

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL**

ANDERLEI ALCEBÍADES MARTINS

ESTAÇÃO DE SOLDA INFRAVERMELHO DE BAIXO CUSTO

FLORIANÓPOLIS, 2021.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL**

ANDERLEI ALCEBÍADES MARTINS

ESTAÇÃO DE SOLDA INFRAVERMELHO DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Eletrônica Industrial.

Professor Orientador: Flávio Alberto Bardemaker Batista, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2021.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Martins, Anderlei Alcebíades

Estação de Solda Infravermelho de Baixo Custo.

Anderlei Alcebíades Martins; orientação de Flávio

Alberto Bardemaker Batista – Florianópolis, SC, 2021.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto

Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Curso

Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial.

ESTAÇÃO DE SOLDA INFRAVERMELHO DE BAIXO CUSTO

ANDERLEI ALCEBÍADES MARTINS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Eletrônica Industrial e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 29 de abril, 2021.

Banca Examinadora:

FLABIO ALBERTO
BARDEMAKER
BATISTA:71595902015

Assinado de forma digital por
FLABIO ALBERTO BARDEMAKER
BATISTA:71595902015
Dados: 2021.06.11 10:46:34
-03'00'

Professor Flávio Alberto B. Batista, Dr. Eng.

MURIEL
BITTENCOURT DE
LIZ:89299469920

Assinado de forma digital por
MURIEL BITTENCOURT DE
LIZ:89299469920
Dados: 2021.06.11 15:07:30 -03'00'

Professor Muriel Bittencourt de Liz, Dr. Eng.

REGINALDO
STEINBACH:039226019
01

Assinado de forma digital por
REGINALDO
STEINBACH:03922601901
Dados: 2021.06.11 15:16:10 -03'00'

Professor Reginaldo Steinbach, Me. Eng.

A todos que conseguem ser apaixonados pelo que fazem.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por me dar saúde e não me deixar desistir diante das dificuldades que surgiram, a fé me ajudou todos os dias.

A cada professor dedico um carinho especial por ter me ajudado em cada etapa, durante esses anos, mais que suas disciplinas também me deram aula de responsabilidade e crescimento. Um agradecimento a parte ao professor Flávio, meu orientador, que dedicou atenção e paciência infinita para me ajudar.

Nessa caminhada fiz amizades passageiras e amizades que se tornaram fraternais, quero agradecer a todos, e em especial ao amigo Ismael, que não mediu esforços e foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

A toda a família que incentiva desde o início e também esperou ansiosamente por esse momento.

Obrigado principalmente a minha esposa, Anilvane, que esteve junto na parte mais difícil dessa jornada, a minha mãe Marlene, que apesar de não ter muito estudo, nunca me deixou desistir, e ao meu pai Alcebíades que é meu guia e exemplo para tudo.

Obrigado.

RESUMO

Este documento apresenta o desenvolvimento de uma máquina (estação de solda) dedicada a soldas de componentes BGA (Ball Grid Array) ou demais componentes SMD (Surface Mount Device) de forma prática e com baixo custo. O projeto compreende o desenvolvimento e testes das unidades aquecedoras, circuitos de aquisição e tratamento de sinais analógicos, software de interface, sistema de controle e circuitos de potência. O conjunto permite ao usuário configurar por meio de um *software*, os parâmetros de tempo e temperatura para o aquecimento da solda. O *software* desenvolvido oferece ao usuário o acompanhamento do processo em tempo real, estabelecendo uma comunicação serial com um microcontrolador, que executa o controle do sistema de temperatura. Este conjunto de soluções visa realizar um processo pré definido pelo usuário afim de garantir o controle de tempo e temperatura adequado para processos de solda. Este projeto utiliza lâmpadas incandescentes como fonte de calor, medidas de temperatura através de sensores termopar e sistema de controle microcontrolado. As técnicas usadas têm o objetivo de atender o requisito de baixo custo, porém não ferem os conceitos aprendidos durante o curso. O equipamento não é apenas teórico e foi construído e testado em condições reais.

Palavras-chave: Estação de solda. Solda infravermelho. BGA. SMD. Sistema de controle,

ABSTRACT

This document presents the development of a soldering station machine targeted to BGA (Ball Grid Array) or regular SMD (Surface Mount Device) devices in a practical and inexpensive way. The project includes the development and testing of heating units, acquisition circuits, analog signal conditioning, interface software, control system and power circuits. The equipment software allows time and temperature parameters configuration for solder heating. Software also allows real time process monitoring, establishing a serial communication with a microcontroller, which performs system temperature control. This project aims to carry out a user pre-defined process to ensure adequate time and temperature control for soldering processes. It uses incandescent lamps as a heat source, temperature measurements through thermocouple sensors and a microcontrolled control system. The techniques used are intended to meet low-cost requirement, but keeping the concepts learned during the course. The equipment is not just theoretical – it was built and tested in real conditions.

Keywords: Soldering station. Infrared soldering. BGA. SMD. Control system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Exemplos de componentes PTH	14
Figura 2	Exemplos de componentes SMD	15
Figura 3	Exemplo de componente BGA	15
Figura 4	Estação de ar	16
Figura 5	Perfil de temperatura	17
Figura 6	Estação de solda com câmera	18
Figura 7	Estação de solda simples com aquecedor inferior	19
Figura 8	Espectro eletromagnético	20
Figura 9	Lâmpada IR para reposição	20
Figura 10	Lâmpada IR Philips	21
Figura 11	Junção de referência	22
Figura 12	LM35	23
Figura 13	Exemplo de PWM	25
Figura 14	Controle realimentado	25
Figura 15	Diagrama de blocos	26
Figura 16	Infra vermelho halógenas	29
Figura 17	Lâmpada dicróica	29
Figura 18	Teste dicróica	30
Figura 19	Suporte para quatro lâmpadas	30
Figura 20	Tubo quadrado para alojamento de lâmpadas	31
Figura 21	Lâmpada halógena palito	31
Figura 22	Circuito de medição do termopar	33
Figura 23	Acionamento de potência	34
Figura 24	Conversor USB TTL	35
Figura 25	Software de Interface com o usuário	35
Figura 26	PWM Rápido	38
Figura 27	CTC	39
Figura 28	Referencia 1,1 V	40
Figura 29	Alimentação	42
Figura 30	Face da montagem	43
Figura 31	Alojamento de lâmpadas	43
Figura 32	Interior	44
Figura 33	Encaixe com BGA	44
Figura 34	Medida de temperatura intermediária	45
Figura 35	Medida de temperatura alta	45
Figura 36	Degrau de PWM de 30 % para 40 %	46
Figura 37	Degrau para G(s)	47
Figura 38	Degrau de malha fechada em S e Z	49
Figura 39	Degrau de 15 % para 35 % de <i>DutyCycle</i> no aquecedor superior	50
Figura 40	Degrau de 5 % para 15 % de <i>DutyCycle</i> aquecedor inferior .	51
Figura 41	Degrau de malha fechada em S e Z do aquecedor superior .	52

Figura 42	Análise de malha fechada e erro com equações recursivas ..	53
Figura 43	Degrau de malha fechada em S e Z do aquecedor inferior ...	54
Figura 44	Análise de malha fechada e erro com equações recursivas ...	55
Figura 45	Degrau de 150 °C para 190 °C	56
Figura 46	Partindo de 100 °C até alcançar 150 °C	57
Figura 47	Frequência de amostragem	57
Figura 48	Frequência do PWM	58
Figura 49	Ciclo ativo	59
Figura 50	Configuração das três etapas	60
Figura 51	Resultado do comportamento das três etapas	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	12
1.2 Problema de pesquisa	12
1.3 Objetivo Geral.....	13
1.4 Objetivos Específicos	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 Componentes SMD e BGA.....	14
2.2 Particularidades dos componente BGA	16
2.3 Estação de solda por infra vermelho	17
2.4 Elemento aquecedor	19
2.5 Medição de temperatura	21
2.6 Microcontroladores.....	23
2.7 Modulação por largura de pulso	24
2.8 Sistemas de controle	25
2.8.1 Sistemas de controle digital	27
3 METODOLOGIA	28
4 TESTES DAS ETAPAS	29
4.1 Elemento aquecedor	29
4.2 Sensor de temperatura	32
4.3 Acionamento de potência.....	33
4.4 Comunicação serial	34
4.5 Interface do usuário	35
4.6 Microcontrolador.....	36
4.7 Alimentação.....	42
4.8 Montagem	43
4.9 Medida de temperatura	44
4.10 Controle digital.....	46
5 TESTE FINAL	56
6 CUSTOS	61
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS	64
APÊNDICES	65
APÊNDICE A Código fonte do matlab para projeto do aquecedor superior	66
APÊNDICE B Código fonte do matlab para projeto do aquecedor inferior	68
APÊNDICE C Características do atmega328p.....	70
APÊNDICE D Código fonte do microcontrolador.....	72
APÊNDICE E Circuito completo	76

1 INTRODUÇÃO

Realizar um processo de solda em componentes BGA (Ball Grid Array) ou SMD (Surface Mount Device) não ocorre de forma trivial, seja pela impossibilidade de alcançar os terminais ou seja pela sensibilidade térmica de alguns componentes. Para tal, se faz necessário o uso de equipamentos específicos que incluem formas distintas de aquecimento, porém, indispensavelmente o controle de temperatura. Esses equipamentos, conhecidos como estação de solda ou estação de retrabalho podem, dependendo da complexidade de recursos, variar de dois mil reais até algumas centenas de milhares de reais. Para um técnico, o custo de dois mil reais ainda pode ser considerado alto, dependendo da demanda de trabalho existente.

Visando uma baixa produção ou até mesmo o usuário doméstico, estes valores podem ser impraticáveis. Uma possível alternativa são equipamentos de poucos recursos e confiabilidade que tornam o uso prático por vezes inviável.

Neste trabalho, busca-se unir características de automatização, com um elemento aquecedor de custo extremamente baixo, atendendo uma vasta gama de usuários.

1.1 Justificativa

Apesar de existirem comercialmente elementos aquecedores de menor custo, a exemplo dos baseados em fluxo de ar aquecido, a alternativa mais interessante é utilizar aquecedores infravermelho. Isso porque os aquecedores baseados em ar aquecido implicam em dificuldades técnicas como deslocamento de componentes. Sabendo-se que lâmpadas incandescentes geram calor quase que na totalidade de sua potência, será usado desse princípio para realizar o procedimento.

Esse trabalho justifica-se pela necessidade de desenvolver um equipamento adequado para uma técnica incomum, visando chegar em resultados práticos similares aos demais.

1.2 Problema de pesquisa

O aquecimento por infravermelho é uma das formas mais desejadas para soldagem de componentes BGA, contudo é também a forma mais cara. Será possível então utilizar essa forma de aquecimento alternativa de baixo custo, adicionando controle de temperatura e automatização do processo?

Conforme descrito nesse estudo, será abordada uma técnica incomum para tal função, uma vez que lâmpadas incandescentes não são desenvolvidas com o propósito de gerar calor, mas com excelentes resultados tanto em custo como em funcionalidade. Todos os problemas e dificuldades foram contornados com soluções bastante disponíveis e com fáceis adaptações.

De forma geral, um computador simples de uso doméstico com uma interface gráfica, uma pequena placa com microcontrolador, um elemento aquecedor com lâmpadas incandescentes e um módulo USB-serial. Com isso chegar a resultados semelhantes ao de equipamentos profissionais e com custo extremamente abaixo do mercado.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é realizar de forma prática e barata um equipamento para solda de circuitos com controle de temperatura automatizado, utilizando o calor de lâmpadas incandescentes.

1.4 Objetivos Específicos

Para esse projeto será necessário adequar e desenvolver as seguintes etapas:

- a) Definir um conjunto de lâmpadas com calor suficiente para soldagem.
- b) Projetar um circuito de potência para acionamento do elemento aquecedor
- c) Projetar um circuito eletrônico para medição de temperatura.
- d) Desenvolver o firmware para um microcontrolador gerenciar o controle de temperatura.
- e) Desenvolver o software para interface com o usuário.
- f) Realizar testes para comprovar funcionamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura se faz necessária para facilitar o entendimento das etapas e justificar o motivo das decisões tomadas. Apesar de todos os conceitos serem simples, alguns detalhes não fazem parte do dia a dia e serão abordados.

2.1 Componentes SMD e BGA

Com o passar do tempo a eletrônica vem sofrendo alterações em quase todos os sentidos, uma alteração muito presente é a redução do tamanho dos componentes, visando diminuir o espaço físico ocupado, diminuindo assim o tamanho das placas eletrônicas. Desta forma, apesar de ainda presentes, cada vez mais os componentes clássicos conhecidos como *Pin Throught Hole*(PTH), conforme Figura 1, estão dando lugar aos *SMDs* e *BGAs*.

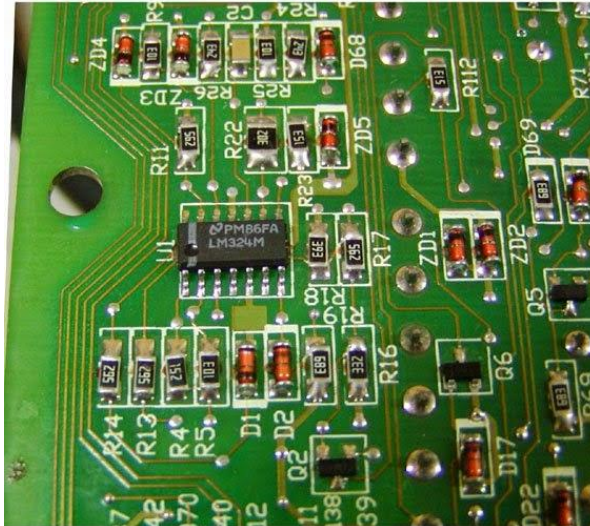
Figura 1 - Exemplos de componentes PTH



Fonte: tecnomon

Os componentes PTH são extremamente fáceis de manusear e geralmente com menor custo, porém implicam em necessidade de placas de tamanhos algumas vezes inadequados, a exemplo, temos hoje no nosso dia a dia os *smartphones* que seriam impraticáveis com componentes desse tipo.

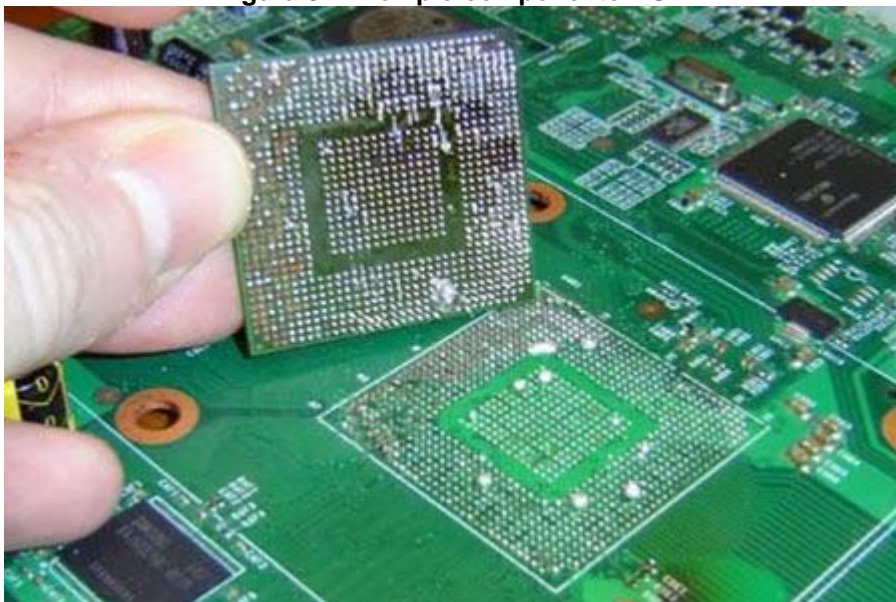
Dessa forma estamos convivendo cada vez mais com componentes SMD, exemplificados na Figura 2, menores, e que já começam a apresentar certas dificuldades para a realização das soldas.

Figura 2 - Exemplo de componentes SMD

Fonte: eletronica90.blogspot

O espaço reduzido dificulta o acesso com os ferros de solda e exigem ser manuseados com pinças.

Temos ainda os componentes BGA, em detalhes na Figura 3. Neste caso, os terminais dos componentes estão localizados na parte inferior, tornando o acesso impossível ao ferro de solda.

Figura 3 - Exemplo componente BGA

Fonte: maseunaosabia.blogspot

Para esse tipo de componente, se faz obrigatória a utilização de outro método de aquecimento, como por exemplo o fluxo de ar quente, a exemplo na Figura 4.

Figura 4 - Estação de ar



Fonte: lojadomecanico

A soldagem por ar quente elimina a necessidade de contato físico com os terminais do componente. Como o componente BGA não tem seus terminais acessíveis ao ferro de solda, esta é uma solução viável em determinados casos, porém se torna inadequada devido ao deslocamento de componentes em algumas situações. Para evitar esse problema, uma das melhores soluções é a soldagem por infravermelho, que será abordada em mais detalhes no decorrer desse trabalho.

2.2 Particularidades dos componentes BGA

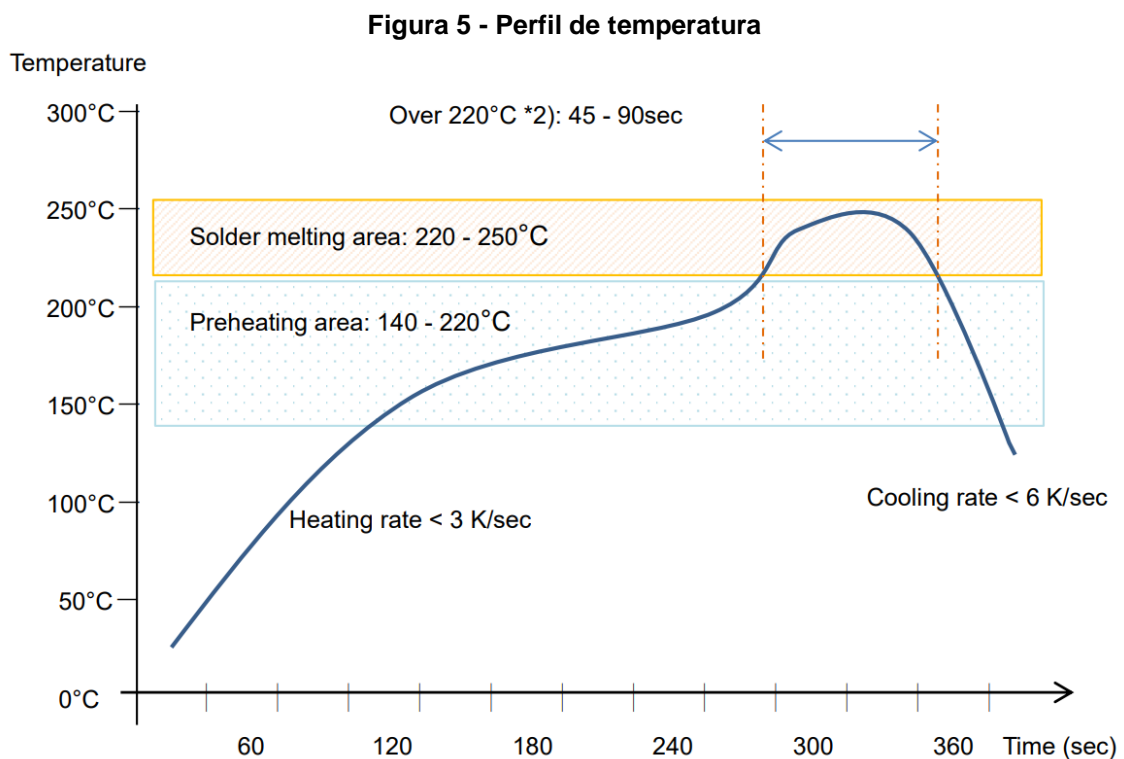
Aprofundando nas características específicas dos componentes BGA, nos deparamos com mais dificuldades. Em alguns casos, os componentes têm dimensões grandes o suficiente para que o calor da extremidade não seja o mesmo do centro, onde se aponta o fluxo de ar. Isso pode tornar impossível fazer com que a solda alcance o ponto de fusão, a menos que aumentemos a temperatura do ar, o que por sua vez, pode fazer com que o centro do componente exceda a temperatura máxima permitida. Isso exige um trabalho minucioso e delicado do operador.

