

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

CAMPUS JOINVILLE

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL

ADRIANO LEHNERT

JEFFERSON LUIS DE SOUZA PESAVENTO

WELINTON DOS SANTOS

CONTROLADOR DE CÂMARA QUENTE

JOINVILLE, NOVEMBRO DE 2018.

**ADRIANO LEHNERT
JEFFERSON LUIS DE SOUZA PESAVENTO
WELINTON DOS SANTOS**

CONTROLADOR DE CÂMARA QUENTE

JOINVILLE, NOVEMBRO DE 2018.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**ADRIANO LEHNERT
JEFFERSON LUIS DE SOUZA PESAVENTO
WELINTON DOS SANTOS**

CONTROLADOR DE CÂMARA QUENTE

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

Orientador: Prof. Rodrigo Coral,
Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Michael Klug,
Dr. Eng.

JOINVILLE, NOVEMBRO DE 2018.

Lehnert, Adriano. Pesavento, Jefferson Luís de Souza. Santos, Welinton.

Controlador de Câmara Quente / Lehnert, Adriano. Pesavento, Jefferson Luís de Souza. Santos, Welinton – Joinville: Instituto Federal de Santa Catarina, 2018. 91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, 2017. Graduação. Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial. Modalidade: Presencial.
Orientador: Rodrigo Coral, Dr. Eng.

1.Mecatrônica 2.Controlador 3.Câmara Quente

I. CONTROLADOR DE CÂMARA QUENTE

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em especial a DEUS, que devido ao seu imensurável amor, nos proporciona a oportunidade da vida, fortalecendo nosso corpo e mente para superar os desafios de cada dia.

Aos nossos familiares, que foram o grande apoio nos momentos de dificuldades, alegrias e incentivo para conclusão do curso.

Aos profissionais da instituição federal de Santa Catarina, que proporcionou o incentivo, a persistência, a motivação durante todo o processo de aprendizado, bem como a organização de todo o espaço físico.

Aos grandes mestres do ensino, nossos professores, que tanto se dedicaram para transferir seus vastos conhecimentos a fim de garantir, o desenvolvimento do conhecimento e aprendizado.

Ao orientador Rodrigo Coral, que foi o grande incentivador para o desenvolvimento do projeto, acreditando, apoiando e buscando recursos para realização do projeto.

Ao coorientador Michael Klug, que proporcionou apoio e conhecimento para os desafios encontrados durante o desenvolvimento do projeto.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste projeto através do edital didático pedagógico (EDITAL – Nº 02DEPE/CJ/2017).

RESUMO

Este trabalho visa atender uma necessidade de um dos potenciais econômicos de nossa região, a indústria de injeção termoplástica, sendo desenvolvido um protótipo de controlador de câmara quente. A proposta é controlar a temperatura de injeção em moldes na indústria de polímeros, neste caso, o controle será feito inicialmente em 4 pontos de injeção. Contando com um formato modular na sua parte eletrônica e também na potência para facilitar a manutenção e troca de componentes quando necessário. O projeto teve início com pesquisas de mercado para saber as reais necessidades e possíveis melhorias do que já existe para controle. Para monitoramento e configurações do controlador, foi desenvolvido um display *touchscreen*. A realização dos testes foi feita com o uso de corpos de prova, tarugos de aço 1020, visando aproximar-se das condições reais. As dimensões da estrutura foram projetadas para que pudessem armazenar toda a parte eletrônica e de potência.

Palavras-chave: Mecatrônica. Controlador. Câmara Quente.

ABSTRACT

This project aims to meet a need of one of the economic potentials of our region, the thermoplastic injection industry, being developed a prototype of hot runner temperature controller. The proposal is to control the injection temperature in molds in the polymers industry. In this case, the control will be done initially at 4 injection points with a modular format in its electronic part and also in the power circuit to facilitate the maintenance and replacing of components when necessary. The project started with market researches to find out the real needs and possible improvements of those already in existence for control. For monitoring and controller settings, a touchscreen display has been developed. The tests were conducted with the use of test bodies, steel billets 1020, in order to approximate the real conditions. The dimensions of the structure were designed so they could store all the electronic part and the power circuit.

Keywords: Mechatronics. Control. Hot runner controller.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- INJETORA.....	26
FIGURA 2 - COMPONENTES DA CÂMARA QUENTE.....	27
FIGURA 3 - JUNTA DO TERMOPAR	28
FIGURA 4 – DIFERENÇA ENTRE AS TELAS RESISTIVA E CAPACITIVA	32
FIGURA 5 – TELA NEXTION.....	32
FIGURA 6 – CONTROLADOR POLIMOLD.....	33
FIGURA 7 – FUNCIONAMENTO DO HARDWARE	34
FIGURA 8 – MÓDULO DE LEITURA DE TEMPERATURA.....	36
FIGURA 9 – CIRCUITO DE LEITURA DE TEMPERATURA.....	36
FIGURA 10 – MÓDULO DE DISPARO PARA CARGA	37
FIGURA 11 – CIRCUITO DE DISPARO PARA CARGA	38
FIGURA 12 – TRANSFORMADOR DE CORRENTE	39
FIGURA 13 – CIRCUITO DE LEITURA DE CORRENTE	39
FIGURA 14 – FONTE SIMÉTRICA	42
FIGURA 15- GABINETE DO CONTROLADOR.....	43
FIGURA 16 – DIVISÃO INTERNA.....	43
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS	44
FIGURA 18 – PLACA ARDUINO MEGA	45
FIGURA 19 – ARDUINO IDE	45
FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA.....	46
FIGURA 21- ORDEM DE FUNÇÕES DO CONTROLADOR	47
FIGURA 22 - NEXTION EDITOR	49
FIGURA 23– TELA PRINCIPAL.....	49
FIGURA 24 – TELA DE CONFIGURAÇÃO.....	51
FIGURA 25 – ALARME DE TERMOPAR	52
FIGURA 26 – ALARME DE RESISTÊNCIA	52
FIGURA 27 – CIRCUITO DE ALARME SONORO	53
FIGURA 28- DIMENSÕES DO TARUGO DE TESTES	55
FIGURA 29 - RESISTÊNCIA DE COLEIRA	56
FIGURA 30 – LAYOUT DE TESTES.....	57
FIGURA 31 – TESTE SEM SINCRONISMO	58
FIGURA 32 – TESTE COM SINCRONISMO.....	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- VALORES ADICIONAIS POR ZONA	67
TABELA 2 – VALOR TOTAL DOS COMPONENTES.....	68

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	24
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1	TERMOPLÁSTICOS	25
2.2	INJEÇÃO TERMOPLÁSTICA.....	25
2.2.1	Câmara quente	26
2.2.2	Termopar	28
2.3	MICROCONTROLADOR.....	30
2.4	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA.....	31
2.4.1	Tela <i>Touchscreen</i>	31
2.4.2	Tela <i>Nextion</i>	32
3.	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	CONCEPÇÃO DO PROJETO	33
3.2	FUNIONAMENTO DO HARDWARE	34
3.3	MODULARIDADE	35
3.3.1	Módulo de leitura de temperatura.....	35
3.3.2	Módulo de disparo para carga.....	36
3.4	PLACA DE LEITURA DE CORRENTE	38
3.5	FONTE SIMÉTRICA.....	40
3.6	ESTRUTURA	42
3.7	SISTEMA	44
3.8	TELAS DO CONTROLADOR.....	48
3.9	ALARMES	51

4.	TESTES E AJUSTES	55
4.1.	FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR	57
4.2	ALARMES	60
4.5	OSCILAÇÃO NA LEITURA DA TEMPERATURA	61
4.6	DIFICULDADE NA LEITURA DE CORRENTE NA RESISTÊNCIA.....	62
4.7	DESLIGAMENTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DURANTE O FUNCIONAMENTO.....	62
4.8	ESPECIFICAÇÃO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO UTILIZADA	63
4.9	UTILIZAÇÃO DO CONTROLE PID	63
4.10	MEMÓRIA DA IHM ATINGIU O LIMITE DE SUA CAPACIDADE	64
4.11	DIFICULDADE DE COMUNICAÇÃO ENTRE O ARDUINO COM O DISPLAY NEXTION.....	64
4.12	ALARME ACIONANDO CONSTANTEMENTE	64
4.13	CONEXÃO DOS TERMOPARES COM AS PLACAS DE LEITURA DE TEMPERATURA.....	65
4.14	ERRO NO PROGRAMA EM RELAÇÃO À LEITURA DE TEMPERATURA SETADA NA TELA PRINCIPAL.....	65
5.	ANÁLISE DE CUSTOS.....	67
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
6.1	FUTUROS TRABALHOS	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO A – DATASHEET DOS CONVERSORES AD594/AD595	75
	ANEXO B– DATASHEET DO DISSIPADOR TÉRMICO	83
	APÊNDICE A – CÁLCULOS DE DISSIPAÇÃO TÉRMICA	84
	APÊNDICE B – CIRCUITO ELETRÔNICO DE LEITURA DE CORRENTE.....	86
	APÊNDICE C – TESTES DE RESISTÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE D – CIRCUITO ELÉTRICO	91

1. INTRODUÇÃO

Na área da indústria Plástica, os sistemas de câmara quente melhoraram em muitos fatores a produção no setor. Esse sistema aumenta a qualidade do produto, pois tem menores tensões internas do que o sistema de injeção a frio. Segundo Manrich (2005) o sistema de injeção com câmara quente pode economizar até 15% de material em relação ao sistema de injeção a frio, isso só levando em conta a perda nos galhos ou canais. Com isto não há gasto com processos de moagem e mistura para reaproveitamento do material.

Segundo a ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria Plástica) (2017) no ano de 2016 foram produzidos 64,9 bilhões de reais em transformados plásticos e foram gastos 70,45 bilhões de reais. Santa Catarina é o segundo estado com maior número de empregos no setor, chegando a 38.464 vagas em 1112 empresas segundo pesquisa feita pelo Cadastro de Empregados e Desempregados (2016). O controlador de câmara quente aqui proposto foi projetado para este setor. Busca-se apresentar um produto com o custo-benefício melhor que aqueles encontrados no mercado, e também melhorar o processo em vários pontos citados por Hamilton da Costa (2016) como: economia de matéria prima, aumento de vida útil do produto do cliente, economia de energia nas injetoras, controle uniforme das zonas de aquecimento e monitoramento das variáveis de saída.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Teve-se como objetivo desenvolver um Controlador de Câmara Quente em injetoras de plástico que atuem em até 4 zonas de controle.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um circuito eletrônico para a leitura de termopares tipo J e K, que fazem a leitura de temperatura nas zonas de aquecimento.
- Desenvolver um software para o controle de temperatura das diferentes câmaras.
- Desenvolver no software um controle de sincronismo da temperatura entre diferentes câmaras.
- Desenvolver no software um controle de pré-aquecimento da resistência para cada câmara.
- Desenvolver um circuito eletrônico de potência para atender o controle necessário para as saídas.
- Desenvolver uma interface para interação entre o usuário e o equipamento.
- Desenvolver uma estrutura para alocar de forma organizada todos os componentes usados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Para entender um pouco mais sobre o Controlador de Câmara Quente, é preciso entender um pouco sobre o processo de injeção termoplástica, termoplásticos, microcontroladores e IHM (Interface Homem Máquina).

2.1 TERMOPLÁSTICOS

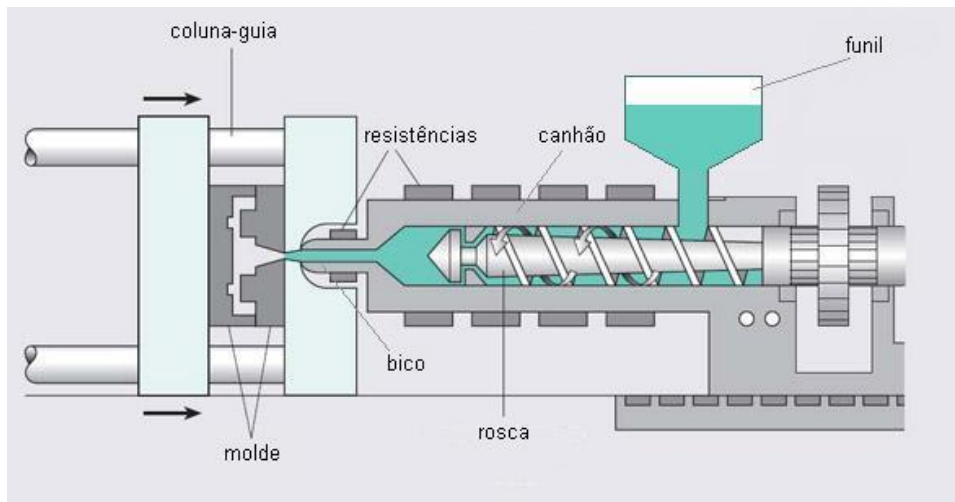
Os termoplásticos fazem parte de uma divisão dos polímeros, o qual a outra parte da divisão são os termofixos.

Os termoplásticos são aqueles que podem ser moldados várias vezes por ação de temperatura e pressão, por isso são recicláveis, já os termofixos sofrem reações químicas em sua moldagem as quais impedem uma nova fusão, portanto não são recicláveis. Os materiais plásticos vêm sendo utilizados há muitos anos em substituição a diversos tipos de materiais como o aço, o vidro e a madeira devido às suas características de baixo peso, baixo custo, elevadas resistências mecânica e química, facilidade de aditivção e ainda por serem 100% recicláveis. (ABIPLAST,2015)

2.2 INJEÇÃO TERMOPLÁSTICA

A injeção termoplástica é um processo de transformação do polímero e consiste na fusão do material termoplástico para tomar as formas de um molde desejado. O processo é feito por uma máquina injetora, como essa apresentada pela Figura 1.

Figura 1- Injetora



Fonte: <http://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp>

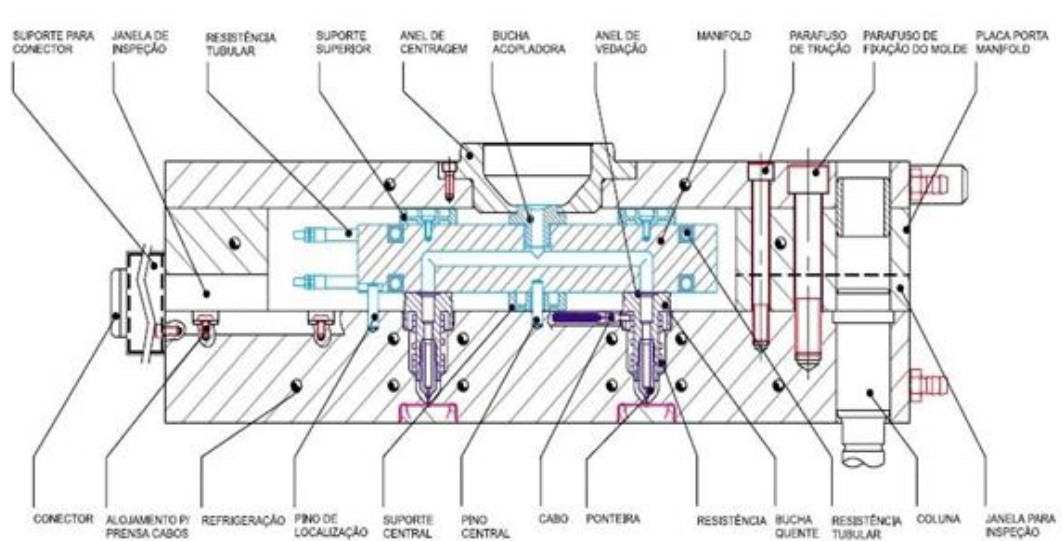
A alimentação da matéria prima é em forma de grãos e é direcionada pelo funil até a entrada no cilindro ou canhão, onde o material começa a ser aquecido pelas resistências elétricas e transportado pela rosca até o bico de injeção. Nessa etapa acontece o derretimento do material, atingindo o estado de líquido viscoso, possibilitando a injeção no molde. O molde consiste em placas de aço-ferramenta estacionárias e móveis onde se encontram as cavidades que dão forma ao plástico. No molde ainda existem canais de refrigeração para o resfriamento e solidificação da peça. Para alguns sistemas inclui-se no molde o sistema de câmara quente, o qual tem como função manter a temperatura do material no estado líquido até chegar ao molde.

2.2.1 Câmara quente

Com o molde fechado, o polímero entra nas cavidades através da câmara quente, constituída por buchas e ponteiros aquecidas por resistências que estão acopladas no molde superior, fazendo a extensão do bico injetor da máquina, mantendo o fluxo do material uniforme para todas as cavidades do molde. A medição da temperatura é feita por termopares, e tem de ser controlada para

garantir a temperatura do material a ser injetado. O sistema de câmara quente é composto por uma série de componentes como visto na figura 2.

Figura 2 - Componentes da Câmara Quente.



Fonte: Catálogo Polimold, (2000).

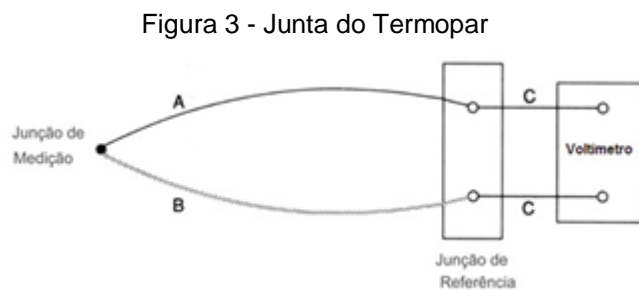
Com a medição de temperaturas feita pelos termopares, se torna possível o uso do controlador de temperatura, o qual envia um sinal de tensão proporcional à temperatura lida anteriormente, para as resistências elétricas que aquecem os manifolds. Esse controle é necessário, pois na ocorrência de poucos graus de variação entre a temperatura desejada e a real, ou ainda no caso de um produto que necessite de mais de um canal de injeção, a temperatura não atingindo o valor de referência, podem haver problemas no acabamento, resistência mecânica e preenchimento completo do molde do produto.

O controlador de temperatura pode também ser usado como o soft-starter da resistência, que funciona como a prevenção de um dos maiores problemas em campo. Com o ar úmido em volta da resistência, o aquecimento brusco a danifica ao longo do tempo, até ser necessária sua troca. O soft-starter consiste em pré-aquecer as resistências a uma temperatura mais baixa que a de trabalho, por um determinado tempo, até que elimine a umidade, para que assim possa chegar a temperatura desejada reduzindo os danos, aumentando consideravelmente a vida útil. As resistências tubulares são inseridas em um

alojamento usinado com precisão em ambos os lados dos manifolds, para uma temperatura uniforme e rápido aquecimento.

