



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FREDSON COUTINHO DE ARAÚJO JUNIOR

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA DE BAIXO
CUSTO PARA UMA CNC DE SOLDAGEM**

TUCURUÍ

2025

FREDSON COUTINHO DE ARAÚJO JUNIOR

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA DE BAIXO
CUSTO PARA UMA CNC DE SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma.

TUCURUÍ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D278s de Araújo Junior, Fredson Coutinho.
Sistema de aquisição de dados de temperatura de baixo Custo
para uma CNC de soldagem / Fredson Coutinho de Araújo Junior.
— 2025.
XV, 67 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Elétrica, Tucuruí, 2025.

1. Baixo custo. 2. gerenciamento térmico. 3. interface. 4.
modelo de regressão. 5. pirômetro. I. Título.

CDD 621.307209811

FREDSON COUTINHO DE ARAÚJO JUNIOR

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA DE BAIXO
CUSTO PARA UMA CNC DE SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 11 de março de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Douglas Neves Garcia
Avaliador Interno - FEM/CAMTUC/UFPA

Eng. Cleber Pereira Corrêa
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

TUCURUÍ

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Título	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA UMA CNC DE SOLDAGEM GMAW-CW
Discente	Fredson Coutinho de Araújo Junior
Matrícula	201933940014

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	Douglas Garcia Neves (CAMTUC/UFPa)	Examinador interno
2	Cléber Pereira Corrêa (CAMTUC/UFPa)	Examinador interno
3	Rafael Suzuki Bayma (CAMTUC/UFPa)	Orientador

Data da Defesa: 11/03/2025	Hora Início: 14:19	Hora Término: 14:54
----------------------------	--------------------	---------------------

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	10,0	10,0	10
Linguagem (gramática e semântica)	9,0	9,0	9,0
Conteúdo técnico	10,0	10	9,0
Média	9,7	9,7	9,3

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	9,0	9,0	8,5
Administração do tempo	10,0	10,0	10,0
Expressão oral	9,0	9,0	8,5
Domínio do tema	8,5	9,0	8,0
Média	9,1	9,3	8,8

Média por examinador	9,4	9,5	9,0
Média Final	9,3		
Conceito Final	EXC		

Documento assinado digitalmente
gov.br DOUGLAS NEVES GARCIA
Data: 12/03/2025 09:53:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Douglas Garcia Neves
Membro

Documento assinado digitalmente
gov.br CLEBER PEREIRA CORREA
Data: 11/03/2025 19:01:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cléber Pereira Corrêa
Membro

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAEL SUZUKI BAYMA
Data: 11/03/2025 18:30:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Suzuki Bayma
Orientador

Dedico este trabalho a Deus, por abençoar minha vida.

À minha mãe, Rivea Braga, que, mesmo nas maiores dificuldades, nunca deixou que me faltasse nada.

E, finalmente, à minha bisavó, Francisca Braga (*in memoriam* ★ 1941 † 2019), que infelizmente não pôde ver o final da minha jornada na faculdade, mas teve a alegria de ver seu bisneto "crescer e virar rapaz".

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho e que contribuíram significativamente para o meu percurso acadêmico.

Agradeço a Deus pela força, sabedoria e orientação durante todo o meu percurso acadêmico. Sua luz iluminou meu caminho e deu-me a força necessária quando precisei para superar desafios.

Agradeço a minha mãe Rivea Braga que sempre me deu apoio nas minhas decisões e me deu forças para seguir meu caminho, sempre está lá quando eu preciso e nas maiores dificuldades nunca me deixou faltar nada.

Aos amigos Júlio, Ângelo, Willian e Joanes, agradeço pela amizade, conhecimento compartilhado, pelo apoio constante e pelas longas horas de estudo em grupo ao longo desta jornada acadêmica, sem vocês eu não teria conseguido vencer essa sozinho.

Agradeço aos meus professores, especialmente ao meu orientador professor Dr. Rafael Suzuki Bayma por toda a dedicação, conhecimento compartilhado e pelo apoio essencial para a conclusão deste trabalho. E pela iniciativa de criar o laboratório FabLab de Tucuruí, que me ajudou bastante a desenvolver habilidades técnicas e aperfeiçoar meus conhecimentos na área de engenharia elétrica.

Dedico esse trabalho em memória de minha bisavó Francisca Braga que sempre sonhou em me ver formado, mas sempre ficava com o coração apertado por eu estar longe de casa, mas infelizmente ela partiu em 2019 sem conseguir ver o final da minha jornada

"As asas de um coração sonhador ninguém irá roubar!"
(Cavaleiros do zodíaco).

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de gerenciamento térmico para processos de soldagem em uma CNC , empregando um sensor pirômetro de baixo custo para monitorar a temperatura entre as camadas. A pesquisa consiste na construção de uma bancada experimental que simula o eixo Z de uma CNC, permitindo a variação da distância do pirômetro em relação à fonte de calor e coleta de dados para calibração do modelo matemático proposto. O trabalho envolve a criação de um *software* de aquisição de dados para monitoramento e controle do experimento, além do desenvolvimento de um modelo de regressão linear para correção da temperatura medida pelo pirômetro com base na leitura de um termopar. Embora a validação final não tenha sido possível devido a problemas operacionais na CNC, os resultados indicam que o método proposto de correção é viável, oferecendo solução de baixo custo para monitoramento térmico. A bancada, o *software* e o modelo desenvolvidos neste estudo podem ser aplicados em futuros projetos de pesquisa e industrial.

Palavras-chave: Baixo custo, gerenciamento térmico, interface, modelo de regressão, pirômetro.

ABSTRACT

This work aims to develop a thermal management system for welding processes in a CNC, employing a low-cost pyrometer sensor to monitor the temperature between layers. The research involves building an experimental setup that simulates the Z-axis of a CNC, allowing for variation in the distance between the pyrometer and the heat source, as well as data collection for calibration of the proposed mathematical model. The project includes the development of data acquisition software for monitoring and controlling the experiment, alongside a linear regression model to correct the temperature measured by the pyrometer based on readings from a thermocouple. Although the final validation was not possible due to operational issues with the CNC, the results indicate that the proposed correction method is feasible, offering a low-cost solution for thermal monitoring. The bench, software, and model developed in this study can be applied in future research and industrial projects.

Keywords: *interface, low cost, pyrometer, regression model, thermal management.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fresa CNC Milwaukee-Matic-II, primeira máquina com um trocador de ferramentas automático.	21
Figura 2 – Exemplo de um desenho e seu Gcode.	23
Figura 3 – CNC moderna.	24
Figura 4 – CNC de baixo custo:	25
Figura 5 – Exemplo de modelo de usinagem em CAD e arquivo CLDATA da trajetória da ferramenta para a usinagem do modelo em <i>software CAM</i>	26
Figura 6 – Evolução da industrialização.	28
Figura 7 – Ilustração do processo de manufatura subtrativa.	29
Figura 8 – Processo de usinagem.	30
Figura 9 – Processo de torneamento.	30
Figura 10 – Ilustração do processo de manufatura aditiva.	31
Figura 11 – Processo <i>binder jetting</i> (aglutinante).	32
Figura 12 – Processo <i>directed energy deposition</i> (deposição de energia direcionada).	33
Figura 13 – Processo <i>material extrusion</i> (extrusão de material).	33
Figura 14 – Processo <i>material jetting</i> (jateamento de material).	34
Figura 15 – Processo <i>powder bed fusion</i> (cama de fusão de pó).	34
Figura 16 – Processo <i>sheet lamination</i> (laminação de chapas).	34
Figura 17 – Processo <i>Vat photopolymerization</i> (fotopolimerização em tanque).	35
Figura 18 – Esquema do processo GMAW-CW.	38
Figura 19 – Exemplo de peça com mal gerenciamento térmico.	39
Figura 20 – Esquema simplificado de aquisição de dados.	40
Figura 21 – Esquemático básico de um sensor termopar.	41
Figura 22 – O processo de sensoriamento.	42
Figura 23 – Diagrama de blocos dos subcomponentes de aquisição de dados.	42
Figura 24 – Esquemático do circuito <i>Sample and Hold</i>	43
Figura 25 – Gráfico de conversão Analógico-Digital.	44
Figura 26 – Gráficos de conversão Analógico-Digital.	44
Figura 27 – Taxa de amostragem.	45
Figura 28 – Diagrama de blocos típico do Delta-Sigma.	46
Figura 29 – Diagrama de um microprocessador.	47
Figura 30 – Diagrama de um microcontrolador.	47
Figura 31 – Desenho 3D dos suportes das peças	52
Figura 32 – Motor nema 17.	54
Figura 33 – Placa <i>shield V3</i>	54
Figura 34 – Sensor pirômetro MLX90614.	55

Figura 35 – Sensor termopar tipo K.	56
Figura 36 – Módulo MAX6675	57
Figura 37 – Placa Arduino usada no projeto.	58
Figura 38 – Esquemático de conexão.	58
Figura 39 – Interface inicial da IDE do Arduino.	59
Figura 40 – Processo de aquisição de dados com os sensores.	60
Figura 41 – Processo de montagem	66
Figura 42 – Gráficos dos valores do termopar X estimativa.	68
Figura 43 – Interface de coleta dos dados.	69
Figura 44 – Caixa 3D para comportar os sensores.	70
Figura 45 – Sensores posicionados na CNC.	71
Figura 46 – Teste de soldagem.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC	<i>Computer Numerical Control</i> , Controle numérico por computador
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet das coisas
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> , Desenho assistido por computador
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> , Manufatura assistida por computador
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> , Soldagem a Arco com Eletrodo Metálico
GMAW-CW	<i>Gas Metal Arc Welding with Cold Wire</i> , Soldagem a Arco com Eletrodo Metálico com Fio Frio
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
LW	<i>Laser Welding</i> , Soldagem a Laser
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> , Soldagem por Arco de Plasma
EBW	<i>Electron Beam Welding</i> , Soldagem por Feixe de Elétrons
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i> , Tela de Cristal Líquido
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , Modulação por Largura de Pulso
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> , Receptor e Transmissor Assíncrono Universal
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> , Interface Periférica Serial
DAQ	<i>Data Acquisition</i> , Aquisição de Dados
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> , Circuito de Comunicação Serial
AD	<i>Analog-to-Digital</i> , Conversor Analógico para Digital
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , Barramento Serial Universal
PROM	<i>Programmable Read-Only Memory</i> , Memória Somente de Leitura Programável
EPROM	<i>Erasable Programmable Read-Only Memory</i> , Memória Programável Apagável
EIA	<i>Electronic Industries Association</i> , Associação das Indústrias Eletrônicas

ANSI	<i>American National Standards Institute</i> , Instituto Nacional de Normas dos Estados Unidos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , Organização Internacional de Normalização

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Taxa de transferência de calor (W)
T	Temperatura (K)
A	Área da superfície (m^2)
e	Emissividade (adimensional)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6704 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)
m	Unidade de medida metro
V	Tensão elétrica (V)
τ	Torque ($N \cdot m$)
μ	Prefixo micro (10^{-6})
$\pm$	sinal de mais ou menos
Δ	Variação ou diferença
Σ	Somatório
n	Número de amostras
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	18
1.3	Objetivos específicos	19
1.4	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO TEÓRICA	20
2.1	Máquinas CNC	20
2.1.1	CNC de 3 eixos	24
2.1.2	Programação CNC	25
2.1.2.1	Programação manual	25
2.1.2.2	CAD/CAM	26
2.2	Manufatura	27
2.2.1	Manufatura moderna	28
2.2.2	Manufatura subtrativa	28
2.2.3	Manufatura aditiva	31
2.3	Radiação	35
2.4	Soldagem a arco elétrico	36
2.4.1	Manufatura aditiva por deposição a arco	37
2.4.1.1	Técnica GMAW-CW	37
2.5	Aquisição de dados	39
2.5.1	Sensores	40
2.6	<i>Hardware</i> de aquisição de dados	42
2.6.1	Condicionador	43
2.6.1.1	Circuito <i>Sample and Hold</i>	43
2.6.2	Conversor A/D	43
2.6.3	Processador	46
2.7	Comunicação serial	48
2.7.1	Padrão USB	48
2.8	<i>Software</i> de aquisição de dados	49
2.8.1	<i>Firmware</i>	49
2.8.2	Interface de usuário	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	Estratégia geral do trabalho	51
3.2	Bancada de testes	52

3.2.1	Caixa 3D para comportar os sensores	53
3.2.2	Motor de passo	53
3.2.3	CNC <i>shield</i>	54
3.3	Sistema de gerenciamento térmico	54
3.3.1	Sensor pirômetro	54
3.3.2	Sensor Termopar	56
3.3.2.1	Módulo MAX6675	56
3.3.3	Placas de comunicação	57
3.3.4	<i>Firmware</i>	59
3.4	Processo experimental	60
3.5	Aplicativo de aquisição de dados	61
3.6	Modelo para correção do pirômetro	62
3.7	Código com a solução	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	Bancada de testes	66
4.2	Modelo de Regressão Linear	67
4.3	Aplicativo de aquisição de dados	68
4.4	Implementação na CNC de soldagens	70
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	73
5.1	Trabalhos Futuros	74
	Referências	75
	APÊNDICES	79
	APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO DE CONTROLE DOS SENSORES	80
	APÊNDICE B – REPOSITÓRIO NO GITHUB	82
	ANEXOS	83
	ANEXO A – NOME DO ANEXO	84
	ANEXO B – NOME DO OUTRO ANEXO	85

1 INTRODUÇÃO

Para Neto (2020) a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) permite a fabricação de peças impossíveis de serem obtidas através da manufatura subtrativa e tem aplicações nos setores aeroespacial, automobilístico, biomédico e geração de energia.

Diversos processos de soldagem na MADA têm sido foco de estudo para alcançar altas taxas de deposição em materiais metálicos, entre eles o processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), que pode alcançar taxas de deposição entre duas ou três vezes maiores que outros processos de soldagem, tornando a GMAW uma opção interessante para a manufatura aditiva de componentes metálicos. No entanto, a aplicação do GMAW como fonte de calor em MADA requer tempo e recursos para encontrar parâmetros operacionais adequados para fornecer características geométricas, acabamento superficial e propriedades do material adequados (TEIXEIRA et al., 2022).

Para alcançar um aumento na taxa de deposição sem aumentar a entrada de calor na junta, destaca-se o processo de soldagem GMAW-CW. Esse processo envolve a adição de um arame não energizado (frio) posicionado à frente do arame eletrodo, alinhado à direção de soldagem, com velocidade controlada na poça de fusão. O objetivo é aproveitar a energia e a estabilidade do arco elétrico do GMAW sem causar perturbações significativas no processo (MOTA et al., 2017). As características de alta taxa de deposição e maior velocidade de resfriamento da poça de fusão, embora possam alterar a estrutura de solidificação do metal de solda, podem ser vantajosas na manufatura aditiva por deposição a arco, reduzindo o tempo de fabricação de um componente.

A soldagem GMAW-CW exige mais rigor e um maior controle dos parâmetros operacionais de soldagem, haja vista que a introdução do arame frio, para a composição do metal fundido, não deve perturbar ou interferir na estabilidade do arco e nem na transferência metálica.

Este trabalho desenvolve um sistema de gerenciamento térmico para uma máquina CNC utilizada em soldagem a arco elétrico. Para garantir medições precisas de temperatura com um pirômetro, que é sensível à distância da fonte de calor, foi montada uma bancada experimental que permite variar essa distância e comparar as leituras com as de um termopar de referência. Com os dados coletados, elaborou-se um modelo matemático por regressão linear para calibrar o pirômetro. Além disso, foi criado um sistema de aquisição de dados com *hardware* e aplicativo dedicado para controlar os sensores e o motor de passo. Apesar de desafios técnicos na implementação final, os resultados em laboratório confirmam a eficácia do modelo e do sistema propostos, contribuindo para aprimorar o controle térmico em processos de soldagem automatizados.

1.1 Justificativa

O presente trabalho está inserido em um projeto desenvolvido no Laboratório de Soldagem de Tucuruí, cujo objetivo é desenvolver um sistema eficiente de soldagem CNC para a Manufatura Aditiva de Deposição a Arco (MADA). O projeto visa aprimorar o controle térmico durante o processo de soldagem, fator essencial para garantir a qualidade das peças produzidas e evitar falhas estruturais decorrentes de variações térmicas.

O processo de soldagem utilizado, conhecido como GMAW-CW (*Gas Metal Arc Welding* com arame frio), já conta com um sistema de alimentação de arame frio que garante a alimentação contínua e controlada do arame durante a soldagem. No entanto, além do controle de alimentação do arame, um dos grandes desafios identificados no projeto foi a necessidade de um sistema de monitoramento térmico. Tal sistema é fundamental para garantir a estabilidade do processo de soldagem e evitar problemas como trincas, distorções ou até a falha completa das peças. A soldagem envolve elevadas temperaturas, e é importante que a medição e o controle dessas temperaturas sejam feitos de forma mais confiável, sem comprometer a segurança e a eficiência do processo.

Para isso, foi necessário desenvolver um sistema de gerenciamento térmico capaz de monitorar a temperatura no processo de soldagem sem contato direto, utilizando tecnologias acessíveis. A solução proposta integrou a medição de temperatura ao sistema CNC, visando futuramente garantir uma soldagem estável. No desenvolvimento do protótipo, utilizou-se um pirômetro, que foi calibrado por um termopar para corrigir os erros de medição e melhorar a precisão.

Os testes iniciais foram realizados em uma bancada para simular as condições reais da CNC e calibrar os sensores. Com a regressão linear, as leituras do pirômetro foram ajustadas para diferentes distâncias da fonte de calor.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho desenvolver um sistema de monitoramento térmico de baixo custo para a aplicação na impressão de peças metálicas por soldagem. Para isso, busca-se implementar um sensor de temperatura infravermelho (pirômetro) de baixo custo para monitorar as camadas de deposição na manufatura aditiva em uma mesa de coordenadas CNC, desenvolver um sistema de aquisição de dados de temperatura e uma interface de controle e monitoramento dos sensores.

1.3 Objetivos específicos

- Realizar um estudo sobre os sensores e equipamentos utilizados;
- Montagem de um sistema de aquisição de dados com sensores de temperatura;
- Projetar uma interface gráfica para visualização e aquisição de dados.

1.4 Estrutura do trabalho

Os elementos textuais que compõem este trabalho encontram-se divididos em 5 capítulos. Neste Capítulo, encontra-se a introdução aqui apresentada. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica na qual o trabalho foi embasado. O Capítulo 3 apresenta a metodologia, materiais e trata, respectivamente, dos componentes mecânicos e eletrônicos utilizados no projeto, assim como os parâmetros que se desejou atender no projeto. Por fim, o Capítulo 4 apresentamos os resultados obtidos, já o capítulo 5 respectivamente as considerações finais do presente trabalho e algumas possibilidades de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir do projeto aqui apresentado.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos conceituais e tecnológicos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho. A revisão abrange o histórico e a evolução das máquinas CNC, sua relevância na manufatura moderna e os processos envolvidos, como a manufatura aditiva e subtrativa. Além disso, são discutidos aspectos essenciais do sistema de aquisição de dados, incluindo sensores, hardware e software, que foram fundamentais para a implementação do sistema de monitoramento térmico e controle da mesa CNC. Esses conceitos fornecem a base teórica necessária para entender os objetivos e as metodologias aplicadas no projeto, contextualizando sua importância no aprimoramento dos processos de soldagem e manufatura aditiva.

2.1 Máquinas CNC

Máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado) são máquinas-ferramentas que usam um computador para controlar os movimentos de seus eixos, permitindo que elas sejam usadas para produzir peças com alta precisão e repetibilidade, mesmo que sejam complexas ou de forma livre ou seja, a peça não segue uma forma geométrica simples, como um círculo, quadrado ou retângulo, mas pode ter contornos mais complexos e irregulares. São equipamentos muito úteis na indústria, oferecendo uma série de facilidades para os trabalhos desenvolvidos no dia a dia. As mesmas são uma evolução das máquinas CN (Comando Numérico), por causa do controle por meio de ferramentas computadorizadas. Tais máquinas operam através de códigos de computadores, sendo utilizadas principalmente em tornos mecânicos e centros de usinagem (SMID, 2003).

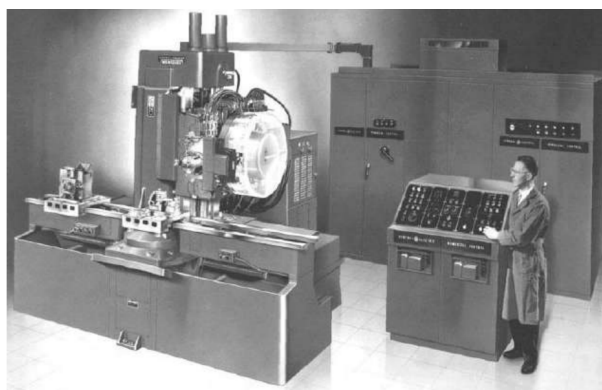
Em 1949, a Força Aérea Norte-americana identificou que a "*Parsons Corporation*", uma pequena empresa fabricante de hélices e rotores para helicópteros, enfrentava dificuldades para produzir gabaritos na velocidade necessária para atender à demanda. A empresa havia experimentado uma forma rudimentar de controle numérico em uma máquina de usinagem convencional, buscando otimizar seu processo produtivo (GONÇALVES et al., 2007).

