

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - CAMPUS BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Frederico Marazzi Xavier Firmo

Sistema microcontrolado para aquisição de temperatura e desenho da curva de perfil
para equipamentos de reparo de placas eletrônicas.

Betim

2023

Frederico Marazzi Xavier Firmo

Sistema microcontrolado para aquisição de temperatura e desenho da curva de perfil para equipamentos de reparo de placas eletrônicas.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Helbert Ribeiro de Sá.

Coorientador: Virgil Del Duca Almeida.

Betim

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

F525s Firmo, Frederico Marazzi Xavier
Sistema microcontrolado para aquisição de temperatura e
desenho da curva de perfil para equipamentos de reparo de placas
eletrônicas / Frederico Marazzi Xavier Firmo. – 2023.
63 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em
Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim,
2023.

Orientador: Prof. Me. Helbert Ribeiro de Sá
Coorientador: Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida

1. Microcontroladores. 2. Reparo. 3. Confiabilidade (Engenharia)
4. Controle de custo. 5. Temperatura I. Frederico Marazzi Xavier
Firmo. II. Título.

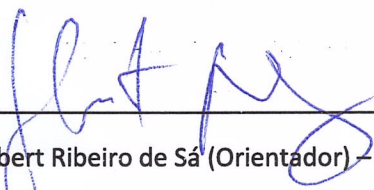
CDU: 681.5

Frederico Marazzi Xavier Firmo

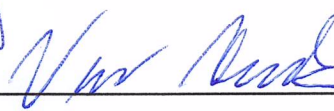
Sistema microcontrolado para aquisição de temperatura e desenho da curva de perfil para equipamentos de reparo de placas eletrônicas.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

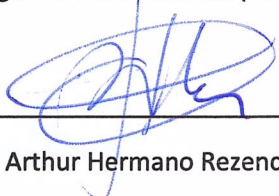
Aprovado em: 16/06/2023 pela banca examinadora:



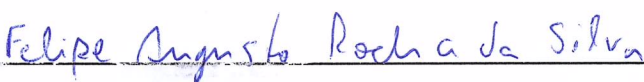
Prof.^(a) Me. Helbert Ribeiro de Sá (Orientador) – IFMG Campus Betim



Prof.^(a) Me. Virgil Del Duca Almeida (Coorientador) – IFMG Campus Betim



Prof.^(a) Dr. Arthur Hermano Rezende Rosa – IFMG Campus Betim



Prof.^(a) Me. Felipe Augusto Rocha da Silva – IFMG Campus Betim

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José André e Flavia Marazzi, por não me deixarem desanimar durante estes longos anos, sem vocês eu não chegaria até aqui.

À minha avó, Maria Eneida, que sempre esteve ao meu lado com seus melhores conselhos.

A todo o restante da minha família e amigos que sempre me ajudaram.

A minha namorada, que sempre me apoiou e acreditou nas minhas ideias.

A todos os servidores, amigos e professores do IFMG Betim pela oportunidade de crescimento e aprendizado.

Aos meus orientadores Helbert de Sá e Virgil Almeida, vocês foram essenciais tanto para meu crescimento técnico quanto para meu crescimento pessoal.

RESUMO

Com o aumento exponencial de dispositivos eletrônicos sendo fabricados ao redor do mundo para atender à alta demanda da população por tecnologia, uma consequência inerente deste processo é a necessidade da realização de reparos nos dispositivos para garantir a eles um maior tempo de utilização, tanto no processo produtivo quanto nas situações pós-venda. Atualmente existem diversas microempresas que oferecem o serviço de reparo de equipamentos eletrônicos como: celulares, tablets, computadores entre outros. Com base na complexidade e tamanhos de alguns componentes como processadores, memórias e micro resistores surge a necessidade do controle de temperatura durante a remoção e inserção de um novo componente. Para resolver este problema surgiram máquinas que permitem este controle e garantia de qualidade, porém o principal pré-requisito deste processo é a aferição do perfil de temperatura através de um dispositivo de aquisição de temperatura. O problema que se cria para pequenos empreendedores é a dificuldade de adquirir um equipamento de baixo custo que seja capaz de aferir com confiabilidade as temperaturas do processo, portanto, neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de circuito eletrônico capaz de medir, converter e entregar estes valores buscando comprovar, ou não, a eficiência do equipamento em comparação com os dispositivos encontrados no mercado.

Palavras-chave: Reparo. Temperatura. Confiabilidade. Baixo custo.

ABSTRACT

With the exponential increase in electronic devices being manufactured worldwide to meet the high demand of the population for technology, an inherent consequence of this process is the need for device repairs to ensure extended usage, both in the production process and in post-sales situations. Currently, there are several microenterprises that offer electronic equipment repair services such as cell phones, tablets, computers, among others. Based on the complexity and size of certain components such as processors, memory, and micro resistors, there arises a need for temperature control during the removal and insertion of a new component. To address this issue, machines have been developed that allow for such control and quality assurance. However, the main prerequisite for this process is the measurement of temperature profiles through a temperature acquisition device. The problem faced by small entrepreneurs is the difficulty of acquiring a low-cost equipment capable of reliably measuring the process temperatures. Therefore, in this work, an electronic circuit prototype was developed to measure, convert, and deliver these values, aiming to prove the efficiency of the equipment compared to devices found in the market.

Keywords: Repair. Temperature. Reliability. Low cost.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 curva do processo de reflow	17
Figura 2 detalhamento da curva de perfil.....	19
Figura 3 Máquina de reparo de BGA.....	20
Figura 4 Junta termopar.....	22
Figura 5 Curvas dos termopares	23
Figura 6 Termopares posicionados na placa.....	24
Figura 7 BGA – processador	24
Figura 8 Falhas típicas no processo de soldagem	25
Figura 9 Traçador de perfil KIC.....	26
Figura 10 Perfil de temperatura em andamento	27
Figura 11 Arquitetura do microcontrolador	27
Figura 12 Comunicação serial síncrona.....	29
Figura 13 Comunicação serial assíncrona	30
Figura 14 Estrutura rx-tx	31
Figura 15 Conexão SPI com dispositivos	31
Figura 16 Ligação do MAX6675 ao microcontrolador	34
Figura 17 Diagrama de blocos MAX6675	35
Figura 18 Simulação do projeto	37
Figura 19 Circuito oscilador e start	37
Figura 20 Formato de dado enviado pelo MAX6675	38
Figura 21 Sinal enviado no barramento SPI do CI MAX6675	38
Figura 22 Comprovação do sinal enviado	39
Figura 23 Diagrama em blocos do projeto.....	39
Figura 24 Materiais utilizados no protótipo	40
Figura 25 Fluxograma do firmware.....	41
Figura 26 Interface gráfica	42
Figura 27 Fluxograma da interface gráfica.....	43
Figura 28 Teste da interface gráfica.....	43
Figura 29 Analisador lógico LA1010	44
Figura 30 Sinal SPI capturado com analisador lógico.....	44
Figura 31 Análise dos bits do sinal SPI	45
Figura 32 Resultados da conversão SPI.....	45
Figura 33 Calibrador CL900A, mostrado com HH-21A, medidor portátil e sonda termopar de cabo.....	47
Figura 34 Gerador de função	48
Figura 35 Acuracidade do gerador de função.....	48
Figura 36 Precisão e exatidão	49
Figura 37 Faixa de erro MAX6675.....	51
Figura 38 Histograma para os testes com 2mV e 6mV	51
Figura 39 Histograma para os testes com 7mV e 10mV	52
Figura 40 Experimento com termômetro de mercúrio	53
Figura 41 Resultado na interface gráfica	54
Figura 42 Comportamento do circuito no resfriamento da água	55
Figura 43 Experimento com gelo	56

Figura 44 Resultado na interface com água em ebulição	57
Figura 45 Histograma dos dados de calibração com água em ebulição	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referências para temperatura de perfil.....	18
Tabela 2 - Temperaturas de pico SnPb	19
Tabela 3 - Temperaturas de pico Lead Free.....	20
Tabela 4 - Tipos de termopares	22
Tabela 5 - Características da família PIC18F	28
Tabela 6 - Velocidades de comunicação serial padrão	30
Tabela 7 - Resultados da calibração com gerador de função	50
Tabela 8 - Amostras no teste com termômetro de mercúrio	54
Tabela 9 - Resultados da calibração com termômetro de mercúrio	55
Tabela 10 - Calibração com água em ebulição.....	57
Tabela 11 - Lista de Materiais	18
Tabela 12 - Acuracidade.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

PCB – Printed Circuit Board

PCI – Placa de circuito Impresso

CI – Circuito Integrado

UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

SPI - Serial Peripheral Interface

BPS – Bits Per Second

SS – Slave Select

SCK – Serial Clock

MOSI – Master Output Slave Input

MISO – Master Input Slave Output

CLR – Common Language Runtime

RX – Receive

TX – Transmit

CSV - Comma-separated values

COM - Communication Port

SDO - Serial Data Output

LSB - Least Significant Bit

SUMÁRIO

1. Introdução.....	14
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Problema.....	15
1.3 Objetivo Geral.....	16
1.4 Objetivos específicos.....	16
1.5 Organização do trabalho.....	16
2. Referencial teórico.....	16
2.1 Soldagem por refusão.....	17
2.1.1 Soldagem por refusão em processos de reparo.....	20
2.2 Termopares.....	21
2.3 Traçadores de perfil de temperatura.....	23
2.4 Microcontroladores.....	27
2.4.1 PIC18F4550.....	28
2.4.2 Conversão analógico-Digital.....	28
2.4.3 Comunicação serial.....	29
2.4.4 Protocolos de comunicação serial:.....	30
2.4.5 Linguagens de programação.....	32
2.4.5.1 Linguagem C.....	33
2.4.5.2 Linguagem C#.....	33
2.5 Circuito integrado MAX6675.....	34
3. Metodologia.....	36
3.1 Seleção dos componentes.....	36
3.2 Proposta de circuito eletrônico.....	36
3.2.1 Simulação do projeto.....	36
3.2.2 Montagem do hardware.....	39
3.3 Programação do microcontrolador.....	40
3.3.1 Fluxograma do firmware.....	41
3.4 Interface de usuário.....	41
3.4.1 Fluxograma de funcionamento da interface gráfica.....	43
3.5 Testes do hardware.....	44
3.6 Calibração do circuito.....	46
3.6.1 Calibração com gerador de tensão de referência.....	47

3.6.2 Análise da calibração com gerador de tensão de referência.....	49
3.6.3 Calibração com termômetro de mercúrio	52
3.6.4 Testes com gelo e água em ebulição	56
4 Resultados e discussões	58
5 Conclusões	59
5.1 Recomendações para trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS.....	61

1. Introdução

Nos últimos anos a demanda por equipamentos eletrônicos vem aumentando consideravelmente e pode-se assegurar que esta é uma tendência crescente. No entanto, após a fabricação destes dispositivos, por exemplo: televisões, celulares, aparelhos de som, fones de ouvido entre outros. Pode-se existir falhas causadas por problemas na placa, e com isso surge a necessidade de realizar um processo de reparo para fazer o dispositivo voltar a funcionar corretamente.

Com base nesta necessidade, o processo de reparo em PCI demanda o uso de um equipamento específico para ajudar o técnico durante esta substituição. Em determinadas situações o componente a ser substituído é muito sensível e não permite operações sem controle de duas variáveis: temperatura e tempo.

Para isso, as máquinas de reparo precisam controlar a temperatura de acordo com uma programação realizada em sua interface. Esta segue a recomendação do fabricante da pasta de solda, elemento responsável por unir os terminais do componente aos terminais da placa. A especificação fornecida pelo fabricante é baseada no perfil de soldagem por refusão.

O impacto de uma soldagem fora dos parâmetros especificados é alto, pois uma junta de solda fragilizada reduz a qualidade do produto e inviabiliza o seu processo de reparo, fazendo com que ele tenha de ser descartado, acarretando prejuízo ao técnico e ao cliente. (Altera, 2015)

Sabe-se que a Intel é a segunda colocada no ranking mundial de empresas que fabricam dispositivos semicondutores, portanto este trabalho se baseia em um dos manuais de recomendações de soldagem. Além disso, ela destaca a importância da obtenção do perfil de temperatura para garantir que todos os pontos críticos da placa foram submetidos a temperaturas controladas e que nenhum componente será danificado no processo de reparo. (Altera, 2015, p4).

O processo de obtenção do perfil de temperatura é realizado por equipamentos de alto custo, variando entre 18 e 30 mil reais, portanto este trabalho visa desenvolver

um equipamento de baixo custo capaz de traçar a curva de temperatura aplicada pela máquina de reparo às placas de circuito impresso. Este dispositivo irá fornecer dois canais com termopares do tipo K equipados com o circuito integrado MAX6675, responsável pelo processo de aquisição, amplificação, compensação de junção fria e conversão da tensão gerada pelo termopar para um valor digital de temperatura.

Após essa conversão o microcontrolador é responsável por traduzir o código digital recebido em graus celsius e enviar ao computador através da interface serial. Uma aplicação gráfica desenvolvida com a linguagem C# no Visual Studio recebe os valores e os disponibilizam em gráfico indicando os momentos em que o processo atingiu medidas fora do especificado.

1.1 Justificativa

A aferição do perfil de temperatura é indispensável em processos de soldagem de componentes eletrônicos, pois a garantia da qualidade do produto depende desta verificação.

O custo de aquisição dos equipamentos pode se tornar um grande limitador para projetos de pequeno porte e para isso o estudo de formas acessíveis e confiáveis de medição de temperatura são importantes para o desenvolvimento da tecnologia eletrônica.

1.2 Problema

A validação da temperatura no processo de soldagem por refusão é importante para assegurar a qualidade do produto em etapas de reparo. Porém, aparelhos que traçam a curva de perfil de soldagem são caros e muitas das vezes inacessíveis a empresas de pequeno porte e a falta deste equipamento impacta diretamente na qualidade do serviço prestado, portanto, sem este dispositivo, o reparo pode não atender às expectativas do cliente.

Não atender às expectativas do cliente reflete diretamente no faturamento da empresa, pois há uma relação direta entre quantidade de serviços prestados e faturamento. Sabendo que no Brasil existem milhares de pequenos empreendedores

prestando serviços, a falta de um equipamento adequado nestes locais nos mostra como este impacto é significativo.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é construir um circuito eletrônico de baixo custo com microcontrolador e termopar capaz de aferir com confiabilidade a temperatura aplicada à PCI durante os processos de reparo e troca de componentes.

1.4 Objetivos específicos

- Propor uma solução de baixo custo em comparação com as soluções disponíveis no mercado prezando pela confiabilidade das medidas.
- Implementar via software e hardware um sistema de aquisição de temperatura que trabalhe com dois termopares e que seja capaz de imprimir em gráfico a curva da temperatura em relação ao tempo em tempo real.
- Criar uma interface gráfica para visualização dos dados em tempo real.
- Realizar estudos estatísticos visando comprovar, ou não, a efetividade do projeto desenvolvido.

1.5 Organização do trabalho

O primeiro capítulo deste trabalho contempla a introdução e contextualização do problema que será estudado. No segundo capítulo será tratado e definido todo o referencial teórico necessário para a compreensão e aplicação do projeto. No terceiro capítulo os materiais e métodos serão definidos e exemplificados. No quarto os resultados obtidos e pôr fim a conclusão.