O soprador de ar deve ser constantemente deslocado por toda extensão do componente afim de distribuir o calor de maneira uniforme, o que é impraticável quando se tem tolerâncias pequenas de variação especificadas pelo fabricante. Como a distribuição de ar não é homogênea quando realizada

manualmente, é comum aparecerem problemas de sobreaquecimento, acarretando em queima ou trinca do componente.

Outro ponto muito crítico é a tolerância à elevação de temperatura, mesmo que de forma uniforme. Para garantir que toda a massa que compreende o componente aqueça com tempo suficiente para que o calor se espalhe sem provocar danos, o fabricante informa uma taxa de aquecimento adequada. Nesse processo, várias etapas com temperaturas distintas devem ser obedecidas, tornando assim, definitivamente impraticável sem uma automatização.

De acordo com Epson (BGA Package Mount Manual, 2018, p. 17), a sugestão para um perfil de temperatura de solda, ilustrado na Figura 5, que garante a segurança do componente mediante o processo de solda. Um perfil de temperatura traz os parâmetros ideais de tempo de aquecimento e temperaturas em que o componente pode ser submetido, apesar de admitir variações, extrapolar tais orientação podem acarretar em danos.



Fonte: BGA Package Mount Manual

2.3 Estação de solda por infra vermelho

Estações de solda por infravermelho são as que oferecem as melhores características de automação e confiabilidade. Também não oferecem risco de deslocamento dos componentes e em quase a totalidade, são configuráveis e automatizadas. Em contrapartida possuem um custo muito elevado. O mercado

oferece, inclusive, equipamentos com braços robóticos que retira ou insere o componente automaticamente, e ainda inclui câmeras, como no exemplo da figura 6, que conferem o alinhamento e dá ao usuário a possibilidade de acompanhar por monitores, estas podem alcançar um custo de centenas de milhares de reais.

Figura 6 - Estação de solda com câmera



Fonte: cnc-bga-oca.com

Claramente, o custo de um equipamento como esse é inviável para as necessidades de um usuário de pouca demanda. As principais características desejadas para o processo de solda são as seguintes: não ter fluxo de ar, conter controle automatizado de vários estágios e aquecimento em ambas as faces da placa.

O aquecimento em ambas as faces da placa é importante para evitar empenamento e para que minimize a dissipação de calor em trilhas muito espessas. A Figura 7 ilustra um exemplo de máquina de uma fabricante chinesa que atende a esses requisitos, com valor aproximado de cinco mil reais.

Figura 7 - Estação de solda simples com aquecedor inferior



Fonte: aliexpress

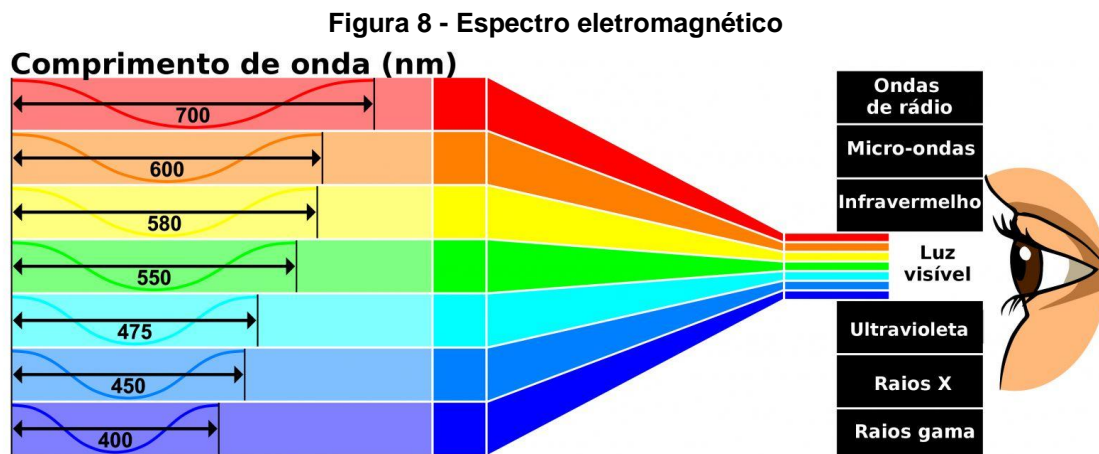
2.4 Elemento aquecedor

Apesar de possível outras formas de aquecimento, focaremos exclusivamente na fonte de calor de nosso interesse. A máquina do exemplo da Figura 7 utiliza como fonte de calor uma lâmpada de infravermelho. As lâmpadas de infravermelho são desenvolvidas para emitirem o máximo possível de radiação no comprimento de onda invisível.

O infravermelho é um tipo de radiação eletromagnética que apresenta frequência menor que a da luz vermelha e, por isso, não está dentro do espectro eletromagnético visível. Por esse motivo, essa radiação não pode ser percebida pelo olho humano. O infravermelho possui comprimento de onda entre $1 \mu\text{m}$ ($1 \times 10^{-6}\text{m}$) e 1mm ($1 \times 10^{-3}\text{m}$) e não é uma radiação ionizante, ou seja, não oferece riscos à saúde humana.

Apesar de não visível, pode ser detectado por dispositivos óticos específicos ou na forma de calor, uma vez que esse comprimento de onda tem a característica de transportar calor.

“Em 1867, quando Maxwell publicou pela primeira vez detalhadamente a sua teoria de campo eletromagnético, o espectro de frequências conhecido estendia-se apenas do infravermelho, através do visível, até a ultravioleta. Apesar desta região ser de primordial importância em ótica, ela constitui apenas um pequeno segmento do vasto espectro eletromagnético”, (HECHT, 2012, p. 101), ilustrado na Figura 8.



Fonte: pinterest

Ainda de acordo com a HECHT (2012, p. 104) "qualquer material pode absorver e emitir radiação infravermelho com base nos fenômenos de agitação molecular" e a energia radiante nos extremos comprimentos podem ser geradas por osciladores de microondas ou por corpos quentes como carvão em brasa ou ainda fontes incandescentes como lâmpadas. Estes comprimentos de onda tem a característica de transportar energia com facilidade e por tal motivo, uma excelente alternativa para o propósito deste trabalho.

Especificamente, a máquina do fabricante chinês do exemplo anterior utiliza uma lâmpada, como a mostrada na Figura 9, que pode ser encontrada no mercado para eventual substituição. Esta, com potência de 150 Watts e com preço em torno de R\$ 450,00, assemelha-se em tamanho e formato a uma lâmpada dicróica comum.

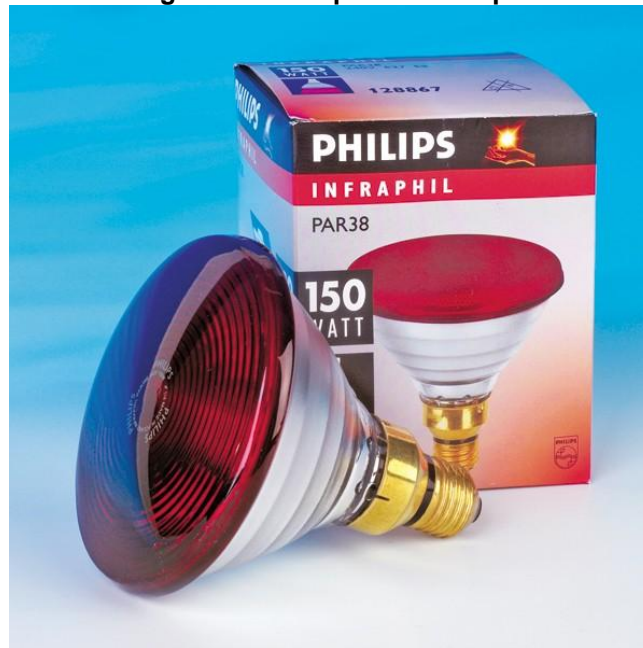
Figura 9 - Lâmpada IR para reposição



Fonte: aliexpress

Outro exemplo de lâmpada infravermelha que pode ser encontrado no mercado, como a Infraphil®, da fabricante Philips, apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Lâmpada IR Philips



Fonte: shopfisio

Esta lâmpada custa em torno de R\$ 200,00, porém sua grande dimensão impede o uso para a finalidade desejada.

2.5 Medição de temperatura

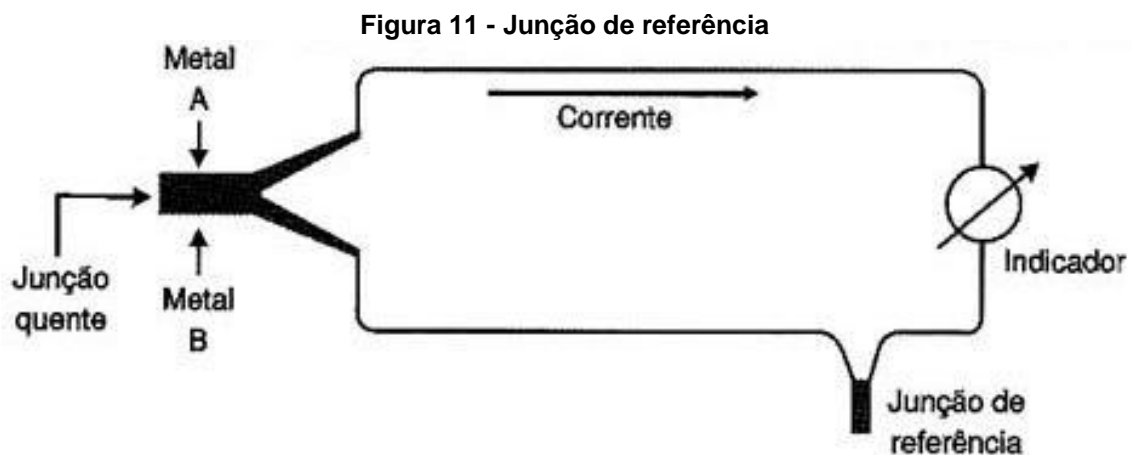
Tipicamente, os termistores são de baixo custo e amplamente usados para medir temperatura. Um bom exemplo são os NTCs (*Negative Temperature Coefficient*), estes têm sua resistência alterada em função da temperatura, quanto maior a temperatura menor a resistência. Apesar de não serem lineares, os NTCs poderiam ser utilizados, porém normalmente a faixa de operação máxima é em torno de 180 °C. Acima dessa temperatura o preço dos NTCs são bastante elevados.

Outra alternativa muito comum são os termopares. De forma básica, termopares são sensores que apresentam diferença de potencial em seus terminais, proporcional a temperatura.

Segundo Thomazini (2011, p. 94), tal característica é explicada pelo efeito *Seebeck*, nome em homenagem ao seu descobridor, Thomas Seebeck, que observou que a junção de metais diferentes gera uma tensão elétrica em função da temperatura. Alguns materiais típicos são usados para a junção, que abrangem diferentes sensibilidades e faixas de temperatura. Um meio termo de tais características e com baixo custo é o tipo K (junção de

romo e níquel). A contrapartida de tal sensor é a tensão extremamente baixa de 41 μV por grau, que exige eletrônica específica para sua medição e necessidades de uma junção de referência.

Uma vez que a junção de interesse gera uma diferença de potencial proporcional apenas no ponto da medição, a outra junção deve estar fora da fonte de calor, exemplificado na Figura 11. Deste modo é possível determinar o quanto a temperatura do ponto de medição está acima da temperatura ambiente. Somando-se os valores é possível obter o valor absoluto da temperatura medida. Apesar dessas especificidades desse sensor, seu baixo preço e robustez o faz uma ótima alternativa.



FONTE: filipeflop

Para a junção de referência, faz-se necessária a utilização de outra forma de medição e que seu resultado seja absoluto. Uma solução simples são os circuitos integrados destinados para esse propósito, a exemplo do LM35.

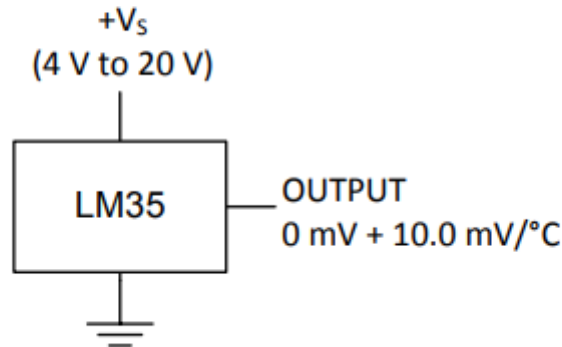
O LM35 é um circuito integrado que tem como função a medição de temperatura. Sua saída é um sinal de tensão linear em função da temperatura. Alimentado com tensão entre 4 V a 20 V, sua variação de saída é de 10 $\text{mV}/^\circ\text{C}$.

Sua relação de precisão e custo, e sua facilidade de montagem, ilustrada na Figura 12, o torna uma excelente escolha para o projeto em questão.

De acordo com o fabricante, suas características específicas como faixa de temperatura ($-55\text{ }^\circ\text{C}$ até $150\text{ }^\circ\text{C}$) e precisão atendem amplamente a função de compensação de junção fria utilizada nesse projeto, conforme será apresentado posteriormente.

Figura 12 - LM35

Basic Centigrade Temperature Sensor (2°C to 150°C)



Fonte: datasheet LM35

2.6 Microcontroladores

Apesar de vasta possibilidade de fabricantes com recursos e preços variados estarem disponíveis no mercado, a decisão de utilizar o Atmega328P da linha AVR, se deu levando em consideração a grande aceitação comercial deste microcontrolador. Este microcontrolador está presente em grande parte dos *kits* de desenvolvimento Arduino, trazendo assim ampla quantidade de material literário disponível e atende aos recursos necessários para esse projeto como, processamento, memória, *timers*, e *ADC*.

Um microcontrolador é um sistema microprocessado com várias funcionalidades (periféricos) disponíveis em um único *chip*. Basicamente, um microcontrolador é um microprocessador com memórias de programa, de dados e RAM (*Random Access Memory*), temporizadores e circuitos de *clock* embutidos. O único componente externo que pode ser necessário é um cristal para determinar a frequência de trabalho. A grande vantagem de se colocar várias funcionalidades em um único circuito integrado é a possibilidade de desenvolvimento rápido de sistemas eletrônicos com o emprego de um pequeno número de componentes (LIMA; VILLAÇA, 2012, p.9).

"As principais características dos microcontroladores AVR são:

- executam a maioria das instruções em 1 ou 2 ciclos de *clock* (poucas em 3 ou 4) e operam com tensões entre 1,8 V e 5,5 V, com velocidades de até 20 MHz.
- estão disponíveis em diversos encapsulamentos;
- alta integração e grande número de periféricos com efetiva compatibilidade entre toda a família AVR;

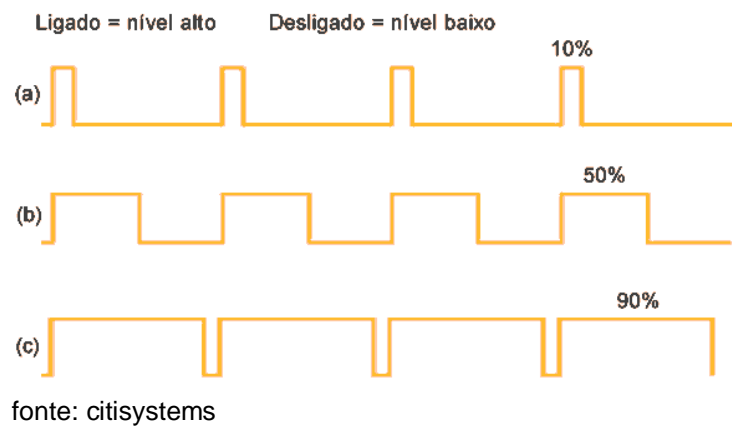
- possuem vários modos para redução do consumo de energia e características adicionais (*picoPower*) para sistemas críticos;
- possuem 32 registradores de propósito geral e instruções de 16 *bits* (cada instrução ocupa 2 bytes na memória de programa);
- memória de programação flash programável *in-system*, SRAM e EEPROM;
- facilmente programados e com debug *in-system* via interface simples, ou com interfaces JTAG compatível com 6 ou 10 pinos;
- um conjunto completo e gratuito de softwares;
- preço acessível." (LIMA E VILLAÇA, 2012, p.13).

2.7 Modulação por largura de pulso

A modulação por largura de pulso, ou PWM (*Pulse Width Modulation*), consiste em controlar o ciclo ativo de trabalho ao qual uma carga receberá. A dosagem de potência se dá pela variação do tempo em que o circuito permanece acionado ou em repouso, conhecido como *duty cycle* ou ciclo ativo, exemplificado na Figura 13.

O acionamento por PWM é importante para este trabalho, pois apesar de usar lâmpadas que em princípio são desenvolvidas para serem acionadas com corrente alternada, neste trabalho, as mesmas serão usadas em corrente contínua retificada em onda completa de acordo com HART (2011, p. 111) afim de facilitar o circuito de acionamento, principalmente por dispensar chaveadores bidirecionais, conforme descrito por Barbi (2006, p. 225). Deste modo, o acionamento será realizado da forma mais clássica e sem a preocupação de sincronia com a rede elétrica e apenas com um divisor de tensão como citado por Boylestad (2013, p. 360). Sendo assim, o circuito de potência terá seu acionamento com os transistores chaveadores trabalhando sempre em corte ou saturação conforme demonstrado na Figura 16, evitando que estes dissipem potência.

Figura 13 - Exemplo de PWM

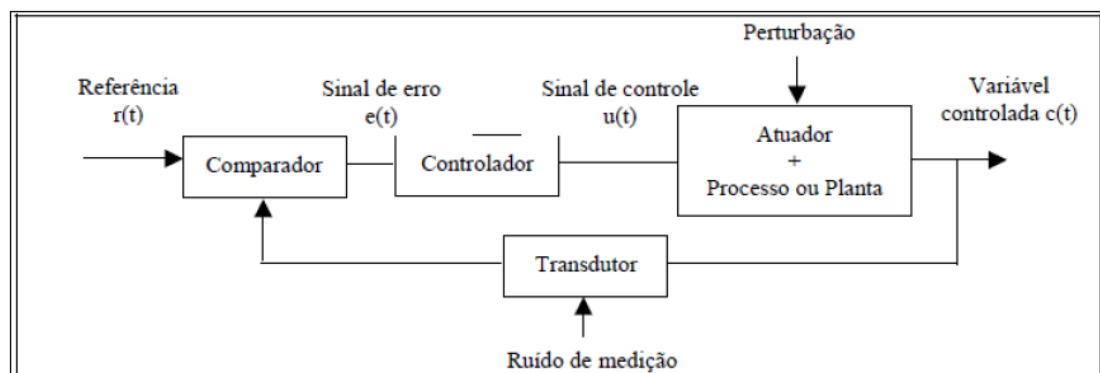


2.8 Sistema de controle

"Um sistema de controle é um mecanismo manual ou automático usado para controlar (regular/dirigir/comandar) um determinado processo ajustando ou mantendo variáveis físicas tais como temperatura, velocidade ou vazão. Em um sistema de controle, uma saída $c(t)$ (variável controlada) é controlada de alguma maneira pré-determinada por uma entrada $u(t)$ (sinal atuante)" (VILLAÇA, 2014, p. 8).

