos métodos citados, e com as condições de fronteira inicial, podemos confirmar que se as paredes da estufa forem mantidas em temperatura constante, eventualmente a própria estufa terá temperatura constante, e igual a das paredes, em todo seu volume.

Por outro lado após medir as temperaturas dentro do forno de fato operando, logo os valores contam com a convexão, e outros efeitos termodinâmicos não medidos previamente, aplicando então os valores na condição de contorno das equações de Laplace temos a seguinte distribuição de temperaturas:

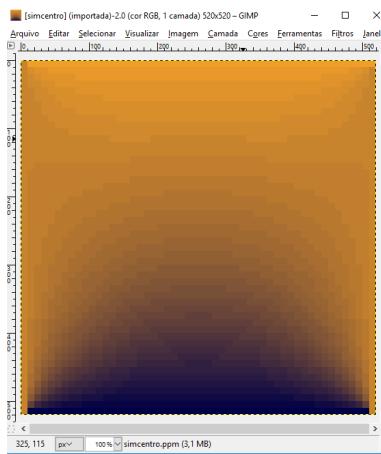


Figura 4: Simulação da Distribuição de Temperatura

Simulações em pontos mais externos do forno(longe das seções afetadas pelas resistências) podem ser encontradas nos anexos, assim como uma versão maior da figura 4.

6 Dimensionamento do Isolamento Térmico

Sendo a temperatura mais extrema que a estufa precisa atingir internamente igual a 120 graus Celsius queremos isolar o corpo de modo a manter uma temperatura externa que seja suportável. A temperatura externa pode se estimada com ajuda da seguinte fórmula[3]:

$$\frac{Ts - Ti}{\sum_{j=1}^n \frac{Lj}{Kj*A}} = \frac{Tar - Ts}{he*A} \quad (9)$$

Onde:

Ts=Temperatura da superfície externa da estufa

Ti=Temperatura interna da estufa

A=Área de uma das laterais

Tar=Temperatura do Ar

Kj=Coeficiente de Condutividade Térmica de cada isolante

Lj=Espessura de cada isolante

he=coeficiente de película(tabela Neto 2010)

Como isolante escolhemos uma manta térmica para telhados, que será colocada na parte interna e também na externa da estufa, e junto com a madeira compensada que é parte da própria estrutura, terá a função de reter o calor.

Agora podemos seguir então para a determinação da temperatura externa a 120°C. Isolando Ts na equação (9) temos a seguinte fórmula para Ts:

$$Ts = \frac{Tar(\frac{L_1}{K_1*A} + \frac{L_2}{K_2*A}) + \frac{Ti}{he*A}}{\frac{1}{he*A} + \frac{L_1}{K_1*A} + \frac{L_2}{K_2*A}} \quad (10)$$

Onde:

Ti=120 °C;

Tar=25 °C;

L_1 (Compensado)=0,018 m;

L_2 (Manta térmica)=0,002 m;

K_1 =0,14 Kcal/m.h°C;

K_2 =0,026 Kcal/m.h°C;

A=0,302 5m²;

he (Neto 2010)=8 Kcal/m.h;

O que nos dá um $T_s \approx 60^\circ\text{C}$ sendo esse um valor aceitável vide o fato que 120°C está acima da faixa operacional do forno e ainda nessa temperatura, se tem uma temperatura externa aceitável.

7 Análise dos Números Relacionados as Resistências

Na sequência temos algumas tabelas que serão importantes nos próximos passos dos cálculos.

Variável	unidades
Q : calor, energia térmica de um corpo	1 cal = 4,18402 J
m : massa do corpo	g
c : calor sensível, quantidade de calor necessária para variar a temperatura de um corpo para cada unidade de massa	$\frac{cal}{g^\circ\text{C}}$
ΔT : variação da temperatura	$^\circ\text{C}$
Δt : variação do tempo	s
R_{conv} : resistência convectiva	$\frac{^\circ\text{C.s}}{\text{cal}}$

Figura 5: Unidades

Algumas propriedades dos materiais aplicados			
Const./Material	Duralfoil (Al)	Madeira	Alumínio(folha)
$k(\text{cal.cm}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.00000942	0.00029	0.5
$c(\text{cal.g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	-----	0.2916	0.22
$C(\text{cal} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	-----	923.2059	17.9032 (Sal)
$R_{conv} (\text{^\circ C.s.cal}^{-1})$	2.86411	-----	-----
$e(\text{cm})$	0.05	1.8	0.01
$d(\text{g.cm}^{-3})$	1.25	0.545	2.7
Volume médio por parede(cm^3)	150.7005	5809.176	30.1401
$A_s(\text{cm}^2)$	3014.01	3014.01	3014.01
Massa(g)	188.3756	3166.0009	81.3783

Figura 6: Propriedades

Capacidade Térmica do DURALFOIL			
	ALUMÍNIO (2 FOLHAS)	POLIETILENO (2 FOLHAS)	REFORÇO (1 FOLHA)
CALOR ESPECÍFICO (cal. g ⁻¹ .°C ⁻¹)	0.22	0.43	0.3
VOLUME TOTAL (cm ³)	60.2802	21.7746	68.6457
DENSIDADE (g/cm ³)	2.70	0.919	0.082
MASSA TOTAL (gramas)	162.7565	~20	~5.6
CAPACIDADE TÉRMICA (cal.°C ⁻¹)	17.905 (de uma folha)	~8.6	~1.68
CAPACIDADE TÉRMICA TOTAL (cal.°C ⁻¹)		46.09	

Figura 7: Duralfoil Propriedades

Pela equação fundamental da calorimetria, temos:

$$Q = mc\Delta T \Rightarrow \frac{Q}{\Delta t} = mc\frac{\Delta T}{\Delta t} \Rightarrow P = mc\frac{\Delta T}{\Delta t} \Rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{mc} = \frac{P}{C}$$

Por outro lado, observando a Lei de Fourier para fluxo de calor, temos:

$$\phi = \frac{k(A_{superficie})\Delta T}{e} = \frac{Q}{\Delta T} \rightarrow \phi = \frac{P_{interna}}{R_{termica}} \quad (11)$$

8 Temperatura da Resistência

Para calcular a temperatura da resistência, temos que considerar a emissão de energia demandada, isto é, a potência dela, no caso, $P = 72.41$ W para cada resistência, considerando que nenhuma energia escaparia do forno. Acontece que, na realidade, sabemos que isso não ocorre. E, para corrigir isso, utilizaremos as propriedades da emissividade de um corpo ideal para simplificar e viabilizar os cálculos. Em um corpo ideal, a emissividade ao longo de toda a sua superfície é constante e, portanto, a potência torna-se diretamente proporcional a sua área, isto é:

$$P = A \cdot I \quad (12)$$

Como o filamento será posicionado a 1,8 cm ou 0,0018 m da parede, temos que, para obter uma precisão maior dos cálculos, podemos dividir a emissão de energia em diferentes regiões.

Para a região mais próxima da parede, temos que a área de emissão responsável pela potência que atingirá a parede irá variar apenas com a variação do ângulo de abertura entre um extremo e o outro da parede. Assim, como o raio do filamento será constante e igual a 0,325 cm, temos:

$$\begin{aligned} & \int_{c=0}^{c=21} \int_{\theta=0.4619\pi}^{\theta=c.0,4825\pi} 2\pi \cdot 0,325 * \frac{\theta}{2\pi} d\theta dc = 4 \cdot (0,6552) = 2.6208 \text{ cm}^2 \\ & 2 \cdot \int_{c=0}^{c=42} \int_{\theta=0}^{\theta=c.0,4619\pi} 0,325 * \theta d\theta dc = 2 \cdot (14.3714) = 28.7428 \text{ cm}^2 \\ & \therefore A_{r_{parede}} = 31.3636 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

E, ao acharmos a razão entre essa área e a área total do fio, conseguiremos achar a porcentagem da potência total emitida para a parede. Logo:

$$P_{pot\acute{e}ncia\ total} = \frac{A_{r_{parede}}}{A_{resist\acute{e}ncia}} = \frac{31.3636}{42 * 2 * \pi * 0,325} = \frac{31.3636}{85.7655} = 0.3657$$

Assim, a potência da resistência apoiada na parede que atingi a superfície interna do forno é, na verdade:

$$P_{emitida} = P_{potência\ total} * P_{gerada} \rightarrow P_{emitida} = (0.3657).P_{gerada}$$

Com isso, a intensidade média a atingir a parede é dada por:

$$I_{med} = 2. \frac{\int_{z=0}^{z=21} \int_{\theta=0}^{\theta=0.4677\pi} \int_{\rho=1.8}^{\rho=17.82} \frac{(0.3657).P_{gerada}}{42 \cdot 4\pi \cdot \rho^2} d\rho d\theta dz}{\int_{z=0}^{z=21} \int_{\theta=0}^{\theta=0.4677\pi} \int_{\rho=1.8}^{\rho=17.665} \rho^2 \cdot \text{sen}(\theta) d\rho d\theta dz} + 8. \frac{\int_{\theta=0}^{\theta=0.25\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=0.4677\pi} \int_{\rho=1.8}^{\rho=17.82} \frac{(0.3657).P_{gerada}}{42 \cdot 4\pi \cdot \rho^2} \rho \cdot \text{sen}(\theta) d\rho d\theta dz}{\int_{\theta=0}^{\theta=0.25\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=0.4677\pi} \int_{\rho=1.8}^{\rho=17.665} \rho^2 \cdot \text{sen}(\theta) d\rho d\theta dz}$$

$$I_{med} = \left[2. \frac{0.04901}{4849.18} + 8. \frac{0.00783}{1330.02} \right] * P_{gerada} \rightarrow [0.0000202 + 0.0000471] * P_{gerada}$$

$$I_{med} = (0.0000673) * P_{gerada}$$

E, portanto, a potência total na superfície é dada por:

$$P_{parcial\ superfície} = \int_{y=0}^{y=54.9} \int_{x=0}^{x=54.9} I_{med} dx dy = (0.202843) * P_{gerada}$$

$$\begin{aligned} P_{necessária} &= 72.41 = (1 - 0.3657) * P_{gerada} + [(0.202843) - \sum P_{exit}] P_{gerada} = \\ 72.41 &= (0.6343) * P_{gerada} + [0.202843 - (0.202843) * (Pie + Pme + Pee)] * P_{gerada} \\ 72.41 &= (0.6343) * P_{gerada} + [0.202843 - 0.202843] * P_{gerada} \\ &\quad - (0.202843) * [(0.0130788) + (0.0000069) + (0.0000001)] P_{gerada} \rightarrow \\ \rightarrow 72.41 &= (0.6343) * P_{gerada} + (0.2001886) * P_{gerada} = (0.8344886) * P_{gerada} \end{aligned}$$

$$P_{gerada} = 86.7717 W$$

Além disso, pela Lei de Stefan-Boltzmann e pela lei da conservação da energia associada a potência, temos:

$$\begin{aligned} P &= A \cdot I = A \cdot (\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4) = 86.7717 W \\ &= A_{emissão\ do\ fio} \cdot (0.95) \cdot (5.67 * 10^{-8}) \cdot T^4 = (8.57654 * 10^{-3}) \cdot (5.39 * 10^{-8}) \cdot T^4 = \\ &\quad (4.62 * 10^{-10}) \cdot T^4 = 86.7717 \Rightarrow T^4 = 1.8783 * 10^{11} \\ \therefore T_{resistência} &= 658.32 K = 385.32 ^\circ C \end{aligned}$$

8.1 Potência nas paredes:

Agora precisamos determinar a potência total que atinge a superfície de cada parede, usando a notação da figura 8:

Para tanto, acha-se os valores de intensidade média que atingem cada parede e calcula-se a potência a partir da equação:

$$P = A \cdot I_{m\acute{e}d}$$

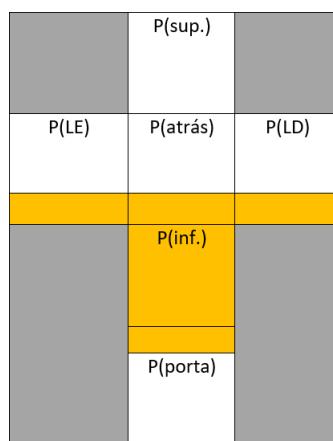


Figura 8: Parte interna da caixa planificada

Onde a potência P é dada pelo produto entre a área da superfície irradiada A com a intensidade média Iméd.

Para o cálculo das intensidades de radiação de cada resistência que atingem as paredes utilizou-se a integração da potência emitida em intervalos de espaço específico para a obtenção de intensidades parciais de cada resistência nas superfícies analisadas.

O modelo de equação utilizado foi exatamente a definição de intensidade em função da distância

$$I(r) = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

E, para a aplicação prática do cálculo em um corpo emissor extenso, achou o dP/dS de cada emissor, que no caso das resistências em formato de bastão, trata-se da densidade linear de potência emitida pelo resistor.

Ao final dos cálculos, obteve-se a seguinte relação entre a potência de cada resistor recebida nas superfícies consideradas:

Potência das resistências que chegam às superfícies (em função da potência emitida Pe)						
	R(sup.)	R(LE)	R(LD)	R(inf.)	Chapa	Σ
P(sup.)	0.5824	0.1092	0.1092	-----	0.0001	0.8009 Pe
P(LE)	0.1271	0.5824	0.0151	0.0679	desprezível	0.7975 Pe
P(LD)	0.1271	0.0151	0.5824	0.0679	desprezível	0.7925 Pe
P(inf.)	-----	0.0426	0.0426	0.5824	0.0152	0.6828 Pe
P(porta)	0.1271	0.0810	0.0869	0.0679	desprezível	0.3629 Pe
P(atrás)	0.1271	0.0869	0.0810	0.0679	desprezível	0.3629 Pe
P(chapa)c	0.0116	0.0257	0.0257	-----	-----	0.0630 Pe
P(chapa)b	-----	0.0752(inf.)	0.0752(inf.)	0.0740	-----	0.2244 Pe
P(CEF)ss	0.0258	0.0785	0.07825	-----	-----	0.1823 Pe
P(CEF)si	-----	-----	-----	-----	0.1268	0.1268 Pe

Figura 9: Potencia em cada Parte interna da Caixa

9 Definição do Sistema de Controle

No intuito de melhor realizar todos os controles necessários de temperatura(taxa de variação e amplitude) optamos então por usar um sistema de controle amplamente conhecido da Industria chamado de PID (proportional–integral–derivative controller) por ser um sistema confiável, eficiente e amplamente testado.