2.2.2 Termopar

Em 1822, o físico Thomas Seebeck descobriu que a junção de dois metais gera uma tensão elétrica em função da temperatura. O funcionamento dos termopares é baseado neste fenômeno, que é conhecido como efeito Seebeck. De forma resumida o termopar é ilustrado pela Figura 3.



Fonte- MOREIRA (2002, p.52)

Um termopar é constituído de dois metais distintos que unidos por sua extremidade formam um circuito fechado. Desta maneira é gerada uma força eletromotriz (FEM), que quando conectada a um instrumento de leitura, converte a tensão em valor de temperatura proporcional.

Conforme Borchardt (1979) a força eletromotriz de um termopar depende somente da natureza dos condutores e das temperaturas dos dois contatos. Existem categorias que classificam os termopares de metal nobre (R, S, B) e metal base (K, J, N, E, T). Os tipos de termopares para as temperaturas mais altas são os termopares de tipo refratário, que inclui os tipos C, G e D. Os sensores de termopar possuem a faixa de temperatura entre -200°C à 1750°C , com exatidão típica entre $0,5^{\circ}$ à 5°C , sendo que na maioria dos tipos de sensores não são lineares e possuem

tempo de resposta de 0,1 a 10 segundos. As principais vantagens são, o baixo custo, utilização simples, auto alimentação, reforçado, grande variedade e grande intervalo de temperatura. As desvantagens do sensor de temperatura são, a não linearidade, possuir baixa tensão, necessita de uma referência, ser menos estável e menos sensível.

Outro sensor de medição de temperatura é a termoresistência (RTD do inglês resistance temperature detector), que consiste do uso da platina como elemento em um termômetro de resistência de alta exatidão. O valor mais comum de uma termoresistência é de 100 ohms a 0°C. O coeficiente de temperatura do fio de platina padronizado pelas normas IEC751 e ASTM 1137 é 0,00385 $\Omega/^{\circ}\text{C}$, sendo que para uma termoresistência de 100 ohms, isso corresponde a 0,385 ohms por grau Celsius. Por exemplo, para uma temperatura de 25°C, o valor da termoresistência será de 109,73 ohms.

As termoresistências possuem faixa de temperatura entre -200 à 650°C, com exatidão típica de 0,1 a 1,0°C, com medição linear de temperatura e tempo de resposta na faixa de 1 a 50 segundos. As principais vantagens da termoresistência são, ser um sensor mais estável, ter maior precisão e possuir maior linearidade comparando-se ao sensor de termopar. As desvantagens desse sensor são, o alto custo, ter a necessidade de utilização de uma fonte de corrente, ter um pequeno diâmetro de resistência e resistência absoluta baixa.

Devido ao baixo custo em relação aos RTD's, os termopares do tipo J e K são utilizados em grande maioria nos projetos de câmara quentes, onde a quantidade de termopares pode variar de quatro a cento e oito zonas de temperatura dependendo da construção do molde. Por ter uma grande variedade de tamanhos, esses tipos de termopares são bem aplicáveis a necessidade das câmaras quentes, que necessitam de tamanhos reduzidos.

Os termopares do tipo J possuem como termoelemento positivo ferro puro e Constantan com termo elemento negativo. Medem o intervalo de -40 a 750°C. A utilização do tipo J acima dos 750°C leva a uma transformação magnética abrupta que estraga a calibração. Sua configuração se dá por:

-Termoelemento positivo (JP): Fe (ferro) 99,5%;

-Termoelemento negativo (JN): Cu (cobre) 55% Ni (níquel) 45%;

-Faixa de utilização: -40°C a 750°C;

-Fem. produzida: -8,096 mV a 42,919 mV.

O termopar tipo K é formado por fios de cromo, com termoelementos positivos, e alumínio, com termoelementos negativos. Sendo adequado para medição entre -200°C a 1200°C. Sua configuração se dá por:

- Termoelemento positivo (KP): Ni (níquel) 90% CR (cromo) 10%;

- Termoelemento negativo (KN): Ni (níquel) 95% Mn (manganês) 2% Si (silício) 1% Al (alumínio)22%;

- Faixa de utilização -270°C a 1200°C;

- Fem. produzida: -6,458 mV a 48,838 mV.

2.3 MICROCONTROLADOR

Os microcontroladores são circuitos integrados complexos que podem ser programados para exercer diversas funções de controle, como exemplo, o sistema de controle de um automóvel, o qual está interligado a vários sensores espalhados no carro, gerenciando quais ações devem ser feitas por determinados dispositivos. (BRAGA, 2016).

Neste ponto do trabalho abordaremos o sistema de microcontrolador ATmega 2560 que está acoplado ao Arduino Mega, pois será utilizado no controlador.

O Arduino é um dispositivo que difere de um computador normal, pois não apresenta sistema operacional, nem interfaces para teclado, mouse ou monitor. Seu principal objetivo é controlar coisas realizando interfaces entre sensores e atuadores, através dele pode-se conectar um sensor de presença, que ao ser acionado ativa um alarme por exemplo. (MONK, 2015).

Monk (2015) descreve brevemente que o Arduino é composto por um microcontrolador e alguns componentes de apoio. É uma ótima ferramenta para realizar testes e fazer protótipos, já que há uma facilidade de programação, edição e gravação do programa na placa através de sua porta USB.

Em termos práticos, um Arduino é um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software. (MCROBERTS, Michael, 2015).

2.4 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

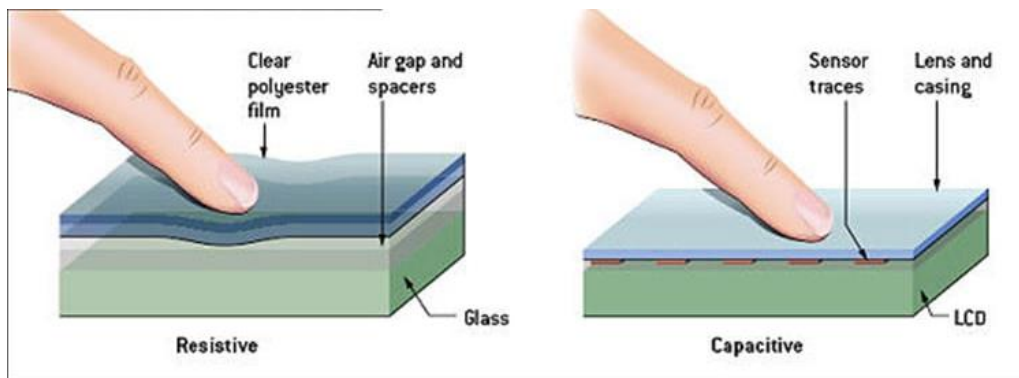
Com a intenção de facilitar a interação do usuário com a máquina, para esse projeto foi implantada uma IHM (Interface Homem Máquina). Afim de não utilizar botões nem teclado no controlador, foi optado por utilizar uma tela *touchscreen*, tendo assim todo monitoramento de variáveis e configuração de parâmetros a partir da tela.

2.4.1 Tela *Touchscreen*

As telas *touchscreen* (sensível ao toque) já tomaram conta em maioria das áreas tecnológicas, smartphones, tabletes e computadores. Os tipos mais utilizados de tela touch são as resistivas e as capacitivas segundo Pedroza (2014).

O sistema resistivo é formado por três camadas, sendo uma resistiva, outra de vidro e outra de metal condutor. Entre as camadas resistiva e condutora existe uma corrente elétrica de baixa intensidade. Com o toque na tela e as duas camadas estando encostadas há uma mudança de campo elétrico no ponto, que é detectado por um processador e transformado em um comando. Já as telas com sistema capacitivo, usam uma camada eletricamente carregadas sobre o painel do monitor, que ao toque transmitem elétrons para o dedo. Com a percepção desta descarga são enviadas as coordenadas do ponto tocado e realizado um comando. A vantagem das telas capacitivas às resistivas, é que elas permitem a passagem de 90% da luminosidade do monitor, já as resistivas têm 75% permeabilidade luminosa por conter uma camada metálica. A figura 4 mostra a diferença entre as telas resistiva e capacitiva que é explicada por Grasel (2014).

Figura 4 – Diferença entre as telas Resistiva e Capacitiva



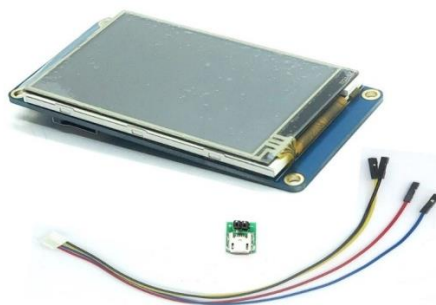
Fonte: GRASEL (2014)

2.4.2 Tela Nextion

Analisando as opções de display do mercado, foi encontrada a tela Nextion NX8048T070 da Itead. Esta tela tem 7" (sete polegadas), tamanho apropriado para mostrar informações das 4 zonas ao mesmo tempo, facilitando o monitoramento do operador. Além de oferecer a interação do usuário com a tela, o que pesou na escolha por essa opção foi a possibilidade de processar e armazenar dados no próprio display, diminuindo o uso de portas e memória do Arduino. A comunicação é por porta serial e existe um software chamado Nextion Editor que auxilia na produção das páginas, permitindo também fazer simulações sem a tela física.

A Figura 5 mostra a tela Nextion de 7" (sete polegadas), além de seus quatro cabos de conexões e um adaptador micro USB para a alimentação de energia da tela

Figura 5 – Tela Nextion



Fonte: ITEAD (2017)

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 CONCEPÇÃO DO PROJETO

A ideia do projeto surgiu devido a percepção de uma melhoria no processo de injeção por câmara quente. Isso se deu pelo fato de um dos autores do projeto trabalhar na área e verificar quão grande seria a importância de controlar precisamente a temperatura de injeção para o aumento da qualidade e melhoria do acabamento.

Visando constatar a viabilidade e necessidade real deste projeto, buscou-se no mercado produtos que pudessem servir como base de estudos. Neste âmbito encontrou-se vários exemplos, dos quais o controlador da fabricante Polimold mostrada pela Figura 6 é o que mais se destaca no mercado nacional e que mais se aproxima das propostas do projeto.

Figura 6 – Controlador Polimold



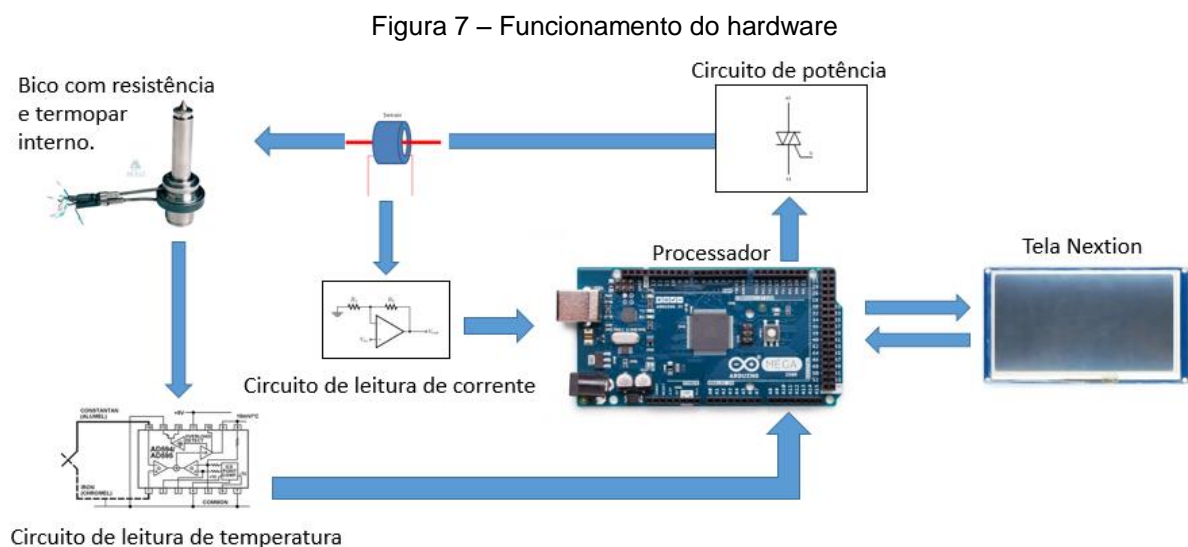
Fonte: POLIMOLD

O valor de mercado desse produto é de R\$1500,00 (mil e quinhentos reais) por zona controlada, a partir dessa informação focou-se em projetar algo com um custo menor e com uma interface melhor para interação com o usuário,

oferecendo através de uma tela *touchscreen* uma melhor visualização e configuração dos parâmetros de controle.

3.2 FUNCIONAMENTO DO HARDWARE

O funcionamento do conjunto de hardware pode ser explicado juntamente com a Figura.7, onde observamos a comunicação entre os sensores, atuadores, placas eletrônicas, processador e tela *touchscreen*. A medição de temperatura feita pelo termopar é enviada para o circuito de leitura de temperatura primeiramente, depois enviado ao Arduino, onde esse dado é processado e enviado a tela para que seja mostrado ao usuário o valor de temperatura real. O valor de temperatura selecionado pelo usuário na tela é enviado para o Arduino, onde é feita a tomada de decisão pelo programa de controle se a saída de potência deve ser acionada ou não. Em cada saída foi acoplado um transformador de corrente, que transforma o sinal de corrente em sinal de tensão que é enviado para a placa de leitura de corrente onde ocorre a amplificação deste sinal para ser enviado ao Arduino que processa este dado e envia em forma de valor numérico de corrente para ser mostrado na tela ao usuário.



Fonte: Elaboração Própria

3.3 MODULARIDADE

Pensando na possibilidade de tornar o presente projeto em um produto comercializável, esse foi concebido com uma arquitetura modular, dessa forma, facilitando a troca de componentes com defeito, diminuindo o custo de manutenção e consertos. Sendo assim, foram projetadas placas individuais para cada zona de temperatura controlada, tanto para a aquisição de dados com os termopares, quanto para saída controlada nas resistências. Para facilitar a troca destas placas utilizamos um encaixe tipo gaveta.

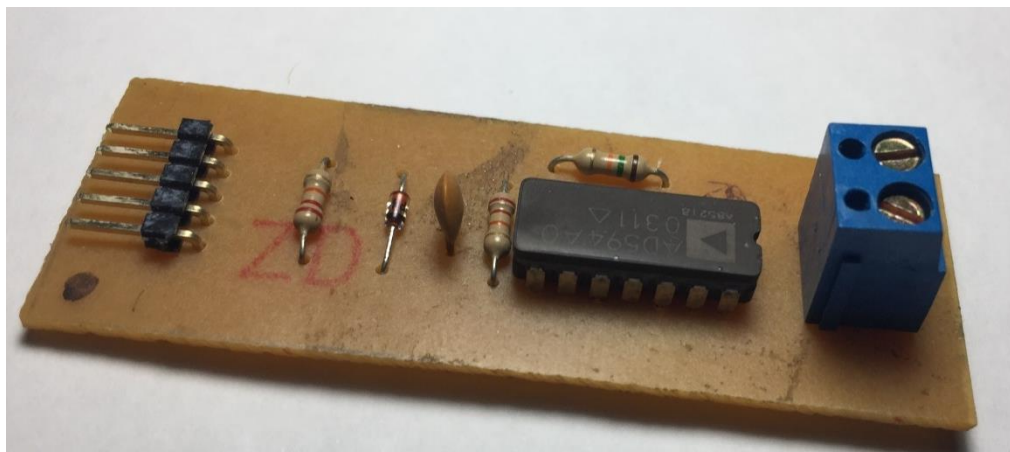
3.3.1 Módulo de leitura de temperatura

O módulo de leitura de temperatura mostrado na figura 8 é uma placa em circuito impresso, que possui um conversor analógico digital. Para o termopar do tipo J foi utilizado o conversor AD594. Para o termopar do tipo K o conversor AD595 foi o escolhido, cujos datasheets estão disponíveis no Anexo A.

A escolha dos conversores AD594 e AD595, ocorreu por serem amplificadores de instrumentação completos, incluindo ainda um compensador de junta fria para termopar. Esses componentes combinam uma referência de ponto de gelo com um amplificador pré calibrado para produzir uma saída de tensão de aproximadamente de $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ conforme leitura do termopar, para cada grau de temperatura lida, a saída do conversor disponibilizará 10 mV. As opções de configuração dos pinos permitem que o conversor AD, seja usado como um controlador de temperatura direta, ou podendo ser configurado de modo remoto, fornecendo um sinal para um controlador externo.

Outra vantagem do conversor AD é de possuir um alarme de falha de termopar indicando se um ou ambos os terminais do termopar estão abertos, gerando um sinal de tensão entre 0 e 5 V (TTL), através de uma saída transistorizada incluída internamente. Os conversores AD 594 e 595 podem ser alimentados a partir de uma única fonte de alimentação de +5 V, incluindo ainda uma fonte de alimentação negativa e podem ser medidas temperaturas abaixo de 0°C .

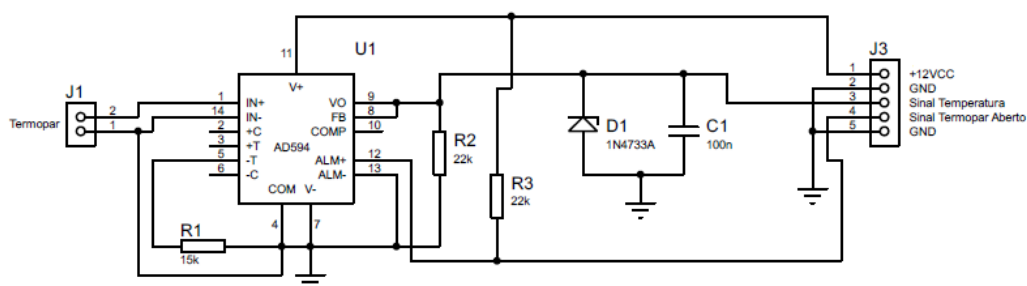
Figura 8 – Módulo de leitura de temperatura



Fonte: Elaboração própria

O layout das placas foi feito através do software Proteus, no qual é possível desenhar o circuito, simular e gerar um arquivo para impressão e confecção da placa física. A figura 9 mostra o circuito de leitura de temperatura projetado no Proteus.