Um sistema de controle de malha fechada, objeto deste estudo, utiliza um valor de referência para poder atuar no sistema. O controlador é constantemente realimentado pela saída do sistema para manter correções constantes. De forma geral, a saída é comparada com uma referência que determina um erro, onde este impõem uma ação no controlador e a planta responde a perturbação imposta pelo controlador atuando na saída, ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Controle realimentado



Fonte VILLAÇA, 2014, p. 8

Em outras palavras, em um sistema de malha fechada, o controlador atua na planta de modo que o erro entre a saída e a entrada sejam reduzidos.

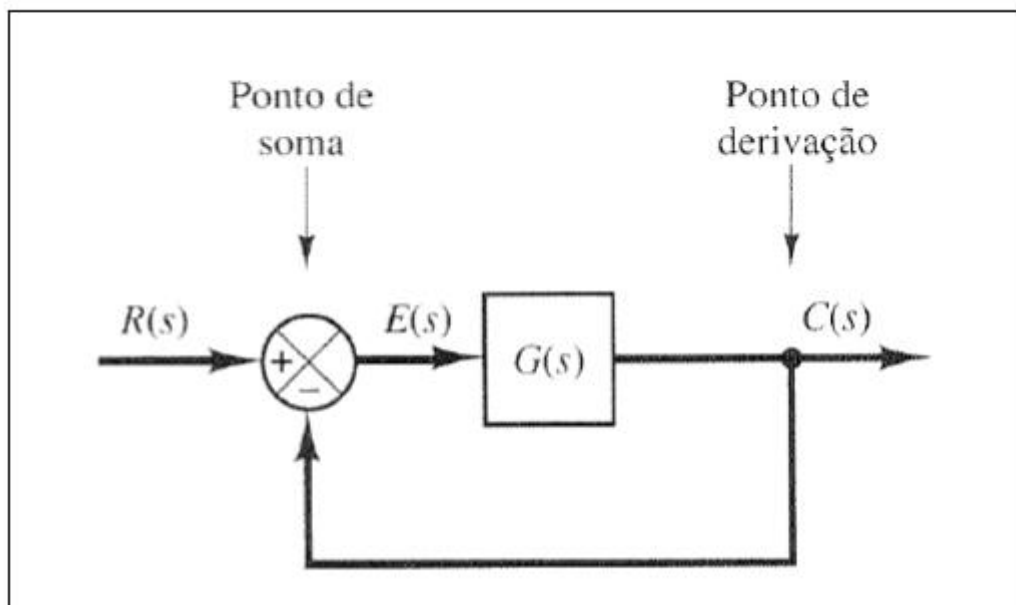
Uma forma típica de representação das funções do sistema é através de diagrama de blocos, onde cada etapa do processo é representada separadamente e matematicamente modelada de acordo com sua função de transferência.

Em um diagrama de blocos como as partes do processo são distintamente separadas em subsistemas, torna-se mais fácil sua compreensão.

“um subsistema é representado por um bloco com uma entrada, uma saída e uma função de transferência. Muitos sistemas são formados de diversos subsistemas... Ao se interligar subsistemas, alguns elementos novos devem ser acrescentados ao diagrama de blocos. Esses novos elementos são as junções de soma e os pontos de coleta de sinal” (NISE, NORMAN S., 2002, p. 180).

Como citado anteriormente por Nise (2002, p. 180), a Figura 15, destaca uma função de transferência $G(s)$ que recebe a soma de $R(s) - C(s)$. O ponto de derivação é ao mesmo tempo a saída do sistema e sua realimentação para o fechamento da malha.

Figura 15 - Diagrama de blocos



Fonte: OGATA 1998 p. 54

2.8.1 Sistema de controle digital

Segundo Ogata (1982, p. 702), um sistema de tempo discreto ou sistema de dados amostrados são sistemas em que as variáveis são tratadas em instantes específicos de tempo. O intervalo entre os tempos é pequeno o suficiente a ponto de serem aproximados por interpolação simples.

Deste modo, sistemas de tempo discreto têm suas medidas obtidas de forma intermitente, ou seja, para sistemas digitalizados as funções de transferência devem ser específicas para essa abordagem. Um método comum e que é aplicado nesse projeto é a transformada Z. Para sistemas discretos, a transformada Z é similar à transformada de *Laplace* em sistemas de tempo contínuo.

Ainda, segundo Ogata (1982), os controladores digitais apresentam algumas vantagens sobre os controladores analógicos. São capazes de realizar computações complexas em grande velocidade e são extremamente versáteis, tornando simples eventuais alterações no sistema.

Apesar deste projeto de controle se basear em grandezas digitais, o sistema de controle partirá de um sistema no domínio S e em função de ter amostragens digitalizadas será transformado para o plano Z.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi primeiramente validar as ideias e conceitos iniciais, e confirmar sua viabilidade.

Para cada etapa foi realizado um desenvolvimento teórico e prático para atender às necessidades individuais dos objetivos, incluindo desenvolvimento de circuito e *software*. Concluídas as etapas individualmente e a união de todo o sistema, o conjunto inteiro foi testado e validado.

Para os métodos de desenvolvimento, foram utilizados computadores, *softwares* de simulação, *software* compiladores, equipamentos de medição e materiais para confecção de circuitos e peças mecânicas.

4 TESTE DAS ETAPAS

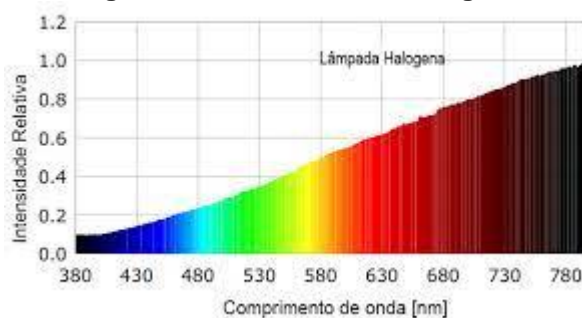
Todas as etapas foram testadas e validadas individualmente.

4.1 Elemento aquecedor

A semelhança da lâmpada das máquinas comerciais com as dicróica doméstica comum, despertou a curiosidade de testar seu comportamento. As lâmpadas dicróicas halógenas geram muito calor e tem o tamanho ideal para o processo. O primeiro teste deste trabalho é analisar se é possível calor suficiente para realizar um processo de solda e qual potência necessária.

De acordo com Santos (2006, p. 226), lâmpadas halógenas, são lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio contido em um gás inerte e com uma pequena quantidade de um elemento halogênio como iodo ou bromo. Apesar de desenvolvidas com o intuito de iluminar, grande parte do espectro se dá no infravermelho, apresentado na Figura 16. No mercado são encontradas facilmente com valor em torno de R\$ 20,00, a exemplo da Figura 17.

Figura 16 - Infravermelho halógenas



Fonte: canal6

Figura 17 - Lâmpada Dicróica



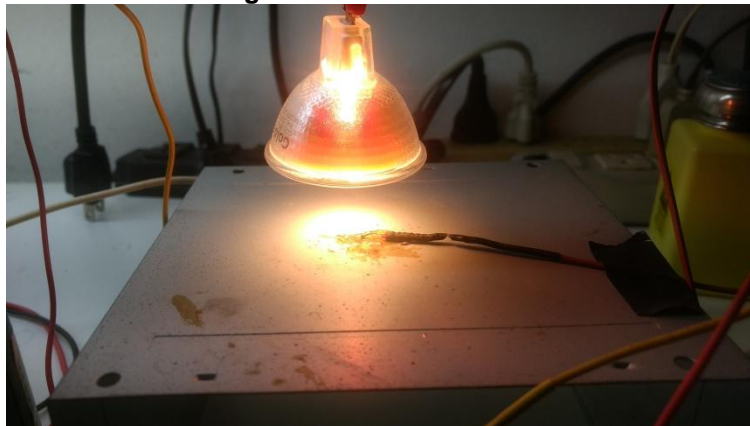
Fonte: mercadolivre

Mesmo que seu espectro não esteja tão concentrado no infravermelho como as lâmpadas para tal finalidade, de acordo com Santos (2006, p. 226),

quase a totalidade da potência de lâmpadas incandescentes, próximo de 90 %, se dissipam em forma de calor.

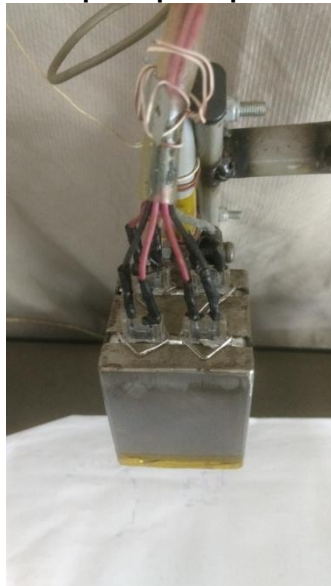
Em um teste preliminar, foi posicionada uma lâmpada no formato de dicróica junto a um sensor de temperatura para avaliar o calor dissipado, como mostrado na Figura 18, e não se obteve calor suficiente para solda em distâncias em que permitisse o manuseio de algum componente. Retirar o vidro de proteção para tentar aumentar a troca de calor é inviável, pois freqüentemente o receptáculo inteiro se quebra, mas ao utilizar apenas a lâmpada, comprada separadamente sem o refletor parabólico, e adicionada mais de uma lâmpada confinada em um suporte metálico, Figura 19, é possível, mesmo a 5 centímetros de distância temperaturas superiores a 250 °C.

Figura 18 - Teste dicróica



Fonte: Elaboração própria (2021).

Figura 19 - Suporte para quatro lâmpadas



Fonte: Elaboração própria (2021).

De forma mais detalhada, foi recortado um pedaço de tubo quadrado de 5 cm por 5 cm, que compreende o tamanho máximo da maioria dos componentes BGA, e feito encaixes com ranhuras para fixação de quatro lâmpadas halógenas de 220 V e 50 Watts cada, apresentado na Figura 20. Essa escolha teve como base a potência típica de uma máquina para essa finalidade que é, em média, 150 Watts e levando em consideração um maior equilíbrio e divisão de calor, foi posicionada uma lâmpada em cada canto do alojamento.

Figura 20 - Tubo quadrado para alojamento de lâmpadas



Fonte: Elaboração própria (2021).

Esta etapa apresentou resultados extremamente animadores, gerando calor suficiente para realizar o processo de solda e com distância suficiente para manuseio dos componentes a serem soldados. Com o confinamento do calor no suporte confeccionado, se alcançou a temperatura próxima de 200 °C com apenas 40 % de ciclo ativo.

Tendo em vista o resultado deste teste, já foi definido também o elemento aquecedor da parte inferior. Este por sua vez, não tem necessidade de espaço tão confinado, levando em conta que deverá aquecer a parte inferior inteira da placa onde a solda será feita. Foi usada a mesma potência total da parte superior, porém com duas lâmpadas halógenas de 100 Watts cada, chamadas de "palito", exemplificada na Figura 21.

Figura 21- Lâmpada halógena palito



Fonte:mercadolivre

4.2 SENSOR DE TEMPERATURA.

Medições com termopares são extremamente delicadas de serem realizadas, dependem de valores extremamente baixos de tensão, o que traz atenção especial para esse circuito. De forma simplificada precisa-se amplificar 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ para níveis adequados de tensão, que para este projeto foram realizadas em duas etapas, a e b. Os sensores, tanto superior quanto inferior, são posicionados o mais próximo possível do local onde será realizada a medida. Para a parte superior, o sensor é móvel e deve ser posicionado logo acima do componente.

a) De antemão, uma etapa amplificadora para tornar as grandezas mais adequadas de serem medidas, elevando a tensão gerada pelo termopar para um múltiplo intuitivo de ser lido no multímetro. Exemplo: $100^\circ\text{C} = 1\text{ V}$ ou $200^\circ\text{C} = 2\text{ V}$ demonstrado nas equações 1 e 2.

$$41 \times 10^{-6} \text{ V} \times 100^\circ \text{ C} \times \text{Ganho} = 1,0 \text{ V} \quad (1)$$

$$\text{Ganho} = 243,9024 \quad (2)$$

A realização da medida não se conclui dessa forma, esse é apenas o valor de temperatura entre o ponto de prova a extremidade fria do termopar. É preciso ainda incluir a temperatura do ambiente. Uma forma prática de atender esse propósito são duas etapas inversoras, um primeiro estágio com ganho -243,90 (citada anteriormente) para medida do termopar e outra de -1 para incluir a compensação que virá de um LM35, demonstrado nas equações 3 e 4.

$$\text{etapa 1: } -G = \frac{R1}{R2} \Rightarrow R2 = 100 \Omega \times 243,90 = 24,390 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

$$\text{etapa 2: } -G = \frac{R4}{R3} \Rightarrow G = -\frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = -1 \quad (4)$$

b) A temperatura máxima a ser medida coincidirá com faixa máxima do conversor analógico digital do microcontrolador. Será usada a tensão de referencia de 1,1 V existente no próprio microcontrolador e apenas 8 bits (mais detalhado a diante). Com 8 bits temos uma faixa de 0 a 255 partes, que intuitivamente nos leva a definir como temperatura máxima 255°C , facilitando assim várias etapas do tratamento dessa grandeza.

Sendo assim, quando estivermos no máximo de nossa medida, o conversor analógico digital do microcontrolador deverá receber 1,1 V, demonstrado nas equações 5, 6 e 7.

$$2,55 \text{ V} \times \text{Ganho} = 1,1 \text{ V} \quad (5)$$

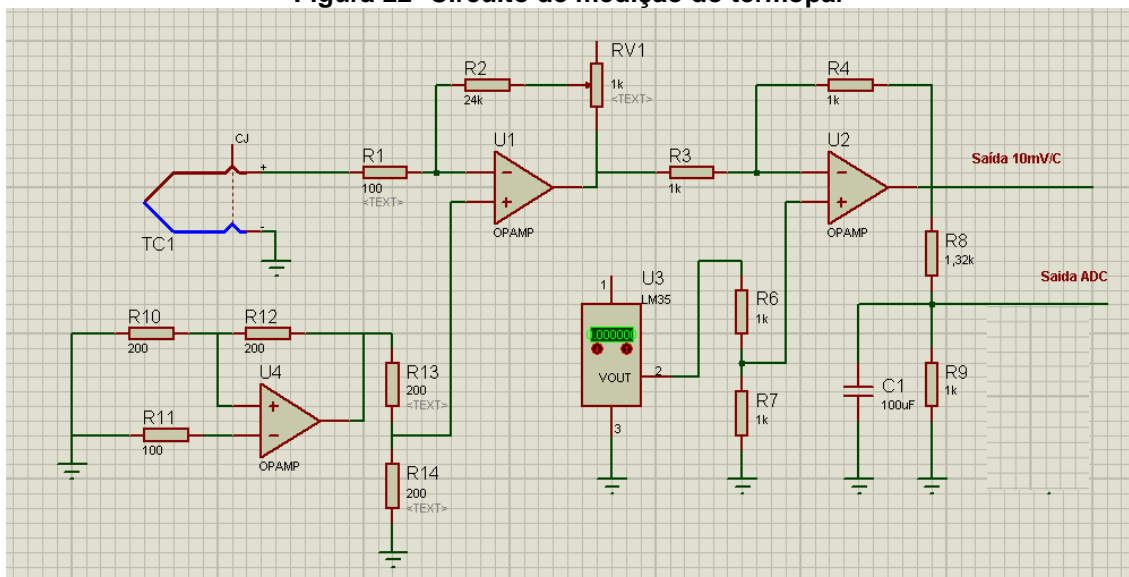
$$\text{Ganho} = 0,4318 \quad (6)$$

$$R8 = \left(2,55 \text{ V} \frac{1 \text{ k}\Omega}{1,1 \text{ V}} \right) - 1 \text{ k}\Omega = 1,318 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

Nessa etapa apareceu um imprevisto, o amplificador operacional escolhido em função de seu baixo custo, LM324N, sofreu variações na saída conforme a temperatura ambiente. A alternativa adotada para contornar esse problema, foi colocar mais um amplificador do mesmo encapsulamento, que em princípio reagiu de forma muito semelhante aos seus pares para alterar a referência da primeira etapa de amplificação. Ou seja, o erro provocado pelo deslocamento em função da temperatura, será adicionado inversamente no primeiro estágio, e para garantir que o erro inserido inversamente seja o mesmo do erro indesejado, as impedâncias serão as mais próximas possíveis. Exemplificando, a primeira etapa tem em sua entrada inversora R1 (100 Ω) em paralelo com R2 (24,39 k Ω), totalizando praticamente 100 Ω . Sendo assim, a entrada não inversora também terá os mesmos 100 Ω , para evitar diferenças de corrente de *bias*. As seguintes etapas compartilham da mesma técnica.

Para eventual ajuste, foi adicionado um potenciômetro em série com R2, e o circuito completo de medição de temperatura é apresentado na Figura 22.

Figura 22- Circuito de medição do termopar



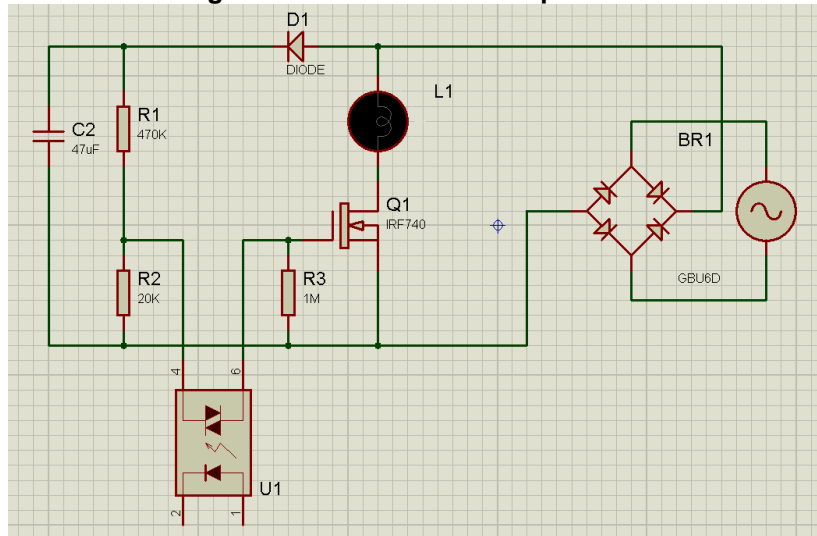
Fonte: Elaboração própria (2021)

4.3 Acionamento de potência

Nesta etapa, como, em caso de acidente, envolve risco de choque elétrico para o usuário e possibilidade de danos aos equipamentos utilizados, foi feito um isolamento através de um opto acoplador conforme descrito por Malvino (2016 p. 171). Assim o sinal proveniente do microcontrolador aciona o diodo do opto acoplador, que por sua vez, aciona o *gate* do transistor chaveador IRF740. Para evitar detecção de passagem por zero e simplificar o circuito, a carga será acionada em corrente contínua e chaveada com apenas um transistor. Foram implementados uma etapa de retificação e um

acumulador para garantir tensão no *gate*, representado na Figura 23. R1 e R2 garantem que a tensão de acionamento do chaveador não exceda seu limite e C2 garante que a tensão permaneça estável.