9.1 Proportional–Integral–Derivative Controller (PID)

O sistema do PID é constituído por três termos de controle responsáveis por controlar as propriedades Proporcionais, Integrais e Derivativas do sistema, assim ele oferece uma ótima capacidade de trabalhar com os dados para controlar os efeitos desejados. O PID pode então ser descrito em diagrama de blocos na forma da figura 10:

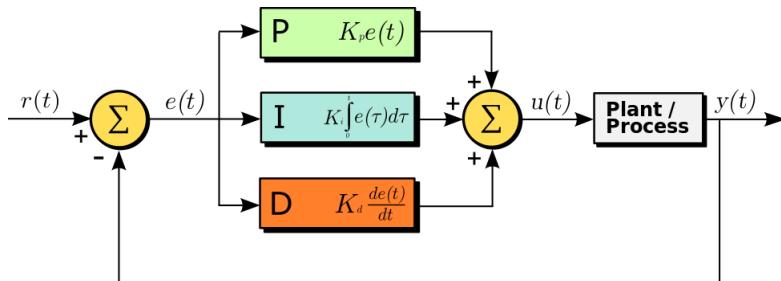


Figura 10: Diagrama de Blocos do PID

O sistema representado pelo diagrama de blocos acima pode ser também descrito em sua forma equacional pela seguinte relação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

Onde:

K_p é o ganho proporcional

K_i é o ganho integral

K_d é o ganho derivativo

$e(t) = SP - PV(t)$ definido como o erro, onde (SP é o valor definido e PV(t) é a variável do processo)

t é o tempo decorrido

9.2 Ajustando as Variáveis do Controlador pelo Método de ström–Hägglund

Por fim, para definir as constantes do sistema o método usado consiste em aplicar uma série crescente da K's até que se passe do ponto desejado, e então diminuí-los em um fator menor até se alcançar o valor desejado, sendo cada, cada ganho pode ser calculado pela equação $K_u = 4b/\pi a$ onde, a é a amplitude da variável de oscilação do sistema e b é a amplitude da mudança na saída do controlador que gerou a oscilação.

Após testes sucessivos feitos após a montagem completa do equipamento, e dos sistemas eletrônicos pudemos então definir os valores das constantes necessárias para termos um incremento de 1°C por minuto, que é o valor ótimo para a curagem de fibra de carbono com a resina epóxi, até que se atinga a temperatura desejada, e manter mínimas as oscilações após isso. Com essas condições o controlador foi então definido com as seguintes constantes:

$$K_p = 3.5 \quad (14)$$

$$K_i = 1.5$$

$$K_d = 2.3$$

Parte III

**Definição dos Modelos Elétricos e
Eletrônicos**

10 Parte Eletrônica

A eletrônica é responsável pelo gerenciamento da temperatura e interface com usuário.

No tópico sobre a parte eletrônica do projeto, será tratado três subtópicos: o módulo de eletrônica, os componentes eletrônicos e a programação em Arduino. Nestes subtópicos serão explicados o funcionamento básico e características importantes do tema.

10.1 Módulo de Eletrônica

Segue abaixo então a imagem com a versão final da construção do sistema eletrônico que será "embarcado" no protótipo.

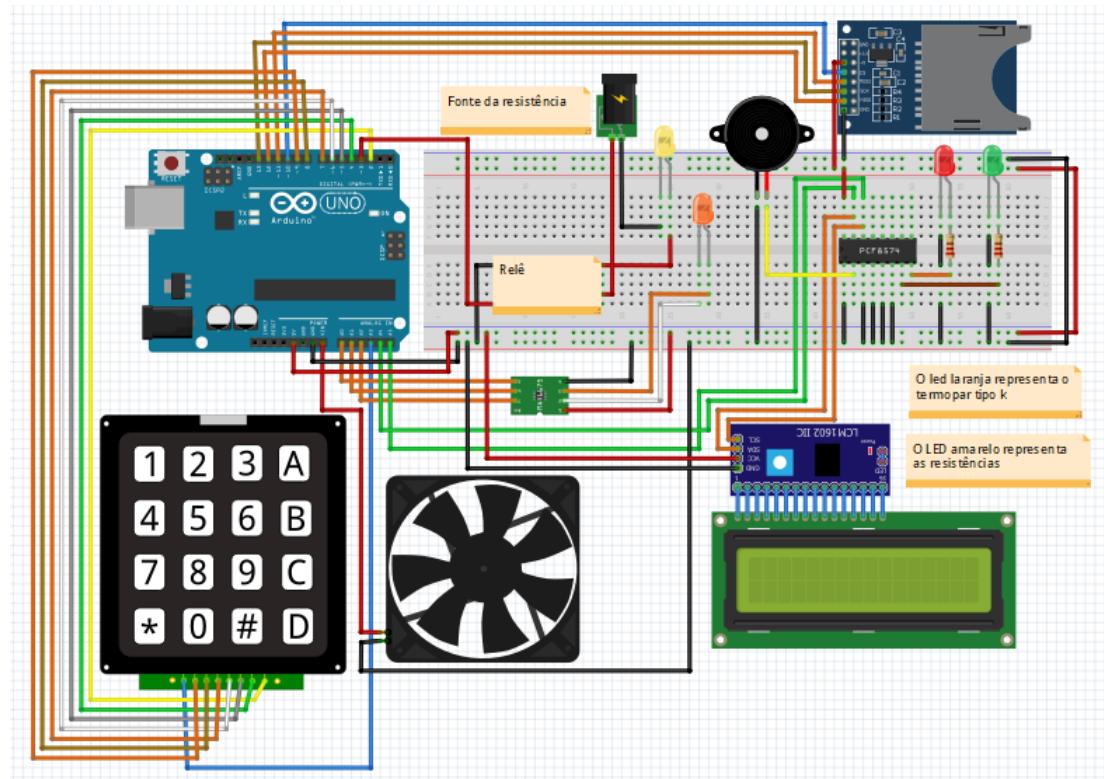


Figura 11: Circuito Eletrônico Completo

10.2 Componentes Eletrônicos

O diagrama de cada componente separado se encontra nos anexos.

1. Cooler: Resfriamento de alguns componentes eletrônicos como precaução ao calor excessivo nos mesmos.
2. PCF8574: Expansão de entradas, dessa forma, é possível adicionar mais dois leds e um buzzer ao esquema.
 - (a) Led vermelho: Representa que o forno está fazendo curagem de um material.
 - (b) Led verde/buzzer: Representa que o processo de curagem finalizou.
3. Relé: Controle das resistências, por meio da programação, ele é capaz de ligar ou desligar as mesmas.
4. Módulo SD: Recepção de dados da temperatura do forno.
5. Teclado 4x4: Introdução dos dados de temperatura limite e tempo de curagem.
6. Tela: Interface com o usuário.
7. Termopar: Leitura de temperatura do forno.

10.3 Programação do Arduino

Com a ajuda de um Arduino UNO, que contém o microprocessador de 8-bit ATmega328, todos os cálculos necessários para que o controle PID seja efetuado são feitos no próprio Arduino, assim:

```

erro = setpoint - 0;
PID_p = kp * erro;

if(-5 < erro <5)
{
    PID_i = PID_i + (ki * erro);
}

timePrev = Time;
Time = millis();
elapsedTime = (Time - timePrev) / 1000;

PID_d = kd*((erro - previous_error)/elapsedTime);

PID = PID_p + PID_i + PID_d;

if(PID < 0)
{
    PID = 0;
}
if(PID > 255)
{
    PID = 255;
}

analogWrite(pinoModRele, (int)PID);

```

Figura 1. Implementação básica do controlador PID em C

Figura 12: Imagem de Código 1

O "input" utilizado para fazer os cálculos do controlador vem de um sensor de temperatura termopar tipo K, que recebe atualizações de temperatura a cada 500 mili-segundos. Utilizando uma combinação de ajuste manual e ajuste pelo método ström-Hägglund, foram testadas várias combinações de constantes kP, kI e kD. O "output" do controlador é enviado na forma de modulação por largura de pulso (Pulse-Width Modulation — PWM), que possibilita um controle maior por simular uma variação de potência por meio da frequência de ativação do pulso, enviado para um relé de estado sólido que fecha o circuito composto pela fonte alternada e as resistências.

Para a interface de usuário foram utilizados um teclado matricial 4x4 e uma tela LCD, possibilitando a definição de temperatura e tempo de funcionamento, além das opções de ligar e desligar o forno:

```
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("A)C"); lcd.write((byte)0); lcd.print("      B)Tempo");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("C)Start  D)Stop");
char customKey = customKeypad.getKey();
char option, key;
```

Figura 13: Programação da Interface de Usuário



Figura 14: Visualização da Interface de usuário

A opção de definição de temperatura permite ao usuário escolher a qual temperatura ele deseja que o forno se mantenha, além de mostrar a opção atual de temperatura, caso a mesma tenha sido definida anteriormente. O valor "default" da temperatura é 0 °C, temperatura da qual o forno não pode ser acionado, obrigando o usuário a digitar uma temperatura. A temperatura deve ser escolhida por meio de números inteiros apenas, por limitações por parte do teclado matricial utilizado.

```
if (customKey == 'A'){
    pos = 0;
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(blank);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(blank);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Temperatura:");
    lcd.print(setpoint);
    lcd.write((byte)0);
    customKey = NO_KEY;
    for(;;){
        customKey = customKeypad.getKey();
        if(customKey){
            lcd.setCursor(pos,1);
            lcd.print(customKey);
            buff[pos] = customKey;
            pos++;
            if(customKey == 'A'){
                buff[pos] = '\0';
                setpoint = strtol(buff, NULL, 10);
                lcd.setCursor(0,0);
                lcd.print(blank);
                lcd.setCursor(0,1);
                lcd.print(blank);
                customKey = NO_KEY;
                break;
            }else if(customKey == '#'){
                lcd.setCursor(0,1);
                lcd.print(blank);
                pos = 0;
            }else if(customKey == '*'){
                break;
            }
        }
    }
}
```

Figura 15: Código de definição de temperatura



Figura 16: Apresentação da função de definição da temperatura

O processador 8-bit do Arduino permite a cronometragem do tempo a partir de um contador interno com resolução de 4 microsegundos, no caso do Arduino sendo utilizado. É possível iniciar o forno sem que seja definido um tempo de funcionamento, ao contrário da obrigatoriedade de definição de uma temperatura. Utilizando esta função do Arduino foi desenvolvido um temporizador com contagem em minutos para que haja maior controle do tempo por parte do usuário:

```

}else if (customKey == 'B') {
    pos = 0;
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(blank);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(blank);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Tempo (minutos):");
    customKey = NO_KEY;
    for(;;){
        customKey = customKeypad.getKey();
        if(customKey){
            lcd.setCursor(pos,1);
            lcd.print(customKey);
            buff[pos] = customKey;
            pos++;
            if(customKey == 'B'){
                buff[pos] = '\0';
                tempo = strtol(buff, NULL, 10);
                timer = 1;
                lcd.setCursor(0,0);
                lcd.print(blank);
                lcd.setCursor(0,1);
                lcd.print(blank);
                customKey = NO_KEY;
                break;
            }else if(customKey == '#'){
                lcd.setCursor(0,1);
                lcd.print(blank);
                pos = 0;
            }else if(customKey == '**'){
                break;
            }
        }
    }
}

```

Figura 17: Implementação do menu de tempo



Figura 18: Apresentação do menu de tempo

A tecla de acionamento do forno inicia o temporizador e o sensor de temperatura, que têm suas informações mostradas a todo momento por meio da

tela LCD, além de mostrar a opção de interrupção do forno. Nesse momento também é iniciado o controlador PID, que faz cálculos constantes para controlar a potência da resistência dependendo da temperatura do forno e a temperatura escolhida:

```
else if (customKey == 'C' && setpoint != 0) {
    startTime = millis();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(blank);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(blank);

    for(;;) {
        unsigned long currentTime = millis();
        char customKey = customKeypad.getKey();

        if(currentTime - previousMillis >= 500) {
            previousMillis += 500;
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print(thermocouple.readCelsius());
        }
        lcd.setCursor(6,0);
        lcd.write((byte)0);
        lcd.print("C");
        lcd.setCursor(9,0);
        lcd.print(minutesElapsed);
        lcd.setCursor(13,0);
        lcd.print("min");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("D)Stop");
    }
}
```

Figura 19: Inicialização do forno, juntamente com o controlador e temporizador



Figura 20: Exemplo de apresentação tela após a ativação do forno

11 Parte Elétrica

A parte elétrica possuirá dois subtópicos: Circuito Resistivo e Controle de Potência. No primeira será apenas uma análise teórica para o cálculo da potência consumida pelo forno, enquanto o segundo será a exposição da influência do PWM na potência média dissipada.

11.1 Circuito Resistivo

Para a montagem da parte elétrica interna do forno, optou-se pelo uso de resistências do modelo reto, de 150 W a 220 V, antes disso, cogitou-se escolher resistência de nicromo, para isso foi realizado diversos testes (Anexo 8) com o intuito de selecionar a bitola ideal de tal resistência, o que chegou a ser feito, contudo, foi descartado com diversas discussões entre os integrantes do grupo. Para as ligações, foram utilizados cabos de cobre residencial, com resistência linear desprezível.

Para compreender melhor a escolha do modelo de organização do circuito usada, primeiro considera-se potência consumida individualmente por cada resistência em diferentes disposições.