2. Referencial teórico

Neste capítulo serão abordados os princípios de soldagem por refusão e sua importância no processo de manufatura eletroeletrônica, além da utilização de traçadores

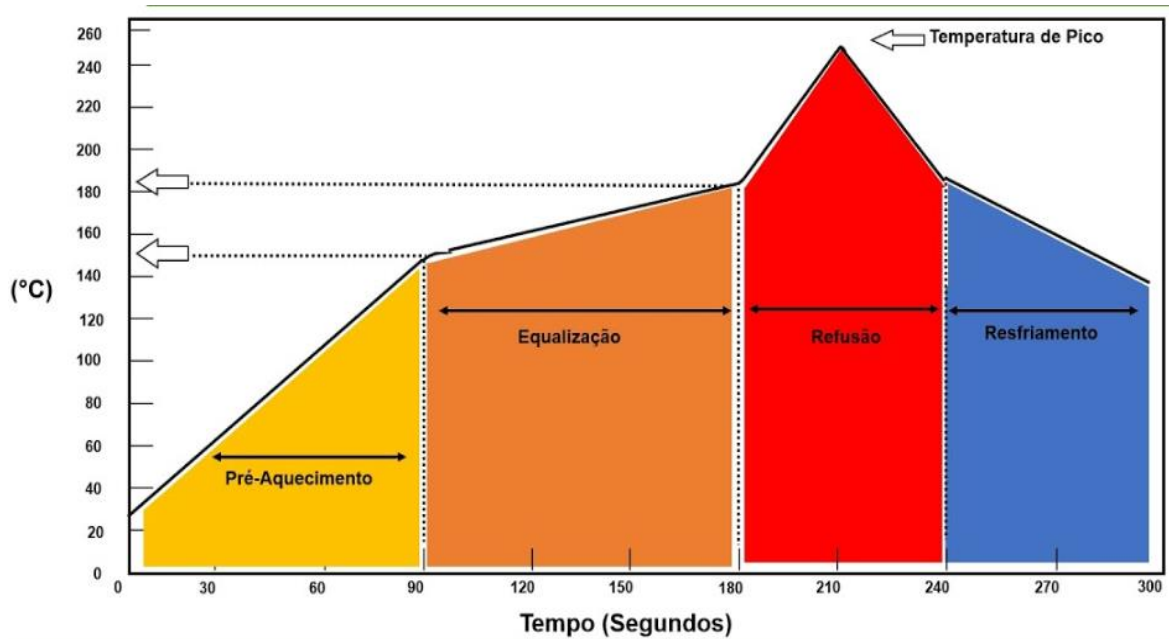
de perfil para a calibração dos equipamentos. A composição dos equipamentos e protocolos de comunicação também serão abordados.

2.1 Soldagem por refusão

A soldagem por refusão é um processo crítico na produção PCIS pois é nesta etapa que os componentes são fixados às trilhas do PCB. Este modelo de soldagem consiste em submeter a placa ao calor por radiação, condução ou convecção a fim de fundir a pasta de solda e fixar os componentes na placa. O elemento responsável por executar este processo de união é o forno de refusão.

Para assegurar que a soldagem dos componentes irá acontecer de maneira controlada e eficiente, são necessárias quatro etapas principais, descritas na Figura 1. Este gráfico representa de maneira geral como é o comportamento de um perfil de soldagem, valendo destacar que as temperaturas em cada etapa vão variar de acordo com volume aplicado e pasta de solda utilizada, conforme descrevem as tabelas 1, 2 e 3 deste capítulo.

Figura 1 curva do processo de reflow



Fonte: Adaptado https://i.ytimg.com/vi/_MrGfet3734/maxresdefault.jpg, 2023

As quatro etapas mencionadas anteriormente são detalhadas a seguir:

- **Pré-Aquecimento:** Nesta etapa a placa entra em contato com as primeiras camadas do forno e é submetida à uma rampa de temperatura que tem como objetivo evitar choques térmicos nos componentes. (Briggs e Lasky, 2012, p2,3)
- **Equalização:** Nesta região a placa é submetida a uma rampa estável de temperatura, pois o objetivo é permitir que o elemento químico misturado à pasta de solda limpe os contatos da placa com os componentes e que a temperatura se iguale em todos eles, visto que existem diversos tamanhos e materiais dispostos no PCB. (Briggs e Lasky, 2012, p2,3)
- **Refusão:** Nesta região a pasta de solda se encontra totalmente liquefeita e acontece a formação da liga metálica entre os terminais do componente e os terminais da placa. (Briggs e Lasky, 2012, p2,3)
- **Resfriamento:** É de extrema importância para a solidificação da pasta de solda e garantia da não ocorrência de choques térmicos ao entrar em contato com a temperatura ambiente. (Briggs e Lasky, 2012, p2,3)

Os parâmetros do perfil de soldagem são descritos na tabela 1, nela observa-se as recomendações para a configuração de um perfil de temperatura ideal de acordo com a pasta de solda utilizada no processo.

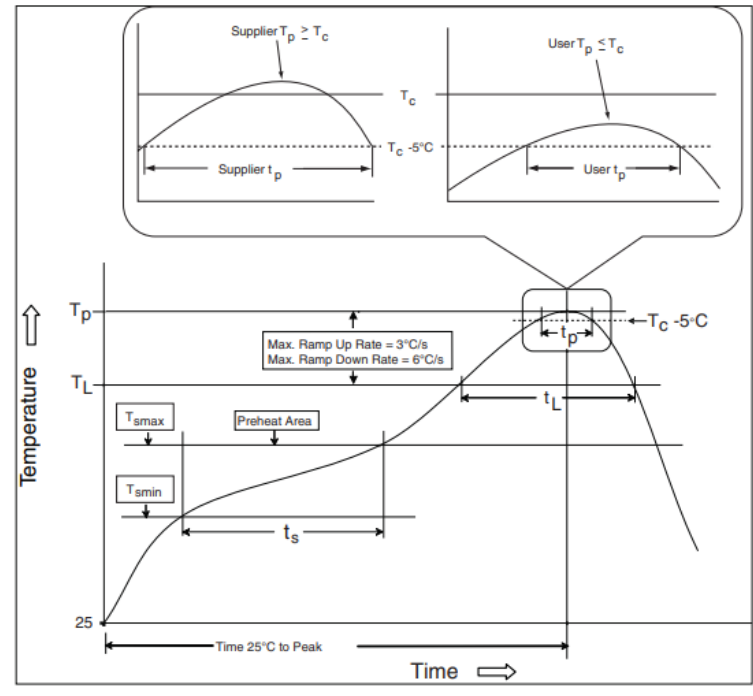
Tabela 1 Referências para temperatura de perfil

Característica do perfil	Solda SnPb	Solda sem chumbo
Taxa média de subida (T _{smax} até TP)	3 °C/s no máximo	3 °C/s no máximo
Temperatura mínima de pré aquecimento (T _{smin})	100 °C	150 °C
Temperatura máxima de pré aquecimento (T _{smax})	150 °C	200 °C
Temperatura máxima de pré aquecimento (T _{smax})	60-120 segundos	60-120 segundos
Temperatura de liquefação (TL)	183 °C	217 °C
Tempo com a temperatura acima de TL	60-150 segundos	60-150 segundos
Temperatura de pico (TP)	Ver tabela temperaturas de pico	Ver tabela temperaturas de pico
Tempo com a temperatura na faixa de (TP – 5) °C	20 segundos	30 segundos
Taxa média de arrefecimento (TP até T _{smax})	6 °C/s no máximo	6 °C/s no máximo
Tempo para a temperatura ir de 25°C até TP	6 min no máximo	8 min no máximo

Fonte: Adaptado de ALTERA

Para facilitar a identificação dos termos da tabela 1 durante o perfil de soldagem, um gráfico de referência pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 detalhamento da curva de perfil



Fonte: (ALTERA, 2023)

As tabelas 2 e 3 especificam as temperaturas de pico (TP) para os dois tipos de pasta de solda existentes:

Tabela 2 Temperaturas de pico SnPb

Espessura da pasta	Volume mm ³ < 350	Volume mm ³ ≥ 350
< 2.5 mm	235°C	220°C
≥ 2.5 mm	220°C	220°C

Fonte: (adaptado de ALTERA, 2023)

Na tabela 2, notamos a variação da temperatura de pico de acordo com a espessura do componente e o volume de pasta aplicada nos terminais do componente. A mesma situação ocorre na tabela 3 para as referências de soldas livre de chumbo.

Tabela 3 Temperaturas de pico Lead Free

Espessura da pasta	Volume mm ³ < 350	Volume mm ³ 350–2000	Volume mm ³ > 2000
< 1.6 mm	260°C	260°C	260°C
1.6 mm–2.5 mm	260°C	250°C	245°C
> 2.5 mm	250°C	245°C	245°C

Fonte: (Adaptado de ALTERA, 2023)

2.1.1 Soldagem por refusão em processos de reparo

Diferente do processo produtivo onde fornos de refusão são utilizados, os processos de reparo de placas utilizam equipamentos menores com o foco na substituição individual de componentes.

A máquina utilizada no processo de reparo possui um software de controle e programação que permite a configuração dos parâmetros de tempo e temperatura aplicados na placa durante o processo de retrabalho, conforme recomendado pela tabela 1.

O soprador de ar quente direciona o fluxo ao componente a ser trocado seguindo o perfil de temperatura previamente configurado até que o componente esteja apto a ser removido da placa. A Figura 3 representa um modelo de equipamento que faz este trabalho.

Figura 3 Máquina de reparo de BGA



Fonte: (Aliexpress, 2023)

O processo de reparo de placas é composto pelas seguintes etapas: (ALTERA, 2015, p7)

- Perfil de temperatura: Obtido através do dispositivo proposto neste estudo.
- Remoção do componente defeituoso: Utilizando a máquina de reparo.
- Limpeza do local.
- Inserção de nova solda ou fluxo.
- Posicionamento do novo componente.
- Soldagem por refusão: Utilizando a máquina de reparo.
- Inspeção pós soldagem por refusão.

Neste momento, conseguimos definir o comportamento do processo de soldagem por refusão e suas etapas, levando em consideração as diferenças nos tipos de pasta de solda utilizadas no processo e a importância da calibração da máquina utilizando um traçador de perfil para garantir a confiabilidade do reparo.

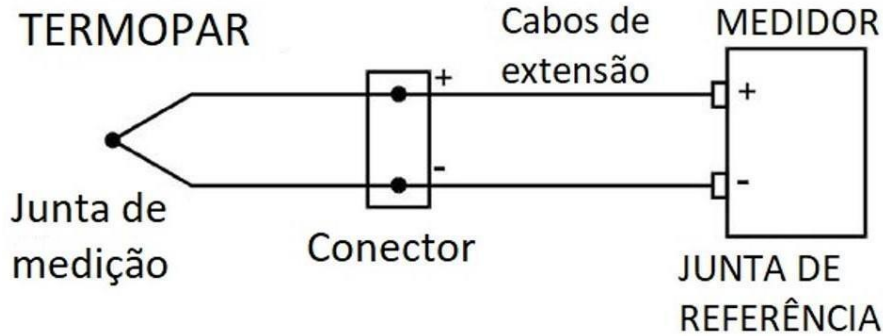
2.2 Termopares

Os termopares são dispositivos formados por duas ligas metálicas de materiais distintos conectados entre si numa região chamada junta de medição, através desta junção, as outras extremidades dos fios metálicos são unidas para criar um circuito elétrico (Dunn, 2005). Esta definição é ilustrada na Figura 4, onde observa-se a junta de medição, local submetido à temperatura e junta de referência, que, de acordo com (Dunn,2005), ao criar uma junta de referência, cria-se também a possibilidade de medir a temperatura na junção conectada ao medidor.

Ao submeter a junção à temperatura, uma corrente irá fluir através da junta termopar, corrente proveniente da força eletromotriz gerada devido à diferença de temperatura. (Dunn,2005)

Em 1821 Thomas Seebeck descobriu este fenômeno da geração de corrente a partir do aquecimento de uma junta de materiais através da junção de um fio de cobre e um fio de bismuto e a ele foi creditado a descoberta do efeito termoelétrico. (Borges, 2012)

Figura 4 Junta termopar



Fonte: (viverdeeletrica, 2023)

A Tabela 4 apresenta uma lista de termopares com tipo, composição química e faixa de temperatura de trabalho:

Tabela 4 Tipos de termopares

Tipo	Material	Faixa de Temperatura
T	Cobre (+) / Cobre - Níquel (-)	200 a 370°C
J	Ferro (+) / Cobre - Níquel (-)	-40 a 760°C
E	Níquel - Cromo (+) / Cromo - Níquel (-)	-200 a 870°C
K	Níquel - Cromo (+) / Níquel - Alumínio (-)	-200 a 1260°C
R	Platina - 13% Ródio (+) / Platina (-)	0 a 1600°C
S	Platina - 10% Ródio (+) / Platina (-)	1 a 1600°C
B	Platina - 30% Ródio (+) / Platina - 6% Ródio (-)	600 a 1700°C
N	Níquel - Cromo - Silício (+) / Níquel - Silício (-)	-200 a 1260°C

Fonte: (blogmasterwalkershop, 2023)

Para a aplicação deste trabalho foi selecionado o termopar tipo K devido a sua vasta aplicação nos processos de aquisição de temperatura em indústrias de componentes eletrônicos e facilidade de encontrar circuitos que utilizam este modelo de sensor para a mesma finalidade do trabalho em questão.

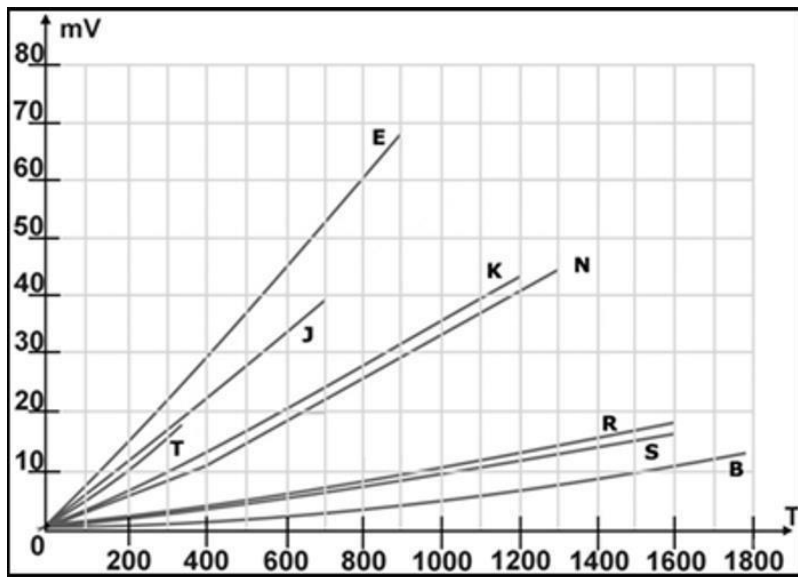
(KÖRBES, 2011) desenvolveu um sistema denominado “traçador de perfil térmico para uso na indústria eletrônica” utilizando termopares do tipo K e obteve resultados positivos.