A Força Aérea Americana, percebendo um grande avanço na fabricação de aviões e material bélico, contratou a *Parsons* e patrocinou estudos e desenvolvimento do controle numérico. Planejaram e executaram as adaptações de controle numérico para uma fresadora de três eixos, a *Hydrotel*, da *Cincinnati Milling Machine Company*. Os controles e comandos convencionais foram retirados e substituídos pelo comando numérico, dotado de leitora de fita de papel perfurado, unidade de processamento de dados e servomecanismos nos eixos. Deste modo foi criado um protótipo de uma máquina CNC que foi apresentado em 1953

no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Os resultados foram excepcionais e demonstraram uma mudança revolucionária nas indústrias de transformação (GENG, 2004).

Após este período, a Força Aérea Norte-americana teve um desenvolvimento extraordinário, pois as peças complexas e de grande precisão, empregadas na fabricação das aeronaves, principalmente os aviões a jato de uso militar, passaram a ser produzidas de forma simples e rápida, reduzindo-se os prazos de entrega do produto desde o projeto, até o acabamento final. Em 1956 surgiu o trocador automático de ferramentas, ilustrado na Figura 1. Mais tarde em 1958, os equipamentos com controle de posicionamento ponto a ponto e a geração contínua de contornos, foram melhorados por este sistema em desenvolvimento (GENG, 2004).

Figura 1 – Fresa CNC Milwaukee-Matic-II, primeira máquina com um trocador de ferramentas automático.



Fonte: GENG (2004).

A partir de 1957, houve nos Estados Unidos, uma grande corrida na fabricação de máquinas comandadas por CN. Até então os industriais investiam em adaptações do CN em máquinas convencionais. Este novo processo foi cada vez mais usado na rotina de manufatura, fazendo com que surgissem novos fabricantes, os quais já produziam seus próprios sistemas e linguagem de comandos. Devido ao grande número de fabricantes, começaram a surgir os primeiros problemas, sendo o principal a falta de uma linguagem padronizada. A falta de padronização era bastante sentida nas empresas com mais de uma máquina, fabricadas por diferentes fornecedores, onde cada um possuía uma linguagem própria, o que gerava a necessidade de uma equipe técnica especializada para cada tipo de comando, elevando os custos de fabricação (Capable Machining, 2024).

Em 1958, por intermédio da EIA (*Electronic Industries Association*) organizaram-se estudos no sentido de padronizar os tipos de linguagem. A linguagem destinada à programação de máquinas era a APT (*Automatically Programed Tools*), desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1956. Daí para frente foram desenvolvidas outras linguagens para a geração contínua de contornos como *AutoPrompt Automatic*

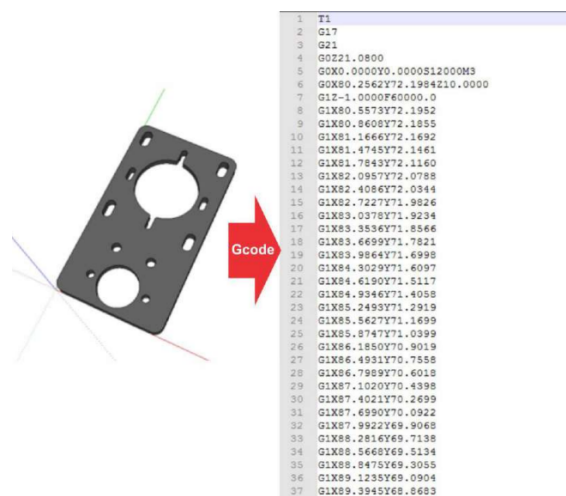
Programming of Machine Tools, *ADAPT*, *Compact II*, *Action*, e outros que surgem para novas aplicações. Os códigos de máquinas CNC mais utilizados no mundo foram padronizados inicialmente pela "ISO 1056:1975" e posteriormente atualizada pela "ISO 6983-1:1982" (*International Organization for Standardization*) e de forma muito semelhante pela ANSI "NAS995-1996" (*American National Standards Institute*) ([Capable Machining, 2024](#)).

Com o aparecimento dos circuitos integrados, houve uma significativa redução no tamanho físico dos comandos CNC e um aumento expressivo na capacidade de armazenamento e processamento, comparado aos controles transistorizados, pois a integração de vários componentes em um único chip permitiu a miniaturização e maior eficiência dos sistemas de controle. Em 1967, as primeiras máquinas controladas numericamente chegaram ao Brasil, vindas dos Estados Unidos. Desde então, observou-se uma evolução contínua, acompanhando os avanços dos computadores em geral, e permitindo que os comandos CNC modernos utilizem tecnologia de última geração em seu *hardware* ([GENG, 2004](#)).

Para [MARCICANO \(2005\)](#) o princípio da operação dessas máquinas reside na programação, processo no qual operadores ou programadores especializados desenvolvem códigos conhecidos como G e M. Os códigos G são responsáveis por orientar os movimentos da ferramenta de corte, determinando direção, trajetória e velocidade do corte. Em contrapartida, os códigos M gerenciam funções como ativação de refrigeração ou troca de ferramentas.

Ainda, segundo [MARCICANO \(2005\)](#) a execução desses códigos é realizada pelo controlador da máquina CNC, que interpreta os códigos G e M e os transforma em movimentos coordenados dos eixos, analisado na Figura 2. Um código G pode instruir a máquina a deslocar a ferramenta de corte horizontalmente para a direita por uma distância especificada, e o controlador CNC, então, executa essa instrução como um movimento físico real e preciso da ferramenta.

Figura 2 – Exemplo de um desenho e seu Gcode.



Fonte: [MARCICANO \(2005\)](#).

O *feedback* é uma parte crucial do sistema CNC, uma vez que sensores e *feedback* dos motores monitoram e ajustam constantemente a posição da ferramenta ou da peça, permitindo que a máquina CNC opere com alta precisão e eficiência. No entanto, nem todas as máquinas CNC possuem *feedback*, ou seja, algumas máquinas mais antigas ou mais simples podem não ter essa funcionalidade. Além disso, algumas máquinas podem operar em “malha aberta”, onde a máquina executa os comandos conforme programado, mas não tem a capacidade de ajustar ou corrigir seus movimentos com base no *feedback* dos sensores ([KALATEC AUTOMAÇÃO, 2024](#)).

Existem diferentes tipos de máquinas CNC, como as de 3 eixos, 4 eixos e 5 eixos, sendo que as máquinas de 3 eixos são as mais comuns e são usadas para cortes em 2D e 3D ([POLASTRINI, 2016](#)).

As máquinas de 5 eixos contam com uma ferramenta que se move em cinco direções diferentes – X, Y e Z, bem como A e B, em torno das quais a ferramenta gira. O uso de uma máquina CNC de 5 eixos permite que os operadores manuseiem uma peça de todas as direções em uma única operação, eliminando a necessidade de reposicionar manualmente a peça de trabalho entre as operações, visto na Figura 3. Esse processo economiza tempo e é ideal para criar peças complexas, como as encontradas nas indústrias médica, de petróleo e gás e aeroespacial ([Marcus Figueiredo, 2024](#)).

As máquinas CNC desempenham um papel fundamental no processo de manufatura moderna pois permitem a fabricação de peças complexas com alta precisão e repetibilidade, sendo importante para uma variedade de aplicações, desde a fabricação de automóveis e aeronaves até a produção de dispositivos médicos e eletrônicos. Elas são altamente flexíveis, o que significa que podem ser usadas para fabricar uma variedade de peças diferentes, o que as tornam uma escolha interessante para empresas que precisam produzir peças em pequenas quantidades ou que precisam mudar de produção rapidamente. É válido ressaltar

Figura 3 – CNC moderna.



Fonte: [Dreamstime](#) (2023).

que as máquinas CNC geralmente são mais eficientes do que os métodos de fabricação tradicionais, elas automatizam muitas tarefas que seriam realizadas manualmente, o que reduz o tempo e o custo de produção ([POLASTRINI, 2016](#)).

Alguns exemplos de aplicação das máquinas CNC na indústria incluem a fabricação de componentes para automóveis, aeronaves, dispositivos médicos e eletrônicos. Na fabricação de automóveis, elas são empregadas na produção de motores, transmissões, chassis e carrocerias, enquanto na fabricação de aeronaves, são utilizadas para produzir asas, fuselagem e motores. Na fabricação de dispositivos médicos, as máquinas CNC são empregadas na fabricação de implantes, próteses e instrumentos cirúrgicos, e na fabricação de eletrônicos, são responsáveis pela produção de chips, placas de circuito impresso e componentes mecânicos.

2.1.1 CNC de 3 eixos

Uma máquina CNC de 3 eixos é uma máquina de corte computadorizada que pode mover-se em três direções: X, Y e Z. A direção X é paralela à superfície da mesa da máquina, a direção Y é perpendicular à direção X e a direção Z é perpendicular à superfície da mesa da máquina e à direção X.

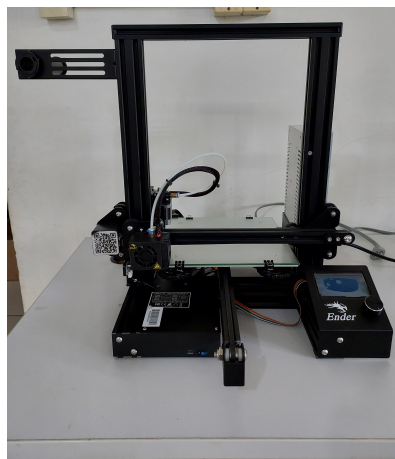
Essa configuração é suficiente para realizar muitas operações de usinagem, incluindo fresamento, perfuração, torneamento e outros processos de fabricação, uma vez que a simplicidade de operação e programação das máquinas de 3 eixos, juntamente com seu custo relativamente menor em comparação com máquinas de mais eixos, fazem com que sejam ideais para uma ampla gama de aplicações ([JANELA, 2023](#)).

O barateamento das máquinas CNC de 3 eixos deve-se a uma série de fatores, incluindo o aumento da demanda, a redução dos custos de fabricação e o desenvolvimento de novas tecnologias. Além disso, podem ser construídas a partir de materiais de baixo

custo, mas isso requer conhecimento de mecânica, eletrônica e programação, visto na Figura 4b. No entanto, existem kits de máquinas CNC de 3 eixos disponíveis no mercado, como observado na Figura 4a. Esses *kits* geralmente incluem todas as peças e componentes necessários para construir uma máquina CNC de 3 eixos funcional (JANELA, 2023).

Figura 4 – CNC de baixo custo:

(a) Impressora 3D.



(b) CNC de soldagem construída manualmente.



Fonte: Autoria própria.

2.1.2 Programação CNC

A programação de máquinas CNC pode ser realizada de diversas maneiras, seja manualmente, com os dados de entrada e as informações de usinagem sendo do programador para a ferramenta de usinagem se deslocar segundo os comandos básicos da máquina; ou via CAD/CAM, que gera uma programação baseada em desenhos de trajetórias, feita conforme um modelo externo já elaborado em um software de desenho assistido por computador (CAD) e usando métodos de manufatura assistida por computador (CAM) (TORMEN, 2020).

2.1.2.1 Programação manual

Esta é a programação na qual os dados de entrada do programa e o código são colocados no computador da máquina pelo programador, sem nenhum recurso computacional externo.

Segundo Gonçalves et al. (2007), este tipo de programação é ideal para aplicações ponto a ponto em trabalhos de torneamento e fresamento que envolvam o processamento de peças geometricamente simples e que requeiram poucas operações.

2.1.2.2 CAD/CAM

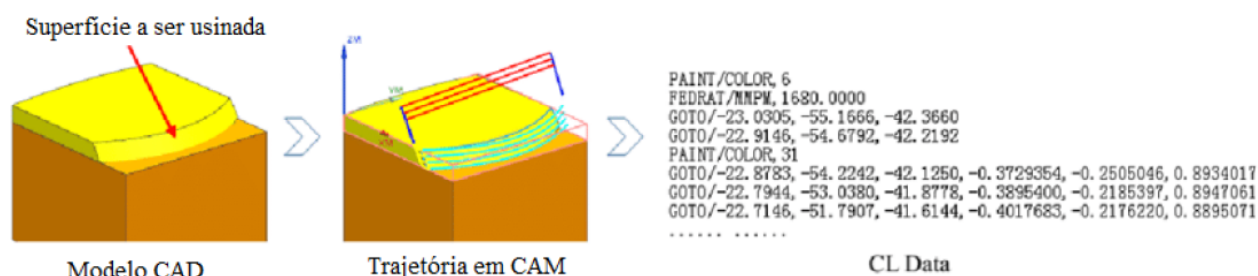
Sistemas CAD/CAM contribuem com a rapidez para o processo de fabricação e automatização da programação de máquinas CNC para a manufatura do produto. Tais sistemas têm vantagens, como a possibilidade de simulação off-line, análise de tempo e custo de operação e otimização do caminho da ferramenta para reduzir tempos desnecessários na fabricação (TORMEN, 2020).

O processo de fabricação de uma peça usando *softwares* CAD/CAM, segue algumas etapas: primeiro deve ser feito um desenho do modelo geométrico em três dimensões em um programa CAD; após isso, deve-se enviar este modelo ao sistema CAM, onde são feitas as trajetórias de usinagem resultam em funções de manufatura que a máquina executa (TORMEN, 2020).

A programação CNC em CAD/CAM foi gerada primeiramente para solucionar problemas que eram comuns durante a programação manual. Atualmente ela é reconhecida como um meio de programar tanto peças simples como de geometrias complexas, de forma mais rápida e precisa. As aplicações do CAD/CAM são de grande importância na indústria de moldes em geral, e aeroespacial, que trabalham com usinagem de peças complexas e que exigem bastante precisão (TORMEN, 2020).

Uma significativa parcela dos sistemas CAM produz arquivos que contêm as instruções necessárias para a operação de máquinas CNC. Esses arquivos podem ser gerados em um formato binário conhecido como CLDATA (Dados de Linguagem de Controle, em tradução para o português) ou em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) (TORMEN, 2020). O formato ASCII é capaz de interpretar definições, geometrias simbólicas e instruções de usinagem, posteriormente convertendo essas informações em código CLDATA, o qual especifica a execução de uma operação de usinagem em condições absolutas, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de modelo de usinagem em CAD e arquivo CLDATA da trajetória da ferramenta para a usinagem do modelo em *software* CAM



Fonte: TORMEN (2020).

Atualmente, *softwares* como AutoCAD®, Autodesk Fusion 360®, SolidWorks®, AlphaCAM, FlatCAM, FreeCAD são usados para projetar um produto e programar os processos de manufatura, especificamente a usinagem CNC, estes *softwares* permitem

a criação de desenhos técnicos detalhados e a simulação de processos de manufatura, garantindo precisão e facilidade.

No contexto de ferramentas avançadas para projetos mais automatizados, alguns *softwares* de desenho estão utilizando ferramentas de inteligência artificial para produzir desenhos automáticos e personalizados, otimizando assim o tempo e a precisão do desenvolvimento de projetos. No entanto, essas tecnologias de inteligência artificial aplicadas ao design automatizado ainda estão engatinhando, com desafios a serem superados em termos de confiabilidade, capacidade de adaptação a diferentes demandas e integração com fluxos de trabalho complexos. Embora promissoras, essas soluções ainda não alcançaram a maturidade necessária para uma implementação generalizada, e muitas indústrias continuam dependentes de técnicas mais consolidadas, como o uso de escaneamento 3D e as simulações tradicionais em CAD/CAM, para garantir resultados precisos e robustos em seus processos de manufatura (Alveni Lisboa, 2024).

A tecnologia de escaneamento 3D está mais consolidada e permite capturar a geometria de objetos físicos com alta precisão, transformando-os em modelos digitais que podem ser editados e utilizados para gerar trajetórias de usinagem em máquinas CNC. Esses modelos, obtidos por meio de escaneamento, facilitam a reprodução de peças existentes e possibilitam a criação de protótipos e componentes personalizados com maior eficiência. Essa integração reduz o tempo necessário para converter um objeto real em um modelo manufaturável, eliminando etapas manuais de medição e garantindo que a usinagem CNC reproduza fielmente os detalhes da peça original (JAVOID et al., 2021).

A evolução das máquinas CNC representa um avanço significativo na capacidade de fabricação de peças complexas com alta precisão e repetibilidade. No entanto, para entender a aplicação prática dessas tecnologias na produção moderna, é importante discutir os processos de manufatura que beneficiam diretamente dessas inovações. A seguir, será abordada a manufatura moderna, com foco nas técnicas subtrativas e aditivas, que utilizam CNCs para transformar projetos em produtos acabados.

2.2 Manufatura

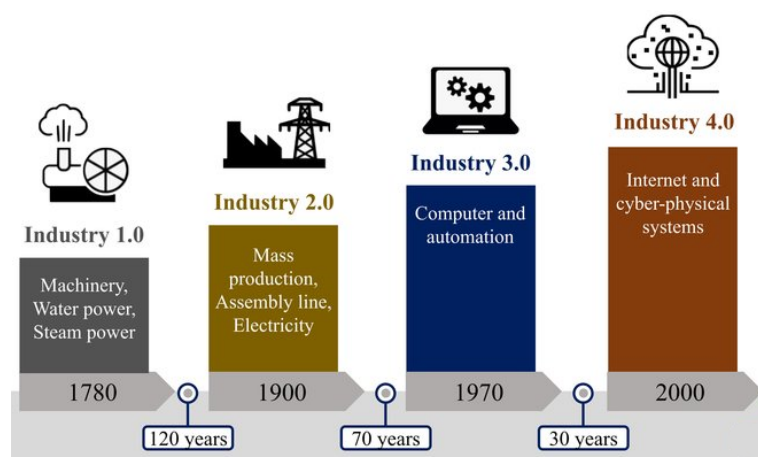
A manufatura (do latim *manu* = mão e *factura* = feito) descreve a transformação de matérias primas em produtos terminados para sua comercialização, como também envolve processos de elaboração de produtos semi-faturados. O termo manufatura pode se referir a uma grande variedade de atividades humanas, desde o artesanato até a alta tecnologia, porém, é mais comumente aplicada à produção industrial, na qual as matérias primas são transformadas (produção ou montagem de elementos) em bens acabados em grande escala. Isto permite qualificar como manufatureiras um conjunto de indústrias, dentre as quais podemos destacar a indústria aeronáutica, mecânica, alimentícia, eletrônica, elétrica, química, automobilística, confecção, calçados e moveleira (Thais Pacievitch, 2024).

A manufatura, em sua essência, é o processo pelo qual matérias-primas são transformadas em produtos finais. Com o advento das máquinas CNC, a manufatura subtrativa e aditiva ganharam novas possibilidades, permitindo a produção de peças com maior precisão e eficiência. Estas técnicas serão exploradas em detalhes nas subseções seguintes.

2.2.1 Manufatura moderna

Na primeira Revolução Industrial, a energia hidráulica e a vapor impulsionaram a mecanização, substituindo o trabalho manual por máquinas-ferramenta, inaugurando a automação na manufatura. A segunda Revolução Industrial foi marcada pela eletricidade como fonte de energia predominante, possibilitando a produção em massa e revolucionando os processos de fabricação com a implementação de linhas de montagem. A terceira Revolução Industrial introduziu computadores e automação baseada em software, resultando em uma transformação na manufatura. Nesta fase, a CNC emergiu como uma ferramenta de fabricação, permitindo o controle automatizado e preciso de máquinas-ferramenta (ResearchGate, 2024). A Figura 6 ilustra o processo de evolução da indústria.

Figura 6 – Evolução da industrialização.



Fonte: ResearchGate (2024).

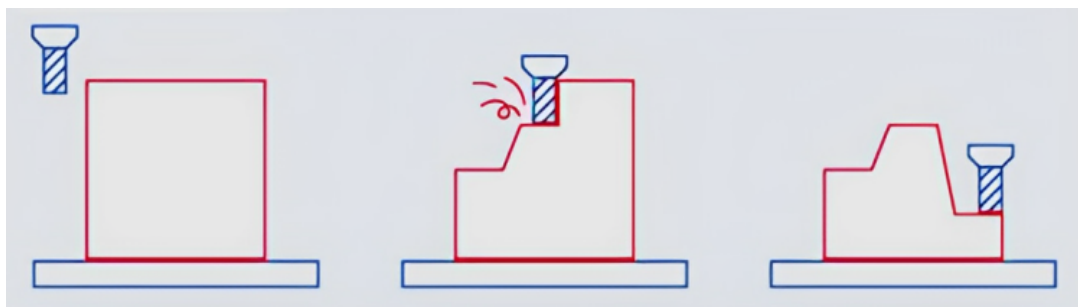
Atualmente a humanidade vive a quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, caracterizada pela integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e impressão 3D. Tal evolução visa aumentar a flexibilidade, personalização e eficiência na produção, moldando continuamente o cenário da manufatura. (Revolução Industrial, 2023).

2.2.2 Manufatura subtrativa

A manufatura subtrativa refere-se a um processo de fabricação no qual o material é removido para criar peças ou produtos, conforme ilustrado na Figura 7, esse processo é feito através da remoção de camadas sucessivas de material bruto até que a forma desejada seja alcançada. É válido ressaltar que, essa é a forma mais tradicional de fabricação, desde

quando o ser humano construía ferramentas de pedra, porém essa técnica foi modernizada com o uso das máquinas CNC, que permitem maior precisão, velocidade e complexidade na produção (REDWOOD, 2017).