Resistências em série

$$U_{individual} = \frac{R}{R_{eq}} U_{Total} = \frac{R}{R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n} U_{Total} \quad (15)$$

$$P_{individual} = \frac{U_{individual}^2}{R} = \frac{\frac{R}{R_{eq}} U_{Total}^2}{R} = \frac{R}{(R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n)^2} U_{total}^2 \quad (16)$$

Resistências em paralelo

$$I_{individual} = \frac{U_{Total}}{R} \quad (17)$$

$$P = RI_{individual}^2 = \left(\frac{U_{total}}{R}\right)^2 R = \frac{U_{total}^2}{R} \quad (18)$$

Sendo que I é a corrente fornecida e U é a diferença de potencial.

A partir das equações acima, percebe-se que a maior potência é consumida pela disposição em paralelo. Considerando que o valor eficaz da rede elétrica equivale a 220V e a potência consumida por cada resistência ligada a essa diferença de potencial é 150 W, a disposição em paralelo forneceria uma potência total de 600W ao forno.

Após algumas experiências (Relatadas em Anexo), foi decidido a potência de 600W como a ideal para o projeto. Logo, todas as resistências foram dispostas paralelamente.

Esse valor de 600W é o normal, sem ativação do relé pelo Arduino. O comportamento com a ativação do relé será tratado no próximo subtópico. Além disso, pelo fato do Arduino também estar ligado em paralelo, o consumo total é levemente superior ao previsto (cerca de 0,2W), também sendo desconsiderado nos cálculos.

Segue abaixo o esquemático elétrico final do projeto:

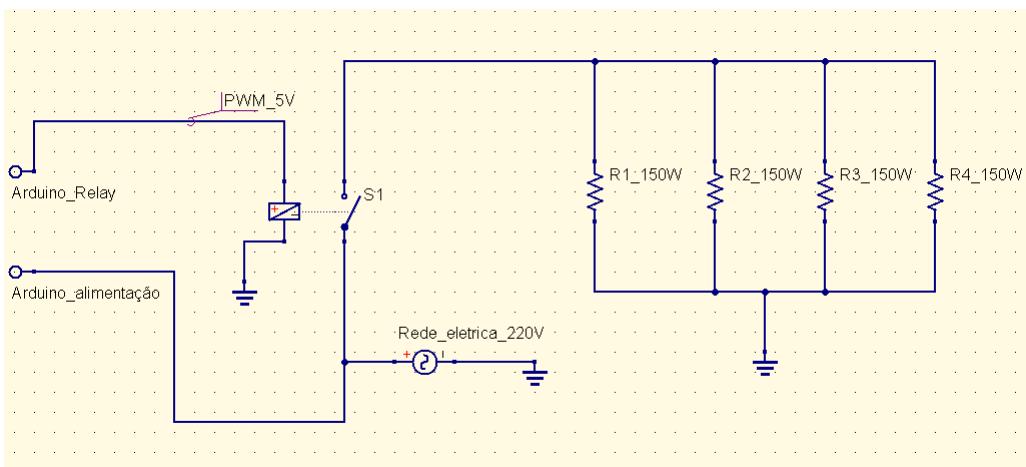


Figura 21: Esquemático Elétrico

11.2 Potência com PWM

No sistema de controle, é usado um relé para o controle da potência dissipada dentro do forno. A ativação do relé, em qualquer frequência, com “duty cycle” - razão percentual entre o tempo de máximo e o de mínimo numa onda quadrada, de 50% , a potência teria uma queda de metade do valor original (no caso do forno, cairia a 300W).

Entretanto, o PWM varia o duty cycle, variando assim a potência e controlando a potência de maneira eficiente, de forma a seguir o determinado pelo controlador PID.

Parte IV

Definição da Estrutura

Com todos os dados em mãos, seguimos então finalmente para a montagem do corpo da estrutura, para, por fim começar a construção do protótipo.

12 Lista de Materiais

Cola para madeira;

2 tábuas em compensado com 18mm de espessura, 550 mm de altura e 550 mm de largura;

2 tábuas em compensado com 18mm de espessura, 550 mm de altura e 586 mm de largura;

2 tábuas em compensado com 18mm de espessura, 586 mm de altura e 586 mm de largura;

Selante para motor resistente a 235 °C (cura acética); 3 dobradiças;

1 trinco para porta;

10 metros de fio de 1mm de espessura;

Grampeador para madeira;

2,5 m² de manta duralfoil de alumínio para isolamento térmico;

4 resistências retas de níquel-cromo de 150 W;

8 rolhas maciças;

1 litro de emulsão asfáltica para imprimação (Sika Primer);

Chapa de aço de 500 mm de largura, 500 mm de comprimento e 4,75 mm de espessura;

1 puxador;

Borracha de Eva para cobrir a porta;

37 parafusos de 40 mm de comprimento e 4 mm de diâmetro; Furadeira;

Parafusadeira.

13 Procedimentos de Montagem

As tábuas em MDF receberam a manta Duralfoil, que foi escolhida devido ao preço baixo, ao bom isolamento térmico oferecido e a facilidade de manuseio. Ela foi aplicada em todas as tábuas com o uso de um grampeador para madeira. Com todas as peças cobertas pela manta, o cubo, sem porta, pode ser montado com o auxílio de parafusos, para garantir uma união firme entre as tábuas e, para reforçar, foi utilizada cola de madeira.

Na porta, diferentemente das outras partes, foram usadas três dobradiças simples. Com o objetivo de aumentar a vedação do forno e garantir que o isolamento térmico seja o maior possível. A borracha para vedação foi aplicada nas

extremidades da porta que entram em contato com o restante do forno quando esse é fechado, sendo que a extremidade onde estão fixadas as dobradiças não recebe a aplicação desse material.

Para apoiar a peça a ser curada, foi montada uma bandeja e colocada uma chapa de aço com cortes de semicírculos nas laterais para evitar o contato com as resistências. Para sustentá-la, dois pedaços de madeira cobertos com manta Duralfoil para prevenir possíveis danos à madeira causados pela temperatura foram fixados com parafusos no lado direito interno do forno e mais dois foram parafusados no lado esquerdo interno, de forma que a chapa fique bem sustentada e seja removível.

Com o objetivo de evitar o contato direto das resistências com as paredes do forno e garantir o isolamento elétrico, as mesmas foram pregadas em rolhas de cortiça, sendo uma rolha em cada extremidade da resistência. Elas foram parafusadas no forno de forma que haja resistência na lateral direita, na lateral esquerda, na parte inferior e outra na parte superior do forno. Serem parafusadas na diagonal maior da superfície é importante para aumentar a uniformidade da distribuição de temperatura.

A fim de aumentar a potência e, consequentemente, obter a temperatura necessária dentro do forno, as ligações entre as resistências foram feitas em paralelo. Ainda falando da parte elétrica do projeto, para garantir o isolamento elétrico e a segurança do projeto, o aterramento é feito na ligação que conecta o forno à energia elétrica da rede, pois foi usado um plug de três pinos, sendo o terceiro pino o aterramento. Além disso, caso a tomada não tenha sistema de aterramento, um fio terra foi colocado em um dos pés do forno, fazendo com que ele se mantenha eletricamente aterrado quando em contato com o solo. Todos os fios utilizados nas ligações entre as resistências foram passados para a parte externa do forno por meio de furos feitos nas laterais para maior proteção do sistema elétrico.

A caixa localizada na parte superior do forno, onde ficam os componentes eletrônicos, foi construída da mesma forma e usando os mesmos materiais do forno. Ela também foi envolta com manta térmica, a fim de isolar o sistema eletrônico externamente, o protegendo da temperatura da superfície externa do forno.

Com o intuito de facilitar a abertura e o fechamento do forno, um puxador simples foi parafusado no canto superior direito da porta e um trinco galvanizado foi utilizado para aumentar a vedação do forno, visto que foi instalado justo.

14 Vistas da Estrutura

Seguem abaixo então as imagens da estrutura final do Projeto

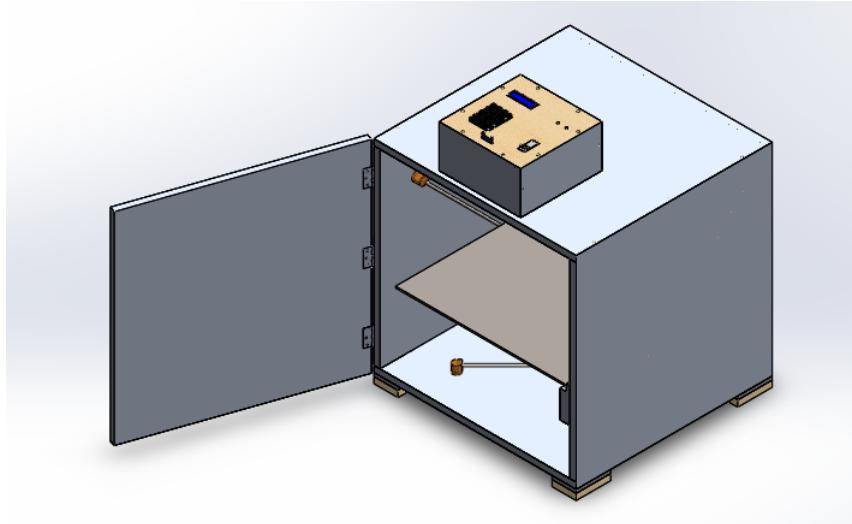


Figura 22: Vista Completa

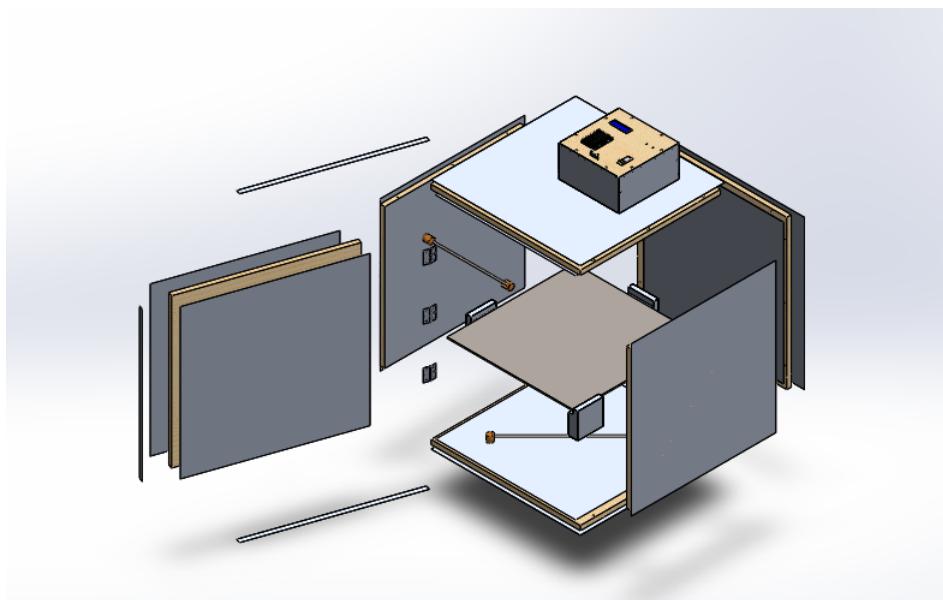


Figura 23: Vista Explodida

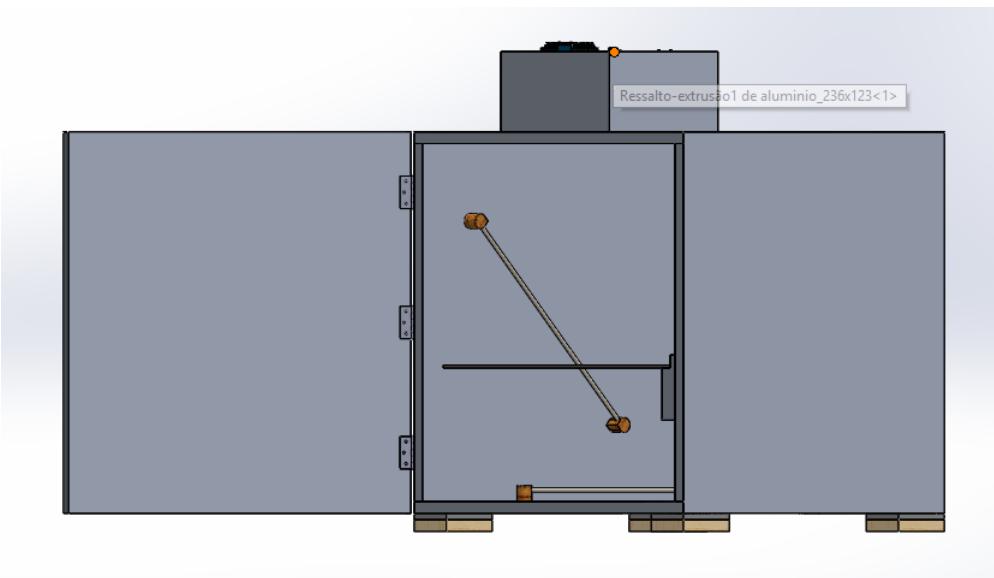


Figura 24: Vista Lateral

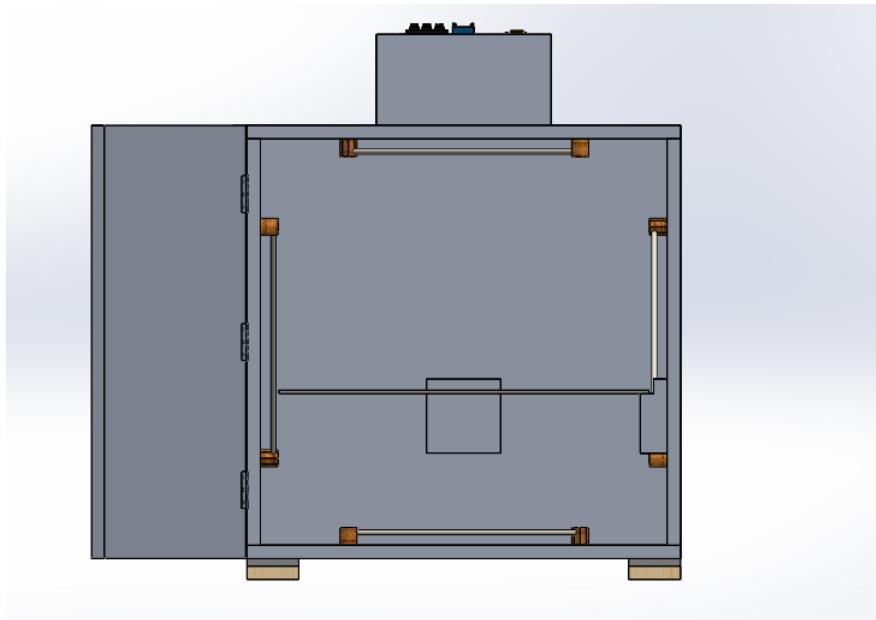


Figura 25: Vista Frontal



Figura 26: Imagem Real do Protótipo Montado

Parte V

Conclusão

À medida que o projeto foi sendo desenvolvido, surgiram algumas dúvidas e questionamentos referentes tanto à parte teórica quanto ao projeto em si, pois algumas vezes foi preciso repetir alguns procedimentos. Essas dúvidas foram solucionadas com o auxílio de professores da disciplina e de fóruns auxiliares na internet.