Figura 23 - Acionamento de potência



Fonte: Elaboração própria (2021)

Como as impedâncias do acionamento são relativamente altas, a transição entre saturação e corte levam tempo suficiente para o transistor ficar em região ativa a ponto de provocar calor, compensado facilmente com frequências de chaveamento abaixo de 500 Hz. Nessa frequência o calor dissipado no transistor foi insignificante.

4.4 Comunicação Serial

Para a configuração de parâmetros e monitoramento, a interface do usuário e o microcontrolador precisam de um *link* de comunicação. A comunicação foi feita de forma mais simples possível, usando um módulo conversor serial USB-TTL, exemplificado na figura 24, facilmente encontrado no mercado. Este módulo aceita velocidades de comunicação serial de até 115200 bps e tensão configurável de 3,3 V ou 5 V. Para o projeto foi usado 9600 bps com tensão de 5 V para entrada e saída.

Figura 24 - Conversor USB TTL

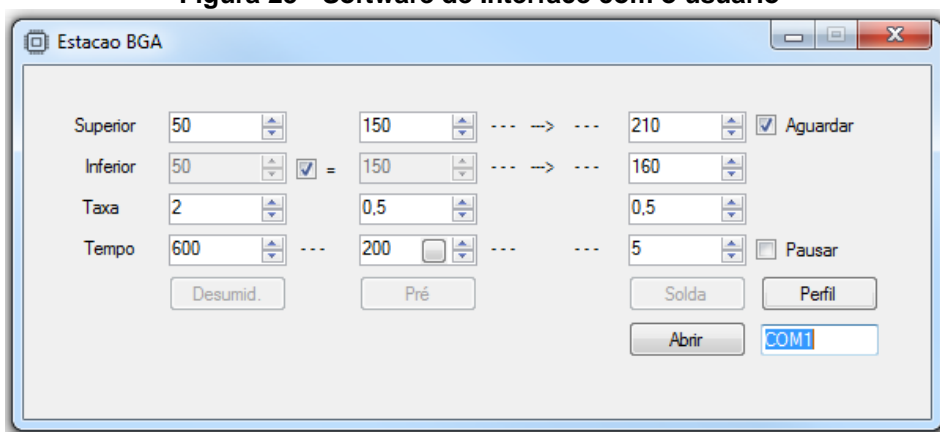


Fonte: mercadolivre

4.5 Interface do usuário

Um programa desenvolvido em *Visual Studio*, mostrado na Figura 25 é o responsável pelos parâmetros de temperatura e tempo de cada etapa; este contém os dados e segue de forma seqüencial e automática enviando a cada segundo o novo valor de temperatura para o microcontrolador. Enquanto o microcontrolador apenas verifica se a temperatura está dentro do estabelecido e corrige o ciclo ativo de acionamento da carga, o computador é o responsável pelas atualizações de novos valores de temperatura.

Figura 25 - Software de Interface com o usuário



Fonte: Elaboração própria (2021)

No exemplo, temos as seguintes configurações:

- a) Desumid.: Etapa de desumidificação que serve para evitar que bolhas de umidade se expandam provocando rachaduras nas placas. De acordo com a imagem, temos temperatura de desumidificação em 50 °C para parte superior e inferior, sairá de

temperatura ambiente até o selecionado em 2 °C por segundo configurado no campo "Taxa" e nesta permanecerá por 600 segundos, configurado no campo "Tempo".

b) Pré: Terminado o tempo anterior, inicia-se a etapa de pré-aquecimento, onde a parte inferior e superior alcançarão ambas 150 °C, conforme configurado, e terão uma taxa de subida de 0,5 °C por segundo, também configurável, totalizando mais 200 segundos de processo.

c) Solda: Etapa final e de soldagem propriamente dita. Nesta etapa a temperatura na parte superior alcançará 210 °C e a inferior ficará limitada em 160 °C, conforme configurado. Subirá com taxa de 0,5 °C por segundo e nessa temperatura permanecerá em espera por 5 segundos após alcançar os parâmetros. O caminho inverso (de esfriamento) acontece obedecendo duas vezes a taxa do parâmetro anterior.

Apesar de as características descritas acima terem o padrão de rampa, esse processo é um exemplo idealizado onde todos os dados podem ser adquiridos com o fabricante do componente. Para o uso prático, nem sempre corresponde a realidade, grande parte das vezes o operador não tem disponibilidade dos dados do fabricante e precisa trabalhar em pontos fixos de temperatura, incrementando a mesma conforme julgar necessário. Por esse motivo o controlador não foi projetado visando seguir rampa.

Esta etapa requer um mecanismo de segurança adicional, em caso de travamento do computador e perda de dados, o microcontrolador monitora constantemente se os dados estão sendo recebidos de forma correta, caso perca comunicação o processo é interrompido e todos os aquecedores desligados imediatamente. Essa função será abordada no capítulo seguinte.

4.6 Microcontrolador.

Como citado anteriormente, o Atmega328P, atende todas as especificações necessárias para este projeto. Dentre as características existentes no microcontrolador, as mais importantes para este projeto são as seguintes:

- a) 6 canais de *PWM*;
- b) 2 contadores de 8 *bits*;
- c) 1 contador de 16 *bits*;
- d) 8 canais conversores analógico-digital de 10 *bits*;
- e) Fontes de interrupção internas e externas;

- f) 1 *Serial* USART;
- g) 32 K *Bytes* de memória de programa;
- h) 2 K *Bytes* de *SRAM*;
- i) 23 linhas de *IO* programáveis;
- j) Tensão de operação de 2,7V a 5,5V;
- k) Arquitetura *RISC*.

Mais detalhes sobre as características do Atmega328P podem ser encontrados no Apêndice C.

O microcontrolador receberá do *software* de interface uma atualização de temperatura a cada segundo, o novo valor de temperatura será comparado com a medida presente no termopar e o sistema de controle terá como resposta um novo valor para o PWM.

As principais funções para viabilizar cada etapa serão transcritas a seguir, e em detalhes no apêndice D.

Quatro funções do microcontrolador são essenciais para o funcionamento do projeto: Comunicação serial, PWM, *timer* e conversor analógico-digital. Essas funções são necessárias para que seja possível a comunicação com o *software* desenvolvido, controle de etapa de potência, controle de tempo e aquisição de sinais analógicos.

a) Configuração de comunicação serial: A comunicação serial foi configurada para um *Baud Rate* de 9600 Kbps, sem paridade e com um *bit* de *stop Bit*. Para que cada dado recebido pelo microcontrolador seja imediatamente tratado, será habilitado uma interrupção para RX. A seguir é apresentado exemplo do código para configuração serial.

```
#define F_CPU 8000000UL //Informar frequência de CPU para o
                        //cálculo de Baud Rate

#define BAUD 9600 //taxa de 9600 Kbps.
#define MYUBRR F_CPU/16/BAUD-1
UBRR0H=(unsignedchar)(ubrr0>>8); //Ajuste realizado pela biblioteca
                                  //disponível no ATMEL Studio.

UBRR0L=(unsignedchar)ubrr0;
UCSR0A=0; //desabilita velocidade dupla de
           //transmissão.

UCSR0B=(1<<RXIE0)|(1<<RXEN0)|(1<<TXEN0); //Habilita a transmissão e a recepção e
                                           //interrupção.

UCSR0C=(1<<UCSZ01)|(1<<UCSZ00); //modo assíncrono, 8 bits de dados, 1
                                  //bit de parada, sem paridade.
```

b) Configuração de PWM e *TIMER*: A contagem de tempo é extremamente importante para definir a frequência do PWM e para solicitar uma interrupção

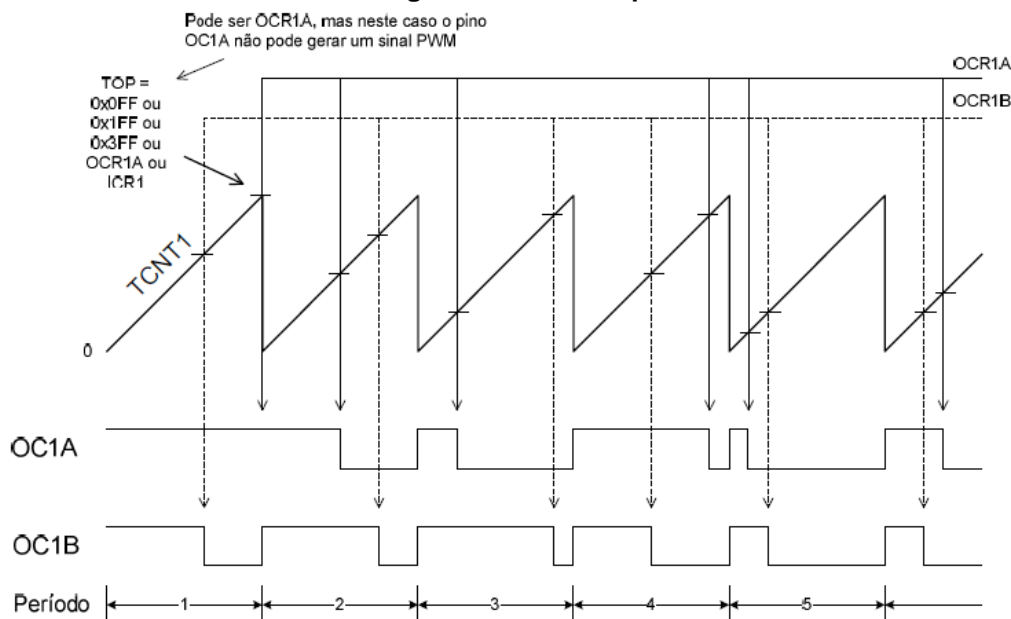
para a amostragem analógica. Para o Projeto, usaremos o modo PWM rápido para os dois aquecedores e uma interrupção de *timer* a cada 1 segundos para adquirir as amostras analógicas de temperatura do termopar, configurada em modo PWM rápido e CTC (*Clear Timer on Compare*).

"O modo PWM rápido permite a geração de um sinal PWM de alta frequência. O contador conta de zero até o valor máximo e volta a zero. No modo de comparação com saída não-invertida, o pino OC1A é zerado na igualdade entre TCNT1 e OCR1A e colocado em 1 no valor mínimo do contador. No modo de comparação com saída invertida, o processo é inverso: OC1A é ativo na igualdade e zerado no valor mínimo. A comparação para o pino OC1B é feita com OCR1B. O valor de contagem para o TC1 pode ser definido pelos valores fixos 0x0FF (255), 0x1FF (511) ou 0x3FF (1023), por OCR1A ou ICR1; caso OCR1A seja empregado, o pino OC1A não pode gerar um sinal PWM, apenas uma onda quadrada. A resolução para o PWM rápido pode ser fixada em 8, 9, 10 bits (0x0FF, 0x1FF ou 0x3FF) ou definida pelos registradores OCR1A ou ICR1. A resolução mínima é de 2 bits (OCR1A ou ICR1 = 3) e a máxima é de 16 bits (ICR1 ou OCR1A = 0xFFFF). A resolução do PWM é calculada com:

$$RPWM_Rápido = \frac{\log_2(top+1)}{\log_2(2)} \text{ [bits]} \quad (8)$$

Neste modo, o contador é incrementado até encontrar um dos valores fixos 0x0FF, 0x1FF ou 0x3FF, o valor de OCR1A ou o valor de ICR1. Um diagrama exemplo para o PWM rápido com OC1A e OC1B como saídas não invertidas e apresentado na Figura 26." (LIMA E VILLAÇA, 2012, p.191).

Figura 26 - PWM Rápido

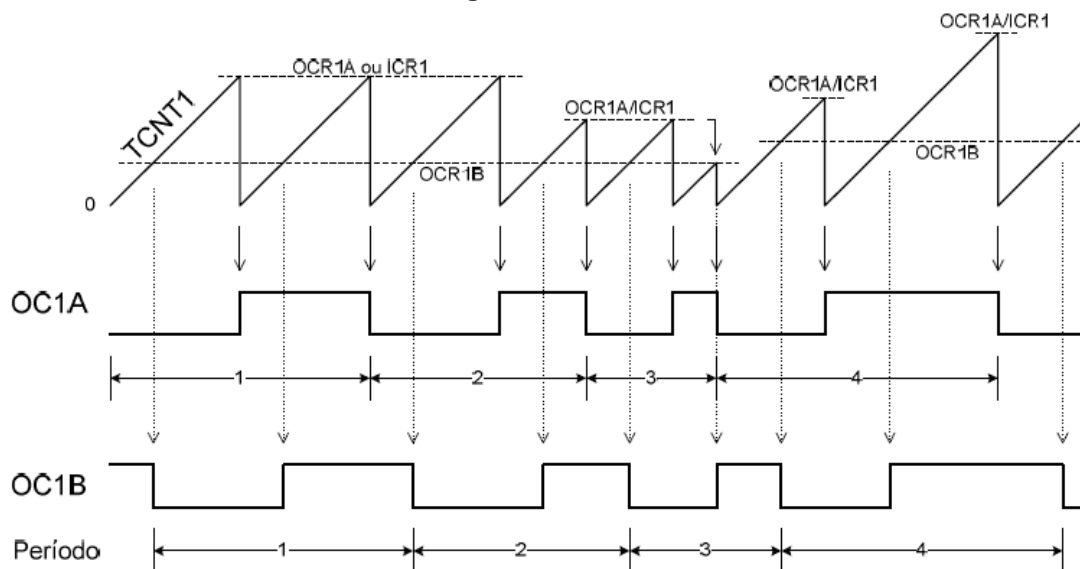


Fonte: LIMA; VILLAÇA (2012, p.191).

"No modo CTC (*Clear Timer on Compare*) os registradores OCR1A ou ICR1 são utilizados para mudar a resolução do contador (valor de topo).

Neste modo, o contador é limpo (zerado) quando o valor do TCNT1 é igual a OCR1A ou igual a ICR1. Este modo permite grande controle na comparação para estabelecer a frequência de saída e também simplifica a operação de contagem de eventos externos. Um exemplo de diagrama temporal para o modo CTC é apresentado na figura 27: os pinos OC1A e OC1B foram habilitados." (LIMA E VILLAÇA, 2012, p.212)

Figura 27 - CTC



Fonte: LIMA; VILLAÇA (2012, p.191).

$$FOC1A = \frac{F_{osc}}{2N(1+TOP)} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

A exemplo, a configuração dos contadores para PWM e *timer*.

```
TCCR0A=0b10100011; //Configura pinos como saída e PWM em modo PWM rápido
TCCR0B=0b00000011; // prescaler 64 –próximo a 500 Hz
TCCR1B=0b00001100; //modo CTC ,prescaler = 256
TIMSK1=0b00000010; //Habilita interrupção
OCR1A=30000; // Timer para 1 segundos
```

c) Configuração do ADC: Para o conversor analógico digital, foi configurado para usar a referência interna do microcontrolador de 1,1V e será usado apenas os 8 *bits* mais significativos.

A parte analógica incorporada nesse microcontrolador conta com um conversor analógico-digital de aproximações sucessivas e suas principais características, de acordo com a folha de dados do fabricante, são:

- a) 10 *bits* de resolução (1024 pontos);
- b) Precisão absoluta de ± 2 LSBs (*bits* menos significativos);
- c) Tempo de conversão de 65 a 260 μ s;
- d) 6 canais de entrada multiplexados;
- e) 2 canais multiplexados nos encapsulamentos TQFP e QFN/MLF;
- f) Faixa de tensão de entrada de 0 até VCC;
- g) Tensão de referência selecionável de 1,1V, descrito na figura 28;
- h) Ajuste opcional de alinhamento de resultado;
- i) Modo de conversão simples ou contínua;
- j) Interrupção ao término da conversão;
- k) Eliminador de ruído para o modo *Sleep*;
- l) Sensor interno de temperatura com ± 10 °C de precisão.

Conforme descrito acima, esse projeto usará as seguintes configurações:

Figura 28 - Referência 1,1V

REFS1	REFS0	Seleção da Tensão de Referência
0	0	AREF, tensão interna V_{REF} desligada.
0	1	AVCC. Deve-se empregar um capacitor de 100 nF entre o pino AREF e o GND.
1	0	Reservado.
1	1	Tensão interna de referência de 1,1 V. Deve-se empregar um capacitor de 100 nF entre o pino AREF e o GND.

Fonte: LIMA; VILLAÇA (2012, p.191).

A seguir um exemplo de configuração do conversor analógico-digital do Atmega 328P.

```
ADMUX=ADMUX|(1<<REFS1)|(1<<REFS0)|(1<<ADLAR);//resultado do ADC em ADCH e
referência 1,1V
ADCSRA=0b10000111; // habilita ADC com Prescaler 128
```

d) Implementação de segurança: Para garantir que uma falha de comunicação não acarrete em danos dos componente durante o processo de solda por excesso de temperatura, foi implementado um algoritmo que realiza a seguinte função: A cada estouro do *Timer*, que foi configurado para 1 segundo, além de ser realizado as amostras analógicas de temperatura, uma variável "erroleitura" é incrementada. Caso essa variável seja maior que 3, o microcontrolador desabilita as saídas de PWM impedindo que os aquecedores permaneçam ligados. Essa variável é zerada toda vez que uma informação de temperatura nova chega ao microcontrolador.

Outra função de segurança implementada, foi a confirmação dos dados recebidos. Quando o computador envia um valor de temperatura para o microcontrolador, o mesmo deve estar no seguinte formato, primeiro um caractere 'i' ou 's', representando inferior ou superior, depois o valor de temperatura, e por fim um caractere '*'. O microcontrolador só irá aceitar um recebimento caso essas condições sejam confirmadas.

```
ISR(USART_RX_vect)
{
    dadorex=UDR0;
    numerorx[posrx]=dadorex;// dado recebido
    posrx++;
    if(dadorex=='*')
    {
        posrx=0;
        if(numerorx[0]=='s'&&numerorx[2]=='*')
        {
            temps=numerorx[1];// Temperatura para o aquecedor superior
        }
        if(numerorx[0]=='i'&&numerorx[2]=='*')
        {
            tempi=numerorx[1];// Temperatura para o aquecedor inferior
            erroleitura=0;// confirmação de leitura e zera a variável erroleitura
        }
        numerorx[2]=0;
    }
}
```

Outro cuidado a ser tomado, é no caso do controle impor uma ação foras dos limites praticáveis, com PWM maior que 100 % ou menor que 0 %. Neste caso, o programa limita essa ação.

```
PWM=u;
if(PWM>254)
{
    PWM=255;
}
if(PWM<1)
{
    PWM=0;
}

OCR0A=PWM;
```

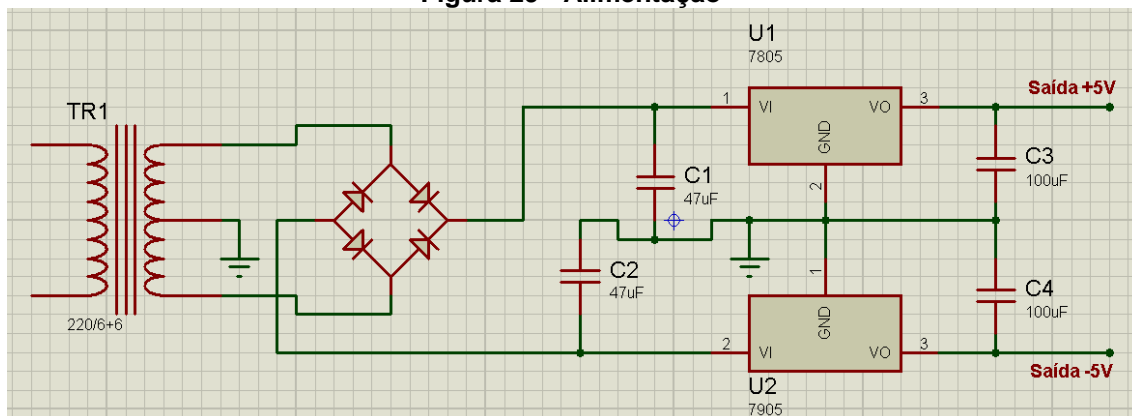
|

4.7 Alimentação

A etapa de alimentação para os circuitos de baixa potência foi construída da forma mais simples e convencional possível. Foi utilizado um transformador de tensão com saída de ± 6 V com retificador e filtro, representado na Figura 29. Em seguida, dois reguladores lineares de +5 V (7805) e -5 V (7905) para alimentação simétrica.