(QUINTÃO, 2019) também utilizou termopares do tipo K para desenvolver um sistema denominado “desenvolvimento de um controlador adaptativo de temperatura para fornos elétricos a resistência aplicada na soldagem de componentes SMD”, que

tinha o foco de projetar o controlador e converter um forno elétrico residencial para um forno de refusão apto a soldar placas de circuito impresso.

Para demonstrar a relação de força eletromotriz gerada e temperatura equivalente, vemos na Figura 5 as curvas de tensão versus temperatura gerada pelos principais tipos de termopares:

Figura 5 Curvas dos termopares



Fonte: (www.temperatura.com.br, 2023)

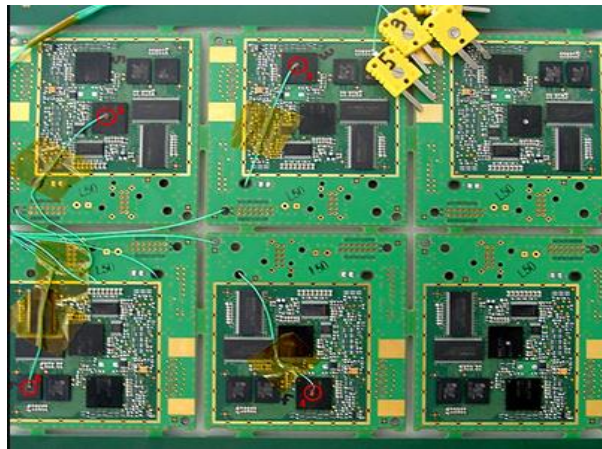
2.3 Traçadores de perfil de temperatura

Após a configuração da máquina de reparo de componentes com as temperaturas ideais para atender ao perfil de refusão, citado no tópico 2.1 deste trabalho, detalha-se a seguir a importância dos traçadores de perfil.

Os traçadores de perfil são equipamentos responsáveis por gerar resultados de medidas de temperatura aplicada aos pontos da PCI, através da captação da força eletromotriz dos termopares conectados a ele. Eles são responsáveis por medir, traduzir, registrar e mostrar os valores obtidos em representações gráficas que permitem ao usuário tirar conclusões acerca do perfil de temperatura. (Koorithodi, 2009)

Para utilizar o equipamento se faz necessária a preparação de uma placa montada com componentes, onde serão posicionados os termopares nos pontos de interesse. Na Figura 6 podemos observar o resultado obtido após a aplicação dos termopares em uma placa:

Figura 6 Termopares posicionados na placa



Fonte: (www.ett.bme.hu, 2023)

Estes pontos de interesse são selecionados com base em alguns critérios:

- Grandes conectores, é importante avaliar o comportamento da temperatura em grandes conectores pois eles podem sofrer danos durante o processo de soldagem. (Koorithodi, 2009)
- BGA: são componentes críticos (Figura 7) para a soldagem devido à sua complexidade de construção que impacta diretamente na dificuldade de soldagem do componente na placa. (Koorithodi, 2009)
- Componentes pequenos sensíveis a temperaturas elevadas.

Figura 7 BGA – processador

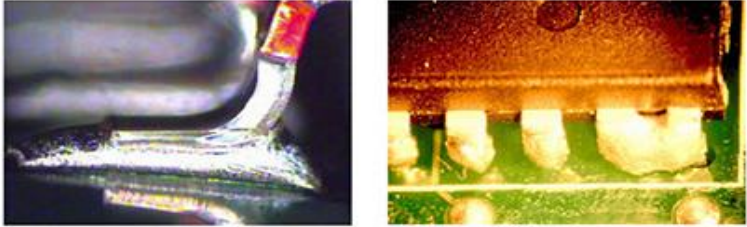
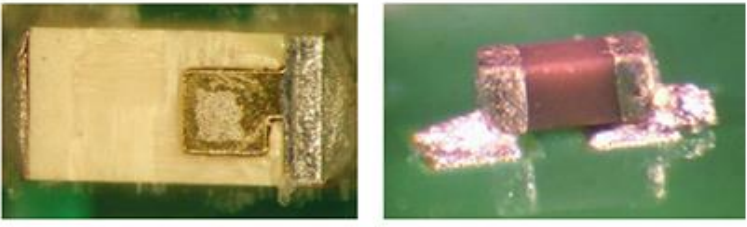
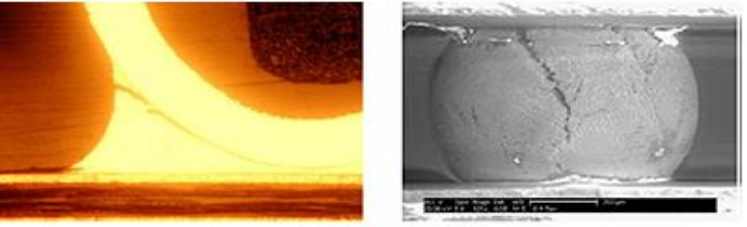


Fonte: (www.ebay.com, 2023)

Após submeter a placa de perfil ao teste e avaliar os resultados, alterações de parâmetros na máquina de reparo podem ser necessárias, e, para avaliar a eficácia das alterações, uma nova seção de teste deve ser realizada.

O impacto de um perfil de temperatura mal calibrado inviabiliza o processo de reparo, uma vez que as falhas listadas na Figura 8 podem ser encontradas após a troca dos componentes:

Figura 8 Falhas típicas no processo de soldagem

Baixa temperatura de pico, levam a junta fria e curtos de solda	
Altas temperaturas de pico danificam os componentes e o expulsam da placa	
Ao se resfriar abruptamente a placa a criação das juntas intermetálicas são interrompidas e podem causar trincas na solda	

Fonte: Adaptado de www.ett.bme.hu, 2023

As amostras de imagens da Figura 8 são utilizadas para reforçar a importância de um perfil de temperatura confiável e devidamente calibrado, para isso os equipamentos de aferição devem ser confiáveis e precisos. Um dos principais fabricantes de traçadores

de perfil no mercado atualmente é o KIC Explorer e seus componentes são visualizados na Figura 9:

Figura 9 Traçador de perfil KIC



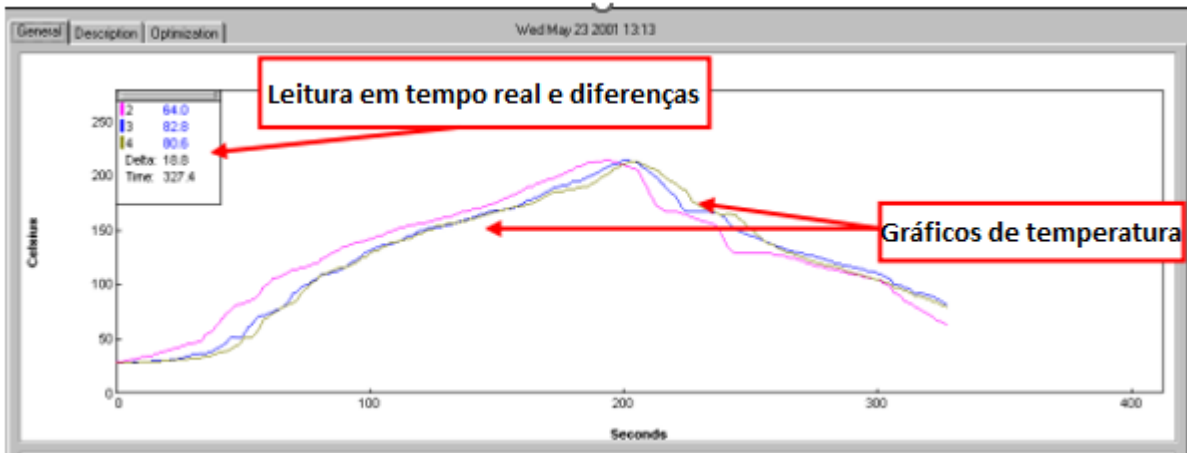
Fonte: KIC 2000 User Manual Hardware and Software

O conjunto é composto por termopares tipo K, pilhas, circuito principal, invólucro isolador e emissor-receptor para comunicação wireless. Este KIT é inserido dentro do forno junto à placa de perfil e após passar pelo processo de soldagem o equipamento pode ser conectado ao computador e o gráfico relativo ao processo é criado, facilitando a análise do técnico de processo responsável pelo produto.

Observando a temperatura medida na placa, a comparação com o valor esperado é feita e em casos de necessidade os parâmetros do forno são alterados dando início à um novo ciclo. Ao fim deste ciclo o programa do forno está calibrado para entregar aos componentes da placa a temperatura especificada pelos datasheets e garantir uma soldagem de sucesso.

No contexto deste trabalho, este equipamento será utilizado na máquina de reparo não havendo a necessidade do uso de invólucro isolador, pois o circuito não é submetido ao aquecimento como é feito na calibração com fornos. A Figura 10 demonstra o andamento de um perfil em tempo real onde pode-se observar como a temperatura se comporta no decorrer do tempo.

Figura 10 Perfil de temperatura em andamento

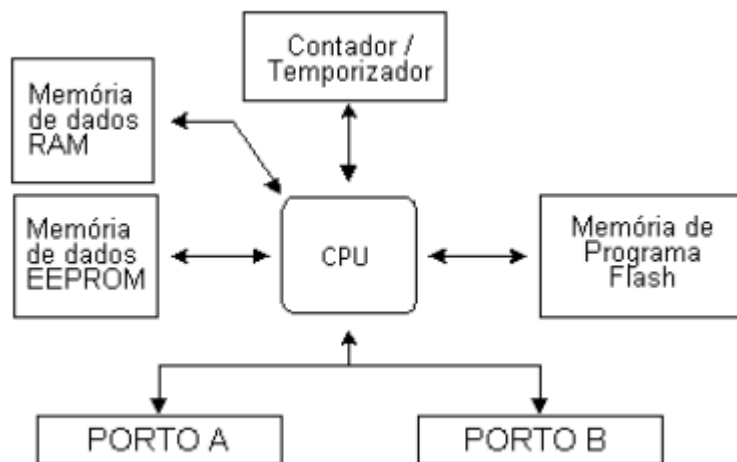


Fonte: Adaptado de ALTERA

2.4 Microcontroladores

O microcontrolador será elemento fundamental para o funcionamento do projeto, pois ele terá a função de receber os valores enviados pelos termopares e enviá-los ao computador através das portas seriais. A Figura 11 demonstra a estrutura em blocos deste componente.

Figura 11 Arquitetura do microcontrolador



Fonte: (PicBook-PT, 2003)

Com base na Figura 11, um microcontrolador é um dispositivo que une em sua construção todos os elementos necessários para seu funcionamento independente,

necessitando apenas de alimentação externa, podendo ser chamados de computadores de chip único. (Kerschbaumer, 2018)

Uma das vantagens que o microcontrolador entrega aos projetos de hardware é a flexibilidade no desenvolvimento sem criar a dependência de muitos componentes externos. Neste trabalho o microcontrolador é peça chave, pois sua estrutura de baixo custo e variedade de protocolos viabiliza esta construção.

2.4.1 PIC18F4550

Para viabilizar este trabalho, se faz necessário o uso de um microcontrolador que forneça suporte à comunicação UART e SPI. O microcontrolador selecionado para este projeto foi o PIC18F4550, pois ele é parte da placa de desenvolvimento “PIC EXPERT” utilizada nos testes do protótipo Na tabela 5, retirada do datasheet do componente, podemos observar suas principais características:

Tabela 5 Características da família PIC18F

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	Comparators	Timers 8/16-bit
	FLASH (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I ² C			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

Fonte: Datasheet do fabricante

Na tabela 5, observamos que o PIC selecionado tem a maior capacidade de memória flash, também contam com 35 pinos de entrada e saída de proposta geral, interface SPI e UART, que serão a base do projeto do ponto de vista de transferência de dados entre dispositivos, neste ponto fica claro a relevância do microcontrolador na construção do projeto.

2.4.2 Conversão analógico-Digital

Para trabalharmos em sistemas eletrônicos com grandezas como temperatura, velocidade, luminosidade, entre outros, a conversão é necessária pois as grandezas

físicas da natureza são percebidas pelos sensores na forma analógica, o que dificulta o armazenamento e o processamento dos dados. (Lima,2023)

Com base nessa simples introdução, a variável base do projeto é temperatura, que é medida em variações de microvolts pelo termopar e convertida para graus celsius através das tabelas de referência e da programação de dispositivos eletrônicos microcontrolados.

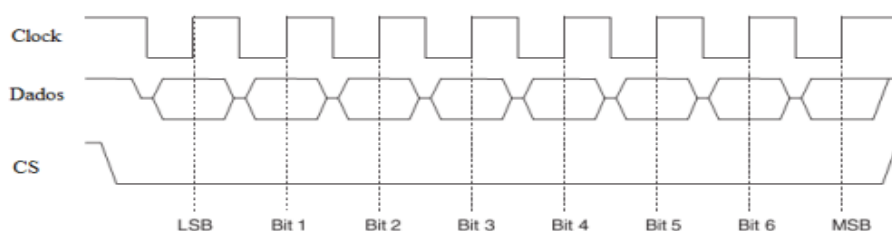
O microcontrolador selecionado tem um conversor de 10 bits, ou seja, se calibrarmos uma escala de 0v a 5v para medição de temperatura, a conversão A-D com este conversor forneceria $(5 / 1024) 0.0048$ volts por divisão, ou 4.88mV. No entanto, o componente selecionado para fazer esse tratamento foi o circuito integrado MAX6675 que conta com conversor A-D de 12 bits, provendo maior resolução na medição.

2.4.3 Comunicação serial

A comunicação serial entre dispositivos é de grande valia para este trabalho pois os módulos que integram os termopares enviam os dados ao microcontrolador utilizando este protocolo. Portanto uma breve explicação sobre comunicação serial e seus tipos serão abordadas neste tópico.

Comunicação serial é o processo de envio de dados um bit por vez em sequência através de canais (Kerschbaumer,2018). Ela é dividida em dois tipos, síncrona e assíncrona, na Figura 12 a comunicação síncrona pode ser observada, nela existe o sinal de clock que é responsável por marcar as transições dos bits.