Ao fim da montagem do forno e de todo o projeto estrutural, eletrônico e de software por trás da construção do produto foi possível concluir que ao longo do desenvolvimento do forno algumas características inicialmente previstas no Ponto de Controle 1 tiveram que ser alteradas. Entre essas características estão o tipo de resistência e, consequentemente, o orçamento final, que teve um custo maior que estava previsto. Além disso, após o Ponto de Controle 2, outro ponto importante do projeto foi definido, o modelo de controle da temperatura interna do forno.

A importância desse projeto foi cada vez mais destacada ao longo de seu desenvolvimento, visto que foi construído em um campus que possui exclusivamente cursos da área de engenharia e, portanto, peças de fibra de carbono curadas são essenciais para a elaboração de projetos. Os quais fazem parte tanto de disciplinas laboratoriais quanto de equipes de competição e empresas juniores que precisam de materiais processados para que possam ser moldados de acordo com suas respectivas finalidades e solicitações de esforços. Logo, um forno para curagem de materiais compósitos é importante para que essas equipes e empresas atinjam seus objetivos em menor tempo e também há o fator de *cross link* (ligação entre a fibra de carbono e a resina usada) que é maior e mais efetiva em compósitos cuja curagem foi feita em um forno do que em peças processadas ao ar livre.

Ademais, através do forno montado durante a disciplina de Projeto Integrador foi possível compreender a importância de materiais compósitos em escala industrial. Os compósitos, principalmente os que têm matriz polimérica, como o que foi utilizado para ser curado no forno, são muito importantes para os seres humanos de forma geral, pois, além de serem de fácil fabricação e baixo custo, também possuem costumam manter suas propriedades físicas e mecânicas à temperatura ambiente.

Algumas aplicações dos compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono envolvem componentes estruturais de aeronaves, tanto militares como comerciais, como parte de asas fixas e também em componentes da asa, da hélice, da fuselagem, do estabilizador e da pá do leme de um helicóptero.

Os objetivos foram cumpridos totalmente. Para que o protótipo fosse validado foi-se laminada uma peça para a equipe de competição Apuama Racing, do Campus Darcy, e um corpo de prova para a apresentação deste projeto.

O corpo de prova e a peça curados pela equipe demonstrou o que a teoria

apresentava, já que a fibra de carbono em si antes da curagem se assemelha a um tecido frágil, e após a aplicação da resina epóxi, do endurecedor e da presença da matriz o material se torna muito resistente e com um acabamento requintado devido ao calor e vácuo.

Durante o processo foi necessária a manutenção da temperatura durante algumas horas. Mais especificamente em 50°C durante 2 horas e 80°C durante 4 horas. Então, antes do início do processamento foi definido tempo e temperatura no sistema do forno, e foi-se observando se este mantinha as condições estabelecidas perfeitamente.

O observado foi que a temperatura oscilava com um pequeno desvio padrão em torno da escolhida, e, para que ela pudesse se fazer constante foi necessário escolher temperaturas maiores, para que ela estabilizasse na desejada. Tal erro foi estudado e corrigido. Então, a temperatura, agora, atinge, com um ínfimo desvio, a faixa desejada.

A contagem do tempo foi contabilizada perfeitamente. Após atingido o prazo dado na entrada, o relé é fechado e, consequentemente, a corrente não passa, desligando as resistências e caracterizando término do processamento.

A escolha da madeira como componente estrutural principal foi aprovada, mais uma vez, durante a validação do produto, se mostrando resistente à temperatura desempenhada pelas resistências. Também, a manta térmica desempenhou satisfatoriamente seu papel, resistindo às condições impostas e evitando o superaquecimento da parte externa do forno.

Os obstáculos encontrados no projeto foram em sua maioria superados com dedicação da equipe. Entre eles o prazo curto, que foi resolvido a partir de uma maior organização e divisão de tarefas dentro da equipe, recursos escassos, solucionado através do empréstimo de capital pelos próprios membros do grupo, o qual foi devolvido após o arrecadamento, e, também, a dificuldade em aplicar alguns conhecimentos que a maioria do time não possuía, visto que boa parte da equipe acabara de completar o Ciclo Básico de Engenharias. Este último foi superado com auxílio de professores e da internet.

Uma vez que se encontram definidas a documentação do projeto, orçamento, cálculos que justifiquem os componentes eletrônicos e componentes da estrutura física, a parte teórica do projeto pôde ser considerada como definida. O forno encontra-se pronto e o material de fibra de carbono já está devidamente curado, com todos os componentes estruturais, eletrônicos e de controle de temperatura funcionando em conjunto.

Parte VI
Anexos

15 Anexos Cálculo

15.1 Tabelas e Diagramas

SITUAÇÃO	h [W/m ² .K]
Paredes internas	8,0
Forros internos	6,0
Pisos internos	10,5
Paredes externas (sem vento)	25,0
Superfícies horizontais externas (sem vento)	29,0