Apesar de não haver sinais negativos, os amplificadores operacionais usados (LM324N) apresentam um erro normalmente desprezível para saídas com amplitudes próximas a tensão de alimentação. Apesar desse erro ser na ordem de milivolts, para a medida do termopar esse erro torna-se significativo. Para corrigir esse problema, a fonte simétrica foi incluída no projeto.

Figura 29 - Alimentação

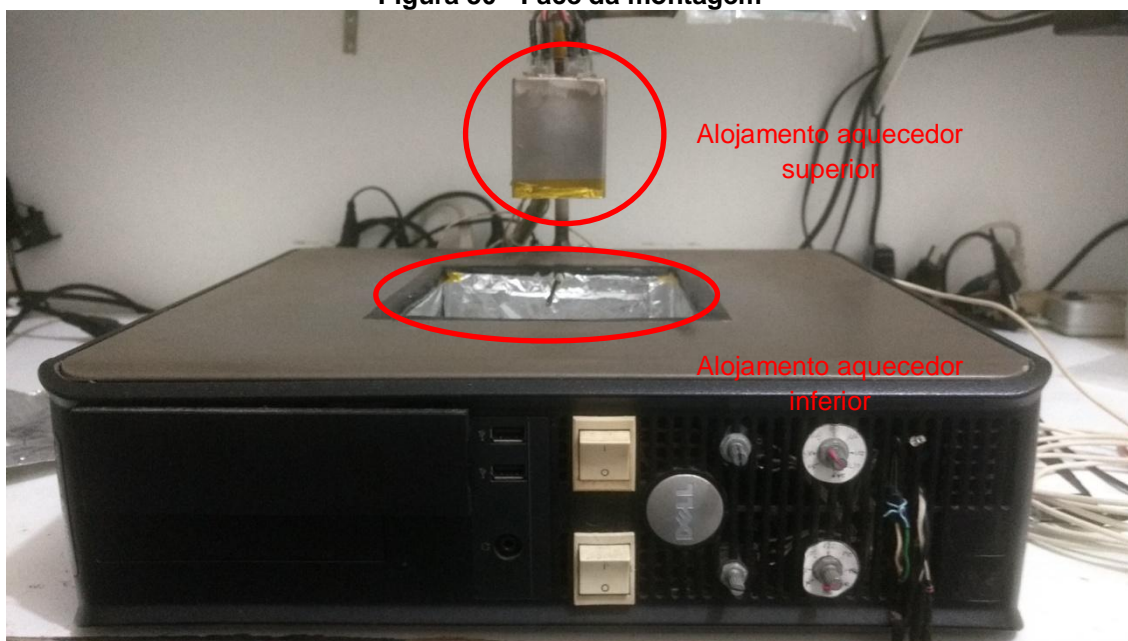


Fonte: Elaboração própria (2021)

4.8 Montagem

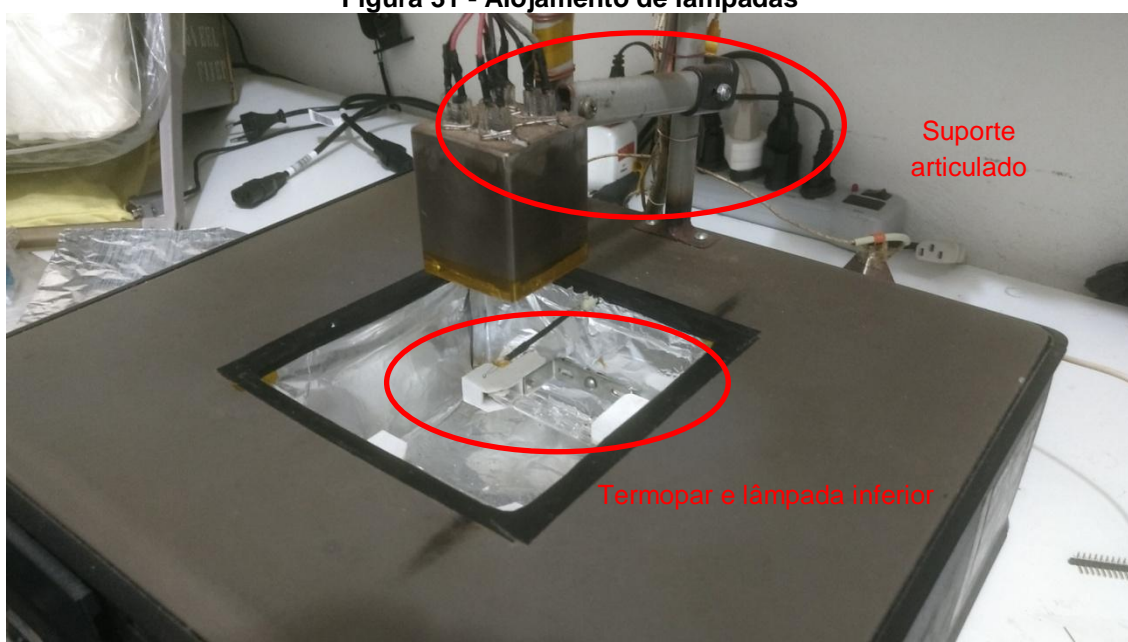
O equipamento foi adaptado em um antigo gabinete de computador e feito um suporte articulado para movimentação do aquecedor superior. Toda a eletrônica foi alojada no interior do gabinete, mostrado nas Figuras 30, 31, 32 e 33.

Figura 30 - Face da montagem

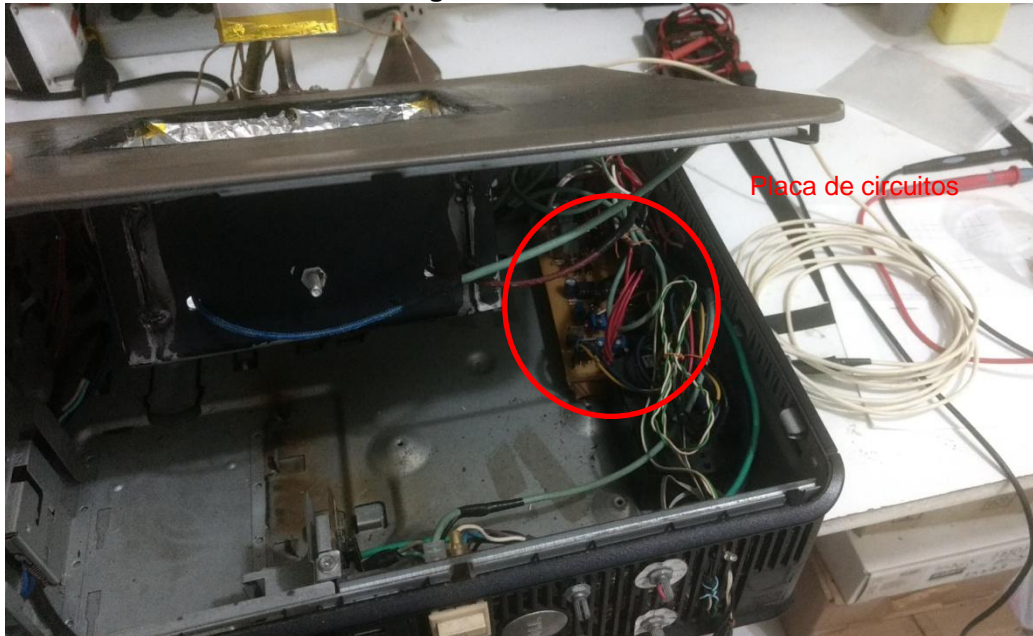


Fonte: Elaboração própria (2021)

Figura 31 - Alojamento de lâmpadas



Fonte: Elaboração própria (2021)

Figura 32 - Interior

Fonte: Elaboração própria (2021)

Figura 33 - Encaixe com BGA

Fonte: Elaboração própria (2021)

4.9 Medida de temperatura

Para validar o circuito de medição de temperatura foi utilizado um multímetro com um termopar para fazer as medidas em graus Celsius e outro multímetro medindo a tensão na etapa de saída dos amplificadores. Foram tiradas algumas medidas de temperatura intermediárias, mostrado na Figura

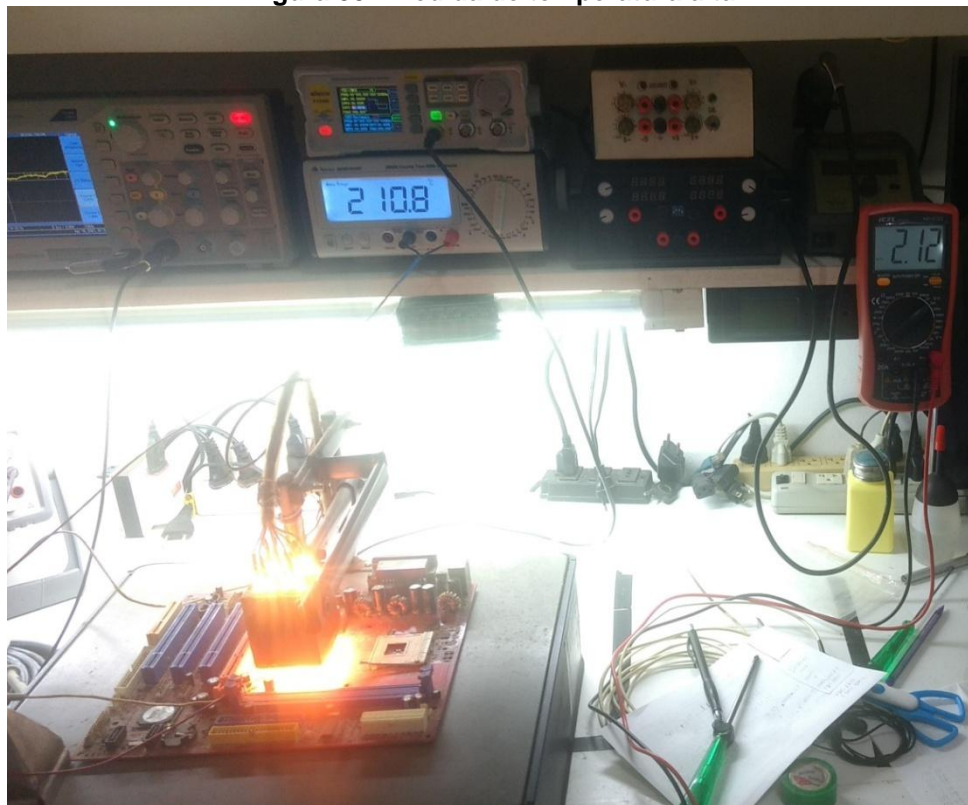
34, e próximas ao ponto normal de operação, Figura 35, no momento das soldas.

Figura 34 - Medida de temperatura intermediária



Fonte: Elaboração própria (2021)

Figura 35 - Medida de temperatura alta



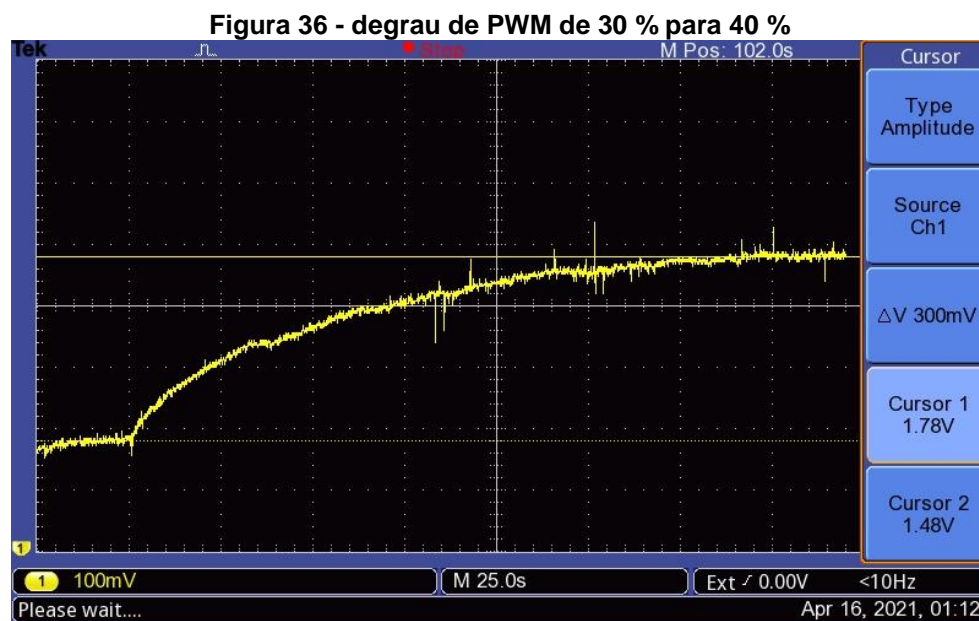
Fonte: Elaboração própria (2021)

Os resultados foram absolutamente satisfatórios, apresentando menos de 1 % de erro próximo ao ponto de operação mais importante. Desta etapa em diante, para poder usar o osciloscópio para medir temperatura, usaremos as saídas de tensão preparadas no circuito que se mostraram bastante confiáveis, conforme apresentado no teste descrito anteriormente.

4.10 Controle digital

O controle digital exige algumas etapas bem definidas; em primeiro momento, o levantamento dos dados da planta. Este projeto de controle conta com dois elementos aquecedores distintos no qual aplicaremos a teoria de controle. Apesar de estarem em espaços fisicamente distintos, por ambos terem a mesma potência, foi previamente definido que compartilham das mesmas equações, sendo assim, foi levantada a curva característica de apenas um. Com esses dados, a primeira etapa da elaboração do controle foi realizada.

Em bancada, aplicou-se um degrau de PWM de 30 % para 40 % no elemento aquecedor superior. Após aguardar a estabilização, nota-se que o equilíbrio da temperatura para 30 % de PWM permanece em 148 °C. Após a mudança do PWM para 40 %, ocorreu um aumento de temperatura característico de sistemas de primeira ordem que se estabilizou nos 178 °C em aproximadamente 175 segundos, conforme apresentado na Figura 36.



Fonte: Elaboração própria (2021)

Considerar esse transitório como sendo de primeira ordem é apenas uma aproximação, porém válida para esse projeto. Em função dos tempos longos e ruídos nas medidas, não é possível mensurar o exato instante de regime, mas visualmente é possível uma boa estimativa.

Considerando o tempo de acomodação para a faixa 5 % como sendo 175 segundos, com o auxílio do *MatLab* foi possível equacionar a planta. Lembrando que como o microcontrolador tem um registrador de 8 *bits* (de 0 a 255) para configurar o PWM, fez-se necessária uma correção, em que 30 % de PWM equivalem a 76 em *bits*, conforme equações 10, 11 e 12.

Partindo de:

$$G(s) = \frac{k}{Ts+1} \quad (10)$$

e

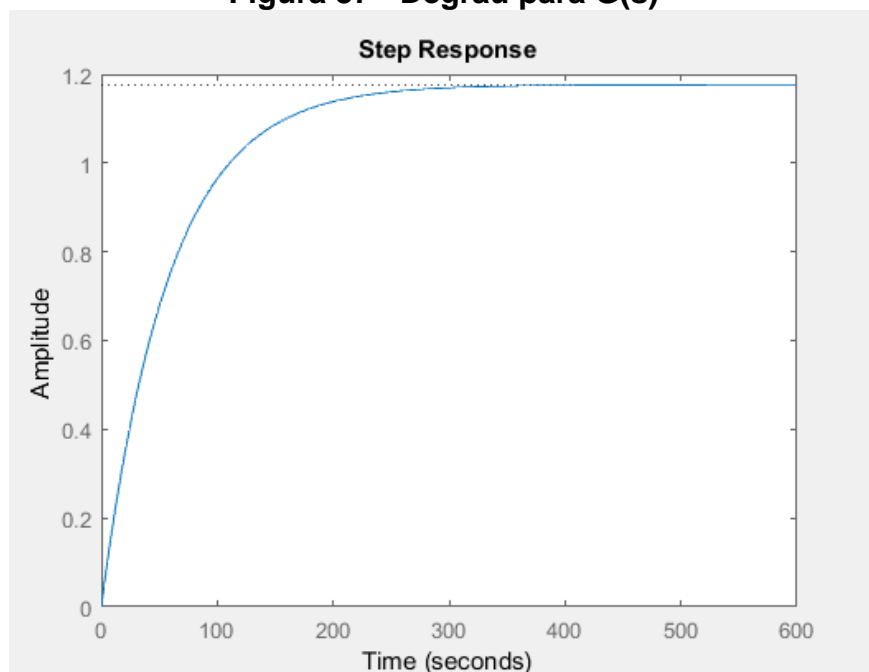
$$k = \frac{\Delta Temperatura}{\Delta Duty \times 2.55} \quad (11)$$

então:

$$G(s) = \frac{1,176}{58,33s+1} \quad (12)$$

Afim de confirmar se o equacionamento condiz com o observado no osciloscópio, foi aplicado um degrau para $G(s)$, representado na Figura 37.

Figura 37 - Degrau para $G(s)$



Fonte: Elaboração própria (2021)

Para o projeto do controlador foi definida uma nova constante de tempo em 1 segundo, conforme mostrado nas equações 13, 14 e 15.

então:

$$T_{eq} = \frac{T}{k_p \times k} = \text{nova constante de tempo do sistema} \quad (13)$$

$$K_p = \frac{T}{T_{eq} \times k} \quad (14)$$

$$C(s) = \frac{k_p}{T} \left(\frac{Ts+1}{s} \right) \quad (15)$$

Com auxílio do *Matlab*, $C(s)$, $G(s)$ foram discretizados e a malha fechada para simulação. O código escrito no *Matlab* é apresentado a seguir.

Aplicando o ganho k encontrado anteriormente e a nova constante de tempo na equação 14 temos:

$$K_p = 148,75 \quad (16)$$

$$C(s) = \frac{k_p}{T} \times \left(\frac{Ts+1}{s} \right) = \frac{148.8s+2.55}{s} \quad (17)$$

Com a função "c2d" do Matlab, $C(s)$ foi discretizado com a frequência de amostragem de 10 amostras até o tempo de acomodação.

$$C(z) = \frac{148.8z-148.5}{z-1} \quad (18)$$

O código do Matlab a seguir foi utilizado na resolução destes passos.

