



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

HENRIQUE BRITO SILVA

CONTROLADOR DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (CTC)
PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO
MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA

UBERLÂNDIA
2020

HENRIQUE BRITO SILVA

**CONTROLADOR DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (CTC)
PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO
MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção de título de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

Área de concentração: Engenharia Mecatrônica

Orientador: Profa. Dra. Priscila Ferreira Barbosa de Sousa

**UBERLÂNDIA
2020**

*Este trabalho é dedicado a meus pais, amigos e a Faculdade de Engenharia Mecânica.
Todos foram essenciais na minha formação e crescimento.*

AGRADECIMENTOS

À vida, pelas grandiosas oportunidades de crescimento e aprendizado que tive. “A quem muito foi dado, muito será pedido” (Lc 12,48). Sou grato por sentir que tenho muito a devolver a sociedade.

Aos meus pais, meus primeiro e eternos mestres por me darem os valores que me constituem e pelo amor e apoio incondicional a meus projetos e capacidades.

À Profa. Dra. Priscila Ferreira Barbosa de Sousa e o Prof. Dr. Gilmar Guimarães, pela a oportunidade de ter impacto no meio científico, aplicando meus conhecimentos adquiridos na graduação, e pela orientação e incentivo no projeto.

Ao José Ricardo Ferreira Oliveira pelo suporte na implementação prática do projeto e por partilhar do sonho de ver o equipamento em funcionamento pleno.

Ao Leonardo Ribeiro Rosa pelo fornecimento do case do equipamento impresso em 3D.

Aos professores e amigos, que na minha jornada me deram calma quando houve urgência, sabedoria quando houve medo e conhecimento quando houve trevas.

À Sociedade, pelo privilégio de poder crescer na UFU.

“De nada adianta a inteligência se não houver também a humildade”

Cláudia Furtado Borges

RESUMO

Esse trabalho apresenta o projeto e a implementação do Controlador de Transferência de Calor (CTC) em uma placa de controle para ensaios de condutividade térmica pelo método da placa quente protegida. Esse método se destaca para a caracterização da **condutividade térmica** de materiais devido a sua facilidade de ser implementado e modelado matematicamente. O objetivo do CTC é distribuir a potência de uma única fonte para diferentes cargas, resistências, controlando em malha fechada as suas respectivas temperaturas, permitindo assim criar um fluxo térmico unidimensional necessário para realizar o ensaio de condutividade térmica. O ensaio é controlado por meio de uma interface gráfica em MATLAB por meio da qual é possível controlar a placa e acompanhar o andamento do ensaio de condutividade térmica. A placa foi implementada baseada no microcontrolador Arduino MEGA 2560 e em circuitos de eletrônica de potência.

Palavras-chave: Placa Quente, Condutividade térmicas, Eletrônica de Potência, Microcontroladores, Controle de temperatura

ABSTRACT

This work presents the design and implementation of the Heat Transfer Controller(HTC), a control plate for thermal conductivity tests by the protected hot plate method. This method stands out for the characterization of thermal conductivity of materials due to its ease of being implemented and mathematically modeled. The CTC is capable of distributing the power from a single source to different loads, resistances, controlling in closed loop the applied voltage and therefore their respective temperatures, thus allowing to create a one-dimensional thermal flow necessary to perform the thermal conductivity test. The test is controlled by means of a graphical interface in MATLAB through which it is possible to control the plate and monitor the progress of the thermal conductivity test. The board was implemented based on the Arduino MEGA 2560 microcontroller and on power electronics circuits.

Key-words: Hot Plate, Thermal Conductivity, Electronics, Microcontroller, Temperature Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Modos de Transferência de calor, (MOURA, 1993) | 14 |
| Figura 2 – Modos de Transferência de calor, (INCROPERA, 2011) | 17 |
| Figura 3 – Condução unidimensional em regime permanente, (INCROPERA, 2011) | 17 |
| Figura 4 – Representação prática da equação (2.1), (INCROPERA, 2011) | 18 |
| Figura 5 – Relação condutividade térmica com a temperatura em diversos sólidos | 19 |
| Figura 6 – Resistências da placa quente (RIBEIRO; GUIMARÃES; BORGES, 2003) | 20 |
| Figura 7 – Esquema de fabricação das placas frias (RIBEIRO; GUIMARÃES; BORGES, 2003) | 21 |
| Figura 8 – Montagem da placa quente protegida (RIBEIRO; GUIMARÃES; BOR- GES, 2003) | 22 |
| Figura 9 – Resposta de um sistema de primeira ordem a um degrau unitário. Fonte: Próprio autor (2020). | 24 |
| Figura 10 – Resposta ao impulso unitário de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte.Fonte: Próprio autor (2020). | 25 |
| Figura 11 – Modelo de funcionamento da placa de controle. Fonte: Próprio autor (2020) | 26 |
| Figura 12 – Simbologia do MOSFET (BRAGA, 2020) | 27 |
| Figura 13 – Curva Característica do MOSFET (TUTORIALS, 2020) | 28 |
| Figura 14 – Analogia de funcionamento do transistor como válvula hidráulica (AL- LINONEELECTRONIC, 2020) | 28 |
| Figura 15 – Circuito push-pull para acionamento de MOSFET (SWITCHCASE, 2020) | 29 |
| Figura 16 – Exemplo de PWM (CIRCUITS4YOU, 2020) | 30 |
| Figura 17 – Circuito que amplifica o sinal de saída no microcontrolador e chaveia os transistores de potência Fonte: Próprio autor (2020) | 31 |
| Figura 18 – Funcionalidades do Arduino MEGA 2560 (4HOBBY, 2020) | 32 |
| Figura 19 – Circuito de aplicação do chip MAX6675 (DATASHEETSMAXIMINTE- GRATED, 2020) | 32 |
| Figura 20 – Pinout do sensor ACS712 (DATASHEETSMAXIMINTEGRATED, 2020) | 32 |
| Figura 21 – Recursos interligados pela placa de circuitos Fonte: Autor Próprio (2020) | 33 |
| Figura 22 – Projeto da Placa de circuitos completo Fonte: Autor Próprio (2020) . . | 34 |
| Figura 23 – Ligações da camada inferior da placa de circuitos Fonte: Autor Próprio (2020) | 35 |
| Figura 24 – Ligações da camada superior da placa de circuitosFonte: Autor Próprio (2020) | 35 |
| Figura 25 – Visão de perfil da placa de circuitos montada Fonte: Autor Próprio (2020) | 36 |
| Figura 26 – Vista inferior da placa de circuitos montada Fonte: Autor Próprio (2020) | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 27 – Vista superior da placa de circuitos montada Fonte: Autor Próprio (2020) | 37 |
| Figura 28 – resposta ao degrau das resistências térmicas Fonte: Autor Próprio (2020) | 38 |
| Figura 29 – Modelo no Simulink da planta definida Fonte: Autor Próprio (2020) | 40 |
| Figura 30 – Resposta do modelo definido ao degrau de 32V Fonte: Autor Próprio (2020) | 40 |
| Figura 31 – Modelo no Simulink da planta definida + ruído Fonte: Autor Próprio (2020) | 41 |
| Figura 32 – Resposta do modelo definido ao degrau de 32V + ruído Fonte: Autor Próprio (2020) | 41 |
| Figura 33 – Modelo do Controlador aplicado a planta Fonte: Autor Próprio (2020) | 42 |
| Figura 34 – Resposta da planta com o controlador a uma entrada em degrau de 30°C Fonte: Autor Próprio (2020) | 43 |
| Figura 35 – Simulação da resposta da planta com ruído no sensor de temperatura Fonte: Autor Próprio (2020) | 43 |
| Figura 36 – Simulação da resposta da planta com ruído no sensor de temperatura com filtro de média móvel Fonte: Autor Próprio (2020) | 44 |
| Figura 37 – Simulação da resposta da planta com ruído e controlador PI de $K_p = 1,5$ e $K_I = 4$ Fonte: Autor Próprio (2020) | 45 |
| Figura 38 – Simulação da resposta da planta com ruído e controlador PI de $K_p = 15,71$ e $K_I = 0$ Fonte: Autor Próprio (2020) | 45 |
| Figura 39 – Conexão das fontes da bancada com a placa de controle Fonte: Autor Próprio (2020) | 46 |
| Figura 40 – Conexão dos sensores de temperatura com a placa de controle Fonte: Autor Próprio (2020) | 47 |
| Figura 41 – Conexão da placa de controle com o computador via cabo USB. Fonte: Autor Próprio (2020) | 48 |
| Figura 42 – Conexão da placa de controle com as Resistências. Fonte: Autor Próprio (2020) | 48 |
| Figura 43 – Terminais de conexão da placa. Fonte: Autor Próprio (2020) | 49 |
| Figura 44 – Conexão da placa de controle com as Resistências. Fonte: Autor Próprio (2020) | 49 |
| Figura 45 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 1. Fonte: Autor Próprio (2020) | 50 |
| Figura 46 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 2. Fonte: Autor Próprio (2020) | 51 |
| Figura 47 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 1 com filtro de média móvel. Fonte: Autor Próprio (2020) | 52 |
| Figura 48 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 2 com filtro de média móvel. Fonte: Autor Próprio (2020) | 52 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| CTC | Controlador de Transferência de Calor |
| LTCME | Laboratório de Ensino e Pesquisa em Transferência de Calor |
| UFU | Universidade Federal de Uberlândia |
| FEMEC | Faculdade de Engenharia Mecânica |
| FOPTD | First Order Plus Dead Time (Sistemas de Primeira Ordem com Atraso de Transporte) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|---|
| q | Fluxo de calor em uma direção - [W] |
| k | Constante de condutividade térmica - [W/m.K] |
| h | Coefficiente de transferência de calor convectivo - [W/m ² .K] |
| T | Temperatura - [K] |
| A | Área - [m ²] |
| t | Tempo - [s-min] |
| τ | Constante de tempo - [s-min] |
| k | Ganho estático - [° C/V] |
| θ | Atraso de transporte - [s-min] |
| d | Razão Cíclica [%] |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | OBJETIVOS DO PROJETO | 14 |
| 1.1.1 | Objetivos Específicos - Requisitos de Projeto | 14 |
| 1.2 | DOS TRABALHOS ANTERIORES | 15 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 15 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 16 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 2.2 | FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR | 16 |
| 2.2.1 | Conceitos de Transferência de Calor | 16 |
| 2.2.2 | Condução | 17 |
| 2.3 | PLACA QUENTE PROTEGIDA | 19 |
| 2.3.1 | Placa Quente | 20 |
| 2.3.2 | Placa Fria | 21 |
| 2.3.3 | Montagem da bancada | 21 |
| 2.3.4 | Aplicações da Placa quente protegida | 22 |
| 2.4 | CONTROLE DE SISTEMAS TÉRMICOS COM ATRASO | 23 |
| 2.4.1 | Sistemas de Primeira Ordem | 23 |
| 2.4.2 | Sistemas de primeira ordem com atraso de transporte | 23 |
| 2.4.3 | Projeto do Controlador | 24 |
| 2.5 | ELETRÔNICA DE POTÊNCIA | 25 |
| 2.5.1 | MOSFET-chave semicondutora | 26 |
| 2.5.2 | MOSFET-Circuito de ativação como chave | 28 |
| 2.5.3 | PWM (Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso) | 29 |
| 2.5.4 | Circuito de amplificação de sinal PWM | 29 |
| 2.6 | MICROCONTROLADOR | 31 |
| 3 | METODOLOGIA | 33 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 33 |
| 3.2 | PLACA DE CIRCUITOS | 33 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA | 38 |
| 3.4 | SIMULAÇÕES EM MALHA FECHADA | 42 |
| 3.5 | MONTAGEM DO ENSAIO | 46 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 50 |
| 5 | CONCLUSÃO | 54 |
| 6 | TRABALHOS FUTUROS | 55 |

| | | |
|-----|---|-----------|
| 6.1 | CALIBRAÇÃO E FILTRO DIGITAL DOS SENSORES DE TEMPERATURA MAX6675 | 55 |
| 6.2 | ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA | 55 |
| | REFERÊNCIAS | 57 |
| | A – APÊNDICE - MANUAL DE USO DO CONTROLADOR | 59 |

1 INTRODUÇÃO

A condutividade é uma propriedade termofísica chave para o desenvolvimento de materiais que no futuro serão essenciais para a criação de novas tecnologias. O desenvolvimento de materiais com uma condutividade térmica superior aos que existem atualmente, viabilizará a criação de dispositivos eletrônicos mais seguros, eficientes e poderosos. Já materiais isolantes podem ajudar a reduzir as trocas de calor entre dois meios e que podem ser aplicados na construção civil para melhorar o isolamento, reduzindo os gastos com climatização.

Nesse contexto se destaca a atuação do LTCME - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Transferência de Calor na FEMEC em Uberlândia, responsável por diversos avanços nos estudos da condutividade térmica. Um desses avanços foi a construção de uma bancada de ensaio capaz de medir a condutividade de materiais. A placa foi construída pelo método da placa quente como descrito em (RIBEIRO; GUIMARÃES; BORGES, 2003).

Esse método se baseia no empilhamento de placas e resistências térmicas para criar um fluxo unidirecional de calor. O material ensaiado fica entre uma placa quente com resistências e uma placa fria refrigerada. Para realizar o ensaio é preciso ajustar a tensão das resistências térmicas e monitorar a leitura de vários termopares.

Essa bancada atingiu resultados satisfatórios, sendo capaz de aferir a condutividade térmica do PVC com uma diferença inferior a 4% (MOURA, 1993). Porém a realização desse ensaio pode levar até 8 horas e depende do acompanhamento de um pesquisador para ajustar manualmente o controle de potência das resistências e observar a temperatura em até 20 termopares.

Porém segundo (MOURA, 1993), existem fatores que podem aumentar os erros de medição que estão relacionados com o fluxo unidimensional de calor entre as placas. Esses fatores são:

- diferenças na temperatura ambiente
- desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda
- heterogeneidades nas amostras

Esses fatores distorcem as linhas isotérmicas, modificando a hipótese de fluxo de calor unidimensional. A figura 1, mostra os possíveis fluxos de calor na montagem do ensaio.

As transferências de calor no **sentido vertical** são aquelas que ocorrem na direção desejada. As transferências de calor na horizontal distorcem as linhas isotermais e para

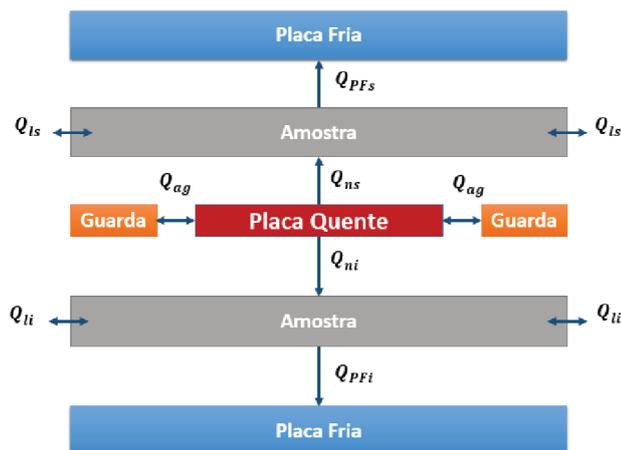


Figura 1 – Modos de Transferência de calor, (MOURA, 1993)

combater essas distorções existe a resistência de guarda que tem o papel de manter a mesma temperatura da placa quente. Uma forma de reduzir essa distorção seria controlar a potência que chega as resistências de guarda, garantindo que a sua temperatura é a mesma da resistência central

Dessa forma, esse trabalho se apresenta como uma proposta de melhoria para a bancada por meio da aplicação de conhecimentos de eletrônica e automação com o intuito realizar o controle em malha fechada das resistências térmicas, para aumentar a qualidade das linhas isoterms e ainda automatizar o ensaio, permitindo a interação do usuário com a bancada por meio de uma interface gráfica além de realizar o controle em malha fechada da temperatura e medição da temperatura ao longo do tempo. Dessa forma, a bancada traz uma solução que tornará mais simples e eficiente a realização dos ensaios de condutividade térmica.

1.1 OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo do projeto é aprimorar a bancada de ensaio de condutividade térmica através do controle em malha fechada da tensão aplicada às resistências da placa quente, reduzindo assim a necessidade de supervisão humana para a realização de ensaios.

1.1.1 Objetivos Específicos - Requisitos de Projeto

- Controlar diferentes resistências a partir de uma mesma fonte.
- Controlar até 5 resistências simultaneamente
- Monitorar até 7 termopares simultaneamente.

- Um manual de uso do equipamento deve permitir a sua utilização mesmo por leigos aos sistema.

1.2 DOS TRABALHOS ANTERIORES

Esse trabalho é a continuação do artigo desenvolvido no LTCME (RIBEIRO; GUIMARÃES; BORGES, 2003) com o intuito de desenvolver uma bancada de ensaios para testes de condutividade térmica para materiais isolantes por meio do método da placa quente protegida (ou compensada).

A implementação da placa quente protegida foi possível devido a integração de diversos sistemas que foram adquiridos e/ou desenvolvidos pelo laboratório. Por exemplo, as resistências térmicas, a fonte de potência e o leitor dos termopares foram adquiridos e integrados à bancada. Outros sistemas como as placas quentes e frias e o sistema de resfriamento foram desenvolvidos e confeccionados pelos pesquisadores do laboratório.

O presente trabalho tem o intuito de continuar aprimorando essa bancada para ampliar sua utilização e permitir maior controlabilidade com menor intervenção humana e controles simplificados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante do trabalho é dividido da seguinte maneira.

Fundamentação Teórica: contém as bases teóricas do trabalho, com detalhamento da parte eletrônica, microcontroladores e controle assim como as bases térmicas do ensaio de condutividade.

Metodologia: descreve como a teoria descrita no capítulo anterior foi aplicada para a implementação do projeto e justifica as decisões tomadas ao longo do seu desenvolvimento.

Resultados: mostra com dados e gráficos os resultados obtidos com a utilização do sistema construído e a as análises dos mesmos pela visão do projetista.

Conclusão: analisa o impacto do trabalho no contexto de aplicação e como seus resultados tiveram impacto no resultado final da bancada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

A solução desenvolvida nesse trabalho tem um aspecto amplo e interdisciplinar. Diversos conceitos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Mecatrônica foram colocados em prática tais como Transferência de Calor, o método da placa quente protegida, controle de sistemas lineares, eletrônica de potência e sistemas embarcados.

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica para o embasamento técnico do projeto.

2.2 FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.2.1 Conceitos de Transferência de Calor

Na termodinâmica estuda-se que a energia pode ser transferida entre um sistema e seus entornos através de **trabalho** e **calor**, contudo o seu foco de estudo são os estados finais dos processos e interações, não dando atenção aos detalhes envolvidos nessa troca. Esse enfoque é aprofundado no estudo da **Transferência de Calor** que estende a análise termodinâmica aos *modos* que o calor é transferido entre sistemas e na quantificação desse processo, detalhando que variáveis e relações que afetam a taxa de transferência de energia.

Segundo (INCROPERA, 2011):

"Transferência de calor (ou Calor) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço."

Sempre que houver essa diferença de temperatura em um *meio* irá ocorrer uma transferência de calor. Se esse meio for um material sólido o calor será transferido por **Condução**, caso a troca analisada seja entre uma superfície e um fluido o processo é chamado de **Convecção** e quando o calor é passado entre superfícies sem a necessidade de um meio físico, essa transferência é chamada de **Radiação**, a figura 2 ilustra esses fenômenos.

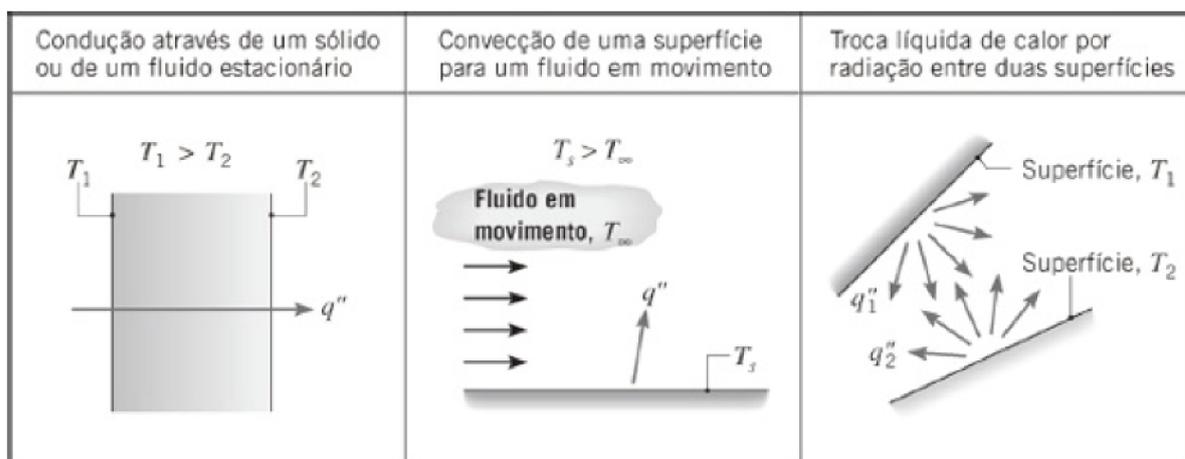


Figura 2 – Modos de Transferência de calor, (INCROPERA, 2011)

2.2.2 Condução

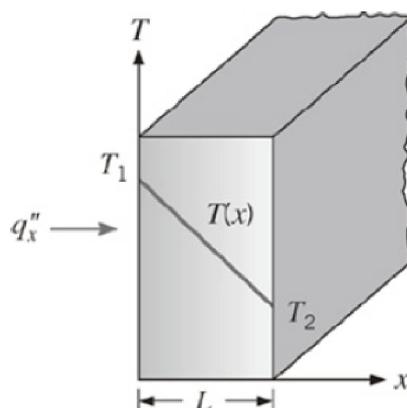


Figura 3 – Condução unidimensional em regime permanente, (INCROPERA, 2011)

Esse tipo de transferência de calor está intrinsecamente ligado as atividades **atômicas e moleculares**, assim a energia se distribui entre as moléculas até que atinja uniformidade no meio. Essa energia está associada a energia cinética das moléculas (translação e rotação) que por sua vez está associada a temperatura do material.

A colisão constante entre essas moléculas faz que a energia seja transferida de moléculas mais energéticas para menos energéticas. Esse processo é também chamado de *difusão* de energia.

A condução de energia é regida pela **Lei de Fourier**, que pode ser aplicada no regime transiente de condução e em multi-dimensões. Analisando para apenas uma dimensão, o modelo de condução é dado pela figura 4.