Fonte: Neto 2010

Figura 27: Tabela usada no dimensionamento do Isolamento Térmico

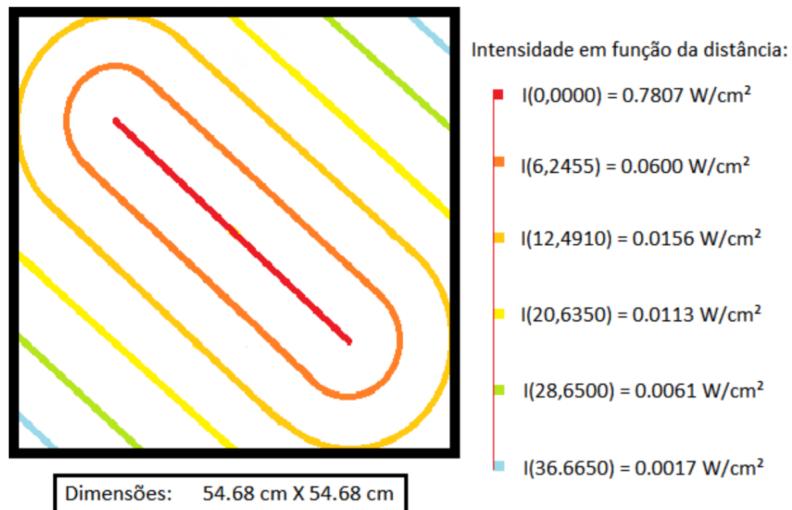


Figura 28: Diagrama de Radiação em Função da Distância

15.2 Gráficos e Simulações

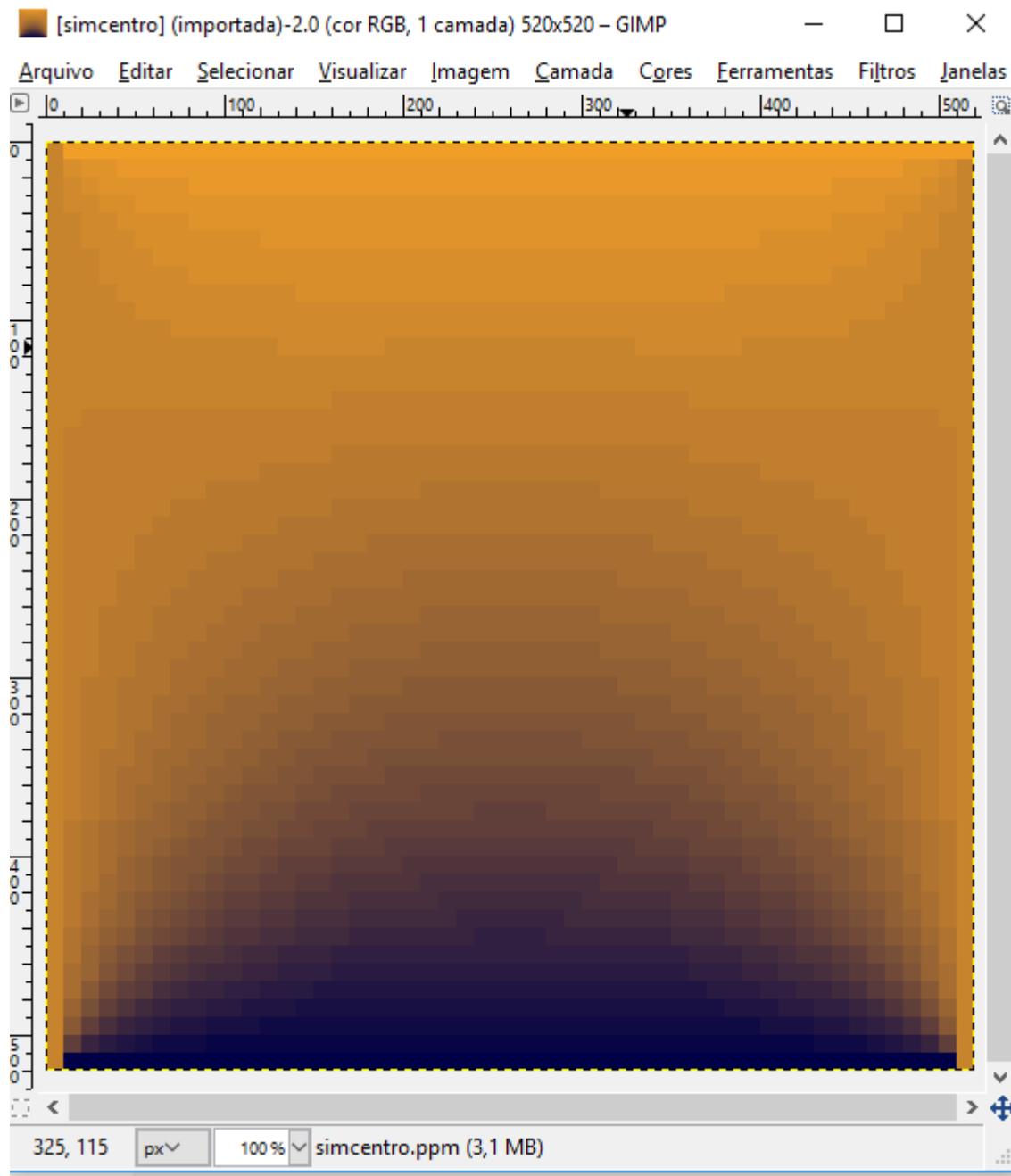


Figura 29: Simulação no Centro da Estufa

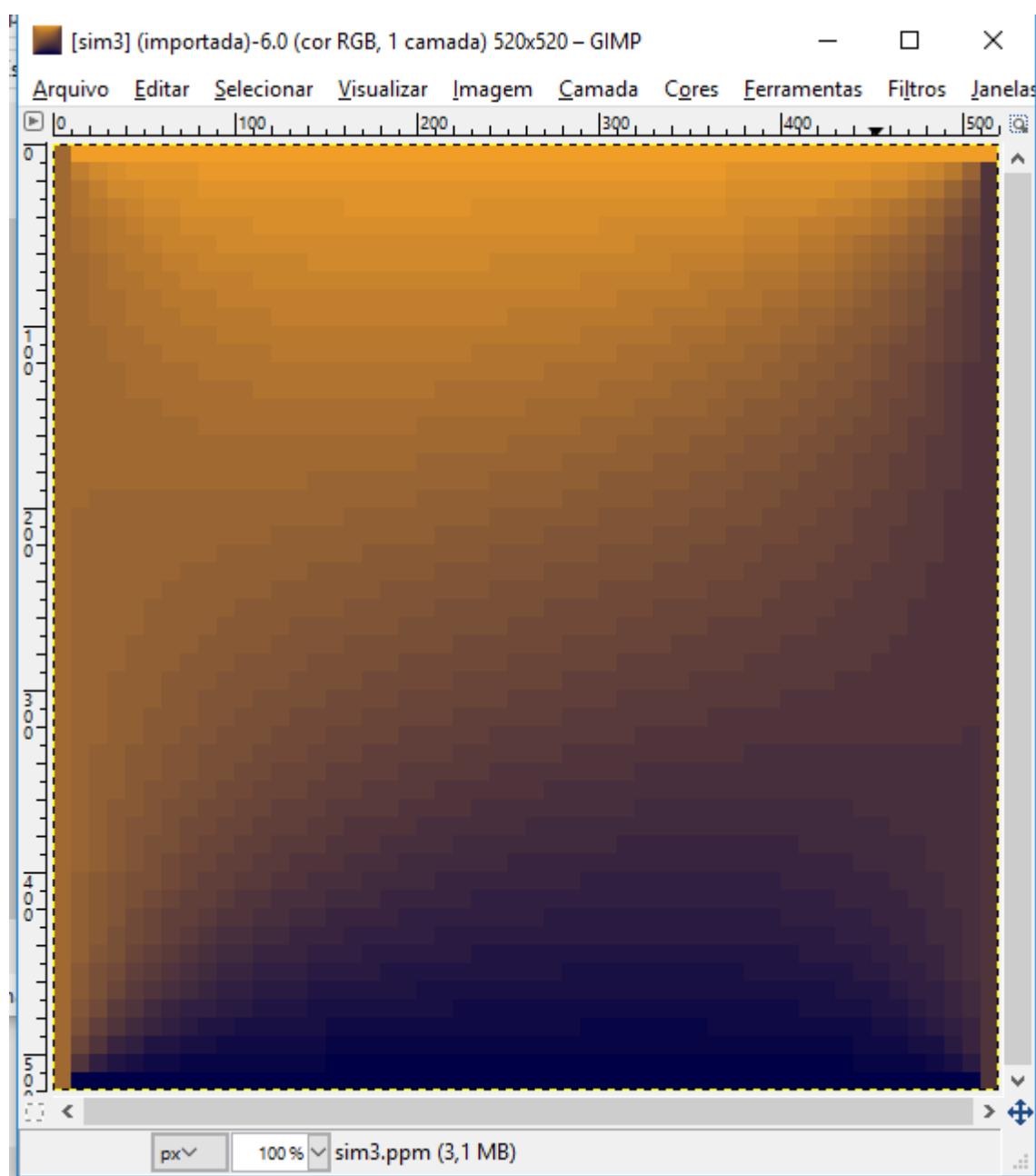


Figura 30: Simulação da Temperatura na Região Porta da Estufa

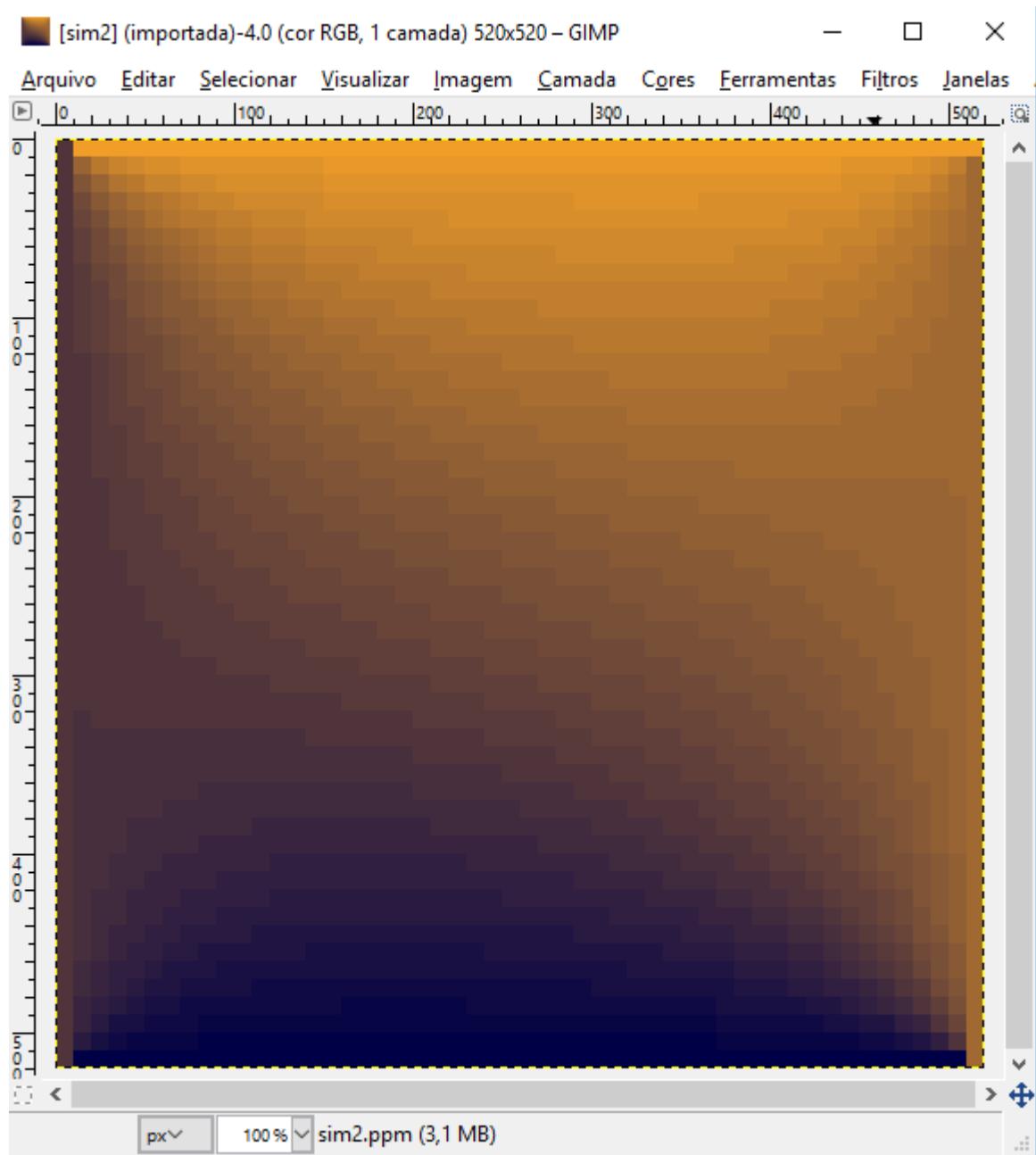


Figura 31: Simulação da Temperatura na Região da parede traseira da Estufa

16 Anexos Eletrônica

16.1 Esquemáticos Eletrônicos

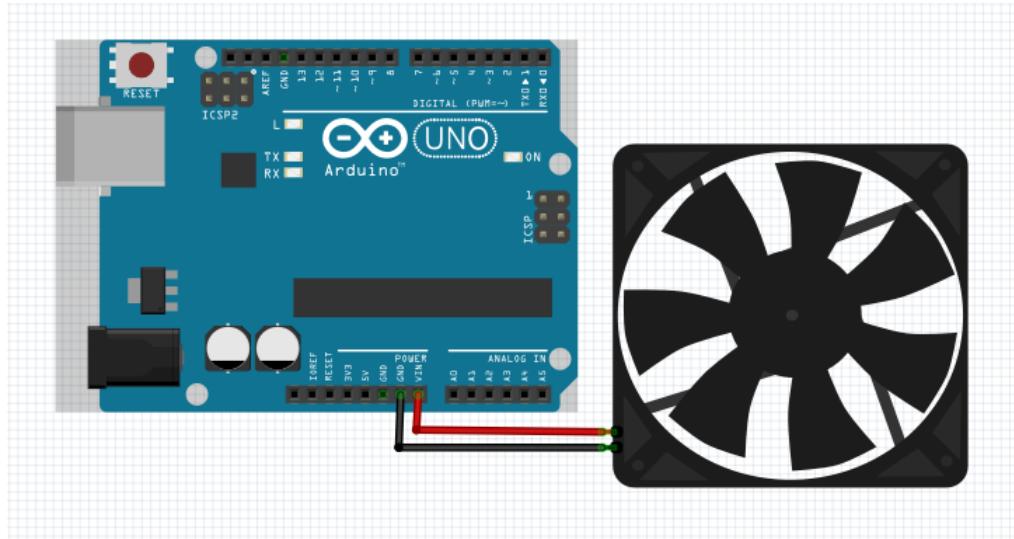


Figura 32: Esquemático do Cooler

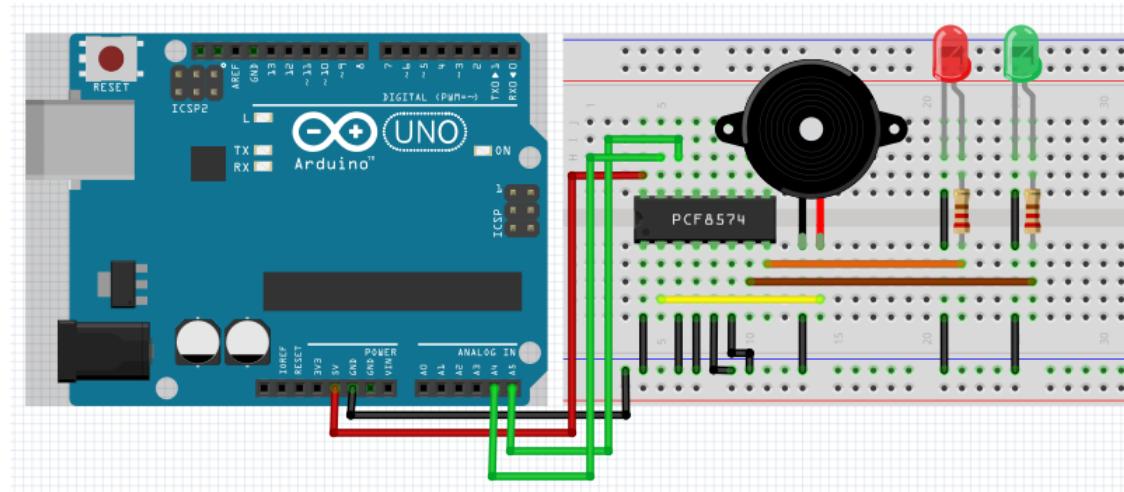


Figura 33: Esquemático do PCF8574

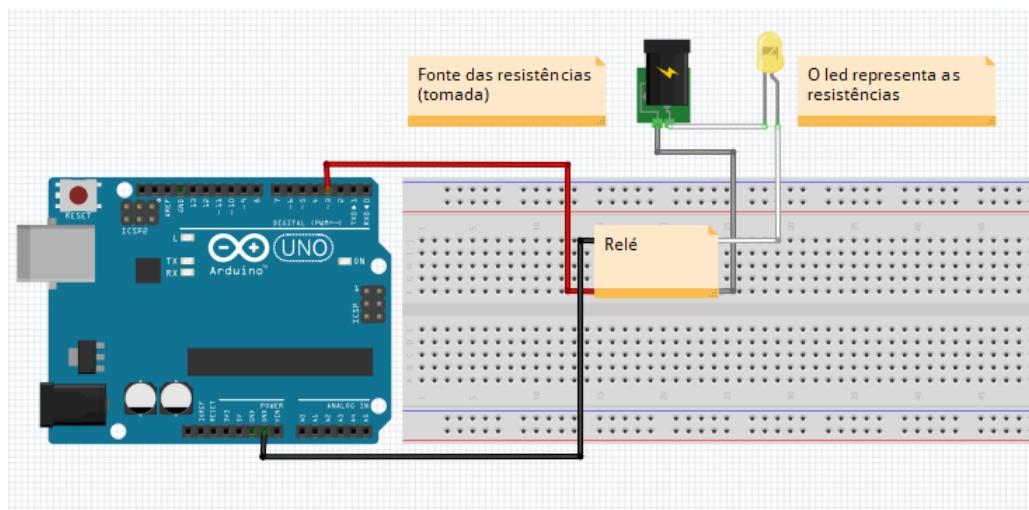


Figura 34: Esquemático do Relé

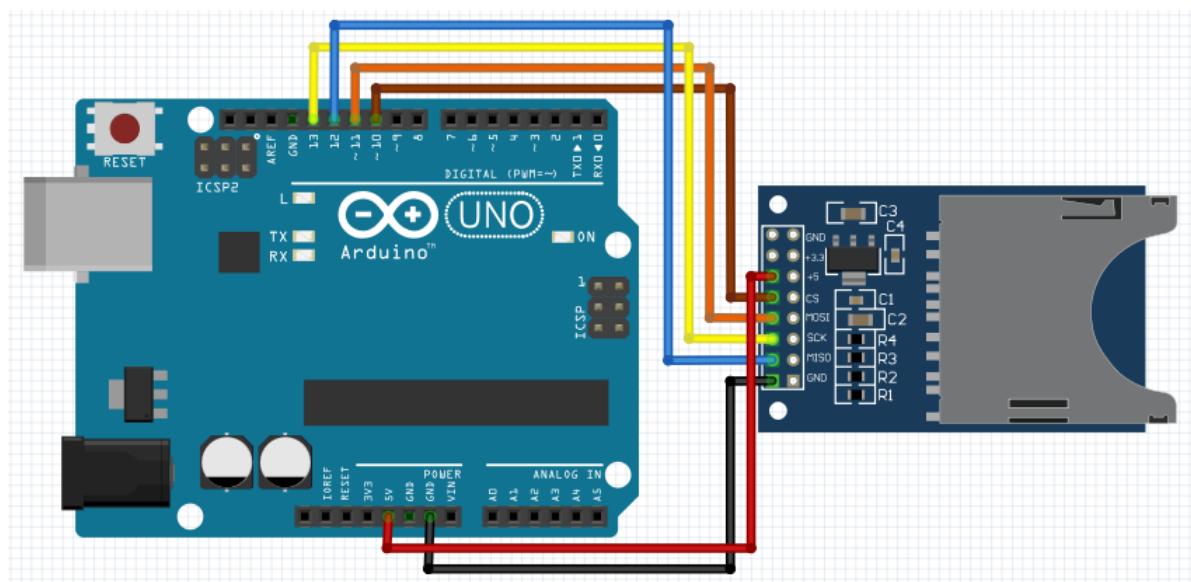


Figura 35: Esquemático do Módulo SD

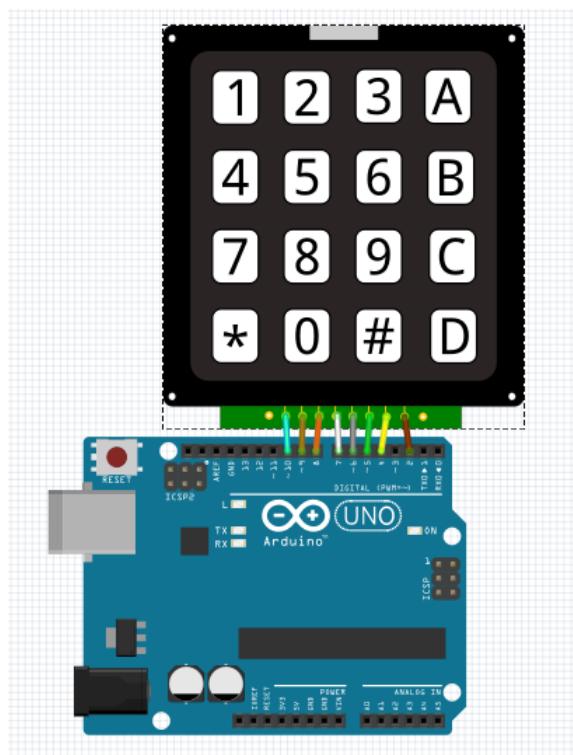


Figura 36: Esquemático do Teclado

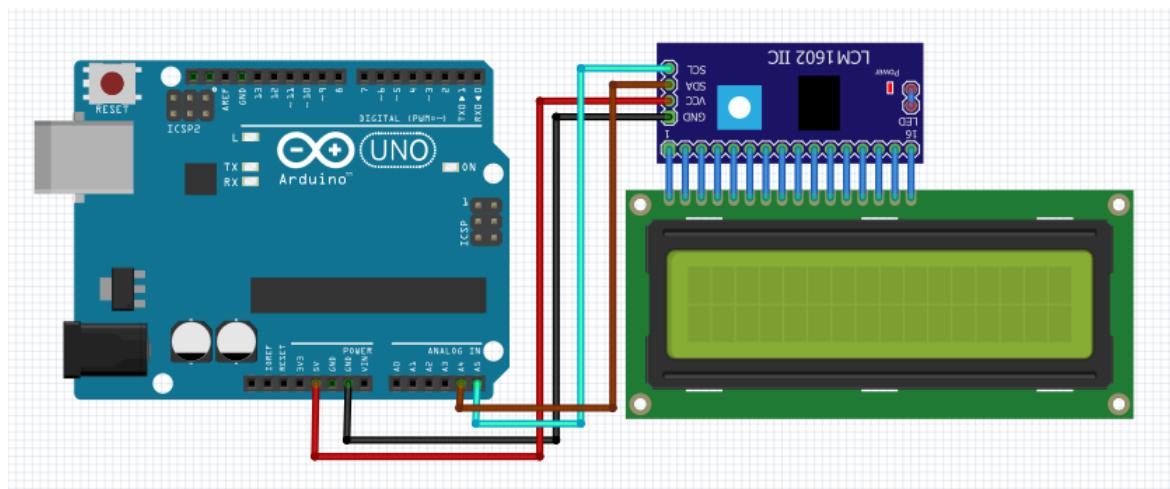


Figura 37: Esquemático da Tela

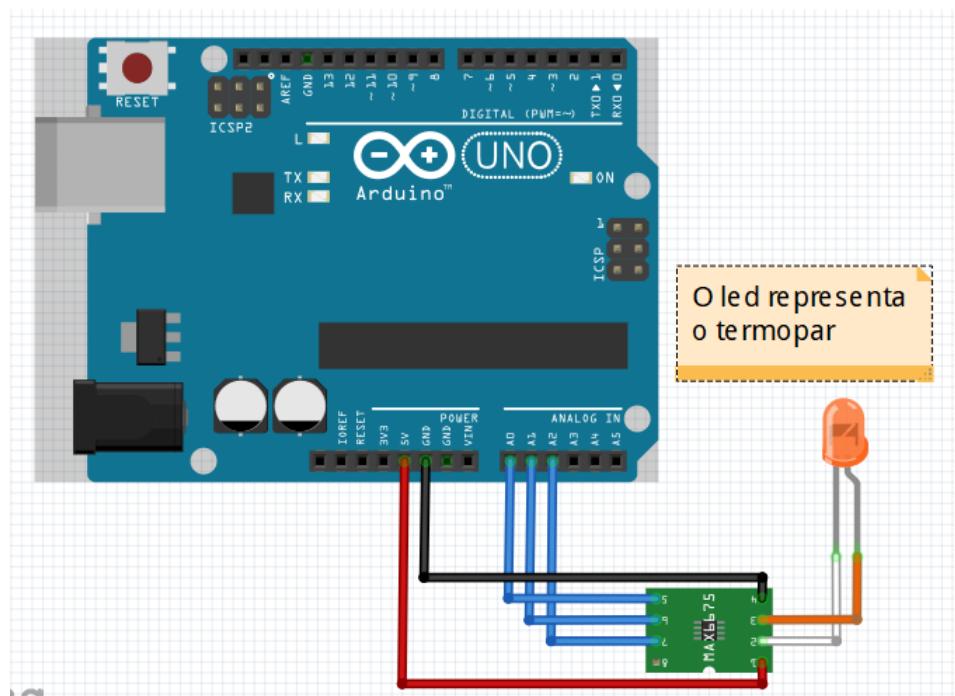


Figura 38: Esquemático do Termopar

16.2 Relatórios de Teste das Resistências

O objetivo deste teste foi escolher o fio mais adequado para utilização como elemento aquecedor para o forno. Foram feitos três testes, cada um com bitolas diferentes. A quantidade de testes foi definida a partir da disponibilidade e obtenção das bitolas encontradas, neste caso, utilizando a Escala americana de bitolas de fios (AWG), foram testadas as bitolas 18, 20 e 33. A composição do fio foi baseado na situação financeira do grupo, desse jeito foi escolhido o fio de Nicromo, composto principalmente por uma liga de níquel e cromo, que alcança temperaturas de até dez vezes a temperatura definida no escopo de 100 °C.

TESTE 1:

Material: Nicromo

Bitola: AWG 33

Duração: 3 h

Corrente: 1 A

Voltagem: 12 V

Análise:

O fio foi aquecido rapidamente ao ser ligado na fonte de energia de 12 V, sendo necessário a utilização de um simples controlador proporcional para chaveamento do fornecimento de energia. Utilizando o controlador o fio funcionou por 3 h ininterruptas sem apresentar problemas. Nota-se a necessidade de um encaixe adequado para a resistência caso a mesma seja feita no formato de hélice pois o aumento de temperatura resulta em uma leve deformação no formato do mesmo, ocasionando no contato entre partes da hélice que logo se fundem por causa do calor. Devido a baixa área de contato do fio, ele gera menos calor por tempo.