%Objetivo

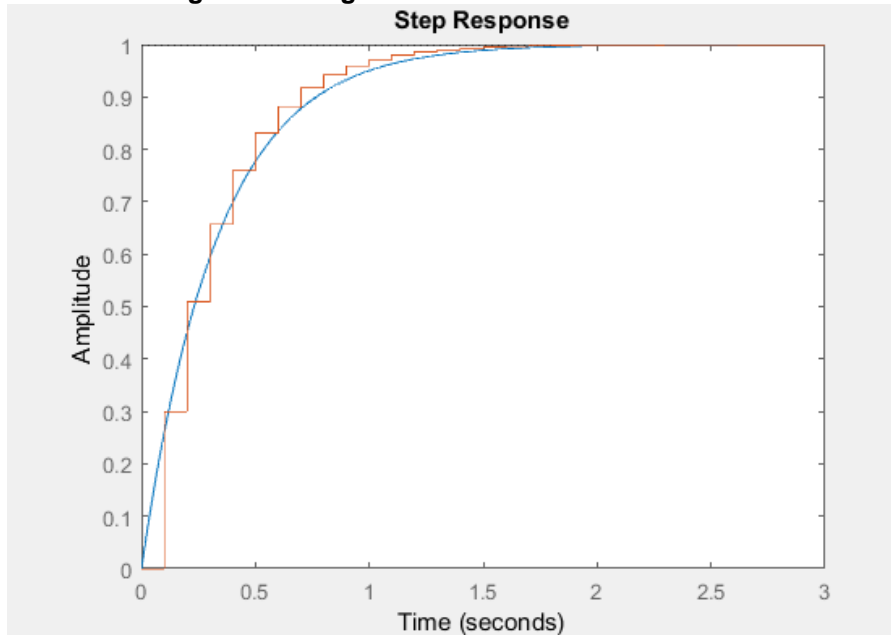
```
Tnovo=1 % tempo desejado para acomodação
Teq=Tau/((Ts5p)/Tnovo);% Ts5p é igual ao tempo de acomodação da planta para 5%
Kp=Tau/(Teq*k);
Cs=tf([Tau 1],[1 0])
Cs=Cs*(Kp/Tau)
```

% Convertendo para digital

```
Ta=Tnovo/10; %Tempo de amostragem. Aproximadamente 10 amostras para acomodação.
Gz=c2d(Gs,Ta);
Cz=c2d(Cs,Ta)
FTMFz=feedback((Gz*Cz),1);
```

Com a malha fechada podemos confirmar o equacionamento com um degrau em $G(s)$ e $G(z)$, representado na figura 38

Figura 38 - Degrau de malha fechada em S e Z



Fonte: Elaboração própria (2021)

Tendo então o projeto do controlador pronto, Equação 18, foi realizado o primeiro teste partindo da equação recursiva $u=(148,8*\text{erro})-(148,5*\text{erro1})+(1*u1)$ e aplicado no microcontrolador da seguinte forma, e repetido para os dois aquecedores:

```
erro=temperatura-amostra[0];
u=(149*erro)-(148*erro1)+(1*u1);
u1=u;
erro1=erro;
PWM=u;
```

O teste apresentou quatro novidades importantes:

A primeira é que com a amplitude de ação do controlador tão alta, os passos de variação do PWM são muito grandes fazendo com que o aquecedor fique a maior parte do tempo desligado ou ligado em sua potência máxima. Para exemplificar, julgando que os valores de entrada e saída estejam perfeitamente equilibrados, assim que surgir o primeiro grau de erro, este já será multiplicado por 149, passando assim mais da metade do valor máximo do PWM.

A segunda é que foi inadequado considerar um tempo de acomodação tão baixo. Uma vez que um degrau normal de trabalho da máquina será de aproximadamente 1 °C por segundo, assim que chegar uma nova referência de temperatura para o microcontrolador a temperatura de saída já está muito

próxima da nova referência, tornando assim desnecessário um tempo de acomodação tão curto.

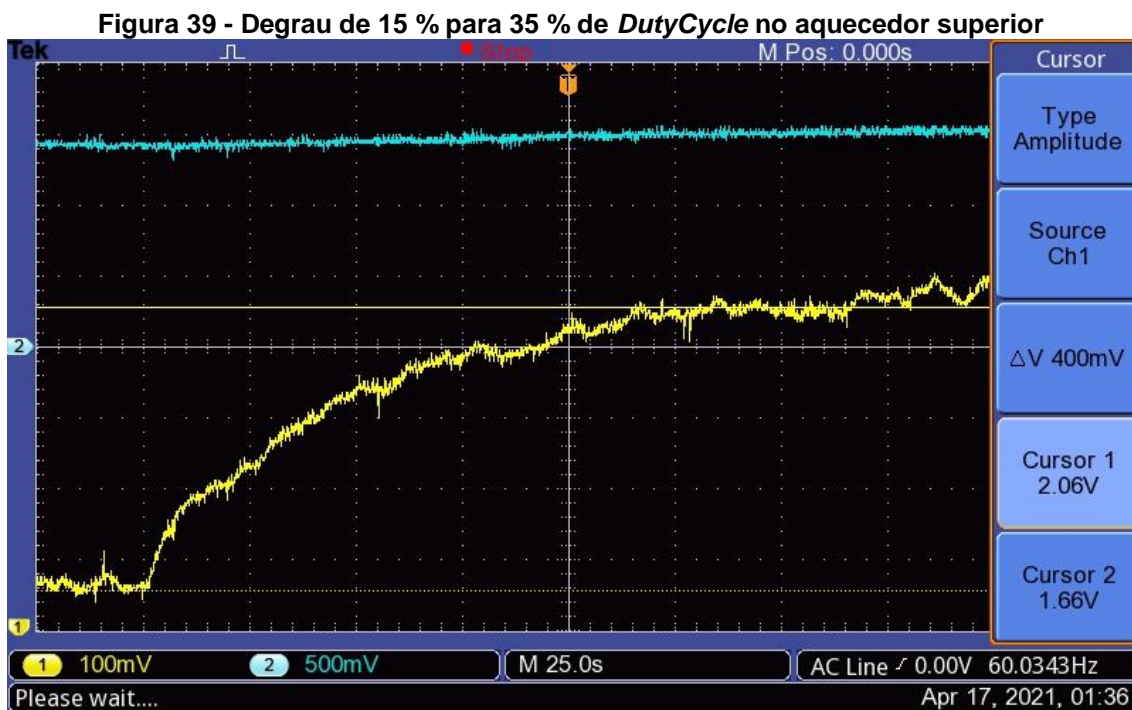
A terceira é que não foi considerada a influência que um aquecedor gera no outro. Considerando que os aquecedores estão separados apenas por uma placa fina e alguns componentes, o calor gerado por um aquecedor é percebido pelo termopar do outro aquecedor.

Por último, apesar de os aquecedores serem de mesma potência, seus alojamentos são diferentes e trazem comportamentos de transitórios diferentes, exigindo assim uma ação de controle distinta para cada aquecedor.

Isso criou a necessidade de novos testes em que ambos os aquecedores estejam ligados e próximos da temperatura normal de trabalho, maior tempo de acomodação e medidas de transitórios distintas para cada aquecedor.

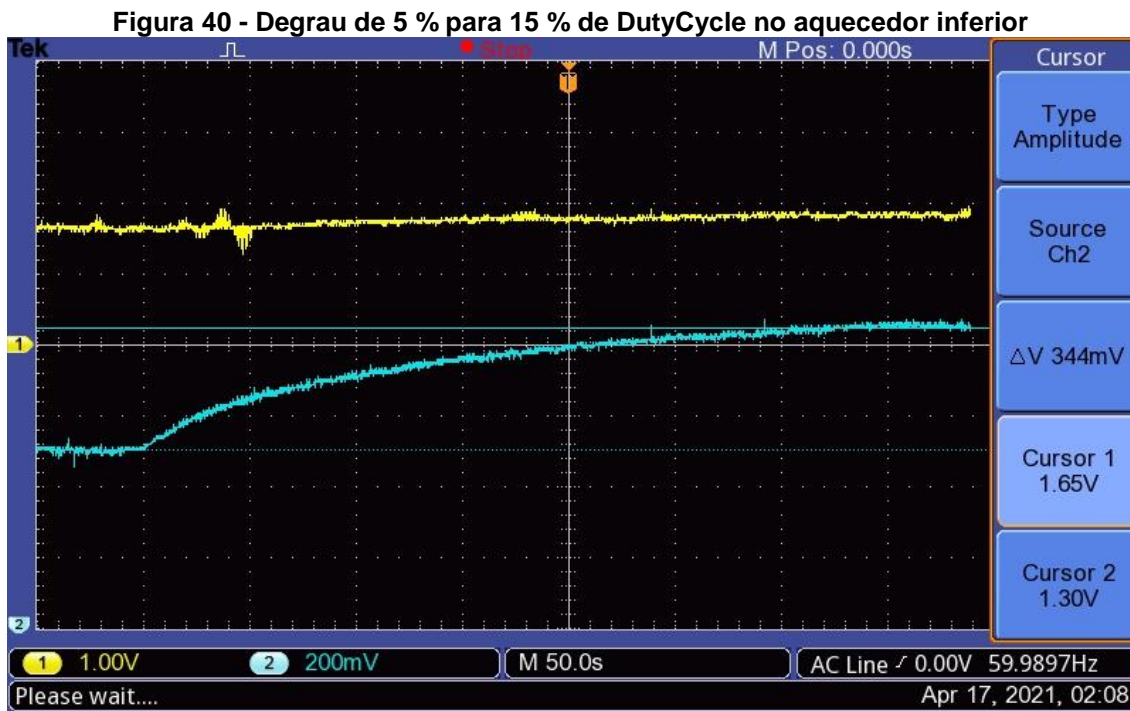
Com o resultado do novo teste, foi elaborado um novo controlador para cada aquecedor seguindo os mesmos passos anteriormente citados.

Degrau de 15 % para 35 % de *DutyCycle* no aquecedor superior, mantendo o aquecedor inferior próximo dos 150 °C, mostrado na figura 39. O resultado agora é uma variação de 40 °C para variação de 20 % de *DutyCycle* com tempo de acomodação em 150 segundos



Fonte: Elaboração própria (2021)

Degrau de 5 % para 15 % de *DutyCycle* no aquecedor inferior, mantendo o aquecedor superior próximo dos 80 °C, mostrado na figura 40. Para este, foi observado que o tempo de acomodação é maior que o calculado anteriormente.



Fonte: Elaboração própria (2021)

Para ambos, foi admitido um tempo novo de acomodação de 10 segundos e um novo projeto também elaborado através do *Matlab*. As etapas de equacionamento são as mesmas apresentadas anteriormente e utilizado o mesmo algoritmo para sua resolução.

% Degrau de 15%duty para 35%duty ---> 1%duty = 2.55 SetPWM
 % aproximadamente (Visual) tau 50 segundos
 % Para 5% 3 tau =150 segundos
 % 10mV/graus (Temperatura)

%Planta

Ts5p=150; % tempo de acomodação para 5%
 Tau=Ts5p/3;
 k=(206-166)/((35-15)*2.55); % Já em DutyCycle
 Gs=tf([k],[Tau 1]);

%Objetivo

Tnovo=10 % Novo tempo de acomodação desejado
 Teq=Tau/((Ts5p)/Tnovo);
 Kp=Tau/(Teq*k);
 Cs=tf([Tau 1],[1 0])
 Cs=Cs*(Kp/Tau)
 FTMA=(Gs*Cs);

% Convertendo para digital

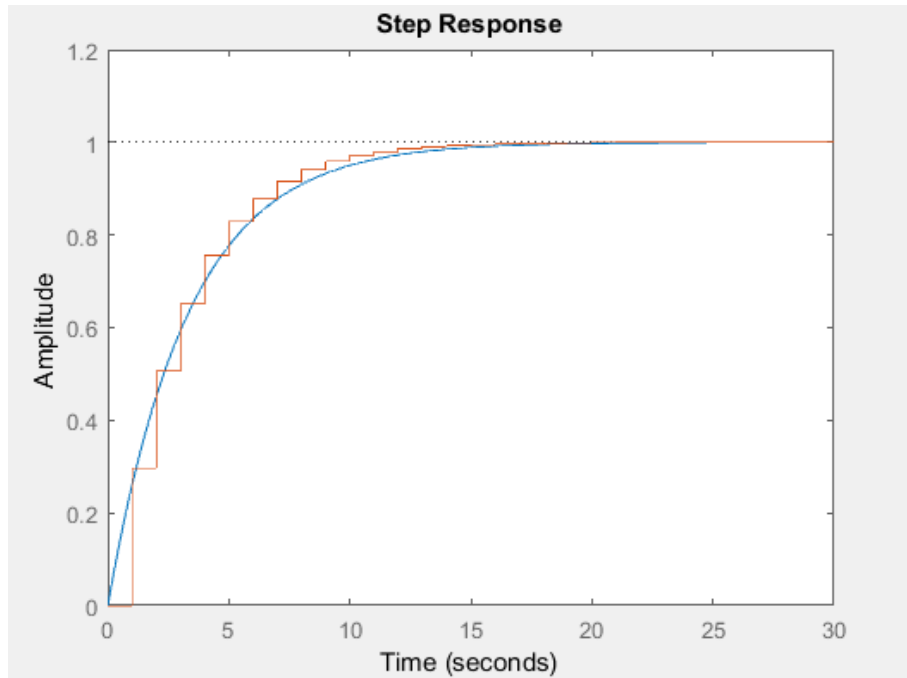
Ta=Tnovo/10; %Tempo de amostragem
 Gz=c2d(Gs,Ta);

$Cz=c2d(Cs,Ta)$

```
FTMFs=feedback((Gs*Cs),1);
FTMFz=feedback((Gz*Cz),1);
step(FTMFs,FTMFz)
```

Degrau de malha fechada em S e Z do aquecedor superior representado na Figura 41

Figura 41 - Degrau de malha fechada em S e Z do aquecedor superior

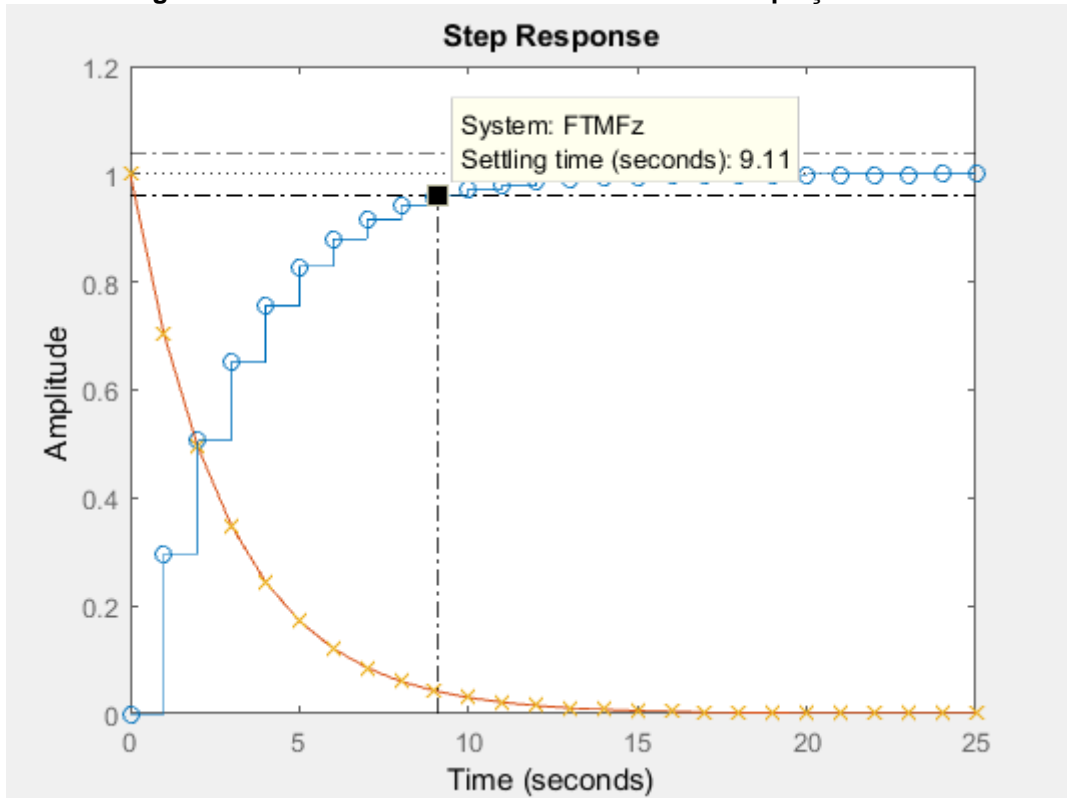


Fonte: Elaboração própria (2021)

$$C_{sup}(z) = \frac{19,13z - 18,74}{z - 1} \quad (19)$$

Com o novo controlador definido, também foi realizada uma análise de malha fechada e erro com equações recursivas para confirmar os resultados, representadas na Figura 42

Figura 42 - Análise de malha fechada e erro com equações recursivas



Fonte: Elaboração própria (2021)

O mesmo procedimento foi repetido para o aquecedor inferior.