Figura 7 – Ilustração do processo de manufatura subtrativa.



Fonte: Adaptado de REDWOOD (2017).

A manufatura subtrativa pode ser aplicada a diversos materiais, como metais, plásticos, madeira, cerâmica, entre outros. Tal método apresenta algumas vantagens, como a alta qualidade do acabamento superficial, a resistência mecânica das peças, a variedade de materiais disponíveis e a facilidade de integração com outros processos de fabricação. No entanto, a mesma também tem algumas desvantagens, como o desperdício de material, a limitação geométrica das peças, o alto custo de manutenção das máquinas e a necessidade de ferramentas específicas para cada operação. Todavia, existem alguns processos fabris que só podem ser feitos com a manufatura subtrativa, como por exemplo, a fabricação de móveis de madeira (REDWOOD, 2017).

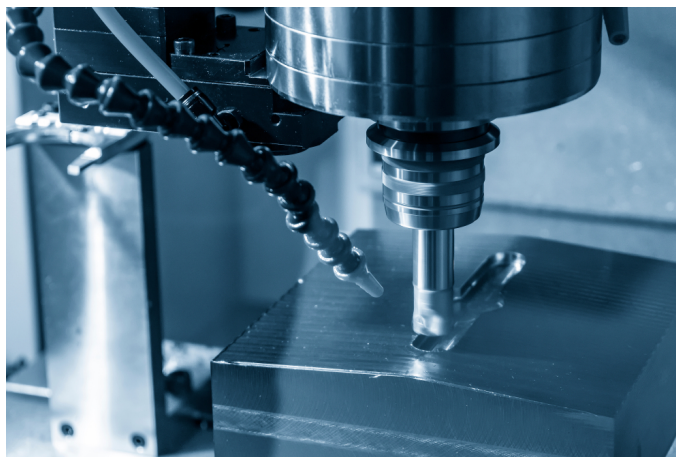
A manufatura subtrativa é utilizada em diversos setores industriais, como automotivo, aeroespacial, médico, naval, energético, entre outros. Alguns exemplos de peças produzidas por manufatura subtrativa são engrenagens, parafusos, implantes, turbinas, hélices, entre outros (REDWOOD, 2017).

Usinagem é o termo geral que é praticamente sinônimo de manufatura subtrativa, pois é o processo onde se usa uma ferramenta para cortar, furar, desgastar o material e assim conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento desejados, conforme observado na Figura 8. O que muda em cada processo de usinagem é a ferramenta e a forma como se trabalha na peça (FERRARESI, 2018).

De acordo com Ferraresi (2018), alguns métodos de usinagem para manufatura subtrativa incluem:

- **Fresagem:** Processo pelo qual uma ferramenta rotativa de corte denominada fresa, gira em alta velocidade para remover material de uma peça bruta e plana. Nesse processo utiliza-se a translação entre os eixos cartesianos (X,Y,Z), ou seja, a ferramenta se move pela peça. As máquinas de fresagem podem ser usadas para produzir formas específicas e contornos, para obter superfícies planas e suaves na

Figura 8 – Processo de usinagem.

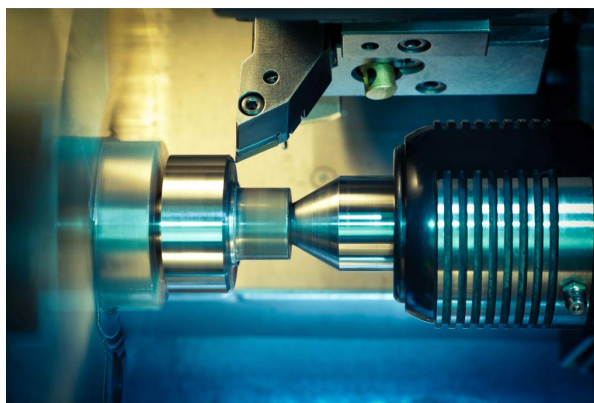


Fonte: [M&S INDUSTRIAL](#) (2023)

peça de trabalho, criação de roscas em peças metálicas, perfuração, arredondamento de cantos, entre outros. Suas aplicações incluem desde a fabricação de peças para motores, transmissões, chassis, entre outros na indústria automobilística, na fabricação de componentes eletrônicos, como placas de circuito impresso da indústria eletrônica e produção de moldes para injeção de plástico, matrizes de estampagem, entre outros.

- **Torneamento:** Processo que se diferencia da usinagem, pois, ao invés de movimentar a ferramenta em diversos eixos, a peça é girada, então, usa uma ferramenta de corte para remover material enquanto a peça está em rotação. Para isso é usado o mandril que fixa a peça de trabalho e a mantém girando em torno de seu eixo enquanto o carro transversal (parte do torno que move a ferramenta de corte), se movimenta de forma perpendicular ao eixo da peça, permitindo a criação de diferentes formas, Como visto na Figura 9.

Figura 9 – Processo de torneamento.



Fonte: [M&S INDUSTRIAL](#) (2023)

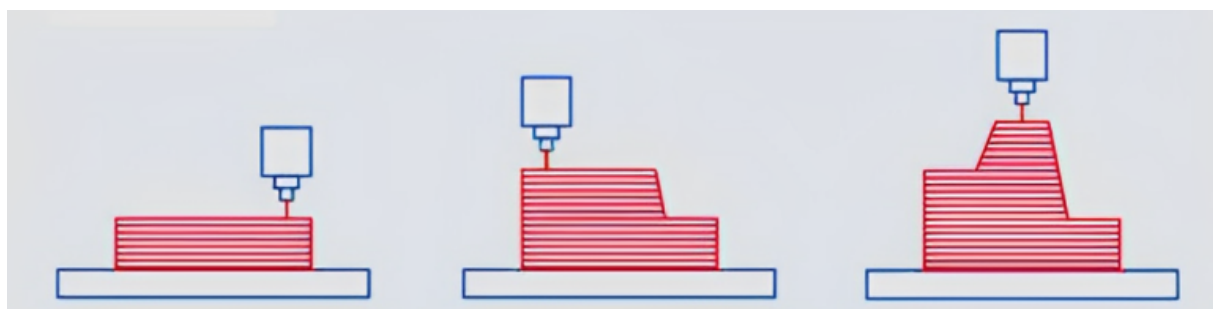
As máquinas de torneamento podem ser usadas para produzir peças cilíndricas, cônicas e esféricas. Suas aplicações incluem desde a fabricação de eixos, pinos, pistões e outros componentes do motor na indústria automobilística; usinagem de peças para válvulas, conexões e outras aplicações na indústria de petróleo; até a produção de peças estruturais, como parafusos e porcas.

Apesar de a manufatura subtrativa ser amplamente utilizada devido à sua precisão e à alta qualidade do acabamento superficial, ela apresenta limitações em termos de desperdício de material e complexidade geométrica. Para superar esses desafios, a manufatura aditiva emerge como uma solução complementar, onde material é adicionado camada por camada, oferecendo maior flexibilidade na criação de geometrias complexas.

2.2.3 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva caracteriza-se pelo emprego de equipamentos capazes de fabricar objetos por meio da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo digital tridimensional (3D), usualmente obtido por meio do emprego de um sistema CAD, ilustrado na Figura 10. Assim, tem-se o conceito de produção por adição de material em contraste à produção por métodos convencionais, em que a peça é obtida pela retirada de material, como na usinagem (RODRIGUES et al., 2017).

Figura 10 – Ilustração do processo de manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de REDWOOD (2017).

Os primeiros equipamentos de manufatura aditiva foram máquinas de prototipagem rápida (*rapid prototyping*), que começaram a surgir a partir da década de 1980. Entretanto, esses equipamentos não se limitam simplesmente à produção de protótipos, ingressando na manufatura final de produtos e “depositando” uma variedade maior de materiais, incluindo plásticos, cerâmicas e ligas metálicas. Assim, a terminologia mais usual no âmbito técnico e adotada pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) é manufatura aditiva (*additive manufacturing*) (RODRIGUES et al., 2017).

Rodrigues et al. (2017) afirmam que as características fundamentais da manufatura aditiva são a redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto, a economia de material e a possibilidade de combinação diferente de geometria e materiais,

eventualmente mais de um na mesma peça. Para a produção de uma única peça de geometria complexa por meios subtrativos, pode ser necessário o emprego de diversas máquinas, ferramental específico e de diversos processos de usinagem e de acabamento até o produto final, enquanto que uma máquina de manufatura aditiva pode produzir a peça em uma única etapa ou em um número significativamente menor de etapas.

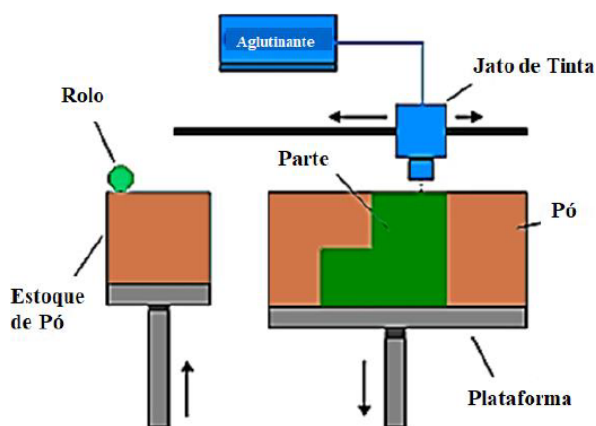
Rodrigues et al. (2017) completam que uma vez quando a peça é produzida por deposição de material, camada por camada, não haveria desperdício de materiais, como é o caso de cavacos produzidos pela usinagem. Assim, a manufatura aditiva serve como meio de produzir protótipos maneira precisa e eficiente. Serve também para a produção de bens complexos, como próteses médicas personalizadas e, cada vez mais, mostra-se como um integrante da cadeia produtiva na indústria.

Almeida et al. (2020) explicam que a manufatura aditiva pode ser usada para a produção de peças para veículos espaciais, componentes de motores aeroespaciais e vasos de pressão, pode ser aplicada em áreas automotivas, aeroespaciais, biomédicas entre outras. Citam também usos nas indústrias aeroespacial e automobilística auxiliando principalmente na redução de custos tanto na fabricação, quanto no reparo de partes. Almeida et al. (2020) destacam também a aplicação no desenvolvimento de estruturas leves empregadas nas áreas aeroespacial, médica, odontológica, cirúrgica, automotiva, de petróleo e gás.

Almeida et al. (2020) classificam os processos de manufatura aditiva em sete categorias, diferenciadas pelos tipos de máquinas empregadas, esses processos são:

a) *Binder jetting* (aglutinante): um processo no qual um agente de ligação líquida é depositado seletivamente para juntarem-se materiais em pó, Figura 11.

Figura 11 – Processo *binder jetting* (aglutinante).

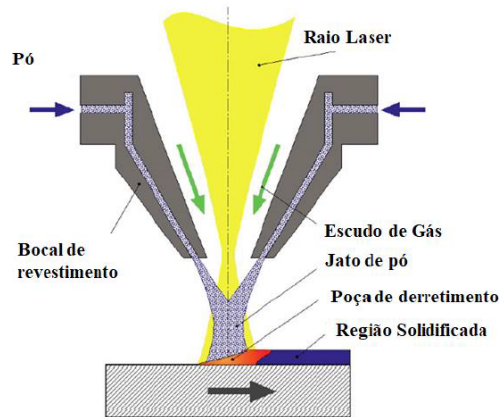


Fonte: ALMEIDA et al. (2020).

b) *Directed energy deposition* (deposição de energia direcionada): processo em que o foco de energia térmica é usado para fundir materiais derretendo enquanto estão sendo depositados. O foco térmico significa uma fonte de energia, por exemplo, laser, feixe de

elétrons ou arco de plasma, Figura 12.

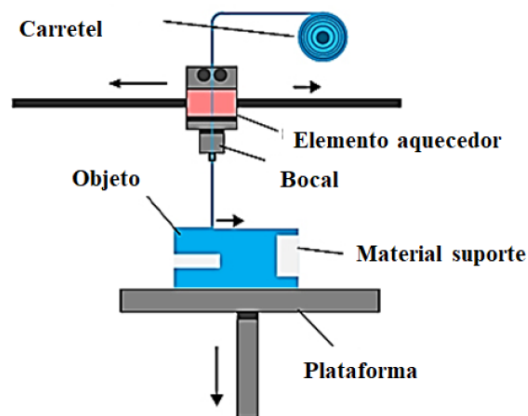
Figura 12 – Processo *directed energy deposition* (deposição de energia direcionada).



Fonte: ALMEIDA et al. (2020).

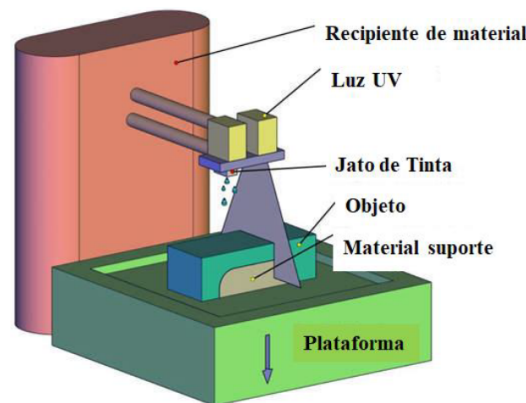
c) *Material extrusion* (extrusão de material): material é depositado seletivamente através de um bico ou orifício. O material é geralmente um polímero, mas também pode ser um metal, cerâmica ou outro material, Figura 13.

Figura 13 – Processo *material extrusion* (extrusão de material).



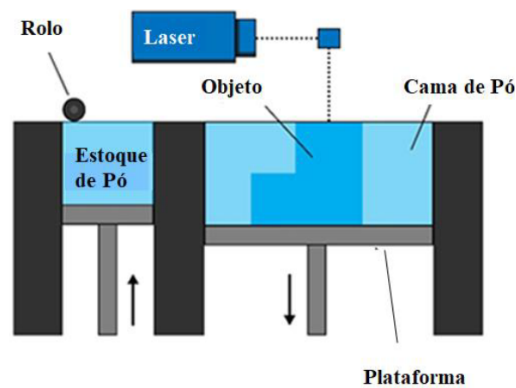
Fonte: ALMEIDA et al. (2020).

d) *Material jetting* (jateamento de material): um processo em que gotículas de material são seletivamente depositadas. Exemplos de materiais incluem foto polímero e cera, Figura 14.

Figura 14 – Processo *material jetting* (jateamento de material).

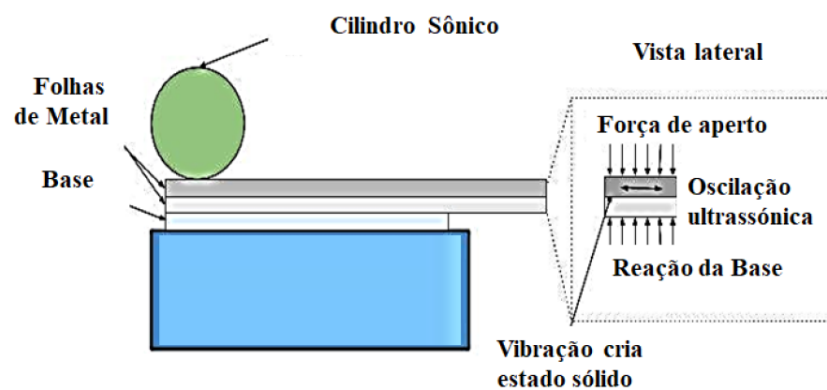
Fonte: ALMEIDA et al. (2020).

e) *Powder bed fusion* (cama de fusão de pó): um processo em que a energia térmica combina seletivamente regiões de uma camada de pó depositada, Figura 15.

Figura 15 – Processo *powder bed fusion* (cama de fusão de pó).

Fonte: ALMEIDA et al. (2020).

f) *Sheet lamination* (laminação de chapas): um processo em que folhas de material são ligadas para formar um objeto, Figura 16.

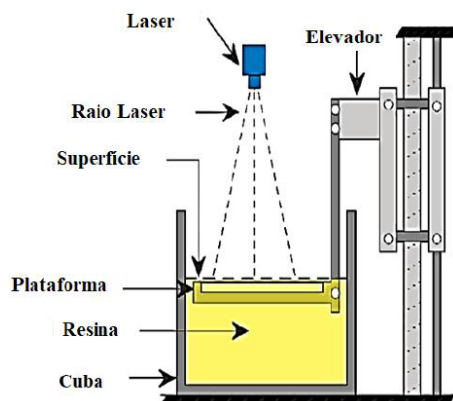
Figura 16 – Processo *sheet lamination* (laminação de chapas).

Fonte: ALMEIDA et al. (2020).

g) *Vat photopolymerization* (fotopolimerização em tanque): um processo em que

o foto polímero líquido em um tanque é seletivamente polimerizado por ativação de luz, Figura 17.

Figura 17 – Processo *Vat photopolymerization* (fotopolimerização em tanque).



Fonte: ALMEIDA et al. (2020).

A manufatura aditiva não só ampliou as possibilidades na criação de peças complexas, mas também encontrou aplicações em processos industriais como a soldagem a arco elétrico. Esta técnica, essencial na manufatura de componentes metálicos, será abordada a seguir, destacando suas particularidades e sua integração com a manufatura aditiva.

2.3 Radiação

Radiação é a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, como a luz visível, a radiação infravermelha e a radiação ultravioleta. Todo mundo já sentiu o calor da radiação solar e o intenso calor proveniente das brasas de carvão de uma churrasqueira ou uma lareira. A maior parte do calor proveniente desses corpos quentes atinge você por radiação, e não por condução ou convecção do ar. O calor seria transferido a você mesmo que entre você e a fonte de calor existisse, apenas vácuo (YOUNG; FREEDMAN; FORD, 2020).

A taxa de radiação de energia de uma superfície é proporcional à área A da superfície e à quarta potência da temperatura absoluta (Kelvin) T . Essa taxa também depende da natureza da superfície; essa dependência é descrita por uma grandeza e , denominada emissividade (YOUNG; FREEDMAN; FORD, 2020).

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2017), sendo um número sem dimensões compreendido entre 0 e 1, e representa a razão entre a taxa de radiação de uma superfície particular e a taxa de radiação de uma superfície de um corpo ideal com as mesmas área e temperatura. A emissividade também depende ligeiramente da temperatura. Logo, podemos expressar a taxa de transferência de calor através da Equação 1:

$$H = Ae\sigma T^4 \quad (1)$$

Esta relação é denominada lei de Stefan-Boltzmann em homenagem a seus descobridores, que viveram no final do século XIX. A constante de Stefan-Boltzmann σ (letra grega sigma) é uma constante fundamental; seu melhor valor numérico atualmente conhecido é expressa pela Equação 2: (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2017)

$$\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4 \quad (2)$$

Compreender os princípios da radiação e a transferência de calor é um complemento para a análise dos processos térmicos envolvidos na soldagem a arco elétrico. A radiação, como uma das formas de transferência de calor, desempenha um papel na distribuição da temperatura durante a soldagem, influenciando diretamente a qualidade da união e as propriedades do material resultante. A seguir, serão discutidos os fundamentos da soldagem a arco elétrico, com foco em como o calor gerado pelo arco é controlado e utilizado na fusão de materiais.

2.4 Soldagem a arco elétrico

A soldagem pode ser definida basicamente como a técnica de unir duas ou mais partes de metais ou não metais por meio da fusão localizada, tornando a união permanente é assegurando entre elas a continuidade e as características físicas, químicas e metalúrgicas do material. Sendo este processo muito versátil, não há limites para sua aplicação podendo variar método e tipo de material a ser soldado (COSTA; CARDOSO et al., 2019).

Marques (2005), afirma que o arco elétrico consiste em uma descarga elétrica mantida por meio de um gás ionizado a altas temperaturas chamado plasma, o qual produz energia térmica suficiente para ser usada na soldagem como fonte de calor para a fusão localizada de peças. Ainda, de acordo com Marques (2005), esse comportamento do arco elétrico foi observado pela primeira vez por Sir Humphrey no início do século XIX.

A soldagem a arco pode ser usada na manufatura aditiva de várias maneiras. Uma delas é usar a soldagem para unir camadas de material de adição, o que é semelhante à soldagem convencional, no entanto é feito em uma escala muito menor. Outra maneira de usar a soldagem a arco na manufatura aditiva é usar o arco elétrico para fundir um material de adição sobre um substrato, podendo ser usado para criar formas complexas ou para reparar peças danificadas.

Dada a versatilidade da soldagem a arco elétrico, esta técnica pode ser adaptada para processos de manufatura aditiva, especialmente na deposição de materiais metálicos. A manufatura aditiva por deposição a arco, um desses processos, será explorada em seguida, destacando suas aplicações e vantagens na produção de componentes metálicos.

2.4.1 Manufatura aditiva por deposição a arco

A relação entre a manufatura aditiva e a soldagem em metal é que ambas podem usar processos de soldagem para depositar material metálico e formar peças complexas.