Conclusão: REJEITADO

TESTE 2;

Material: Nicromo

Bitola: AWG 20

Duração: 1 h

Corrente: 10 A

Voltagem: 220 V

Análise:

Assim como no primeiro teste, o fio aqueceu rapidamente ao ser ligado na fonte de energia. Também foi necessário o uso de um controlador proporcional para que o fio não chegasse à sua temperatura máxima de utilização. Com o aumento da espessura do fio e da fonte de energia, percebeu-se uma geração bem maior de calor, resultado bem vindo e que servirá bem para os propósitos

do projeto. Assim como no primeiro teste, percebeu-se a necessidade de um encaixe adequado para que o aumento da temperatura evite o contato entre pontos da hélice, causando a fundição do mesmo. Nota-se a possibilidade de colocar o fio em um formato semelhante ao de serpentinas de geladeira para mitigar o problema de deformação. A maior área de contato do fio possibilita uma geração maior de calor por tempo, mas o rápido aquecimento do fio utilizando a tensão de 220 V torna difícil o controle de temperatura do mesmo.

Conclusão: REJEITADO

TESTE 3:

Material: Nicromo

Bitola: AWG 18

Duração: 30 min

Corrente: 10 A

Voltagem: 220 V

Análise:

A diminuição da resistência pelo leve aumento da área da seção do fio de 0.515 mm² (AWG 20) para 0.818 mm² do fio atual possibilitou um controle maior da temperatura uma vez que o mesmo não esquentou tão rapidamente quanto o TESTE 2, mas ainda assim com velocidade suficiente para gerar calor em pouco tempo. O aumento da área de contato possibilitou que ainda mais calor fosse dissipado se comparado aos testes anteriores, sendo este modelo o candidato perfeito para uso no forno.

Conclusão: REJEITADO

TESTE 4:

Material: Resistência de forno elétrico

Potência dissipada: 155W

Duração: 30 min

Corrente: 10 A

Voltagem: 220 V

Análise:

A resistência de forno elétrico se mostrou capaz de ser controlada com maior precisão do que os fios usados sem nenhum tipo de isolamento e condução. Foi possível chegar a temperatura definida no escopo do projeto sem muito problema, além de eliminar o problema de deformação do fio e de possível choque causado pelo fio sem isolamento elétrico.