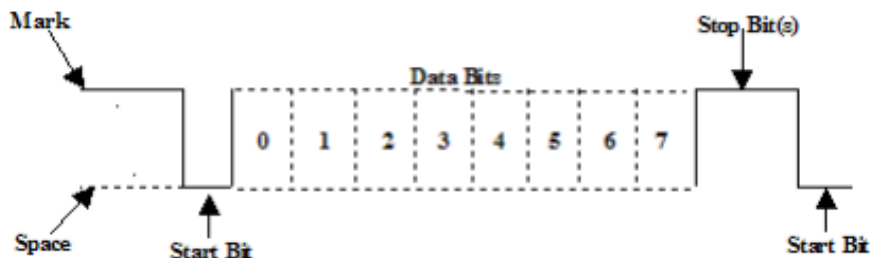
Figura 12 Comunicação serial síncrona



Fonte: (Kerschbaumer, 2018)

Na comunicação assíncrona a transição é detectada por faixas de tempo, conforme a Figura 13:

Figura 13 Comunicação serial assíncrona



Fonte: (Kerschbaumer, 2018)

Um parâmetro crítico no processo é a taxa de comunicação, sua unidade geralmente é bits por segundo (bps). (Kerschbaumer,2018). Na Tabela 6, observa-se as principais taxas de comunicação (Baud Rate) para facilitar o desenvolvimento e configuração de dispositivos:

Tabela 6 Velocidades de comunicação serial padrão

300 bps	600 bps	1200 bps
2400 bps	4800 bps	9600 bps
14400 bps	19200 bps	28800 bps
38400 bps	56000 bps	57600 bps
115200 bps	128000 bps	256000 bps

Fonte: (Kerschbaumer, 2018)

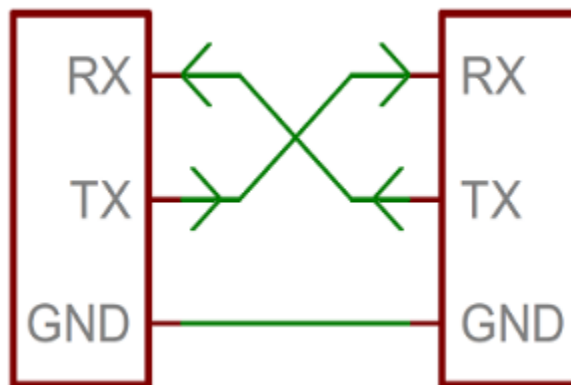
É de extrema importância que os dispositivos que estão se comunicando sejam configurados com a mesma velocidade de comunicação, pois é através deste tempo que são detectados os pulsos, com tempos divergentes o sinal original não chegará ao destino da mesma forma que foi enviado, causando assim uma inconsistência de dados.

2.4.4 Protocolos de comunicação serial:

UART: O pino de transmissão de dados é denominado TX e por ele são enviados os bits que serão interpretados um a um pelo receptor (RX). Cada pacote contém as marcações de bit de início e fim, a partir daí o baud rate é utilizado para encontrar o

pacote de informação dentro deste sinal enviado. (Robocore, 2021). A Figura 14 ilustra a forma como a informação é enviada de um dispositivo para o outro. O pino RX de um é diretamente conectado ao pino TX do outro equipamento.

Figura 14 Estrutura rx-tx

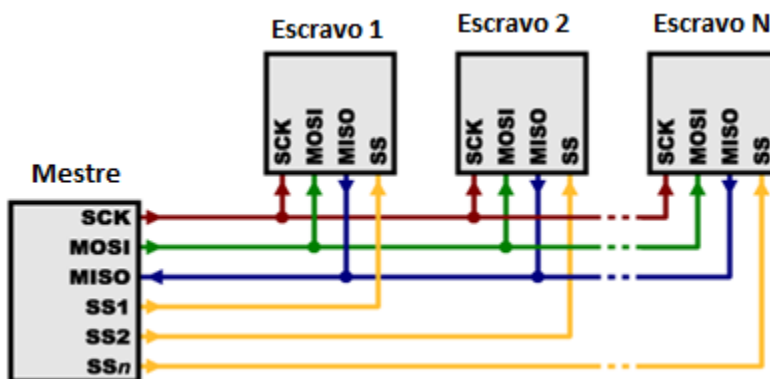


Fonte: (learn.sparkfun.com, 2023)

SPI: Neste protocolo, existe a participação de mais de um dispositivo, diferente do protocolo UART visto anteriormente, o princípio de funcionamento é definido através de um sinal de clock gerado pelo dispositivo mestre, no caso do presente trabalho, o microcontrolador PIC18F4550, após a geração deste sinal o dispositivo alvo é selecionado através do pino SS (Slave select), em seguida a comunicação é estabelecida e as informações fluem através do pino MOSI. (Robocore,2021).

A Figura 15 mostra como é realizada a construção de um sistema mestre-escravo:

Figura 15 Conexão SPI com dispositivos



Fonte: (learn.sparkfun.com, 2023)

A seguir, observamos a definição de cada cabo mostrado na Figura 15:

- SCK: sinal de clock gerado pelo mestre.
- MOSI: (*Saida mestre – Entrada escravo*) sinal enviado pelo mestre ao escravo.
- MISO (*Entrada mestre – Saída escravo*) sinal enviado pelo escravo ao mestre.
- SS: (*Seleção do escravo*) pino utilizado pelo mestre para selecionar o escravo que irá comunicar, em caso de mais de um dispositivo conectado ao mestre, para cada unidade adicionada, um pino digital do microcontrolador é requerido para que seja possível selecionar o escravo desejado. A Figura 17 ilustra o barramento SS1, SS2 e SSn, onde n é a quantidade de dispositivos adicionais.

O CI MAX6675 que será detalhado no tópico 2.5 deste documento, utiliza a comunicação SPI para envio de dados ao mestre (PIC18F4550).

2.4.5 Linguagens de programação

Linguagem de programação é uma série de palavras-chave organizadas e estruturadas de modo que instruem um computador na execução de determinadas atividades. (FTMS, 2019).

Estas linguagens são subdivididas em categorias, 1GL, 2GL e 3GL,

- 1 GL: Linguagem à nível de **máquina**, dificilmente entendida por humanos.

É o único nível que o computador consegue compreender e são constituídas por conjuntos de binários ou bits, enquanto o computador entende e traduz rapidamente um ser humano fica impossibilitado de compreender tendo em vista que só existem zeros e uns nos arquivos. (FTMS, 2019).

- 2 GL, também categorizada como linguagem de máquina, porém conhecida por **Assembly**.

Um programa escrito em assembly consiste numa lista de instruções que são traduzidas por um assembler e diretamente carregadas na memória do computador, esta linguagem usa palavras chaves e símbolos muito parecidos ao inglês, porém o problema que essa linguagem carrega é a necessidade do uso do assembler para fazer a conversão ao nível 1GL, para que o computador possa entender. (FTMS. 2019).

- 3GL conhecida como linguagens de **alto nível**.

Linguagens neste nível nos permitem escrever programas de computador utilizando palavras do cotidiano, como (imprimir, se, enquanto), programas escritos neste nível precisam de um compilador ou um interpretador para converter o código para linguagem de máquina. (FTMS, 2019)

2.4.5.1 Linguagem C

A linguagem C é uma estrutura de alto nível desenvolvida por Dennis Ritchie para a construção do sistema operacional UNIX nos laboratórios Bell em 1970.

Em 1978 foi lançada uma descrição pública sobre a linguagem junto de uma lista de vantagens:

- Facilidade de aprendizado.
- Linguagem estruturada.
- Programas eficientes.
- Consegue gerenciar atividades de baixo nível.
- Executa em várias plataformas.

Os programas para microcontroladores das famílias Microchip são desenvolvidos na linguagem C, para isso se fez necessário o uso desta linguagem de programação no projeto.

2.4.5.2 Linguagem C#

C# é uma linguagem de programação moderna orientada a objetos que permite o desenvolvimento seguro de aplicações dos mais diversos tipos. (Microsoft, 2023)

Códigos criados em C# são executados em .NET que é um sistema virtual chamado Common Language Runtime (CLR), ela garante que tudo irá funcionar perfeitamente na execução do código. (Microsoft, 2023).

Ao executar um código C#, o código Assembly é enviado ao CLR que por sua vez converte o código em lista de instruções de máquina, seguindo o processo descrito no tópico 2.4.5 deste trabalho.

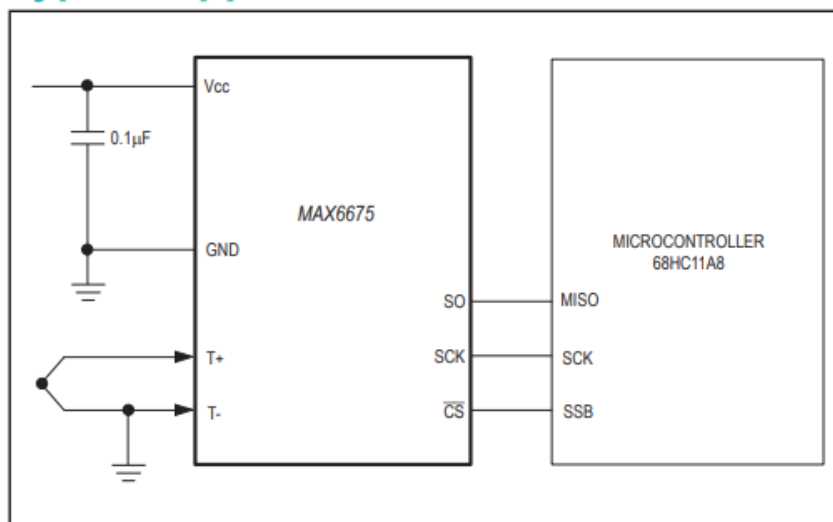
Neste trabalho a linguagem C# foi utilizada juntamente com uma aplicação Windows Forms para desenvolver a parte de tratamento dos dados enviados pelo microcontrolador através da interface serial e criação da interface gráfica.

2.5 Circuito integrado MAX6675

O CI MAX6675 é classificado com um conversor de termopar para digital onde utiliza um conversor analógico digital de 12 bits. Além disso faz a compensação e correção de junção fria através de um circuito interno de captação de temperatura e por fim disponibiliza os dados digitalizados via interface SPI.

Este componente foi fabricado para trabalhar em conjunto com um termopar do tipo K e um microcontrolador para fazer a aquisição dos dados.

Figura 16 Ligação do MAX6675 ao microcontrolador



Fonte: Datasheet

O processo de conversão de temperatura acontece internamente e antes de disponibilizar o valor encontrado, se faz necessária a compensação da junção fria.

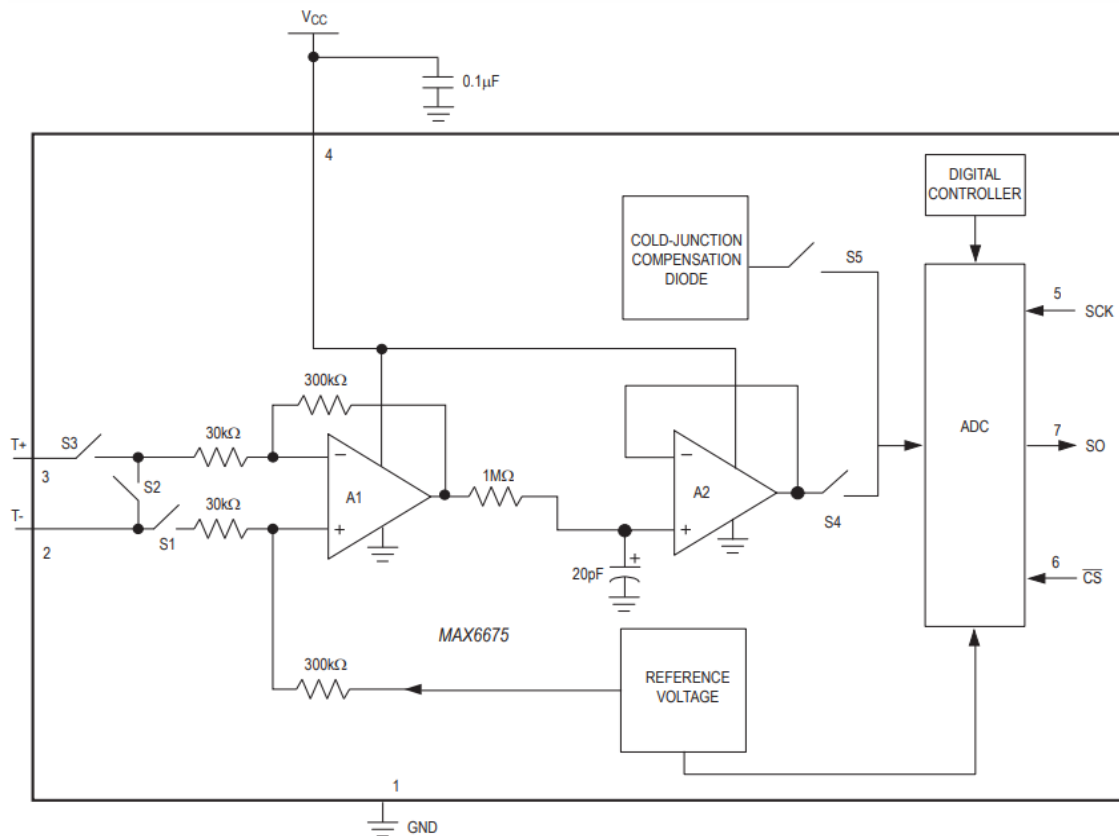
Para o termopar do tipo K a cada aumento $41\mu\text{V}$ considera-se o aumento de $1\text{ }^\circ\text{C}$ e a equação deste componente é representada pela fórmula linear:

$$V_{out} = (41\mu\text{V}) * (T_r - T_{Amb})$$

- **Tr** representa a temperatura da junção termopar.
- **TAmb** representa a temperatura ambiente.

Para realizar a aquisição da temperatura ambiente (TAmb) o circuito do MAX6675 utiliza um diodo sensível à temperatura. O diagrama de blocos da Figura 17 apresenta os componentes internos do CI MAX6675 e nele conseguimos observar os principais elementos deste circuito integrado.

Figura 17 Diagrama de blocos MAX6675



Fonte: Datasheet

Na Figura 17, observamos os principais componentes deste circuito eletrônico muito importante para o projeto, são eles:

- Amplificador diferencial.
- Diodo de compensação de junção fria.
- Conversor analógico-digital de 12 bits.

3. Metodologia

Nesta etapa detalhe-se a seleção dos componentes necessários, a montagem do circuito em simulação e todas as etapas referentes ao processo de montagem e calibração do equipamento.

3.1 Seleção dos componentes

Para a execução do trabalho os seguintes materiais e softwares foram utilizados:

- Termopares do tipo K com módulos MAX6675.
- PIC18F4550 na placa de desenvolvimento PIC EXPERT.
- Cabo conversor USB-Serial com o driver CH34x.
- Protoboard e cabos para conexão.
- Proteus, software para realizar a simulação do circuito eletrônico e validar a ideia proposta.
- MikroC, software para realizar a programação do microcontrolador.
- PicKit V2, software para realizar a gravação do firmware no microcontrolador.
- Visual Studio / .Net Framework, para criar a interface gráfica.

3.2 Proposta de circuito eletrônico

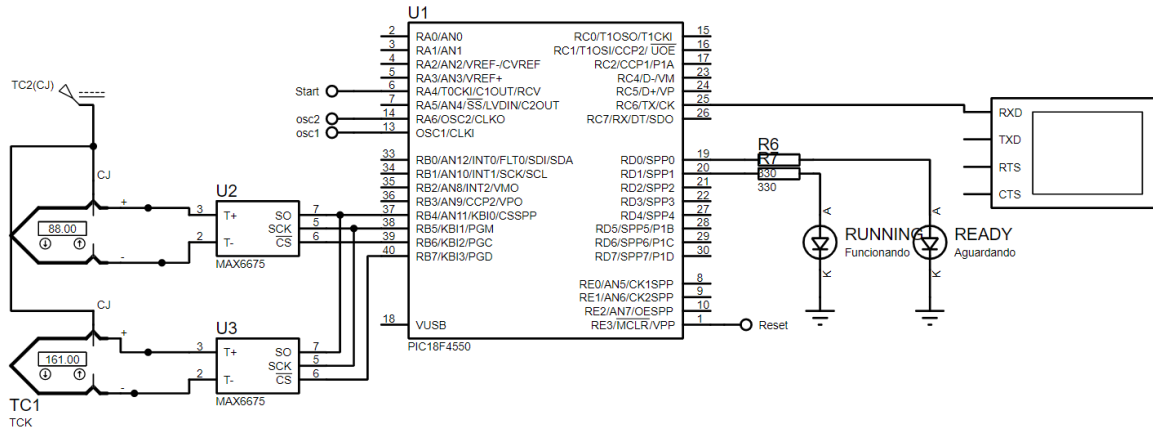
Nesta seção iremos discutir a parte de hardware do projeto, iniciando com uma plataforma de simulação para viabilizar a ideia e evitar gastos desnecessários com componentes que podem não ser utilizados. Por fim, após uma simulação operante partiremos para a montagem física do protótipo.