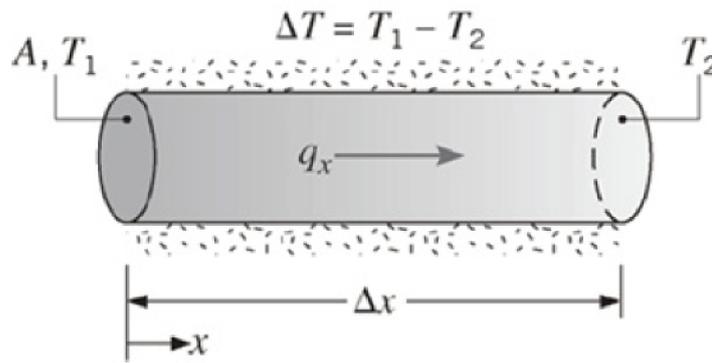


Figura 4 – Representação prática da equação (2.1), (INCROPERA, 2011)

Esse fenômeno pode ser descrito pela equação (2.1), (INCROPERA, 2011):

$$q_x = -k_x A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Nessa equação, o calor é dado por $q_x (W)$ e é negativo pois flui no sentido da menor temperatura e é proporcional a **constante de condutividade térmica** $k_x (W/m \cdot K)$, uma propriedade do material. Materiais metálicos por exemplo, tendem a serem bons condutores, enquanto materiais cerâmicos são maus condutores (bons isolantes).

Essa propriedade indica a taxa de transferência de energia na condução em um material e pode ser definido experimentalmente pela equação (2.2)

$$k_x = -\frac{q_x}{A \frac{dT}{dx}} \quad (2.2)$$

Observa-se que em materiais isotrópicos, ou seja, materiais que possuem as mesmas propriedades em todas as direções, essa característica também se aplica a condutividade térmica, sendo ela a mesma em todas as direções. Porém em materiais anisotrópicos essa propriedade apresenta valores diferentes a depender da direção analisada no material.

A condutividade térmica, por depender intrinsecamente de relações intermoleculares, pode também variar de acordo com a temperatura. Essa variação pode ser vista na figura 5 que mostra a condutividade térmica de vários materiais em função da temperatura.

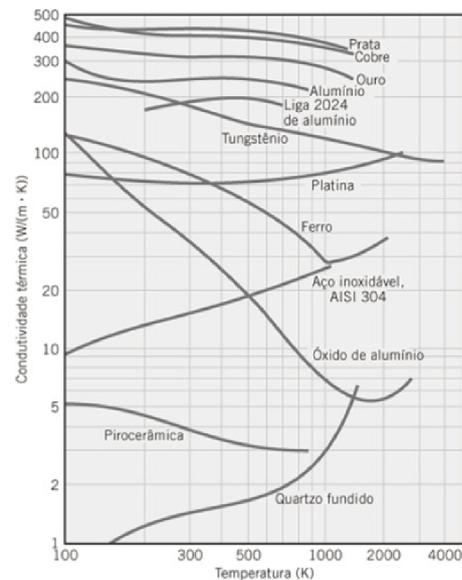


Figura 5 – Relação condutividade térmica com a temperatura em diversos sólidos
, (INCROPERA, 2011)

Atualmente, com o desenvolvimento de novos materiais é crescente a necessidade de caracterizá-los termicamente, dando destaque a polímeros isolantes, usados para limitar o fluxo de calor em diversas áreas da engenharia, como na área aeroespacial e na construção civil.

2.3 PLACA QUENTE PROTEGIDA

Existem diversos métodos para a caracterização da condutividade térmica de materiais, porém, a placa quente protegida se destaca dos outros pela simplicidade de implementação e de modelagem matemática. Esse método também simula as condições de utilização dos materiais que se deseja estudar, permitindo observar sua capacidade de difundir calor. Ele é adequado para analisar amostras planas homogêneas e isotrópicas, ou seja, que possuem as mesmas propriedades em todas as direções, mesmo que considerando somente a condutividade térmica.

A placa quente protegida (compensada) se inspira na Lei de Fourier para obter a condutividade térmica, o experimento é construído com o intuito de simular as mesmas condições ideais do modelo mostrado nas figuras 4 e 3. Logo a amostra analisada é colocada entre um gradiente de temperatura fixo e controlado, de forma que seja conhecido essas temperaturas e o fluxo de calor unidirecional, q_x , que é difundido pela mesma.

Nesse experimento, o material a ser analisado está na forma de placa e é colocado entre duas outras placas, uma *quente* e outra *fria*. Dessa forma, é possível direcionar o fluxo de calor pelo material e nas condições de regime permanente, pelo gradiente de temperatura, conhecendo a taxa de transferência de calor, é possível calcular a condutividade térmica

pela relação (2.2).

2.3.1 Placa Quente

A placa quente é a responsável por fornecer energia térmica ao sistema com o auxílio de resistências elétricas. É desejado que ela possua uma alta condutividade térmica com relação ao material analisado para assegurar que ela esteja isotérmica. Por isso ela é comumente feita de alumínio ou cobre, que são materiais que apresentam elevada condutividade térmica.

Para garantir que essa placa seja capaz de gerar um fluxo térmico *unidirecional* e *homogêneo* na amostra ela é dotada de duas regiões: uma central, o **núcleo** com uma única resistência, e o **anel de guarda**, que fica em torno do núcleo e possui resistências auxiliares.

O anel de guarda tem a função de manter a temperatura dos entornos da placa igual a do núcleo, e dessa forma garantir que a energia gerada pela resistência central não se difunda para regiões em volta da placa assegurando o fluxo unidirecional de calor, necessário para a execução do experimento. A figura 6, mostra esses detalhes.



Figura 6 – Resistências da placa quente (RIBEIRO; GUIMARÃES; BORGES, 2003)

Dessa forma, controlando a tensão aplicada as resistências do núcleo e do anel de guarda é possível controlar a temperatura na área da placa. Essa temperatura é observada por termopares posicionados na placa quente e suas medições auxiliam a ajustar os níveis de tensão às resistências para se obter homogeneidade térmica mantendo a temperatura desejada para o experimento.

2.3.2 Placa Fria

A placa fria é responsável pela refrigeração do sistema, ou seja, retirar o calor gerado pela placa quente. Ela deve possuir as mesmas características da placa quente em termos de dimensões, planicidade, paralelismo e condutividade térmica.

Ela deve ser refrigerada constantemente por líquido a uma temperatura constante. Essa temperatura pode ser controlada e monitorada com o auxílio de um *banho termostático*, dessa forma é possível manter uma temperatura constante na placa fria ao longo do tempo. Para que o fluido possa refrigerar a placa fria ela possui canais internos usinados em forma de espiras (caracol) que permitem a circulação de água conforme mostrado na figura 7

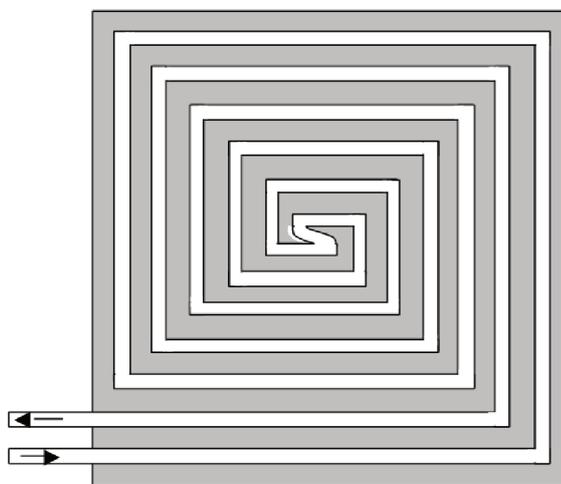


Figura 7 – Esquema de fabricação das placas frias (RIBEIRO; GUIMARÃES; BORGES, 2003)

2.3.3 Montagem da bancada

O modelo de montagem utilizado é dito simétrico, as amostras são colocadas em pares com um bom contato térmico entre as placas metálicas. Esse modelo é mostrado na figura 8, no qual é possível notar as duas regiões da placa quente, o núcleo e o anel de guarda além do arranjo de todas as placas.

Vale ressaltar que no entorno de toda a montagem, apresentada na figura 8 é feito um isolamento, para minimizar o fluxo de calor para fora do sistema. O isolamento contribui para melhorar a performance, a homogeneidade e unidirecionalidade da difusão do calor, no sentido da placa quente para a placa fria.

A temperatura é medida por meio de termopares em diversos pontos do experimento, sendo essencial monitorar as temperaturas da placa quente e das placas frias além da potência consumida pela resistência central, assim pela equação (2.1) calcula-se a condutividade térmica do material.

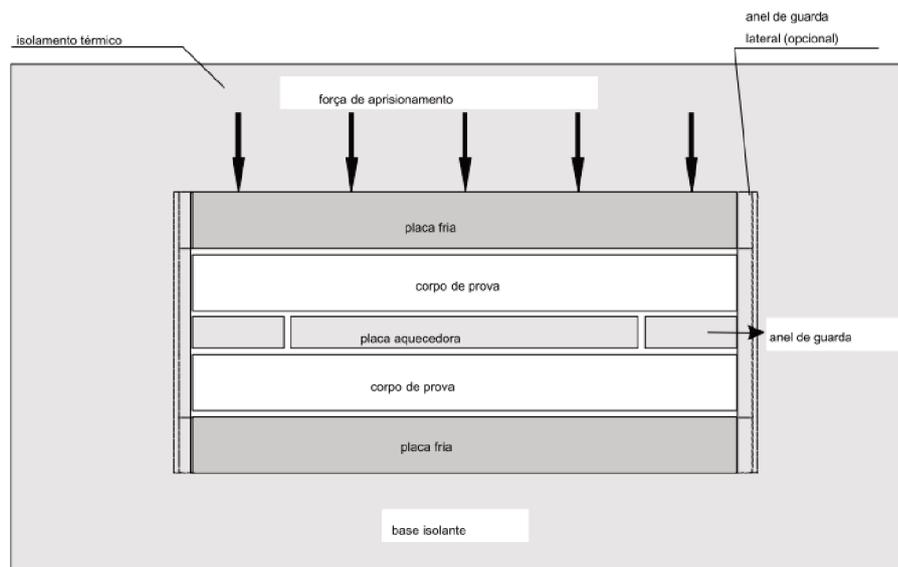


Figura 8 – Montagem da placa quente protegida (RIBEIRO; GUIMARÃES; BORGES, 2003)

Porém, como revés de sua simplicidade construtiva, nesse método há restrições como o tempo para se atingir o *regime permanente* do sistema, variações no paralelismo e planicidade das placas o que impossibilita um contato perfeito e prejudica o fluxo de calor unidirecional. Esses problemas podem ser atenuados com melhores técnicas construtivas precisas.

2.3.4 Aplicações da Placa quente protegida

Na conclusão de RIBEIRO et al,(2003), com o método da placa quente protegida foi possível obter o valor da condutividade térmica para o PVC com um desvio menor de 4,00% com relação ao valor da literatura, observando que esse desvio pode ter sido causado tanto por erros da bancada quanto por diferenças entre o material utilizado no experimento e aquele com o valor padronizado.

MOURA,(1993) também fez um estudo com o mesmo método, as incertezas de medição são oriundas principalmente das não idealidades do modelo adotado na equação de Fourier, como a condição de fluxo de calor unidimensional e regime permanente. Mais que isso, os desvios das condições de fluxo são difíceis de serem estimados devido a influência do ambiente externo, desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda, e para minimizar esses erros o autor recomenda utilizar amostras menos espessas. Ele aponta ainda que a existência de bolsões de ar entre as placas, má fixação dos componentes metálicos e má isolamento elétrica são fatores que podem afetar negativamente o experimento, mas podem ser controlados de acordo com a qualidade da construção do experimento.

Similarmente, a incerteza da medição utilizando esse método foi estimada em 5%

para uma faixa de condutividade entre 0.18 e 0.44 $W/m \cdot K$ e temperatura média de 20 e 40°C.

No trabalho de SALMON,(2001) método foi escolhido para se obter a condutividade térmica, porém dá-se destaque ao diferencial na montagem que utiliza a compressão das placas. O autor descreve como resultado que para diversos materiais ensaiados os erros variaram de $\pm 0.35\%$ a $\pm 1.4\%$

2.4 CONTROLE DE SISTEMAS TÉRMICOS COM ATRASO

Na aplicação da placa quente protegida, as resistências são controladas eletronicamente para garantir que a temperatura da placa seja homogênea em sua área. Nessa implementação, é preciso que exista uma função de controle em malha fechada no microcontrolador que a partir da leitura dos sensores de temperatura, seja capaz de determinar o sinal de saída para alimentar as resistências.

A natureza do comportamento de um sistema térmico como a desse trabalho é descrita por um modelo chamado de *Sistemas de Primeira Ordem com Atraso de Transporte* ou **FOPTD (First Order Plus Dead Time)**.

2.4.1 Sistemas de Primeira Ordem

Sistemas de primeira ordem são por definição sistemas cuja relação entre entrada e saída é uma equação diferencial de primeira ordem. Esse tipo de sistema é normalmente associado com sistemas que possuem algum elemento único de armazenamento de energia, como capacitores em sistemas elétricos, e corpos massivos em sistemas térmicos. A equação diferencial que descreve esses sistemas é mostrada na equação 2.3

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ku(t) \quad (2.3)$$

Onde $y(t)$: saída do sistema no instante t , $u(t)$: entrada do sistema no instante t , τ : constante de tempo, K : ganho estático. Sendo que τ e K , são constantes da natureza do sistema e são identificados na modelagem da resposta do sistema. A resposta ao degrau desse tipo de sistema é mostrada na figura 9.

2.4.2 Sistemas de primeira ordem com atraso de transporte

Esse tipo de sistema possui um comportamento similar a de outros sistemas de primeira ordem, porém com o efeito adicional de um atraso na resposta, já que o sistema físico não responde imediatamente a entrada. É importante considerar esse atraso na saída

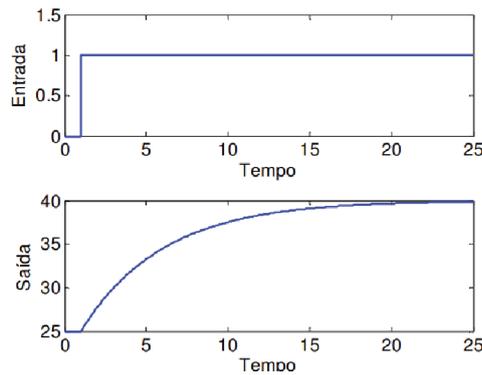


Figura 9 – Resposta de um sistema de primeira ordem a um degrau unitário. Fonte: Próprio autor (2020).

com relação a entrada, pois esse efeito pode causar instabilidades no controlador final. A equação de diferenças desse modelo é dada por:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ku(t - \theta) \quad (2.4)$$

Na equação 2.4 o novo elemento θ , representa o atraso no transporte entre uma entrada e sua resposta. A função de transferência para essa equação de diferenças é representada pela equação 2.5.

$$G(s) = K \frac{e^{-\theta s}}{1 + \tau s} \quad (2.5)$$

A resposta desses modelos ao degrau unitário é representada pela figura 10.

Os parâmetros que definem o comportamento da planta, podem ser obtidos graficamente a partir da resposta do sistema ao impulso. Assim, τ é o tempo necessário para a planta sair de seu estado inicial até 63.21% do seu valor máximo em regime permanente, K é valor da saída em regime permanente para um impulso unitário, ou seja $K = \frac{Saída}{Entrada}$ e θ (mostrado na figura 10 como L) é o tempo entre o início do impulso e a inicia da resposta do sistema.

2.4.3 Projeto do Controlador

No trabalho de CRISTINA et al,(2014), foi feito um estudo comparativo entre diversos modelos de controle para sistemas de primeira ordem com atraso. Com base nos resultados desses estudo e na orientação de um professor da área, optou-se por utilizar um método de controle chamado de **Método SIMC (Skogestad IMC)**.

Esse método consiste em uma otimização do método IMC (Internal Model Control). Nele é determinado que o tempo integrativo T_i deve ser reduzido para melhorar a rejeição de ruídos pelo sistema e que o valor de λ deve ser ajustado em função de θ .

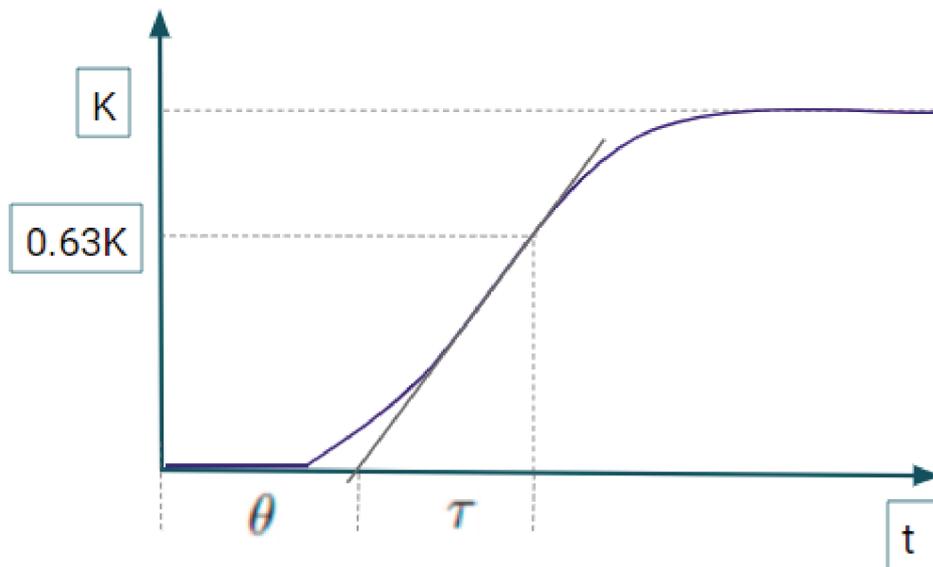


Figura 10 – Resposta ao impulso unitário de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte. Fonte: Próprio autor (2020).

Nesse método o controlador segue o modelo descrito pela equação 2.6

$$G_c(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.6)$$

Sendo que k_p é definido na equação 2.7

$$k_p = \frac{2\tau + \theta}{3\theta k} \quad (2.7)$$

O T_i é calculado com a equação 2.8

$$T_i = \min\left(\tau + \frac{\theta}{2}, 8\theta\right) \quad (2.8)$$

2.5 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

No que diz respeito a eletrônica de potência, foi usado como material de base a referência AHMED,(2000).

No trabalho em questão é preciso que um microcontrolador controle a potência que chega a resistências térmicas, contudo o microcontrolador sozinho não possui recursos para atender os requisitos de potência da resistência.

Para suprir as resistências é necessário utilizar uma fonte que atinja um nível de tensão de até 80V e uma corrente de até 3A, para isso é usada uma fonte de bancada disponível no laboratório.

Em situações como essa é comum usar um microcontrolador para acionar transistores usando **PWM** (*Pulse Width Modulation ou Modulação por largura de Pulso*) para realizar o chaveamento dos transistores e controlar a tensão de saída. Porém, microcontroladores comuns operam em um nível de tensão de 3.3V ou 5V o que é insuficiente mesmo para operar transistores para controlar uma fonte com os níveis de tensão desejado

Dessa forma, para fazer a interface entre o microcontrolador e as resistências existem dois problemas que devem ser resolvidos:

- Acionamento do transistor (MOSFET) como chave
- Amplificação do sinal de PWM do arduino

Por isso, foi construído um circuito baseado em eletrônica de potência para fazer a interface entre o microcontrolador e as resistências. Sua participação no processo de controle é mostrado na figura 11, nele é possível ver como as diferentes funcionalidades estão interligadas no funcionamento do circuito.

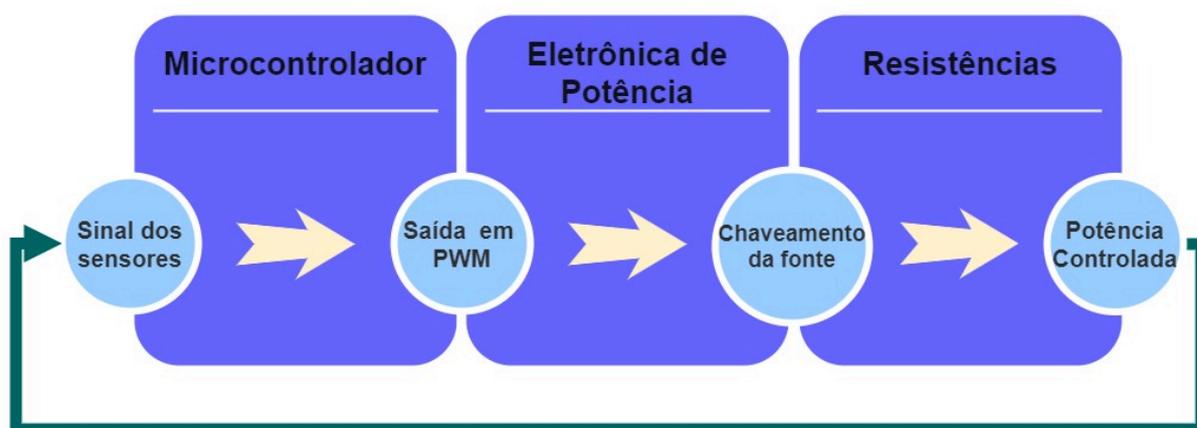


Figura 11 – Modelo de funcionamento da placa de controle. Fonte: Próprio autor (2020)

2.5.1 MOSFET-chave semicondutora

MOSFET é a abreviação de Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor ou Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor. Esse componente eletrônico é uma chave semicondutora que pode ser usada para controlar a potência de circuitos, por meio de chaveamentos em diversas topologias.

Os MOSFETs podem ser classificados quanto sua estrutura interna em 2 tipos: *N-channel MOSFET* e *P-channel MOSFET*. A diferença entre os dois tipos está na polaridade da tensão de acionamento entre suas portas, essa diferença pode ser útil a depender do circuito. Nesse trabalho são usados *N-channel MOSFETs*.

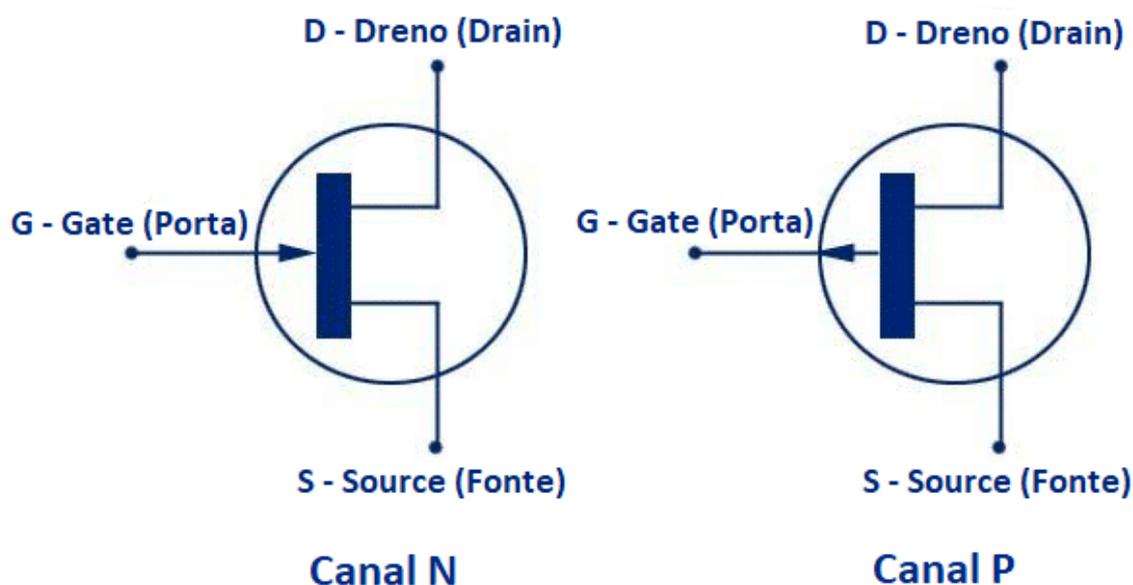


Figura 12 – Simbologia do MOSFET (BRAGA, 2020)

A simbologia desses tipos de *MOSFETs* é mostrada na figura 12

Os *MOSFETs* possuem 3 pinos, sendo eles *Drain (D)*, *Gate (G)* e *Source (S)*. No caso dos transistores utilizados, quando há um sinal de tensão positivo V_{GS} entre os pinos G e S, o transistor é ativado e permite a condução de corrente entre os pinos D e S. O funcionamento dessa ativação depende do nível de tensão aplicado V_{GS} .