Conclusão: APROVADO

17 Anexos Estrutura

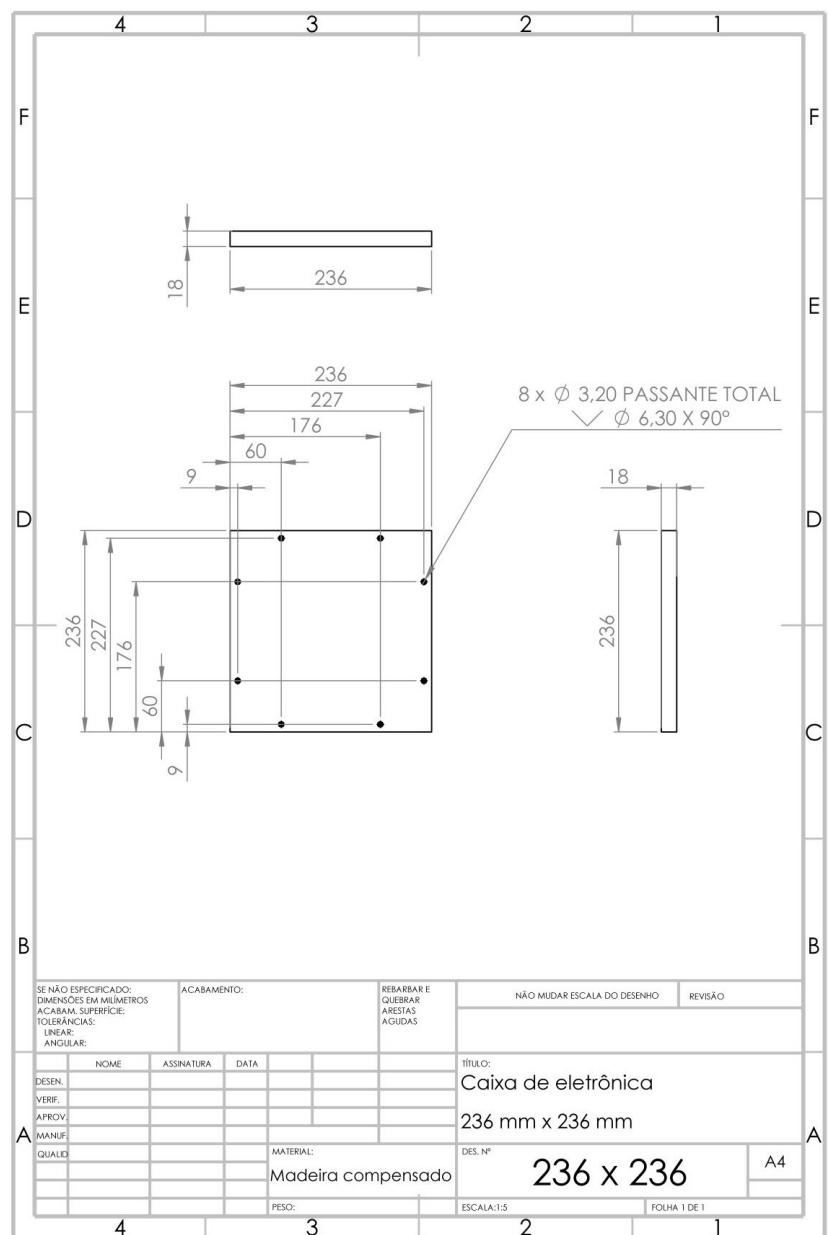


Figura 39: Cad 1

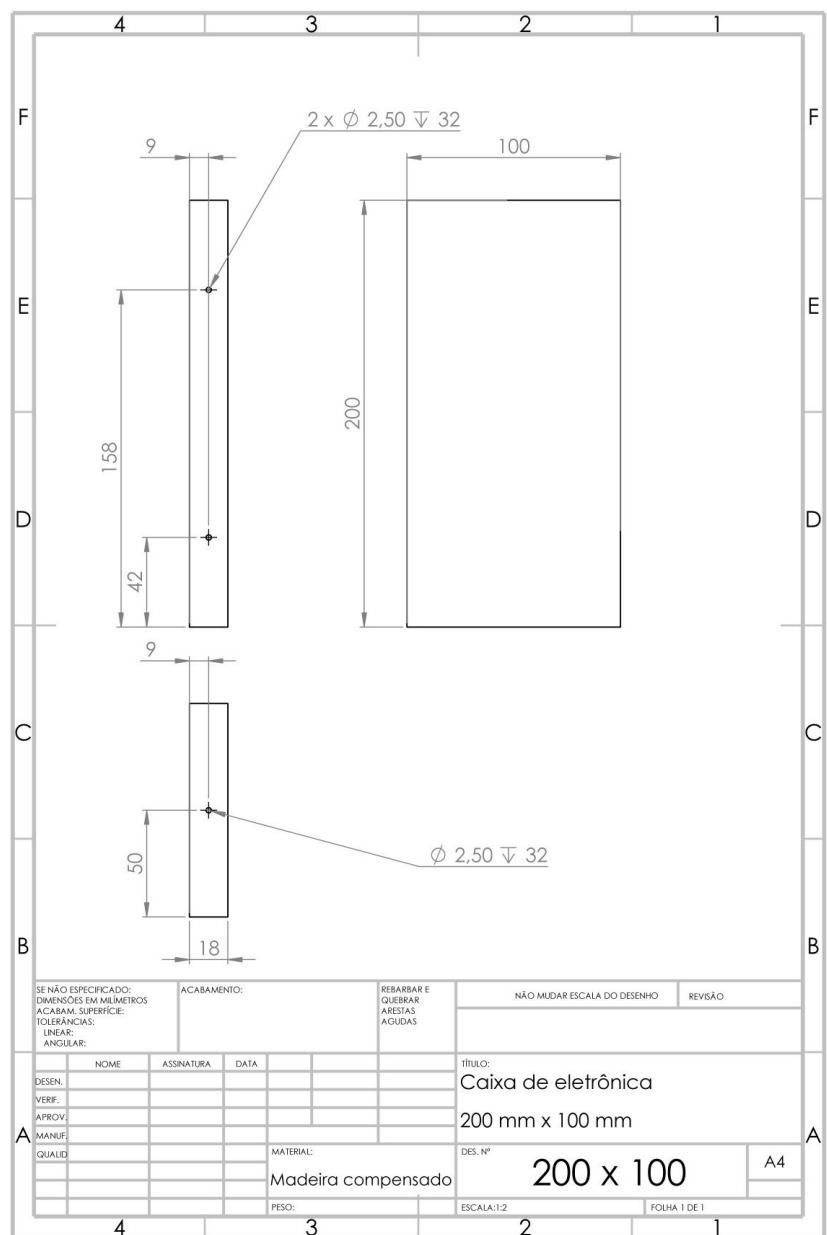


Figura 40: Cad 2

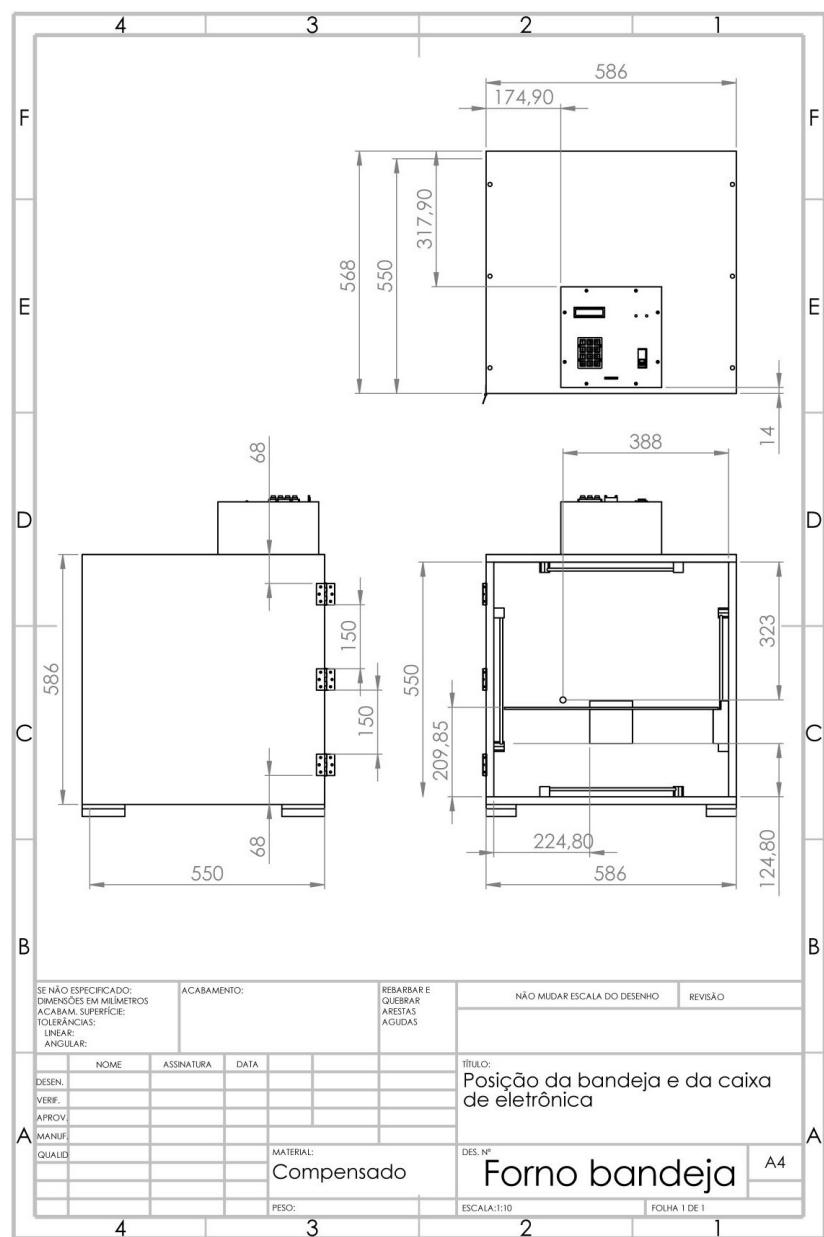


Figura 41: Cad 3

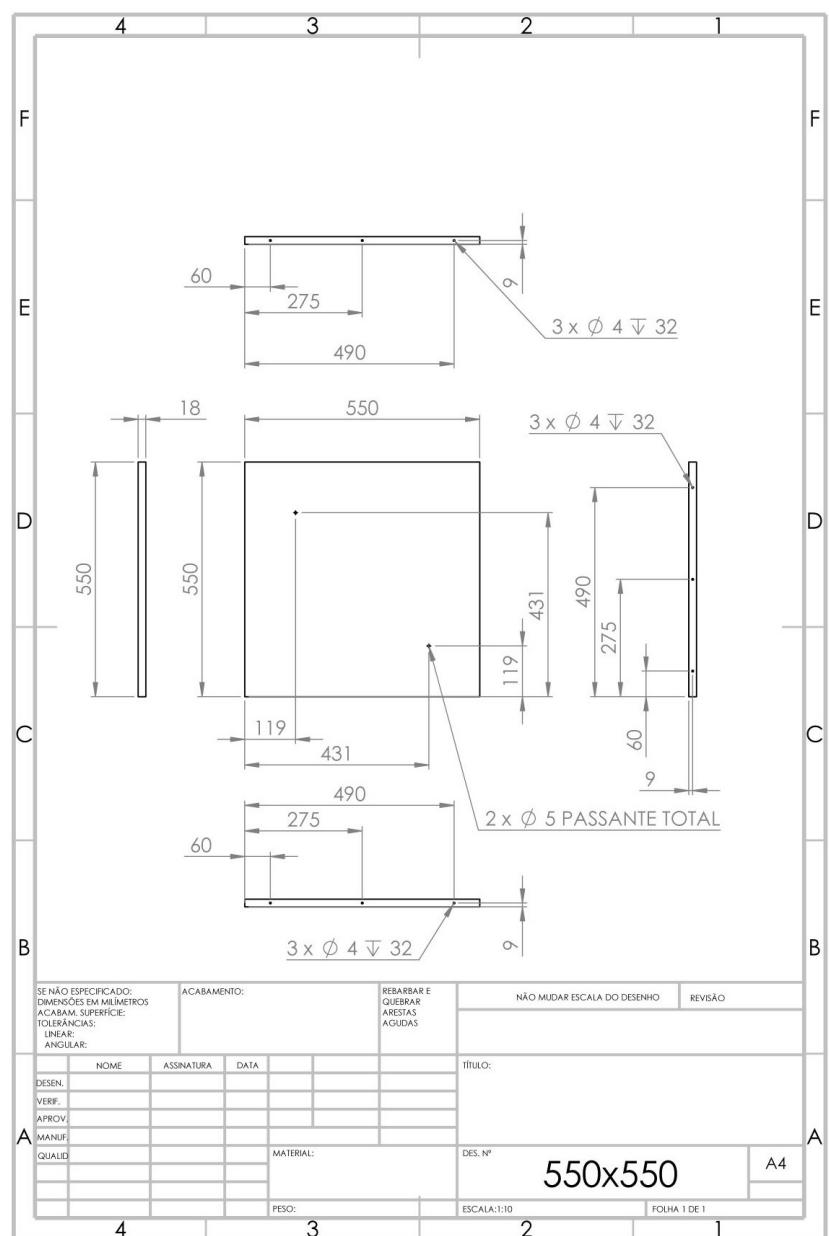


Figura 42: Cad 4

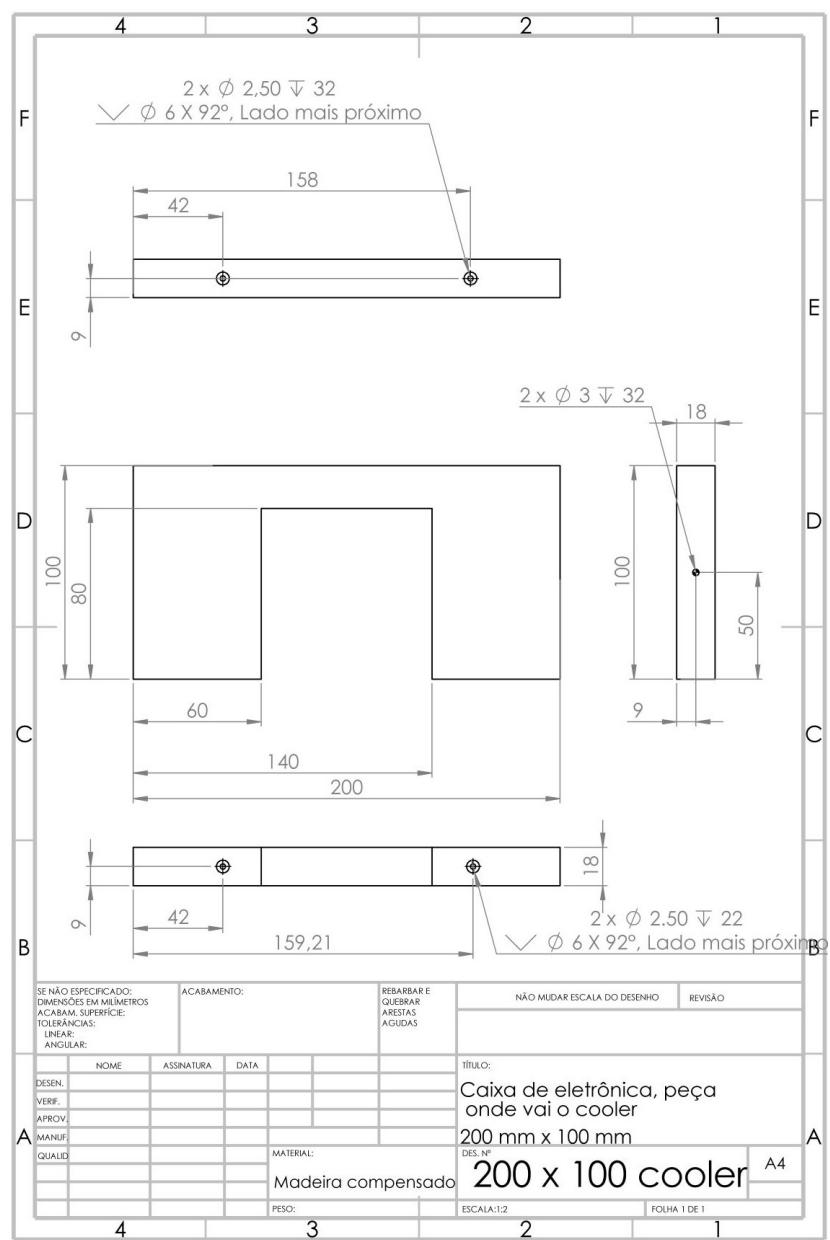


Figura 43: Cad 5

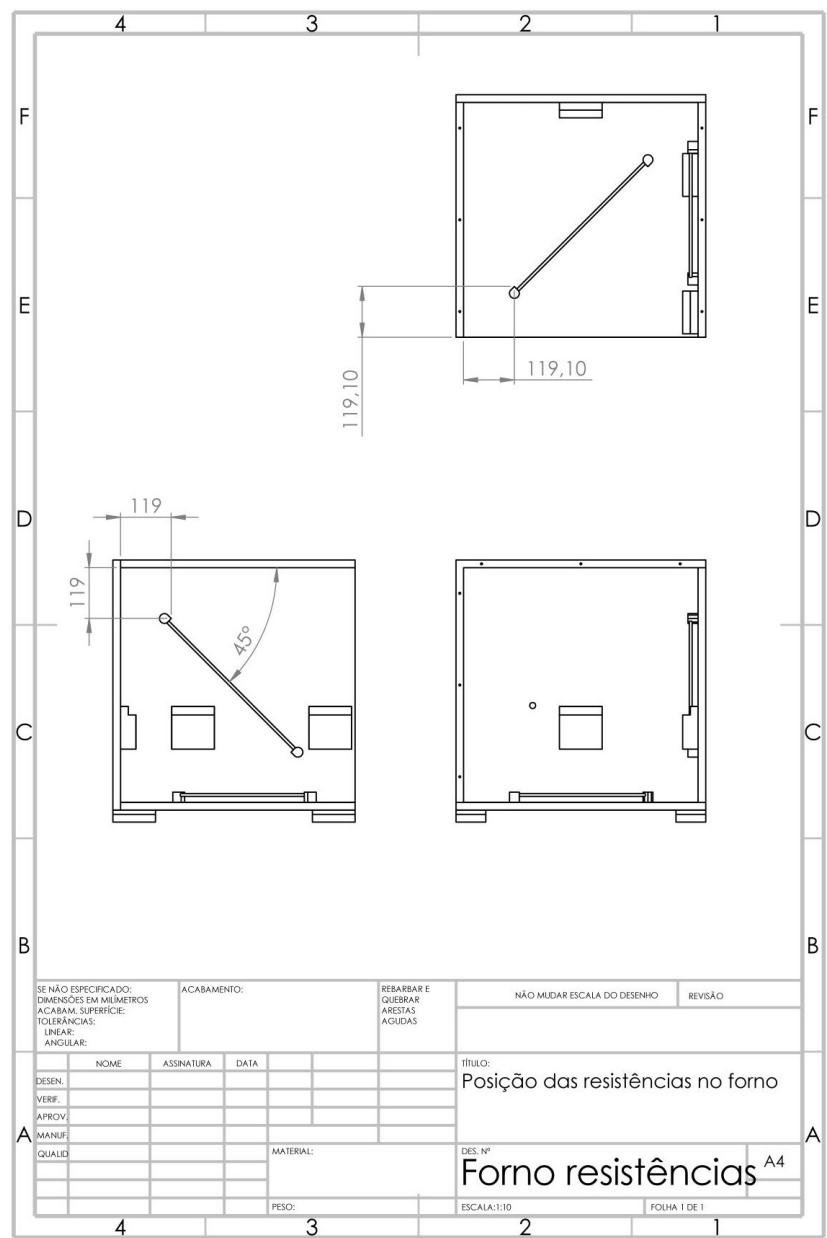


Figura 44: Cad 6

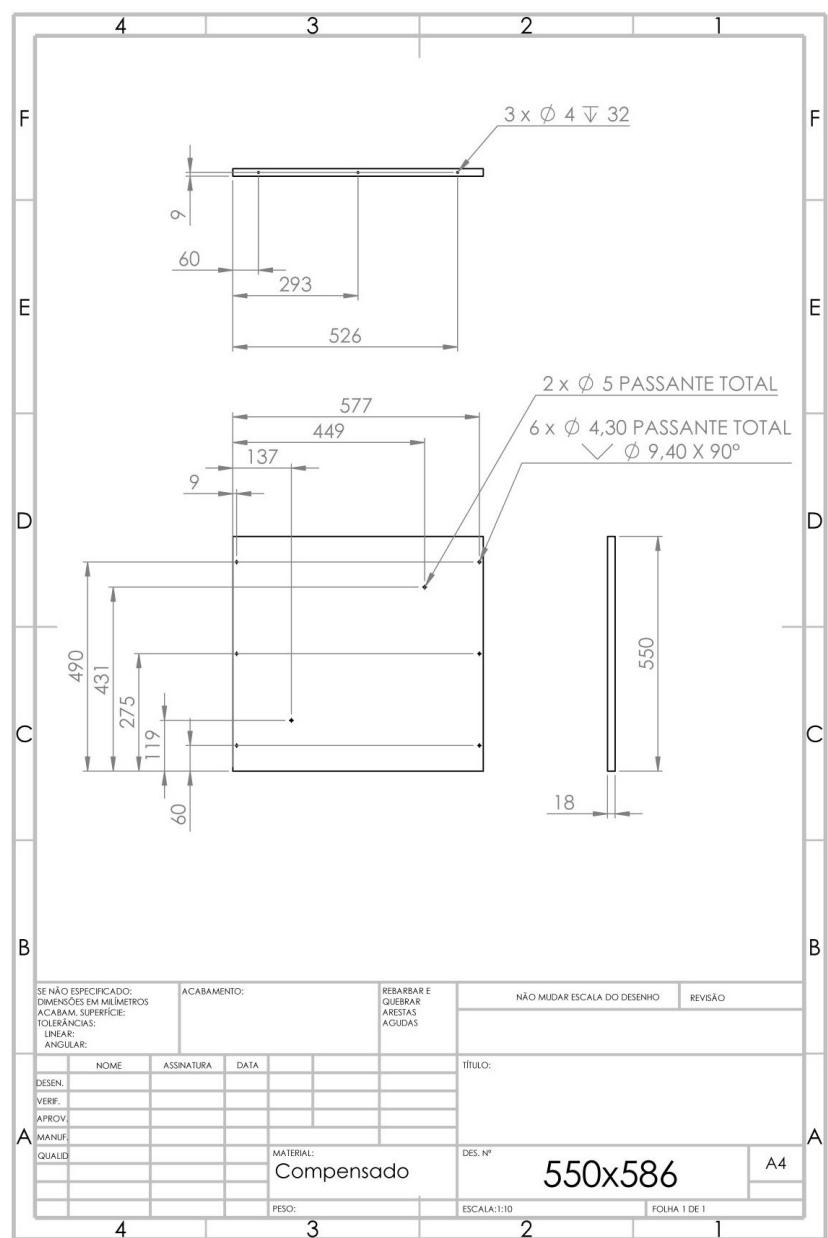


Figura 45: Cad 7

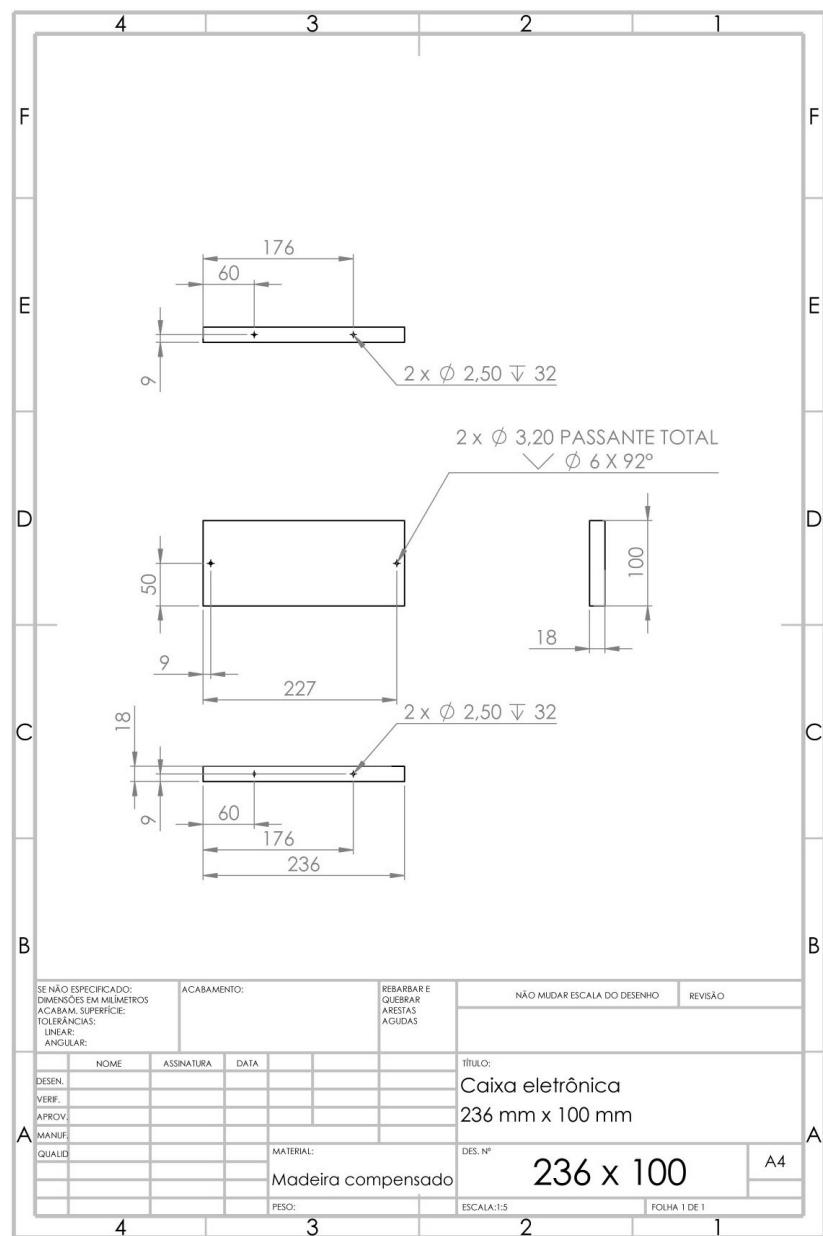


Figura 46: Cad 8

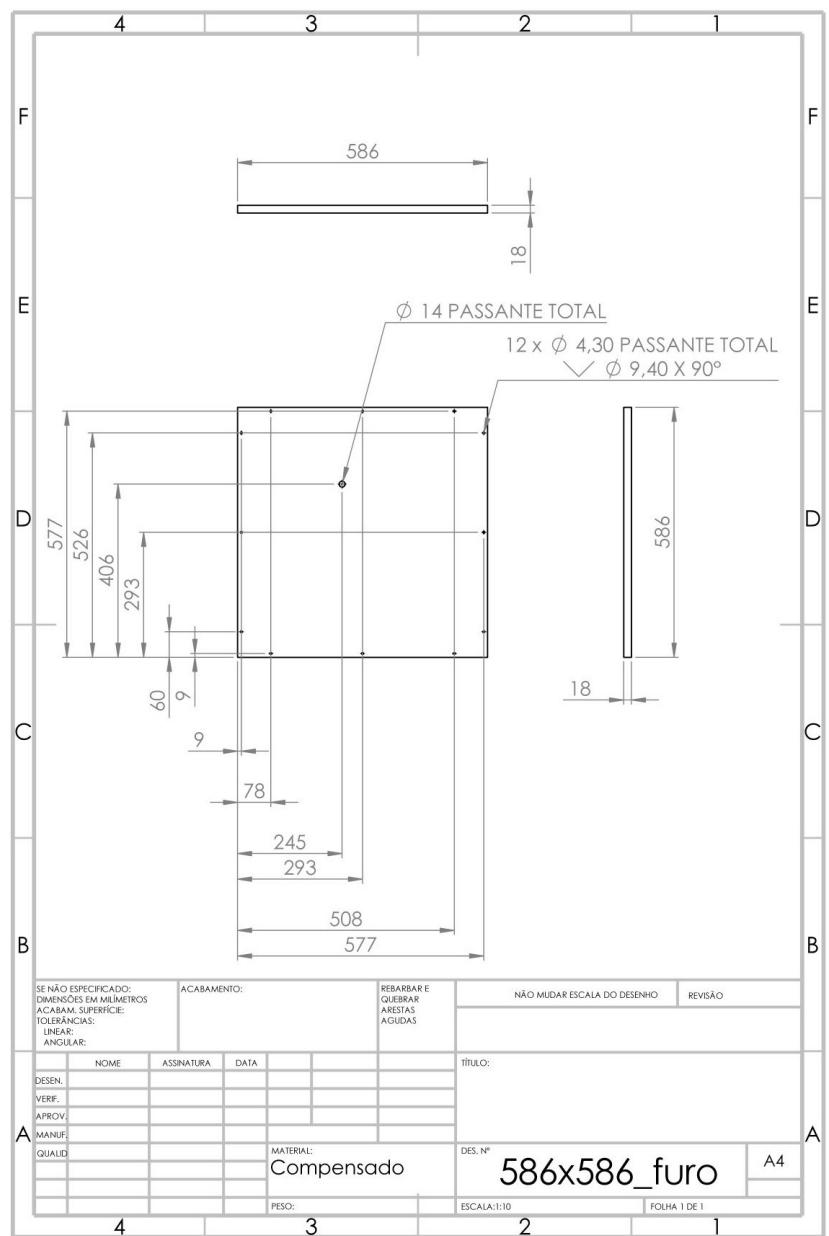


Figura 47: Cad 9

Parte VII

Referência Bibliográfica

- [1] **LIGANDO uma lâmpada com módulo relé.** Disponível em: <<https://www.arduinoecia.com.br/2013/02/ligando-uma-lampada-com-rele.html>>. Acesso em: 01 nov. 2018. Nenhuma citação no texto.
- [2] **SONS no Arduino usando buzzer.** Disponível em: <<https://www.arduinoecia.com.br/2013/06/sons-no-arduino.html>>. Acesso em: 01 nov. 2018. Nenhuma citação no texto.
- [3] MOREIRA, Fernando. **Controle PWM de Motor com Arduino ou Teste de Servo com Arduino.** Disponível em: <<http://aeromodelosedrones.blogspot.com/2017/05/controle-pwm-de-motor-com-arduino.html>>. Acesso em: 01 nov. 2018. Nenhuma citação no texto.
- [4] **EL potenciômetro.** Disponível em: <<http://www.iescamp.es/miarduino/2016/02/15/elpotencometro/>>. Acesso em: 01 nov. 2018. Nenhuma citação no texto.
- [5] KRASNHAK, Vagner. **Módulo I2C com LCD.** Disponível em: <<https://www.up.edu.br/blogs/engenharia-da-computacao/2016/09/29/tutorialmodulo-i2c-com->>. Acesso em: 01 nov. 2018. Nenhuma citação no texto.