Figura 9 – Circuito de leitura de temperatura



Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Módulo de disparo para carga

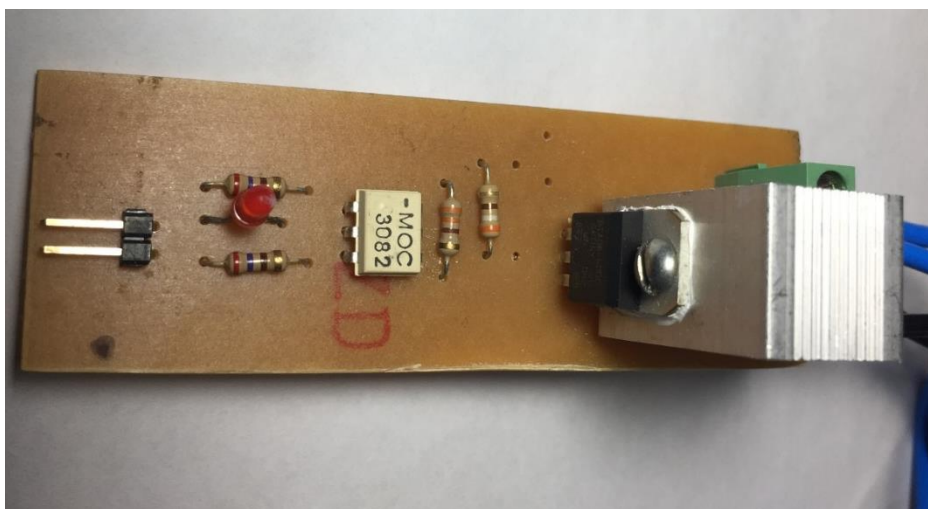
O módulo de disparo para carga consiste em uma placa eletrônica opto isolada, a qual isola o sinal proveniente do processador principal da alta tensão que será aplicada a carga. Este módulo foi projetado para receber um sinal de tensão de

corrente contínua de 5 V para habilitação do funcionamento e de 0 V para garantir o desligamento. Para o acionamento da carga, pode se aplicar tensão de alimentação máxima de até 240 V, e no máximo de até 8 A. Esse módulo possui as seguintes características técnicas:

- Tensão de entrada (off) = 0 V a 1,5 V;
- Tensão de entrada (on) = 2,56 V à 5 V;
- Tensão de saída = 2,4 V à 240 V;
- Tensão de Pico = 600 V;
- Corrente máxima de saída = 8 A.

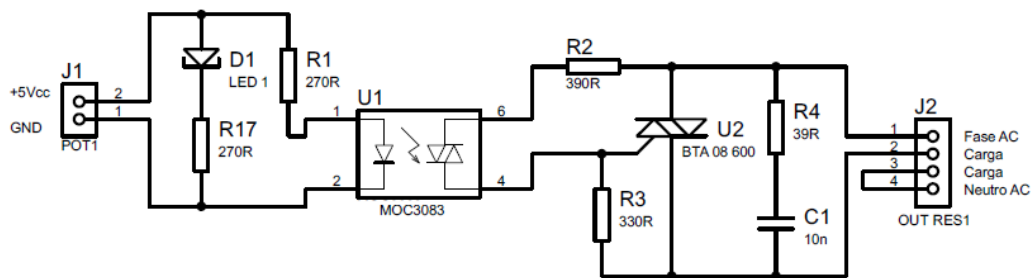
A figura 10 mostra o módulo de disparo e a figura 11 mostra o circuito eletrônico projetado no Proteus.

Figura 10 – Módulo de disparo para carga



Fonte: Elaboração própria

Figura 11 – Circuito de disparo para carga



Fonte: Elaboração própria

Para garantir o correto funcionamento dos módulos de disparo, foram realizados testes com resistências de 500, 750 e 1000 Watts afim de expor as placas a uma situação mais próxima da realidade das câmaras quentes. Á partir desses testes observou-se que a máxima corrente obtida foi de 4,78 A, abaixo dos 8 A especificados para o módulo. A geração de calor nos componentes foi um ponto bem analisado nos testes, sendo assim, foi constatado a necessidade da utilização de um dissipador térmico acoplado ao tiristor para seu bom funcionamento. Os cálculos de dissipação térmica foram realizados para então obter um dissipador que atenda a pior situação encontrada, que é na resistência de 1000 watts, a qual possui o maior consumo de corrente. Os cálculos foram feitos com base no datasheet do componente presente no Anexo B e estão descritos no Apêndice A. É importante ressaltar nesta parte do acionamento que os pulsos de tensão são dados de forma que são recortados ciclos inteiros, evitando assim a formação de harmônicas que prejudicam todo sistema elétrico e eletrônico.

3.4 PLACA DE LEITURA DE CORRENTE

A placa de leitura de corrente é composta por quatro canais individuais com entradas analógicas, obtidas por um transformador de corrente e saídas em tensão analógica. Sua alimentação é feita por uma fonte de tensão externa de 12 V.

A principal função desta placa é monitorar a corrente de cada resistência de aquecimento, amplificar o sinal de corrente em forma de tensão contínua e com isso identificar possíveis falhas na resistência. As leituras de correntes são realizadas através do transformador de corrente SCT006 da YHDC mostrado na figura 12, instalado na saída para a carga. Esse faz a leitura da corrente na faixa de 0 a 20 A e transforma em um sinal proporcional de 0 a 25 mA. Com o valor da corrente já abaixado a placa transforma este sinal de corrente em tensão e amplifica em aproximadamente 250 vezes para ser enviado a uma entrada analógica do processador principal.

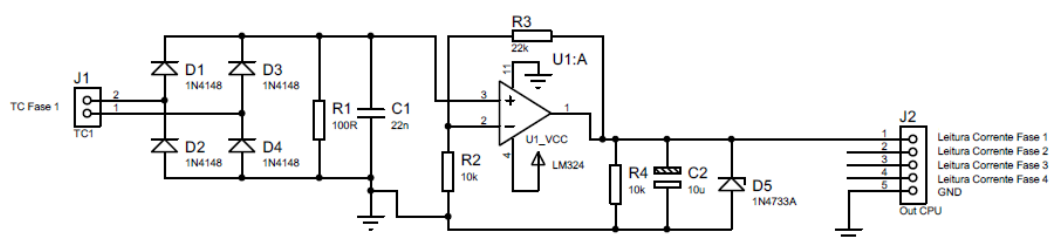
Figura 12 – Transformador de corrente



Fonte: YHDC

O projeto do circuito eletrônico de leitura de corrente para uma zona isolada é apresentado pela figura 13. O projeto da placa completa está disposto no Apêndice B.

Figura 13 – Circuito de leitura de corrente



Fonte: Elaboração própria

Foram realizados testes aplicando 220 V em cada tipo de resistência, afim de monitorar as tensões de saída na placa. Com os resultados apresentados no Apêndice C foi observada uma variação nas tensões entre cada saída que pode ser futuramente diminuída com a implantação de um trimpot. A realização desta melhoria não foi feita pois acarretaria na refabricação da placa de circuito impresso, gerando assim um custo o qual não haveria mais verba para cobertura.

3.5 FONTE SIMÉTRICA

O funcionamento das placas pertencentes ao controlador depende de uma fonte de energia, esta que pode ser de 5, 12 ou 24 V dependendo do circuito. Para projetar adequadamente a fonte, foi estabelecido um consumo de 700 mA, valor que equivale a 25% acima do valor real de consumo de todas as placas eletrônicas do controlador. Com base no consumo de corrente foram feitos cálculos para a confecção da fonte.

Passo 1: Cálculo da tensão de pico de entrada para a fonte simétrica, para isso foi especificado a tensão do transformador de 15 + 15 V.

$$V_p = \sqrt{2} \times V_{ef}$$

$$V_p = \sqrt{2} \times 15$$

$$V_p = 21,21 \text{ Vca}$$

Passo 2: Cálculo da tensão máxima na saída da ponte retificadora, utilizando como referência a tensão de 0,7 V correspondente ao diodo.

$$V_{max} = V_p - V_d$$

$$V_{max} = 21,21 - 0,7$$

$$V_{max} = 20,51 \text{ Vcc}$$

Passo 3: Cálculo da tensão média, neste caso incluindo a tensão ripple, que corresponde ao quanto será permitido à oscilação da tensão em caso de consumo nominal da carga, para isso, foi especificado uma variação máxima de 0,75 V.

$$V_{med} = V_{max} - \frac{V_r}{2}$$

$$V_{med} = 20,51 - \frac{0,75}{2}$$

$$V_{med} = 20,14 V_{cc}$$

Passo 4: Cálculo da carga equivalente que corresponde ao consumo máximo de corrente de 700 mA.

$$R_{Leq} = \frac{V_{med}}{I_o}$$

$$R_{Leq} = \frac{20,14}{0,7}$$

$$R_{Leq} = 28,77\Omega$$

Passo 5: Cálculo do capacitor para filtro de tensão da fonte simétrica.

$$C = \frac{V_{med}}{2fxR_{Leq}xV_r}$$

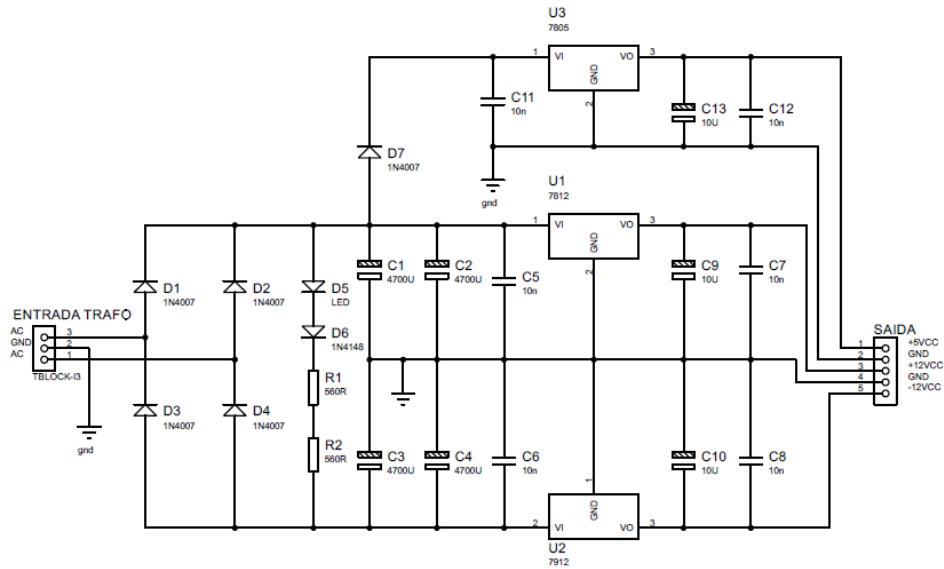
$$C = \frac{20,14}{2x60x28,77x0,75}$$

$$C = 7778,16\mu F$$

Para suprir a necessidade do capacitor eletrolítico calculado de 7778,16 μ F, sendo que esse valor não é comerciável, foram implementados dois capacitores de 4700 μ F de forma paralela, obtendo assim o valor de 9400 μ F. Dessa forma foi possível garantir melhor estabilidade na tensão e corrente para o consumo.

A figura 14 mostra o circuito da fonte por completo, fornecendo ao controlador, as tensões de: 5, -12 e 12 V.

Figura 14 – Fonte simétrica



Fonte: Elaboração própria

3.6 ESTRUTURA

Para alojar todas as placas de circuitos de potência e eletrônica, foi desenvolvido um gabinete em MDF (Medium Density Fiberboard) conforme figura 15, com medidas que proporcionassem uma fácil movimentação do controlador. Esse material foi escolhido como forma provisória para realizar todos os testes de funcionamento do controlador, visando assim identificar o melhor layout e posteriormente projetar um gabinete mais adequado.

No interior do gabinete foram feitas divisões para o alojamento de todos os componentes do controlador. Com todas as placas eletrônicas e de potência confeccionadas foi possível estipular um espaço adequado para cada item. A figura 16 mostra uma parte das divisões internas.

Figura 15- Gabinete do controlador



Fonte: Elaboração Própria

Figura 16 – Divisão interna

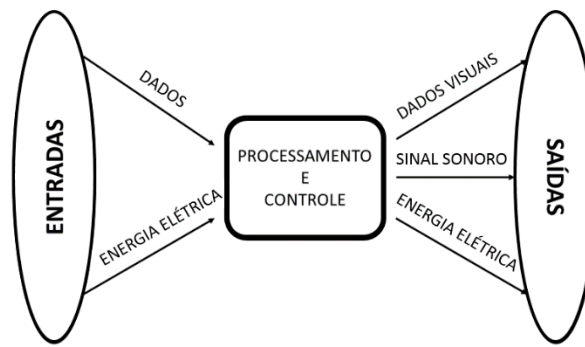


Fonte: Elaboração Própria

3.7 SISTEMA

Na Figura 17 é possível visualizar em formato de diagrama de blocos as entradas e saídas que representam o sistema de processamento, que é aplicado ao controle de variáveis, controle de sequência de eventos e controle de ocorrência de eventos. No Apêndice D é possível observar todo o circuito elétrico de entradas e saídas com blocos representado cada parte do protótipo.

Figura 17 – Diagrama de entradas e saídas



Fonte: Elaboração própria

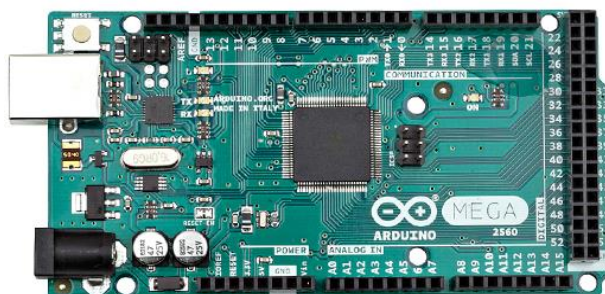
Definidas todas as ações que esse controlador deve realizar, foi possível criar um sistema embarcado responsável pelo controle das diversas funções, o qual o usuário não tem acesso às configurações do software.

Para o projeto do controlador de câmara quente foi aplicado a placa Arduino Mega 2560 R3 mostrada na Figura 18, que é uma placa eletrônica microprocessada, baseada no microcontrolador ATmega2560. Ela possui 54 pinos de entradas/saídas digitais, 16 entradas analógicas, 4 UART's (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP (In Circuit Serial Programming) e um botão de reset.

Para o desenvolvimento do sistema foi escolhida a linguagem C a qual Backes (2013) refere-se como uma das mais bem-sucedidas linguagens de alto nível, sendo também considerada a linguagem de programação mais utilizada de todos

os tempos. Com os códigos gerados pelo software Arduino IDE (Integrated Development Environment) cujo ambiente de programação é mostrado na Figura 19.

Figura 18 – Placa Arduino Mega



Fonte: Arduino (2018)

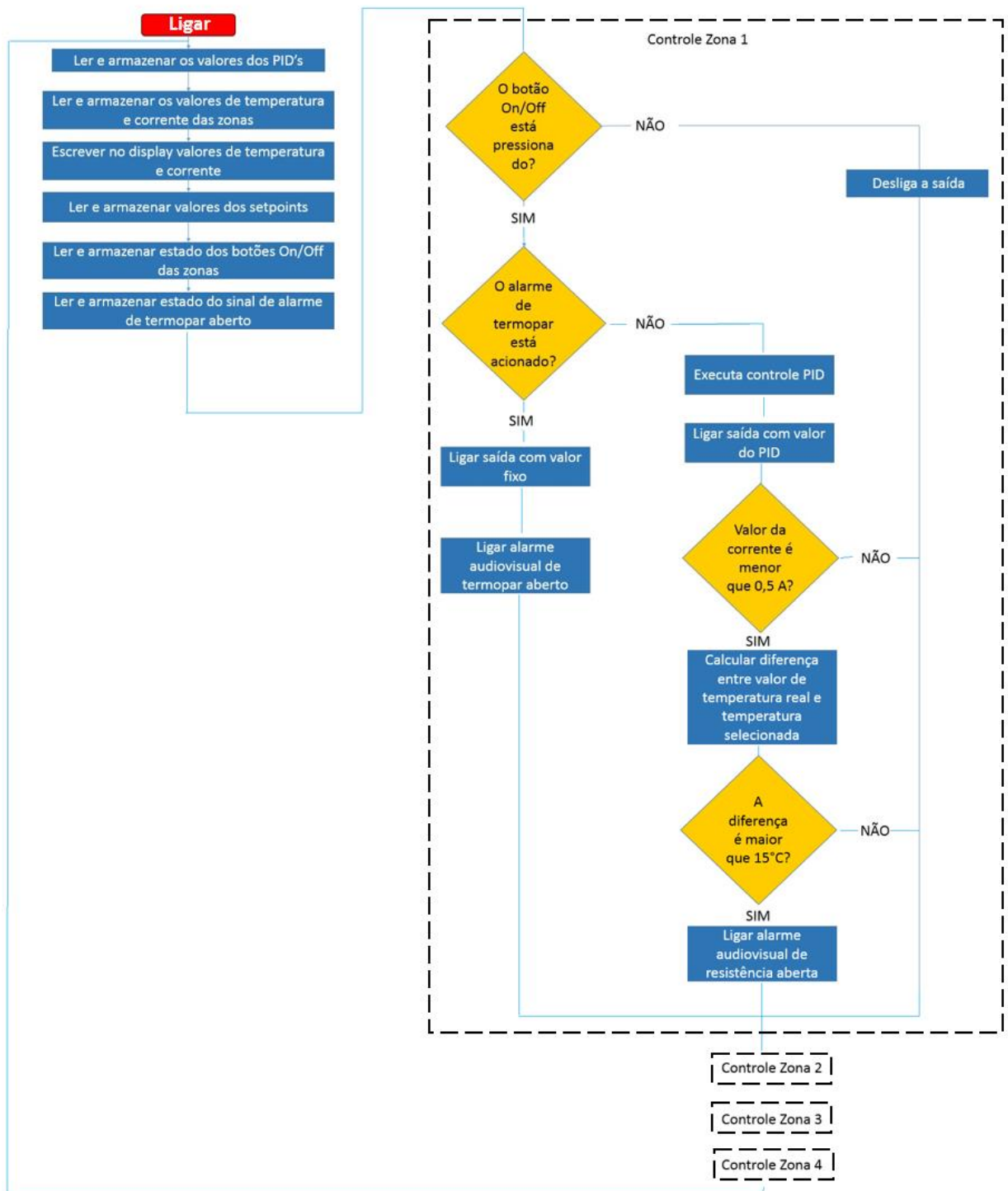
Figura 19 – Arduino IDE



Fonte: Elaboração Própria

A sequência lógica do programa desenvolvido é apresentada pela figura 20.