Existem basicamente 3 regiões de funcionamento para esse componente. A Região ativa ou ôhmica, na qual a tensão V_{GS} é suficiente para que o componente se comporte o mais próximo possível de uma chave ideal, atingindo sua resistência interna mínima. Região de Saturação: região em que o transistor está "meio aberto", e é possível controlar a corrente que passa pelo mesmo. Região de Corte (Cut-off): nessa região a tensão V_{GS} não é suficiente para permitir a condução entre os pinos D e S. Essas regiões são mostradas na figura 13 para níveis de tensão V_{GS} e seu comportamento em função da corrente I_{DS} e da tensão V_{DS} .

Fazendo uma analogia com sistemas hidráulicos, o *MOSFET* funciona como uma válvula de controle de vazão como mostrada na figura 14. Porém, para evitar perdas de energia elétrica no transistor e possível sobreaquecimento do componente ele opera somente entre as regiões ativa e Cut-off. Ou seja, somente como ON ou OFF. Para mantê-lo em funcionamento OFF, basta que a V_{GS} seja nula, enquanto para que seja ON essa tensão precisa atingir um valor mínimo a depender do *MOSFET* utilizado.

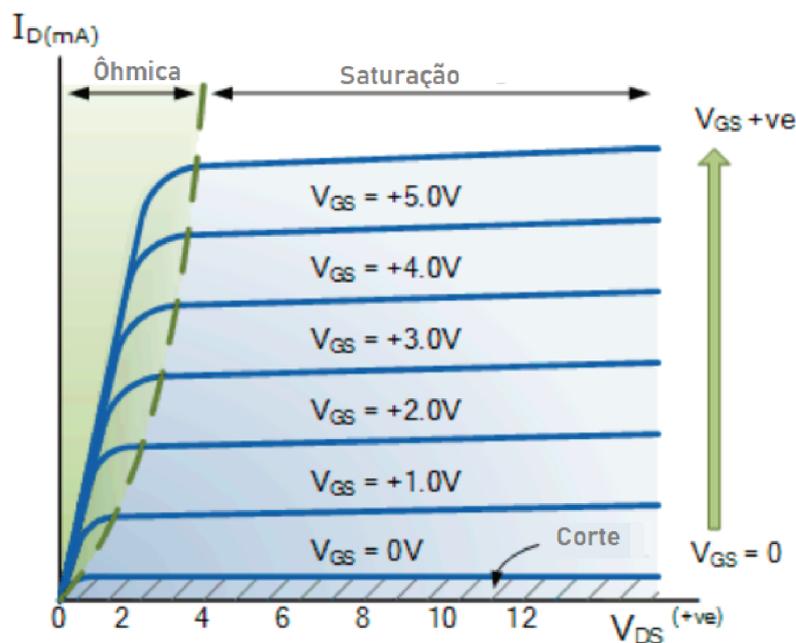


Figura 13 – Curva Característica do MOSFET (TUTORIALS, 2020)

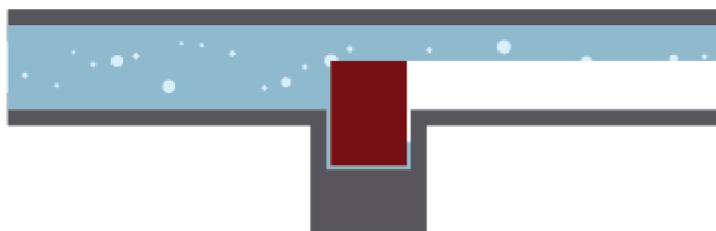


Figura 14 – Analogia de funcionamento do transistor como válvula hidráulica (ALLINO-NEELECTRONIC, 2020)

2.5.2 MOSFET-Circuito de ativação como chave

O par *Gate (G)*, *Source (S)* do *MOSFET* se comporta como um capacitor, por isso quando se pensa em seu circuito de controle é preciso não só garantir que o *MOSFET* receba um sinal de tensão suficiente para colocá-lo na região ôhmica, por tempo suficiente para construir carga entre esses pinos, mas também para garantir que ele vá para região de corte é preciso dar um caminho de saída para essa carga armazenada.

Ou seja, para que esse transistor se comporte conforme o esperado é preciso que seu *Source (S)* esteja aterrado e seu *Gate (G)* seja conectado a um circuito chamado *push-pull*, capaz de controlar o *MOSFET* adequadamente. A representação dessa parte do circuito é mostrada na figura 15

Ou seja, para controlar esse circuito é preciso utilizar um sinal de PWM amplificado, que pode ser conseguido usando um microcontrolador e um circuito de amplificação.

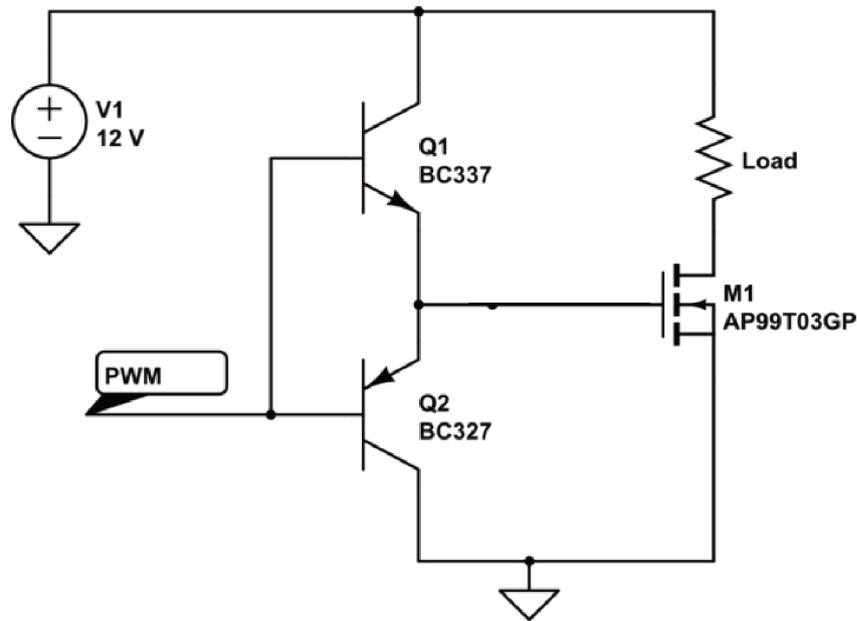


Figura 15 – Circuito push-pull para acionamento de MOSFET (SWITCHCASE, 2020)

2.5.3 PWM (Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso)

PWM é uma técnica que permite modular um sinal elétrico (uma onda quadrada) em função de sua *razão cíclica* ou *duty cycle*, para fins de controle de potência ou transporte de informações. O nível inferior de tensão da onda quadrada é $0V$ e o nível máximo da onda é o mesmo da fonte de alimentação.

Dessa forma, a onda quadrada é periódica e composta por momentos em que ela está ligada (ON) e outros em que está desligada (OFF), esses períodos (usualmente medidos em micro segundos) são chamados de T_{on} e T_{off} , sendo que $T_{total} = T_{on} + T_{off}$. O *duty cycle* (d) é dado pela equação 2.9, que mostra que d é uma medida em % da parcela ativa da onda quadrada. A relação entre a onda quadrada e a razão cíclica é mostrada na figura 16.

$$d = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (2.9)$$

Essas ondas quadradas podem ser usadas para acionar chaves semicondutoras e assim controlar cargas de maior potência, como é necessário nessa aplicação.

2.5.4 Circuito de amplificação de sinal PWM

O sinal gerado pelo microcontrolador possui pico de $5V$, porém, para garantir que o *MOSFET* opere na região ôhmica é preciso que o sinal tenha de $10V$ a $15V$.

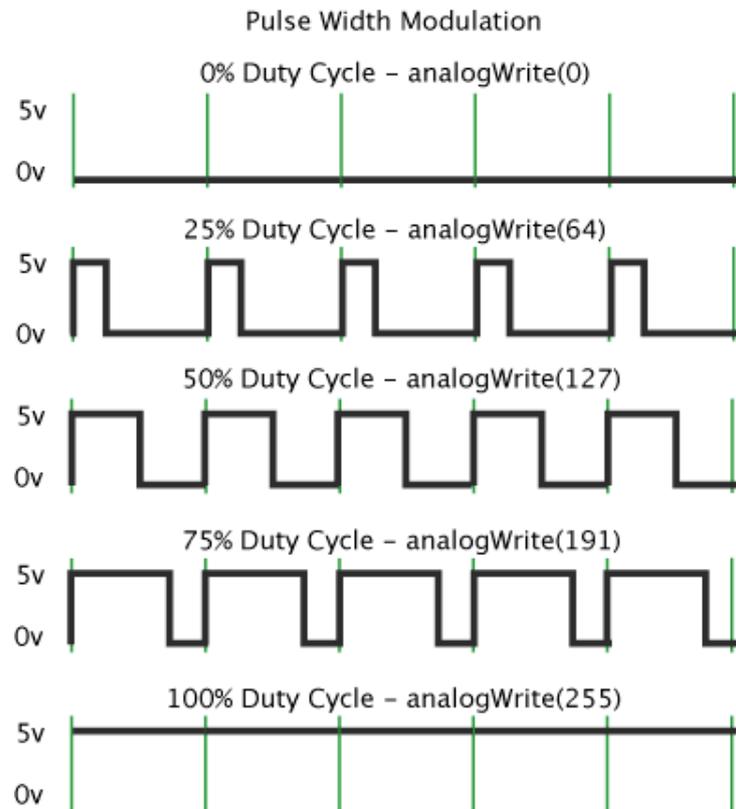


Figura 16 – Exemplo de PWM (CIRCUITS4YOU, 2020)

Para fazer isso foi usado um opto acoplador que faz com que o sinal PWM do microcontrolador chaveie um transistor ligado a uma fonte de maior tensão. Isso, além de amplificar o sinal, isola galvanicamente o circuito digital do analógico, reduzindo a interferência de ruídos.

Porém, esse circuito possui duas desvantagens: os ruídos associados com a parte analógica do circuito e a inversão do sinal de entrada, ou seja, a inversão da razão cíclica utilizada. Para combater esses efeitos é usado uma porta lógica inversora 4049n, que reduz o ruído e faz com que a saída não seja invertida com relação a entrada. Esse sinal de PWM amplificado pode ser ligado direto no circuito *push-pull*, permitindo que o microcontrolador acione o *MOSFET* para realizar o controle de potência da resistência. Na figura 17 é possível ver o circuito completo, responsável pela amplificação do sinal de entrada e ativação dos transistores. São usados 2 inversores, pois na tecnologia CMOS deixar portas do circuito integrado sem conexão pode danificar a porta.

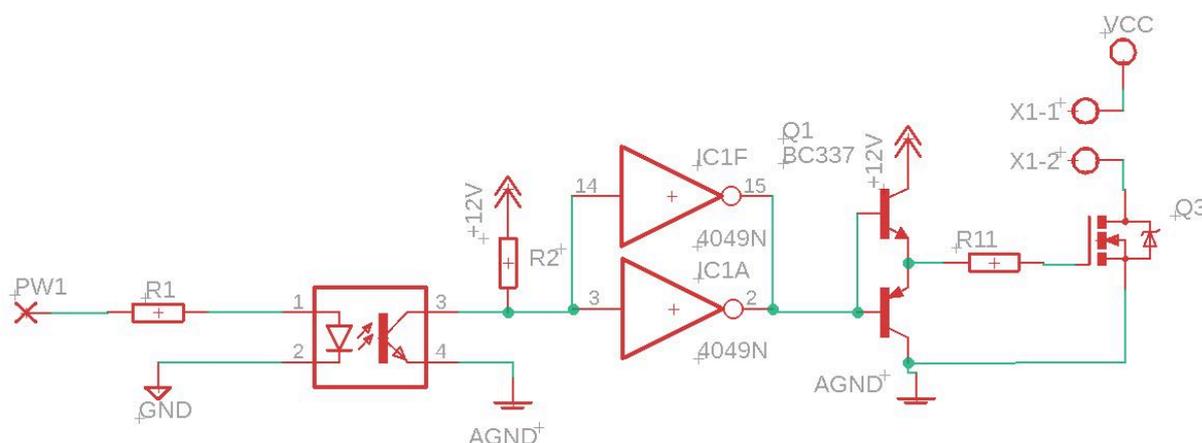


Figura 17 – Circuito que amplifica o sinal de saída no microcontrolador e chaveia os transistores de potência Fonte: Próprio autor (2020)

2.6 MICROCONTROLADOR

Um computador possui aplicações gerais e pode se adaptar a diversas funcionalidades e necessidades do usuário, ou seja, o computador é um sistema de propósitos diversos. Já o sistema embarcado é um sistema no qual um microprocessador realiza tarefas dedicadas e específicas a sua aplicação e funcionalidade, de forma que o produto final é específico para uma determinada aplicação e possui tamanho e custo reduzido.

O microcontrolador dessa aplicação deve ser capaz de ler diversos sensores termopares, gerar sinais de PWM e se comunica por meio de comunicação serial.

Atendendo a esses pré-requisitos escolheu-se o microcontrolador **Arduino MEGA 2560**, devido ao seu grande número de portas, que são necessárias para se comunicar com diversos sensores e controlar diversas resistências, além de sua comunicação serial e grande número de bibliotecas que aceleram o desenvolvimento do *firmware*. As funcionalidades da placa estão resumidas na figura 18.

A placa controla a potência das resistências térmicas por meio de saídas PWM, juntamente com o circuito de eletrônica de potência. Na parte de sensoramento é necessário medir a temperatura com termopares em 7 pontos diferentes e a corrente da resistência central, para o cálculo da potência.

Para medir a temperatura dos termopares é preciso um transdutor que converta o sinal elétrico dos termopares em um sinal adequado ao Arduino. Nesse projeto, optou-se pelo módulo **MAX6675** que possui dois terminais para a conexão de um termopar tipo K, além dos pinos de alimentação (5V e 0V) e dos pinos de comunicação pelo padrão SPI (SO, CS, SCK), ou seja, *Slave Output*, *Chip Select* e *Serial Clock*. Essa descrição é mostrada na figura 19.

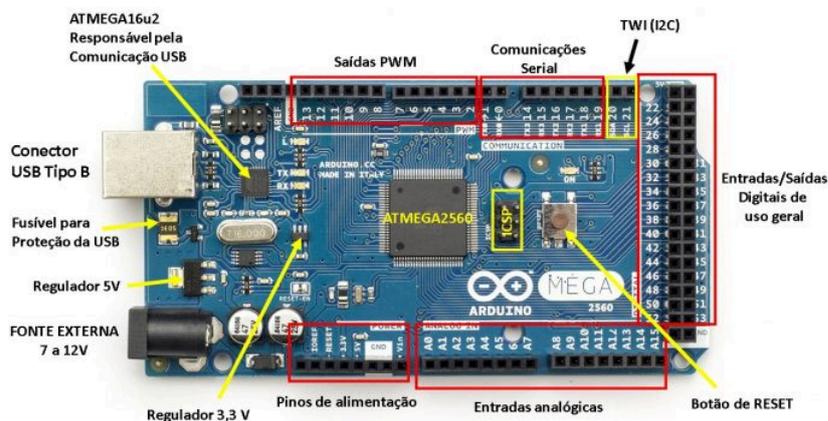


Figura 18 – Funcionalidades do Arduino MEGA 2560 (4HOBBY, 2020)

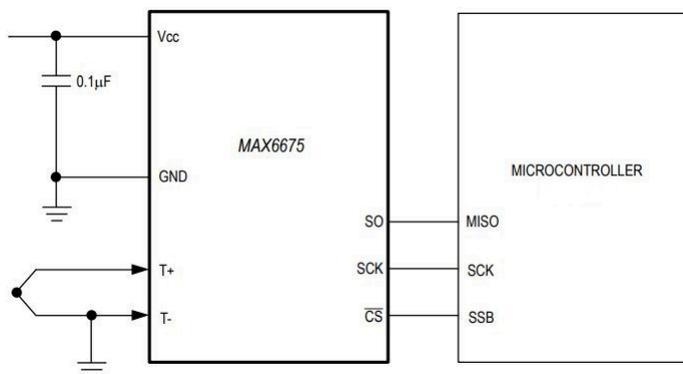


Figura 19 – Circuito de aplicação do chip MAX6675 (DATASHEETSMAXIMINTEGRATED, 2020)

Já para ler a corrente foi escolhido o sensor **ACS712 5A**, pois ele possui a maior resolução de medição na faixa de corrente do problema. Suas ligações de comunicação com o Arduino e com a medição de corrente são mostradas na figura 20.

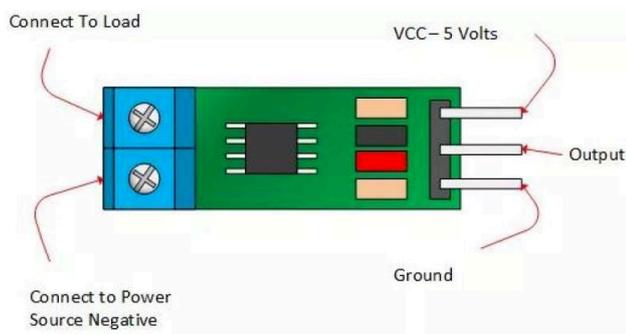


Figura 20 – Pinout do sensor ACS712 (DATASHEETSMAXIMINTEGRATED, 2020)

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será detalhado as ferramentas e abordagens utilizadas na implementação do projeto. As descrições envolvem decisões construtivas, opções de projeto e a implementação de Software.

3.2 PLACA DE CIRCUITOS

Dos requisitos do projeto é exigido que diversos componentes funcionem de forma integrada. Como mostra a figura 21, há diversos sistemas que precisam ser interligados eletricamente.

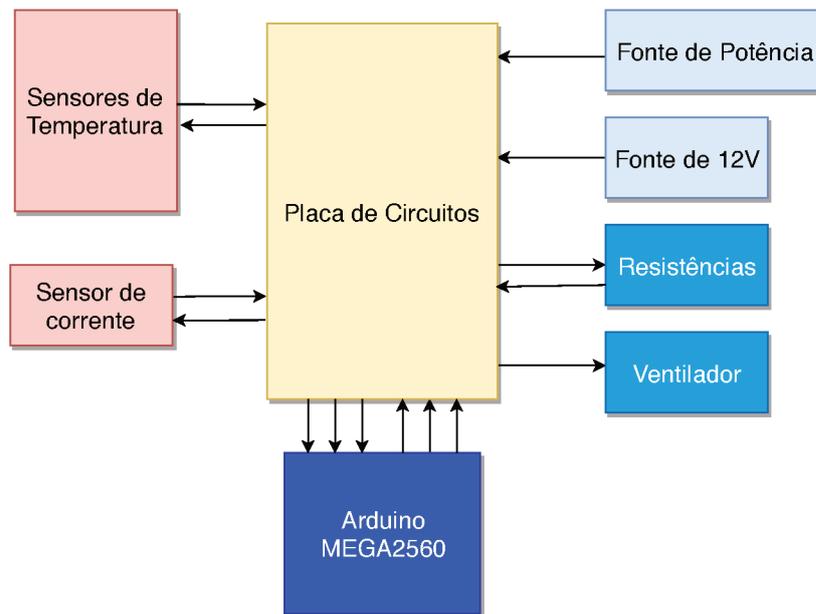


Figura 21 – Recursos interligados pela placa de circuitos Fonte: Autor Próprio (2020)

São necessárias 153 conexões para ligar todos os componentes. Essas conexões podem ser feitas em placas laminadas de cobre e algum compósito (fibra de vidro, Fenolite), a camada de compósito possui função estrutural e de isolamento elétrico. Já a face de cobre é usada para criar as trilhas responsáveis pela conexão dos componentes. Essas trilhas são feitas por meio de remoção de parte da camada de cobre, comumente por corrosão química ou usinagem.

Para realizar as conexões do projeto foi usada uma placa com duas camadas de cobre (superior e inferior), assim não é necessário utilizar fios para completar as ligações. As trilhas foram impressas em papel fotográfico e passadas para a placa usando calor,

então por meio de corrosão com perclorato de ferro foi removido todo o cobre da placa que não compunha as trilhas.

Essa decisão ajuda a compactar o volume e a robustez do resultado final, porém é importante ressaltar que nem todos os componentes utilizados foram feitos para serem soldados na placa pelos dois lados, portanto observa-se que na montagem foi necessário fazer ajustes para implementar as ligações elétricas.

Nas figuras 22, 23 e 24, é possível ver todas as ligações implementadas em suas respectivas camadas e o projeto completo

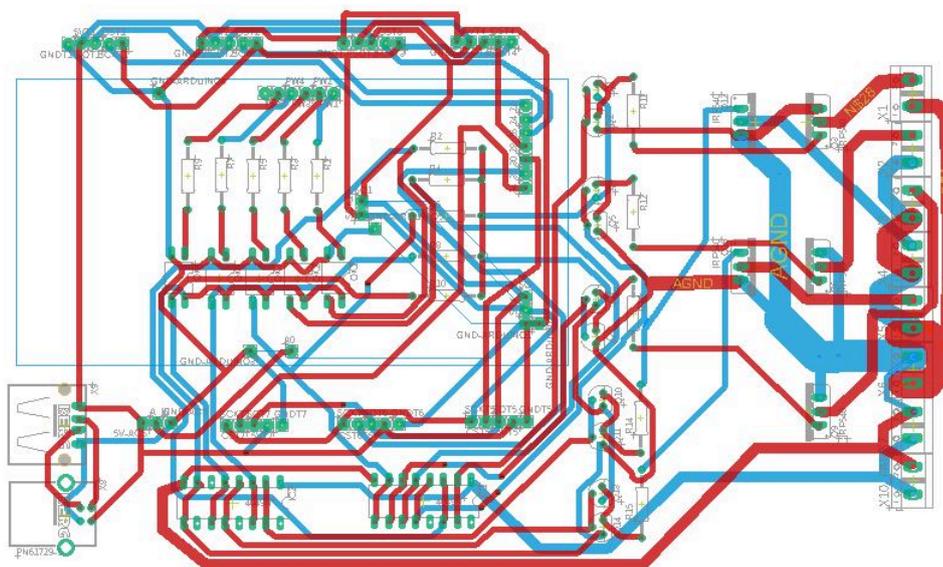


Figura 22 – Projeto da Placa de circuitos completo Fonte: Autor Próprio (2020)

Além disso, observa-se que em alguns pontos na placa foi necessária a utilização de vias, ou seja, a passagem de uma conexão entre diferentes camadas.