3.2.1 Simulação do projeto

O circuito proposto para esta solução foi simulado no software proteus a fim de comprovar a funcionalidade da ideia antes de dar seguimento aos testes práticos.

A Figura 18 representa a montagem da estrutura do circuito, composta pelo PIC18F4550 como microcontrolador base, CI MAX6675 como elemento responsável por traduzir as tensões medidas pelos termopares e enviar ao microcontrolador através do barramento SPI, leds para indicação de status e monitor serial para visualização dos dados das medições e informações enviadas nas portas seriais.

Figura 18 Simulação do projeto

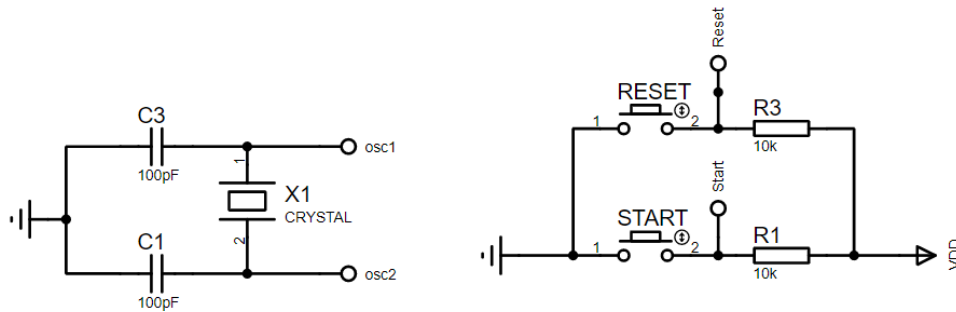


Fonte: Desenvolvido pelo Autor

- O barramento PORTB foi subdividido para a comunicação com o MAX6675.
- No barramento PORTA utilizou-se um pino para o botão de start/stop do circuito.
- No barramento PORTD dois pinos foram dedicados aos leds que representam circuito ligado e circuito em processo de medição.

Os circuitos complementares da Figura 19 são responsáveis pelo bloco oscilador do microcontrolador e pelos botões de start e reset do circuito:

Figura 19 Circuito oscilador e start



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

3.2.1.1 Validação da simulação

Após a montagem do circuito em simulação, iremos comprovar a funcionalidade do projeto eletrônico proposto, ele deve ser capaz de traduzir as temperaturas dos termopares e enviá-las através do protocolo UART.

A primeira parte da avaliação da simulação propõe analisar o sinal enviado pelo CI MAX6675 na interface SPI do microcontrolador, para isso a ferramenta osciloscópio foi utilizada. Para esta aplicação, 3 canais são necessários, um para avaliar o comportamento do pino SS, que deve estar em estado lógico baixo, outro canal para o sinal de clock, e um último para o sinal SO (saída do escravo).

De acordo com o datasheet do fabricante, o CI MAX6675 envia os dados da seguinte maneira:

Figura 20 Formato de dado enviado pelo MAX6675

BIT	DUMMY SIGN BIT	12-BIT TEMPERATURE READING											THERMOCOUPLE INPUT	DEVICE ID	STATE	
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0	MSB											LSB		0	Three-state

Fonte: Datasheet

Podemos observar que o valor de interesse está entre os bits 3 e 14, na Figura 21 observamos o resultado obtido com o osciloscópio:

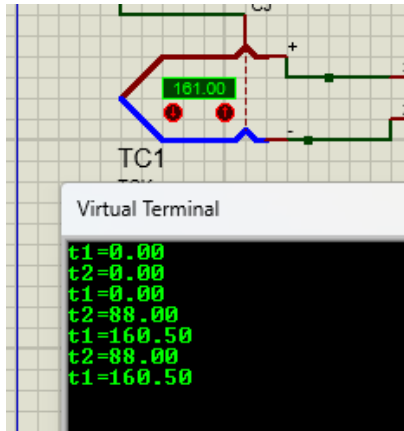
Figura 21 Sinal enviado no barramento SPI do CI MAX6675



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Após convertermos o binário 001010000010 para decimal, obtemos o valor 642, porém a resolução do conversor é de 0,25°C, portanto multiplica-se 642 por 0.25 para obtermos a temperatura final de 160,50°C, que é vista na interface serial da simulação:

Figura 22 Comprovação do sinal enviado

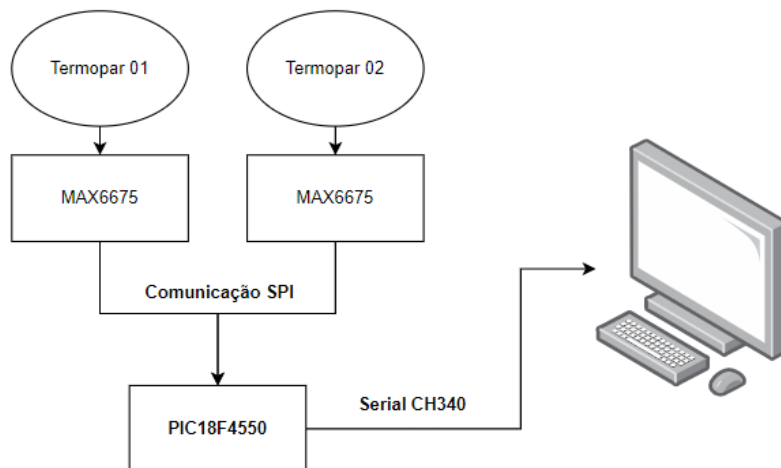


Fonte: Desenvolvido pelo Autor

3.2.2 Montagem do hardware

Confirmado o funcionamento do circuito em simulação, o próximo passo foi a aquisição dos componentes e montagem do protótipo para testes iniciais de hardware. No fluxograma da Figura 23, a estrutura do hardware que compõe o sistema é descrita de maneira abrangente.

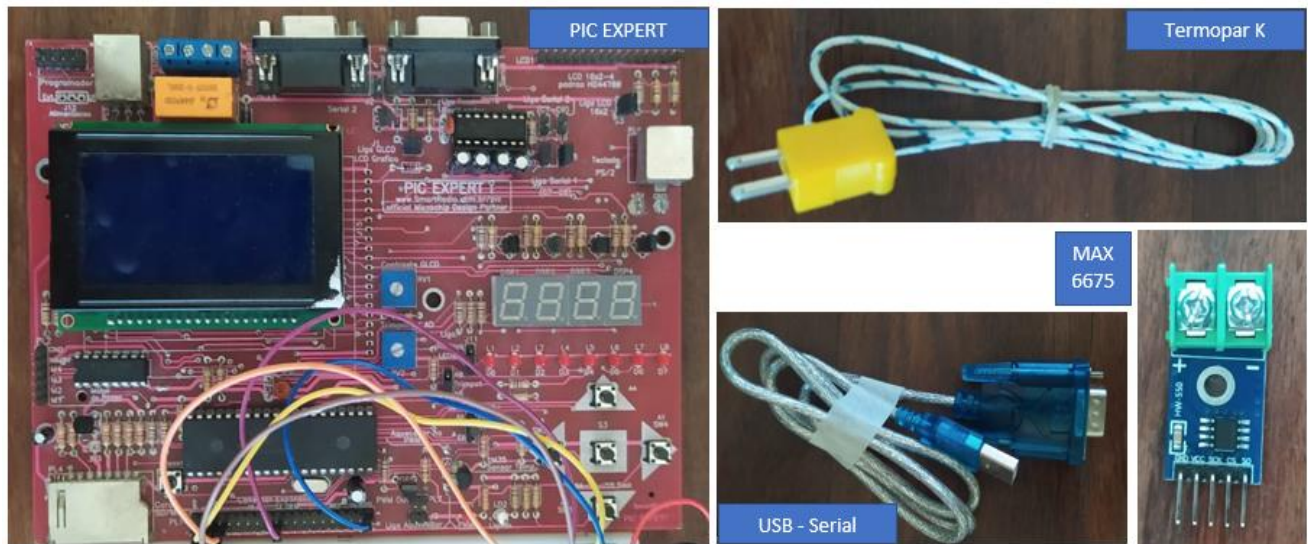
Figura 23 Diagrama em blocos do projeto



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

A primeira etapa de montagem consiste em fazer a conexão dos termopares aos conversores MAX6675, em sequência, realizar a conexão dos pinos SPI do CI aos pinos do microcontrolador PIC18F4550 que está embarcado na placa de desenvolvimento PIC EXPERT e por fim coletar os dados do pino TX fazendo a utilização da porta Serial 1 disponível no KIT. Na Figura 24 todos os materiais utilizados para a montagem do protótipo foram listados:

Figura 24 Materiais utilizados no protótipo



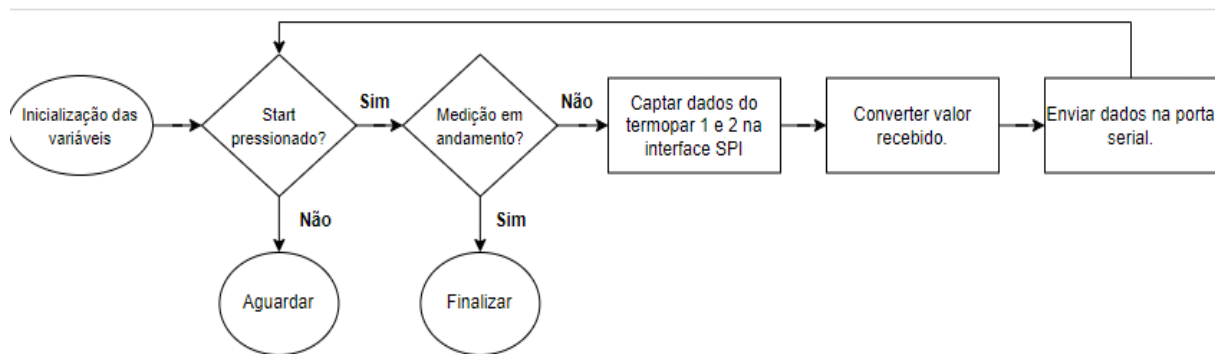
Fonte: Desenvolvido pelo Autor

3.3 Programação do microcontrolador

Para possibilitar a aquisição dos dados nos pinos SPI do microcontrolador, realizar o tratamento e envio na interface UART, a linguagem de programação utilizada para programar o PIC18F4550 foi a linguagem C, e as principais bibliotecas utilizadas foram a **soft_spi** e a **uart**.

3.3.1 Fluxograma do firmware

Figura 25 Fluxograma do firmware



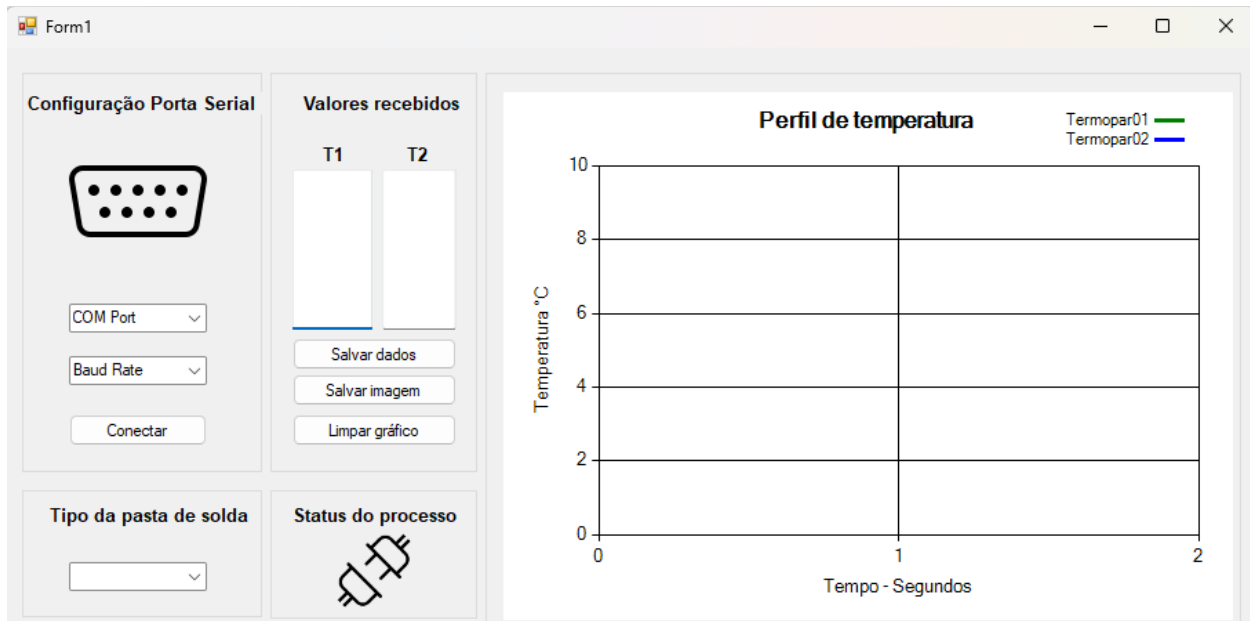
Fonte: Desenvolvido pelo Autor

O firmware gravado no microcontrolador segue o fluxo da Figura 25, onde se inicia o monitoramento do pino referente ao botão de start do circuito, enquanto o botão start estiver desabilitado o programa irá aguardar. A partir do momento que o botão foi pressionado a pergunta “*medição em andamento?*” é realizada, pois neste caso optou-se por usar um mesmo botão para realizar o processo de ligar e desligar o circuito. Com essa abordagem conseguimos economizar 1 botão, 1 resistor e 1 pino digital do microcontrolador. Se a medição não estiver em andamento os dados que o MAX6675 está enviando são coletados, convertidos pela função de correção da temperatura e enviados no pino TX do microcontrolador. Se a medição estiver em andamento ela finaliza o envio dos dados na porta serial e fica aguardando o evento de start do circuito.