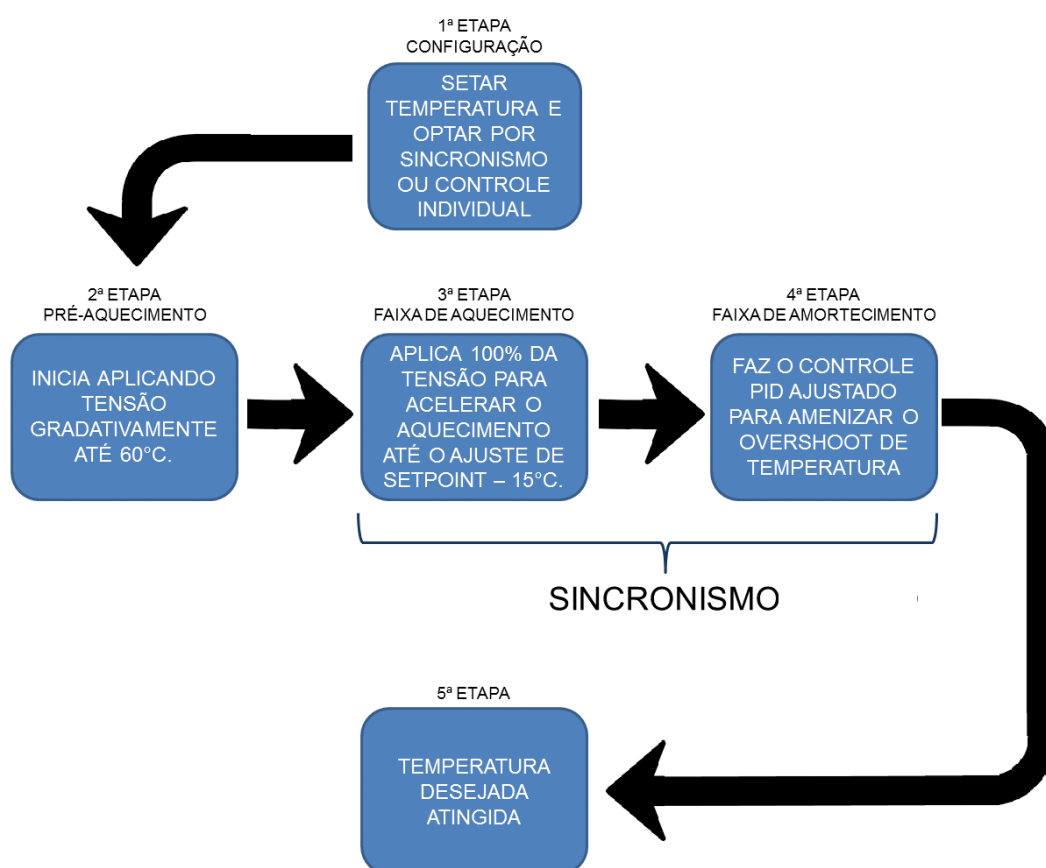
Figura 20 – Fluxograma do programa



Fonte: Elaboração própria

Para o desenvolvimento do programa, foram utilizadas como base algumas funções do livro “Primeiros Passos com o Arduino” Banzi (2015). E no desenvolvimento da programação foram utilizados alguns exemplos do livro “Arduino Básico” McRoberts (2015). O programa desenvolvido consiste em todos os comandos necessários para o funcionamento do controlador de câmara quente, conforme descrito no fluxograma. O programa dispõe de uma comunicação direta com o display da Nextion, coletando valores definidos pelo usuário, e processando esses valores para gerar o controle e respostas desejadas. Além disso, contém programas para leitura e conversão de sinais analógicos para dados de máquina, bem como leitura de entradas digitais e acionamentos de saídas digitais. O PID utilizado foi um modelo adaptado da biblioteca do Arduino IDE tendo ainda a necessidade de uma pesquisa de seu funcionamento com base nas instruções do site do Arduino, além da realização de alguns testes a fim de entender o funcionamento. A figura 21 mostra a sequência de ações para o funcionamento do controlador.

Figura 21- Ordem de funções do controlador



Fonte: Elaboração própria

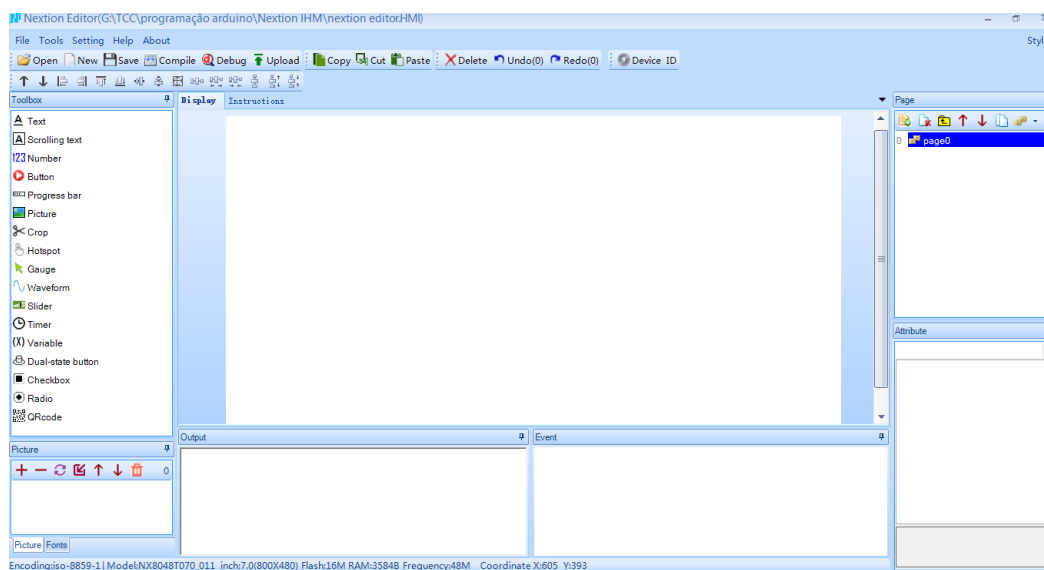
A maior dificuldade encontrada na programação foi a comunicação do Arduino com a tela Nextion. Cada elemento presente na tela possui uma ID que deve ser declarada juntamente com o nome do elemento e a página referente. Para a comunicação ser reconhecida é necessário o uso da biblioteca NeoNextion no Arduino IDE, que possui funções específicas, essa biblioteca foi encontrada no próprio site da Nextion. Com a escassez de bibliografias referentes a comunicação do Arduino com a tela Nextion, a definição de alguns parâmetros foi realizada por tentativas, pesquisas no site da Nextion e também no site do Arduino.

3.8 TELAS DO CONTROLADOR

A interface responsável pela interação do usuário com o controlador foi desenvolvida de forma a facilitar a maneira de configuração de parâmetros e monitoramento das variáveis controladas. Para isso foram geradas 5 telas com a ajuda do software “Nextion Editor” da Itead. Esse programa foi desenvolvido para a criação de interfaces gráficas das telas TFT da Itead. Usando esse software fica mais rápido desenvolver um dispositivo baseado em TFT (ITEAD, 2017). A figura 22 mostra o ambiente de desenvolvimento do software Nextion Editor.

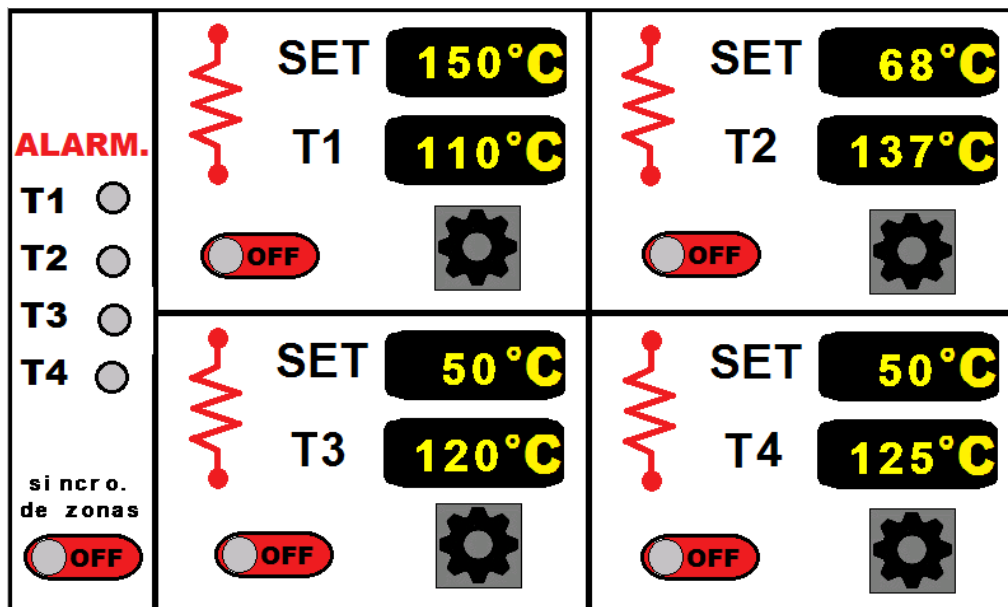
A proposta inicial foi de dispor de todas as informações e configurações do controlador em apenas uma tela, porém durante o processo de desenvolvimento foi constatada a necessidade de ter uma tela principal, além de algumas telas de configuração. Sendo assim foram desenvolvidas no total cinco telas, das quais uma é a principal e as demais são telas de configurações das zonas de controle. A figura 23 mostra a tela principal que é apresentada ao ligar o controlador. Essa tela está dividida em cinco partes, sendo 4 iguais que se remetem a cada zona de controle e uma de alarmes de termopar. Em cada divisão da tela principal é possível monitorar a temperatura de *setpoint* que se mostra ao lado do texto SET. Ao lado do texto T1 é mostrado ao usuário a temperatura real de trabalho na zona de controle 1. Ainda existem um botão de duplo estado ON/OFF que aciona a saída de tensão para a resistência referente à zona e um botão de configuração que direciona o usuário a uma tela de configuração da zona.

Figura 22 - Nextion Editor



Fonte: Elaboração própria

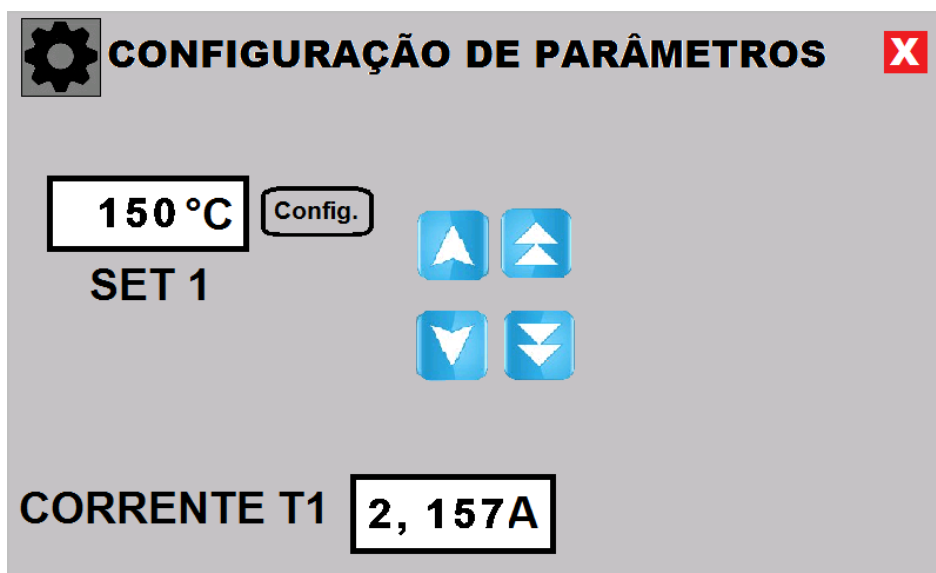
Figura 23– Tela principal



Fonte: Elaboração própria

Todas as telas de configuração seguem o mesmo padrão, para cada zona o usuário pode escolher uma temperatura de trabalho diferente. Nos primeiros testes foram utilizados *sliders* para a definição da temperatura. Observando a dificuldade em ter uma precisão na escolha da temperatura, foram implementados quatro botões para definir a temperatura desejada. A figura 24 mostra uma das quatro telas de configuração, referente a zona 1. Além da seleção da temperatura inicialmente foi projetado a possibilidade de configurar os valores dos ganhos do PID utilizado no sistema de controle. Porém no decorrer dos testes foi constatado que estes valores não são aceitos pelo PID do Arduino, precisando assim o operador configurar os ganhos K_p , K_i e K_d diretamente no programa do Arduino. Para as simulações os ganhos do PID foram configurados manualmente conforme observação dos resultados obtidos. Para efetuar a seleção dos valores é necessário apertar no botão “Config” que terá sua imagem alterada para “ENTER”, como mostrado ao lado do quadro que indica o valor da temperatura, ativando assim a configuração do parâmetro desejado. O botão com uma seta para cima acrescenta uma unidade no valor, o botão com uma seta para baixo diminui uma unidade. Foram acrescentados dois botões para obter agilidade no processo de seleção, um com duas setas para cima e outro com duas setas para baixo, acrescentando e subtraindo respectivamente dez unidades do valor de seleção. Após o término da configuração é necessário apertar o botão “ENTER” para conseguir configurar os outros parâmetros. Ainda na tela de configuração é apresentado o valor da corrente na resistência.

Figura 24 – Tela de configuração

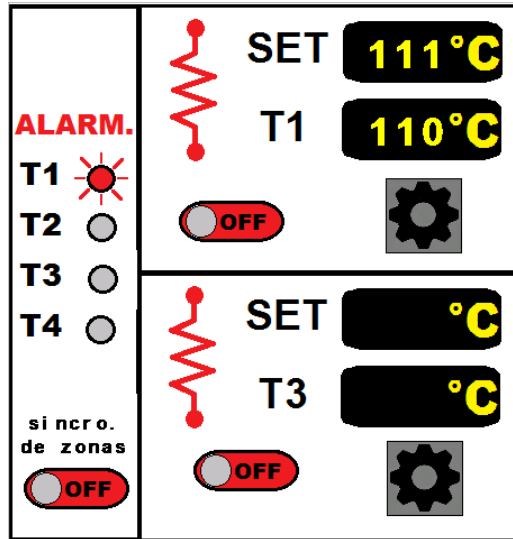


Fonte: Elaboração própria

3.9 ALARMES

Com o objetivo de alertar o usuário de possíveis falhas no controlador ou no sistema controlado, foram implantados dois tipos de alarme visual na tela principal do controlador e um alarme sonoro. Um alarme aponta a falha no sistema de leitura de temperatura, este é gerado quando o termopar está em aberto, e permanece oscilando a indicação e o sonoro até o momento do restabelecimento das condições normais de funcionamento. Na figura 25 é possível visualizar um alarme no termopar 1 indicado por T1, quando ativo o alarme este sinal é intermitente para que tenha melhor visibilidade do evento.

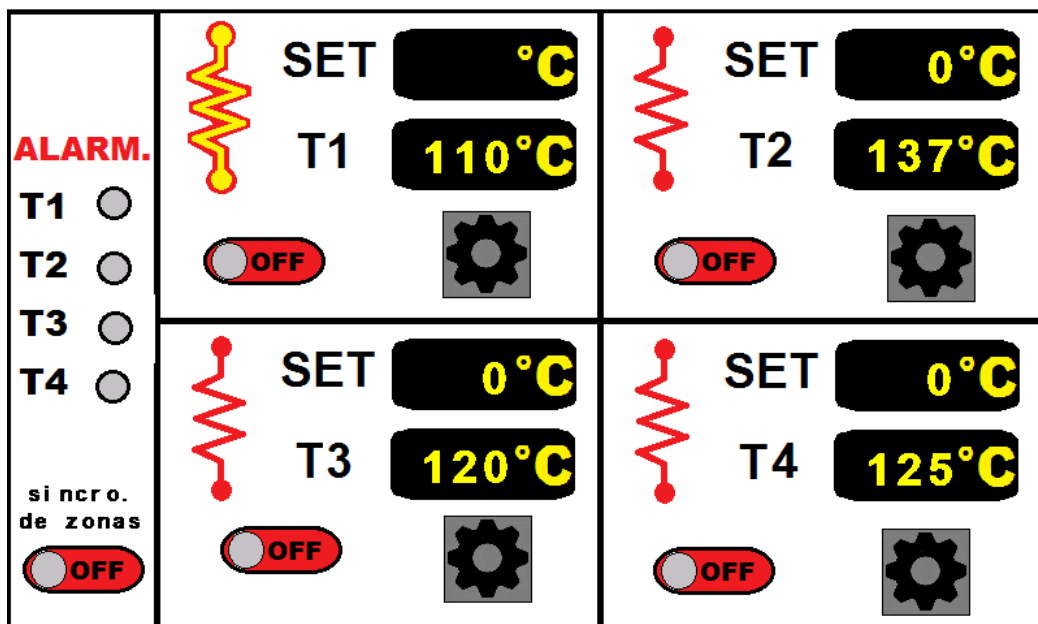
Figura 25 – Alarme de termopar



Fonte: Elaboração própria

Um segundo alarme é gerado para indicar ao usuário uma falha nas resistências. Esse é indicado através da oscilação da imagem da resistência que está presente em cada divisão das zonas e permanece oscilando até o restabelecimento das condições normais de funcionamento. A figura 26 mostra o alarme de resistência na zona 1.

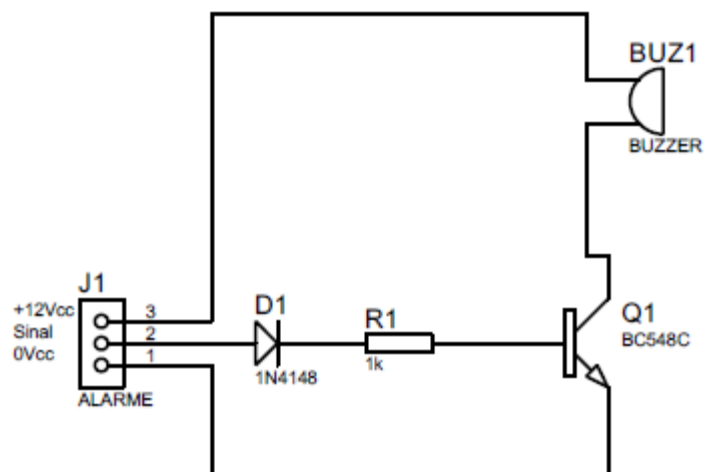
Figura 26 – Alarme de resistência



Fonte: Elaboração própria

Tanto para o alarme de termopar quanto para o alarme de resistência é disparado um alarme sonoro que se difere um do outro apenas pela frequência, o circuito do alarme pode ser observado na figura 27.