Os pontos mais críticos de dimensionamento são o espaçamento entre as trilhas e sua espessura. Na configuração do software utilizado (**EAGLE 9.5.2**) é possível definir qual deve ser o mínimo espaçamento e a espessura mínima. Assim foram definidos os valores padrões de roteamento para a trilhas da placa.

A parte das trilhas para as aplicações de potência precisam ter uma maior espessura para suportar a corrente desejada. Estimar a espessura mínima dessas trilhas pode ter um resultado impreciso quando se trata da técnica de corrosão de placa, na qual é difícil estimar qual será a qualidade do cobre resultante após a corrosão, no que diz respeito a tolerância dimensional.

Logo, dado o foco da aplicação, as trilhas de potência foram superdimensionadas para suportar correntes maiores do que as esperadas com base na relação entre a espessura das trilhas e a corrente que elas suportam. Essa relação é estabelecida pela equação 3.1 da normativa IPC-2221 na seção 6.2. Para facilitar o uso da equação foi usada a ferramenta

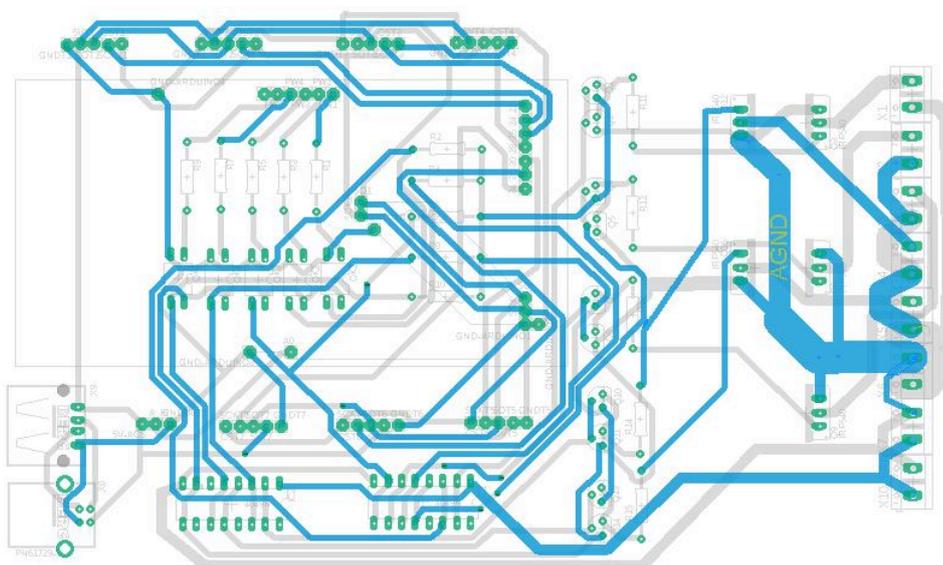


Figura 23 – Ligações da camada inferior da placa de circuitos Fonte: Autor Próprio (2020)

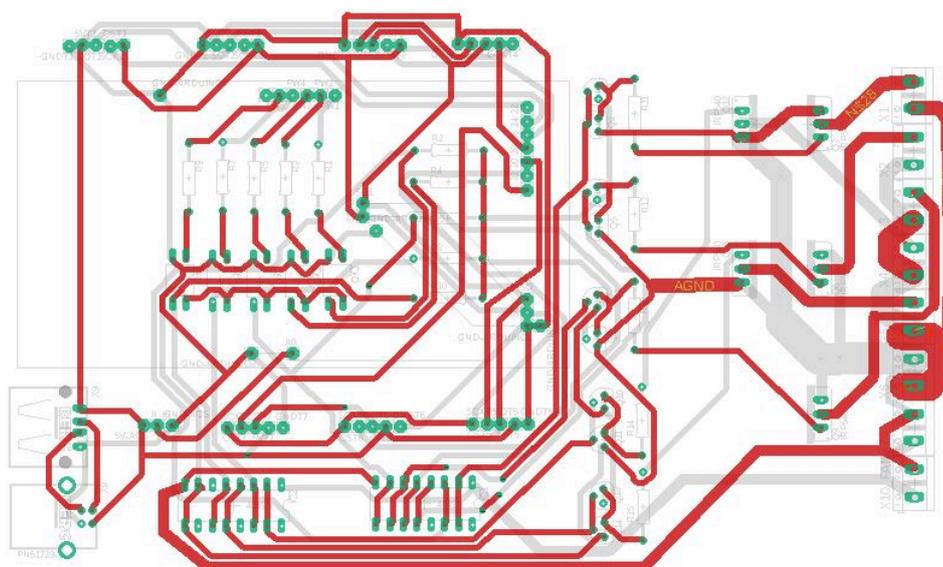


Figura 24 – Ligações da camada superior da placa de circuitos Fonte: Autor Próprio (2020)

de cálculo online, *Trace Width Calculator*. A espessura das trilhas foi aumentada de acordo com o espaço na placa e o valor mínimo definido para uma dada corrente e condições ambientes.

$$I = k\Delta T^{0.44}A^{0.725} \quad (3.1)$$

O resultado final pode ser visto nas figuras 25, 26 e 27.

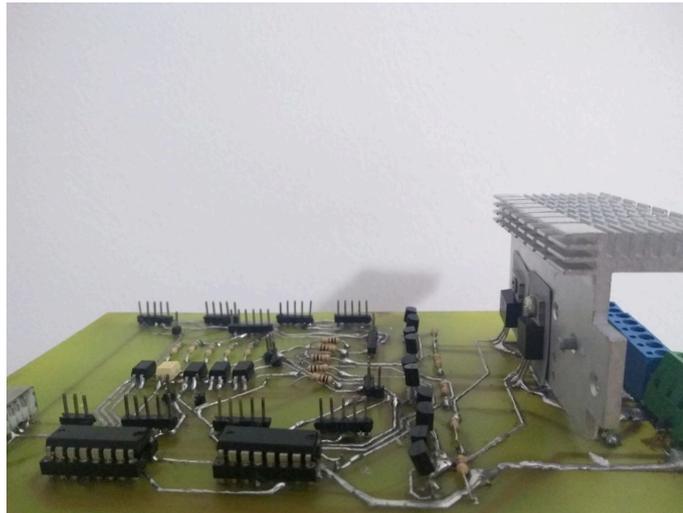


Figura 25 – Visão de perfil da placa de circuitos montada Fonte: Autor Próprio (2020)

Na figura 25 é possível notar que além dos próprios componentes da placa é utilizado um dissipador térmico para dar mais robustez aos transistores de potência garantindo que eles não se sobreaqueçam.

Na especificações técnicas dos transistores existem dados que dizem respeito à resistências térmicas entre a junção semicondutora do transistor e o ar além da sua resistência mínima quando ativo na região ôhmica, assim, com base na corrente que passa pelo transistor, na temperatura do ar e na teoria de circuitos térmicos é possível estimar o quanto este se aquece durante o uso. Como o transistor escolhido possui uma baixa impedância na região ôhmica e a corrente utilizada no projeto é relativamente baixa (2A) com relação ao seu espectro de aplicação, foi calculado que o componente não atingiria temperaturas críticas (também definidas no datasheet). Mesmo assim, optou-se pela utilização de um dissipador térmico e um pequeno ventilador, para dar mais robustez ao projeto reduzindo as possibilidades de falha.

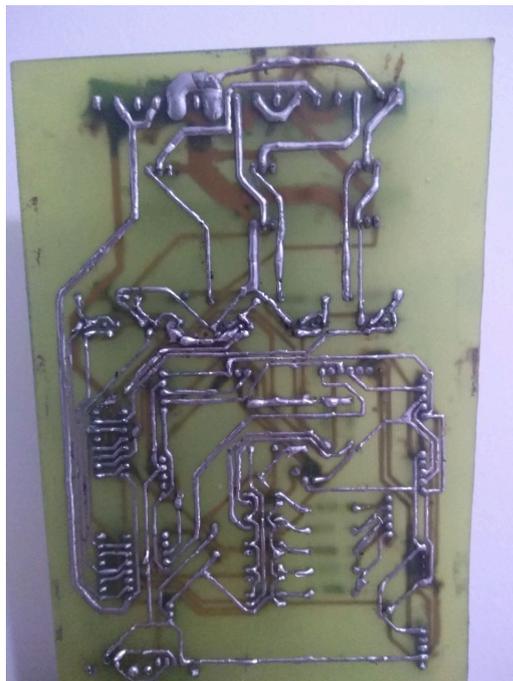


Figura 26 – Vista inferior da placa de circuitos montada Fonte: Autor Próprio (2020)

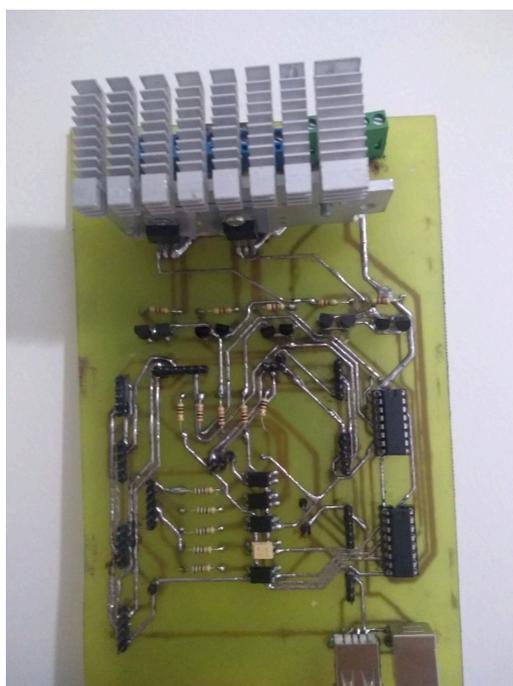


Figura 27 – Vista superior da placa de circuitos montada Fonte: Autor Próprio (2020)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

Como descrito na fundamentação teórica no item 2.4, o sistema térmico em questão é um sistema de 1° Ordem com atraso de transporte. A dinâmica desse sistema é definida por 3 constantes: O τ , tempo necessário para a planta sair do seu estado inicial até 63,21% de seu valor máximo em regime permanente, K , o valor da saída em regime permanente para um impulso unitário e θ o que tempo entre o início do impulso e o início da resposta.

Esses parâmetros que determinam como o sistema irá aquecer e dependem da montagem do experimento, ou seja, da resistência do material da placa quente, qualidade do isolamento, temperatura externa. Idealmente o controlador projetado deve ser robusto a essas perturbações e ainda assim conseguir manter a temperatura dentro do valor determinado.

Para projetar o controlador com base na seção 2.4.3 é preciso determinar esses parâmetros. Para isso, foram realizados testes com as resistências posicionadas na bancada expostas ao ar, utilizando duas resistências disponíveis para testes no laboratório.

Nesse teste as resistências foram conectadas ao controlador que era alimentado com uma tensão de 32[V] e foram estimuladas com uma entrada em degrau na tensão máxima por 90[*min*].

A partir desse ensaio, foram medidas duas curvas mostradas na figura 28. Com essas curvas foi possível estimar os parâmetros K , τ , θ como mostrado na tabela 1

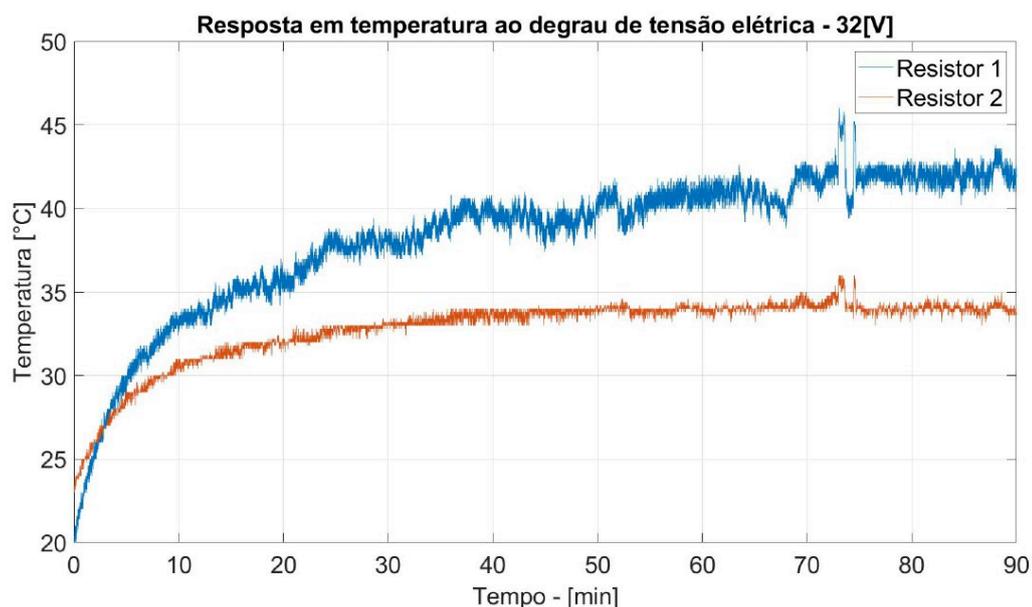


Figura 28 – resposta ao degrau das resistências térmicas Fonte: Autor Próprio (2020)

Tabela 1 – Parametros de Controles para os dois

| Parâmetros | Resistor 1 | Resistor 2 |
|--------------------|------------|------------|
| $K[{}^{\circ}C/V]$ | 0,68 | 0,33 |
| $\tau[min]$ | 13,6 | 8,5 |
| $\theta[min]$ | 0,2 | 0,2 |

O projeto do controlador foi feito avaliando os casos mais críticos, ou seja, que podem levar a instabilidade do sistema.

No contexto desse problema o K mostra a variação de temperatura para cada volt aplicado às resistências. Segundo RIBEIRO et al,(2003), em um dos experimentos a resistência utilizada atingiu temperatura de $65^{\circ}C$ quando submetida a uma tensão de $80V$, assumindo uma temperatura ambiente de $20^{\circ}C$, pode-se calcular que para essa situação $K = \frac{65-20}{80} = 0,56\frac{{}^{\circ}C}{V}$, ou seja os valores encontrados são coerentes com os vistos em pesquisas anteriores.

Dessas forma, é coerente verificar a resposta do controlador para o valor de $K = 0,7$, pois a instabilidade está associada a maiores valores de ganho.

Já o τ mostra o tempo em minutos necessário para o sistema atingir 63% do seu valor máximo em uma resposta para a entrada em degrau. Nos testes realizados verificou-se um tempo de 8,5 a 13,6 minutos.

Como nesses testes foi utilizado somente as resistências, sem o restante da estrutura da bancada que adicionaria mais inércia térmica ao sistema, pode-se garantir que no uso em bancada o sistema terá uma resposta mais lenta. Ou seja, dimensionar o controlador para os sistemas ensaiados reduz as chances do controlador levar o sistema a instabilidade.

Como um controlador projetado para sistemas com resposta mais lentas pode se tornar inadequado ou mesmo instável para sistemas com respostas mais rápidas, o projeto do controlador será avaliado para o valor de $\tau = 8$, que é relativamente menor ao tau das resistências mais o restante da bancada.

No entanto, quando se avalia o valor de θ , a lógica é a contrária. Um atraso de transporte maior aumenta os riscos do sistema se tornar instável. E é esperado que os ensaios realizados possuam um atraso de transporte menor que o do sistema com a bancada de ensaios, devido a falta de outros componentes que adicionam inércia térmica.

Assim, para considerar o pior caso o controlador deve ser projetado para um atraso de transporte superior ao mensurado nos ensaios. Nesse projeto o controlador foi feito para um atraso de transporte de $\theta = 0,5$.

É possível simular a resposta desses sistema a um degrau de $32V$ utilizando a ferramenta do MATLAB, o Simulink. O modelo pode ser analisado na figura 29 e a sua respectiva resposta pode ser vista na figura 30.

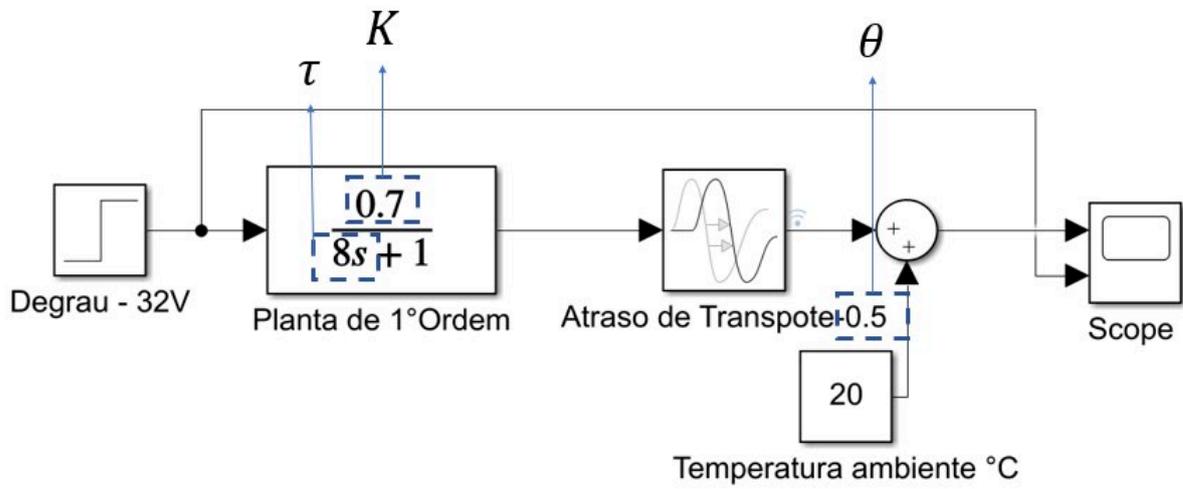


Figura 29 – Modelo no Simulink da planta definida Fonte: Autor Próprio (2020)

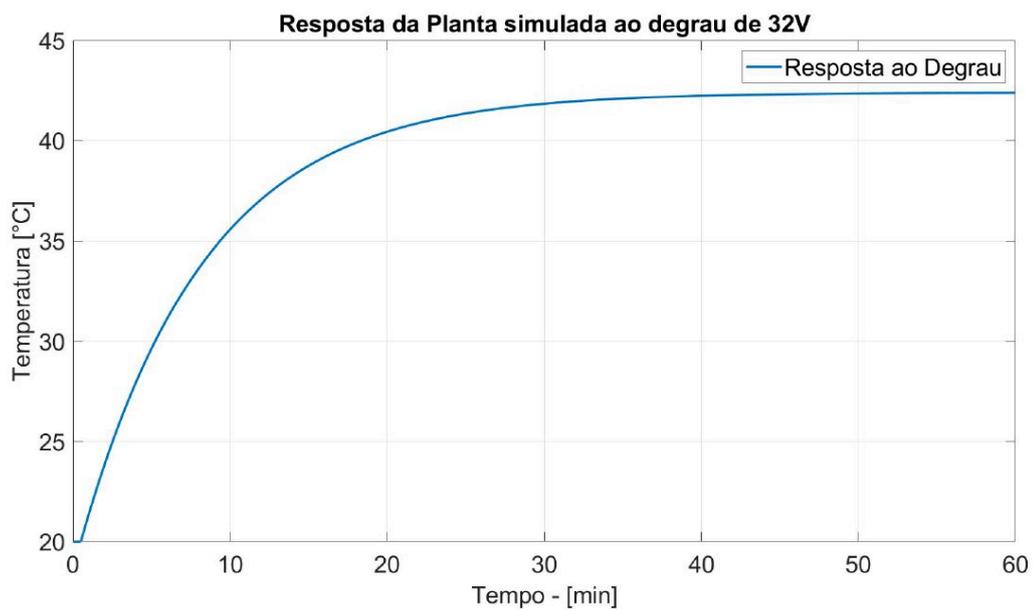


Figura 30 – Resposta do modelo definido ao degrau de 32V Fonte: Autor Próprio (2020)

Também foram feitos ensaios de leitura do sensor de temperatura a temperatura ambiente. Com esses ensaios foi possível medir uma variância na leitura do sensor de $\sigma = 0.17$. Assim é possível introduzir no modelo ruídos aleatórios que mudam na mesma frequência de amostragem do sistema. Dessa forma é possível validar a modelagem feita para o sistema. Nas figuras 31 e 32 é mostrado a modelagem da planta com ruído.