De acordo com [Neto \(2020\)](#) a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) permite a fabricação de peças impossíveis de serem obtidas através da manufatura subtrativa e tem aplicações nos setores aeroespacial, automobilístico, biomédico e geração de energia. Alguns exemplos de processos de soldagem usados na manufatura aditiva são:

- **Soldagem por arco com eletrodo de tungstênio (GTAW):** usa um eletrodo não consumível de tungstênio e uma proteção gasosa inerte para criar um arco elétrico que funde o metal de adição, que pode ser na forma de arame ou pó.
- **Soldagem por arco com eletrodo metálico (GMAW):** usa um eletrodo consumível de metal e uma proteção gasosa inerte ou ativa para criar um arco elétrico que funde o metal de adição, na forma de arame.
- **Soldagem por arco submerso (SAW):** usa um eletrodo consumível de metal e uma camada de fluxo granular que protege e estabiliza o arco elétrico, que funde o metal de adição, que é na forma de arame.
- **Soldagem a laser (LW):** usa um feixe de laser de alta potência para fundir o metal de adição, que pode entrar na forma de arame ou pó.
- **Soldagem por feixe de elétrons (EBW):** usa um feixe de elétrons de alta energia para fundir o metal de adição, que pode entrar na forma de arame ou pó.

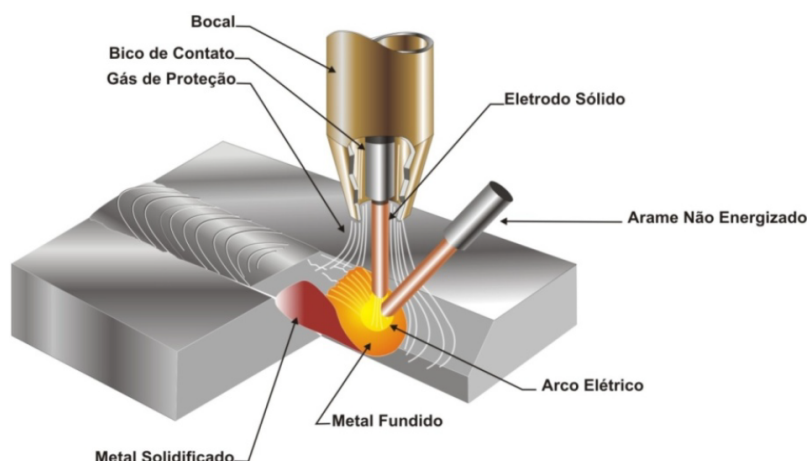
Diversos processos de soldagem na MADA têm sido foco de estudos para alcançar altas taxas de deposição em materiais metálicos, entre eles o processo Gas Metal Arc Welding (GMAW), que pode alcançar taxas de deposição entre duas ou três vezes maiores que o Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) e o Plasma Arc Welding (PAW), tornando a GMAW uma opção interessante para a manufatura aditiva de componentes metálicos. No entanto, a aplicação do GMAW como fonte de calor em MADA requer tempo e recursos para encontrar parâmetros operacionais adequados para fornecer características geométricas, acabamento superficial e propriedades do material adequados ([TEIXEIRA et al., 2022](#)).

2.4.1.1 Técnica GMAW-CW

Para alcançar um aumento na taxa de deposição sem aumentar a entrada de calor na junta, destaca-se o processo de soldagem GMAW-CW, representado na Figura 18.

Esse processo envolve a adição de um arame não energizado (frio) posicionado à frente do arame eletrodo, alinhado à direção de soldagem, com velocidade controlada

Figura 18 – Esquema do processo GMAW-CW.



Fonte: CABRAL et al. (2011).

na poça de fusão. O objetivo é aproveitar a energia e a estabilidade do arco elétrico do GMAW sem causar perturbações significativas no processo (MOTA et al., 2017). As características de alta taxa de deposição e maior velocidade de resfriamento da poça de fusão, embora possam alterar a estrutura de solidificação do metal de solda, podem ser vantajosas na manufatura aditiva por deposição a arco, reduzindo o tempo de fabricação de um componente.

O monitoramento térmico é essencial na manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) para controlar o acúmulo de calor e superar limitações relacionadas ao ciclo de deposição, problemas geométricos e anisotropias mecânicas. O processo GMAW-CW, uma variante do processo de deposição Gas Metal Arc (GMA), destaca-se como uma opção para reduzir a transferência de calor para as camadas em deposição sem afetar a taxa de deposição. Já a soldagem GMAW-CW exige mais rigor e um maior controle dos parâmetros operacionais de soldagem, haja vista que a introdução do arame frio, para a composição do metal fundido, não deve perturbar ou interferir na estabilidade do arco e nem na transferência metálica (TEIXEIRA et al., 2022).

O gerenciamento térmico é importante na técnica GMAW-CW por alguns motivos, pois a temperatura do metal de base, do metal de adição e do arco elétrico afeta a qualidade da solda. Se a temperatura for muito baixa, a solda pode ser frágil ou não se unir adequadamente ao metal de base, se a temperatura for muito alta, a solda pode ser porosa ou sobreaquecida, como observado na Figura 19.

O calor do arco elétrico pode causar danos ao material adjacente à solda, se a temperatura for muito alta. O material pode deformar, trincar ou até mesmo derreter. O gerenciamento térmico pode ajudar a melhorar a produtividade da soldagem GMAW-CW. Ao controlar a temperatura do metal de base, pode-se aumentar a taxa de deposição e reduzir o tempo de soldagem.

Figura 19 – Exemplo de peça com mal gerenciamento térmico.



Fonte: [ROSLI et al. \(2018\)](#).

Algo semelhante ocorre no processo de impressão 3D de filamento, onde o gerenciamento térmico também é importante para garantir a qualidade da impressão, uma vez que a temperatura do bico da impressora e da mesa de impressão afeta a qualidade da impressão. Se a temperatura do bico for muito baixa, o filamento não derreterá adequadamente e a impressão será frágil ou terá defeitos. Do mesmo modo, se a temperatura do bico for muito alta, o filamento pode derreter demais e a impressão pode ficar deformada ou sobreaquecida.

A manufatura aditiva por deposição a arco combina a precisão da soldagem a arco elétrico com a flexibilidade da adição controlada de material, permitindo a fabricação de peças metálicas complexas. Este método tem sido amplamente estudado devido à sua capacidade de produzir componentes com altas taxas de deposição, que seriam difíceis de alcançar por meio de técnicas convencionais.

2.5 Aquisição de dados

Segundo [Grando \(2013\)](#), a aquisição de dados (DAQ) é o procedimento no qual um fenômeno físico de interesse é convertido em um sinal elétrico proporcional à grandeza medida e, subsequentemente, transformado em formato digital. Esse sinal digital é então processado, analisado e armazenado com a assistência de um computador. O processo completo de aquisição de dados é composto por blocos funcionais fundamentais, que incluem sensores ou transdutores, condicionamento de sinais, hardware de medição, e um computador equipado com *software* programável, conforme ilustrado na Figura 20.

É necessária uma união de hardware e software para fazer aquisição de dados. O hardware é a parte formada por sensores (equipamentos que convertem grandezas físicas em sinais elétricos) e o microprocessador (responsável pela coleta e armazenamento dos dados). Por sua vez, o software é responsável pela análise dos dados, o qual permite visualizar, explorar e interpretar os dados coletados.

Figura 20 – Esquema simplificado de aquisição de dados.



Fonte: INSTRUMENTS (2013).

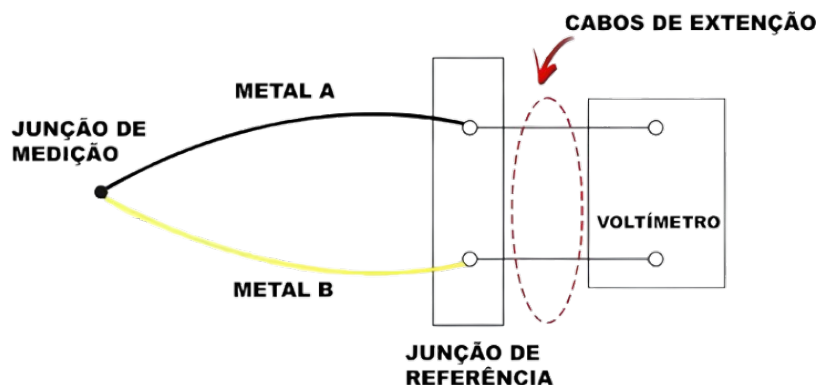
2.5.1 Sensores

De acordo com Grando (2013), sensores e transdutores são os elementos responsáveis em fazer a conexão direta entre o mundo real e o sistema de aquisição de dados. Dessa forma, grandezas físicas tais como temperatura, radiação solar, vibração, vazão entre outros, são convertidas em grandezas elétricas (tensões, correntes) permitindo a sua leitura por sistemas eletrônicos.

Um sensor é um dispositivo que responde a um estímulo físico ou químico de maneira específica, produzindo um sinal que pode ser transformado em outra grandeza física para fins de medição e/ou monitoramento. Desta forma, o sensor associado a um módulo de transformação do estímulo em uma grandeza pode ser definido como transdutor ou medidor, que converte um tipo de energia em outro, para fins de medição (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

Na taxonomia inicial de sensores, estes são categorizados em duas classes principais: Ativos e Passivos. Os sensores Ativos distinguem-se por necessitarem de uma fonte de energia externa para a sua operação, que pode ser um sinal de excitação ou de potência. Por exemplo, um sensor de fluxo ultrassônico ativo requer uma fonte de alimentação para gerar ondas acústicas. Em contraste, os sensores Passivos são autônomos, não dependendo de nenhuma fonte de energia externa, sendo capazes de converter a energia do fenômeno que estão a medir numa resposta elétrica mensurável, como os termopares, como ilustrado na Figura 21, que geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura. (Blog Raisa, 2024).

Figura 21 – Esquemático básico de um sensor termopar.



Fonte: [Newton C. Braga \(2024\)](#).

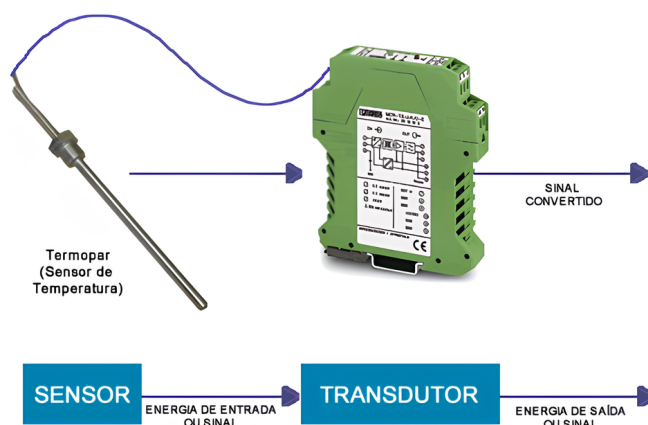
Outra classificação dos sensores baseia-se no princípio de detecção empregado. Os sensores podem utilizar diversos meios de detecção, incluindo, mas não limitando-se a elétricos, biológicos, químicos e radioativos. Um exemplo pertinente é o biossensor, que utiliza um componente biológico, como uma enzima, para detectar uma substância química específica ([Blog Raísa, 2024](#)).

Finalmente, a classificação subsequente relaciona-se com o fenômeno de conversão energética que fundamenta o funcionamento do sensor. Este fenômeno pode ser fotoelétrico, termoelétrico, eletroquímico, eletromagnético, termoóptico, entre outros. Um exemplo ilustrativo é o fotodiodo, um sensor que opera com base no efeito fotoelétrico, convertendo a luz em corrente elétrica ([Blog Raísa, 2024](#)).

De acordo com [Ramírez, Jiménez e Carreño \(2014\)](#), um transdutor é definido como um dispositivo capaz de converter uma variável física em outra de domínio diferente. De maneira mais clara, um transdutor é um termo geral para qualquer elemento que converte energia. Ele pode ser classificado como um sensor ou um atuador, dependendo da função que desempenha. Um transdutor atua como sensor quando converte uma grandeza física em uma informação utilizável, que pode ser lida e analisada por um sistema. [Ramírez, Jiménez e Carreño \(2014\)](#) completam que por outro lado, ele funciona como um atuador quando recebe uma informação como entrada e converte essa informação em uma ação física, amplificando a energia para atuar em um determinado processo.

Portanto, a principal diferença está na direção da conversão: enquanto o sensor converte grandezas físicas em dados úteis, o atuador transforma dados em ações físicas, conforme mostrado na Figura 22. Atualmente, é importante destacar que muitos sensores de baixo custo são comercializados em módulos que já incluem o conversor analógico-digital (AD) e a interface de comunicação serial integrados (Pode-se observar na Figura 34 presente em 3.3.1). Essa integração facilita a conexão dos sensores com sistemas de processamento de dados, reduzindo a complexidade do projeto e acelerando o desenvolvimento de soluções que utilizam esses componentes.

Figura 22 – O processo de sensoriamento.



Fonte: THOMAZINI; ALBUQUERQUE (2020).

A eficácia de um sistema de aquisição de dados depende da precisão dos sensores utilizados, que são responsáveis por capturar os fenômenos físicos e convertê-los em sinais elétricos mensuráveis. A seguir, serão detalhados os diferentes tipos de sensores empregados neste processo, destacando suas características e aplicações.

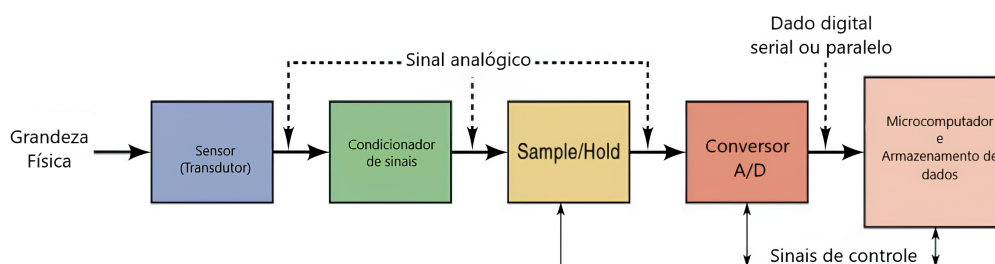
2.6 Hardware de aquisição de dados

Hardware refere-se aos componentes físicos e tangíveis de um sistema computacional, eletrônico ou tecnológico. São as partes físicas de um computador ou dispositivo eletrônico, que podem ser tocadas e vistas, tais como processadores, memória RAM, placas-mãe, discos rígidos, placas de vídeo, monitores, teclados, mouses e outros dispositivos eletrônicos.

Hardware de aquisição de dados é um conjunto de dispositivos que permitem coletar, converter e armazenar dados de sensores, instrumentos ou outras fontes. Esses dados podem ser analisados, processados ou transmitidos para outros sistemas. O *hardware* de aquisição de dados pode incluir placas, módulos, sistemas integrados ou dispositivos portáteis, dependendo da aplicação e do nível de complexidade desejado (Grant Maloy Smith, 2024).

Os seguintes componentes ilustrados na Figura 23 são as partes fundamentais do sistema de aquisição de dados:

Figura 23 – Diagrama de blocos dos subcomponentes de aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria

2.6.1 Condicionador

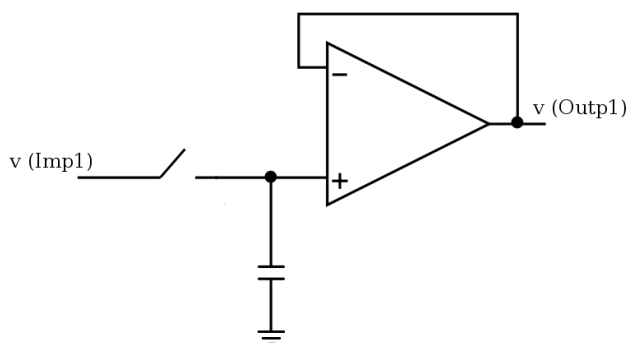
Uma vez que a grandeza já tenha sido convertida em sinais elétricos, se faz necessário tratar esses sinais para que sejam compatíveis com o método de aquisição eleito. Desse modo, podemos utilizar os condicionadores de sinais para amplificar ou atenuar, deslocar nível médio, detectar pico, nível médio ou valor eficaz, filtrar e/ou isolar o sistema para uma medição mais adequada (FRANÇA et al., 1997).

Por exemplo, se um sensor gera um sinal de 0-10 mV e o sistema de aquisição opera na faixa de 0-5 V, um amplificador pode ser utilizado para elevar o sinal para o nível necessário. Além disso, é importante considerar a limitação de tensão ou corrente para proteger o sistema de aquisição de possíveis danos causados por sobretensão ou sobrecorrente. A filtragem também é importante para remover ruídos e interferências que podem distorcer o sinal medido. Um filtro passa-baixa, por exemplo, pode ser aplicado para atenuar frequências altas que não são pertinentes ao sinal de interesse, garantindo assim uma medição mais precisa e confiável (FRANÇA et al., 1997).

2.6.1.1 Circuito *Sample and Hold*

Os circuitos de amostragem e retenção (*sample and holding*) são muito empregados em conversores analógicos-digitais (A/D). Estes circuitos tomam o valor de uma grandeza e o mantém por um certo tempo registrados na forma de uma carga num capacitor. Este valor pode então ser lido por um conversor de uma forma fixa, em um determinado intervalo de tempo (Grant Maloy Smith, 2024). A Figura 24 exemplifica um esquemático de um circuito *Sample and Hold* simples utilizando um capacitor e um amplificador operacional.

Figura 24 – Esquemático do circuito *Sample and Hold*.



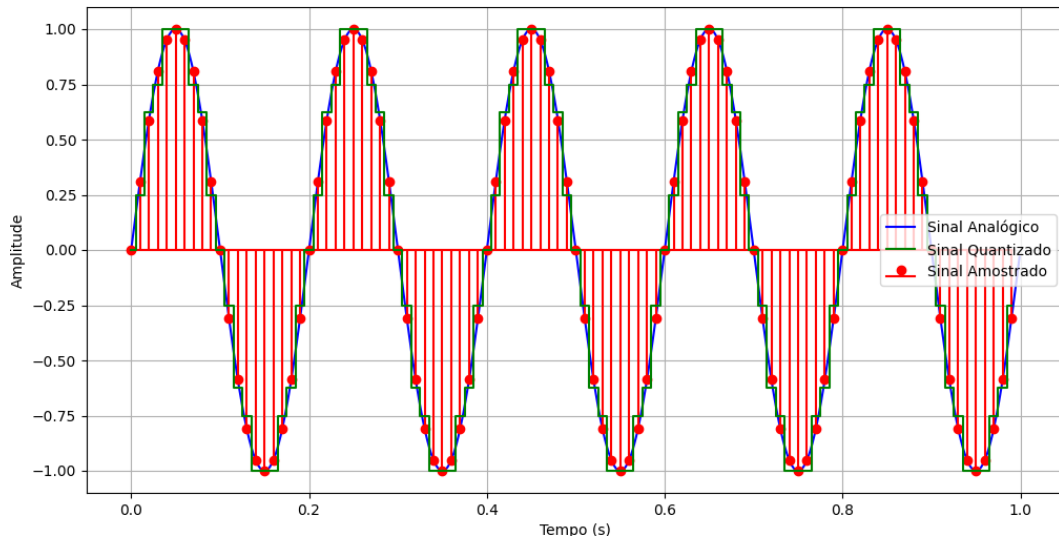
Fonte: Grant Maloy Smith (2024).

2.6.2 Conversor A/D

As grandezas observáveis em fenômenos físicos são em geral de natureza analógica, ou seja, podem assumir qualquer valor real. O processamento e captura dessas grandezas no

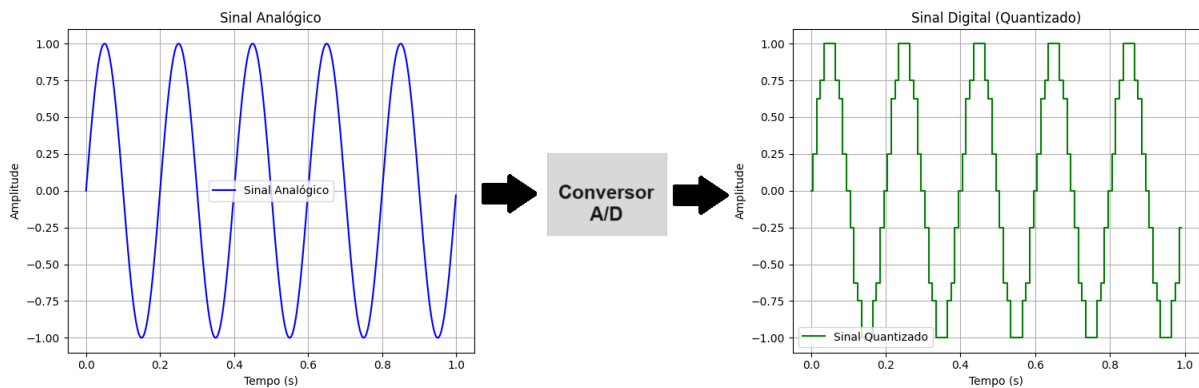
universo digital exige que uma conversão de formato. Para isso, necessitamos de circuitos capazes de realizar essa conversão ao mesmo tempo que se mantém certas características do sinal real. Ao circuito responsável por realizar esse processo dá-se o nome de conversor analógico-digital (conversor A/D) (RIBEIRO, 2017). As Figuras 25 e 26 representam esse processo de conversão de um sinal analógico para digital.

Figura 25 – Gráfico de conversão Analógico-Digital.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Gráficos de conversão Analógico-Digital.