3.4 Interface de usuário

Um dos objetivos deste trabalho é a criação de uma interface de usuário para facilitar a visualização dos dados pelo operador, portanto, após a validação inicial do hardware, o trabalho propõe a construção de um gráfico de linhas para facilitar a visualização do comportamento da temperatura e tempo. Na Figura 26 o painel da interface desenvolvida é mostrado:

Figura 26 Interface gráfica



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Além de proporcionar uma boa experiência ao usuário com um painel simples, a interface disponibiliza as seguintes funcionalidades:

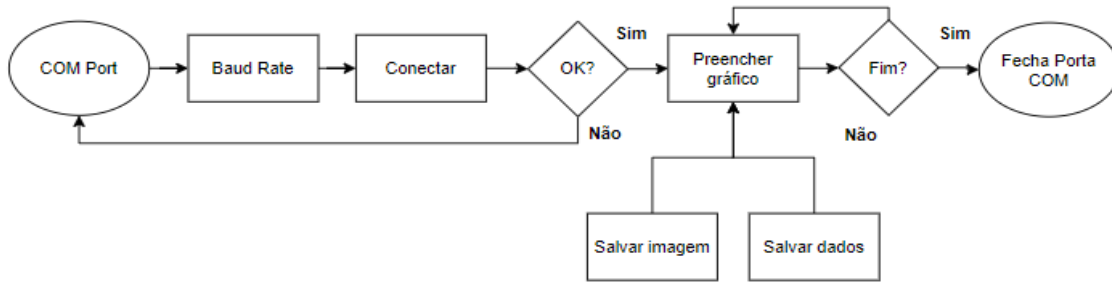
- Seleção da porta de comunicação (COM) e velocidade de comunicação (Baud Rate).
- Seleção do tipo de pasta de solda utilizada no processo.
- Visualização dos dados brutos recebidos.
- Visualização em tempo real do gráfico de perfil.
- Limpar os dados da tela para uma nova medição.

Visando melhorar a experiência do usuário, as seguintes funções foram disponibilizadas ao clique de um botão:

- Exportar todos os pontos do gráfico em um arquivo do formato CSV para análises posteriores.
- Exportar uma imagem em formato png do gráfico em tempo real.

3.4.1 Fluxograma de funcionamento da interface gráfica

Figura 27 Fluxograma da interface gráfica



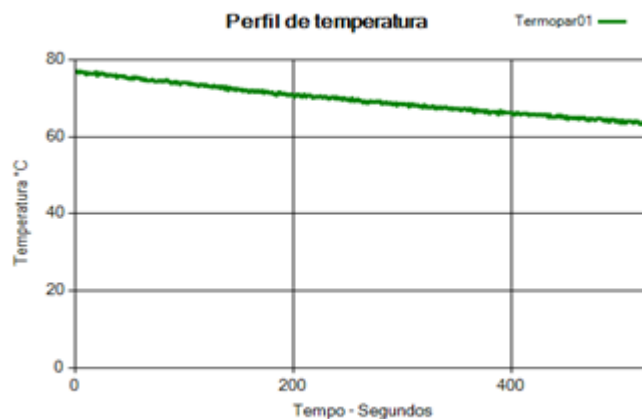
Fonte: Desenvolvido pelo Autor

O fluxograma da Figura 27 descreve as funcionalidades da interface gráfica de acordo com as características listadas anteriormente.

O início se dá com a seleção da porta COM onde o dispositivo medidor foi conectado, após isso seleciona-se o Baud Rate aplicado ao projeto, que neste caso é 9600 bps. Ao clicar em conectar, o sistema valida se a porta COM existe, se não existir retorna um erro ao usuário, caso contrário inicia a comunicação com o circuito medidor.

Iniciada a comunicação serial com o dispositivo medidor o sistema aguarda a chegada de dados e ao recebê-los inicia o preenchimento do gráfico conforme demonstra a Figura 28, neste exemplo capturamos o processo de resfriamento de um Becker com água.

Figura 28 Teste da interface gráfica



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

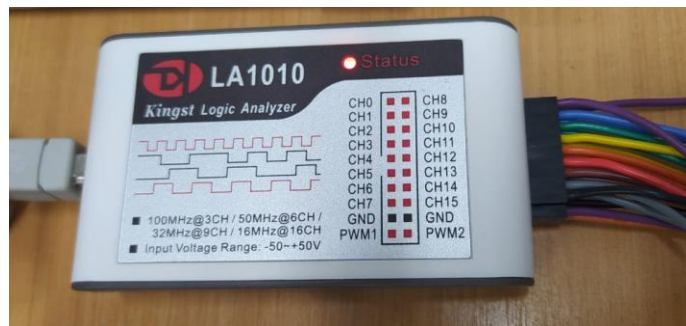
3.5 Testes do hardware

Concluída a montagem do hardware, programação do microcontrolador e o desenvolvimento de uma interface gráfica, o circuito foi configurado para uma sessão de testes com os seguintes objetivos:

- Obter o sinal SPI enviado pelo CI MAX6675.
- Validar se o microcontrolador está realizando a conversão e disponibilizando o dado na interface serial conforme o esperado.

Para viabilizar o teste da captura do sinal SPI o analisador lógico LA1010 foi utilizado. Este equipamento conta com software capaz de criar gráficos com os valores medidos em cada canal.

Figura 29 Analisador lógico LA1010

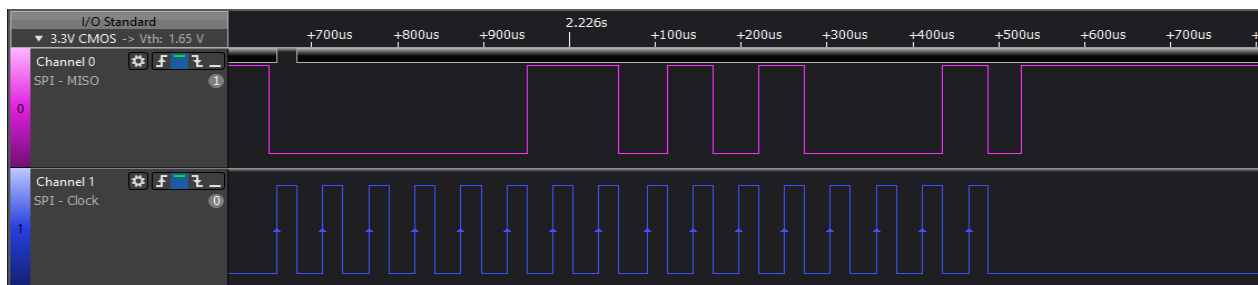


Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Esta etapa foi realizada em temperatura ambiente e os canais CH0 e CH1 do analisador foram conectados aos pinos SDO e SCK do MAX6675, respectivamente.

O resultado da Figura 30 foi obtido na interface do software:

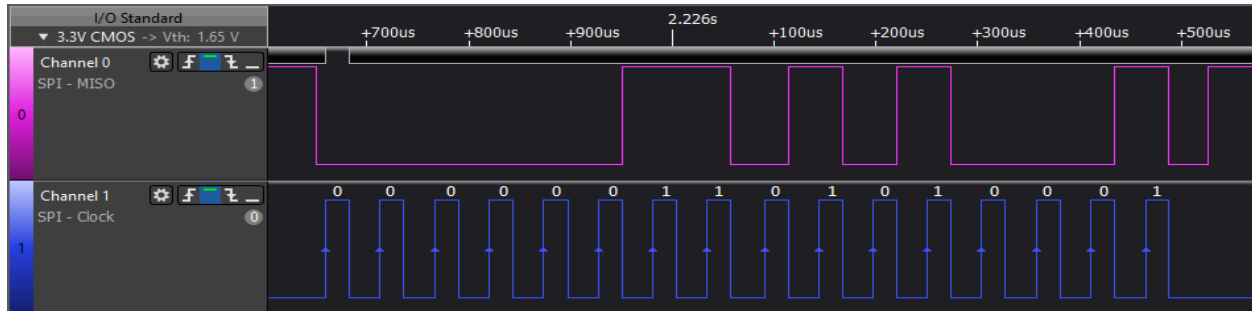
Figura 30 Sinal SPI capturado com analisador lógico



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Para converter o sinal apresentado na Figura 30 para um valor de fácil leitura para seres humanos, os mesmos passos do tópico 3.2.1.1 deste trabalho foram executados:

Figura 31 Análise dos bits do sinal SPI



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Na figura 32, o sinal de 16 bits enviado pelo CI é compreendido pelo número binário: 000001101010001, de acordo com o datasheet os bits de 3 a 14 correspondem ao valor de temperatura, portanto o valor de interesse é 00001101010, 12 bits, conforme indica o datasheet do MAX6675, com estes 12 bits a resolução é de 0,25°C.

00001101010 representa 106 em decimal, que multiplicado pela resolução de 0,25°C nos indica uma temperatura ambiente de 26,50°C.

Para confirmar que o microcontrolador está recebendo o sinal, fazendo a conversão e enviando na porta Serial1, durante o teste com o analisador lógico, a interface gráfica do protótipo também estava capturando os dados gerando o resultado da Figura 32:

Figura 32 Resultados da conversão SPI

Valores recebidos	
T1	T2
26.37	
26.37	
26.37	
26.37	
26.37	
26.37	
26.12	

Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Com base nos testes anteriores, podemos confirmar que o protótipo atende aos objetivos do trabalho de desenvolver um equipamento de baixo custo capaz de capturar a temperatura com termopares tipo K e disponibilizá-la ao usuário em uma interface gráfica de fácil utilização.

Um dos fatores destacados nos objetivos era a necessidade de confiabilidade nas medições, que até este ponto do desenvolvimento não foi confirmada, portanto o tópico a seguir irá tratar da calibração do equipamento e análise da sua confiabilidade para atuar como traçador de perfil para máquinas de reparo de placas de circuito eletrônico.

3.6 Calibração do circuito

Todo equipamento utilizado em processo de medição na qual a variável controlada é crítica, se faz necessária a calibração e rastreabilidade do medidor para verificar se ele entrega e continua entregando os valores esperados com exatidão. (Omega, 2015).

Sondas termopares que trabalham sob alta temperatura podem perder suas propriedades e parar de entregar os valores esperados com o tempo e podem ser danificadas durante o processo produtivo (Omega, 2015).

De acordo com (Omega, 2015), a forma mais simples de calibrar um sensor para esta finalidade é verificando como ele mede a temperatura da água em ebulição e o ponto em que o gelo derrete, porém, estes métodos não são rastreáveis e isso causa um problema quando se trata de confiabilidade das medições.

As formas que (ômega. 2015) propõe para solucionar este problema é realizar os testes utilizando uma combinação de dois dispositivos dedicados à calibração de sensores de temperatura que são exibidos na Figura 33:

Figura 33 Calibrador CL900A, mostrado com HH-21A, medidor portátil e sonda termopar de cabo



Fonte (ômega, 2015)

Este equipamento aquece a junta do termopar até a temperatura configurada, possibilitando a visualização do resultado no display do medidor. Para realizar a calibração de equipamentos de medição, a tensão gerada pelo termopar pode ser simulada por um dispositivo confiável a fim de analisar o comportamento do circuito eletrônico (ômega, 2015).

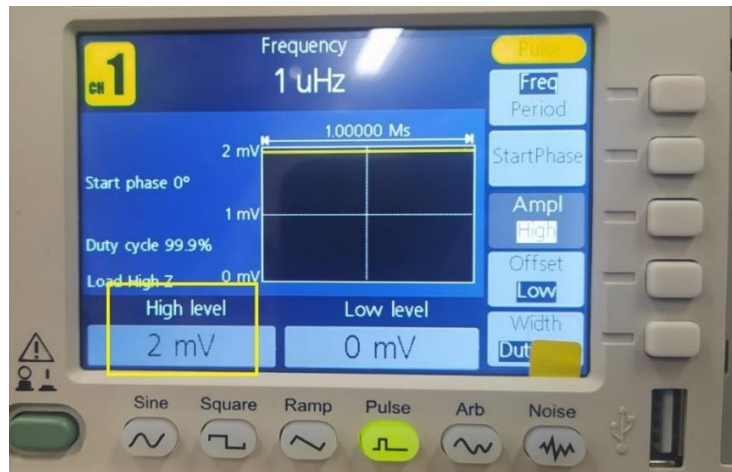
3.6.1 Calibração com gerador de tensão de referência

Os laboratórios do IFMG campus Betim não contam com dispositivos de calibração de termopares para serem utilizados na construção do protótipo deste trabalho, portanto, selecionamos a segunda abordagem proposta no tópico 3.6 que é a avaliação do circuito com base em um dispositivo confiável.

Utilizamos um gerador de função TEKTRONIX/AFG1022 configurado para fornecer uma tensão contínua de 2 milivolts esperando um resultado de aproximadamente 50°C, que pode ser consultado na tabela do termopar tipo K.

Na Figura 34, o gerador de função se encontra devidamente configurado:

Figura 34 Gerador de função



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Após esta configuração o circuito de medição foi inicializado e a temperatura de 64,28 °C foi registrada, porém o esperado era aproximadamente 50°C, representando um erro de 14,28°C na medição.

Foi verificado o datasheet do gerador de função TEKTRONIX/AFG1022 confirmando que a exatidão do valor configurado oscila numa faixa de +-1% da configuração de tensão com +1milivolt de tolerância adicional, conforme demonstra a Figura 35:

Figura 35 Acuracidade do gerador de função

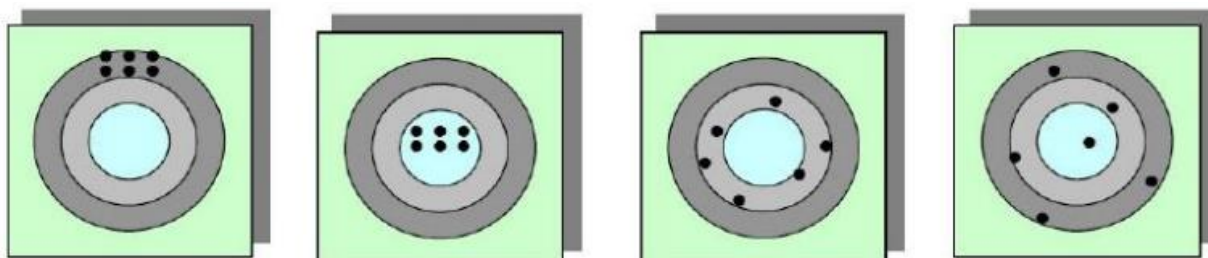
Range (Open circuit or high Z load)	
≤25 MHz	2 mV _{p-p} to 20 V _{p-p}
>25 MHz	-
Accuracy	±(1% of setting +1 mV _{p-p}), (1 kHz sine waveform, 0 V offset)

Fonte: Datasheet

Considerando que 40 microvolts representam 1°C de variação no termopar pode-se concluir que o gerador de função não é o equipamento ideal para calibrarmos o protótipo com foco em exatidão das medidas.

A Figura 36 nos ajuda a compreender a diferença entre exatidão e precisão:

Figura 36 Precisão e exatidão



Fonte: De Sá, Helbert,2018

Iniciando da esquerda para a direita, observamos um exemplo de alta precisão, porém baixíssima exatidão, pois os pontos não atingem o alvo, mas são altamente precisos. A segunda imagem representa a condição ideal de um instrumento de medição, que é alta precisão e alta exatidão, enquanto as últimas duas imagens representam alta exatidão com baixa precisão e baixa exatidão e baixa precisão, respectivamente.

Após concluirmos que o gerador de função não pode ser utilizado com padrão para a calibração da exatidão do protótipo, fizemos a tentativa de análise na precisão das medidas, desta forma conseguimos garantir a eficiência do protótipo para este importante conceito na análise de um dispositivo medidor.

3.6.2 Análise da calibração com gerador de tensão de referência

Nesta etapa, trabalhamos na aquisição de amostras de temperatura com intervalo de 1 segundo entre cada medida para viabilizar a análise da média, variância e desvio padrão com o objetivo de determinar se o protótipo apresenta boa precisão.