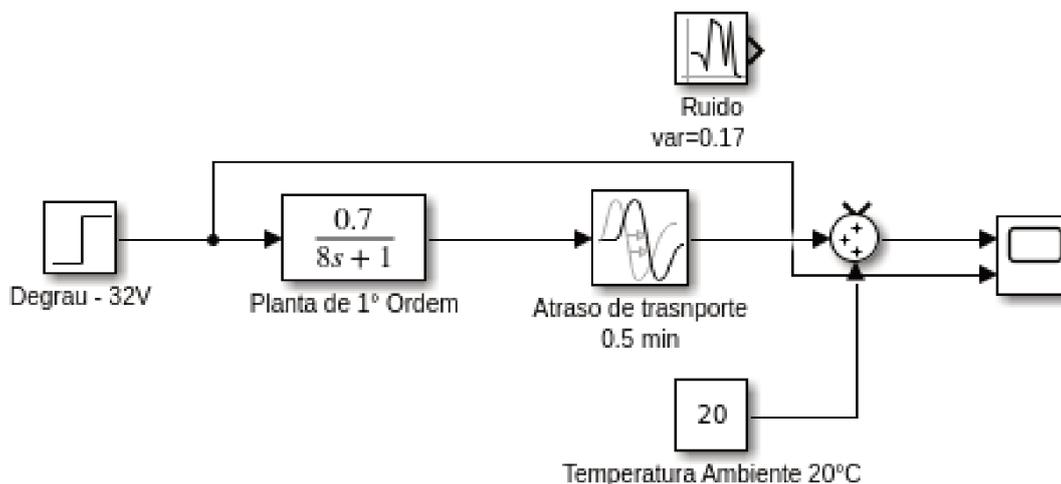


Figura 31 – Modelo no Simulink da planta definida + ruído Fonte: Autor Próprio (2020)

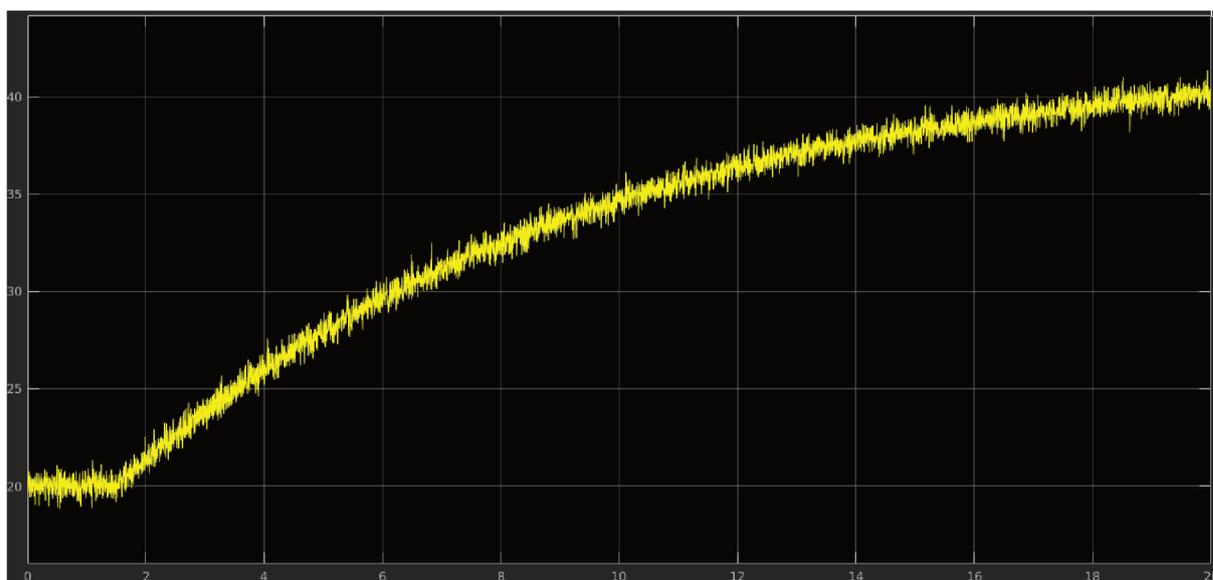


Figura 32 – Resposta do modelo definido ao degrau de 32V + ruído Fonte: Autor Próprio (2020)

3.4 SIMULAÇÕES EM MALHA FECHADA

A partir dos parâmetros da planta definidos no item 3.3 é possível calcular as constantes do controlador pelo *Método de SIMC*, descrito na seção 2.4.3.

No mesmo formato descrito pela equação 2.6, tem-se que :

$$k_p = 15.71$$

$$T_i = 4.00$$

Vale ressaltar que como o sistema analisado é de primeira ordem e suscetível a perturbações por oscilações na retroalimentação da malha, a parte derivativa do controlador foi desconsiderada, pois essas variações repentinas podem gerar uma componente indesejada na resposta. Um controlador PI é suficiente para essa aplicação.

Além disso, não foram feitas análises pela óptica do controle digital, pois, não havia diferença relevante entre o modelo prático e os modelos de controle linear, dado o tempo de resposta da planta do sistema e a frequência utilizada pelo controlador para reagir às alterações. Para um sistemas cuja resposta está na ordem de grandeza dos minutos, um controlador que trabalha em torno de 4Hz se comporta de forma próxima ao contínuo. Tal fato justifica o não aprofundar nesta análise.

Com os dados do controlador, no *Simulink*, foi montado um modelo da planta com o controlador mostrado na figura 33. Esse modelo simula o comportamento da planta definida com o controlador PI.

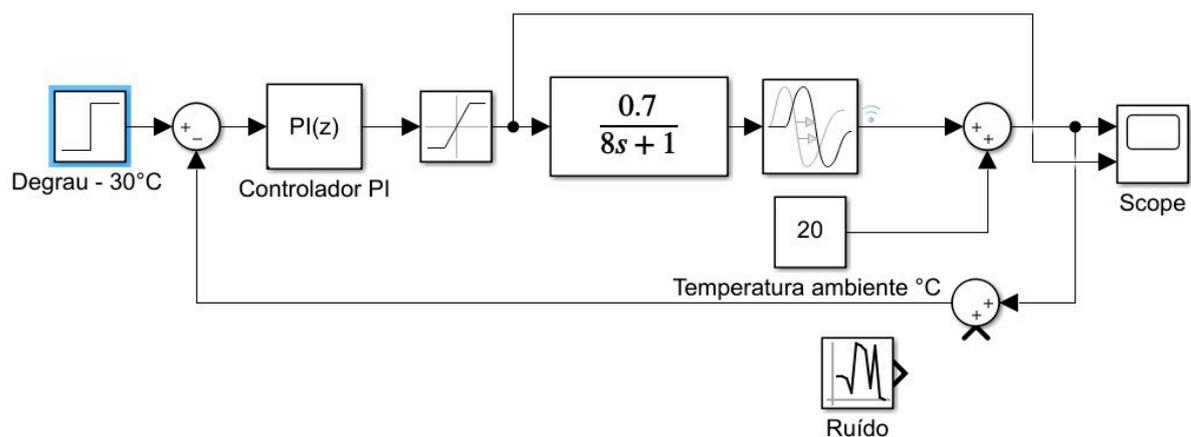


Figura 33 – Modelo do Controlador aplicado a planta Fonte: Autor Próprio (2020)

A resposta dessa simulação é mostrada na figura 34. Nela observa-se que o sistema é alimentado com a máxima potência da fonte, mostrando a saturação do controlador, o que para os momentos iniciais é positivo. Após o pico de sobressinal a parte integrativa do sistema passa a predominar e estabilizar a resposta em regime permanente do sistema.

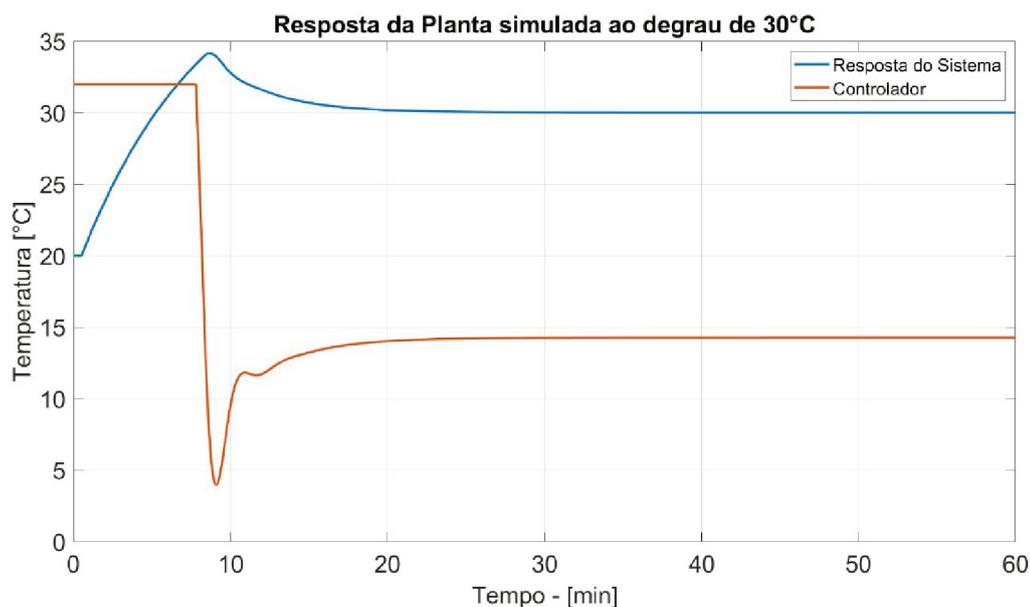


Figura 34 – Resposta da planta com o controlador a uma entrada em degrau de 30°C
Fonte: Autor Próprio (2020)

Na figura 35 é possível visualizar como o sistema se comporta quando há a presença de ruído no sistema.

Analisando a resposta do sistema com ruído nota-se que o sistema se estabiliza como na simulação anterior, porém a resposta do controlador oscila fortemente.

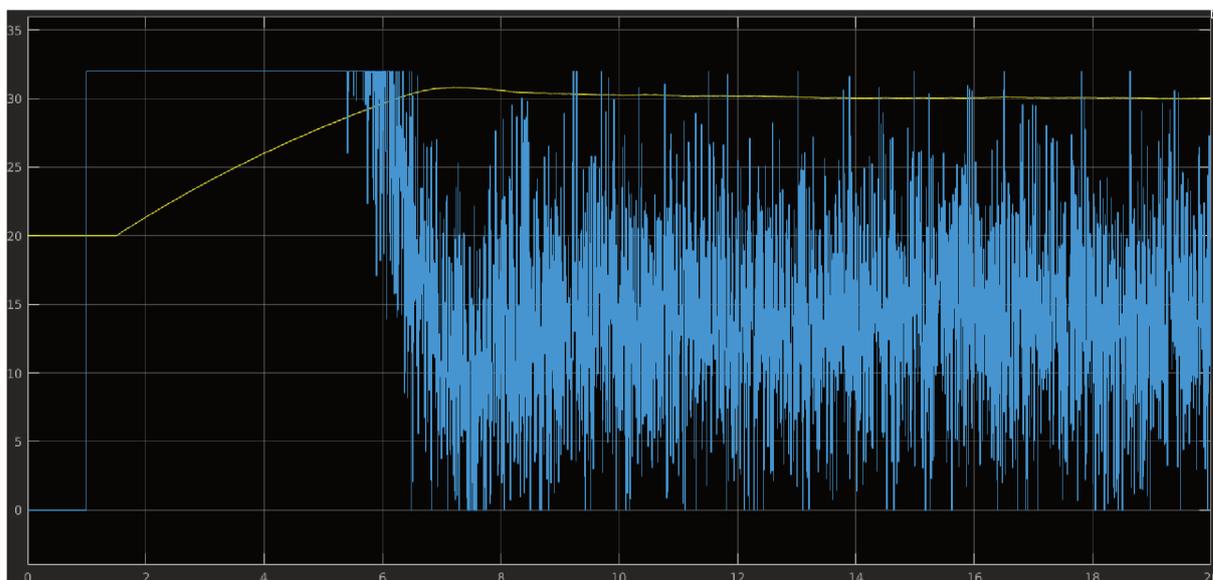


Figura 35 – Simulação da resposta da planta com ruído no sensor de temperatura
Fonte: Autor Próprio (2020)

Para realizar o cálculo da condutividade térmica é preciso conhecer a tensão final que chega a fonte. Por isso, fez-se uma comparação entre a tensão final aplicada ao sistema sem ruído, com da tensão média aplicada ao sistema com ruído, considerando os 5 minutos

finais de teste, após a estabilização do sinal do controlador. Para o modelo sem ruído a tensão final para estabilizar o sistema na temperatura de 30°C foi de 14.29V , já no sistema com ruído analisando os últimos 5 minutos de ensaio a tensão final foi de 14.26V .

É importante observar que o ruído na medição da temperatura faz com que o controlador apresente flutuações. Porém, essas flutuações não interferem significativamente no controle da temperatura que se mantêm estável ao redor do valor configurado.

Usando um filtro de média móvel no sinal do controlador, de janela central e tamanho 50, é possível visualizar a estabilização do sinal do controlador para a tensão necessária para sustentar a temperatura de controle, esse comportamento pode ser observado na figura 36.

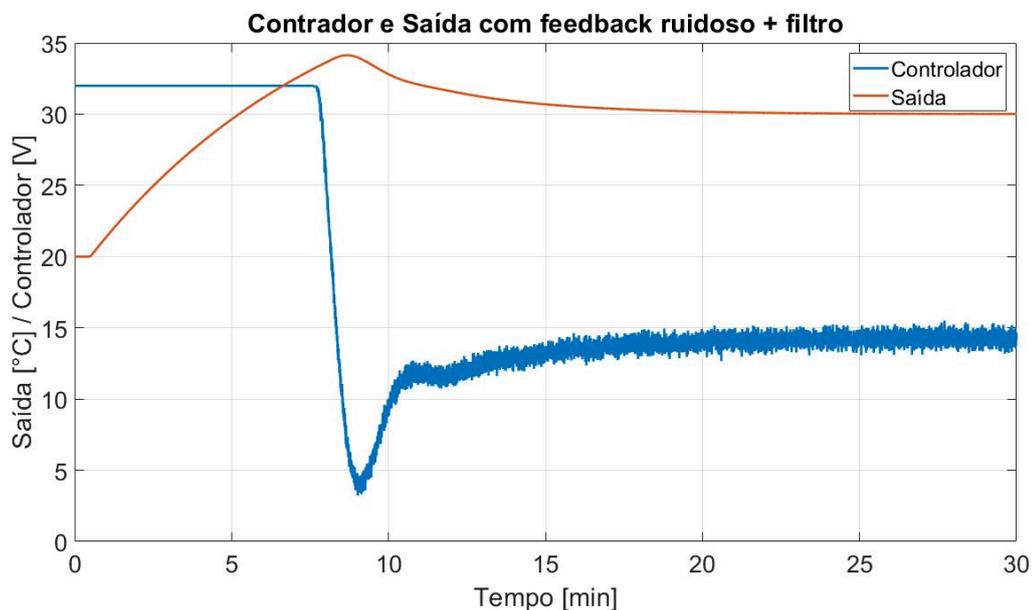


Figura 36 – Simulação da resposta da planta com ruído no sensor de temperatura com filtro de média móvel Fonte: Autor Próprio (2020)

Devido ao comportamento ruidoso do controlador, foram feitas simulações para avaliar a relevância das partes do controlador no comportamento no sistema. Assim, com base no modelo da figura 33, foram ajustados as constantes da parte proporcional e integral para identificar qual mais possui maior contribuição na amplificação dos ruídos.

Nas figuras 37 e 38 a parte do controlador predominante é respectivamente a integrativa e a proporcional. Vale ressaltar que na figura 37, há uma pequena parcela proporcional para que o sistema possa atingir a estabilidade.

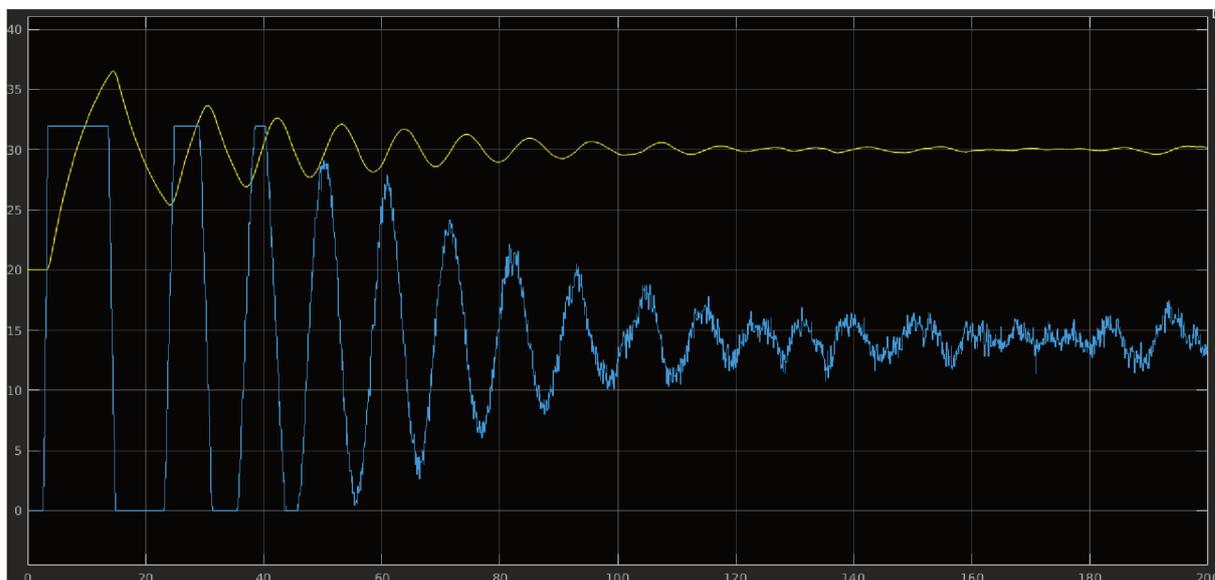


Figura 37 – Simulação da resposta da planta com ruído e controlador PI de $K_p = 1,5$ e $K_I = 4$ Fonte: Autor Próprio (2020)

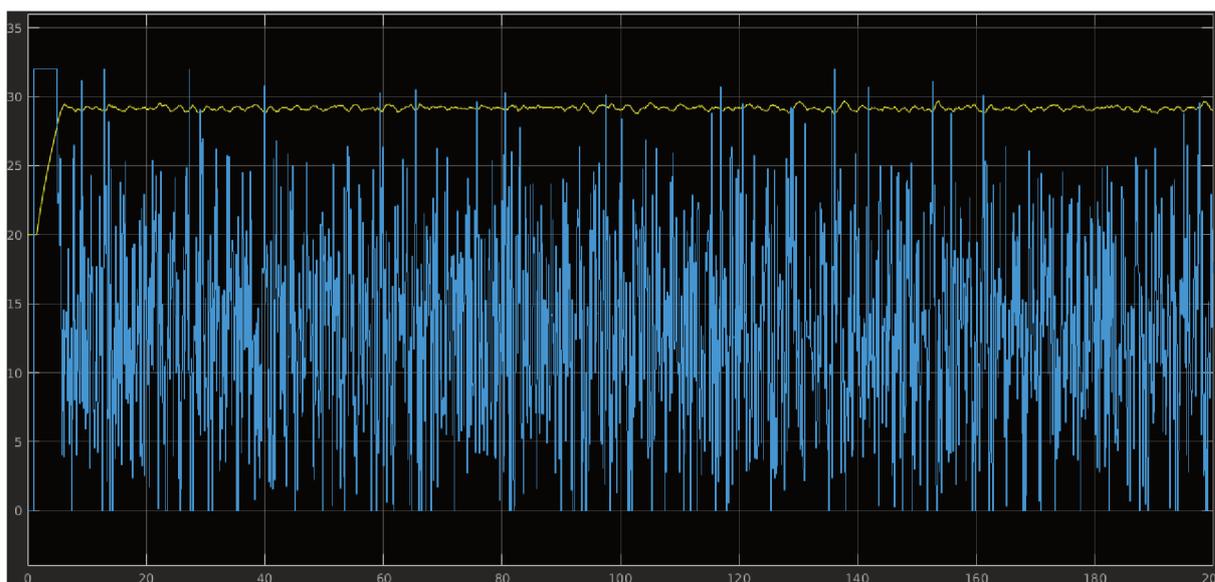


Figura 38 – Simulação da resposta da planta com ruído e controlador PI de $K_p = 15,71$ e $K_I = 0$ Fonte: Autor Próprio (2020)

Na Figura 37 quando o controlador atinge a estabilidade, a parte proporcional tem pouca relevância no controlador. Dessa forma é possível visualizar que a parte integrativa do controlador pouco afeta o ruído do sistema, que se mantém em níveis semelhantes ao da planta simulada com ruído na figura 30.

No entanto, na figura 38, observa-se que mesmo após atingir a estabilidade o controlador se mantém oscilando fortemente, confirmando a hipótese de que a parte proporcional do controlador por é a principal responsável pela amplificação do ruído.

Ou seja, o controlador escolhido é capaz de atingir a estabilidade, porém a saída do controlador possui ruídos amplificados pela parte proporcional que não afetam significativamente a temperatura dada a velocidade de resposta do sistema.

3.5 MONTAGEM DO ENSAIO

Para facilitar o uso da bancada de ensaio foi redigido um manual, que pode ser encontrado no apêndice A, contendo um passo a passo e a descrição dos componentes utilizados nessa implementação, o manual encontra-se disponível no anexo 1.

No manual encontra-se detalhado através de imagens como deve ser feita a conexão entre todos os componentes da bancada, ou seja, os sensores e o Arduino Mega, a placa de controle e as fontes de alimentação da placa. Além da descrição do hardware há também a descrição sobre como usar o programa em MATLAB para controlar os parâmetros do ensaio e extrair dados.

Para os resultados apresentados nesse trabalho foi utilizada a montagem descrita no manual do equipamento. Na figura 39 é possível ver a conexão das duas fontes de alimentação à placa de controle, a fonte de 12V para a eletrônica da placa e a fonte de potência para alimentar as resistências.

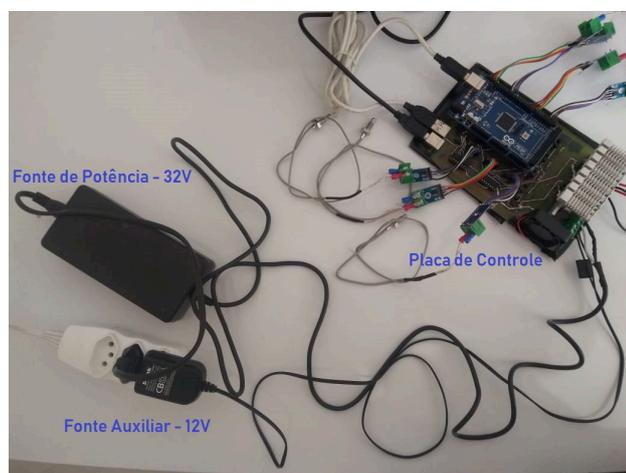


Figura 39 – Conexão das fontes da bancada com a placa de controle Fonte: Autor Próprio (2020)

Ainda sobre essa montagem, na figura 40 apresenta-se a vista superior da placa de controle. Observa-se na placa os 7 sensores de temperatura com os seus termopares. No ensaio apresentado 5 sensores de temperatura estão expostos ao ambiente os outros dois sensores serão usados para monitorar a temperatura das resistências e fechar a malha de controle.

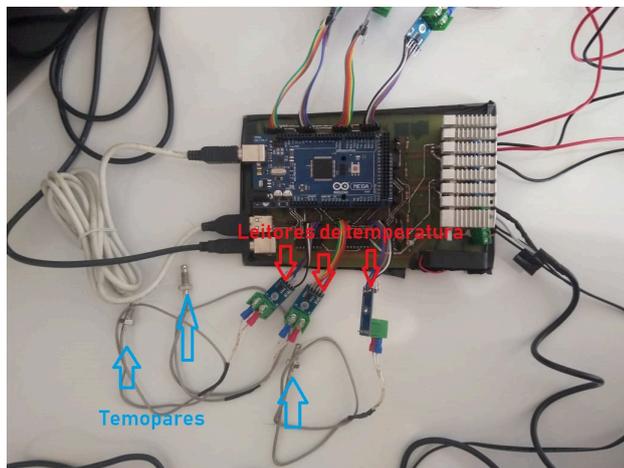


Figura 40 – Conexão dos sensores de temperatura com a placa de controle Fonte: Autor Próprio (2020)

A Figura 41 mostra a conexão da placa de controle com o computador via cabo USB, essa conexão é feita para configurar os parâmetros do ensaio e ler os dados por meio do MATLAB.