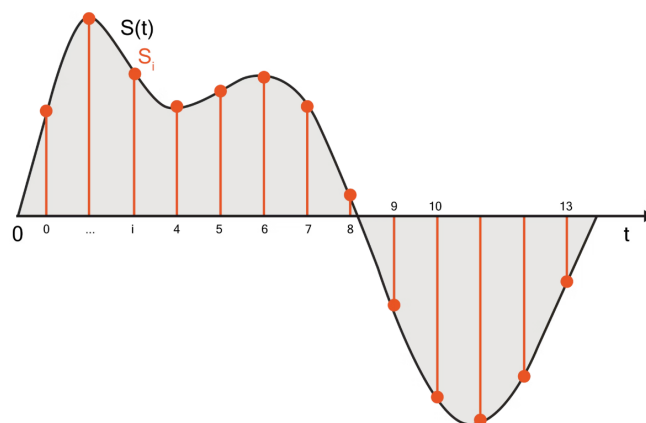


Fonte: Autoria própria.

Franklin, Powell e Emami-Naeini (2013) explicam que esse dispositivo amostra uma variável física, geralmente uma tensão elétrica, e depois converte a amostra em um número binário que normalmente possui resolução de 10 à 16 bits. A conversão do sinal analógico $y(t)$ para as amostras, $y(kT)$, ocorre repetidamente em instantes de tempo de T segundos. T é o período de amostragem, e $\frac{1}{T}$ é a taxa de amostragem em *Hertz*. O sinal amostrado é $y(kT)$, com k podendo assumir qualquer valor inteiro. Muitas vezes, ele é escrito simplesmente como $y(k)$. Chamamos esse tipo de variável de sinal discreto para distingui-la de um sinal contínuo, $y(t)$, que existe continuamente no tempo.

Em um sistema digital, o *clock* define intervalos de tempo nos quais a informação é considerada constante. Tecnicamente, é possível tratar os instantes de amostragem como impulsos, e assim, o sinal amostrado é zero entre um período de amostragem e outro. A Figura 27 demonstra esse processo ao ilustrar a amostragem de um sinal analógico: a linha contínua representa o sinal original, enquanto as marcas indicam os momentos específicos de amostragem. Este modelo de impulsos é usado para entender como os sinais são capturados e processados em sistemas digitais, permitindo a reconstrução do sinal analógico a partir de suas amostras discretas.

Figura 27 – Taxa de amostragem.

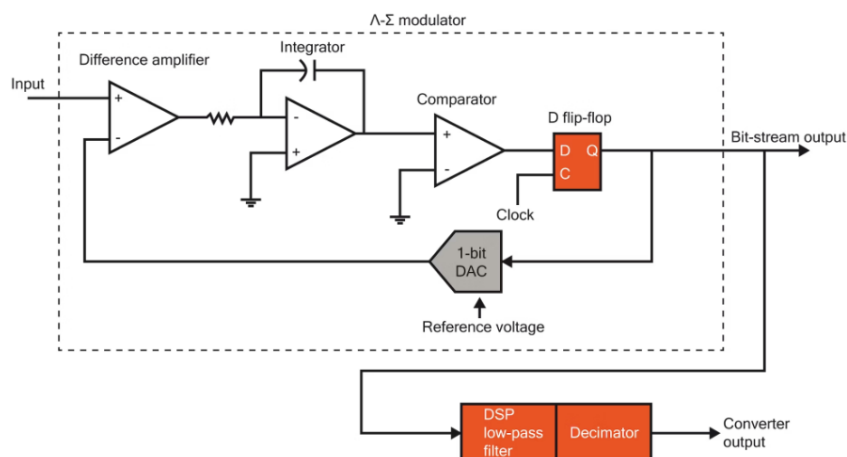


Fonte: Grant Maloy Smith (2024).

Segundo Grant Maloy Smith (2024), existem cinco tipos de conversores analógico-digital, mas os mais comuns utilizados no processo de aquisição de dados são:

- **Aproximação sucessiva** : Oferece um equilíbrio de velocidade e resolução e lida com uma ampla variedade de sinais. Já existe há muito tempo, portanto, são estáveis e confiáveis, e os chips são relativamente baratos. Eles podem ser configurados para cartões A/D simples, onde um único chip A/D é "compartilhado" por vários canais de entrada (placas A/D multiplexadas) ou em configurações em que cada canal de entrada possui seu próprio A/D para verdadeira amostragem simultânea.
- **Delta-sigma ($\Delta\Sigma$)**: aproveita a tecnologia DSP (*Digital Signal Processor*) para melhorar a resolução de amplitude e reduzir o ruído de quantização de alta frequência inerente dos projetos com Aproximação sucessiva. O design complexo dos conversores delta-sigma os tornam ideais para aplicações dinâmicas que requerem maior resolução. É por isso que eles são comumente encontrados em áudio, som em uma ampla variedade de aplicações de aquisição de dados de última geração. A Figura 28 exemplifica um diagrama de blocos típico do Delta-Sigma.

Figura 28 – Diagrama de blocos típico do Delta-Sigma.



Fonte: [Grant Maloy Smith \(2024\)](#).

2.6.3 Processador

O processador, também chamado de CPU (*central processing unit*), é o componente de hardware responsável por processar dados e transformar em informação. A CPU serve para executar instruções gerais de programas, funcionando como o “cérebro” do computador. Ela é dividida em três componentes principais: a Unidade Lógica Aritmética (ULA), a Unidade de Controle (UC) e os Registradores. Por ser a unidade central de processamento, é muitas vezes chamada apenas de “processador” ([EletronPI, 2024](#)).

Na aquisição de dados, o processador desempenha o papel de gerenciar o processo de aquisição. Ele controla o conversor analógico-digital definindo as configurações de conversão, e lendo os resultados, além de armazenar os dados do conversor AD e processar os dados para fins de análise ou exibição. O processador também controla outros dispositivos envolvidos na aquisição de dados, como sensores, *displays* e memórias ([EletronPI, 2024](#)).

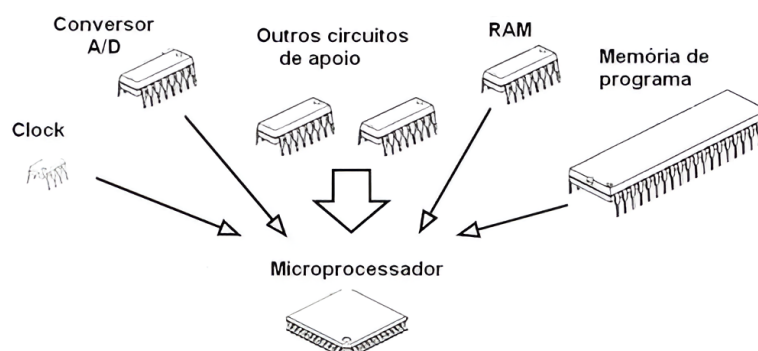
Nesse contexto, é importante entender que o termo “processador” é um termo genérico que pode se referir a vários tipos de dispositivos de processamento de dados, incluindo microcontroladores. Os microcontroladores são um tipo de processador projetado para aplicações dedicadas e são geralmente usados em sistemas de aquisição de dados de baixo custo. ([EletronPI, 2024](#)).

Por outro lado, os computadores de propósito geral são mais poderosos que os microcontroladores e podem ser usados em sistemas de aquisição de dados de alto desempenho. Eles podem, além de coletar os dados, realizar múltiplas tarefas simultaneamente, como processamento complexo de dados em tempo real, análise estatística avançada, execução de algoritmos de aprendizado de máquina e integração com sistemas de redes e comunicação em larga escala. Sua capacidade de processamento e armazenamento permite lidar com volumes massivos de dados e suportar interfaces de usuário mais sofisticadas e interativas ([EletronPI, 2024](#)).

Microprocessadores para aplicações de controle geralmente vêm com palavra digital de tamanho de 8, 16 ou 32 bits, embora alguns já estejam disponíveis com 12 bits. Tamanhos de palavras maiores fornecem maior precisão, mas tem custos maiores. A solução mais econômica muitas vezes é usar um microprocessador de 8 bits, mas duas palavras, digitais para armazenar um valor (precisão dupla) nas áreas do controlador que são fundamentais para a precisão do sistema (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

Uma distinção entre microprocessadores e microcontroladores reside na maneira como interagem com os periféricos, os microprocessadores se conectam com componentes externos, como memórias RAM e *flash*, conversores A/D e sistemas de *clock*, que são fisicamente separados do processador principal, conforme ilustrado na Figura 29.

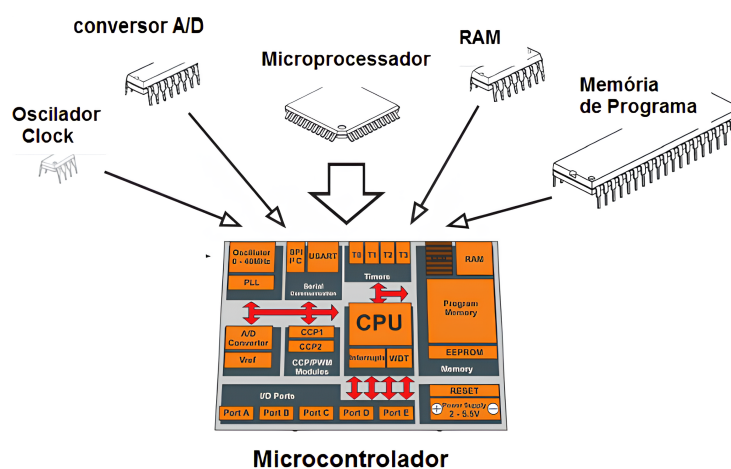
Figura 29 – Diagrama de um microprocessador.



Fonte : EletronPI (2024).

Por outro lado, os microcontroladores integram todos esses periféricos em um único circuito integrado, funcionando como um SoC (*System-on-a-Chip*), o que é visto na Figura 30.

Figura 30 – Diagrama de um microcontrolador.



Fonte: EletronPI (2024).

Com o hardware de aquisição de dados devidamente configurado, é necessário estabelecer uma forma eficiente de transmitir os dados coletados para sistemas de processamento ou armazenamento. A comunicação serial surge como uma solução eficaz para essa necessidade, permitindo a troca de informações entre dispositivos de forma rápida e confiável. Na próxima seção, serão explorados os diferentes padrões de comunicação serial utilizados em sistemas de aquisição de dados.

2.7 Comunicação serial

A comunicação serial é importante na aquisição de dados porque permite a transmissão de informações entre dispositivos de forma rápida, eficiente e confiável. Ela utiliza um protocolo que define como os dados são enviados e recebidos, garantindo que não haja perda ou corrupção dos dados, também economiza recursos, pois utiliza apenas um par de fios para transmitir os dados, ao invés de vários fios paralelos. Além disso, a comunicação serial pode ser adaptada a diferentes tipos de dispositivos e aplicações, como sensores, controladores, computadores, entre outros (Exxacta, 2024).

Seu funcionamento baseia-se no método de transmissão de dados em que bits de dados são enviados sequencialmente, um após o outro, por meio de um único canal de comunicação. Isso contrasta com a comunicação paralela, onde vários bits de dados são transmitidos simultaneamente em canais separados (Exxacta, 2024).

Exxacta (2024) cita que diversas tecnologias de interligação serial entre dispositivos foram desenvolvidas, podendo ser separadas em duas grandes categorias, a comunicação síncrona e a comunicação assíncrona. Dentre os métodos de comunicação mais conhecidos, destacam-se três: UART: *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*, SPI: *Serial Peripheral Interface*, I2C: *Inter Integrated Circuit*.

2.7.1 Padrão USB

USB (*Universal Serial Bus*) é uma interface para transmissão serial de dados e distribuição de energia, desenvolvida pelo USB *Developers Forum* (USB IF). As causas que levaram à sua origem estão diretamente relacionadas às principais deficiências que os computadores apresentavam na primeira metade da década de 90, tais como: a escassez de determinados recursos (linhas de interrupção IRQs e canais de acesso direto à memória DMAs), as limitações em termos de capacidade de expansão e desempenho, bem como a lentidão das portas seriais e paralelas e a diversidade de interfaces para conectar dispositivos a computadores (Emerson Alecrim; Paulo Higa, 2024).

O USB é uma interface padrão amplamente adotada em uma variedade de dispositivos eletrônicos, como computadores, *smartphones*, *tablets*, impressoras, câmeras, e uma variedade de periféricos. Isso significa que muitos dispositivos podem se comunicar entre

si usando o USB, independentemente do fabricante ou do sistema operacional. Ele usa um protocolo síncrono e suporta uma variedade de velocidades de transferência de dados, que são especificadas pelas diferentes versões do padrão USB. As velocidades de transferência comuns incluem USB 2.0 (até 480 Mbps), USB 3.0 (até 5 Gbps), USB 3.1 (até 10 Gbps) e USB 3.2 (até 20 Gbps) (Emerson Alecrim; Paulo Higa, 2024).

Uma das características distintivas do USB é sua capacidade de fornecer energia elétrica aos dispositivos conectados, o que permite que muitos dispositivos sejam alimentados diretamente pela porta USB do computador ou por um adaptador de energia USB, as diferentes versões do USB têm especificações diferentes de fornecimento de energia, sendo a mais comum 5 volts.

Embora o hardware de aquisição de dados seja essencial para a coleta e o condicionamento de sinais, é o software que permite a análise e a interpretação desses dados. O próximo tópico abordará os softwares de aquisição de dados, que incluem o firmware e as interfaces de usuário utilizadas para monitorar e controlar os processos em tempo real.

2.8 Software de aquisição de dados

Um software para aquisição de dados é um conjunto de dois programas, o primeiro que permite coletar os dados, e o segundo que recebe os dados pelo canal de comunicação e é responsável por armazenar, processar, analisar e compartilhar os dados provenientes da fonte geradora (PRESSMAN; MAXIM, 2021).

O *software* de aquisição de dados pode ser dividido em duas partes: *firmware* e interface para o usuário.

2.8.1 Firmware

Para Daniel Ribeiro (2024) ,o *firmware* é um conjunto de instruções operacionais que são programadas diretamente no hardware de equipamentos eletrônicos. Também conhecidos pela nomenclatura “*software embarcado*”, os códigos transcritos por este tipo de programa residente são fundamentais para iniciar e executar os dispositivos e os seus recursos, pois fornecem informações idênticas sempre que o hardware é ligado.

Daniel Ribeiro (2024) complementa que na prática, o *firmware* funciona como uma espécie de “sistema operacional” dos microcontroladores. No contexto de aquisição de dados ele se limita a pequenas tarefas tais como: realizar a conversão A/D e realizar a comunicação serial com a central que vai receber os dados. O *firmware* não pode armazenar grandes volumes de dados por muito tempo, apenas envia-los à interface para o usuário.

Ele fica gravado diretamente no chip de memória de seus hardware , mais especificamente nas memórias PROM e EPROM (memória somente leitura programável e memória somente leitura apagável, respectivamente).

2.8.2 Interface de usuário

O *software* da interface do usuário é uma parte essencial de qualquer sistema de aquisição de dados sendo responsável por controlar o hardware e processar os dados coletados, fornecer uma maneira de configurar, controlar e monitorar o processo de coleta de dados ([Workana, 2024](#)).

A interface oferece uma gama de funcionalidades para a aquisição e processamento de dados em tempo real, dentre elas incluem um gráfico dinâmico para monitoramento instantâneo, controles intuitivos para gerenciar a conexão à rede serial de comunicação, ativar ou desativar a visualização gráfica dos dados e selecionar o canal de leitura desejado. Além disso, os usuários têm a capacidade de gravar os dados coletados diretamente da interface.

Além dessas funcionalidades básicas, a interface proporciona recursos avançados de processamento de dados, como filtragem de amostras, e uma variedade de operações matemáticas, incluindo soma, subtração, multiplicação, divisão, cálculo da média, derivadas e integrais.

A integração entre *hardware* e *software* é fundamental para o desenvolvimento de sistemas eficientes de aquisição de dados. Com a programação adequada do microcontrolador e a implementação de interfaces amigáveis para o usuário, é possível monitorar e controlar processos complexos, como a manufatura aditiva por deposição a arco. No próximo capítulo, serão apresentados os detalhes do projeto experimental e os resultados obtidos, consolidando os conceitos teóricos discutidos até aqui.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos empregados no desenvolvimento de um sistema de gerenciamento térmico para uma máquina CNC. Os objetivos foram investigar a variação da leitura do pirômetro com a distância, construir um modelo matemático que relacione as leituras do pirômetro e do termopar com a distância, e testar o sistema de aquisição de dados. Para isso, montou-se uma bancada experimental que permite variar a distância entre o pirômetro e a fonte de calor, simulando o eixo Z de uma CNC. Coletaram-se leituras simultâneas dos sensores em diferentes distâncias, possibilitando a construção de um modelo matemático por meio de regressão linear. Desenvolveu-se também um sistema de aquisição de dados, composto por *firmware* para leitura dos sensores e controle do motor, e um aplicativo com interface gráfica para visualização em tempo real e controle da posição do pirômetro. O capítulo detalha esses processos, desde a montagem da bancada até a implementação do modelo no sistema real.

3.1 Estratégia geral do trabalho

Os objetivos deste trabalho eram investigar a variação da leitura do pirômetro com a distância, construir um modelo matemático que relacionasse as leituras do pirômetro e do termopar com a distância, e testar o sistema de aquisição de dados. Para alcançar esses objetivos, pretendia-se adotar a seguinte estratégia geral:

Primeiramente, planejava-se montar uma bancada experimental que permitisse variar a distância entre o pirômetro e a fonte de calor, simulando as condições da CNC do laboratório de soldagens, através de um único eixo Z que possibilitasse o movimento do pirômetro ao longo de um eixo vertical. Essa montagem seria realizada para investigar a variação da leitura do pirômetro com a distância.

Em seguida, durante os experimentos, seriam coletadas leituras simultâneas do pirômetro e do termopar em diferentes distâncias. Esses dados seriam registrados em uma planilha para posterior análise, com o objetivo de construir um modelo matemático. Esse modelo matemático seria utilizado para corrigir as leituras do pirômetro, que variam em função da distância.

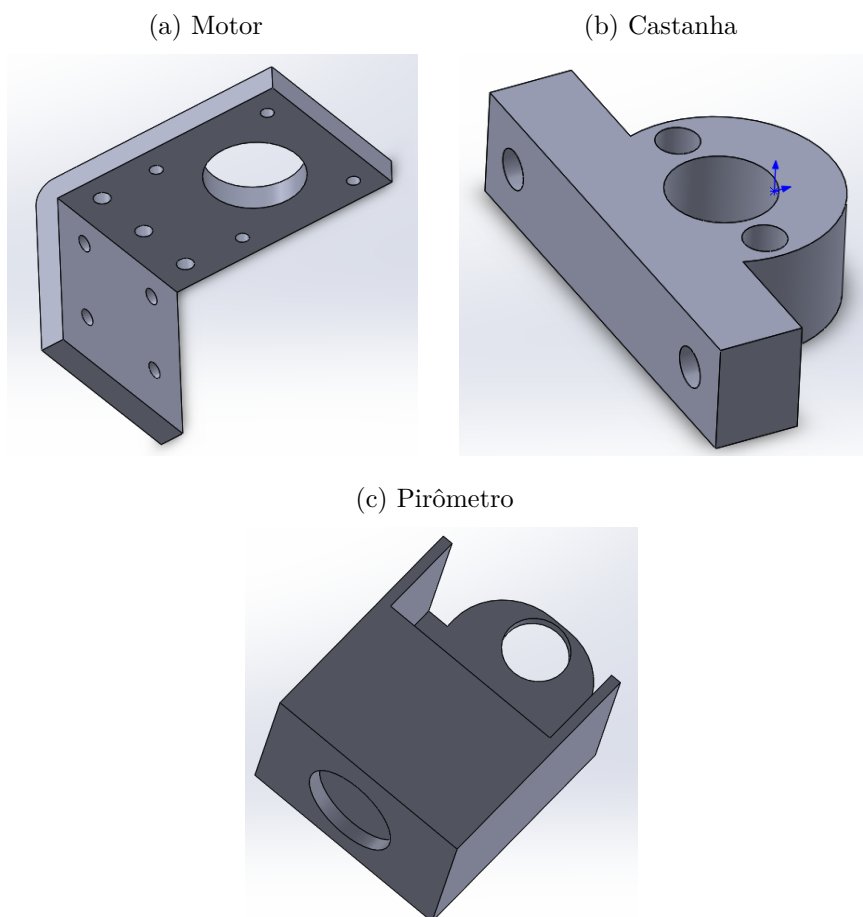
Por fim, pretendia-se desenvolver e testar um *software* para aquisição de dados, a fim de possibilitar a visualização das leituras dos sensores em tempo real e o controle da posição do pirômetro, além de criar um aplicativo com interface gráfica para o usuário (*frontend*).

3.2 Bancada de testes

Como o objetivo do trabalho era desenvolver um sistema de gerenciamento térmico em uma CNC de grande porte, seria necessário replicar tal estrutura em laboratório. Isso permitiria entender o funcionamento dos sensores, montar o sistema de leitura térmica e realizar testes controlados. Para isso, seria confeccionada no FabLab uma bancada de testes que imitasse um eixo Z de CNC para iniciar os trabalhos.

A fabricação dessa estrutura, que envolvia o desenvolvimento de componentes e a utilização de materiais reutilizados, seria realizada com o auxílio do *software* de desenho e modelagem 3D SolidWorks®, que permitiria a criação das peças necessárias, incluindo suportes para o motor de passo e a castanha do eixo, bem como uma caixa para acomodar o pirômetro. Estes podem ser visualizados na Figura 31.