Para calcular todos os elementos da tabela, foram utilizadas fórmulas estatísticas com apoio da ferramenta Excel. Para calcular a média, utiliza-se $AVERAGE(amostras)$, para variância, $=VAR.S(amostras)$, para desvio médio, $=AVEDEV(amostras)$, para desvio padrão, $=STDEV.S(amostras)$, para faixa de erro, $= (Valor\ máximo - Valor\ médio)$, para faixa de erro médio, $= ((faixa\ de\ erro + (Valor\ médio - Valor\ mínimo)) / 2)$.

Para cada 1 milivolt alterado no gerador de função, uma série de amostras foram coletadas e os indicadores das medições agrupados na Tabela 7:

Tabela 7 Resultados da calibração com gerador de função

Referência de tensão	Amostras	Média(°C)	Desvio médio(°C)	Desvio padrão(°C)	Variância(°C)	Faixa de erro(°C)	Faixa de erro Média(°C)
2mV	136	63.84	0.40	0.49	0.24	1.20	1.26
3mV	90	77.00	0.39	0.49	0.24	2.51	1.68
4mV	66	116.45	0.34	0.43	0.19	2.26	1.54
5mV	82	130.01	0.39	0.50	0.25	2.51	1.79
6mV	124	163.39	0.60	0.75	0.57	4.02	2.80
7mV	99	176.39	0.39	0.46	0.21	2.26	1.57
8mV	90	215.97	0.35	0.46	0.21	2.01	1.50
9mV	100	229.15	0.40	0.51	0.26	2.77	1.94
10mV	96	263.02	0.41	0.50	0.25	2.77	2.09
11mV	98	275.48	0.34	0.44	0.19	2.01	1.50

Fonte: Desenvolvido pelo Autor

As fórmulas utilizadas foram:

- média = $(\sum x) / n$
- desvio médio = $(\sum |x_i - \text{média}|) / n$
- desvio padrão = $\sqrt{(\sum (x_i - \text{média})^2) / n}$
- variância = $\sum (x_i - \text{média})^2 / n$
- Faixa de erro = $V_{\text{máximo}} - V_{\text{média}}$
- Faixa de erro média = $(\text{Faixa de erro} + (V_{\text{média}} - V_{\text{mínimo}})) / 2$

Com base nos dados coletados na tabela 7, podemos concluir a respeito da precisão do equipamento:

- Desvio médio menor que 0,6°C.
- Desvio padrão menor que 0,75°C.
- Variância menor que 0,6°C.
- Faixa de erro média menor que 2°C.

Para fins de validação dos valores obtidos neste teste, o datasheet do CI MAX6675 foi consultado em busca das faixas de erros de medição, nele encontramos uma faixa de erro de +- 8 bits LSB conforme indica a Figura 37. Neste protótipo trabalha-se com a faixa de 0°C a 700°C com o CI MAX6675 em temperatura ambiente.

Figura 37 Faixa de erro MAX6675

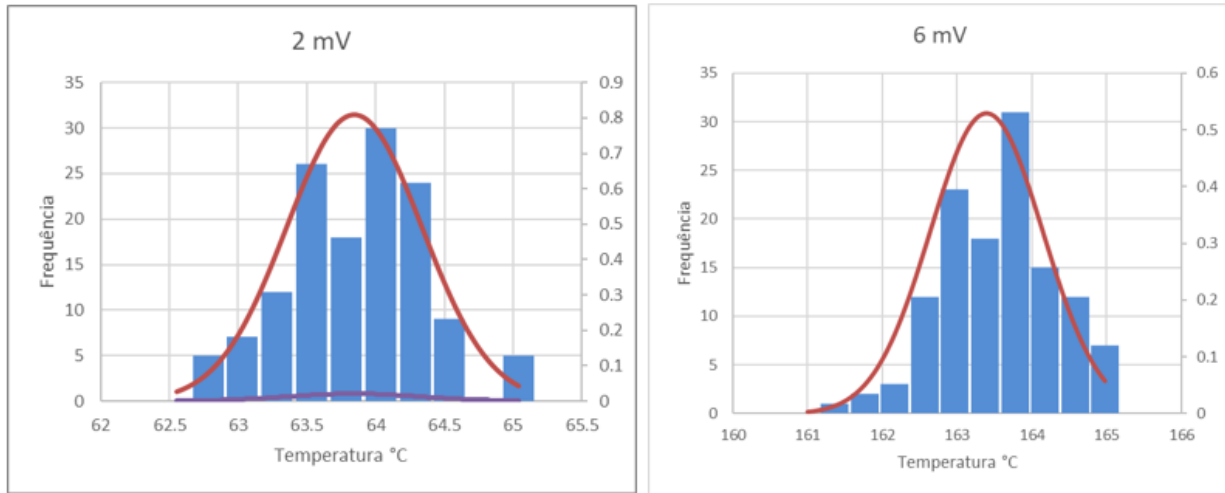
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Temperature Error		T _{THERMOCOUPLE} = +700°C, T _A = +25°C (Note 2)	V _{CC} = +3.3V	-5		+5	LSB
			V _{CC} = +5V	-6		+6	
		T _{THERMOCOUPLE} = 0°C to +700°C, T _A = +25°C (Note 2)	V _{CC} = +3.3V	-8		+8	
			V _{CC} = +5V	-9		+9	
		T _{THERMOCOUPLE} = +700°C to +1000°C, T _A = +25°C (Note 2)	V _{CC} = +3.3V	-17		+17	
			V _{CC} = +5V	-19		+19	

Fonte: Datasheet

Um erro de +- 8 LSB, considerando resolução de 0,25°C, acarreta +-2 °C de erro na medição, o que faz sentido quando se observa a coluna faixa de erro e faixa de erro média da tabela 7.

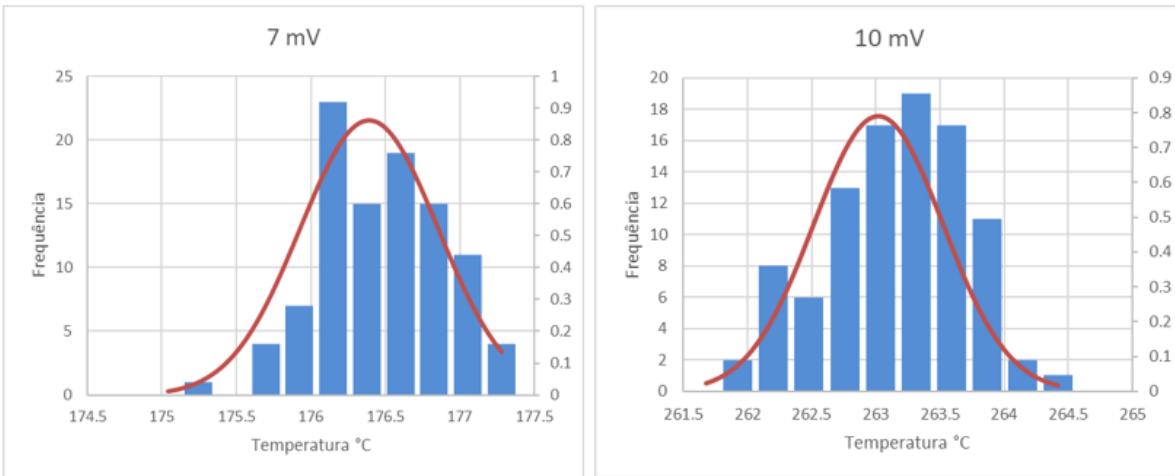
Algumas medidas da tabela 7 foram representadas com histogramas para ilustrar o comportamento dos dados em gráfico, Figuras 38 e 39.

Figura 38 Histograma para os testes com 2mV e 6mV



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Figura 39 Histograma para os testes com 7mV e 10mV



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Conseguimos comprovar que o CI MAX6675 se comporta conforme a descrição do datasheet quando analisado as tolerâncias para as medidas.

3.6.3 Calibração com termômetro de mercúrio

Diante da falta de equipamentos específicos para calibração de termopares e após concluir que o gerador de função não é o equipamento ideal para executar a calibração, pois sua tolerância não é aceitável para o objetivo do protótipo, iremos realizar os testes a seguir com um termômetro de mercúrio do laboratório de química do IFMG.

O termômetro é da fabricante Incoterm, empresa especializada na venda e calibração de instrumentos de medição, portanto, para a situação atual é considerado um bom equipamento para teste.

3.6.3.1 Montagem da estrutura

Para iniciar o experimento com o termômetro, uma estrutura foi montada com os seguintes materiais:

- Termômetro incoterm.
- Becker.
- Aquecedor.

- Suporte de termômetro.
- Protótipo deste trabalho.

A montagem do experimento pode ser observada na Figura 40:

Figura 40 Experimento com termômetro de mercúrio



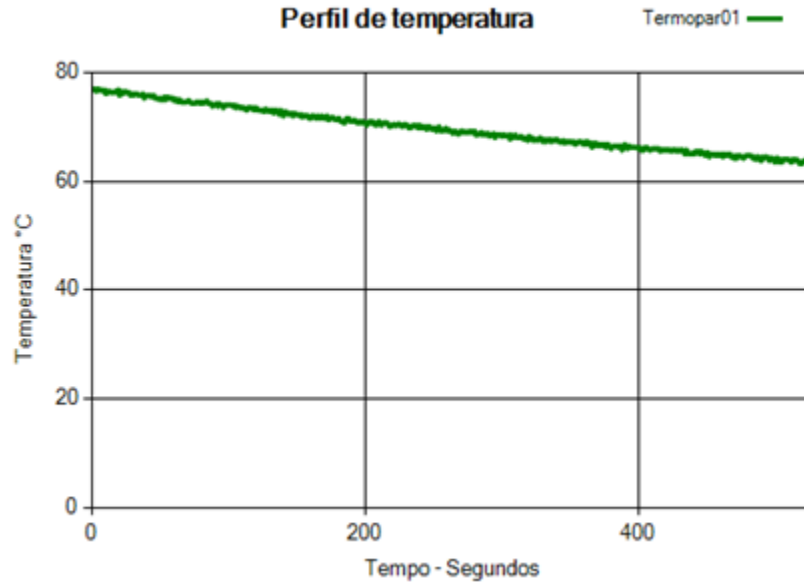
Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Feito esta etapa, esquentou-se o Becker com água até 77°C e o processo de resfriamento foi acompanhando de duas formas:

- Câmera de celular filmando o comportamento do termômetro de mercúrio.
- Protótipo registrando as temperaturas capturadas pelo termopar.

Após 10 minutos de registros, a interface gráfica forneceu o seguinte resultado:

Figura 41 Resultado na interface gráfica



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Para uma maior riqueza de informações, a opção “salvar dados” presente na interface nos disponibilizou um arquivo no formato CSV com todos os pontos do gráfico. Com estes dados em mãos, o vídeo foi repassado para cada ponto do arquivo e a temperatura equivalente no termômetro foi anotada para comparação, conforme a Tabela 8:

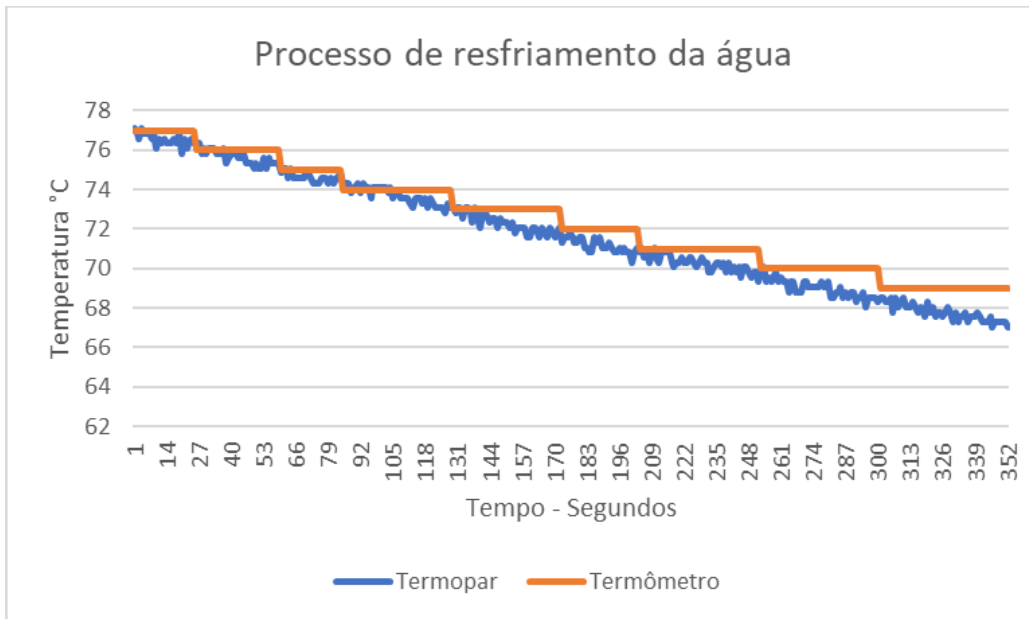
Tabela 8 Amostras no teste com termômetro de mercúrio

Tempo (s)	Termopar (°C)	Termômetro (°C)
1	77.09	77
2	76.84	77
3	76.59	77
4	77.09	77
5	76.84	77

Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Observamos as medições do termopar com valores decimais devido à resolução de 0,25°C do conversor e as medições do termômetro com 1°C de resolução devido às especificações da escala do equipamento. Esta variação fica clara quando analisamos o gráfico da Figura 42:

Figura 42 Comportamento do circuito no resfriamento da água



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

A curva do termômetro se comporta como um degrau, enquanto curva do termopar apresenta maior linearidade devido à resolução do conversor anteriormente dita, além disso, não foram registrados valores atípicos durante todo o processo de medição, chamados também de outliers. Para determinarmos a qualidade das medições do equipamento tendo como referência o termômetro, iremos refazer os procedimentos e a tabela do tópico 3.6.2.

Tabela 9 Resultados da calibração com termômetro de mercúrio

Referência	Amostras (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Variância (°C)	Faixa de erro (°C)	Faixa de erro Média (°C)
77.00	25.00	76.55	0.31	0.10	0.54	0.90
76.00	34.00	75.64	0.37	0.13	0.70	0.98
75.00	25.00	74.63	0.23	0.05	0.45	0.60
74.00	20.00	74.08	0.20	0.04	0.25	0.51
73.00	25.00	72.61	0.34	0.12	0.46	0.73
72.00	14.00	71.35	0.31	0.10	0.47	0.74
71.00	26.00	70.54	0.28	0.08	0.52	0.76
70.00	14.00	69.45	0.31	0.09	0.61	0.93
69.00	24.00	68.11	0.31	0.10	0.44	0.72

Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Com base nos resultados da Tabela 9, observamos uma faixa de erro média de aproximadamente 0,76°C além de valores baixos de variância o que indica que grande parte das medidas não se distanciam muito da média.