Na figura 42 apresenta-se as resistências usadas no ensaio. As resistências são do LTCME e foram feitas para a aplicação em ensaios de condutividade térmica. Observa-se na figura 42 os termopares tipo K utilizados para aferir a temperatura na resistência central e no anel de guarda. A resistência central foi conectada como a resistência 1 da placa de controle e a resistência em volta dela foi conectada com resistência 2 na placa.

Por fim, na figura 43 é possível ver como é feita a conexão das resistências e das fontes através dos bornes (conector elétrico com fixação parafusada) da placa.

Nessa montagem foram utilizadas duas resistências térmicas para validar a funcionalidade do CTC.

Dessa forma, resultado esperado é que a placa de controle, o CTC, controle a tensão de alimentação das duas resistências de forma independente e que seja mantida estável a temperatura configurada no MATLAB.

Na figura 44 observa-se a interface desenvolvida. No painel é possível identificar os parâmetros de entrada do ensaio, ou seja, tempo de duração do ensaio, 90 *min*, temperatura de controle de 40[°C], tensão da fonte de alimentação das resistências de 32 [V], além de outros valores tais como o valor da resistência da placa quente que é usada como referência

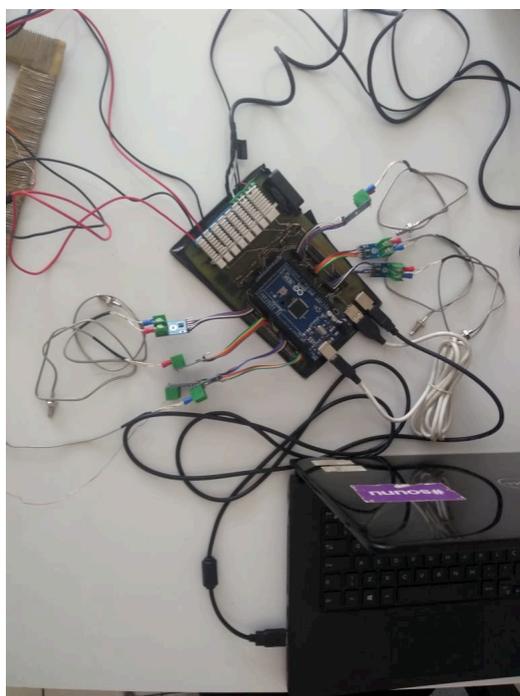


Figura 41 – Conexão da placa de controle com o computador via cabo USB. Fonte: Autor Próprio (2020)

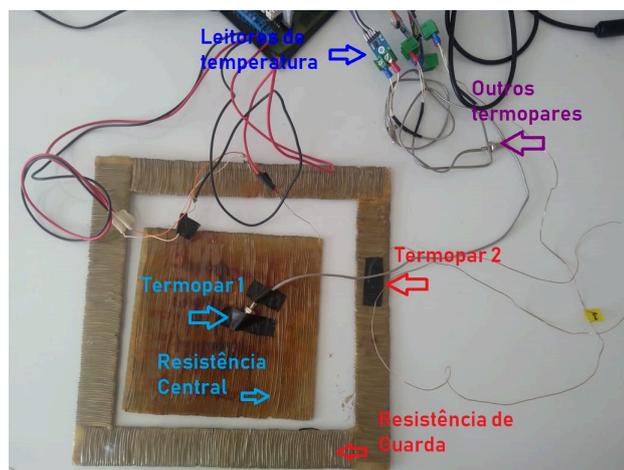


Figura 42 – Conexão da placa de controle com as Resistências. Fonte: Autor Próprio (2020)

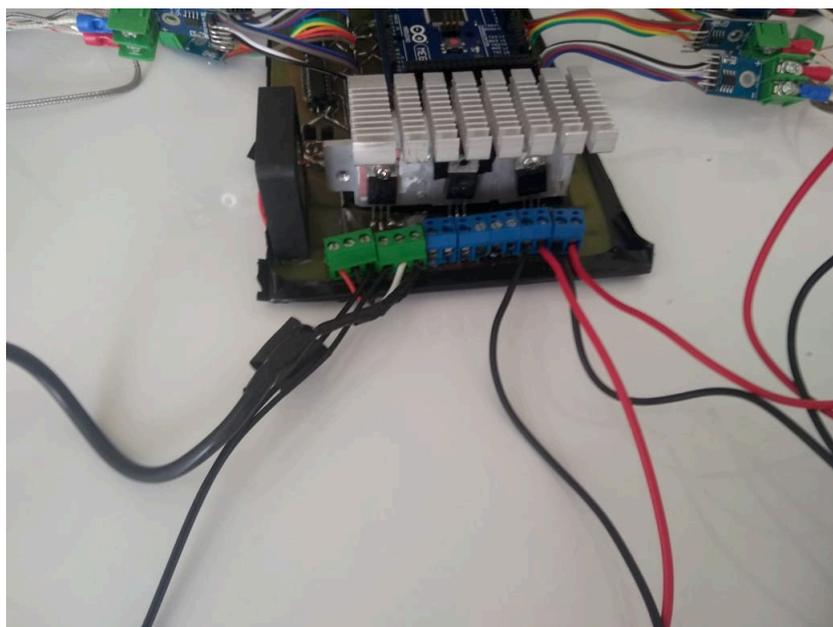


Figura 43 – Terminais de conexão da placa. Fonte: Autor Próprio (2020)

para o cálculo de potência da fonte, a identificação da porta serial usada pelo Arduino e o nome do arquivo usado para salvar os dados do ensaio.

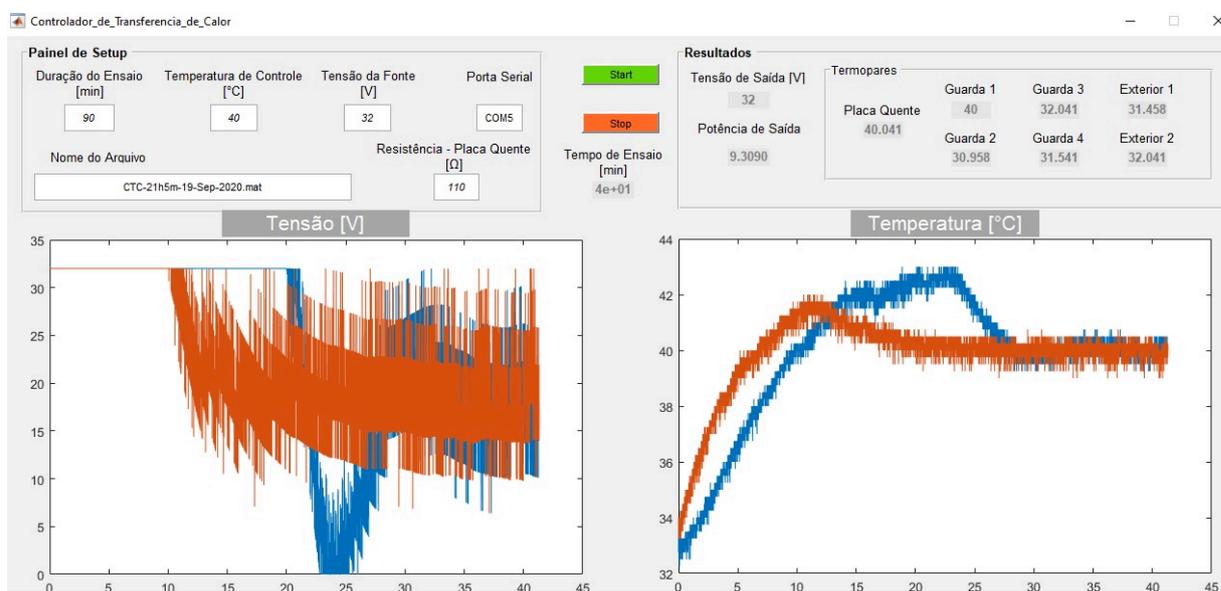


Figura 44 – Conexão da placa de controle com as Resistências. Fonte: Autor Próprio (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio foram obtidos os seguintes dados em função do tempo:

- Temperatura de 7 termopares (sendo que 2 deles estavam conectados as resistências)
- 5 valores de PWM utilizados pelo Arduino para controlar as resistências de forma independente. Um para cada possível resistência.

Ressalta-se que é possível converter esses valores de PWM para tensão elétrica, já que é conhecida a tensão da fonte de alimentação.

Com as informações coletadas no ensaio é possível traçar em um gráfico a tensão aplicada na resistência e sua resposta em temperatura e assim comparar o resultado com a modelagem teórica realizada.

Nas figuras 34, 35 e 36 observa-se a simulação do controle da saída em temperatura em função da entrada de controle em tensão no sistema. São consideradas duas situações, com e sem ruídos no sensor de temperatura.

Já as figuras 45 e 46 apresentam a resposta equivalente obtida através do ensaio experimental realizado. Observa-se que na prática o resultado demonstra uma característica oscilatória maior do que na simulação.

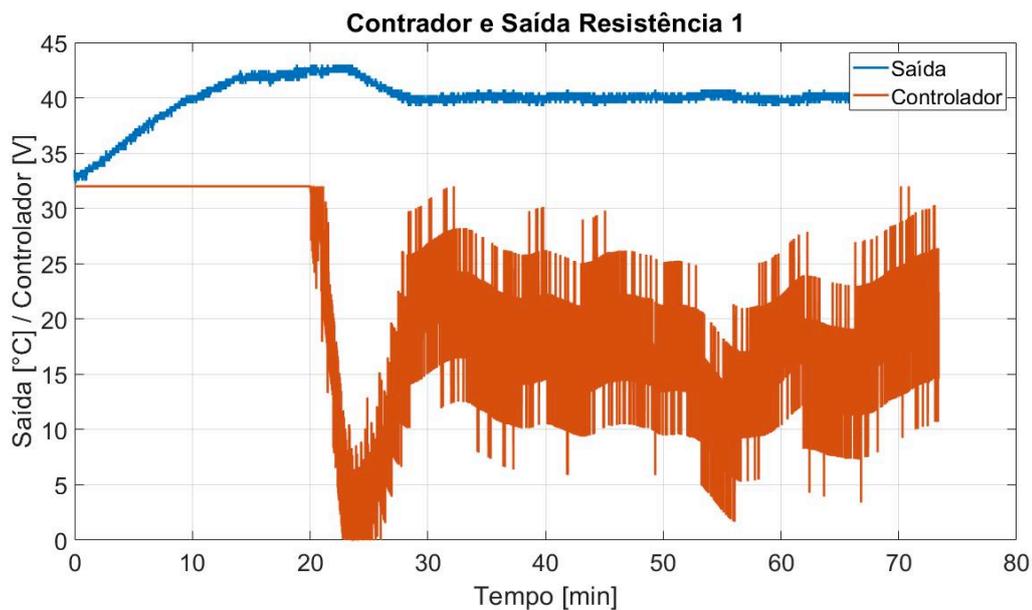


Figura 45 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 1. Fonte: Autor Próprio (2020)

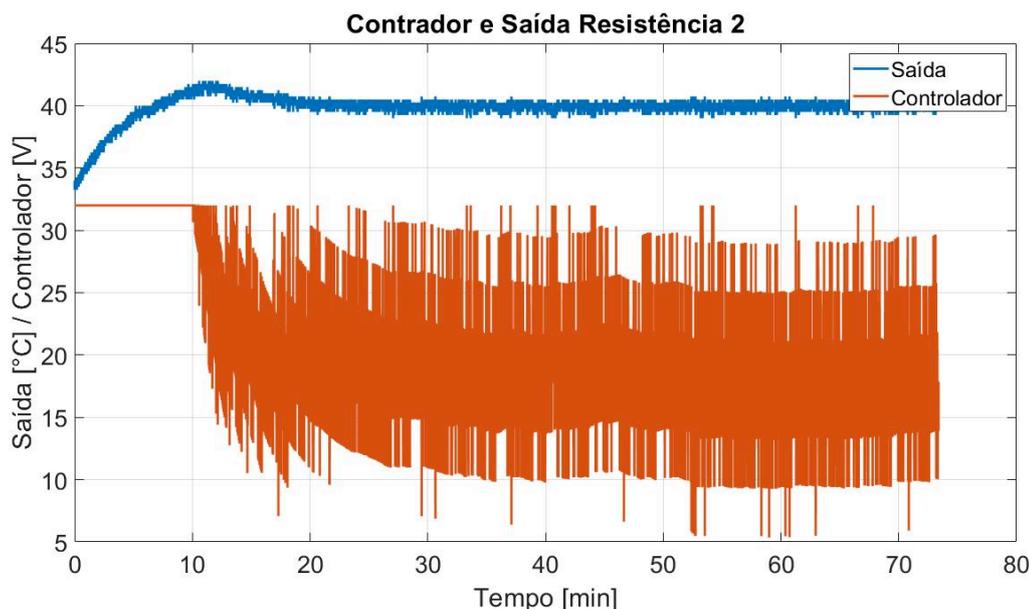


Figura 46 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 2. Fonte: Autor Próprio (2020)

Vale ressaltar que na execução do ensaio a temperatura do ambiente não era controlada e estava sujeita a circulações de ar.

Nos resultados é possível notar que o controlador atingiu a estabilidade para a duas resistências. Também foi confirmada a amplificação do ruído devida a parte proporcional do controlador.

Outro fenômeno que pode ser visto nesses resultados é o *windup*. Ele ocorre quando a saída do controlador satura em seu valor máximo mesmo após a saída do sistema ter atingido o valor desejado (NETO, 2005). Existem técnicas para combater esse fenômeno e acelerar a resposta do controlador, mas não foram abordadas nesse trabalho.

Para analisar com mais nitidez os resultados obtidos no experimento fez-se uso de um filtro de média móvel de janela centrada e tamanho 50, semelhante ao usado na figura 36. Os resultados deste teste são mostrados nas figuras 47 e 48.

A partir desses resultados é possível fazer 2 análises principais.

A primeira é que a semelhança entre o comportamento observado na prática e o comportamento esperado na teoria, de acordo com o modelo de primeira ordem com atraso de transporte, confirma que o experimento se comporta conforme as equações descritas na metodologia na seção 2.4.

Vale ressaltar que apesar das perturbações no sistema, devido a ruídos e variações na temperatura ambiente, a saída do sistema se estabilizou no valor configurado no ensaio.

A segunda análise diz respeito à efetividade do controlador, uma vez que ele foi



Figura 47 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 1 com filtro de média móvel. Fonte: Autor Próprio (2020)

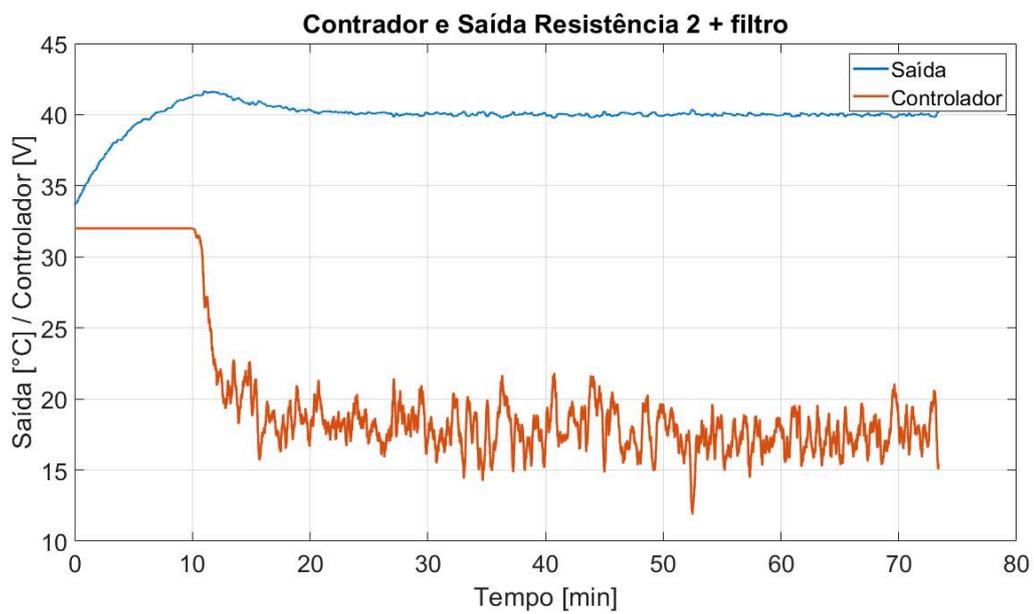


Figura 48 – Leitura de temperatura e tensão aplicada na resistência 2 com filtro de média móvel. Fonte: Autor Próprio (2020)

modelado para uma planta específica e não foram feitas análises que mostrassem como se comportaria em plantas diferentes. Os resultados experimentais corroboram a explicitar essa questão, mostrando que o controlador consegue estabilizar a temperatura das duas resistências. Ou seja, dado tempo suficiente o controlador consegue estabilizar a saída do sistema. A partir desses testes a expectativa é que o controlador consiga estabilizar outros sistemas de temperatura semelhantes

Além dessas análises cabe considerar que os ruídos no sensor de temperatura fazem com o que a tensão fornecida às resistências oscile, o que não impede que a saída do sistema seja controlada. Para fins de cálculo de condutividade térmica é importante usar a análise dos dados de PWM após a estabilização de temperatura, assim é possível calcular a tensão média aplicada à resistência principal e a potência utilizada por ela e em seguida a condutividade térmica do material ensaiado.

5 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido e apresentado nesse trabalho atingiu os objetivos esperados e definidos na introdução. Os resultados mostram que o sistema possui robustez e versatilidade para funcionar dentro do seu escopo de projeto, ou seja, controlar de 1 a 5 resistências e 1 a 7 sensores de temperatura termopar do tipo K.

O microcontrolador Arduino Mega se mostrou capaz de suportar as necessidades do projeto permitindo a interação e controle com múltiplos sensores e as resistências necessárias. Além disso, os sensores escolhidos pela compatibilidade com o Arduino foram capazes de ler a temperatura e fechar as malhas de controle projetadas apesar dos ruídos no sinal.

Em termos de afinidade com outros usuários o sistema projetado é independente, pois o manual descritivo e o programa interativo em MATLAB permitem que pessoas leigas possam realizar o ensaio sem possuir conhecimentos detalhados sobre o sistema ou as tecnologias utilizadas. O manual traz de forma ilustrada todas as conexões necessárias para montar a bancada e a GUI (Guide User Interface) criada em MATLAB e que permite ao usuário interagir de forma amigável e gráfica com a bancada, seja para configurar os parâmetros do ensaio seja para acompanhar em tempo real a tensão e as temperaturas da bancada.

Esse trabalho possui um caráter multidisciplinar e para concluí-lo foi necessário a integração de vários sistemas afins do estudo da mecatrônica (Eletrônica analógica, Eletrônica Digital, Microcontroladores, Instrumentação, Controle Linear, Transferência de Calor, programação em baixo nível, programação em alto nível).

6 TRABALHOS FUTUROS

6.1 CALIBRAÇÃO E FILTRO DIGITAL DOS SENSORES DE TEMPERATURA MAX6675

O sensor de temperatura utilizado é baseado no chip MAX6675, que tem a função de amplificar o sinal de tensão de um termopar do tipo K e comunicar a leitura de temperatura de forma digital no padrão MISO com uma resolução de $0.25[^\circ C]$.

Para aumentar a precisão da temperatura lida e dos resultados da bancada é válido realizar um estudo de calibração dos sensores de temperatura. Assim, será possível avaliar o quanto a temperatura lida se afasta da realidade e compensar essa disparidade com uma curva de calibração.

Essa curva de calibração pode considerar, por exemplo, que há diferenças elétricas de fabricação entre os diferentes sensores do mesmo modelo e o efeito do termopar utilizado, que também pode possuir diferenças em sua confecção ou mesmo extensão dos fios que façam com que surjam alterações na temperatura.

Outro tópico relevante nesse estudo é a análise da resposta do sensor para avaliar a natureza dos erros em ensaios estáticos ou dinâmicos. Uma análise em frequência, por exemplo, poderia auxiliar no dimensionamento de um filtro digital para a temperatura lida, ou seja, mesmo em alterações de hardware seria possível obter leituras de temperaturas melhores.

6.2 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA

Nesse ensaio é preciso utilizar uma resistência chamada de placa quente que é usada para aquecer uma amostra e aferir a diferença de temperatura sobre a mesma, enquanto outras resistências chamadas de resistências de guarda ficam em volta para garantir que a placa quente não perca calor em outras direções.

Utilizando a bancada criada nesse projeto é possível controlar a temperatura da placa e das resistências de guarda de forma independente, dessa forma é possível reduzir as perdas de energia da placa quente para os entornos e obter valores de condutividade térmica mais precisos.

A bancada como está atualmente possui suporte para controlar todas as resistências necessárias nesse modelo de ensaio (no total de 5 resistências) e ler a temperatura em todos os pontos relevantes para o ensaio, nesse caso, 7 pontos. Recomenda-se como trabalho

futuro a utilização da bancada para o ensaio de condutividade térmica no modelo descrito.

REFERÊNCIAS

- 4HOBBY. Arduino Mega R3 Atmega 2560 Atmega 16U2 Com Cabo Usb 100107 | 4Hobby. 2020. Last accessed 2020-09-27. Disponível em: <<https://www.4hobby.com.br/Arduino-Mega-R3-Atmega-2560-Atmega-16U2-Com-Cabo-Usb-100107>>. Citado nas páginas 7 e 32.
- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. [S.l.]: Prentice Hall, 2000. 479 p.
- ALLINONEELECTRONIC. **Transistors - Technology**. 2020. Last accessed 2020-09-27. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/allinoneelectronic/home/transistors>>. Citado nas páginas 7 e 28.
- BRAGA, N. C. **MOSFETs de Potência**. 2020. Último acesso: 16/11/2020. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/eletronica-de-potencia/15366-curso-de-eletronica-de-potencia-parte-4-mosfets-de-potencia-cur3004.html>>. Citado nas páginas 7 e 27.
- CIRCUITS4YOU. **PWMexamples**. 2020. Last accessed 2020-09-27. Disponível em: <<https://circuits4you.com/2017/12/21/esp8266-pwm-example/>>. Citado nas páginas 7 e 30.
- CRISTINA, L. et al. ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM COM ATRASO. **ABCMSymposium Series in Mecatronics**, v. 6, n. 2013, p. 1144–1153, 2014.
- DATASHEETSMAXIMINTEGRATED. **Max6675**. 2020. Last accessed 2020-09-27. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>>. Citado nas páginas 7 e 32.
- INCROPERA, F. P. **Fundamental of Heat and Mass Transfer**. Seventh ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2011. 1076 p. Citado nas páginas 7, 16, 17, 18 e 19.
- MOURA, L. M. **Desenvolvimento de um protótipo de equipamento de placa quente protegida**. [S.l.], 1993. 150 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/157806/93393.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Citado nas páginas 7, 13 e 14.
- NETO, A. H. **TECNICAS ANTI-WINDUP EM ESTRUTURAS DE CONTROLE PID, RST E GPC**. 2005. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp147351.pdf>>. Citado na página 51.
- RIBEIRO, L. C.; GUIMARÃES, G.; BORGES, V. L. **MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS SÓLIDOS NÃO CONDUTORES**. [S.l.], 2003. Disponível em: <<http://web.posfemec.org/posmec/13/artigos/TRB216.pdf>>. Citado nas páginas 7, 13, 15, 20, 21 e 22.
- SALMON, D. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates including recent developments and sources of reference materials. **Measurement Science and Technology**, v. 12, n. 12, 2001.