Figura 31 – Desenho 3D dos suportes das peças



Fonte: Autoria própria.

Após a finalização do design, os modelos 3D foram convertidos em arquivos de impressão 3D pelo *software* de fatiamento *Ultimaker Cura*. As peças foram então produzidas utilizando uma impressora 3D disponível no FabLab, onde os arquivos digitais foram transformados em componentes físicos.

Finalmente, com as peças impressas, iniciou-se a montagem da plataforma de testes personalizada. Esta estrutura é composta por duas guias lineares de 7,8 mm, quatro rolamentos, um mancal, dois fusos, um acoplamento, um motor de passo e uma base de madeira projetada para suportar o pirômetro, conforme mostrado na Figura 41 na seção 4.1.

As guias lineares são componentes que permitem o movimento de uma estrutura ao longo de um eixo, garantindo estabilidade e reduzindo atrito. O mancal é um suporte que fixa e sustenta os eixos rotativos, proporcionando alinhamento adequado e reduzindo o desgaste. Os fusos são barras roscadas que convertem o movimento rotacional do motor em movimento linear, sendo fundamentais em sistemas CNC para controle preciso de posicionamento. Já a castanha é a peça que se movimenta ao longo do fuso, servindo como ponto de conexão entre a estrutura móvel e o sistema de acionamento, esses elementos, em conjunto, formam a base mecânica de um sistema CNC.

3.2.1 Caixa 3D para comportar os sensores

Inicialmente, considerou-se desenvolver uma caixa 3D para acomodar os sensores no experimento de bancada, nela seria adaptado um laser com bateria para ajudar a posicionar o foco do pirômetro. No entanto, percebeu-se que não havia necessidade, pois a fonte de calor utilizada não apresentava riscos aos sensores. Assim, optou-se por desenhar apenas uma peça simples para acomodar o pirômetro nos testes de bancada, enquanto a caixa 3D foi projetada para ser utilizada posteriormente na CNC de soldagem.

3.2.2 Motor de passo

A bancada contaria com um motor de passo Nema 17 modelo 17HS4401, visto na Figura 32, que teria um ângulo de passo de $1,8^\circ \pm 5\%$, funcionando com um torque de $4,2 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$. Esse torque seria suficiente para os testes, pois a única movimentação necessária seria deslocar o eixo com a base na qual o pirômetro estaria acoplado. O motor de passo Nema 17 foi escolhido por sua adequação ao nível de precisão exigido nos testes, aliado ao baixo torque necessário para movimentar o eixo da bancada de testes. Essa escolha visava garantir que as medições de temperatura realizadas pelos sensores não fossem afetadas por oscilações excessivas.

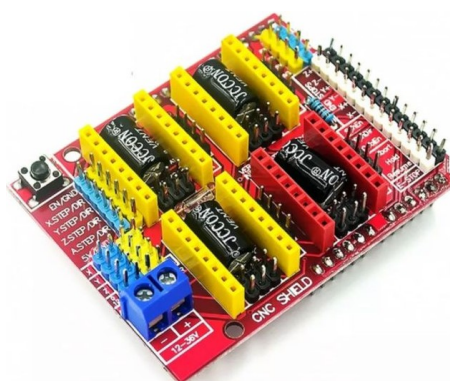
Figura 32 – Motor nema 17.



Fonte: [Mercado Livre \(2024a\)](#).

3.2.3 CNC shield

Após a montagem do sistema com o eixo, o motor seria ligado em uma placa CNC *Shield* V3, observado Figura 33, para realizar o ajuste do passo. Ela foi escolhida devido à sua capacidade de acionamento de até quatro motores de passo, fundamental para um sistema CNC que exigia movimentos precisos e repetitivos. Sua compatibilidade com o Arduino Uno possibilitava uma integração fluida entre o *hardware* e o *software* do projeto. Aqui, era válido ressaltar a importância do fator custo-benefício, uma vez que a placa CNC *Shield* oferecia um desempenho sólido a um preço acessível, tornando-a uma escolha econômica e eficaz para qualquer projeto de controle de máquina CNC.

Figura 33 – Placa *shield* V3.

Fonte: [Mercado Livre \(2024b\)](#).

3.3 Sistema de gerenciamento térmico

3.3.1 Sensor pirômetro

Para desenvolver o sistema de gerenciamento térmico do processo de soldagem, optou-se por escolher o sensor infravermelho pirômetro, modelo MLX90614, conforme observado na Figura 34, de baixo custo, que deveria realizar medições na faixa de temperatura entre -70°C e 380°C . Esse sensor mede a temperatura de um objeto através da

radiação infravermelha que ele emite. A quantidade de radiação infravermelha emitida por um objeto é proporcional à área da superfície e à quarta potência da temperatura absoluta (como discutido em 2.3). No entanto, à medida que a distância do objeto aumentasse, esperava-se que o sensor recebesse menos radiação infravermelha, o que poderia levar a uma medição incorreta.

Existem dois principais fatores que contribuem para essa imprecisão:

- **Efeito de extinção:** A radiação infravermelha é atenuada à medida que viaja pelo ar e a quantidade de atenuação depende da distância, da concentração de umidade e de outros fatores.
- **Efeito de espalhamento:** A radiação infravermelha pode ser espalhada por moléculas de ar, poeira e outros contaminantes. O espalhamento pode levar a uma medição de temperatura mais baixa do que a temperatura real do objeto.

Figura 34 – Sensor pirômetro MLX90614.



Fonte: Autoria própria.

Esses efeitos de imprecisão são mais significativos em sensores de baixo custo, que geralmente não possuem a mesma robustez de sensores mais caros. Para minimizar esses efeitos, os sensores pirômetros são projetados para operar em distâncias específicas. Normalmente, eles são mais precisos em distâncias curtas, de até alguns metros. Em distâncias maiores, é necessário considerar o uso de dispositivos com maior robustez ou o uso de um sistema de correção de erros.

É necessário fazer a calibração do sensor. A calibração consiste em usar uma medida confiável, obtida por meio de um sensor por contato, e corrigir a medida distorcida do pirômetro em função da distância. O sensor de temperatura por contato utilizado no experimento é o termopar.

3.3.2 Sensor Termopar

Foi utilizado o sensor de temperatura termopar do tipo K, conectado através do módulo MAX6675, como observado na Figura 35, usado para medições de temperatura nas faixas entre -220°C e 1260°C com uma sensibilidade de aproximadamente $41\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. O sensor de temperatura termopar é um dispositivo que mede a temperatura através da diferença de potencial elétrico gerada entre dois metais diferentes, unidos por uma junção.

A ponta que toca na superfície medida é denominada junção quente, a outra extremidade dos fios é chamada de junção fria, pois é a extremidade que não está sujeita ao calor. A diferença de potencial gerada pelo termopar é proporcional à temperatura da junção quente. A relação entre a diferença de potencial e a temperatura é conhecida como curva de calibração do termopar.

Figura 35 – Sensor termopar tipo K.



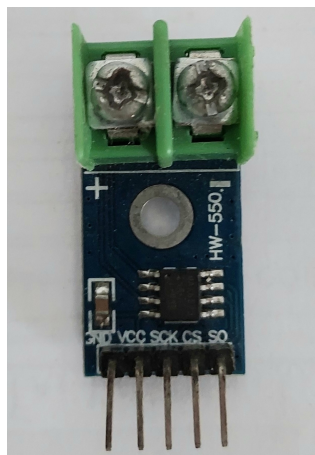
Fonte: Autoria própria.

3.3.2.1 Módulo MAX6675

O MAX6675, como observado na Figura 36, é um conversor analógico-digital (A/D) dedicado à leitura de termopares tipo K, oferecendo uma resolução de 12 *bits* e uma taxa de amostragem de 250 amostras por segundo. Ele amplifica a tensão gerada pelo termopar para uma tensão bem maior que os milivolts gerados nos fios, e, posteriormente, converte em uma leitura digital de temperatura. O módulo possui uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) para se comunicar com um microcontrolador ou outro dispositivo controlador.

O módulo MAX6675 é geralmente fornecido com dois pinos de energia sendo VCC (alimentação), GND (terra), e os pinos de saída onde a comunicação com o módulo é feita por meio da interface SPI, que requer três pinos de conexões: SCK (*clock*) usado para sincronizar a transmissão de dados entre o módulo e o microcontrolador, CS (*chip*

Figura 36 – Módulo MAX6675



Fonte: Autoria própria.

select) que habilita ou desabilita o módulo e SO (dados de saída) que transmite os dados serialmente para um microcontrolador.

3.3.3 Placas de comunicação

O projeto da placa e do *software* Arduino foi desenvolvido no Interaction Design Institute em 2005 por Massimo Banzi, juntamente com seu aluno David Mellis, além dos professores David Cuartielles e Gianluca Martino, da Universidade de Malmö, na Suécia (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013). O Arduino é a placa de prototipagem que pode ser facilmente programado, e conectado a diferentes tipos de sensores e atuadores, os quais serão controlados por portas de entrada e saída de dados específicas (SANTOS et al., 2015).

BANZI; SHILOH destacam que existem vários fatores que facilitam e justificam a ampla utilização da plataforma Arduino em projetos eletrônicos. Por ser uma plataforma projeto aberto, e por isso boa parte do material didático desenvolvido, como as bibliotecas de projetos são disponibilizados gratuitamente sem infringir os direitos autorais de seus idealizadores. BANZI; SHILOH completam que além do Arduino ser compatível com diversos sensores e dispositivos, possuir grande variedades de placas de tamanhos e utilidades diferentes, o baixo custo e fácil acesso das placas.

O Arduino Uno, visto na Figura 37, com o microcontrolador ATMEGA328P 8 bits, foi escolhido principalmente por oferecer uma interface de E/S (Entrada/Saída) versátil, com 14 pinos digitais e 6 pinos analógicos, que podem ser utilizados para comunicação com os dois sensores ao mesmo tempo sendo suficiente para a realização do experimento. Um segundo Arduino uno foi utilizado com uma placa encaixada que possui *drivers* para o controle do motor de passo, uma CNC *Shield* (explicado em 3.2.3).

A escolha de usar dois microcontroladores foi motivada prezando pela agilidade do

experimento, uma vez que se mostrou mais direto usar um segundo microcontrolador para controlar o motor.

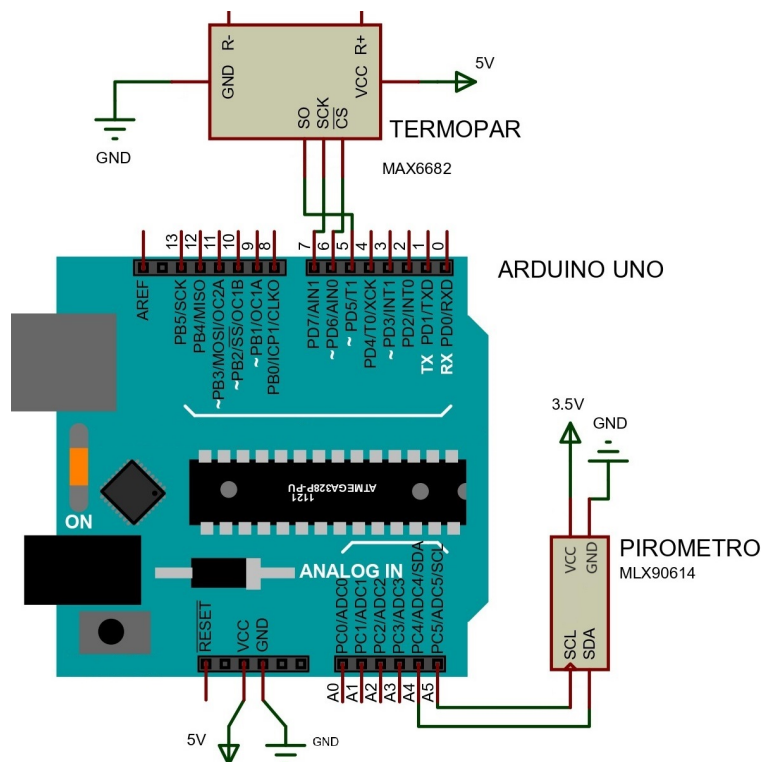
Figura 37 – Placa Arduino usada no projeto.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 38 pode-se observar as conexões dos sensores na placa Arduino. No caso do termopar, o pino VCC está ligado na alimentação de 5V, o GND está ligado no GND do Arduino, o pino SO está ligado na porta 5, o pino CS está ligado na porta 6 e o pino SCK está ligado na porta 7. Para o pirômetro, a distribuição das portas é a seguinte: o VCC está ligado na alimentação de 3.3V do Arduino, o GND está ligado no GND, e as portas de comunicação I2C SCL e SDA estão ligadas nas portas A4 e A5 respectivamente.

Figura 38 – Esquemático de conexão.



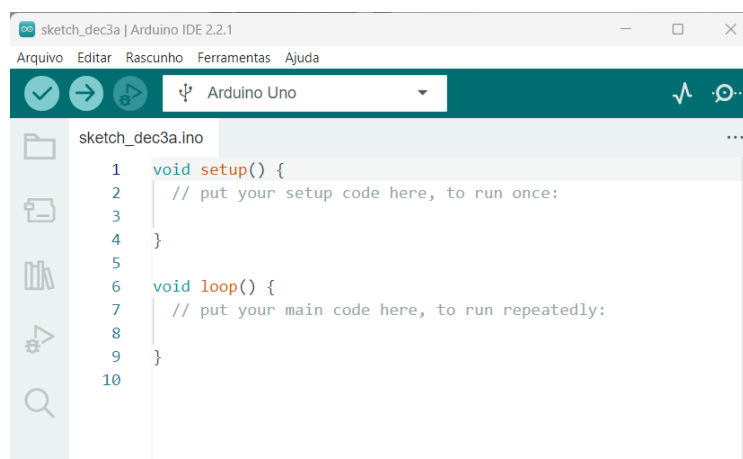
Fonte: Autoria própria.

3.3.4 Firmware

O *software* de programação do Arduino é chamado de *Integrated Development Environment* (IDE), observado na Figura 39, sendo uma aplicação de plataforma de código aberto, escrita na linguagem de programação C e C++. Ele é usado para escrever e fazer *upload* de programas em placas compatíveis com Arduino, mas também, com a ajuda de núcleos de terceiros, outras placas de desenvolvimento de fornecedores (BANZI; SHILOH, 2015).

Um monitor serial integrado está disponível para que os desenvolvedores possam ver mensagens de depuração e saída, o que ajuda a entender o comportamento do código. Por fim, o ambiente suporta o uso de bibliotecas, conjuntos de funções pré-escritas para realizar tarefas comuns, permitindo que os usuários simplifiquem o desenvolvimento ao incorporar essas funções em seus programas.

Figura 39 – Interface inicial da IDE do Arduino.



Fonte: Autoria própria.

O *firmware* da placa conectada aos sensores é projetado para ler continuamente os valores de temperatura dos sensores termopar e pirômetro e transmiti-los pela porta serial. Existem três bibliotecas que auxiliam o programa, sendo a primeira, "Wire.h", usada para a comunicação I2C entre o microcontrolador e o sensor MLX90614, a biblioteca "AdafruitMLX90614.h", específica para o sensor MLX90614 que fornece métodos para lê a temperatura do objeto e a temperatura ambiente. E a biblioteca, "max6675.h", usada para comunicar-se com o módulo MAX6675.

O código foi projetado para ler a temperatura do termopar e a temperatura do objeto medida pelo pirômetro. Também há uma verificação se a leitura resultou em "nan"(que significa "*not a number* - não é um número") ou "NAN"(em letras maiúsculas). Essas *strings* são geralmente retornadas quando a leitura do sensor é inválida. Se uma delas for detectada, a *string* é substituída por "0.0"antes de ser enviada pela porta serial.

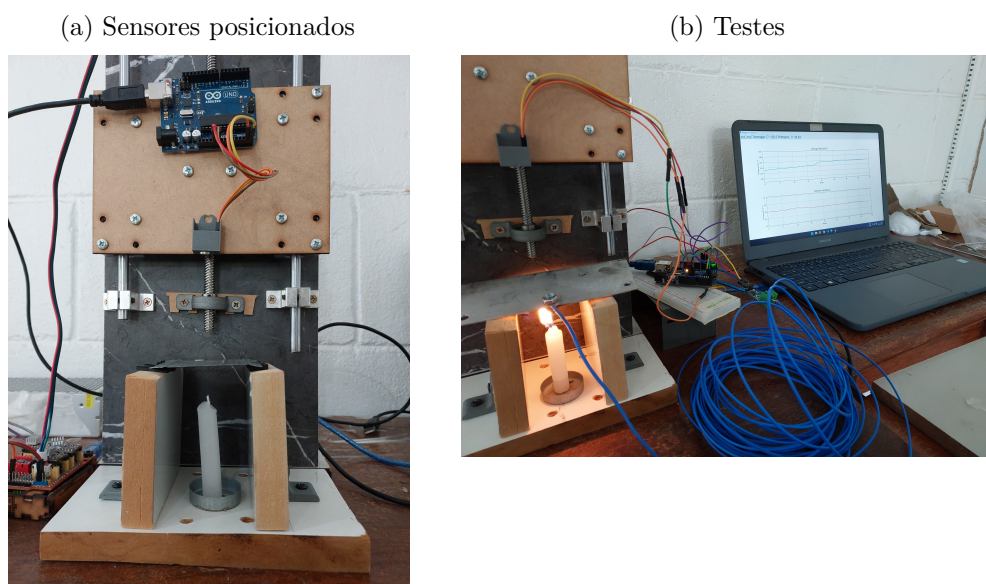
Para a placa de controle do motor de passo foi gravado o GRBL, que é um *firmware*

de código aberto popular para controle de máquinas CNC. O ideal seria utilizar apenas um Arduino para realizar o gerenciamento dos sensores e o controle do motor, entretanto, para não sobrecarregar a porta serial do Arduino com a coleta dos dados dos sensores e o comando do motor e evitar o desenvolvimento de código de pulso a serem mandados para o motor. Essa solução mostrou-se mais eficaz, considerando que o experimento não era permanente e, após o ensaio, a bancada de testes seria desmontada.

3.4 Processo experimental

Com a plataforma de testes pronta, o pirômetro foi adicionado à base de madeira que se movimenta junto com o eixo, enquanto o termopar foi fixado em uma chapa de metal aquecida por uma fonte de calor, que, nesse caso, foi uma vela, observado na Figura 40a. A escolha da vela como fonte de calor foi feita após diversas discussões sobre alternativas possíveis, como resistências elétricas e lâmpadas halógenas. Embora essas alternativas proporcionem maior intensidade de calor, a vela demonstrou ser a opção mais econômica, segura e de controle mais adequado. Além disso, a chama da vela apresenta um perfil térmico ¹ caracterizado por uma distribuição gradual de calor, semelhante ao observado no processo de soldagem, o que era um requisito importante para a simulação.

Figura 40 – Processo de aquisição de dados com os sensores.



Fonte: Autoria própria.

O experimento consistiu em realizar leituras simultâneas do termopar e do pirômetro, ajustando gradualmente a distância entre o pirômetro e a superfície aquecida. Ao aquecer a superfície metálica com a chama de uma vela, gera-se uma fonte de calor. O termopar,

¹ No processo de soldagem, a temperatura é mais alta próximo ao ponto de solda e vai diminuindo à medida que se afasta desse ponto, criando um perfil térmico específico que afeta a qualidade da solda e as propriedades do material. Assim, o perfil térmico da vela foi considerado adequado porque a maneira como o calor é transferido e distribuído se assemelha.

fixado na chapa de metal, mede a temperatura por contato direto, enquanto o pirômetro, apontado para a fonte de calor, realiza a leitura à distância.

O objetivo do experimento foi posicionar o sensor infravermelho a uma distância inicial de 220 mm da fonte de calor, simulando a posição que o sensor ocuparia na máquina de soldagem, e variar gradualmente essa distância, coletando dados em diferentes alturas. A coleta de dados foi realizada em regime permanente; a cada movimentação do sensor, aguardou-se até que a leitura se estabilizasse, descartando assim os dados obtidos durante o período transitório. Os dados coletados foram salvos em um arquivo no formato CSV (*comma-separated values*) para posterior construção de um modelo matemático.

3.5 Aplicativo de aquisição de dados

Para realizar a coleta e o tratamento dos dados, foi utilizada a linguagem de programação *Python*. O código desenvolvido cria uma interface de usuário para monitorar dados de sensores em tempo real, com a capacidade de iniciar/parar a aquisição de dados, além de controlar o motor de passo. Inicialmente, havia uma ideia de realizar o controle do eixo usando uma interface de controle CNC, que seria o "*GRBL control*"², verificou-se que não seria viável utilizar dois *softwares*, sendo assim foi desenvolvido um único *software* que realizava tanto o controle do motor quanto o monitoramento dos sensores.