Figura 27 – Circuito de Alarme sonoro

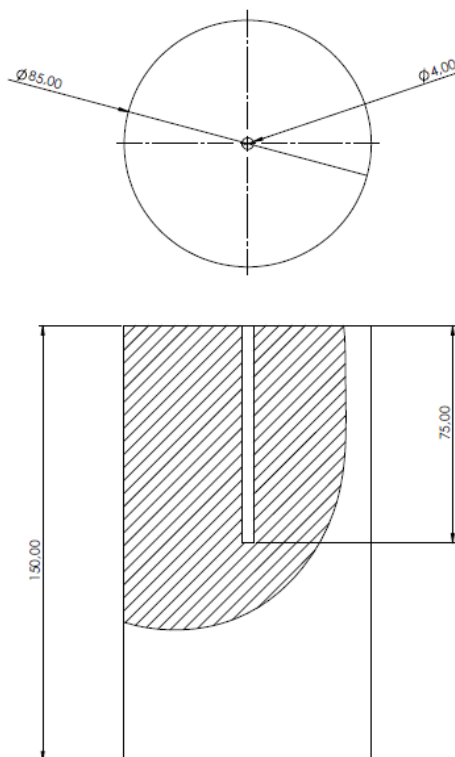


Fonte: Elaboração Própria

4. TESTES E AJUSTES

Com todas as placas eletrônicas confeccionadas, programação do Arduino e da tela Nextion concluídas, caixa para alojamento das placas e tela confeccionada, foi colocado o equipamento em teste inicialmente ligando o controle de apenas um canal. Durante a fase de testes vários ajustes de programação e nos circuitos foram feitos visando a melhoria do controle. A inserção dos outros canais de monitoramento e controle foi feito gradualmente a fim de observar o comportamento do controlador em relação ao tempo de resposta e processamento de dados. Com o intuito de realizar um teste de aproximação para a realidade foram utilizados quatro tarugos confeccionados em aço 1020, ambos com as mesmas dimensões e com furo no centro para instalação de termopar conforme Figura 28.

Figura 28- Dimensões do tarugo de testes



Fonte: Elaboração própria

Em cada um foi instalado uma resistência do tipo coleira que tem formato apresentado na Figura 29 com potências de 500, 750 e duas de 1000 Watts. As duas resistências de 1000 Watts, foram instaladas nas duas primeiras zonas de temperatura, denominadas zona 1 e zona 2, para zona 3, foi instalado a resistência

de 750 Watts e zona 4 a resistência de 500 Watts. Após a instalação das cargas e inserção dos termopares no interior dos tarugos, iniciou-se se os testes de funcionamento do equipamento. Foram realizados testes com temperatura de até 220°C. Na indústria geralmente a faixa de temperatura de trabalho varia conforme produto, podendo trabalhar com temperaturas na faixa de 160°C até 250°C. Para esse controlador de câmara quente a temperatura máxima foi limitada em 300°C.

Figura 29 - Resistência de Coleira



Fonte: Elaboração própria

A Figura 30 mostra a disposição do controlador e das resistências a serem controladas durante os testes.

Figura 30 – Layout de testes



Fonte: Elaboração própria

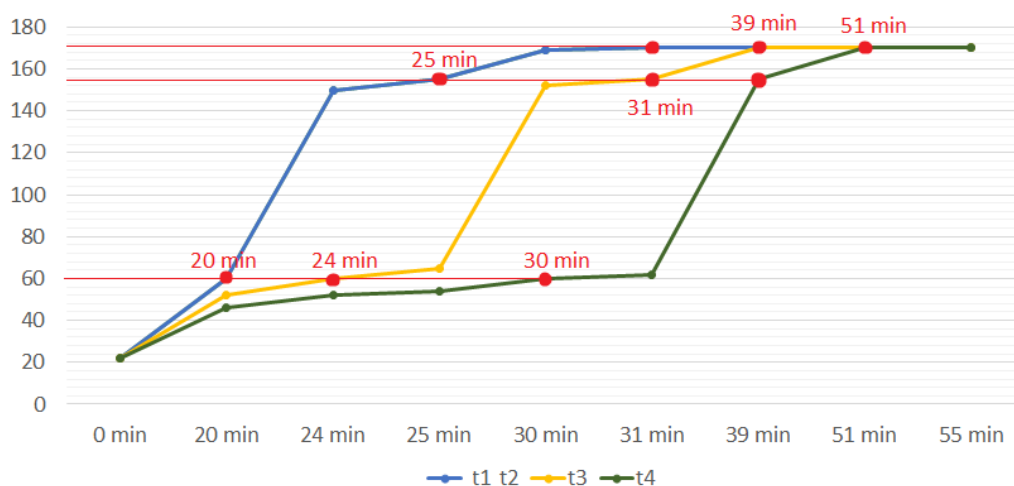
4.1. FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR

Em primeiro momento, o sincronismo não foi ativado, realizando apenas o controle individual de cada zona de temperatura. A temperatura de 170°C foi setada para início dos testes em todas as zonas. O controlador estava indicando a temperatura ambiente de 22°C quando ligado. O primeiro passo do controlador é aplicar pulsos de tensão por tempo, com objetivo de pré-aquecer a resistência e eliminar a possível umidade presente. Conforme ocorre o aumento da temperatura, o tempo do pulso da tensão sobre a resistência aumenta gradativamente. A etapa de pré-aquecimento ocorre até a temperatura de 60°C, quando a temperatura estiver a 55°C é iniciada aplicação de um proporcional de 70% da tensão sobre a carga. Foi possível observar nas zonas 1 e 2, onde estão instaladas as resistências de 1000 Watts, o aumento da temperatura é mais rápido em relação as zonas 3 e 4, neste caso, o tempo para atingir a temperatura de 60°C nas zonas 1 e 2 foi de aproximadamente 20 minutos. Para a zona 3 atingir a temperatura de 60°C, o tempo necessário foi de 24 minutos e para a zona 4 nesta mesma temperatura o tempo foi de 30 minutos.

Após atingida a temperatura de 60°C, o controlador inicia o processo de aquecimento acelerado, aplicando 100% (cem por cento) da tensão sobre a carga.

Este processo permanece até atingir a 15°C abaixo da temperatura solicitada. Para esse teste foi ajustada a temperatura em 170°C, o controlador permanecerá aplicando os 100% da tensão até alcançar a temperatura de 155°C, quando se inicia o processo do controle PID. Durante este processo de aquecimento acelerado, as zonas 1 e 2 chegaram a temperatura de 155°C em aproximadamente 5 minutos, já a zona 3 demorou aproximadamente 7 minutos e a zona 4 chegou em 9 minutos. No período de aquecimento por controle PID, as zonas de temperatura 1 e 2 levaram aproximadamente 6 minutos. Para a zona 3 o tempo de controle PID para temperatura solicitada foi de 8 minutos e para zona 4 foi de 12 minutos. Também foi possível observar que os parâmetros Kp, Ki e Kd do PID ficaram bem calibrados para que o aquecimento não ultrapasse o valor solicitada durante o aquecimento, evitando overshoot da temperatura. Durante o processo de controle da temperatura, foi possível observar variação de 1°C na temperatura, tanto na escala positiva quanto na negativa. No controle da temperatura na zona 4, ocorreu queda da temperatura de até 1°C, em alguns momentos a temperatura caiu 2°C após 30 minutos de funcionamento. Na indústria geralmente a variação aceitável de temperatura pode chegar até 5°C para mais ou para menos, o controlador de câmara quente testado em questão, pode ser observado uma variação de 1°C, podendo chegar a 2°C com intervalos de 30 minutos, demonstrando uma boa condição de controle da temperatura. O resultado do teste do controlador sem o sincronismo ativo pode ser observado na Figura 31. As curvas t1 e t2 representam as resistências de 1000W, a curva t3 a de 750W e a curva t4 a resistência de 500W.

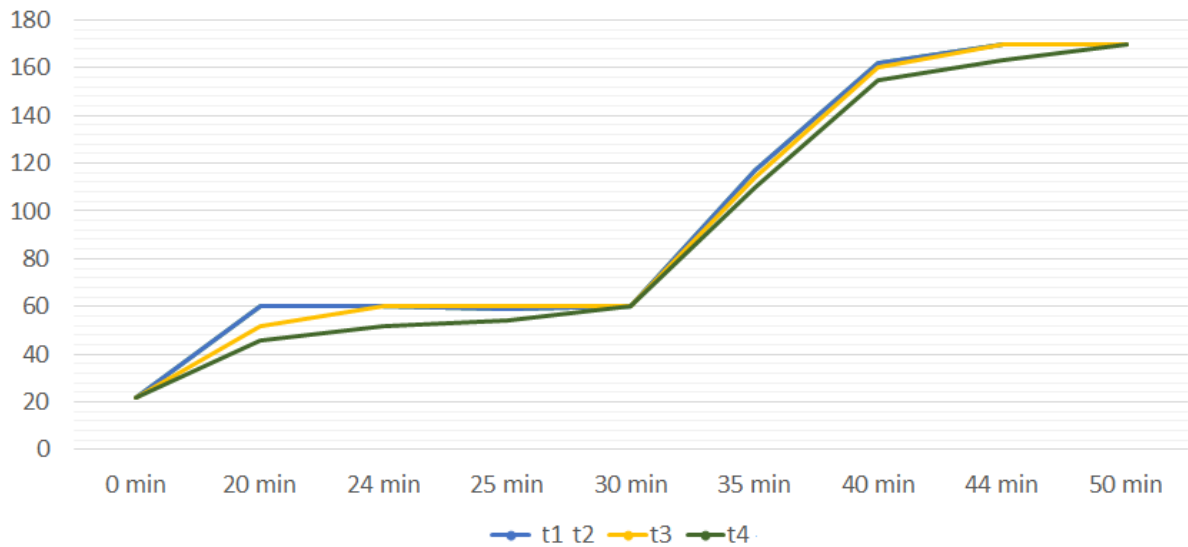
Figura 31 – Teste sem sincronismo



Fonte: Elaboração Própria

O teste seguinte foi realizado habilitando o controle do sincronismo com as mesmas condições de trabalho do primeiro teste. Para condições iniciais de pré-aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura de 60°C, tem-se um controle sem ação do sincronismo. Nesta etapa quando uma zona chega a 60°C ela para de aquecer até que todas cheguem. Com a temperatura acima de 60°C, o controle de sincronismo entra em funcionamento, como a temperatura das zonas 1 e 2 chegam antes das demais em 60°C, o controlador observa a temperatura destas zonas e compara com as demais, se uma delas estiver com uma diferença de mais de 7°C, o controlador desliga o aquecimento daquela zona que estiver mais alta, nesse caso as zonas 1 e 2 tiveram suas saídas desligadas, até que as temperaturas das demais zonas 3 e ou 4 chegam na faixa de 7°C, habilitando novamente o aquecimento das zonas que estavam aguardando. Durante o processo mencionado, as zonas 1 e 2 ficaram desligadas até a zona 4 chegar a faixa de 7°C de diferença, nesse caso a zona 4 tornou se mais lenta, devido a potência da resistência ser menor. Esse processo levou aproximadamente 30 minutos para todas as zonas chegarem à 60°C, após este ponto, o controlador aciona o aquecimento das demais zonas de temperatura que estavam desligadas, sendo elas as zonas 1 e 2. Este processo faz com que as temperaturas tenham sua elevação de forma conjunta, levando aproximadamente 14 minutos para atingir a etapa do controle PID, neste caso atingindo a temperatura de 155°C. Chegando nesse ponto o controle PID é feito de forma individual para cada zona até atingir a temperatura selecionada. O resultado do teste com o sincronismo ativo é mostrado na Figura 32. As curvas t1 e t2 representam as resistências de 1000W, a curva t3 a de 750W e a curva t4 a resistência de 500W.

Figura 32 – Teste com sincronismo



Fonte: Elaboração Própria

4.2 ALARMES

Além do controle de aquecimento, o controlador de câmara quente possui duas proteções específicas, uma refere-se à proteção com relação ao termopar aberto e outra à ausência de resistência ou resistência aberta. Para isso foram realizados testes para cada situação. Inicialmente foi acionado o aquecimento das resistências e para forçar o alarme foi efetuada a abertura do cabo do termopar, com isso o controlador identifica a ausência deste sinal, gerando um sinal de transição para o processador, assim o alarme de termopar aberto é identificado. Na frontal do display é mostrado o respectivo alarme de termopar aberto representado por um *led* oscilando no tempo de 500ms, um alarme auditivo por sirene oscilando no mesmo tempo também é acionado. A reinicialização do alarme ocorre ao restabelecer o sinal proveniente do termopar. Outro detalhe testado com a abertura do termopar é o controle de aquecimento durante a ausência do sinal de leitura da temperatura, onde o controlador para de executar o processo que estava realizando, seja o controle de pré-aquecimento, aquecimento acelerado ou controle PID e passa a acionar a saída para carga de formar proporcional, onde é aplicando uma tensão em curto espaço de tempo, a fim de manter a resistência aquecida, isso com o intuito de não perder o aquecimento já executado. Este controle é reinicializado ao restabelecer o sinal de leitura do termopar.

Outro teste executado está relacionado com a ausência de resistência ou sua abertura. Para forçar esse alarme, foi utilizado um disjuntor em série com a resistência como segurança, a fim de simular a abertura da resistência. Durante o processo de aquecimento foi realizada a abertura do cabo da resistência, como o controlador de câmara quente faz o monitoramento da leitura da corrente de saída, este verifica a ausência da corrente durante 9 segundos, após isso o controlador acionou os alarmes audiovisuais. O alarme visual é mostrado através do display, com uma figura de resistência que fica oscilando a cada 300ms indicando a falha, o alarme auditivo fica oscilando o som no mesmo tempo. Este alarme é reinicializado com o retorno da carga na saída do controlador, com isso restabelecendo as condições normais de funcionamento.

Demais procedimentos realizados, foram durante a etapa de aquecimento ligado com sincronismo atuando, onde também foram desligadas algumas zonas de aquecimento, mantendo o controle com sincronismo com apenas 3 zonas e depois com 2 zonas, sendo ainda intercalado o acionamento das zonas de temperatura. Durante este procedimento, pôde ser observado que o respectivo controle da temperatura permaneceu em funcionamento correto, e o sincronismo respeitando apenas as zonas de temperaturas habilitadas. Com isso pode ser comprovado o correto funcionamento tanto do circuito eletrônico como a resposta correta do programa.

Os principais problemas encontrados serão descritos abaixo a fim de mostrar quais foram as soluções obtidas.

4.5 OSCILAÇÃO NA LEITURA DA TEMPERATURA

Nos primeiros testes com o circuito de leitura de temperatura, foi observado grande variação na leitura do sinal analógico de temperatura. Com objetivo de corrigir o problema foi criado um filtro no próprio programa a fim de criar um cálculo da média da leitura de temperatura. Esse procedimento reduziu muito as oscilações, mas não se obteve a solução completa para o problema. Também foram incluídos capacitores para filtrar o sinal analógico com intuito de eliminar possíveis ruídos. Durante os testes para buscar uma solução completa do problema, foram interligados o GND das entradas analógicas do Arduino com o zero volts da fonte de

alimentação linear e das placas eletrônicas de leitura de temperatura. Realizando este procedimento a oscilação na leitura da temperatura diminuiu consideravelmente, neste caso foi possível reduzir o cálculo da média para leitura da temperatura.

4.6 DIFICULDADE NA LEITURA DE CORRENTE NA RESISTÊNCIA

Como o circuito de disparo gera pulso para acionamento do circuito de potência, em determinados momentos, o pulso do sinal analógico de corrente se tornava muito rápido, impossibilitando a correta leitura e algumas vezes a ausência do sinal no momento da execução de leitura pelo Arduino. Para corrigir esse problema foi necessário aumentar os ganhos do circuito amplificador da leitura de corrente e também a inclusão de capacitores de maior capacitância, a fim de manter o sinal analógico de corrente mais linear para o processador do Arduino conseguir realizar a leitura da corrente com mais precisão.

4.7 DESLIGAMENTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DURANTE O FUNCIONAMENTO

O controlador de câmara quente após 15 minutos ligado estava desligando o display. Monitorando as tensões das fontes de alimentação, foi observado que a tensão na fonte de +5 V estava desligando, deste modo, essa queda de tensão estava relacionada ao aquecimento no corpo do componente e como proteção por temperatura o regulador de tensão estava gerando este desligamento. Com objetivo de resolver esse problema foi adicionado em cada regulador de tensão da fonte de alimentação um dissipador, auxiliando na redução da temperatura sobre regulador e resolvendo o problema da queda da tensão durante o funcionamento. Após essa adequação foi possível manter o controlador de câmara quente ligado por tempo indeterminado.

4.8 ESPECIFICAÇÃO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO UTILIZADA

Para o projeto do controlador de câmara quente foi projetada uma fonte de alimentação linear com capacidade máxima de fornecer 800 mA. Durante os testes observou-se que o consumo de corrente de todos os circuitos, como alimentação do display *touchscreen*, processador Arduino e demais periféricos foi de aproximadamente 720 mA. A fonte linear trabalhou com 90% da capacidade de utilização, sendo que para a implantação de mais circuitos de leitura de temperatura, leitura de corrente e acionamento de potência, será necessária substituição da fonte linear por uma com maior capacidade. Uma solução para este caso será a substituição do transformador, mas a fonte linear estará limitada a fornecer uma corrente máxima de 1,5 A, isso em virtude da capacidade dos reguladores de tensão que podem fornecer apenas a corrente mencionada.

4.9 UTILIZAÇÃO DO CONTROLE PID

Para o controle da temperatura foi necessário à utilização do controle PID, para isso foi realizado uma pesquisa sobre a forma da construção deste controle. Com base nas informações obtidas e também com alguns testes realizados, foi optado pela utilização do PID da biblioteca do próprio Arduino IDE. Com base nas informações coletadas na biblioteca e no site do Arduino, foi construído o controle PID conforme as necessidades do projeto. Durante os testes com o controle PID, a temperatura estava sempre ultrapassando aproximadamente 20 graus acima da que era selecionada, nesse caso, demorando muito para estabilizar na temperatura desejada. Foram realizados vários ajustes nos ganhos para corrigir o controle, também foi incluído uma faixa de controle, sendo que ao atingir a temperatura determinada pela faixa, o PID passa atuar de forma mais lenta no acionamento da potência sobre a carga, com objetivo de amortecer a chegada da temperatura ao valor escolhido sem ultrapassá-lo, com isso aumentou o tempo do aquecimento, porém houve um ganho na precisão no controle.

4.10 MEMÓRIA DA IHM ATINGIU O LIMITE DE SUA CAPACIDADE

Depois de desenvolvido o programa da tela do IHM *touchscreen*, foi carregado para o próprio IHM. Durante este procedimento, foi observado que o programa excedeu o limite de memória disponível na própria IHM, isso porque o programa desenvolvido tinha mais de 18Mb (Megabytes) utilizados e a memória interna do IHM possui um limite de 16Mb (Megabytes). No primeiro momento foi sugerida a utilização de um cartão SSD, pois o próprio IHM da Nextion possui um compartimento para inclusão deste cartão com possibilidade em aumentar a capacidade de memória. Analisando melhor o desenvolvimento do programa, foram verificados alguns excessos de imagem na tela. Após a retirada das imagens excedentes foi possível reduzir o tamanho do programa para aproximadamente 6Mb (Megabytes), liberando dessa forma espaço na memória interna do display Nextion.