% Degrau de 5%duty para 15%Duty ---> 1%duty = 2.55 SetPWM

% aproximadamente (Visual) tau 300 segundos

% Para 5% 3 tau =100 segundos

% 10mV/graus (Temperatura)

%planta

Ts5p=300;

Tau=Ts5p/3;

k=(165-130)/((15-5)*2.55);

Gs=tf([k],[Tau 1]);

%Objetivo

Tnovo=10

Teq=Tau/((Ts5p)/Tnovo);

Kp=Tau/(Teq*k);

Cs=tf([Tau 1],[1 0])

Cs=Cs*(Kp/Tau)

FTMA=(Gs*Cs);

% Digital

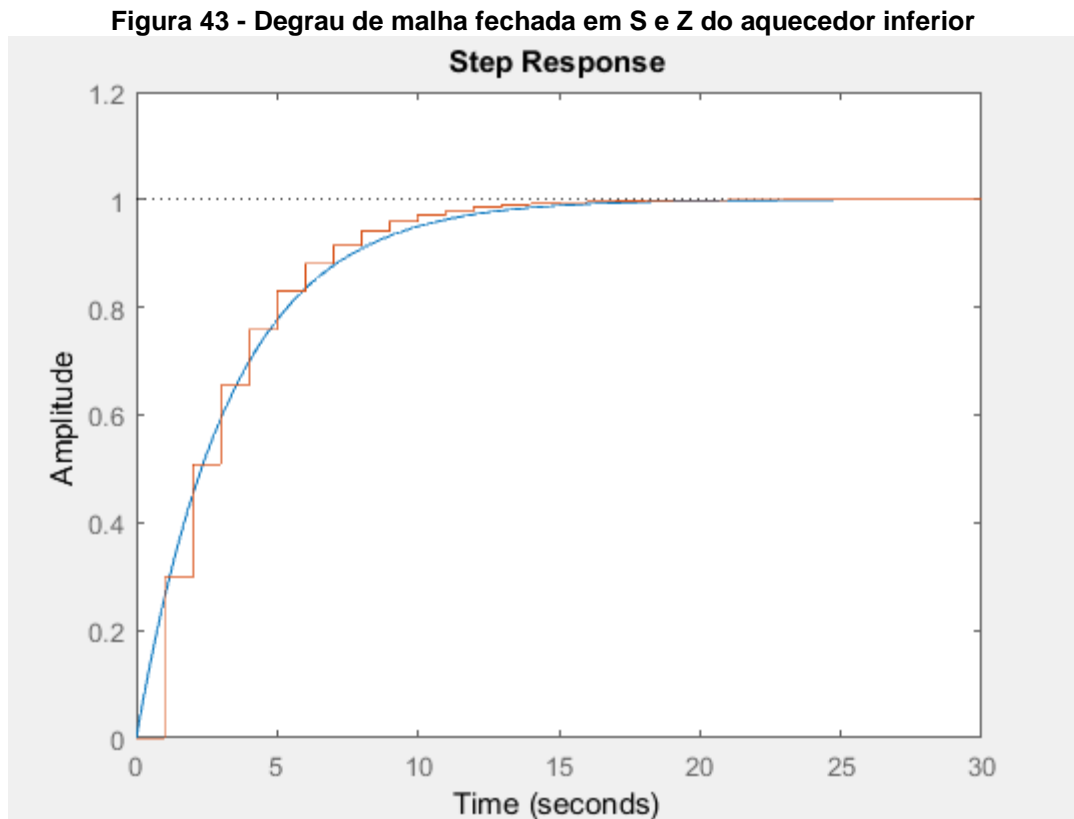
Ta=Tnovo/10;

Gz=c2d(Gs,Ta);

Cz=c2d(Cs,Ta)

```
FTMFs=feedback((Gs*Cs),1);
FTMFz=feedback((Gz*Cz),1);
step(FTMFs,FTMFz)
```

O degrau de malha fechada em S e Z do aquecedor inferior está representado na Figura 43

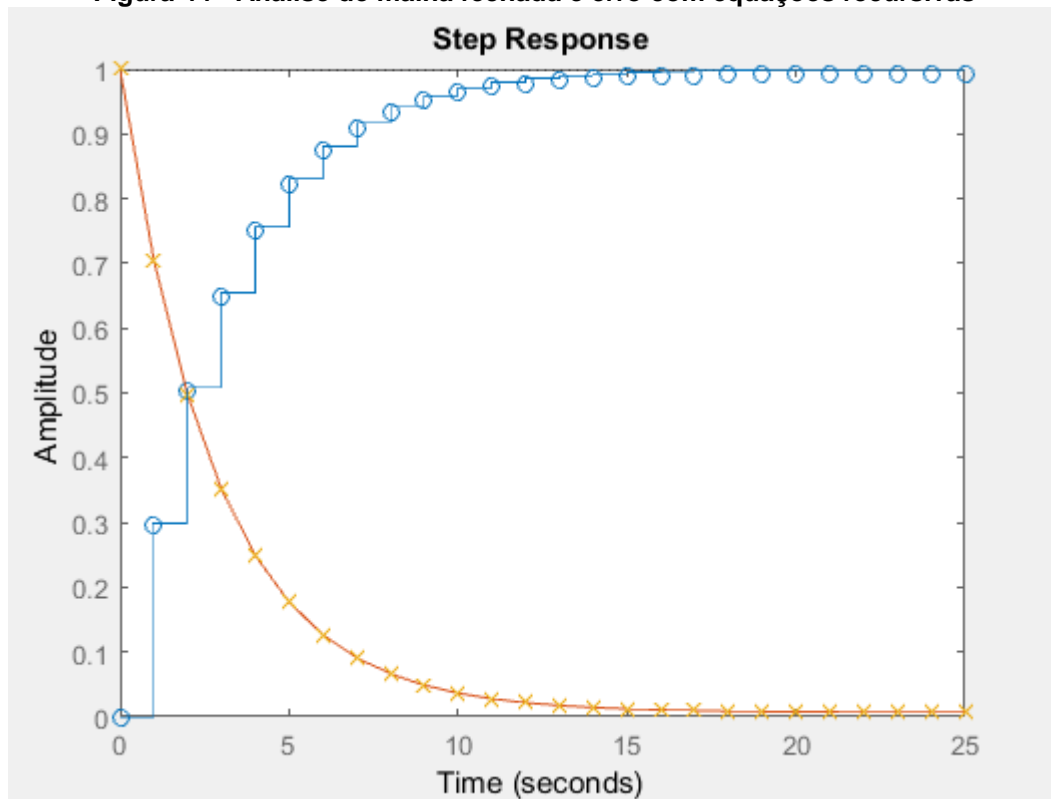


Fonte: Elaboração própria (2021)

$$C_{inf}(z) = \frac{21,86z - 21,64}{z - 1} \quad (20)$$

A análise de malha fechada e erro com equações recursivas do aquecedor inferior estão representadas na Figura 44

Figura 44 - Análise de malha fechada e erro com equações recursivas

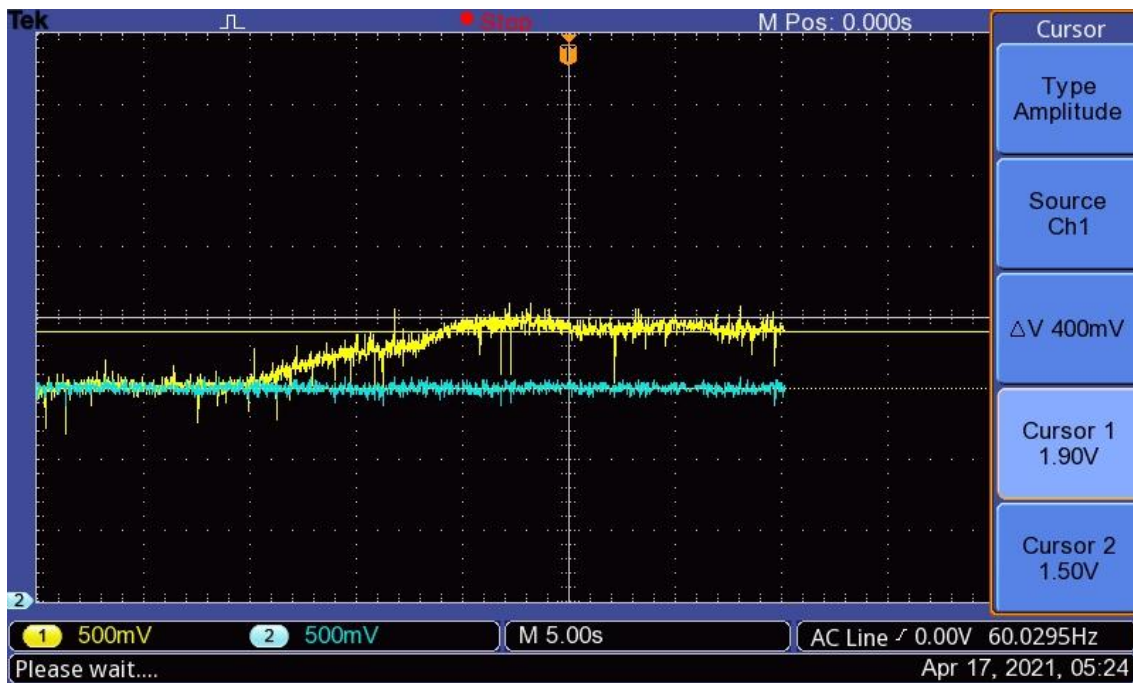


Fonte: Elaboração própria (2021)

5 TESTE FINAL

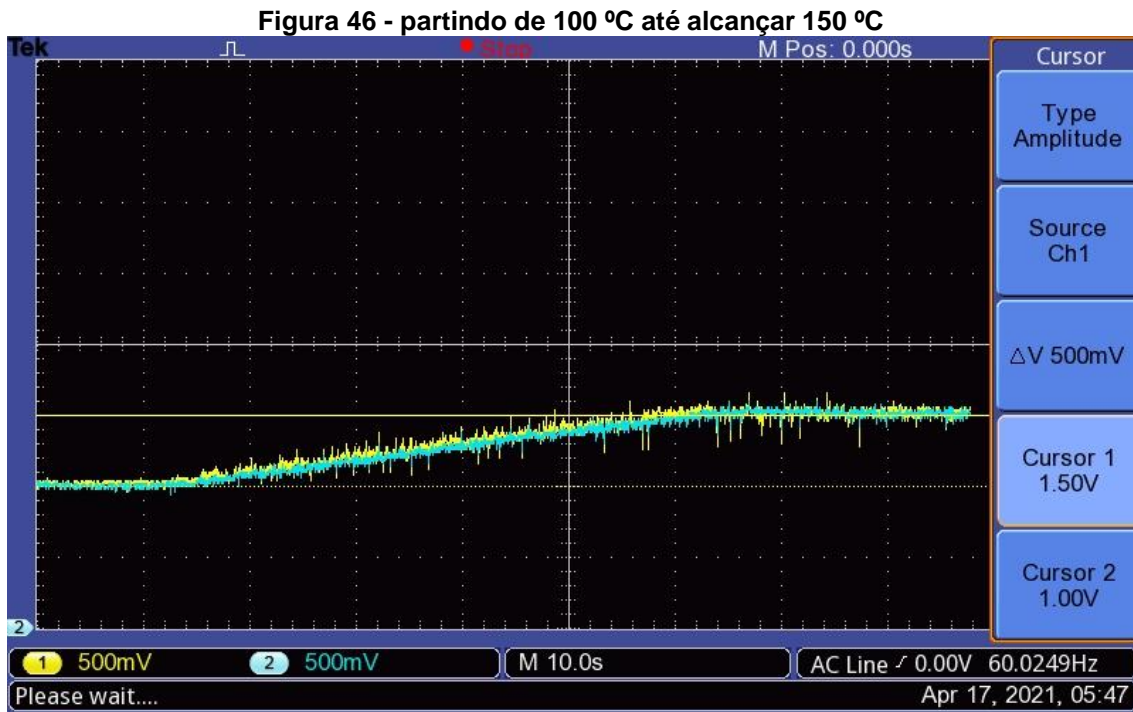
Com o novo controlador, o resultado obtido foi extremamente satisfatório. Os testes mostraram que o degrau realmente teve seu tempo reduzido como o projeto prévia, e para acréscimos mais lentos de temperatura, o controlador conseguiu acompanhar muito bem a entrada do sistema. A exemplo, um degrau de 150 °C para 190 °C, totalizando os mesmos $\Delta 40$ °C da malha aberta, com o tempo de acomodação em 10 segundos, mostrado na Figura 45.

Figura 45 - degrau de 150 °C para 190 °C



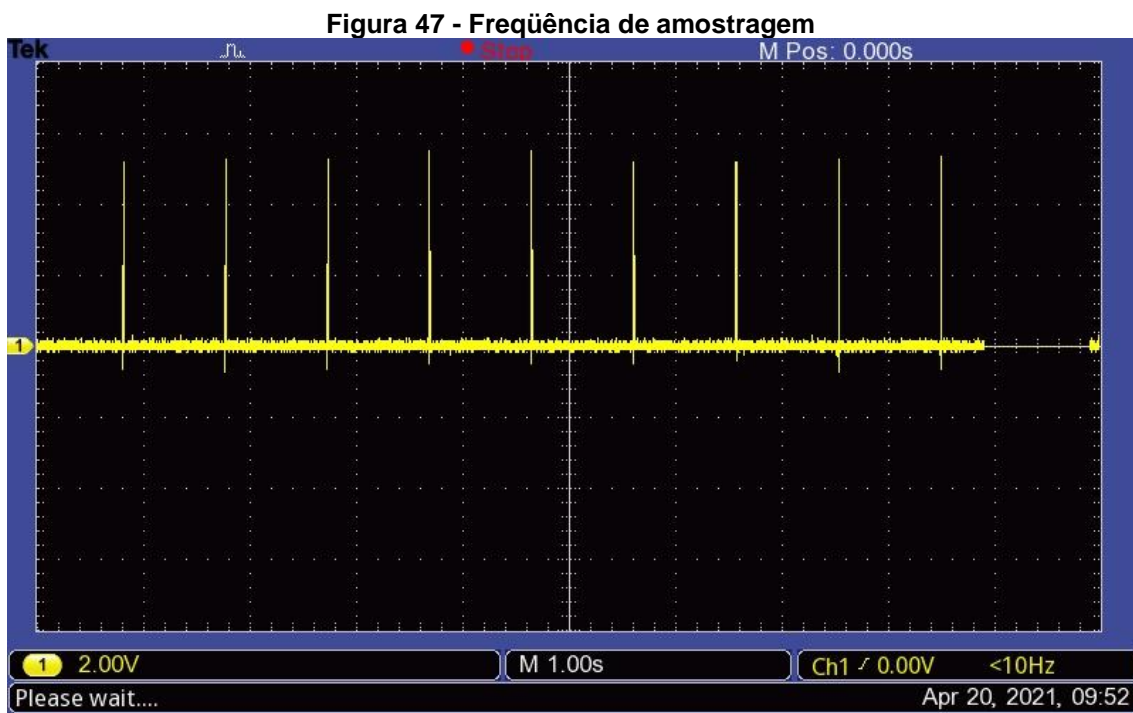
Fonte: Elaboração própria (2021)

Outro resultado interessante, foi o aumento gradativo de temperatura em 1 °C por segundo, partindo de 100 °C até alcançar 150 °C, Figura 46, nos dois aquecedores simultaneamente. O comportamento do sistema permaneceu estável e dentro do esperado.



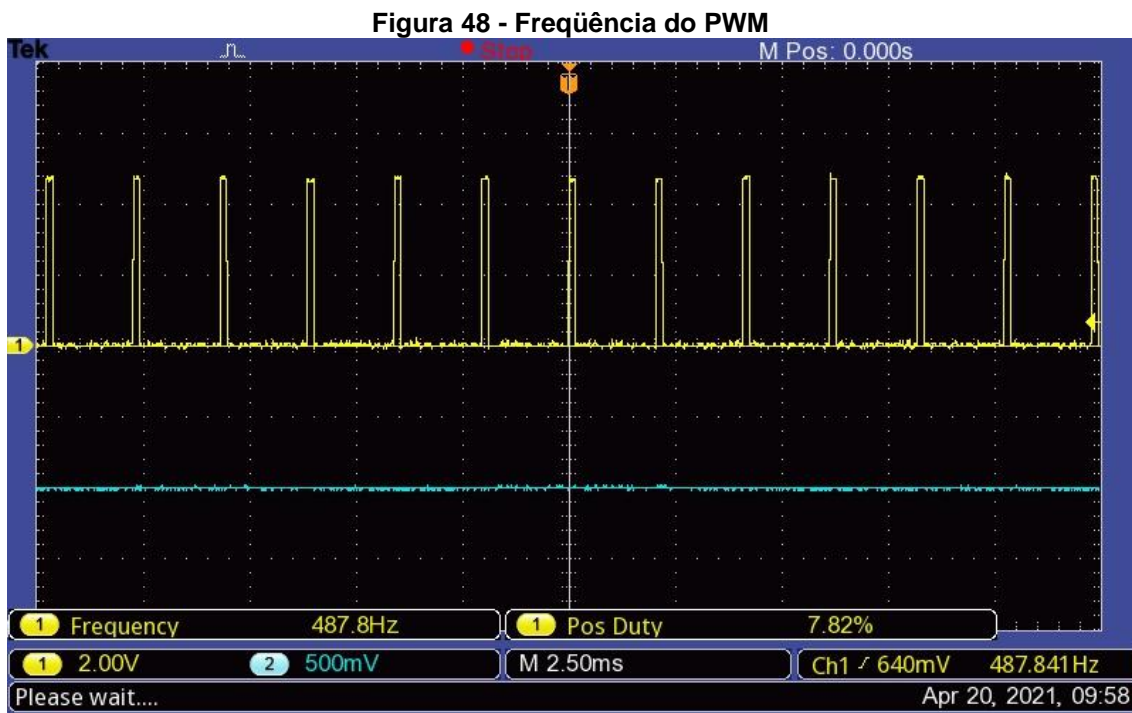
Fonte: Elaboração própria (2021)

Para a realização de conferência, também foi incluído um pino de I/O sinalizando o estouro do *Timer* indicando a frequência de amostragem conforme o projeto, mostrado na Figura 47.



Fonte: Elaboração própria (2021)

Um parâmetro mencionado no projeto, que apesar de não alterar o controlador, mas foi definido com importante para evitar aquecimento no circuito de potência, foi a frequência do PWM. De acordo com o projeto, configurada para 500 Hz conforme Figura 48.



Fonte: Elaboração própria (2021)

Também foi realizado um teste para verificar a amplitude do controlador, neste, representado em amarelo o ciclo ativo e em azul a temperatura, mostrado na Figura 49. Partindo de 100 °C até 200 °C com acréscimos de 2 °C por segundo, o PWM não alcançou 100 % em nenhum momento. Para um acréscimo de 10 °C por segundo o PWM alcançou 100 % em um pequeno instante de tempo, destacado em verde. Tal fato não implica em resultado indesejado, uma vez que, um acréscimo de temperatura dessa grandeza não deve acontecer em um processo correto de solda.

Figura 49 - Ciclo ativo



Fonte: Elaboração própria (2021)

Por fim, um teste que tem as características do funcionamento real da máquina com as três etapas, conforme mostrado da Figura 50.

- a) Desumidificação: Configurada para 60 segundos a 80 °C em ambos aquecedores.
- b) Pré aquecimento: Configurado para atingir 150 °C com rampa de subida de 1 °C por segundo também em ambos.
- c) Solda: Última e mais complexa etapa. Configurado limite de temperatura de 210 °C no aquecedor superior e 160 °C no inferior. Os dois aquecedores têm a mesma taxa de subida de 2 °C por segundo, sendo que o inferior ficará estabilizado no limite configurado e o superior continuará subindo a temperatura e permanecerá no limite máximo com o tempo estipulado de mais 10 segundos. Deste ponto em diante, a rampa de descida se dá com o dobro da taxa de subida da última etapa, que neste caso ficará em máximo de 4 °C por segundos e aguardará que seja atingida a temperatura inicial do último passo para informar o fim do processo.