SWITCHCASE. **mosfet-driver - BJT push-pull para um MOSFET - Switch-Case**. 2020. Last accessed 2020-09-27. Disponível em: <<https://pt.switch-case.com/72156816>>. Citado nas páginas 7 e 29.

TRACE Width Calculator. <<https://www.7pcb.com/trace-width-calculator.php>>. Acessado em 08/11/2020.

TUTORIALS electronics. **The MOSFET**. [s.n.], 2020. Último Acesso: 16/11/2020. Disponível em: <https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_6.html>. Citado nas páginas 7 e 28.

A APÊNDICE - MANUAL DE USO DO CONTROLADOR

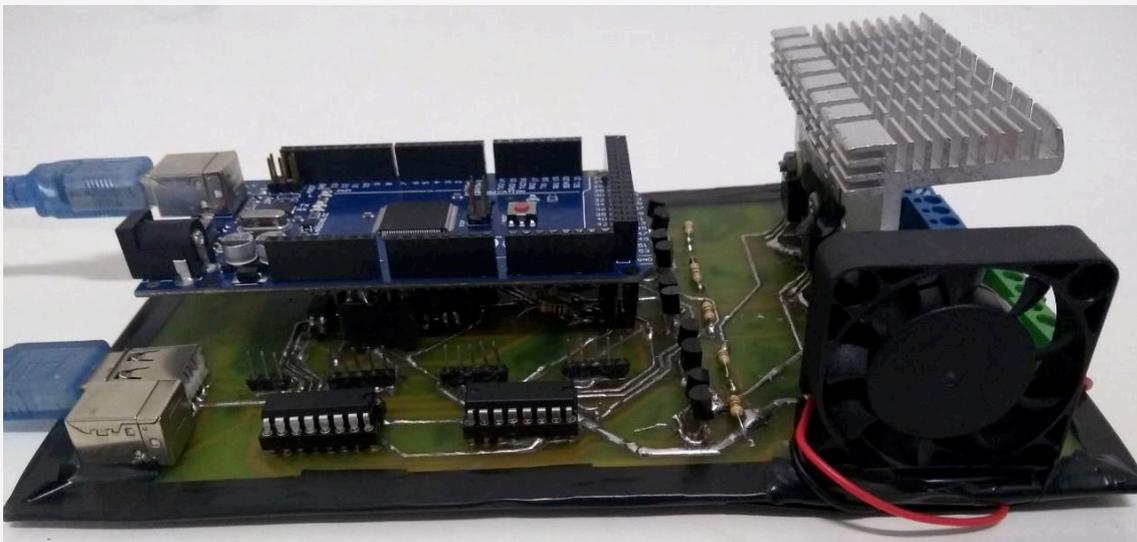


UFU

Universidade
Federal de
Uberlândia

CTC

Controlador de Transferência de Calor



Orientadora: Profa. Dra. Priscila
Ferreira Barbosa de Sousa

Autor: Henrique Brito Silva

Contato:
henriquebritos@hotmail.com

Última Atualização: 03/2020

CTC – Controlador de Transferência de Calor

O equipamento controla a temperatura de resistências térmicas. Recebe energia elétrica de uma fonte e controla o nível de tensão elétrica aplicada a resistências térmicas controlando sua temperatura que é medida com termopares tipo K.

Aplicações:

- Controle em malha fechada de temperatura
- Leitura de termopar tipo K
- Distribuição controlada de tensão elétrica
- PWM de Potência

| Limites do Equipamento | Mínimo | Típico | Máximo | Unidade |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|---------|
| Nº de Resistências | - | - | 5 | - |
| Tensão elétrica da fonte de potência | 15 | - | 100 | V |
| Tensão elétrica da fonte auxiliar | 10 | 12 | 15 | V |
| Corrente elétrica da fonte auxiliar | 0,5 | - | - | A |
| Corrente elétrica por resistência | - | - | 4 | A |
| Temperatura de leitura | 0 | - | 1000 | °C |

Para a sua Segurança e do Equipamento



Energia Elétrica:

- Atenção ao manusear tensões elétricas superiores a 30V.
- Não deixar o equipamento em contato com superfícies metálicas.
- Agrupar fios evitando que derrubar o equipamento ou danificar as conexões.
- Fiação energizada não deve estar exposta.
- Não tocar as trilhas do equipamento enquanto em funcionamento.
- Certifique-se de que a corrente de uma resistência não excede o valor máximo permitido pelo equipamento, nem a da resistência utilizada. $Corrente =$

$$\frac{Tensão\ da\ fonte}{Resistência}$$



Manutenção e Cuidados:

- Manusear o equipamento pela placa e não pelos componentes presos a ela.
- Não deixar o equipamento exposto a acúmulo de poeira.
- Se o equipamento não funcionar adequadamente, verificar as conexões com a função de continuidade de um multímetro. Se o problema persistir, consultar um especialista e a documentação técnica do equipamento.
- Em caso de conexões defeituosas, refazer as soldas do trecho danificado.

Sumário

| | |
|------------------------------------|----|
| Montagem do CTC | 4 |
| Descrição dos componentes..... | 13 |
| Cabo USB | 13 |
| Placa Amplificadora | 13 |
| Arduino Mega 2560..... | 13 |
| Sensor de Temperatura MAX6675..... | 14 |
| Termopar tipo K..... | 14 |
| Fonte de 12V | 14 |
| Fonte de Potência..... | 14 |
| Arduino IDE | 15 |

Montagem do CTC

Siga as instruções passo a passo para realizar um ensaio utilizando o CTC.

1. Pegue os sensores de temperatura que serão utilizados e conecte a eles um termopar do tipo K. Na Figura 1, é mostrado um sensor já com um termopar conectado.

Obs: é importante que o positivo do termopar (mostrado pelo terminal vermelho) seja conectado no positivo do sensor (mostrado pelo sinal '+') e o negativo do termopar (mostrado pelo terminal azul) seja conectado no negativo do sensor (mostrado pelo sinal '-'). Se essa conexão for feita errada a temperatura terá sinal invertido.



Figura 1; Sensores de temperatura MAX6675

2. Posicione a placa de controle em um apoio não metálico e conecte os sensores de temperatura. Na Figura 2 é possível ver a placa antes das conexões serem realizadas e na Figura 3 após a conexão com os sensores.

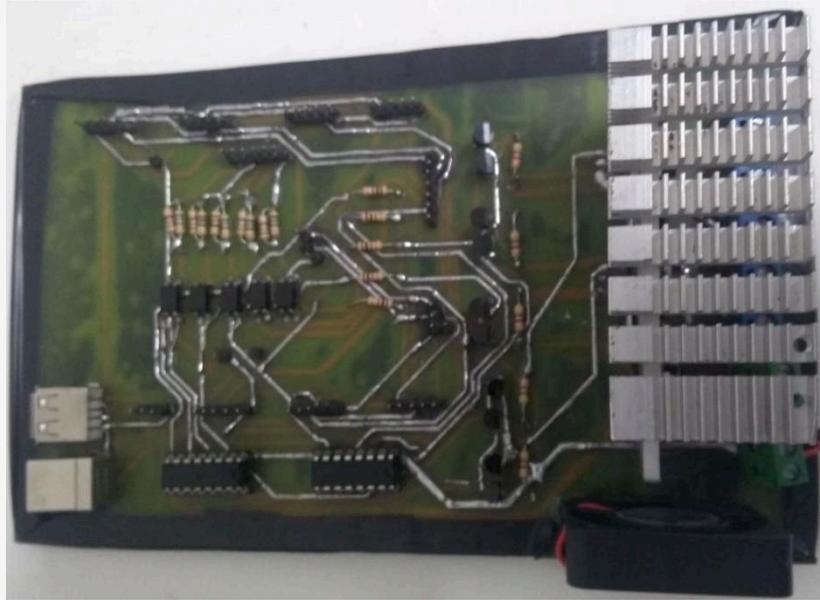


Figura 2: Placa sem nenhuma conexão

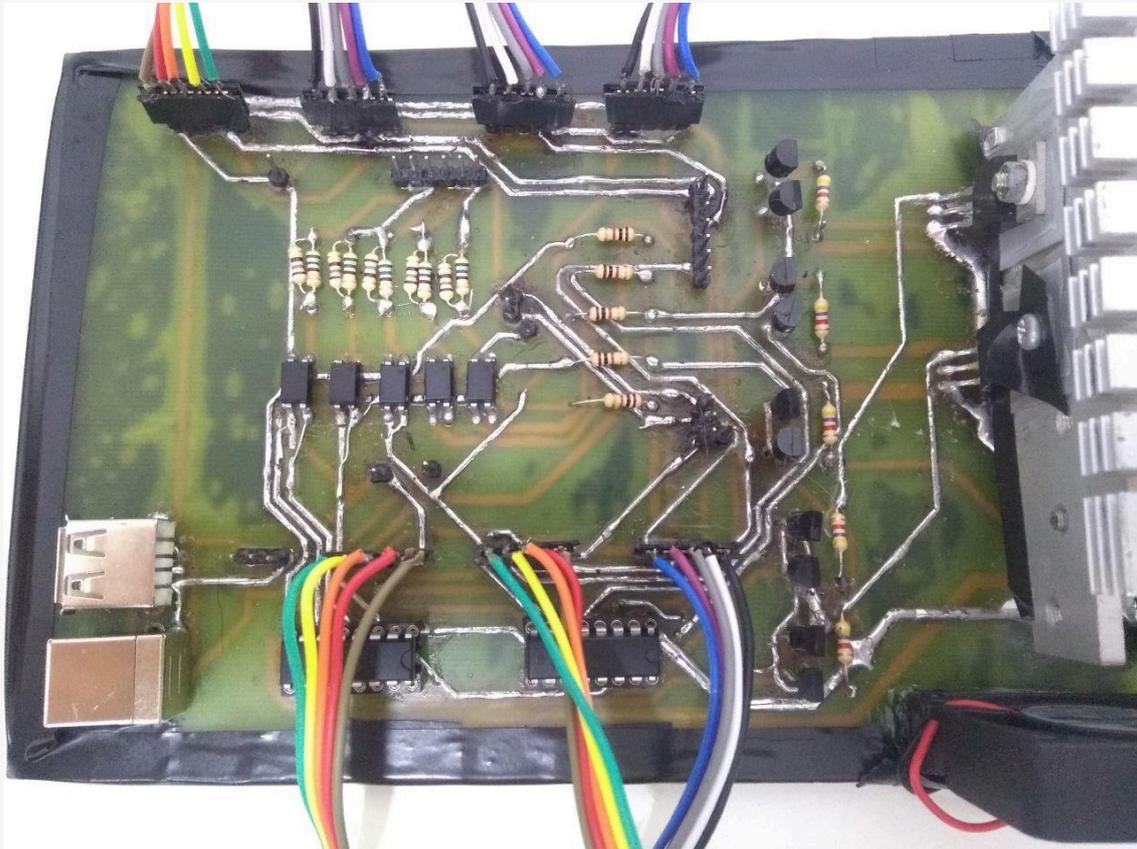


Figura 3: Placa de controle conectada aos sensores de temperatura

Como os pinos do sensor estão unidos basta encaixá-los como mostra a Figura 3. Porém, é preciso certificar-se de que o sentido das conexões está correto, os fios de coloração **preta** e **marrom** são usados como terra do sensor, com o auxílio da Figura 4, Figura 5 e Figura 6 confira se o terra do sensor está conectado ao terra da placa.

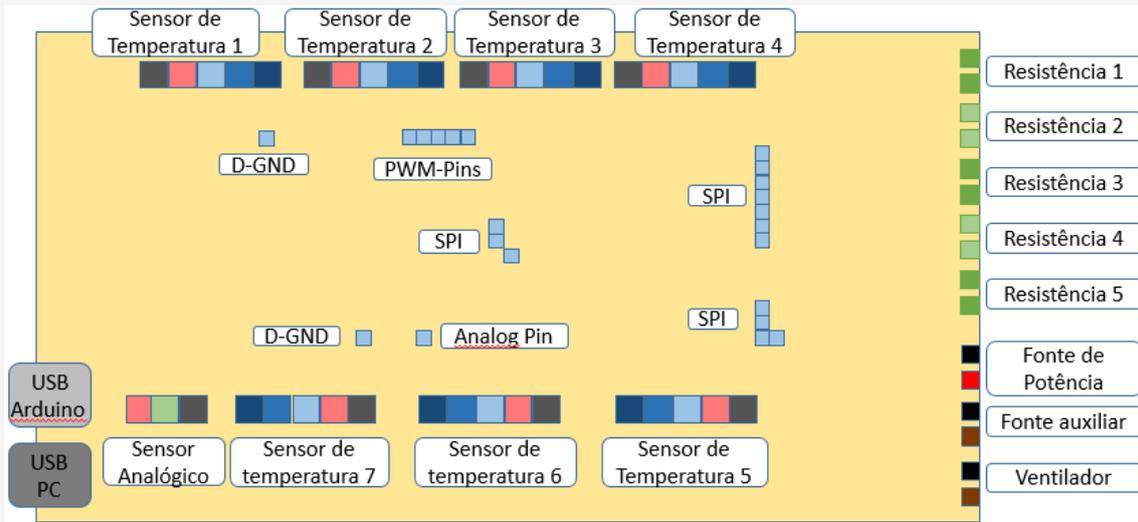


Figura 4 Conectores da Placa Amplificadora

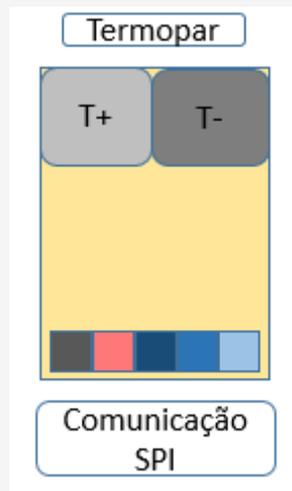


Figura 5 Terminais do sensor de temperatura MAX6675

Legenda:

| | |
|-------|--|
| Texto | : Descrição dos Pinos |
| ■ | : Pinos do Arduino |
| ■ | : D-GND / Terra do circuito digital |
| ■ | : 5V / Alimentação do circuito digital |
| ■ | : SO / Comunicação SPI |
| ■ | : CS / Comunicação SPI |
| ■ | : SCK / Comunicação SPI |
| ■ | : Resistências Térmicas |
| ■ | : Resistências Térmicas |
| ■ | : A-GND / Terra do Circuito Analógico |
| ■ | : Fonte de Potência |
| ■ | : Fonte 12 V |

Figura 6 Legenda do desenho da placa amplificadora

3. Em seguida conecte o Arduino Mega 2560 a placa de controle como mostra a Figura 7. Os pinos da placa de controle que se conectam ao Arduino são mostrados na Figura 4. Após a conexão, verifique visualmente se todos os pinos estão conectados.

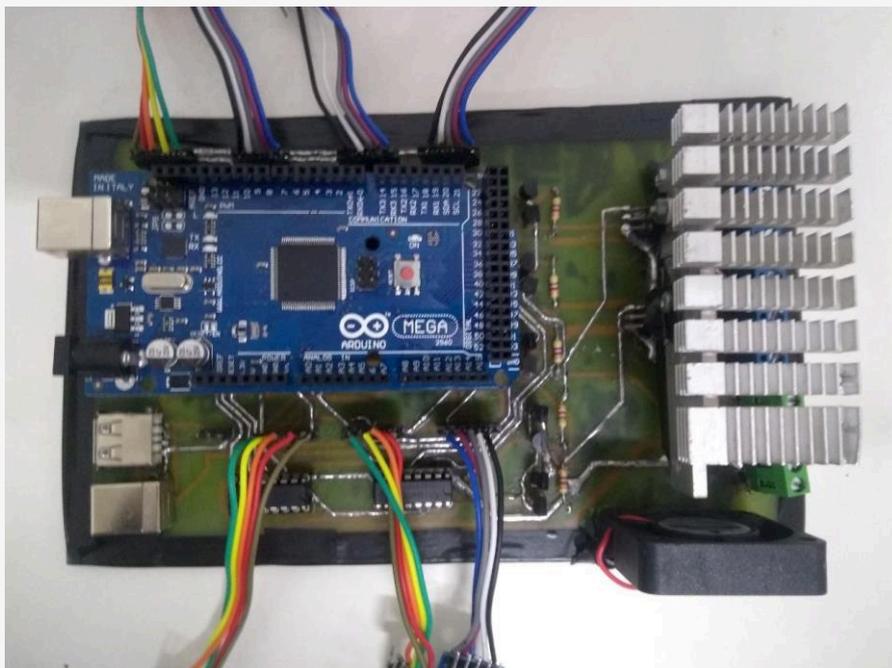


Figura 7: Placa de controle conectada ao Arduino

- Em seguida conecte o cabo USB entre a placa e o Arduino como mostra Figura 8.

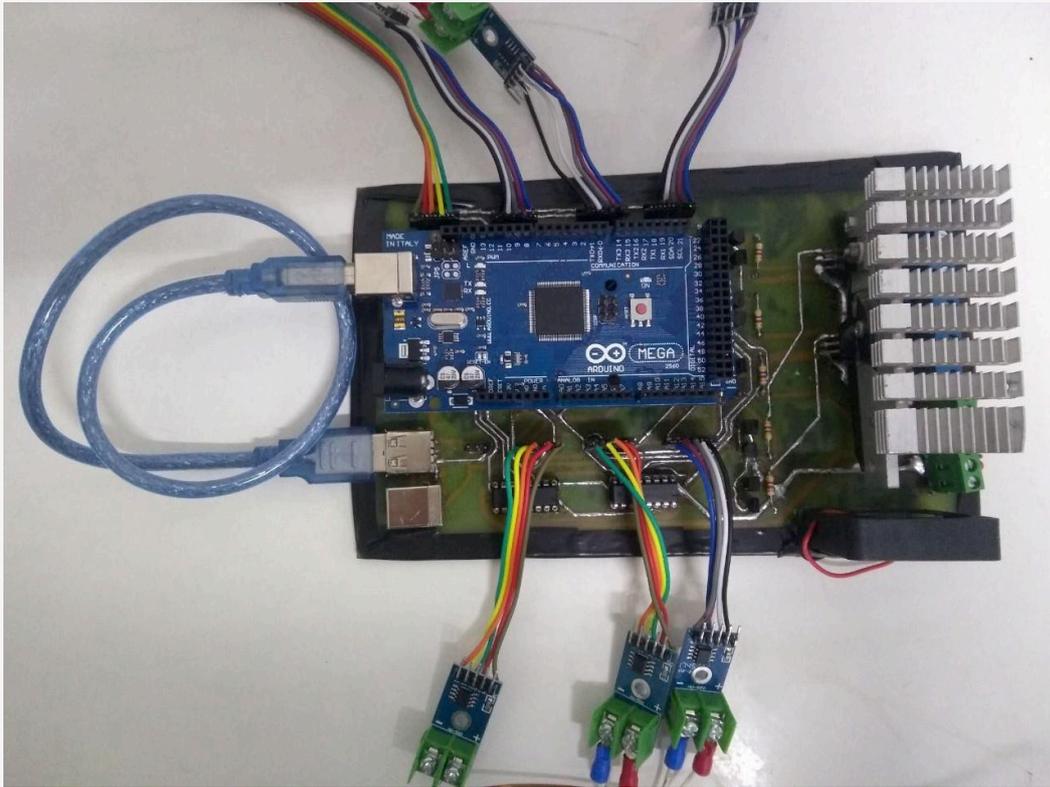


Figura 8: Cabo USB conectando o Arduino à placa de controle

- Nesse passo é preciso conectar uma fonte auxiliar a placa de controle. Nesse manual é usada uma fonte de 12V (utilizada em roteadores de internet, mas também pode ser encontrada em lojas de eletrônicos).

Obs: a fonte utilizada é mostrada na Figura 9, o seu terminal negativo é marcado com uma fita isolante. Em caso de dúvida testar a fonte com um multímetro, se a tensão lida for positiva, o terminal negativo estará conectado a ponteira negativa.



Figura 9: Fonte auxiliar de 12V

Conectar a fonte auxiliar nos seus respectivos terminais, mostrados na Figura 4. Esses terminais podem ser visualizados na Figura 10.

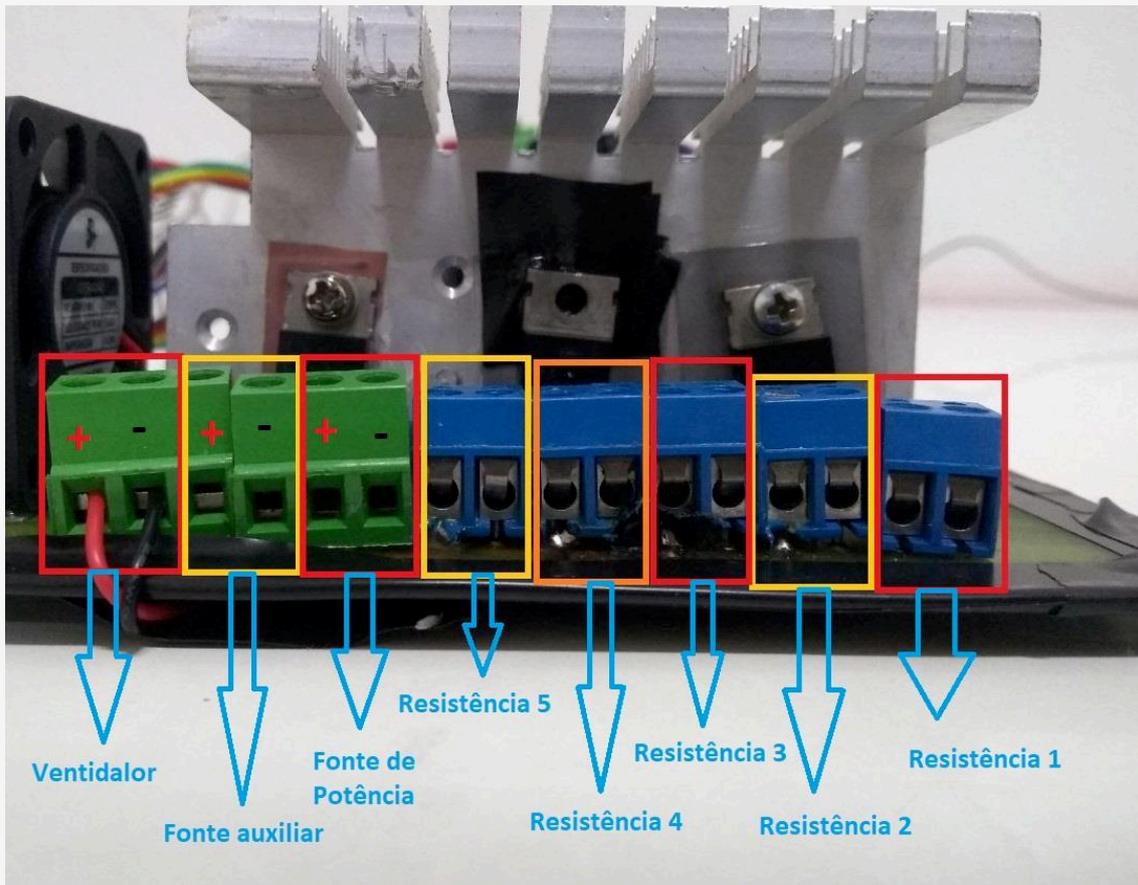


Figura 10: Terminais de potência da placa de controle.