As principais estruturas do código são:

- **Importações de bibliotecas:** As bibliotecas necessárias são a "*Matplotlib*" para plotagem, "*Tkinter*" para criar a GUI, "*Numpy*" para manipulação de *arrays*, "*Serial*" para comunicação serial com sensores, "*Pandas*" para gerenciar dados em formato CSV.
- **Variáveis globais:** O código define várias variáveis globais, incluindo *arrays* para armazenar dados do termopar e do pirômetro; uma estrutura de dados *DataFrame* para armazenar dados em formato CSV, e variáveis de controle.
- **Configuração de gráficos de sinais:** Aqui, o código configura a exibição dos gráficos usando a biblioteca "*Matplotlib*", criando duas áreas de gráfico, sendo uma para o termopar e outra para o pirômetro, definindo títulos, rótulos e limites para os eixos. Os dados são plotados em tempo real nessas áreas de gráfico.
- **Funções para atualização de gráficos:** Há duas funções que atualizam os gráficos do termopar e do pirômetro à medida que novos dados chegam dos sensores. Essas funções também controlam o deslocamento dos dados para manter uma janela deslizante de leitura.

² Disponível em ([GitHub](#), 2024).

- **Função para plotagem:** Esta função é responsável por receber dados dos sensores, processá-los e atualizar os gráficos. Ela lê os dados dos sensores, decodifica-os, chama as funções de atualização dos gráficos e também armazena os dados em um *DataFrame* para posterior exportação.
- **Funções para controle e atualização:** Existem funções que foram definidas para controlar a interação com a interface, por exemplo iniciar/parar a plotagem dos gráficos e controlar um motor.
- **Criação da GUI:** A GUI da aplicação é criada usando o módulo "Tkinter". Ela inclui botões para iniciar, parar e controlar um motor, bem como rótulos para exibir o status dos sensores. Além disso, a área do gráfico é incorporada à GUI usando o "Matplotlib".
- **Porta serial:** O código tenta estabelecer uma conexão serial com um dispositivo Arduino, que está responsável por coletar dados dos sensores. Se a conexão não puder ser estabelecida, um erro é exibido na GUI.
- **Loop principal:** O programa entra em um *loop* principal que atualiza os gráficos e o status a cada 200 milissegundos, bem como verifica a porta serial para novos dados dos sensores.

3.6 Modelo para correção do pirômetro

Após a etapa de coleta de dados, foi aplicado o método de regressão linear para a calibração do pirômetro. De acordo com [Aguirre \(2015\)](#), a regressão linear é um método estatístico utilizado para modelar a relação entre uma variável dependente, no caso, o valor real medido pelo termopar, e uma ou mais variáveis independentes, que neste caso são as leituras do pirômetro e a distância da fonte de calor.

A equação ajustada do modelo de regressão linear múltipla proposta é esse:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 \cdot d + a_2 \cdot p + a_3 \cdot d^2 + a_4 \cdot p^2 + a_5 \cdot (d \cdot p) \quad (3)$$

é um modelo polinomial que pode ser usado como aproximação da maioria das funções que se quer modelar, onde $\hat{y}$ representa a estimativa da temperatura medida pelo termopar, e os coeficientes $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ são obtidos a partir da solução $\hat{\theta}$ calculada.

No entanto, é importante ressaltar que, embora o sistema seja não linear em relação às variáveis de entrada (temperatura medida pelo pirômetro e a distância da fonte de calor), ele é linear em relação aos parâmetros e coeficientes que desejamos estimar. Assim, podemos utilizar a regressão linear para determinar os coeficientes de um modelo que, embora seja não linear nas variáveis, é linear nos parâmetros.

O método dos mínimos quadrados é uma técnica estatística amplamente utilizada para ajustar um modelo aos dados observados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores preditos (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2021). A aplicação do método dos mínimos quadrados visa encontrar os coeficientes que melhor se ajustam aos dados experimentais, garantindo que o erro total seja minimizado.

A regressão linear múltipla é um método estatístico utilizado para modelar a relação entre uma variável dependente Y e um conjunto de variáveis independentes Ψ . A forma geral da equação de regressão linear múltipla em notação vetorial é dada pela Equação 4:

$$Y = \Psi\theta + \xi \quad (4)$$

onde:

- Y é o vetor de observações da variável dependente;
- Ψ é a matriz de design ou matriz de regressores, contendo uma coluna de uns (termo constante) e as colunas correspondentes às variáveis independentes;
- θ é o vetor dos coeficientes desconhecidos a serem estimados;
- ξ é o vetor dos termos de erro ou resíduos.

A solução para este sistema, utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários, é obtida pela Equação 5:

$$\hat{\theta} = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T Y \quad (5)$$

onde:

- $\hat{\theta}$ é o vetor estimado dos coeficientes;
- Ψ^T é a transposta da matriz de regressores Ψ ;
- $(\Psi^T \Psi)^{-1}$ representa a inversa do produto da matriz de regressores transposta pela própria matriz de regressores;
- $\Psi^T Y$ é o produto da transposta da matriz

No contexto deste trabalho, aplicamos a regressão linear múltipla para modelar a relação entre a temperatura medida pelo termopar (Y) e as variáveis independentes: distância (d) e leitura do pirômetro (p), incluindo seus termos quadráticos e de interação. Assim, a matriz de regressores específica Ψ é definida como visto na Equação 6:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & d & p & d^2 & p^2 & dp \end{bmatrix} \quad (6)$$

Após a dedução, a matriz de preditores obtida é construída da seguinte forma:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & d_1 & p_1 & d_1^2 & p_1^2 & (d_1 \cdot p_1) \\ 1 & d_2 & p_2 & d_2^2 & p_2^2 & (d_2 \cdot p_2) \\ 1 & d_3 & p_3 & d_3^2 & p_3^2 & (d_3 \cdot p_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & d_{24} & p_{24} & d_{24}^2 & p_{24}^2 & (d_{24} \cdot p_{24}) \end{bmatrix}$$

O vetor de respostas é dado por:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_{24} \end{bmatrix}$$

onde y_i representa as temperaturas medidas pelo termopar.

Assim, partindo da forma geral da regressão linear múltipla, adaptamos o modelo para incluir os termos não lineares e de interação que melhor representam a relação entre as variáveis no nosso experimento. Os termos quadráticos (d^2 e p^2) e o termo de interação (dp) capturam possíveis curvaturas e interações entre as variáveis independentes.

A métrica de erro médio quadrático (MSE) é calculada como a média dos quadrados dos resíduos, onde os resíduos são as diferenças entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo. Esta métrica é uma medida da qualidade do ajuste do modelo e é dada pela Equação 7:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

Quanto menor o valor do MSE, melhor o modelo se ajusta aos dados observados.

No entanto, para facilitar a interpretação dos resultados, o Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE) também foi calculado. O MAPE representa a média dos erros em relação ao valor observado, expresso em porcentagem, e é dado pela Equação 8:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (8)$$

O modelo permite, então, a correção das leituras do pirômetro em função da distância, utilizando a temperatura medida pelo termopar como referência.

Finalmente, utilizou-se a linguagem *Python* para implementar o modelo de regressão linear. Com os dados coletados, que incluem as temperaturas reais obtidas pelo termopar e as leituras do pirômetro em diferentes distâncias, foi possível estimar os valores que o pirômetro deveria medir naquela distância específica e, assim, realizar a calibração necessária.

A biblioteca matemática *Numpy* foi utilizada para realizar cálculos matriciais, enquanto a biblioteca *Pandas* foi empregada para organizar e armazenar os dados. O código desenvolvido segue uma estrutura organizada, começando pela leitura dos dados armazenados em um arquivo *CSV*. Em seguida, esses dados são convertidos em *arrays*, permitindo um processamento eficiente utilizando as funcionalidades do *Numpy*. Três variáveis principais são extraídas das colunas correspondentes desse *array*: posição, termopar e pirômetro, sendo cada uma transformada em um *array* unidimensional.

3.7 Código com a solução

O código final de regressão é bastante semelhante ao código utilizado durante os testes, diferenciando-se principalmente na implementação da correção de temperatura. Esse segmento do código faz parte do aplicativo que será utilizado no sistema real, e sua função é aplicar o modelo ajustado pelos experimentos, considerando a distância fixa e as leituras do pirômetro, para corrigir as medições de temperatura em tempo real.

Inicialmente, o código carrega um arquivo de solução que contém os dados previamente armazenados. Em seguida, define uma função de correção que recebe como argumentos a posição e o valor medido pelo pirômetro. Essa função realiza a correção utilizando a matriz de soluções gerada pelo modelo de regressão, ajustando os valores de posição e temperatura do pirômetro. Após a correção, o código atualiza os gráficos exibidos, mostrando os valores corrigidos em comparação com os valores lidos pelo termopar.

Finalmente, o código cria um novo registro de dados, que inclui o valor original medido pelo termopar, o valor corrigido do pirômetro, além da data e hora da medição. Esse registro é então adicionado a um *DataFrame* e armazenado na memória do computador para futuras análises.

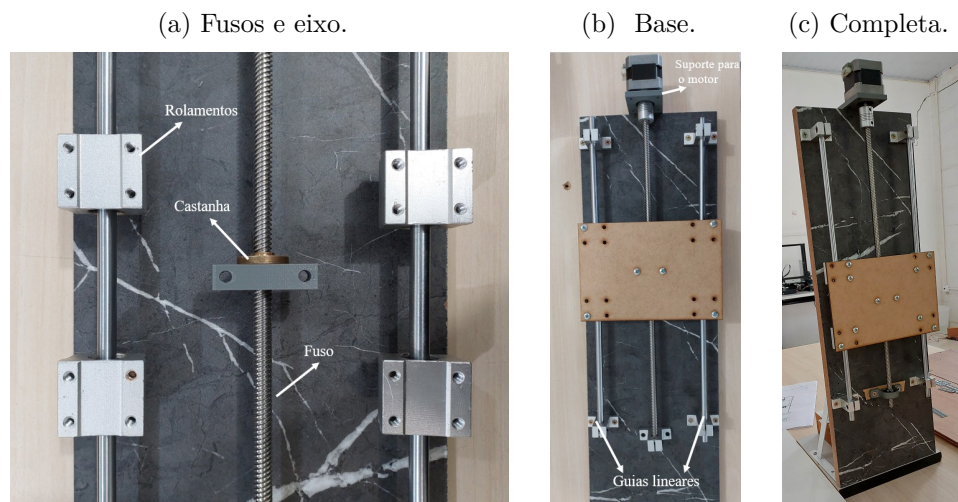
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, foram alcançados diversos resultados significativos para a pesquisa em soldagem, bem como para as soluções de eletrônica e software que permanecerão como contribuições para a faculdade e os laboratórios envolvidos. Vale mencionar que uma etapa importante, posterior à calibração do modelo, seria a validação, que seria realizada em um experimento na máquina CNC do projeto. No entanto, esse experimento acabou sendo prejudicado por problemas na CNC e, por causa disso, a validação não pôde ser concluída com êxito. Entretanto, os testes no FabLab apontam que o modelo foi bem calibrado.

4.1 Bancada de testes

Um dos primeiros resultados obtidos foi a montagem da estrutura experimental, que simula o eixo Z de uma máquina CNC. A movimentação dessa estrutura foi realizada utilizando uma CNC *Shield*, a qual controla um motor de passo acoplado a um fuso, conforme ilustrado na Figura 41. A base, onde o sensor pirômetro foi acoplado, foi posicionada a uma distância adequada da fonte de calor, reproduzindo a distância em que os sensores serão instalados na CNC de soldagem.

Figura 41 – Processo de montagem



Fonte: Autoria própria.

O uso do motor de passo permitiu um controle preciso da distância e da movimentação, garantindo que o pirômetro realizasse leituras com exatidão e sem variações abruptas. A velocidade de movimentação foi definida por meio do ajuste do passo do motor, utilizando a própria interface do programa de aquisição, o que proporcionou uma movimentação mais similar àquela da CNC de soldagens.

Com as peças e os desenhos devidamente documentados, o experimento da bancada de testes pode ser replicado para a utilização do eixo CNC em outros projetos, seja em diferentes máquinas CNC ou em aplicações que exijam movimentações precisas e controladas.

A bancada de testes descrita anteriormente forneceu os dados experimentais necessários para a aplicação do modelo de regressão linear, que é detalhado a seguir.

4.2 Modelo de Regressão Linear

Com o auxílio da linguagem *Python*, foi realizada a solução de regressão linear onde a solução do sistema de equações lineares, representada pela matriz de preditores Ψ e pelo vetor de respostas y , é obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, através da função `np.linalg.lstsq` da biblioteca *Numpy*. Este método calcula os coeficientes $\hat{\theta}$ que minimizam a soma dos erros quadráticos entre os valores observados e os estimados pelo modelo.

solução, resíduo, __, __ = np.linalg.lstsq(Ψ , y , rcond = None)

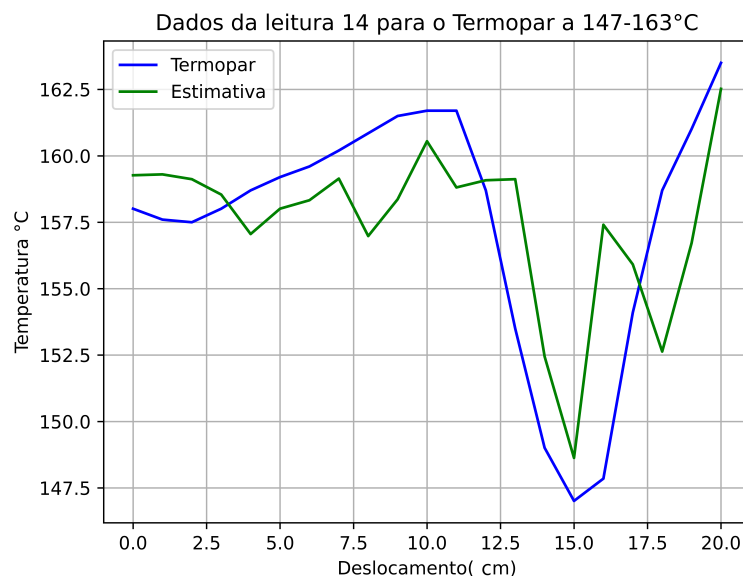
Os parâmetros da solução ($\hat{\theta}$), representados por Usando notação de conjunto com índices: $\{a_i\}_{i=0}^5$, são os coeficientes que ajustam o modelo aos dados observados. Eles são calculados como:

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} 1,06645325 \\ -3,28684299 \\ -5,8523948 \\ -1,27776771 \\ 1,00891754 \\ 1,58397786 \end{bmatrix}$$

Esses coeficientes são utilizados na equação do modelo para estimar a temperatura em função da posição e da leitura do pirômetro. No uso do modelo de correção, a distância (d) permanece fixa, e a equação é utilizada para ajustar a leitura do pirômetro, garantindo que a estimativa da temperatura seja precisa em condições constantes de posicionamento.

O gráfico da Figura 42 apresenta os valores de temperatura capturados pelo termopar, realizando o deslocamento do pirômetro até 20 cm da fonte de calor, e a estimativa de temperatura obtida através da regressão linear. Analisando as leituras do gráfico, observa-se que, nos testes em laboratório, a estimativa ficou bem próxima do valor medido pelo termopar, e o erro percentual médio absoluto (MAPE) desse modelo foi de aproximadamente 11,7%, valor que é esperado visto que os testes foram feitos em laboratório em condições diferentes da CNC de soldagens.

Figura 42 – Gráficos dos valores do termopar X estimativa.



Fonte: Autoria própria.

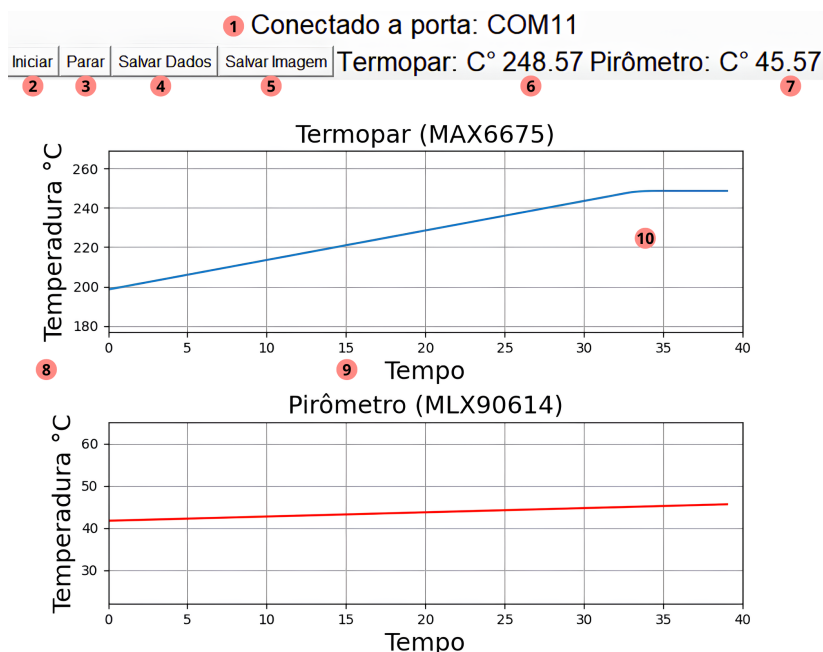
Vale ressaltar que, no momento dos testes, o efeito de variação de temperatura por conta da distância ficou bem evidente nas leituras do pirômetro; à medida que ele se afastava da fonte de calor, a temperatura lida diminuía, gerando resultados discrepantes em relação à temperatura lida pelo termopar.

4.3 Aplicativo de aquisição de dados

Além disso, o aplicativo possui uma interface interativa (*Frontend*) com botões que permitem usuário realizar diversas funções, oferecendo maior controle sobre o processo de medição, especialmente em situações em que seja necessário interromper temporariamente o processo de soldagem. Essa funcionalidade garante que o usuário não perca os dados já coletados e evite a captura de dados desnecessários ao salvar o arquivo CSV.

A Figura 43 com os ícones enumerados e a baixo, a descrição de cada um deles:

Figura 43 – Interface de coleta dos dados.



Fonte: Autoria própria.

1. **Conectado à porta:** Indica que o sistema está conectado à porta serial, que é a interface de comunicação com o *hardware*.
2. **Botão Iniciar:** Utilizado para iniciar a coleta de dados de temperatura dos sensores.
3. **Botão Parar:** Utilizado para pausar a coleta de dados de temperatura. Este botão interrompe temporariamente a aquisição de dados que são escritos no arquivo CSV.
4. **Botão Salvar Dados:** Permite salvar os dados coletados em um arquivo para posterior análise em um formato como CSV.
5. **Botão Salvar Imagem:** Utilizado para salvar uma imagem do gráfico atual, possibilitando a documentação visual dos resultados da coleta de dados.
6. **Temperatura do Termopar:** Mostra a temperatura instantânea medida pelo sensor termopar em graus Celsius.
7. **Temperatura do Pirômetro:** Mostra a temperatura instantânea medida pelo pirômetro em graus Celsius.
8. **Eixo Y do gráfico:** Representa a temperatura medida pelo sensor termopar em graus Celsius.
9. **Eixo X:** Representa o tempo em segundos para ambos os gráficos, permitindo observar a variação da temperatura ao longo do tempo.

10. Curva de Temperatura: Mostra a evolução graficamente da temperatura medida ao longo do tempo, indicando o comportamento da temperatura.

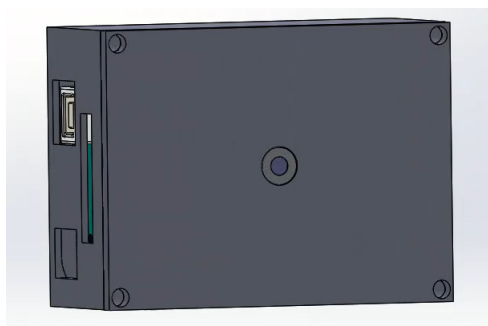
Este módulo de aquisição de dados em tempo real foi um dos primeiros desenvolvidos no laboratório FabLab. A filosofia adotada neste trabalho é bastante abrangente e serve como ponto de partida para várias outras aplicações em diferentes áreas. O código desenvolvido não apenas foi utilizado nos testes, mas também pode ser adaptado para outros projetos de aquisição de sinais em tempo real.

4.4 Implementação na CNC de soldagens

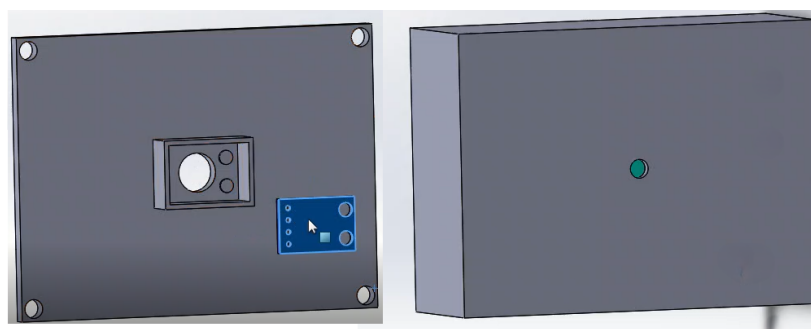
A caixa impressa em 3D para acomodar os sensores, como observado na Figura 44, foi bastante útil para a proteção deles contra as altas temperaturas da tocha e ajudou a manter a área de trabalho organizada, evitando vários fios expostos. O laser de foco implementado posteriormente na caixa serviu para posicionar o foco do pirômetro.

Figura 44 – Caixa 3D para comportar os sensores.

(a) Vista frontal.



(b) Vista posterior.