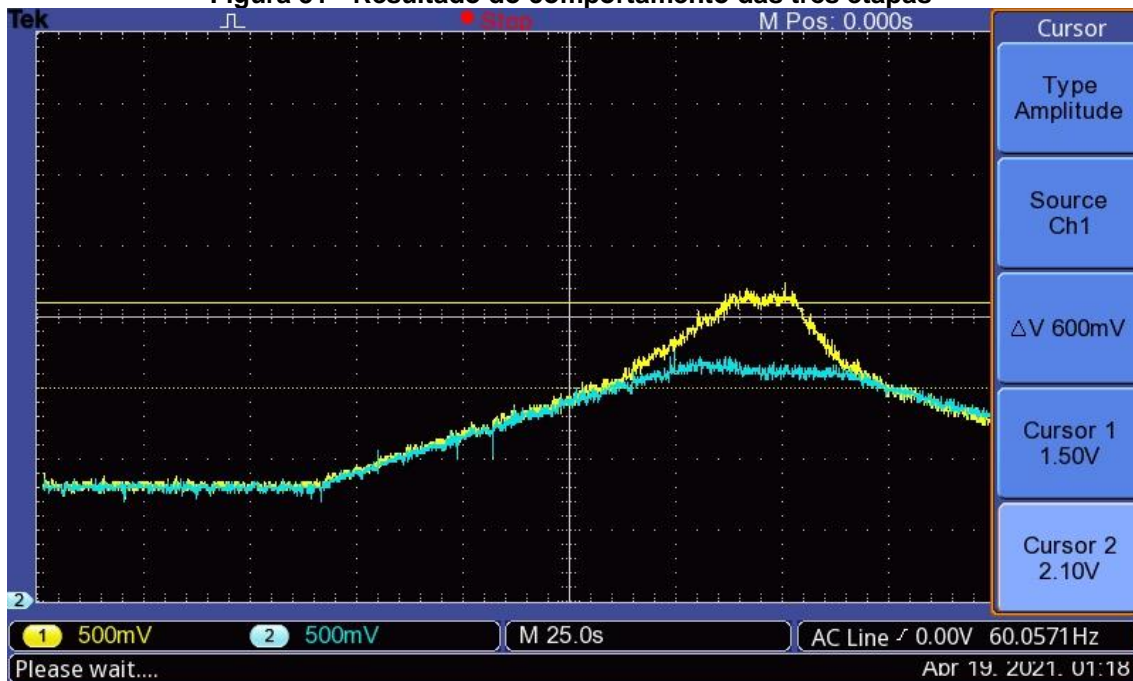
Figura 50 - Configuração das três etapas

The screenshot shows the 'Estacao BGA' configuration window. It is divided into three columns representing different stages. The first column has 'Superior' (80), 'Inferior' (80), 'Taxa' (1), and 'Tempo' (60). The second column has 'Superior' (150), 'Inferior' (150), 'Taxa' (1.0), and 'Tempo' (70). The third column has 'Superior' (210), 'Inferior' (160), 'Taxa' (2.0), and 'Tempo' (10). There are checkboxes for 'Aguardar' (checked) and 'Pausar' (unchecked). Buttons at the bottom include 'Desumid.', 'Pré', 'Solda', 'Perfil', and 'Abrir'. A 'COM1' port is selected in a dropdown menu.

Fonte: Elaboração própria (2021)

O resultado do comportamento das três etapas em teste de trabalho real é mostrado na Figura 51. As temperaturas foram alcançadas conforme o esperado, e o controlador atendeu adequadamente aos tempos.

Figura 51 - Resultado do comportamento das três etapas



Fonte: Elaboração própria (2021)

6 CUSTOS

Os custos da fabricação deste projeto levam em conta apenas o utilizado e presente no mesmo, desconsiderando equipamentos auxiliares de medição, ferramentas de uso geral e eventuais acidentes com quebra de lâmpadas. Os valores são apenas estimados, conforme indica o Quadro 1:

Quadro 1 – Custos

Material	Qt.	Custo unitário R\$	Sub total
Lâmpadas halogenas 50W	4	8,00	32,00
Lâmpadas halogenas 100w	2	12,00	24,00
Termopar tipo K	2	15,00	30,00
Microcontrolador	1	20,00	20,00
Amplificador operacional LM324n	2	1,50	3,00
Controlador de tensão 7805/7905	2	1,50	3,00
Transformador 220/6+6V	1	15,00	15,00
Sensor de temperatura LM35	1	5,00	5,00
Conversor USB/TTL	1	20,00	20,00
Componentes diversos		20,00	15,00
Total			172,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No início deste projeto, a intenção era obter uma máquina de solda para componentes BGA e SMD de baixo custo, com tecnologia infravermelho e com automatização de processos que fossem, ao menos, comparáveis às máquinas de menores custos existentes no mercado.

Inicialmente houve dificuldade para encontrar elementos aquecedores de tamanho adequado para posicionar na máquina de forma a limitar sua atuação restrita a uma pequena área relativa aos componentes a serem soldados. As opções disponíveis eram ou demasiadamente grandes ou pequenas, mas com custo elevado. A adaptação de quatro lâmpadas de menor potência e tamanho foi a solução encontrada sem implicar em grandes alterações no projeto e ainda manter a proposta de baixo custo.

Assim como os elementos aquecedores, os demais componentes seguiram a mesma proposta, sendo esses simples e de baixo custo, podendo ser encontrados facilmente no mercado. Desse modo, atendeu-se plenamente a proposta de baixo custo da máquina de solda para componentes BGA e SMD.

Outro objetivo que se pretendia alcançar era a automatização do processo, como em máquinas profissionais, para que se obtivesse um processo seguro de solda que não causasse avarias nos componentes e com o mínimo de intervenção possível. Esse resultado também foi alcançado, utilizando-se um microcontrolador e técnicas de controle.

Se comparado às máquinas disponíveis no mercado, é possível afirmar que este projeto conseguiu oferecer resultados equivalentes aos dos modelos de máquinas de solda para componentes BGA e SMD com a mesma quantidade de recursos, e com preço consideravelmente mais baixo.

É válido destacar dois pontos de dificuldade na elaboração deste trabalho: aquecimento dos chaveadores da etapa de potência e dificuldades de medição dos termopares.

A forma construtiva da etapa de potência garantiu que a tensão do *gate* não excedesse seus limites; porém, o efeito capacitivo parasita foi subestimado, impondo assim um tempo longo entre corte e saturação, que resultou em calor indesejado nos chaveadores. O problema foi contornado reduzindo a frequência de chaveamento, tornando este tempo proporcionalmente menor e minimizando esse problema. Uma melhor solução teria sido um capacitor junto ao divisor resistivo no nó de tensão do *gate* contrapondo seu efeito parasita.

Já para a medida de temperatura do termopar, os amplificadores foram uma escolha inadequada. Considerando que suas amplitudes são

extremamente baixas, erros mínimos nos amplificadores operacionais causam grandes desvios de medições no resultado final.

Apesar de o problema ter sido contornado, seria de mais valia considerar amplificadores com melhores características, uma vez que o custo adicional compensaria por evitar o trabalho extra de correções. Outra alternativa seriam circuitos integrados específicos para essa função; porém, as duas alternativas devem ser melhor avaliadas. Considerando que os resultados práticos superaram as expectativas iniciais deste trabalho, o custo adicional para eventuais melhorias é válido.

Outras melhorias poderiam também ser aplicadas ao *software* de interface, que apesar de ter sido desenvolvido neste projeto, não era foco de estudo. É válido, para facilitar o serviço de soldagem, incluir um banco de dados com perfis pré-configurados e adicionar uma função de aprendizagem para que sejam salvas eventuais interferências do usuário, criando, assim, um perfil personalizado e específico de acordo com o resultado de cada processo.

Uma análise mais elaborada na teoria de controle também é importante, apesar do resultado final ter sido adequado, talvez uma abordagem com técnicas de controle específicas podem trazer resultados ainda melhores.

Por fim, uma solução que tornaria esse equipamento mais prático, seria implementar um sistema completo e autônomo para dispensar o uso de um computador, incluindo na própria máquina um *display* para configurações.

REFERÊNCIAS

- BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência** 6ª ed. Florianópolis, 2006.
- BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos** 11ª ed. São Paulo, 2013.
- HART, Daniel W. **Power Electronics**. Valparaíso, 2011.
- HECHT, Eugene. **Óptica**. 3ª ed. Lisboa, 2012.
- LIMA, C. B. D.; VILLAÇA, M. V. M. **AVR e Arduino** 2ª ed. Florianópolis, 2012.
- MALVINO, Albert; BATES, David. **Eletrônica: Volumes 1 e 2**. 8ª ed. Porto Alegre, 2016.
- NISE, Norman S. **Engenharia de controle** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2002.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro, 1982.
- SANTOS, A.H.M. et al. **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. 3ª ed. Itajubá, 2006.
- SEIKO EPSON CORPORATION, **BGA Package Mount Manual** Rev 1.0.
Disponível em:
https://global.epson.com/products_and_drivers/semicon/pdf/p000692.pdf.
Acesso em: 10 abr. 2021.
- THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro. U. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 4ª ed. 2011.
- VILLAÇA, M.V.M.; SILVEIRA, J.L. **Sistemas de Controle** 8ª ed.: apostila do Curso Superior em Eletrônica Industrial do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Florianópolis, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A Código fonte do matlab para projeto do aquecedor superior

```

clc
clear
% Degrau de 15%duty para 35%Duty ---> 1%duty = 2.55 SetPWM
% aproximadamente (Visual) tau 50 segundos
% Para 5% 3 tau =150 segundos
% 10mV/graus (Temperatura)

%Planta
Ts5p=150;           % tempo de acomodação para 5%
Tau=Ts5p/3;
k=(206-166)/((35-15)*2.55); % Já em DutyCicle
Gs=tf([k],[Tau 1]);
%infostep=stepinfo(Gs,'SettlingTimeThreshold',0.05); %Ts para 5%
%Ts5p=infostep.SettlingTime;

%Objetivo
Tnovo=10           % Novo tempo de acomodação desejado
Teq=Tau/((Ts5p)/Tnovo);
Kp=Tau/(Teq*k);
Cs=tf([Tau 1],[1 0])
Cs=Cs*(Kp/Tau)
FTMA=(Gs*Cs);

% Digital
Ta=Tnovo/10;      %Tempo de amostragem
Gz=c2d(Gs,Ta);
Cz=c2d(Cs,Ta)

FTMFs=feedback((Gs*Cs),1);
FTMFz=feedback((Gz*Cz),1);
figure(1)
step(Gs)
figure(2)
step(FTMFs,FTMFz)

figure(3)
hold on

T=Ta;
% Equações recursivas e erro
amostra=0:35;
amostraT=amostra*T;
r=ones(1,36)
u(1)=0;
erro(1)=r(1)-u(1);
u(2)=0.297*r(2-1)+1.683*u(2-1);
erro(2)=r(2)-u(2);

```

```
for j=3:36
    u(j)=0.297*r(j-1)-0.2911*r(j-2)+1.683*u(j-1)-.6889*u(j-2);
    erro(j)=r(j)-u(j);
```

```
end
```

```
%plot(amostraT,u)
plot(amostraT,u,'o')
```

```
plot(amostraT,erro)
plot(amostraT,erro,'x')
step(FTMFz)
```

|

APÊNDICE B Código fonte do matlab para projeto do aquecedor inferior

```

clc
clear
% Degrau de 5%duty para 15%Duty ---> 1%duty = 2.55 SetPWM
% aproximadamente (Visual) tau 300 segundos
% Para 5% 3 tau =100 segundos
% 10mV/graus (Temperatura)

%planta
Ts5p=300;
Tau=Ts5p/3;
k=(165-130)/((15-5)*2.55);
Gs=tf([k],[Tau 1]);

%Objetivo
Tnovo=10
Teq=Tau/((Ts5p)/Tnovo);
Kp=Tau/(Teq*k);
Cs=tf([Tau 1],[1 0])
Cs=Cs*(Kp/Tau)
FTMA=(Gs*Cs);

% Digital
Ta=Tnovo/10;
Gz=c2d(Gs,Ta);
Cz=c2d(Cs,Ta)

FTMFs=feedback((Gs*Cs),1);
FTMFz=feedback((Gz*Cz),1);
figure(1)
step(Gs)
figure(2)
step(FTMFs,FTMFz)

% Equações recursivas para demonstrar erro
T=Ta;
amostra=0:35;
amostraT=amostra*T;
r=ones(1,36);
u(1)=0;
erro(1)=r(1)-u(1);
u(2)=0.2955*r(2-1)+1.692*u(2-1);
erro(2)=r(2)-u(2);

for j=3:36
    u(j)=0.2985*r(j-1)-0.2955*r(j-2)+1.692*u(j-1)-0.6950*u(j-2);
    erro(j)=r(j)-u(j);

```

```
end  
figure(3)  
hold on  
%plot(amostraT,u)  
plot(amostraT,u,'o')  
  
plot(amostraT,erro)  
plot(amostraT,erro,'x')  
step(FTMFz)  
hold off
```

APÊNDICE C Características do atmega328p

High performance, low power AVR® 8-bit microcontroller

- Advanced RISC architecture
- 131 powerful instructions – most single clock cycle execution
- 32 x 8 general purpose working registers
- Fully static operation
- Up to 16MIPS throughput at 16MHz
- On-chip 2-cycle multiplier
- High endurance non-volatile memory segments
- 32K bytes of in-system self-programmable flash program memory
- 1Kbytes EEPROM
- 2Kbytes internal SRAM
- Write/erase cycles: 10,000 flash/100,000 EEPROM
- Optional boot code section with independent lock bits
- In-system programming by on-chip boot program
- True read-while-write operation
- Programming lock for software security
- Peripheral features
- Two 8-bit Timer/Counters with separate prescaler and compare mode
- One 16-bit Timer/Counter with separate prescaler, compare mode, and capture mode
- Real time counter with separate oscillator
- Six PWM channels
- 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
- Temperature measurement
- Programmable serial USART
- Master/slave SPI serial interface
- Byte-oriented 2-wire serial interface (Phillips I2C compatible)
- Programmable watchdog timer with separate on-chip oscillator
- On-chip analog comparator
- Interrupt and wake-up on pin change
- Special microcontroller features
- Power-on reset and programmable brown-out detection
- Internal calibrated oscillator
- External and internal interrupt sources
- Six sleep modes: Idle, ADC noise reduction, power-save, power-down, standby, and extended standby
- I/O and packages
- 23 programmable I/O lines
- 32-lead TQFP, and 32-pad QFN/MLF
- Operating voltage:
- 2.7V to 5.5V for ATmega328P
- Temperature range:

- Automotive temperature range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
- Speed grade:
 - 0 to 8MHz at 2.7 to 5.5V (automotive temperature range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$)
 - 0 to 16MHz at 4.5 to 5.5V (automotive temperature range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$)
- Low power consumption
- Active mode: 1.5mA at 3V - 4MHz
- Power-down mode: $1\mu\text{A}$ at 3V

APÊNDICE D Código fonte do microcontrolador

```

/*
 * Estacao BGA ANDERLEI
 */

#include "USART.h"
#define LEDPB5//LED

unsigned char tempas[4];
unsigned char tempai[4];
unsigned char temps=0;
unsigned char tempi=0;
unsigned char erro leitura=0;
unsigned char dadorx;
unsigned char numerorx[5];
unsigned char posrx=0;

int us=0;
int u1s=0;
int erros=0;
int erro1s=0;
int PWMs=0;
int ui=0;
int u1i=0;
int erroi=0;
int erro1i=0;
int PWMi=0;

int main(void)
{
    ADMUX=ADMUX|(1<<REFS1)|(1<<REFS0)|(1<<ADLAR); //resultado
do acd em ADCH referencia 1.1
    ADCSRA=0b10000111;
    // habilita ADC, Prescaler 128
    DIDR0=0b00001111;
    // ADC desconectado de I/O digital
    DDRB=0b00100110;
    // seta saídas
    DDRC=0b00000000;
    DDRD=0b01100010;

    TCCR0A=0b10100011; //COM0A como saida PWM em modo
PWM rapido
    TCCR0B=0b00000011; // prescaler 64 - proximo 500khz

    TCCR1B=0b00001100; //modo CTC , prescaler = 256
    TIMSK1=0b00000010; //Habilita interrupcao
    OCR1A=30000; // 1 segundos

```



```

USART_Inic(MYUBRR);

sei();
clr_bit(TCCR0A,7);
clr_bit(TCCR0A,5);

while(1)
{
}
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    set_bit(PORTB,LED);
    clr_bit(ADMUX,MUX0);
    set_bit(ADCSRA,ADSC);           // pede leitura do ADC
    while(tst_bit(ADCSRA,ADSC)){}
    tempas[0]=(ADCH);

    set_bit(ADMUX,MUX0);
    set_bit(ADCSRA,ADSC);           //pede leitura do ADC
    while(tst_bit(ADCSRA,ADSC)){}
    tempai[0]=(ADCH);

    erros=tempas-tempas[0];
    us=(19*erros)-(19*erro1s)+(1*u1s);
    u1s=us;
    erro1s=erros;
    PWMs=us;
    if(PWMs>254)
    {
        PWMs=255;
    }
    if(PWMs<1)
    {
        PWMs=0;
        clr_bit(TCCR0A,7);
    }
    else
    {
        set_bit(TCCR0A,7);
    }

    erroi=tempai-tempai[0];
    ui=(22*erroi)-(21*erro1i)+(1*u1i);
    u1i=ui;
    erro1i=erroi;
    PWMi=ui;
    if(PWMi>254)
    {

```

```

        PWMi=255;
    }
    if(PWMi<1)
    {
        PWMi=0;
        clr_bit(TCCR0A,5);
    }
    else
    {
        set_bit(TCCR0A,5);
    }

    OCR0A=PWMs;
    OCR0B=PWMi;
    clr_bit(PORTB,LED);

    if(erroleitura>3)// se perder 3 comunicacoes
    {
        clr_bit(TCCR0A,7);
        clr_bit(TCCR0A,5);
        temps=0;
        tempi=0;
    }
    else
    {
        tempas[1]=(tempas[0]/100);
        tempas[2]=((tempas[0]-(100*tempas[1]))/10);
        tempas[3]=((tempas[0]-(100*tempas[1]))-(10*tempas[2]));

        tempai[1]=(tempai[0]/100);
        tempai[2]=((tempai[0]-(100*tempai[1]))/10);
        tempai[3]=((tempai[0]-(100*tempai[1]))-(10*tempai[2]));

        while(!((UCSR0A&(1<<UDRE0))));//espera o dado ser enviado
        UDR0='s';// envia para o computador a temperatura do termopar
        while(!((UCSR0A&(1<<UDRE0))));//espera o dado ser enviado
        UDR0=tempas[1]+48;// envia para o computador a temperatura do
termopar
        while(!((UCSR0A&(1<<UDRE0))));//espera o dado ser enviado
        UDR0=tempas[2]+48;// envia para o computador a temperatura do
termopar
        while(!((UCSR0A&(1<<UDRE0))));//espera o dado ser enviado
        UDR0=tempas[3]+48;// envia para o computador a temperatura do
termopar
        while(!((UCSR0A&(1<<UDRE0))));//espera o dado ser enviado
        UDR0='i';// envia para o computador a temperatura do termopar
        while(!((UCSR0A&(1<<UDRE0))));//espera o dado ser enviado
        UDR0=tempai[1]+48;// envia para o computador a temperatura do
termopar

```

```

        while(!(UCSR0A&(1<<UDRE0))); //espera o dado ser enviado
        UDR0=tempai[2]+48; // envia para o computador a temperatura do
termopar
        while(!(UCSR0A&(1<<UDRE0))); //espera o dado ser enviado
        UDR0=tempai[3]+48; // envia para o computador a temperatura do
termopar
    }
    erroleitura++;
}

voidUSART_Inic(unsignedintubrr0)
{
    UBRR0H=(unsignedchar)(ubrr0>>8); //Ajusta a taxa de transmissão
    UBRR0L=(unsignedchar)ubrr0;
    UCSR0A=0; //desabilitar
    velocidade dupla
    UCSR0B=(1<<RXCIE0)|(1<<RXEN0)|(1<<TXEN0); //Habilita a
    transmissão e a recepção
    UCSR0C=(1<<UCSZ01)|(1<<UCSZ00); //modo assíncrono, 8 bits de
    dados, 1 bit de parada, sem paridade
}

ISR(USART_RX_vect)
{
    dadorex=UDR0;
    numerorx[posrx]=dadorex; // Dado recebido
    posrx++;

    if(dadorex=='*')
    {
        posrx=0;
        if(numerorx[0]=='s'&&numerorx[2]=='*')
        {
            temps=numerorx[1];
        }
        if(numerorx[0]=='i'&&numerorx[2]=='*')
        {
            tempi=numerorx[1];
            erroleitura=0;
        }
        numerorx[2]=0;
    }
}

```

APÊNDICE E Circuito completo