6. Repita o mesmo passo para a fonte de potência. Nesse manual é usada uma fonte de 32V (utilizada em impressoras, mas também pode ser usada quaisquer fontes que respeitem os Limites do equipamento).

Obs: a fonte utilizada é mostrada na Figura 11, o seu terminal negativo é marcado com uma fita isolante. Em caso de dúvida testar a fonte com um multímetro, se a tensão lida for positiva, o terminal negativo estará conectado a ponteira negativa.



Figura 11: Fonte de potência 32V

7. Nesse passo, certifique-se de que tanto a fonte de potência quanto a auxiliar não devem estar ligadas na tomada e o resultado das conexões dos passos anteriores de ser como mostra a Figura 12

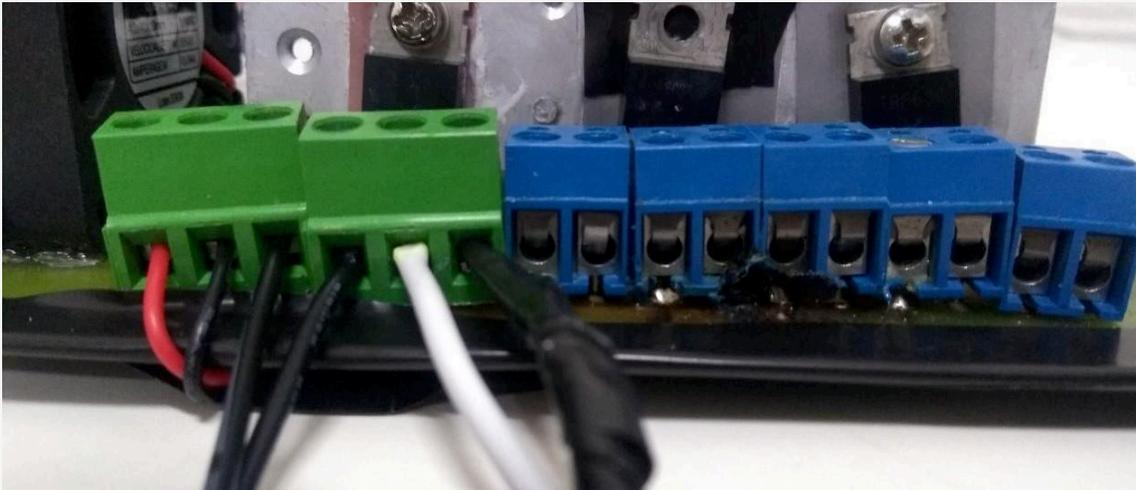


Figura 12: Terminais de potência com ambas as fontes conectadas.

8. Agora conecte as resistências aos terminais mostrados na Figura 4 e Figura 10. O resultado dessas conexões deve ser como mostra a Figura 13.

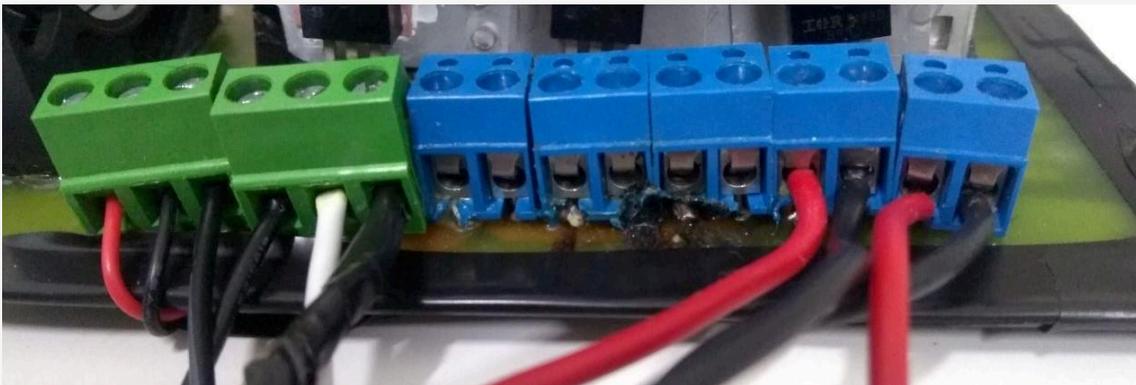


Figura 13: Terminais de Potência com resistências conectadas

9. Com o auxílio da Figura 4 identifique a numeração de cada termopar utilizado (de 1 a 7) e de cada resistência (de 1 a 5). Nesse passo é preciso fixar os termopares nas resistências, pois para que o controle das resistências funcione corretamente é preciso que seja feita essa associação de forma correta. Os termopares 6 e 7 são usados somente como medidores de temperatura.
Obs: (O termopar 1 mede a temperatura da resistência 1, o termopar 2 mede a temperatura da resistência 2, ...)
A forma de associar entre o termopar e a resistência fica a critério do usuário (fita isolante, colagem, ...)
10. Nesse ponto, todas as conexões entre os dispositivos da bancada estão feitas. Para finalizar, conecte a placa de controle ao computador usando um cabo USB e ligue a fonte de 12V e a fonte de potência. Dessa forma, finalizando todas as ligações.

Obs: Mesmo com a fonte ligada o ensaio não começará. Ele precisa antes ser configurado no MATLAB, pois o acionamento das resistências é controlado pelo Arduino e elas só aquecem enquanto o ensaio estiver ativo.

11. Como todas as conexões dos passos anteriores feitas abra o **MATLAB** e execute o arquivo .m “Controlador_de_Transferencia_de_Calor”. Para que o programa funcione adequadamente é importante que o arquivo “Controlador_de_Transferencia_de_Calor.fig” esteja na mesma pasta do arquivo .m executado.

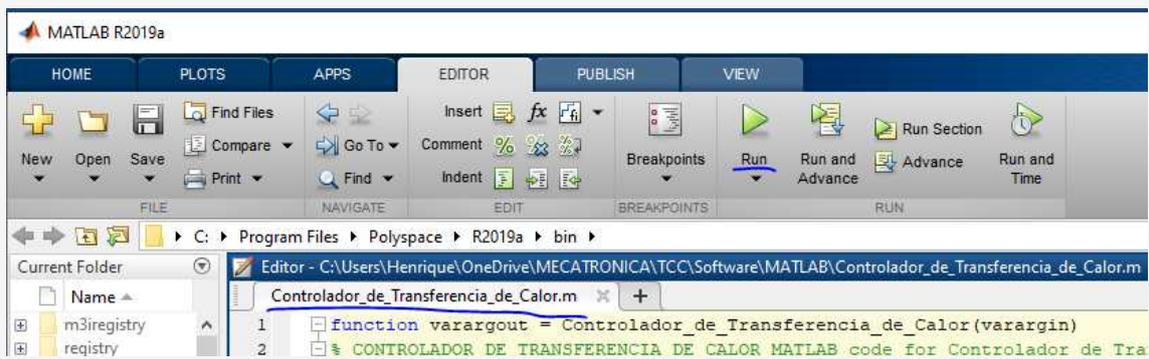


Figura 14: O arquivo Controlador_de_Transferencia_de_Calor aberto no MATLAB. Pressione “Run” para executar

12. Após o tempo de carregamento será aberto o painel mostrado na Figura 15.

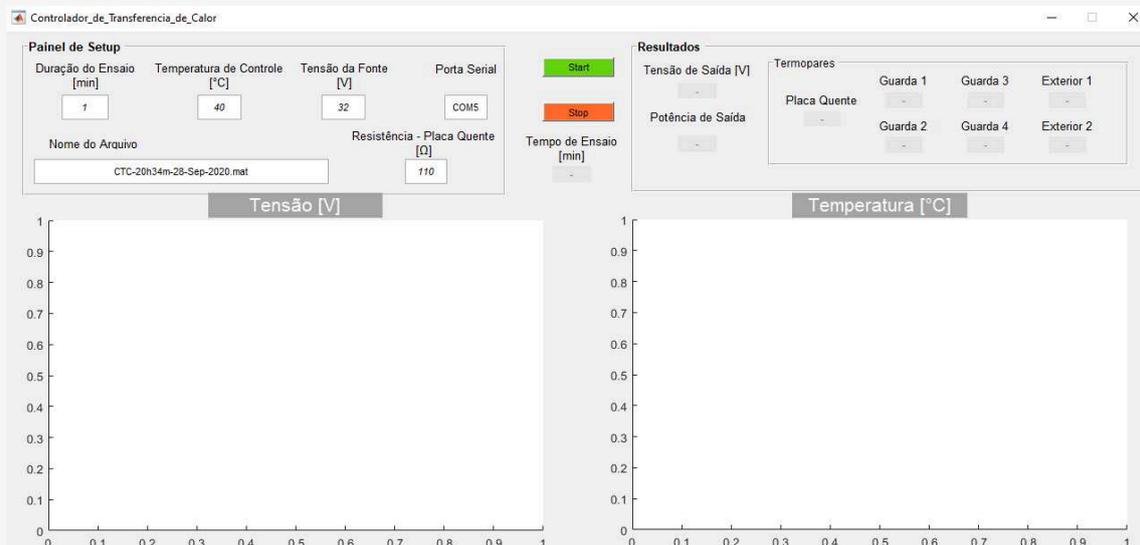


Figura 15: Painel de Controle da bancada.

Na primeira parte do painel, “Painel de Setup”, estão as configurações do ensaio que devem ser definidas pelo usuário. Para iniciar o ensaio é preciso definir: Duração do Ensaio [min] (Por quanto tempo o controlador ficará ligado), Temperatura de Controle [°C] (Temperatura que deverá ser mantida pelas resistências), Tensão da Fonte [V] (Valor da tensão da fonte de potência), Porta Serial (Porta em que o Arduino está conectado, é

possível conferir esse valor no gerenciador de dispositivos do Windows, digite gerenciador de dispositivos na barra de pesquisa e procure pela porta COM do Arduino Mega, as portas COM normalmente são COM3 COM5 COM7). Após a finalização do ensaio os dados serão salvos em um arquivo .mat de acordo com o campo 'Nome do Arquivo'. O valor da Resistência – Placa quente [Ω] é usado como referência para calcular o valor da potência que chega à resistência 1.

13. Após definir os valores do ensaio, clique no botão **Start** para iniciar o ensaio. Com o ensaio iniciado o painel “Resultados” mostrará a temperatura lida nos 7 sensores que a placa possui, a Tensão e Potência aplicada a placa quente. Além disso, será atualizado o campo Tempo de Ensaio, mostrando em minutos o tempo passado desde o começo do ensaio. Nos gráficos serão mostrados a tensão aplicada e a temperatura lida das da resistência 1 e 2 utilizadas no ensaio.
14. O ensaio continuará coletando dados e ajustando a temperatura para o valor configurado até que seja atingida a duração do ensaio definida. Para interromper o ensaio de forma antecipada, clique no botão **Stop**.

Descrição dos componentes

Cabo USB

É responsável por conectar o computador à Placa amplificadora, e por conectar a placa amplificadora ao Arduino, com o intuito de que esses componentes possam se comunicar. Além disso, é energia da porta USB do computador que alimenta o circuito digital da placa e os seus periféricos (Arduino e sensores).

Placa Amplificadora

A Placa Amplificadora é a interface entre os principais componentes. Ela foi projetada para integrar todos os componentes eletrônicos do projeto de forma robusta. É nela que são conectadas as resistências térmicas, as fontes, o microcontrolador e os sensores de temperatura, além de uma porta analógica de propósito genérico.

A placa é feita de fibra de vidro e possui um circuito impresso em duas camadas (Inferior e Superior). Foi projetada para suportar com segurança uma fonte de potência que forneça uma corrente de 4 amperes e uma tensão de 100 Volts. Um ambiente ventilado e refrigerado colabora com a performance térmica da placa.

Na Figura 4 Conectores da Placa Amplificadora Figura 4 é possível visualizar a placa Amplificadora e todos seus conectores. Há duas portas USB na extremidade da placa. Já as portas dos sensores ficam nas laterais da placa, o sensor analógico possui apenas 3 entradas, já os sensores de temperatura possuem cada um deles 5 portas.

Os pinos que conectam ao Arduino ficam no centro e permitem o encaixe do microcontrolador diretamente na placa.

As resistências são conectadas na parte frontal da placa, como resistências não possuem polaridade é indiferente a ordem em que elas são conectadas nos terminais. Porém é importante garantir que a numeração da resistência seja a mesma do sensor de temperatura para que o controlador funcione adequadamente.

A fonte de potência e a fonte de 12 V compartilham o mesmo referencial de terra na placa (terra analógico / A-GND). Já os terminais do ventilador estão conectados a fonte de 12V, de forma que o ventilado é alimentado por essa fonte.

Arduino Mega 2560

O Arduino é uma família de microcontroladores que atende ao segmento de prototipagem de soluções. O Arduino Mega2560 é uma das maiores placas dentre as versões disponíveis, permitindo acessar diversas funcionalidades ao mesmo tempo, devido ao grande número de portas disponíveis.

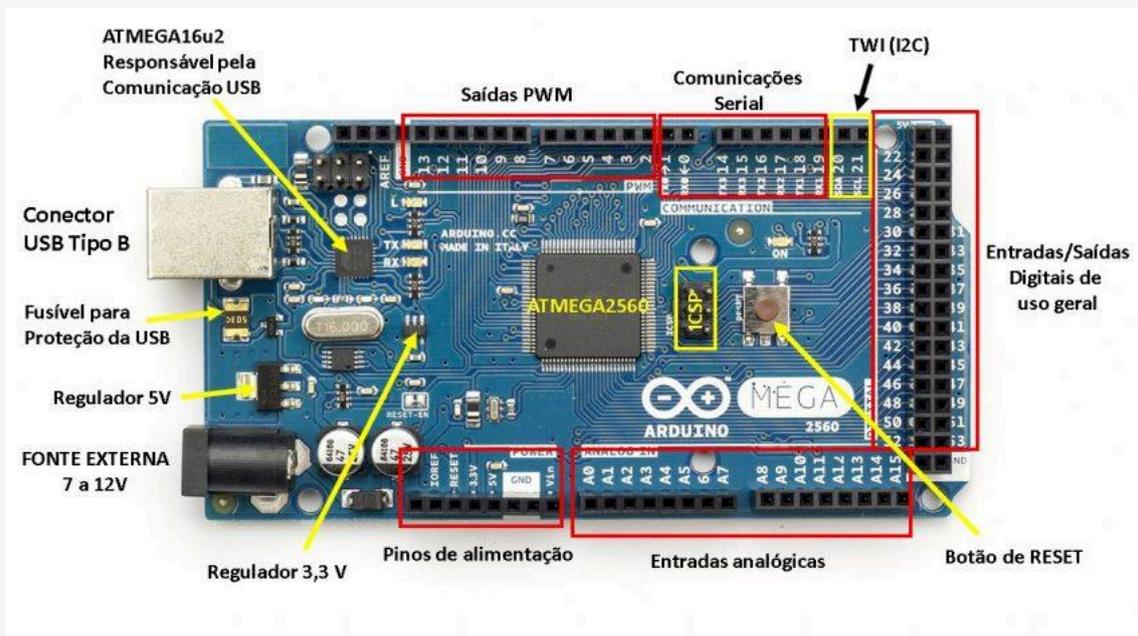


Figura 16 Funções dos terminais do Arduino

Para esse projeto foi feita uma adaptação no microcontrolador, foram soldados conectores na parte inferior da placa permitindo seu encaixe na Placa Amplificadora.

Sensor de Temperatura MAX6675

Esse sensor é um módulo para Arduino baseado no chip MAX6675 que amplifica o sinal de microvolts do termopar e o envia para o Arduino via comunicação digital (SPI).

É importante ressaltar que a ordem dos terminais do sensor é diferente da ordem dos terminais da placa amplificadora, essa sequência é corrigida com os fios soldados ao sensor.

O termopar para esse sensor deve ser do tipo K e é importante também que ele esteja conectado na ordem correta, do contrário a temperatura lida será negativa.

Termopar tipo K

Idealmente o termopar deve ter uma extensão curta e ser isolado para reduzir ruídos. É uma boa prática manter os cabos do termopar afastada de outras fiações energizadas (Tomadas, fonte de potência ...)

Fonte de 12V

Fontes de 12V são comuns no mercado e são um valor padrão para diversas aplicações. Nos ensaios é importante usar uma fonte de pelo menos 1A.

Fonte de Potência

Pode ser utilizado qualquer dispositivo eletrônico que seja capaz de fornecer a corrente necessária para o ensaio, ou seja, o dispositivo não será danificado ao fornecer energia elétrica ao ensaio. A corrente pode ser calculada pela relação: $I(A) = \frac{R(\Omega)}{V(volts)}$. Por segurança é importante calcular a corrente demandada pelas resistências para uma tensão máxima e conferir se a fonte utilizada é capaz de prover esse valor.

Da mesma forma é importante conhecer a resistência e saber seus limites de funcionamento em termos de tensão, corrente, potência e temperatura. Essa medida ajuda a manter a integridade do equipamento

Arduino IDE

IDE é sigla para ambiente de desenvolvimento e é usada para criação de software. O Arduino IDE pode ser baixado na internet e na Microsoft Store.

O Software de controle das resistências e comunicação com o MATLAB já está instalado no microcontrolador. Caso seja preciso reinstalar o nome do programa é 5_resistances_controler.ino.

Essa seção descreve como enviar software para o Arduino, caso seja necessário realizar alguma alteração no programa ou enviar o mesmo software para outro dispositivo, caso o atual seja danificado.

Após a instalação do software, conecte o Arduino na porta USB do computador, abra o Arduino IDE e selecione a placa utilizada (Arduino Mega 2560) conforma a Figura 17.

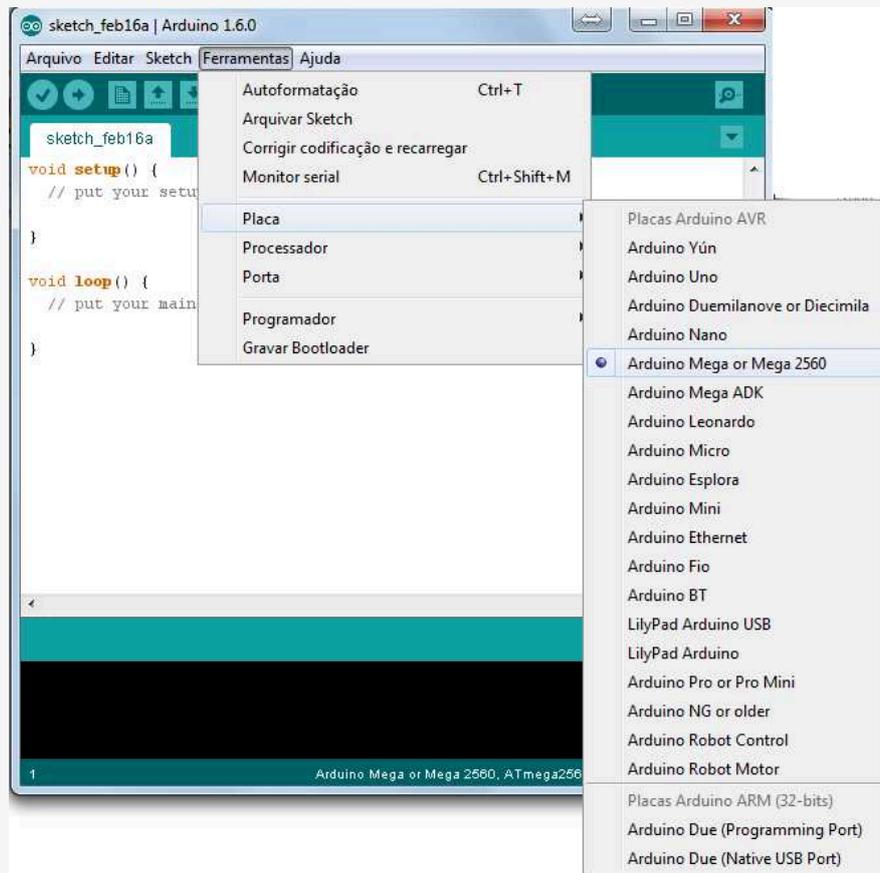


Figura 17 Seleção de placa na IDE do Arduino

Depois selecione a porta em que está conectada o Arduino, como mostra a Figura 18.

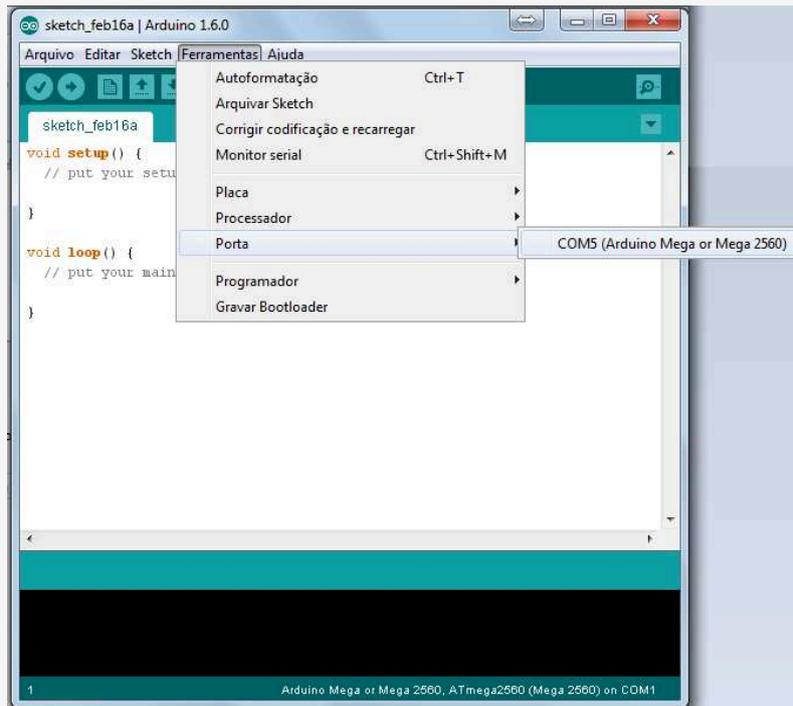


Figura 18 Seleção da porta na IDE do Arduino

Então clique no botão “Carregar” (seta para a direita e no canto superior esquerdo) para enviar o programa.