- [6] MOTA, Allan. **Medindo temperatura com Arduino.** Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/lm35-medindo-temperatura-com-arduino/>>. Acesso em: 01 nov. 2018. Nenhuma citação no texto.
- [7] **COMO piscar um led com efeito fader.** Disponível em: <<http://www.comofazerascoisas.com.br/projeto-arduino-como-piscar-led-comefeito-fader.html>>. Acesso em: 01 nov. 2018. Nenhuma citação no texto.
- [8] COOK, R. D, MALKUS, D. S. PLESHA, M. E., (1989) – “**Concepts and Applications of Finite Element Analysis**” John Wiley Sons, New York; Nenhuma citação no texto.
- [9] RIBAS, Guilherme; RODRIGUES, Leandro. **Dimensionamento de uma estufa para secagem de compósitos de fibra de carbono.** 2013. 46 f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Mecânica)- FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA, Horizontina, 2013. Nenhuma citação no texto.
- [10] **SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE LAPLACE PARA A AVALIAÇÃO DAS TEMPERATURAS NO INTERIOR DE UMA BARRAGEM CONCRETOGRA-**

VIDADE. Belém: [s.n.], 2007. 10 p. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/seminario/belem/T100/A35.PDF>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

[11] SELLERS, David. **An Overview of Proportional plus Integral plus Derivative Control and Suggestions for Its Successful Application and Implementation.** Oregon: [s.n.], 2004. 12 p. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20070307161741/http://www.peci.org/library/PECI_ControlOverview1002.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2018.

[12] Jones, R.M. **Mechanics Of Composite Materials.** Taylor & Francis, 1998. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=oMph2kNG3yAC>. Acesso em: 01 nov. 2018