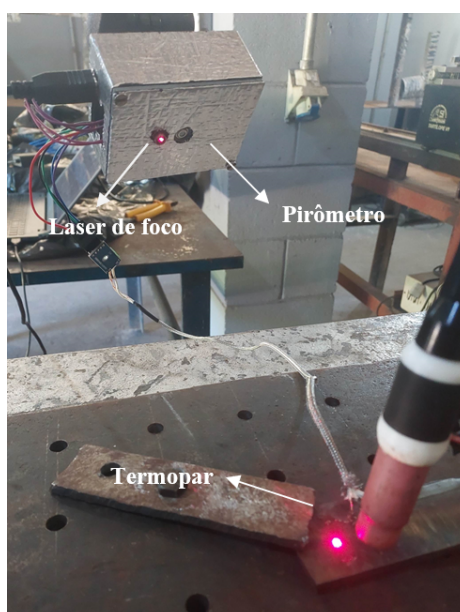
Fonte: Autoria própria.

Os sensores foram posicionados na bancada conforme observado na Figura 45 para realizar os testes de medição e coleta dos dados. A interface possibilita a coleta dos dados de medição da temperatura do termopar e do pirômetro, mostrando os valores graficamente em tempo real possibilitando a observação da variação da temperatura entre ambos os sensores.

No entanto, o intervalo de tempo entre cada ciclo de leitura e impressão das temperaturas está limitado a um *delay* de 200 milissegundos, aparentemente devido a limitações do Arduino. Houve uma tentativa de usar valores menores que esse, mas isto ocasionava erros na leitura e travamentos na interface, devido à alta frequência com que os dados são enviados ao aplicativo, tornando difícil a leitura e interpretação dos valores em tempo real.

Além disso, o sensor pirômetro apresenta medições ruidosas ocasionais de elevada amplitude; o motivo disso acontecer pode estar relacionado ao fato de o processo possuir uma região de elevadas temperaturas e a tocha dispersar faíscas na região de foco do pirômetro.

Figura 45 – Sensores posicionados na CNC.



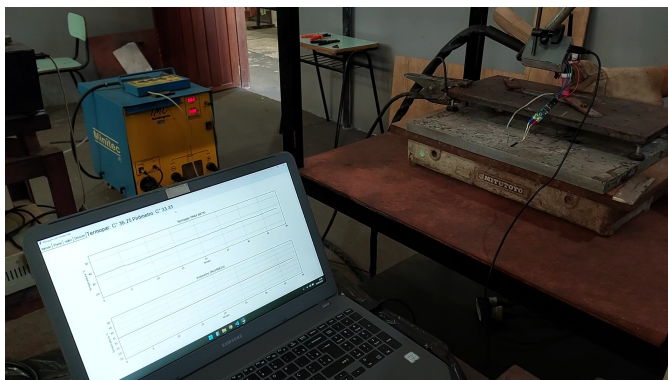
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 46b pode-se observar um teste com o processo de soldagem funcionando e coletando os dados de temperatura. Nos testes de implementação do modelo, foi executado o processo de soldagem por arco com eletrodo de tungstênio, e usado o termopar para capturar dados de temperatura reais e comparar com o valor de estimativa, de modo a conferir se o modelo necessitava de ajustes.

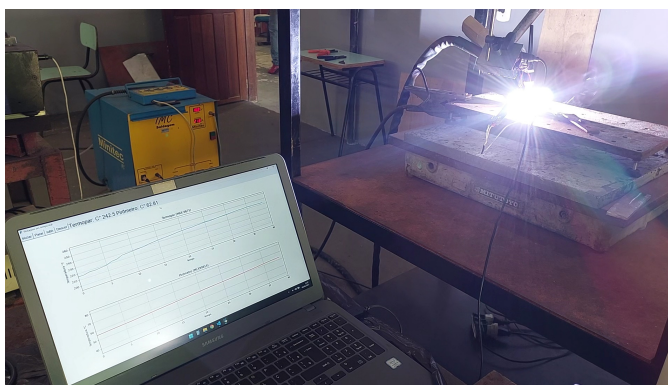
A priori, o modelo se mostrou um pouco impreciso, gerando variações na temperatura de estimativa em comparação à temperatura real. Isso era esperado, uma vez que, para a criação do modelo, utilizou-se um ambiente simulado em laboratório e, apesar de nesse ambiente gerar resultados satisfatórios, no ambiente real de trabalho as temperaturas eram bem mais elevadas.

Figura 46 – Teste de soldagem.

(a) Sensores posicionados



(b) Arco elétrico



Fonte: Autoria própria.

Com isso, o próximo passo seria realizar o ajuste do modelo coletando dados de medição realizando mais ensaios; no entanto, não foi possível completar essa etapa devido a problemas relacionados à CNC de soldagem. Dentre os problemas que impediram os testes finais na CNC para validar o modelo, pode-se destacar problemas relacionados à própria CNC, queima dos módulos MAX6675 por sobrecorrente e outros equipamentos eletrônicos, e atrasos na entrega de novos equipamentos.

A tabela com os custos dos equipamentos do projeto pode ser acessada através do link: [Tabela de custos](#).

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, o objetivo principal foi desenvolver um sistema que pudesse auxiliar no gerenciamento térmico do processo de soldagem, visando aumentar a qualidade na Manufatura Aditiva de Deposição a Arco (MADA). Para isso, foram realizados testes em laboratório para construir um modelo de compensação em *software*, desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados e buscou-se implementar a solução em tempo real na máquina CNC de soldagem. Entre os resultados alcançados, destacam-se o desenvolvimento da bancada experimental, o *software* de aquisição de dados e o modelo de calibração do pirômetro.

A construção da bancada experimental, Utilizando peças recicladas, foi montada para simular o eixo Z de uma máquina CNC, permitindo o controle preciso da distância entre o pirômetro e a fonte de calor. Esse processo não só promoveu a sustentabilidade ao reutilizar materiais, mas também proporcionou um aprendizado prático em montagem mecânica, controle de motores de passo e integração de componentes eletrônicos, habilidades básicas para a implementação em aplicações industriais.

Com a confecção prática do referido trabalho, facilitou a análise no contexto do projeto, permitindo compreender melhor o funcionamento dos sensores e soluções na integração de sistemas de monitoramento térmico além de oferecer uma plataforma versátil que pode ser utilizada e adaptada para diversos outros projetos de pesquisa. Este avanço é particularmente valioso para estudos que requerem a replicação das condições operacionais de uma CNC em um ambiente controlado de laboratório.

O desenvolvimento do *software* de aquisição de dados com interface gráfica foi outro avanço significativo. O aplicativo permite o monitoramento em tempo real dos sinais térmicos, oferecendo controle eficiente sobre o processo de medição e armazenamento dos dados para análises subsequentes. No desenvolvimento do *software*, aprendeu-se sobre técnicas de aquisição de dados, controle de tempo, programação em *Arduino* e enfrentou-se desafios na criação da interface *Frontend*, na qual resultou em um *software* versátil que pode ser adaptado para outros sistemas de aquisição de dados, ampliando sua utilidade para diferentes aplicações.

Outro ponto relevante é a disponibilidade dos códigos desenvolvidos para o gerenciamento de sensores, testes na bancada com o motor de passo, e correção do modelo. Disponibilizados no *GitHub*, esses recursos estão acessíveis para a comunidade científica e industrial, podendo ser adaptados para outras aplicações de aquisição de sinais em tempo real.

O modelo de calibração do pirômetro, baseado na comparação com o termopar,

validou a hipótese de que é possível corrigir as leituras do pirômetro utilizando medições de temperatura por contato. Os resultados obtidos nos testes de laboratório comprovam que a distância influencia consideravelmente na medição do pirômetro, e as medições são plausíveis mesmo não sendo 100% exatas, confirmando que o modelo foi bem calibrado, reduzindo significativamente as discrepâncias entre as leituras dos dois sensores.

Este modelo pode ser aplicado em outros trabalhos que necessitem corrigir o pirômetro por meio de uma medida por contato, contribuindo para aprimorar a precisão em sistemas de monitoramento térmico de baixo custo.

Apesar dos avanços, enfrentou-se algumas limitações durante o desenvolvimento deste trabalho, entre elas a etapa de validação do modelo na máquina CNC de soldagem não pôde ser concluída devido a problemas operacionais com o equipamento, como falhas técnicas na CNC, queima dos módulos MAX6675 por sobrecorrente e atrasos na reposição de componentes eletrônicos. Esses obstáculos impediram a realização dos testes finais que confirmariam o desempenho do modelo em condições reais de operação.

Além disso, percebeu-se que a coleta de temperatura em um único ponto pode não ser suficiente para capturar as variações térmicas ao longo do cordão de solda, especialmente em processos complexos como o GMAW-CW. O resfriamento do cordão de solda e o movimento da tocha implicam que o sensor também se desloca, dificultando o monitoramento contínuo da temperatura. O pirômetro apresentou medições ruidosas ocasionais de elevada amplitude, possivelmente devido à dispersão de faíscas e às altas temperaturas na região de foco do sensor.

5.1 Trabalhos Futuros

Para superar as limitações identificadas, sugere-se os a utilização de câmeras infravermelhas para proporcionar uma visualização mais abrangente da distribuição de temperatura ao longo do cordão de solda, permitindo o monitoramento térmico espacialmente detalhado e em tempo real. Essa abordagem pode complementar ou substituir a medição pontual, oferecendo dados mais precisos para o controle térmico do processo.

Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de proteção robusto para os dispositivos eletrônicos sensíveis, a fim de evitar danos causados pelo ambiente hostil da soldagem, como altas temperaturas e faíscas. Considerar a substituição do módulo MAX6675 por uma placa condicionadora de sinais mais confiável pode aumentar a durabilidade e a precisão do sistema.

Em conclusão, o trabalho alcançou resultados significativos no desenvolvimento de soluções de baixo custo para o monitoramento térmico em processos de soldagem. A construção da bancada, o desenvolvimento do *software* de aquisição de dados e a elaboração do modelo de calibração do pirômetro representaram conquistas importantes.

Referências

- AGUIRRE, L. A. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares: teoria e aplicação. *Editora UFMG*, v. 1, n. 3, p. 4, 2015. Citado na página 62.
- ALMEIDA, A. M. d. et al. Principais barreiras para a implementação da manufatura aditiva no brasil. Universidade Nove de Julho, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 35.
- Alveni Lisboa. *O que é IA generativa?* 2024. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/inteligencia-artificial/o-que-e-ia-generativa/>>. Acesso em: 23 de Junho 2024. Citado na página 27.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. Instrumentação e fundamentos de medidas—volume 2, 2ª edição. *Rio de Janeiro: LTC/Grupo Gen*, 2011. Citado na página 40.
- BANZI, M.; SHILOH, M. *Primeiros Passos com o Arduino—2ª Edição: A plataforma de prototipagem eletrônica open source*. [S.l.]: Novatec Editora, 2015. Citado na página 59.
- BANZI, M.; SHILOH, M. *Getting started with Arduino*. [S.l.]: Maker Media, Inc., 2022. Citado na página 57.
- Blog Raisa. *Sensores: O que São, Tipos e Diferentes Aplicações*. 2024. Disponível em: <<https://blog.raisa.com.br/sensores-o-que-sao-tipos-e-diferentes-aplicacoes/>>. Acesso em: 09 de Março 2024. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- CABRAL, T. d. S. et al. Desenvolvimento e estudo da viabilidade de um injetor de arame adicional para o processo de soldagem mig/mag e fcaw. In: *6th Brazilian conference on manufacturing engineering. Caxias do Sul, RS*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 38.
- Capable Machining. *A História das Máquinas CNC*. 2024. Disponível em: <<https://11nq.com/Mrs5e>>. Acesso em: 17 de janeiro 2024. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- COSTA, V. S.; CARDOSO, F. P. et al. Desenvolvimento de um sistema de aquisição dos parâmetros elétricos e da temperatura durante a operação de soldagem. 2019. Citado na página 36.
- Daniel Ribeiro. *O que é firmware? Saiba o que significa e como fazer o update*. 2024. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/2022/10/o-que-e-firmware-saiba-o-que-significa-e-como-fazer-o-update.ghtml>>. Acesso em: 10 de Fevereiro 2024. Citado na página 49.
- Dreamstime. *Torno moderno com CNC e workpiece*. 2023. Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/foto-de-stock-torno-moderno-com-cnc-image93209107>>. Acesso em: 17 de novembro 2023. Citado na página 24.
- EletronPI. *Aquisição de Dados - Conceitos Básicos*. 2024. Disponível em: <http://www.eletronpi.com.br/aquisicao_de_dados.aspx>. Acesso em: 30 de janeiro 2024. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

Emerson Alecrim; Paulo Higa. *O que é USB? Saiba como funciona a tecnologia e os tipos de conectores*. 2024. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/bntX1>>. Acesso em: 10 de Fevereiro 2024. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. *Arduino em ação*. [S.l.]: Novatec Editora, 2013. Citado na página 57.

Exxacta. *O que é Comunicação serial?* 2024. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/avXZ4>>. Acesso em: 30 de janeiro 2024. Citado na página 48.

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. [S.l.]: Editora blucher, 2018. Citado na página 29.

FRANÇA, J. A. d. et al. *Sistemas de aquisição de dados baseados em microcontrolador*. Universidade Federal de Campina Grande, 1997. Citado na página 43.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. *Sistemas de controle para engenharia*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 47.

GENG, H. *Manufacturing engineering handbook*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

GitHub. *GRBL*. 2024. Disponível em: <<https://github.com/grbl/grbl>>. Acesso em: 23 de Junho 2024. Citado na página 61.

GONÇALVES, M. A. d. F. et al. *Um estudo sobre implementação de ciclos de usinagem através de programação parametrizada em máquinas de comando numérico computadorizado*. Universidade Federal de Santa Maria, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.

GRANDO, F. L. *Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em ambiente LabVIEW para aquecedores solares*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

Grant Maloy Smith. *O que é Aquisição de Dados - DAQ ou DAS?* 2024. Disponível em: <<https://dewesoft.com/pt/blog/o-que-e-aquisicao-de-dados>>. Acesso em: 30 de janeiro 2024. Citado 4 vezes nas páginas 42, 43, 45 e 46.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics, Volume 1*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

INSTRUMENTS, N. National instruments. *Retrieved October*, v. 5, p. 2014, 2013. Citado na página 40.

JANELA, R. J. B. *Desenvolvimento de uma fresadora CNC de 3 eixos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Évora, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

JAVAID, M. et al. *Industrial perspectives of 3d scanning: features, roles and it's analytical applications*. *Sensors International*, Elsevier, v. 2, p. 100114, 2021. Citado na página 27.

KALATEC AUTOMAÇÃO. *CNC: saiba qual é a função e como utilizar!* 2024. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/cnc/>>. Acesso em: 17 de janeiro 2024. Citado na página 23.

- MARCICANO, J. P. P. Introdução ao controle numérico. *USP. São Paulo*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- Marcus Figueiredo. *Usinagem CNC de 3 eixos vs. 5 eixos: o que você precisa saber?* 2024. Disponível em: <<https://www.manufaturadigital.com/usinagem-cnc-3-5-eixos/>>. Acesso em: 17 de janeiro 2024. Citado na página 23.
- MARQUES, P. V. *Soldagem-fundamentos e tecnologia*. [S.l.]: Editora UFMG, 2005. Citado na página 36.
- Mercado Livre. *Mercado Livre*. 2024. Disponível em: <<https://lista.mercadolivre.com.br/motor-nema-17>>. Acesso em: 23 de Junho 2024. Citado na página 54.
- Mercado Livre. *Mercado Livre*. 2024. Disponível em: <<https://lista.mercadolivre.com.br/cnc-shield>>. Acesso em: 30 de Junho 2024. Citado na página 54.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. *Introduction to linear regression analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2021. Citado na página 63.
- MOTA, C. A. M. d. et al. Revestimento de níquel depositado pela soldagem mig e mig com arame frio. *Soldagem & Inspeção*, SciELO Brasil, v. 21, p. 483–496, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 38.
- M&S INDUSTRIAL. *RETIFICA*. 2023. Disponível em: <<https://mesindustrial.com.br/retifica/>>. Acesso em: 23 de novembro 2023. Citado na página 30.
- NETO, F. M. A. B. *Soldagem GMAW-P com switchback e adição de arame frio aplicada à manufatura aditivada de alumínio*. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2020. Mestrado em Engenharia Mecânica. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 37.
- Newton C. Braga. *Amplificador para Termopar CA3140 (CIR5912S)*. 2024. Disponível em: <<https://www.incub.com.mx/index.php/banco-de-circuitos/4139-amplificador-para-termopar-ca3140-cir5912s>>. Acesso em: 29 de janeiro 2024. Citado na página 41.
- POLASTRINI, H. Desenvolvimento de uma máquina cnc de baixo custo com software e hardware abertos. *Relatório (Graduando em Engenharia Elétrica)*, Instituto Federal de Minas Gerais, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- PRESSMAN, R. S.; MAXIM, B. R. *Engenharia de software-9*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2021. Citado na página 49.
- RAMÍREZ, L. G. C.; JIMÉNEZ, G. S. A.; CARREÑO, J. M. *Sensores y actuadores*. [S.l.]: Grupo Editorial Patria, 2014. Citado na página 41.
- REDWOOD, e. a. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. [S.l.]: 3D Hubs, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 31.
- ResearchGate. *ResearchGate*. 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Industrial-revolutions-in-human-history-The-first-industrial-revolution-used-water-and_fig5_348351406>. Acesso em: 06 de Março 2024. Citado na página 28.

- Revolução Industrial. *Revolução industrial*. 2023. Disponível em: <<https://www.significados.com.br/revolucao-industrial/>>. Acesso em: 17 de novembro 2023. Citado na página 28.
- RIBEIRO, M. A. B. Estudo de um modelo de conversor a/d com níveis de quantização configuráveis. 2017. Citado na página 44.
- RODRIGUES, V. P. et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, v. 12, n. 3, p. 1–1, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- ROSLI, N. et al. Design and development of a low-cost 3d metal printer. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Zibeline International Publishing, v. 41, n. 3, p. 47–54, 2018. Citado na página 39.
- SANTOS, J. A. d. et al. Instrumentação eletrônica com o arduino aplicada ao ensino de física. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2015. Citado na página 57.
- SMID, P. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. [S.l.]: Industrial Press Inc., 2003. Citado na página 20.
- TEIXEIRA, F. R. et al. Transferability of the working envelope approach for parameter selection and optimization in thin wall waam. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 119, n. 1-2, p. 969–989, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 17, 37 e 38.
- Thais Pacievitch. *Manufatura*. 2024. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/industria/manufatura/>>. Acesso em: 19 de janeiro 2024. Citado na página 27.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2020. Citado na página 42.
- TORMEN, V. L. Implementação em programação parametrizada cnc pra usinagem de superfícies de bezier. Universidade Federal de Santa Maria, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- Workana. *O que é Interface do Usuário?* 2024. Disponível em: <<https://i.workana.com/guias/o-que-e-interface-do-usuario/>>. Acesso em: 10 de Fevereiro 2024. Citado na página 50.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A.; FORD, A. L. *University physics with modern physics*. [S.l.]: Pearson San Francisco, 2020. v. 191. Citado na página 35.

Apêndices

APÊNDICE A – Código Arduino de controle dos sensores

```

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_MLX90614.h> // Biblioteca para o sensor MLX90614 (Pirômetro)
#include <max6675.h> // Biblioteca para o Módulo MAX6675 (Termopar)

// Definindo os pinos para o sensor de termopar MAX6675
int ktcS0 = 5; // Pino de Saída de Dados (Serial Output)
int ktcCS = 6; // Pino Chip Select (Seleção do chip)
int ktcCLK = 7; // Pino do Relógio (Clock)

// Criando um objeto do tipo MAX6675 utilizando os pinos definidos
MAX6675 termopar(ktcCLK, ktcCS, ktcS0);

// Criando um objeto do tipo Adafruit_MLX90614 para o sensor MLX90614
Adafruit_MLX90614 pirômetro = Adafruit_MLX90614();

// Variáveis para armazenar as leituras dos sensores
double temperatura_objeto; // Armazena a temperatura do objeto medida pelo pirômetro

void setup() {
  // Inicializa a comunicação serial com uma taxa de 9600 bits por segundo (bps)
  Serial.begin(9600);

  // Inicializa o sensor MLX90614
  pirômetro.begin();
}

void loop() {
  // Lê a temperatura do termopar em graus Celsius e converte para String
  String dados_termopar = String(termopar.readCelsius());

  // Lê a temperatura do objeto usando o pirômetro MLX90614
  temperatura_objeto = pirômetro.readObjectTempC();

  // Verifica se a leitura do termopar é válida. Caso contrário, define como "0.0"
  if (dados_termopar.equals("nan") || dados_termopar.equals("NAN")) {

```

```
dados_termopar = "0.0"; // Substitui "NaN"(Not a Number) por "0.0" para indicar erro
na leitura
}

// Imprime as leituras dos sensores no monitor serial
Serial.print("Temperatura Termopar: ");
Serial.print(dados_termopar);
Serial.println("°C");

Serial.print("Temperatura Pirômetro: ");
Serial.print(temperatura_objeto);
Serial.println("°C");

// Espera 200 milissegundos antes de repetir o loop
delay(200);
}
```

APÊNDICE B – Repositório no GitHub

Segue o link com os códigos usados no trabalho :

<https://github.com/Fredsoncoutinho/projeto_de_pesquisa.git>