4.11 DIFICULDADE DE COMUNICAÇÃO ENTRE O ARDUINO COM O DISPLAY NEXTION

Inicialmente foi desenvolvido um programa base para realizar alguns testes para conhecimento do funcionamento tanto do Arduino como do display Nextion, nesse teste constatou-se a dificuldade de comunicação entre ambos os equipamentos. O problema estava relacionado com a utilização do endereçamento da porta serial. Após pesquisas entre professores e site da Nextion foi possível encontrar a solução, na qual a utilização do display Nextion depende de portas seriais específicas, sendo elas as portas TX2 e RX2. Estas portas são exclusivas e habilitadas diretamente na própria biblioteca Nextion no Arduino IDE facilitando a utilização e resolvendo o problema com a comunicação entre Arduino e display Nextion.

4.12 ALARME ACIONANDO CONSTANTEMENTE

Durante os testes de funcionamento do controlador de câmara quente, o alarme de resistência aberta ficou acionando constantemente, isso ocorreu devido

ao tempo de varredura do Arduino ser muito rápido, dificultando a correta leitura da corrente realizada em função do atraso da resposta na leitura do circuito analógico. Para corrigir esse problema foi utilizado um cálculo interno, utilizando o ciclo de varredura do Arduino e subtraindo com o tempo para habilitar a leitura da corrente, com isso foi possível criar um retardo durante o monitoramento de ausência de corrente criando assim uma janela de monitoramento, somente quando a saída de potência for ligada em função do tempo é realizado este monitoramento e gerado o alarme somente quando necessário.

4.13 CONEXÃO DOS TERMOPARES COM AS PLACAS DE LEITURA DE TEMPERATURA

Inicialmente desejava-se utilizar um conector fixo na caixa do controlador de câmara quente e outro no próprio termopar, com a finalidade em garantir o encaixe rápido do termopar ao circuito e também a ligação correta conforme a polaridade para leitura da temperatura. Com esse objetivo, foram realizadas várias pesquisas entre fornecedores destes conectores. Devido ao custo elevado para este momento e também em conversa com orientador do projeto, foi optado pela não utilização destes conectores. Foi realizado então um recorte na caixa para acesso dos termopares ao circuito de leitura de temperatura, realizando a conexão dos termopares aos bornes instalados na própria placa eletrônica.

4.14 ERRO NO PROGRAMA EM RELAÇÃO À LEITURA DE TEMPERATURA SETADA NA TELA PRINCIPAL

Nos primeiros testes ao ligar o controlador de câmara quente, o programa projetado no Arduino não estava conseguindo coletar os valores numéricos que eram selecionados no campo de temperatura. A leitura era habilitada somente quando acessadas as páginas de configuração de cada zona de temperatura. Foi analisado todo o programa projetado no Arduino, mas não foi encontrada nenhuma irregularidade. Verificando o programa projetado no display Nextion, optou-se por realizar uma alteração no programa da IHM. Com essa alteração os programas das

telas de configuração coletam os dados inseridos pelo usuário e transferem os valores para tela principal, que aí sim são coletados pelo Arduino resolvendo assim o problema inicial.

5. ANÁLISE DE CUSTOS

Grande parte dos Controladores de Câmara quente que existem no mercado, trabalham com a definição da temperatura a qual ele deve manter, sendo definidas individualmente em cada zona como no modelo da Polimold. A venda desses produtos, também geralmente é feita de forma individual, por zona. Sendo assim, se forem necessários para um determinado processo de injeção, o controle de 8 zonas de injeção, por exemplo, seria necessário a compra de 8 unidades desses controladores. Neste projeto, foi desenvolvido um controlador onde as temperaturas de trabalho de todas as zonas são definidas em apenas uma tela, que também tem como função o acompanhamento das temperaturas entre outras variáveis, possíveis alarmes, entre outros. O produto em questão, foi projetado didaticamente para atender a 4 zonas de controle, tendo margem para aumentar para 6. Porém com alguns ajustes na estrutura, programação do software e do display, é possível expandir o número de zonas de controle para 8, aumentando consideravelmente o seu custo benefício. A quantia de 8 zonas se torna o limite, devido ao número de entradas analógicas do Arduino. Considerando que cada uma dessas zonas, ocupa duas entradas e estão disponíveis apenas 16. Porém, o projeto contando com 8 zonas de controle, se torna ainda mais rentável em relação ao controlador da Polimold, devido ao fato de que o valor adicional para a inclusão de uma zona é relativamente baixo. A Tabela 1 mostra os valores adicionais para uma zona.

Tabela 1- Valores adicionais por zona

Item	Descrição	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor total (R\$)
1	Diodos	12	0,17	2,04
2	Resistores	12	0,07	0,84
3	Capacitores	2	0,04	0,08
4	CI LM 324	1	1,25	1,25
5	Tiristor BTA 08 600	1	9,97	9,97
6	CI MOC 3083	1	1,9	1,9
7	CI 74HC04	1	6,9	6,9
8	AD 594	1	134,16	134,16
9	Capacitor 47 uf	1	12,58	12,58
10	Dissipador	1	4,76	4,76
11	Conector 2 pinos Pcb 250V 16a	6	2	12
12	TOTAL			186,48

Fonte: Elaboração própria

Um orçamento de um controlador que atende a 5 zonas foi feito junto a uma empresa que fabrica este tipo de produto. O valor final é de R\$7.500,00 (sete mil e quinhentos reais). Sendo assim, pode se considerar o custo de R\$1.500,00 (mil e quinhentos reais) por zona de controle.

Este projeto, que atende a 4 zonas de controle, teve o custo de aproximadamente R\$1.390,00 (mil trezentos e noventa reais) como mostra a tabela 2. Como a parte de software, display, estrutura, alarme e Arduino é a mesma para zonas adicionais, o valor calculado para a inclusão de cada uma, é de aproximadamente R\$190,00 (cento e noventa reais). Logo, enquanto o produto deste outro fabricante, para atender a 8 zonas, custaria R\$12.000,00 (doze mil reais), o custo de fabricação do projeto para atender 8 zonas, seria de aproximadamente R\$2.150,00 (dois mil cento e cinquenta reais), isso considerando somente os custos de material.

Tabela 2 – Valor total dos componentes

Item	Descrição	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor total (R\$)
1	Placa Mega 2560 R3	1	91,56	91,56
2	Buzzer (buzina) 12 V	1	1,36	1,36
3	Placa HMI nextion 7"	1	250	250
4	Micro Ventilador 80x80x25 12 Vcc	2	22,58	45,16
5	Dissipador	4	4,76	19,04
6	Porta Fusível 5x20	7	1,5	10,5
7	Tiristor BTA 08 600	4	9,97	39,88
8	AD 594	4	134,16	536,64
9	Transformador 110/220 vac 15+15 Vcc 1A	1	46	46
10	Capacitor 47 uf/35 Vcc	4	12,58	50,32
11	Placas PCI's	1	50	50
12	Estrutura em MDF	1	50	50
13	Diodos	31	0,17	5,27
14	Diodo (led)	5	0,21	1,05
15	Transistor BC548C	1	0,33	0,33
16	Regulador de tensão LM 7912	1	1,35	1,35
17	Regulador de tensão LM 7812	1	1,2	1,2
18	LM 7805	1	0,89	0,89
19	CI 4N25	4	1,25	5
20	Capacitor 4700uF	4	1,69	6,76
21	Capacitor Eletrolítico 10uF /25 V	24	0,14	3,36
22	Capacitor Eletrolítico 1uF /35 V	12	0,14	1,68
23	Capacitores 10 pf, 150pf, 33pf	18	0,16	2,88

24	Capacitores 22nF/100nF/10nF	17	0,04	0,68
25	CI LM 324	4	1,25	5
26	CI MOC 3083	4	1,9	7,6
27	CI 74HC04	4	6,9	27,6
28	Conector 2 pinos PCB 250 V 16a	50	2	100
29	Cabos 2,5mm (m)	20	1,2	24
30	Conectores múltiplos 10 vias	3	6	18
31	Resistores	51	0,07	3,57
32	TOTAL			1.388,68

Fonte: Elaboração própria

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria plástica é uma grande força e com potencial de muito crescimento. Santa Catarina é o segundo estado com maior número de empregos no setor e Joinville a terceira cidade também nesse quesito. Junto a isso, o conhecimento na área de um dos membros do grupo, o qual expôs algumas melhorias necessárias para este tipo de equipamento, mantendo o preço compatível, ou até menor que os apresentados no mercado, motivaram o interesse por este tema para o trabalho de conclusão de curso.

O controlador de câmara quente desenvolvido traz algumas melhorias, e com um valor de mercado relativamente mais baixo que o concorrente, destacando o volume menor de equipamento, o avanço tecnológico implantado junto ao display *touchscreen*, no qual se define as variáveis de processo, monitora-se as variáveis, e serve também para os alarmes de possíveis problemas ao longo do processo, tudo em uma única tela, de fácil uso, e compreensão. O aumento da vida útil dos componentes e principalmente das resistências, as quais terão menor possibilidade de queima devido ao pré-aquecimento implantado. A opção de aquecimento das zonas de trabalho funcionarem de maneira sincronizada traz ao produto um diferencial, onde evita-se uma variação de temperatura entre as zonas de injeção no aquecimento, e também durante o funcionamento final. O controle da temperatura por PID, fazendo com que durante o processo, a temperatura real tenha uma menor variação em relação a temperatura definida pelo usuário.

A comparação de valor com o produto já existente no mercado foi feita apenas com o valor gasto no material para o desenvolvimento desse produto, não considerando mão de obra, custo de projeto, entre outros. Porém, a diferença é considerável, por exemplo o gasto com esse que foi desenvolvido, foi de aproximadamente R\$1.390,00, enquanto o valor do produto já existente no mercado que atende ao mesmo número de zonas de controle, é de aproximadamente R\$ 6.000,00. Essa diferença fica ainda maior, se forem consideradas 8 zonas de controle, que no caso deste projeto, teria o custo de matérias de R\$ 2.150,00, contra R\$ 12.000,00 do produto já existente. Mesmo não considerando os custos de produção e projetos, as diferenças são significativas entre o produto desenvolvido e

o produto encontrado no mercado nacional, desta forma aumentando o lucro na fabricação do produto.

O desenvolvimento deste trabalho foi essencial para a concretização afirmação dos conhecimentos adquiridos durante o curso.

6.1 FUTUROS TRABALHOS

No decorrer do desenvolvimento do projeto muitas melhorias foram observadas, aquelas que se mostraram indispensáveis para a conclusão da proposta inicial do trabalho foram implantadas, algumas foram deixadas para futuros trabalhos observando-se que sempre é necessário melhorar. Algumas das propostas para trabalhos futuros são as mencionadas abaixo.

Com relação ao monitoramento e configurações na tela *touchscreen* foram observadas algumas possíveis melhorias como a introdução de um botão de seleção de termopar tipo J ou K, seleção dos ganhos K_p K_i e K_d do PID, apresentação dos valores de potência e consumo do equipamento e habilitação de mais canais de controle.

Na parte do Arduino foi pensado na possibilidade de um auto ajuste dos parâmetros do PID, inclusão de uma comunicação com smartphone que teria como consequência a criação de um aplicativo para monitoramento remoto e monitoramento da temperatura interna do controlador para acionamento dos coolers de refrigeração.

Pensando nas melhorias da estrutura física e de modularidade completa, a utilização de tomadas de encaixe rápido para os termopares e saídas de potência, a criação de um circuito integrado para o processamento de dados, inserção de fusíveis de proteção em cada saída, utilização de uma fonte chaveada para diminuir volume, construção de uma caixa com material mais adequado e projetar uma placa eletrônica com mais entradas analógicas possibilitando o aumento das atuais 8 para 16, 32 ou 64 entradas para leitura de temperatura e corrente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Os Plásticos**. Sindiplast. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/site/os-plasticos>. Acessado em 21/10/2017.

ABIPLAST. **Perfil 2016**. São Paulo: ABIPLAST, 2015. 83p.

BACKES, A. **Linguagem C: completa e descomplicada**. 1º Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BANZI, Massimo; SHILO, Michael. **Primeiros Passos com o Arduino**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2015.

BRAGA, N. C. **Curso de eletrônica: eletrônica automotiva**. 1º Ed. São Paulo: NCB, 2016. v. 6.

BORCHARDT, Ildon Guilherme; GOMES, Álvaro Ferreira. **Termometria Termoelétrica – Termopares**. Porto Alegre: SAGRA, 1979, 81 p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **CAGED**. Portal do Fundo de Amparo ao Trabalhador. 2016.

DA COSTA, Hamilton Nunes. **Sistemas de câmara quente: conhecendo para melhor produzir**. Portal Dos Moldes. Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/sistemas-de-camara-quente-conhecendo-para-melhor-produzir/>. Acessado em 18/03/2017.

GRASEL, Grasiel Felipe. **Como funciona o touchscreen**. Oficina da Net. 2014. Disponível em: <https://www.oficinadanet.com.br/post/13740-como-funciona-o-touchscreen>. Acessado em 15/05/2017.

ITEAD. **Nextion basic HMI display**. Itead Studio. Disponível em: <https://nextion.itead.cc/>. Acessado em 15/04/2018

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**. São Paulo: Artliber, 2005.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2015.

MONK, S. **Programação com Arduino II: passos avançados com sketches**. 1° Ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

PEDROZA, Natan Pereira. **Toque na tela: a revolução da tecnologia touchscreen nas mídias móveis**. Monografia (Graduação em Comunicação em Mídias Digitais) – Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes (CCHLA). Orientador: Prof. Dr. Marcos Nicolau. João Pessoa, 2014

ANEXO A – DATASHEET DOS CONVERSORES AD594/AD595



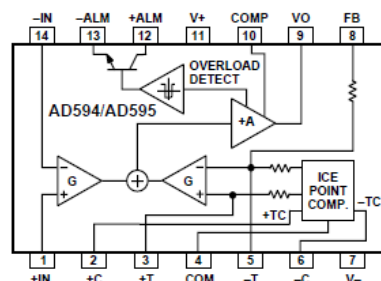
Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

AD594/AD595

FEATURES

Pretrimmed for Type J (AD594) or
 Type K (AD595) Thermocouples
 Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs
 Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C
 Built-In Ice Point Compensation
 Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V
 Low Power: <1 mW typical
 Thermocouple Failure Alarm
 Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy
 Setpoint Mode Operation
 Self-Contained Celsius Thermometer Operation
 High Impedance Differential Input
 Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 μA, but is also capable of delivering in excess of ±5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
 Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$, Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
ABSOLUTE MAXIMUM RATING													
+ V_S to - V_S		36			36			36			36		Volts
Common-Mode Input Voltage	- $V_S - 0.15$	+ V_S		- $V_S - 0.15$	+ V_S		- $V_S - 0.15$	+ V_S		- $V_S - 0.15$	+ V_S		Volts
Differential Input Voltage	- V_S	+ V_S		- V_S	+ V_S		- V_S	+ V_S		- V_S	+ V_S		Volts
Alarm Voltages													
+ALM	- V_S	- $V_S + 36$		- V_S	- $V_S + 36$		- V_S	- $V_S + 36$		- V_S	- $V_S + 36$		Volts
-ALM	- V_S	+ V_S		- V_S	+ V_S		- V_S	+ V_S		- V_S	+ V_S		Volts
Operating Temperature Range	-55	+125		-55	+125		-55	+125		-55	+125		°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
TEMPERATURE MEASUREMENT (Specified Temperature Range 0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C ¹		±3			±1			±3			±1		°C
Stability vs. Temperature ²		±0.05			±0.025			±0.05			±0.025		°C/°C
Gain Error		±1.5			±0.75			±1.5			±0.75		%
Nominal Transfer Function		10			10			10			10		mV/°C
AMPLIFIER CHARACTERISTICS													
Closed Loop Gain ³	193.4 (Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			193.4 (Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			247.3 (Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			247.3 (Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			
Input Offset Voltage	0.1			0.1			0.1			0.1			μV
Input Bias Current	±50			±50			±50			±50			μA
Differential Input Range	-10	+50		-10	+50		-10	+50		-10	+50		mV
Common-Mode Range	- $V_S - 0.15$	- $V_S - 4$		- $V_S - 0.15$	- $V_S - 4$		- $V_S - 0.15$	- $V_S - 4$		- $V_S - 0.15$	- $V_S - 4$		Volts
Common-Mode Sensitivity – RTO	10			10			10			10			mV/V
Power Supply Sensitivity – RTO	10			10			10			10			mV/V
Output Voltage Range													Volts
Dual Supply	- $V_S + 2.5$	+ $V_S - 2$		- $V_S + 2.5$	+ $V_S - 2$		- $V_S + 2.5$	+ $V_S - 2$		- $V_S + 2.5$	+ $V_S - 2$		Volts
Single Supply	0	+ $V_S - 2$		0	+ $V_S - 2$		0	+ $V_S + 2$		0	+ $V_S - 2$		Volts
Usable Output Current ⁴	±5			±5			±5			±5			mA
3 dB Bandwidth	15			15			15			15			kHz
ALARM CHARACTERISTICS													
$V_{(CSAT)}$ at 2 mA	0.3			0.3			0.3			0.3			Volts
Leakage Current	±1			±1			±1			±1			μA max
Operating Voltage at -ALM	+ $V_S - 4$			+ $V_S - 4$			+ $V_S - 4$			+ $V_S - 4$			Volts
Short Circuit Current	20			20			20			20			mA
POWER REQUIREMENTS													
Specified Performance	+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$			+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$			+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$			+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$			Volts
Operating ⁵	+ V_S to - $V_S \leq 30$			+ V_S to - $V_S \leq 30$			+ V_S to - $V_S \leq 30$			+ V_S to - $V_S \leq 30$			Volts
Quiescent Current (No Load)													μA
+ V_S	160	300		160	300		160	300		160	300		μA
- V_S	100			100			100			100			μA
PACKAGE OPTION													
TO-116 (D-14)	AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD			
Cerdip (Q-14)	AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ			

NOTES

¹Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.

²Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

³Pin 8 shorted to Pin 9.

⁴Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.

⁵- V_S must not exceed -16.5 V.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units. Specifications subject to change without notice.

INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN FE-CUNI

AD594/AD595

Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C, $V_S = -5\text{ V}, +15\text{ V}$)

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV	Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454	500	27.388	5300	20.640	5107
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370	520	28.511	5517	21.493	5318
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269	540	29.642	5736	22.346	5529
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152	560	30.782	5956	23.198	5740
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021	580	31.933	6179	24.050	5950
-100	-4.632	-893	-3.553	-876	600	33.096	6404	24.902	6161
-80	-3.785	-729	-2.920	-719	620	34.273	6632	25.751	6371
-60	-2.892	-556	-2.243	-552	640	35.464	6862	26.599	6581
-40	-1.960	-376	-1.527	-375	660	36.671	7095	27.445	6790
-20	-0.995	-189	-0.777	-189	680	37.893	7332	28.288	6998
-10	-0.501	-94	-0.392	-94	700	39.130	7571	29.128	7206
0	0	3.1	0	2.7	720	40.382	7813	29.965	7413
10	0.507	101	0.397	101	740	41.647	8058	30.799	7619
20	1.019	200	0.798	200	750	42.283	8181	31.214	7722
25	1.277	250	1.000	250	760	-	-	31.629	7825
30	1.536	300	1.203	300	780	-	-	32.455	8029
40	2.058	401	1.611	401	800	-	-	33.277	8232
50	2.585	503	2.022	503	820	-	-	34.095	8434
60	3.115	606	2.436	605	840	-	-	34.909	8636
80	4.186	813	3.266	810	860	-	-	35.718	8836
100	5.268	1022	4.095	1015	880	-	-	36.524	9035
120	6.359	1233	4.919	1219	900	-	-	37.325	9233
140	7.457	1445	5.733	1420	920	-	-	38.122	9430
160	8.560	1659	6.539	1620	940	-	-	38.915	9626
180	9.667	1873	7.338	1817	960	-	-	39.703	9821
200	10.777	2087	8.137	2015	980	-	-	40.488	10015
220	11.887	2302	8.938	2213	1000	-	-	41.269	10209
240	12.998	2517	9.745	2413	1020	-	-	42.045	10400
260	14.108	2732	10.560	2614	1040	-	-	42.817	10591
280	15.217	2946	11.381	2817	1060	-	-	43.585	10781
300	16.325	3160	12.207	3022	1080	-	-	44.339	10970
320	17.432	3374	13.039	3227	1100	-	-	45.108	11158
340	18.537	3588	13.874	3434	1120	-	-	45.863	11345
360	19.640	3801	14.712	3641	1140	-	-	46.612	11530
380	20.743	4015	15.552	3849	1160	-	-	47.356	11714
400	21.846	4228	16.395	4057	1180	-	-	48.095	11897
420	22.949	4441	17.241	4266	1200	-	-	48.828	12078
440	24.054	4655	18.088	4476	1220	-	-	49.555	12258
460	25.161	4869	18.938	4686	1240	-	-	50.276	12436
480	26.272	5084	19.788	4896	1250	-	-	50.633	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NICR-NI thermocouples are composed

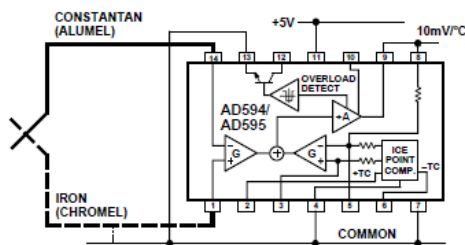


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation
of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

AD594/AD595

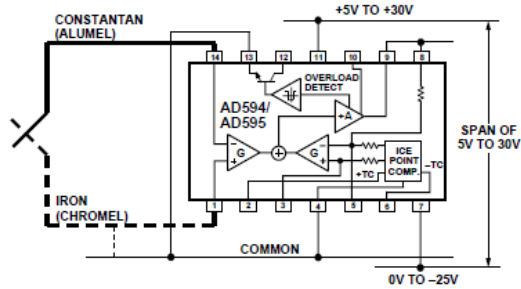


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

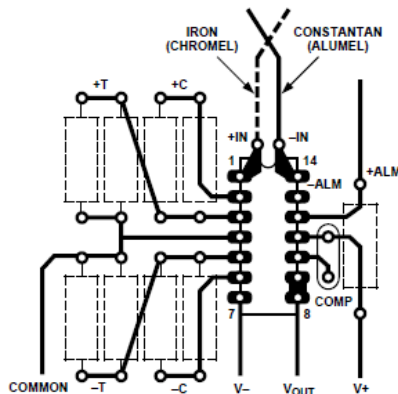


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

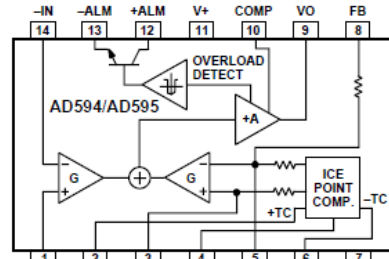


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

AD594/AD595

The AD594/AD595 also includes an input open circuit detector that switches on an alarm transistor. This transistor is actually a current-limited output buffer, but can be used up to the limit as a switch transistor for either pull-up or pull-down operation of external alarms.

The ice point compensation network has voltages available with positive and negative temperature coefficients. These voltages may be used with external resistors to modify the ice point compensation and recalibrate the AD594/AD595 as described in the next column.

The feedback resistor is separately pinned out so that its value can be padded with a series resistor, or replaced with an external resistor between Pins 5 and 9. External availability of the feedback resistor allows gain to be adjusted, and also permits the AD594/AD595 to operate in a switching mode for setpoint operation.

CAUTIONS:

The temperature compensation terminals (+C and -C) at Pins 2 and 6 are provided to supply small calibration currents only. The AD594/AD595 may be permanently damaged if they are grounded or connected to a low impedance.

The AD594/AD595 is internally frequency compensated for feedback ratios (corresponding to normal signal gain) of 75 or more. If a lower gain is desired, additional frequency compensation should be added in the form of a 300 pF capacitor from Pin 10 to the output at Pin 9. As shown in Figure 5 an additional 0.01 μ F capacitor between Pins 10 and 11 is recommended.

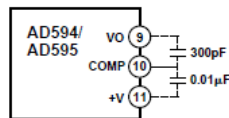


Figure 5. Low Gain Frequency Compensation

RECALIBRATION PRINCIPLES AND LIMITATIONS

The ice point compensation network of the AD594/AD595 produces a differential signal which is zero at 0°C and corresponds to the output of an ice referenced thermocouple at the temperature of the chip. The positive TC output of the circuit is proportional to Kelvin temperature and appears as a voltage at +T. It is possible to decrease this signal by loading it with a resistor from +T to COM, or increase it with a pull-up resistor from +T to the larger positive TC voltage at +C. Note that adjustments to +T should be made by measuring the voltage which tracks it at -T. To avoid destabilizing the feedback amplifier the measuring instrument should be isolated by a few thousand ohms in series with the lead connected to -T.

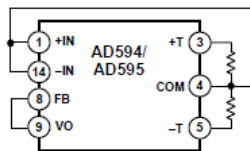


Figure 6. Decreased Sensitivity Adjustment

Changing the positive TC half of the differential output of the compensation scheme shifts the zero point away from 0°C. The zero can be restored by adjusting the current flow into the negative input of the feedback amplifier, the -T pin. A current into

this terminal can be produced with a resistor between -C and -T to balance an increase in +T, or a resistor from -T to COM to offset a decrease in +T.

If the compensation is adjusted substantially to accommodate a different thermocouple type, its effect on the final output voltage will increase or decrease in proportion. To restore the nominal output to 10 mV/°C the gain may be adjusted to match the new compensation and thermocouple input characteristics. When reducing the compensation the resistance between -T and COM automatically increases the gain to within 0.5% of the correct value. If a smaller gain is required, however, the nominal 47 k Ω internal feedback resistor can be paralleled or replaced with an external resistor.

Fine calibration adjustments will require temperature response measurements of individual devices to assure accuracy. Major reconfigurations for other thermocouple types can be achieved without seriously compromising initial calibration accuracy, so long as the procedure is done at a fixed temperature using the factory calibration as a reference. It should be noted that intermediate recalibration conditions may require the use of a negative supply.

EXAMPLE: TYPE E RECALIBRATION—AD594/AD595

Both the AD594 and AD595 can be configured to condition the output of a type E (chromel-constantan) thermocouple. Temperature characteristics of type E thermocouples differ less from type J, than from type K, therefore the AD594 is preferred for recalibration.

While maintaining the device at a constant temperature follow the recalibration steps given here. First, measure the device temperature by tying both inputs to common (or a selected common-mode potential) and connecting FB to VO. The AD594 is now in the stand alone Celsius thermometer mode. For this example assume the ambient is 24°C and the initial output VO is 240 mV. Check the output at VO to verify that it corresponds to the temperature of the device.

Next, measure the voltage -T at Pin 5 with a high impedance DVM (capacitance should be isolated by a few thousand ohms of resistance at the measured terminals). At 24°C the -T voltage will be about 8.3 mV. To adjust the compensation of an AD594 to a type E thermocouple a resistor, R1, should be connected between +T and +C, Pins 2 and 3, to raise the voltage at -T by the ratio of thermocouple sensitivities. The ratio for converting a type J device to a type E characteristic is:

$$r(AD594) = (60.9 \mu V/^{\circ}C) / (51.7 \mu V/^{\circ}C) = 1.18$$

Thus, multiply the initial voltage measured at -T by r and experimentally determine the R1 value required to raise -T to that level. For the example the new -T voltage should be about 9.8 mV. The resistance value should be approximately 1.8 k Ω .

The zero differential point must now be shifted back to 0°C. This is accomplished by multiplying the original output voltage VO by r and adjusting the measured output voltage to this value by experimentally adding a resistor, R2, between -C and -T, Pins 5 and 6. The target output value in this case should be about 283 mV. The resistance value of R2 should be approximately 240 k Ω .

Finally, the gain must be recalibrated such that the output VO indicates the device's temperature once again. Do this by adding a third resistor, R3, between FB and -T, Pins 8 and 5. VO should now be back to the initial 240 mV reading. The resistance value

AD594/AD595

of R3 should be approximately 280 kΩ. The final connection diagram is shown in Figure 7. An approximate verification of the effectiveness of recalibration is to measure the differential gain to the output. For type E it should be 164.2.

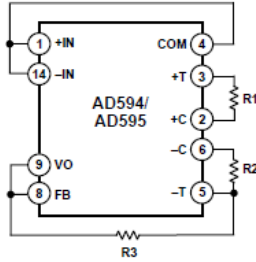


Figure 7. Type E Recalibration

When implementing a similar recalibration procedure for the AD595 the values for R1, R2, R3 and r will be approximately 650 Ω, 84 kΩ, 93 kΩ and 1.51, respectively. Power consumption will increase by about 50% when using the AD595 with type E inputs.

Note that during this procedure it is crucial to maintain the AD594/AD595 at a stable temperature because it is used as the temperature reference. Contact with fingers or any tools not at ambient temperature will quickly produce errors. Radiational heating from a change in lighting or approach of a soldering iron must also be guarded against.

USING TYPE T THERMOCOUPLES WITH THE AD595

Because of the similarity of thermal EMFs in the 0°C to +50°C range between type K and type T thermocouples, the AD595 can be directly used with both types of inputs. Within this ambient temperature range the AD595 should exhibit no more than an additional 0.2°C output calibration error when used with type T inputs. The error arises because the ice point compensator is trimmed to type K characteristics at 25°C. To calculate the AD595 output values over the recommended -200°C to +350°C range for type T thermocouples, simply use the ANSI thermocouple voltages referred to 0°C and the output equation given on page 2 for the AD595. Because of the relatively large nonlinearities associated with type T thermocouples the output will deviate widely from the nominal 10 mV/°C. However, cold junction compensation over the rated 0°C to +50°C ambient will remain accurate.

STABILITY OVER TEMPERATURE

Each AD594/AD595 is tested for error over temperature with the measuring thermocouple at 0°C. The combined effects of cold junction compensation error, amplifier offset drift and gain error determine the stability of the AD594/AD595 output over the rated ambient temperature range. Figure 8 shows an AD594/AD595 drift error envelope. The slope of this figure has units of °C/°C.

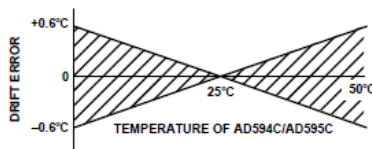


Figure 8. Drift Error vs. Temperature

THERMAL ENVIRONMENT EFFECTS

The inherent low power dissipation of the AD594/AD595 and the low thermal resistance of the package make self-heating errors almost negligible. For example, in still air the chip to ambient thermal resistance is about 80°C/watt (for the D package). At the nominal dissipation of 800 μW the self-heating in free air is less than 0.065°C. Submerged in fluorinert liquid (unstirred) the thermal resistance is about 40°C/watt, resulting in a self-heating error of about 0.032°C.

SETPOINT CONTROLLER

The AD594/AD595 can readily be connected as a setpoint controller as shown in Figure 9.

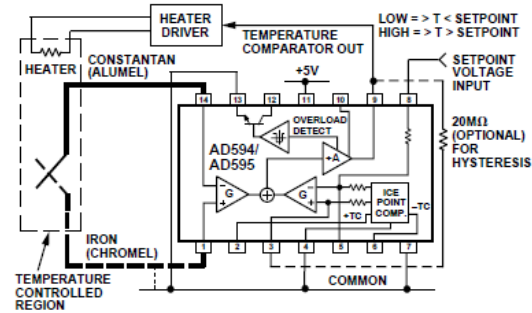


Figure 9. Setpoint Controller

The thermocouple is used to sense the unknown temperature and provide a thermal EMF to the input of the AD594/AD595. The signal is cold junction compensated, amplified to 10 mV/°C and compared to an external setpoint voltage applied by the user to the feedback at Pin 8. Table I lists the correspondence between setpoint voltage and temperature, accounting for the nonlinearity of the measurement thermocouple. If the setpoint temperature range is within the operating range (-55°C to +125°C) of the AD594/AD595, the chip can be used as the transducer for the circuit by shorting the inputs together and utilizing the nominal calibration of 10 mV/°C. This is the centigrade thermometer configuration as shown in Figure 13.

In operation if the setpoint voltage is above the voltage corresponding to the temperature being measured the output swings low to approximately zero volts. Conversely, when the temperature rises above the setpoint voltage the output switches to the positive limit of about 4 volts with a +5 V supply. Figure 9 shows the setpoint comparator configuration complete with a heater element driver circuit being controlled by the AD594/AD595 toggled output. Hysteresis can be introduced by injecting a current into the positive input of the feedback amplifier when the output is toggled high. With an AD594 about 200 nA into the +T terminal provides 1°C of hysteresis. When using a single 5 V supply with an AD594, a 20 MΩ resistor from VO to +T will supply the 200 nA of current when the output is forced high (about 4 V). To widen the hysteresis band decrease the resistance connected from VO to +T.

AD594/AD595

ALARM CIRCUIT

In all applications of the AD594/AD595 the $-ALM$ connection, Pin 13, should be constrained so that it is not more positive than $(V+) - 4\text{ V}$. This can be most easily achieved by connecting Pin 13 to either common at Pin 4 or $V-$ at Pin 7. For most applications that use the alarm signal, Pin 13 will be grounded and the signal will be taken from $+ALM$ on Pin 12. A typical application is shown in Figure 10.

In this configuration the alarm transistor will be off in normal operation and the $20\text{ k}\Omega$ pull up will cause the $+ALM$ output on Pin 12 to go high. If one or both of the thermocouple leads are interrupted, the $+ALM$ pin will be driven low. As shown in Figure 10 this signal is compatible with the input of a TTL gate which can be used as a buffer and/or inverter.

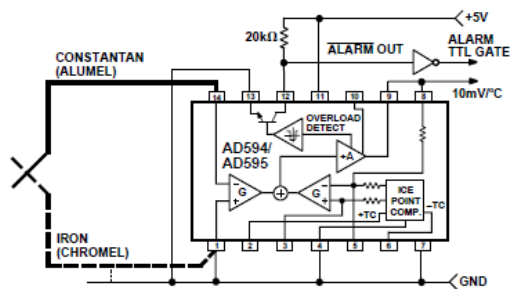


Figure 10. Using the Alarm to Drive a TTL Gate ("Grounded" Emitter Configuration)

Since the alarm is a high level output it may be used to directly drive an LED or other indicator as shown in Figure 11.

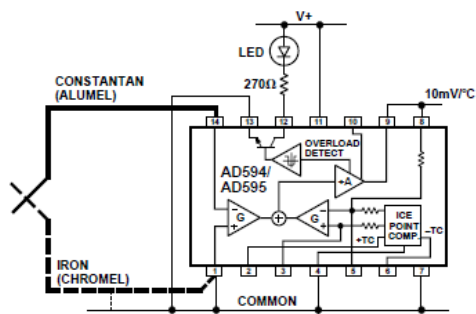


Figure 11. Alarm Directly Drives LED

A $270\ \Omega$ series resistor will limit current in the LED to 10 mA , but may be omitted since the alarm output transistor is current limited at about 20 mA . The transistor, however, will operate in a high dissipation mode and the temperature of the circuit will rise well above ambient. Note that the cold junction compensation will be affected whenever the alarm circuit is activated. The time required for the chip to return to ambient temperature will depend on the power dissipation of the alarm circuit, the nature of the thermal path to the environment and the alarm duration.

The alarm can be used with both single and dual supplies. It can be operated above or below ground. The collector and emitter of the output transistor can be used in any normal switch configuration. As an example a negative referenced load can be driven from $-ALM$ as shown in Figure 12.

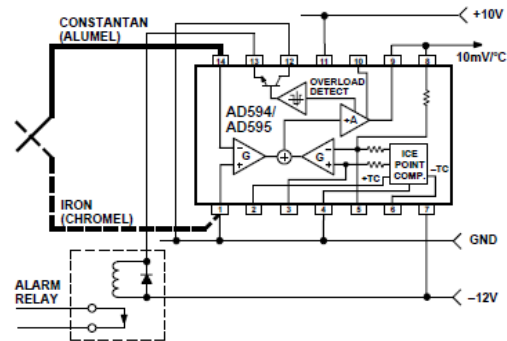


Figure 12. $-ALM$ Driving A Negative Referenced Load

The collector ($+ALM$) should not be allowed to become more positive than $(V-) +36\text{ V}$, however, it may be permitted to be more positive than $V+$. The emitter voltage ($-ALM$) should be constrained so that it does not become more positive than 4 volts below the $V+$ applied to the circuit.

Additionally, the AD594/AD595 can be configured to produce an extreme upscale or downscale output in applications where an extra signal line for an alarm is inappropriate. By tying either of the thermocouple inputs to common most runaway control conditions can be automatically avoided. A $+IN$ to common connection creates a downscale output if the thermocouple opens, while connecting $-IN$ to common provides an upscale output.

CELSIUS THERMOMETER

The AD594/AD595 may be configured as a stand-alone Celsius thermometer as shown in Figure 13.