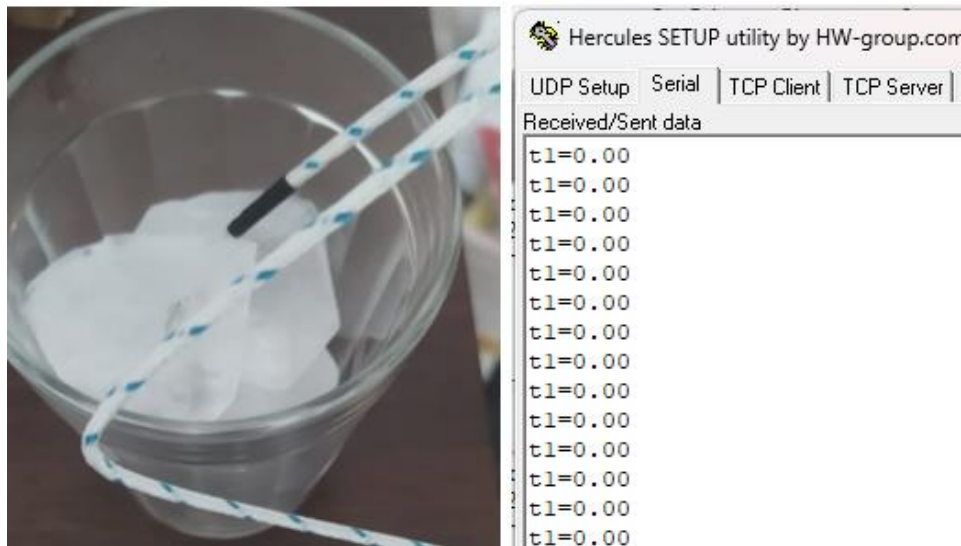
3.6.4 Testes com gelo e água em ebulição

Para fins de confirmação de confiabilidade do equipamento levando em consideração que o processo de calibração não foi realizado com os dispositivos próprios para tal, faremos o teste do sistema com gelo e água em ebulição, embora não seja um método rastreável, ele é mencionado no documento de calibração de termopares da empresa ômega.

3.6.4.1 Teste com gelo

Para este teste o termopar foi colocado em contato com gelo e o circuito foi ligado para rastrear a temperatura medida, que, de acordo com a física, será 0°C.

Figura 43 Experimento com gelo



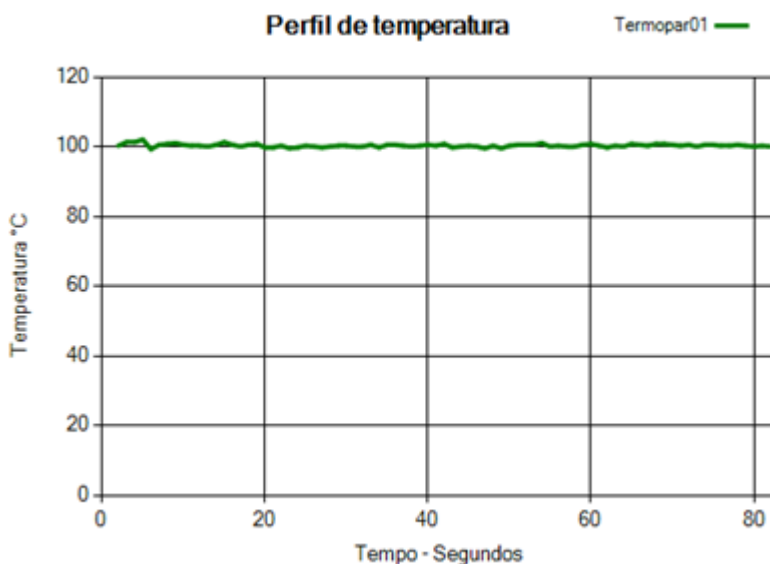
Fonte: Desenvolvido pelo Autor

A Figura 43 demonstra o experimento e no lado direito o monitor serial apresenta a temperatura de 0°C medida conforme o esperado, neste teste, todas as medições resultaram no mesmo valor.

3.6.4.2 Testes com água em ebulição

A água é uma substância que atinge o ponto de ebulição aos 100°C ao nível do mar (educamaisbrasil, 2023), portanto este teste propõe a medição da temperatura da água em ebulição como forma de comprovar a exatidão e precisão das medidas realizadas pelo equipamento medidor. Com a água fervendo, o termopar foi inserido no meio e o circuito começou a captar os dados por aproximadamente 1 minuto e meio, ao fim deste teste a interface do projeto nos forneceu o seguinte gráfico:

Figura 44 Resultado na interface com água em ebulição



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Com base no gráfico da Figura 44, fica perceptível que o equipamento medidor capturou temperaturas na casa dos 100°C, porém será necessária uma análise estatística para entendermos o comportamento dos dados. Com base nas amostras coletadas, obtivemos os seguintes resultados:

Tabela 10 Calibração com água em ebulição

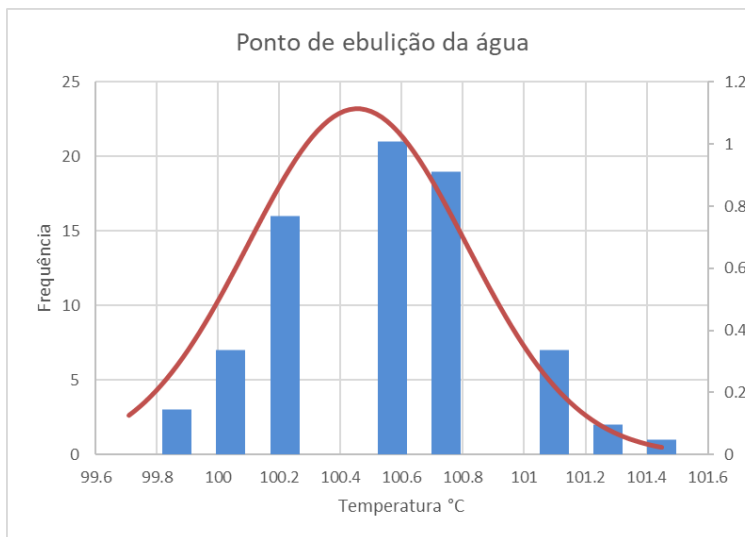
Amostras	Média	Desvio Padrão	Variância	Faixa de erro	Faixa de erro Média
76.00	100.45	0.36	0.13	1.00	1.38

Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Os dados da Tabela 10 indicam que as amostras variam pouco em relação à média e que existe uma faixa de erro média de 1,38°C, valendo ressaltar que a altura em relação ao nível do mar em Betim não resultará em exatos 100°C, porém ajuda a

visualizar a repetibilidade do sistema. Para melhorar a visualização dos dados estatísticos o histograma da Figura 45 foi criado, nele podemos observar a frequência dos valores obtidos durante o processo de medição da temperatura.

Figura 45 Histograma dos dados de calibração com água em ebulição



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

4 Resultados e discussões

Neste capítulo iremos discutir os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto após as etapas de teste e calibração. Durante os testes com gerador de tensão contínua, termômetro de mercúrio e experimentos com gelo e água em ebulição, foi possível observar que em todas as etapas os dados analisados apresentaram desvio padrão abaixo de $0,5^{\circ}\text{C}$, variância abaixo de $0,3^{\circ}\text{C}$ e isso nos indica que o sistema é capaz de fornecer valores com precisão e confiabilidade, resultados que estão alinhados aos objetivos específicos do trabalho. A exatidão do sistema ficou limitada nas faixas de operação do CI MAX6675, visto que o erro especificado no datasheet é de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Este erro foi comprovado durante as três etapas de calibração do equipamento.

O custo de produção de uma unidade deste protótipo gira em torno de 270 reais, enquanto os equipamentos comerciais apresentam preços superiores a 20000 reais, ou seja, com um investimento 60 vezes menor o microempreendedor consegue obter um equipamento traçador de perfil de temperatura para implementar este controle essencial

em seus processos de reparo de componentes e assegurar ao cliente uma maior vida útil dos produtos após manutenção. A tabela 11 detalha a lista de materiais utilizados para a construção do protótipo:

Tabela 11 - Lista de materiais

Item	Preço R\$	Fornecedor
Placa de desenvolvimento PIC	197.72	AliExpress
MÓDULO LEITOR TEMPERATURA MAX6675 COM TERMOPAR TIPO K	54	Piscaled
CABO CONVERSOR USB 2.0 SERIAL RS232 DB9 MACHO	16.5	Piscaled
Total	268.22	

Fonte: Desenvolvido pelo Autor

A interface gráfica desenvolvida com *c#* é simples e objetiva e permite ao usuário visualizar os principais eventos do processo de soldagem e controlar os resultados ao fim do teste. É fornecido o download do arquivo de pontos no formato CSV e download da imagem do gráfico no formato PNG para análises futuras.

5 Conclusões

O protótipo desenvolvido neste trabalho se mostra com alto potencial para ser aplicado em processos de reparo de microempresas, pois ele apresenta um erro máximo aceitável de aproximadamente $\pm 2^{\circ}\text{C}$ tornando-o competitivo tendo em vista que equipamentos de mercado apresentam erros de $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$. Além disso ele cumpre com os objetivos propostos que eram de oferecer um equipamento de baixo custo capaz de traçar o perfil de temperatura do processo de soldagem dos componentes na PCI com confiabilidade. A tabela 12 lista os principais equipamentos do mercado e suas especificações:

Tabela 12 Acuracidade

Fornecedor	Acuracidade
KIC EXPLORER	$\pm 1,2^{\circ}\text{C}$
SUPER M.O.L.E	$\pm 1^{\circ}\text{C}$

SOLDER STAR	+ - 0,5°C
-------------	-----------

Fonte: Desenvolvido pelo Autor

É possível observar que os equipamentos de elevado custo no mercado trabalham com faixas de erro próximas do dispositivo de baixo custo desenvolvido neste trabalho. Apesar dos testes de calibração realizados no equipamento não possuírem rastreabilidade devido à falta de dispositivos específicos para calibração no laboratório do IFMG, podemos dizer que obtivemos resultados positivos na construção desta ideia.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros recomenda-se fazer uma aproximação linear nas amostras capturadas no processo de medição e incorporar a equação obtida no firmware do microcontrolador, desta forma será possível aproximar ainda mais os valores enviados pelo circuito.

Este circuito captura o dado a cada 1 segundo, recomenda-se, com base na análise dos valores médios obtidos durante os testes realizar a captura de mais de 1 valor por segundo para entregar ao usuário um valor corrigido com base na aproximação linear sugerida.

Por fim, é importante submeter o circuito a testes de calibração em um laboratório apropriado para este tipo de objetivo, pois durante todo o desenvolvimento o CI MAX6675 mostrou que os dados enviados eram coerentes aos referenciados no datasheet, com isso as correções via software poderiam ser aplicadas com uma segurança maior.

REFERÊNCIAS

SPI - Mundo Projetado. Disponível em:<<https://mundoprojetado.com.br/spi/>>. Acesso em: 1 maio. 2022.

Angeles: IPC, 2011. p. 1-11. Disponível em: <https://www.ipc.org/ContentPage.aspx?Pageid=Best-Practices-Reflow-Profiling-for-Lead-Free-SMT-Assembly>. Acesso em: 26 de abril de 2023.

Manual da Eletrônica | Componentes na teoria e na prática! Disponível em: <<https://www.manualdaeletronica.com.br>>. Acesso em: 1 maio. 2022.

Aquisição e Tratamento de Dados – Teoria (9): Termopares – Sensores de Temperatura — ligados à corrente. Disponível em:<<https://www.profelectro.info/aquisicao-e-tratamento-de-dados-%E2%80%93-teoria-8-termopares-sensores-de-temperatura/>>. Acesso em: 1 maio. 2022.

Wendling,Marcelo. "Amplificadores operacionais". Apostila de sala de aula (Prof. Marcelo Wendling)

DE SÁ,HELBERT. "APOSTILA DE INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL". Apostila de sala de aula (Prof.HELBERT DE SÁ).

Moreira, Lucia. "Medição de Temperatura Usando-se Termopar". Artigo científico

Sá,Helena.Título:Caraterização das juntas de soldadura de componentes eletrónicos numa PCI.2014.161.Universidade do minho,Braga,2014

SMT Board Assembly Process Recommendations: Disponível em: <https://studylib.net/doc/18031462/an-353--smt-board-assembly-process> recommendations Acesso em: 10 maio. 2023.

KIC 2000 User Manual Hardware and Software: Disponível em: <https://fcc.report/FCC-ID/VBSBS/857735.pdf> Acesso em: 5 maio. 2023.

de Franca,Jose Alexandre.Título: Termopares - Um Tutorial.1997.20. Universidade Federal da Paraiba, Paraiba,1997

De Carvalho, Bruno Henrique. Título: CHUVEIRO AUTOMATIZADO COM MICROCONTROLADOR PIC.2018.45. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018 Acesso em: 5 maio. 2023.

CIN - Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco. Aula 17 - Conversores AD/DA. Disponível em: https://www.cin.ufpe.br/~es238/arquivos/aulas/aula17_conversores_adda.pdf Acesso em: 1 maio. 2023.

KERSCHBAUMER, Ricardo. Apostila de Microcontroladores. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf> Acesso em: 1 maio. 2023.

SANTORO, Giuseppe. SPI (Serial Peripheral Interface) - Slides. Disponível em: <https://www.dmi.unict.it/santoro/teaching/lsm/slides/SPI.pdf> Acesso em: 10 maio. 2023.

ROMA, Álvaro. Introdução às Linguagens de Programação - Livro. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~alvaroma/ucsp/proglang/book.pdf>. Acesso em: 1 maio. 2023.

MICROSOFT. WinForms overview. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/winforms/overview/?view=netdesktop-7.0> Acesso em: 1 maio. 2023.

DEBONI, A. M. (et al.). Construções de algoritmos a partir da resolução de problemas - Artigo. Disponível em: http://www.deboni.he.com.br/arquivos_jornal/2012/17/60_Periodico17.pdf Acesso em: 23 abril. 2023.

BRIGGS, Ed. Understanding Indium's Unique Manufacturing Story. Disponível em: <https://www.indium.com/blog/ed-briggs.php>. Acesso em: 23 abril. 2023.

PETRY, Fernando José; PAVANELLO, Renato; BRANZI, Claudio Augusto; ROSSATO, Fernando; KORBES, Daniel. Traçador de Perfil Térmico para Uso na Indústria Eletrônica - Dissertação. Disponível em:

https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Defesas_Pos_Graduacao/Defesa%2016_Daniel%20Korbes_Tracador%20de%20Perfil%20Termico%20para%20Uso%20na%20Industria%20Eletronica.pdf. Acesso em: 23 abril. 2023.

OLIVEIRA, Felipe Esteves de. Desenvolvimento de Controlador Adaptativo para Sistemas Não Lineares Utilizando a Abordagem Direta - Monografia. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1704/1/MONOGRAFIA_De_senvolvimentoControladorAdaptativo.pdf. Acesso em: 23 abril. 2023.

DUNN, William. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control.

BORGES, J. R. O Efeito Seebeck aplicado na Termometria. Local de publicação: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

Liyakathali.Koorithod, Thermal Profiling for Electronics Manufacturing. Disponível em: <https://smtnet.com/library/files/upload/thermal-profiling.pdf>. Acesso em: 23 abril. 2023.

Robocore. Comparação entre protocolos de comunicação serial. Disponível em: <https://www.robocore.net/tutoriais/comparacao-entre-protocolos-de-comunicacao-serial.html>. Acesso em: 23 abril. 2023.

FTMS College. Program Specification - Computer Science. [PDF]. 2ª ed. Kuala Lumpur, Malásia: FTMS College, 2019. Disponível em: https://ftms.edu.my/v2/wp-content/uploads/2019/02/PROG0101_CH02.pdf. Acesso em: 23 abril. 2023.