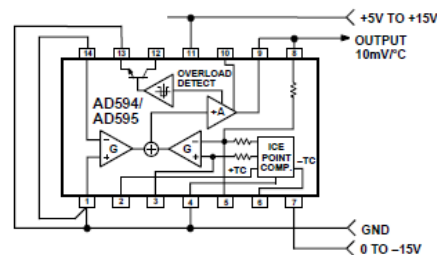


Figure 13. AD594/AD595 as a Stand-Alone Celsius Thermometer

Simply omit the thermocouple and connect the inputs (Pins 1 and 14) to common. The output now will reflect the compensation voltage and hence will indicate the AD594/AD595 temperature with a scale factor of $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$. In this three terminal, voltage output, temperature sensing mode, the AD594/AD595 will operate over the full military -55°C to $+125^\circ\text{C}$ temperature range.

AD594/AD595

THERMOCOUPLE BASICS

Thermocouples are economical and rugged; they have reasonably good long-term stability. Because of their small size, they respond quickly and are good choices where fast response is important. They function over temperature ranges from cryogenics to jet-engine exhaust and have reasonable linearity and accuracy.

Because the number of free electrons in a piece of metal depends on both temperature and composition of the metal, two pieces of dissimilar metal in isothermal and contact will exhibit a potential difference that is a repeatable function of temperature, as shown in Figure 14. The resulting voltage depends on the temperatures, T1 and T2, in a repeatable way.

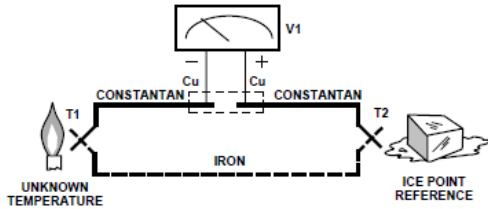


Figure 14. Thermocouple Voltage with 0°C Reference

Since the thermocouple is basically a differential rather than absolute measuring device, a known reference temperature is required for one of the junctions if the temperature of the other is to be inferred from the output voltage. Thermocouples made of specially selected materials have been exhaustively characterized in terms of voltage versus temperature compared to primary temperature standards. Most notably the water-ice point of 0°C is used for tables of standard thermocouple performance.

An alternative measurement technique, illustrated in Figure 15, is used in most practical applications where accuracy requirements do not warrant maintenance of primary standards. The reference junction temperature is allowed to change with the environment of the measurement system, but it is carefully measured by some type of absolute thermometer. A measurement of the thermocouple voltage combined with a knowledge of the reference temperature can be used to calculate the measurement junction temperature. Usual practice, however, is to use a convenient thermoelectric method to measure the reference temperature

and to arrange its output voltage so that it corresponds to a thermocouple referred to 0°C. This voltage is simply added to the thermocouple voltage and the sum then corresponds to the standard voltage tabulated for an ice-point referenced thermocouple.

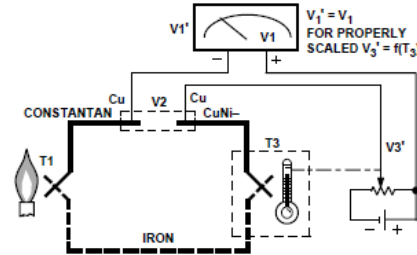


Figure 15. Substitution of Measured Reference Temperature for Ice Point Reference

The temperature sensitivity of silicon integrated circuit transistors is quite predictable and repeatable. This sensitivity is exploited in the AD594/AD595 to produce a temperature related voltage to compensate the reference of "cold" junction of a thermocouple as shown in Figure 16.

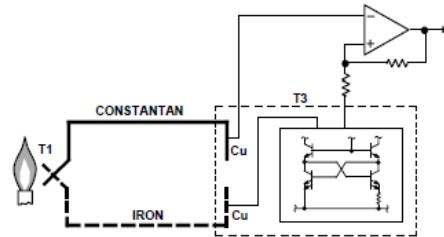


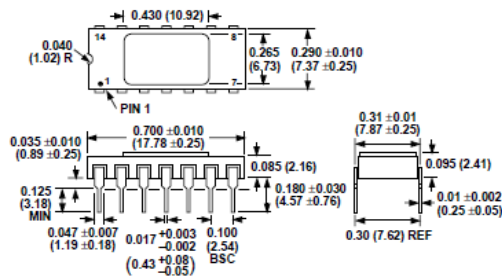
Figure 16. Connecting Isothermal Junctions

Since the compensation is at the reference junction temperature, it is often convenient to form the reference "junction" by connecting directly to the circuit wiring. So long as these connections and the compensation are at the same temperature no error will result.

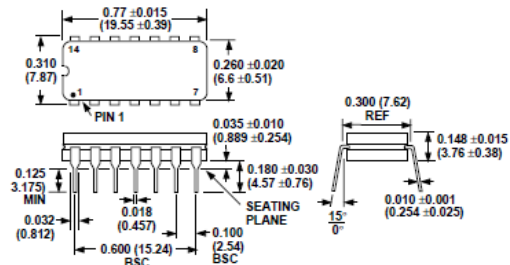
OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

TO-116 (D) Package



Cerdip (Q) Package

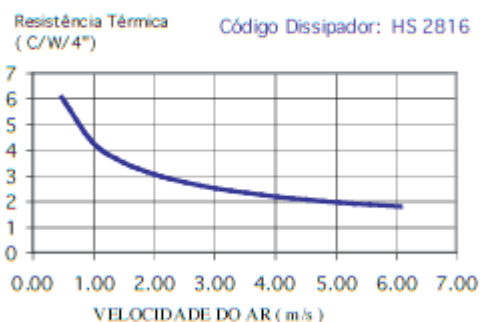
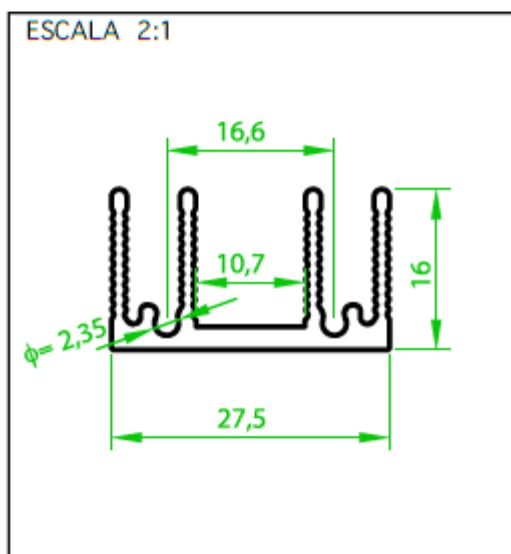
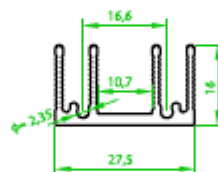


ANEXO B- DATASHEET DO DISSIPADOR TÉRMICO

Código: HS 2816

Perímetro: 195 mm

Resistência Térmica: 7,92 °C / W / 4"



ATENÇÃO: TODAS AS INFORMAÇÕES CONTIDAS NESTE CATÁLOGO SÃO APENAS INDICADORES QUALITATIVOS DOS DISSIPADORES DE CALOR E NÃO DEVEM SER CONSIDERADAS VERDADES ABSOLUTAS. OS VALORES DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DEPENDEM DO POSICIONAMENTO DO DISSIPADOR, BEM COMO DO AMBIENTE ONDE SE ENCONTRA. AS MEDIDAS FÍSICAS (DIMENSÕES) PODEM SOFRER VARIAÇÕES E TAMBÉM ESTÃO SUJEITAS A ALTERAÇÕES SEM AVISO PRÉVIO. CONSULTE-NOS EM CASO DE DÚVIDAS. DIREITOS RESERVADOS. PERMITIDA A DIVULGAÇÃO DESTA CATÁLOGO DESDE QUE INTEGRALMENTE, SEM ALTERAÇÕES.

APÊNDICE A – CÁLCULOS DE DISSIPACÃO TÉRMICA

Dados do tiristor BTA08-600C empregado no módulo de disparo para carga:

$$T_J = 150^\circ\text{C}$$

$$R_{thJc} = 3,3^\circ\text{C/W}$$

$$V_{to} = 1 \text{ V}$$

$$R_t = 0,065 \ \Omega$$

$$R_{hc} = 0,5^\circ\text{C/W}$$

$$T_a = 40^\circ\text{C}$$

Cálculo da corrente média no tiristor:

$$I_{tmed} = 0,225x \frac{V_l}{R_l} x (1 + \cos\phi)$$

$$I_{tmed} = 0,225x \frac{220}{46} x (1 + \cos 0)$$

$$I_{tmed} = 0,225x 4,783x 2$$

$$\mathbf{I_{tmed} = 2,153 \text{ A}}$$

Cálculo da corrente eficaz no tiristor:

$$I_{tef} = \frac{V_l}{R_l} x \sqrt{1 - \frac{\phi}{\pi} + \frac{\text{sen}(2x\phi)}{\pi}}$$

$$I_{tef} = \frac{220}{46} x \sqrt{1 - \frac{0}{\pi} + \frac{\text{sen}(2x0)}{\pi}}$$

$$I_{tef} = 4,783x 1$$

$$\mathbf{I_{tef} = 4,783 \text{ A}}$$

Calculo da potência do tiristor BTA08 do fabricante ST, com encapsulamento tipo TO220, conforme dados fornecidos acima;

$$P_t = V_{to}xI_{tmed} + r_t x I_{tef}^2$$

$$P_t = 1x2,153 + 0,065x4,783^2$$

$$Pt = 2,153 + 1,487$$

$$**Pt = 3,64 W**$$

Cálculo do valor da resistência térmica para especificar o dissipador de calor:

$$Rha = \frac{Tj - Ta}{Pt} - Rhc - Rjc$$

$$Rha = \frac{150 - 40}{3,64} - 0,5 - 3,3$$

$$Rha = 30,22 - 0,5 - 3,3$$

$$**Rha = 26,42° \frac{C}{W}**$$

A resistência térmica do dissipador, dever ter seu valor menor ou igual ao calculado em Rha. O dissipador utilizado é o modelo HS2816 do fabricante Hs dissipadores, onde esse modelo possui uma resistência térmica de 7,92°C/W/4". Para esse projeto foi aplicado o dissipador de 15mm de altura, neste caso foi aplicado um fator de correção, conforme mencionado na tabela do próprio fabricante da HS dissipadores, para isso foi aplicado o fator de correção para 15 mm obtendo o valor de 2,63.

Aplicando o fator de correção:

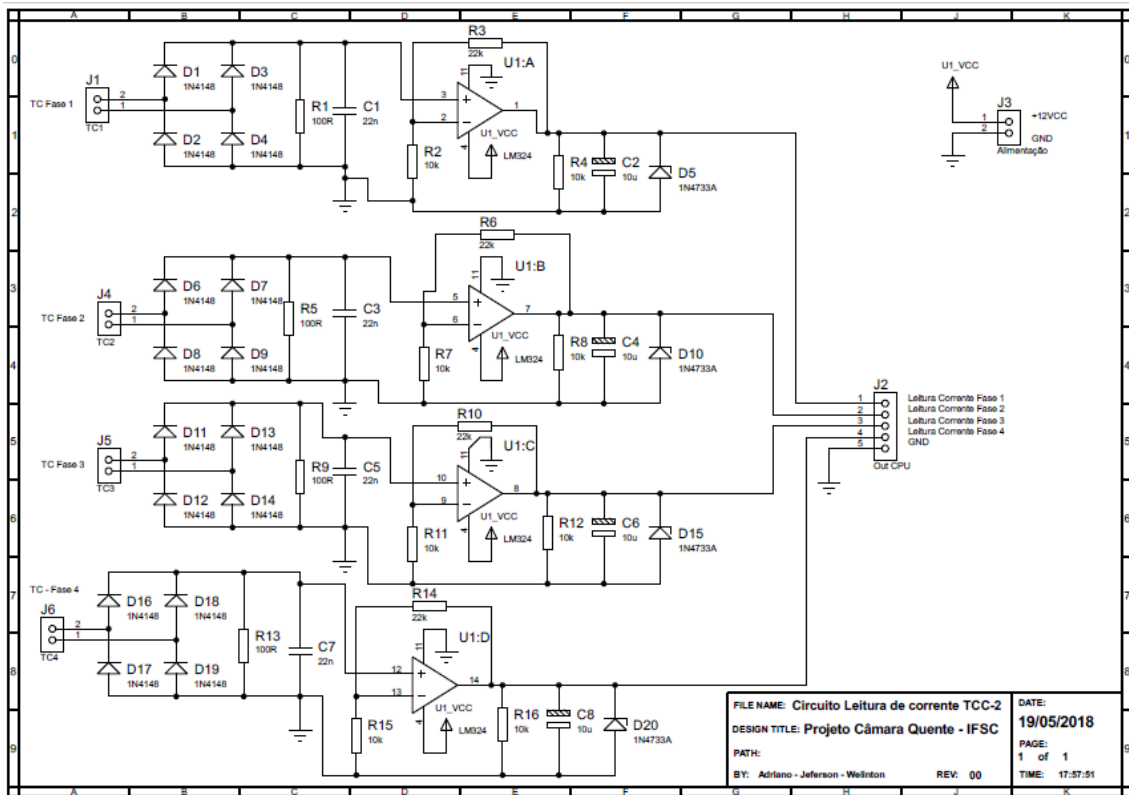
$$R'ha = FcxRha$$

$$R'ha = 2,63x7,92$$

$$**R'ha = 20,83°C/W**$$

Como base nesse valor, pode ser comprovado que o dissipador escolhido é aplicável ao projeto, atendendo assim a condição da dissipação e transferência térmica de calor. Para as demais potências de resistências, a resistência térmica do tiristor será maior, assim não será necessário aplicar os cálculos para os demais.

APÊNDICE B – CIRCUITO ELETRÔNICO DE LEITURA DE CORRENTE



APÊNDICE C – TESTES DE RESISTÊNCIAS

Teste 1:

Será utilizada a resistência de potência de 500 Watts, e apenas um transformador de corrente que foi denominado TC1. Esse TC1 será aplicado em cada canal a fim de testar cada circuito de leitura de corrente. Nesse teste, foi aplicando sobre a resistência a tensão alternada de 220 V, com a utilização de um alicate amperímetro, pode se ler a corrente de 2,42 A e com a utilização de um multímetro na escala de tensão em 2000 mV, foram coletados os seguintes valores de tensão disponíveis na saída da placa de leitura de corrente de cada canal:

Utilizando o TC1 em cada canal:

Canal 1 = 750 mV;

Canal 2 = 736 mV;

Canal 3 = 737 mV;

Canal 4 = 736 mV;

Para a mesma situação de carga, foi apenas substituído o transformador de corrente, onde nesse caso, denominamos TC2, aplicando novamente a mesma situação mencionada acima, temos os seguintes valores de tensão para cada canal:

Utilizando o TC2 em cada canal:

Canal 1 = 843 mV;

Canal 2 = 818 mV;

Canal 3 = 820 mV;

Canal 4 = 817 mV;

Para a mesma situação de carga, foi apenas substituído o transformador de corrente, onde nesse caso, denominamos TC3, aplicando novamente a mesma situação mencionada acima, temos os seguintes valores de tensão para cada canal:

Utilizando o TC3 em cada canal:

Canal 1 = 877 mV;

Canal 2 = 857 mV;

Canal 3 = 860 mV;

Canal 4 = 856 mV;

Para a mesma situação de carga, foi apenas substituído o transformador de corrente, onde nesse caso, denominamos TC4, aplicando novamente a mesma situação mencionada acima, temos os seguintes valores de tensão para cada canal:

Utilizando o TC4 em cada canal:

Canal 1 = 868 mV;

Canal 2 = 846 mV;

Canal 3 = 851 mV;

Canal 4 = 848 mV;

Durante esse teste pode se observar, que utilizando o mesmo transformador de corrente para cada circuito, houve uma pequena diferença na leitura de corrente entre os circuitos, com exceção do circuito do canal 1, onde a diferença foi maior em comparação aos demais. A diferença entre os transformadores de corrente apresentou certa diferença, principalmente entre o TC1, este registrou a leitura de corrente inferior aos demais transformadores. Os valores levantados serão utilizados como referência para o processador principal no Arduino.

Teste 2:

Para esse teste será utilizado à resistência de potência de 750 Watts, e dois transformadores de corrente, um deles será o transformador que foi denominado TC1, sendo este que apresentou maior diferença entre os demais transformadores do teste 1. Foi ainda escolhido o transformador de corrente denominado TC4. Será realizado o teste com TC1 para dois canais de leitura de corrente, após coletados os valores, será utilizado o TC4 para leitura de corrente nos canais. Nesse teste foi aplicando sobre a resistência a tensão alternada de 220 V, com a utilização de um alicate amperímetro, pode se ler a corrente de 3,49 A e com a utilização de um multímetro na escala de tensão em 2000 mV, foram coletados os seguintes valores de tensão disponíveis na saída da placa de leitura de corrente de cada canal:

Utilizando o TC1 nós seguintes canais da placa de leitura de corrente:

Canal 1 = 1094 mV;

Canal 2 = 1065 mV;

Utilizando o TC4 para este teste nós seguintes canais da placa de leitura de corrente:

Canal 1 = 1244 mV;

Canal 4 = 1212 mV;

Teste 3:

Nesse último teste foi utilizada uma resistência de potência de 1000 Watts, e dois transformadores de corrente, um deles será o transformador que foi denominado TC1, sendo este que apresentou maior diferença entre os demais transformadores do teste 1 e teste 2. Foi escolhido o transformador de corrente denominado TC3. Foi realizado o teste com o TC1 para dois canais de leitura de corrente, após coletados os valores, foi utilizado o TC3 para leitura de corrente nos demais canais. Durante esse teste foi aplicando sobre a resistência a tensão alternada de 220 V, com a utilização de um alicate amperímetro, foi possível observar a corrente de 4,78 A e com a utilização de um multímetro na escala de tensão de 2000 mV, foram observados os seguintes valores de tensão disponíveis na saída da placa de leitura de corrente de cada canal:

Utilizando o TC1 nós seguintes canais da placa de leitura de corrente:

Canal 1 = 1513 mV;

Canal 2 = 1470 mV;

Utilizando o TC3 para este teste nós seguintes canais da placa de leitura de corrente:

Canal 1 = 1672 mV;

Canal 3 = 1630 mV;

Com objetivo de melhoria para este circuito de leitura de corrente, pode ser inserido um trimpot, para cada canal, a fim de regular as tensões de saída e manter os níveis de tensão mais próximos entre eles, corrigindo as diferenças na

leitura de corrente, garantindo assim equilíbrio no fornecimento de tensão de corrente contínua para o processador principal.

APÊNDICE D – CIRCUITO ELÉTRICO

