

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

Iury Kischka Mendes

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR DE VARIÁVEIS DE
CAMPO UTILIZANDO MICROCONTROLADORES ARM 32BITS**

Betim
2024

IURY KISCHKA MENDES

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR DE VARIÁVEIS DE
CAMPO UTILIZANDO MICROCONTROLADORES ARM 32BITS**

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

Orientador: Prof. Me. Helbert Ribeiro de Sá

Betim
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

M538d Mendes, Iury Kischka

Desenvolvimento de um transmissor de variáveis de campo utilizando microcontroladores ARM 32 Bits / Iury Kischka Mendes. – 2025.

63 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Me. Helbert Ribeiro de Sá

1. Microcontroladores. 2. ARM 32 bits. 3. Transmissores. 4. Engenharia de Controle e Automação. I Mendes, Iury Kischka. II. Título.

CDU: 681.51

Iury Kischka Mendes

DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR DE VARIÁVEIS DE CAMPO UTILIZANDO MICROCONTROLADORES ARM 32BITS


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

Aprovado em: 22/10/2025 pela banca examinadora:


Helbert Ribeiro de Sá

Digitally signed by Helbert Ribeiro de Sá
DN: cn=Helbert Ribeiro de Sá gn=Helbert Ribeiro de Sá
c=BR Brazil l=BR Brazil o=Betim ou=IFMG
e=helbert.desa@ifmg.edu.br
Reason: Eu reconheço minha assinatura
Location:
Date: 2025-11-06 05:22-03:00

Prof. Me. Helbert Ribeiro de Sá (Orientador) - IFMG

Documento assinado digitalmente
 DELIENE COSTA GUIMARAES BARROS
Data: 10/11/2025 20:42:40-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Ma. Deliene Costa Guimarães Barros - IFMG

Documento assinado digitalmente
 DANIEL ALMEIDA GODINHO
Data: 07/11/2025 00:53:16-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Almeida Godinho - IFMG



ATA DE DEFESA DE RELATÓRIO DE PROJETO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Relatório de Projeto intitulada **DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR DE VARIÁVEIS DE CAMPO UTILIZANDO MICROCONTROLADORES ARM 32BITS** apresentada pelo aluno **Iury Kischka Mendes (0040411)** do Curso **Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação (Campus Betim)**. Os trabalhos foram iniciados às **14:00** do dia **22/10/2025** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Helbert Ribeiro de Sa** (Orientador)
- **Daniel Almeida Godinho** (Examinador Interno)
- **Deliene Costa Guimaraes Barros** (Examinadora Interna)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Relatório de Projeto, passou à argüição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

Aprovado

Reprovado

Nota (quando exigido): 100

Observação / Aprescições:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Helbert Ribeiro de Sa** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIEL ALMEIDA GODINHO
Data: 07/11/2025 00:58:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BETIM / MG, 22/10/2025

Daniel Almeida Godinho

Helbert Ribeiro de Sa

Deliene Costa Guimaraes Barros

Documento assinado digitalmente
gov.br DELIENE COSTA GUIMARAES BARROS
Data: 10/11/2025 20:42:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Helbert
Ribeiro
de Sá**

Digitally signed by Helbert Ribeiro de Sá
DN: cn=Helbert Ribeiro de Sá, gn=Helbert Ribeiro de Sá, c=BR, Brazil, l=BR, Brazil, o=Betim ou=IFMG, e=helbert.desa@ifmg.edu.br
Reason: Eu reconheço minha assinatura
Location:
Date: 2025-11-06 05:26-03:00

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir chegar ao final deste ciclo, por me fortalecer e por me lapidar ao longo deste árduo caminho.

Agradeço aos meus pais, Sergio Farias Mendes e Ingrid Grasiela Kischka Mendes, por me apoiarem e tornarem a jornada possível.

Agradeço aos meus irmãos Ian Kischka Mendes e Isac Kischka Mendes, por caminharem junto comigo e serem verdadeiros amigos.

Agradeço aos tutores que me instruíram durante minha formação, e principalmente ao Professor e Mestre Helbert de Sá.

"Tudo o que fizerem, seja em palavra seja em ação, façam-no em nome do Senhor Jesus, dando por meio dele graças a Deus Pai. (Colossenses 3:17)"

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um transmissor de variáveis de campo através de sensor físico, utilizando um microcontrolador de arquitetura ARM 32 bits, com o objetivo de criar uma solução robusta e de baixo custo para atender às diversas necessidades da indústria. Por meio da utilização de métodos de programação de microcontroladores ARM em linguagem C/C++, é proposto o objetivo de converter valores brutos provenientes do medidor físico utilizado em variáveis de interesse, facilitando sua integração ao sistema de controle e supervisão industrial. Essa abordagem visa possibilitar a leitura contínua de forma concisa pelo controlador durante o processo produtivo, assim como sua visualização pelo operador por meio do sistema de supervisão e controle da planta industrial.

Palavras-chave: microcontrolador; ARM; 32bits; transmissor; variáveis.

ABSTRACT

This work proposes the development of a field variable transmitter through a physical meter, using a 32-bit ARM architecture microcontroller, with the aim of creating a robust and low-cost solution to meet the various needs of the industry. Through the use of ARM microcontroller programming methods in C/C++ languages, the objective is proposed to convert raw values from the physical meter used into variables of interest, facilitating their integration into the industrial control and supervision system. This approach aims to enable the controller to read continuously in a concise manner during the production process, as well as its visualization by the operator through the industrial plant's supervision and control system.

Keywords: microcontroller; ARM; 32bits; transmitter; variables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplificação das escalas de conversão	17
Figura 2 – Conexão de termopar ao multímetro.	18
Figura 3 – Comparação das curvas dos termopares.	19
Figura 4 – MAX6675.	20
Figura 5 – Linearização de sinais.	22
Figura 6 – Componentes de um microcontrolador.	23
Figura 7 – Placa de desenvolvimento - STM32F103VET6.	27
Figura 8 – Conversor VI.	29
Figura 9 – Conversor VI - Esquemático.	30
Figura 10 – Diagrama de Blocos - Projeto do Transmissor.	33
Figura 11 – Diagrama de Blocos - interligação STM32 e Termopar K.	35
Figura 12 – interligação STM32 e Termopar K.	36
Figura 13 – Diagrama de Blocos - interligação STM32 e Conversor VI.	37
Figura 14 – interligação STM32 e Conversor VI.	37
Figura 15 – Conversor VI - 0V/4mA.	38
Figura 16 – Conversor VI - 3V/20mA.	39
Figura 17 – Gráfico Linear - Simulação Conversor VI.	40
Figura 18 – Código STM32F103VET6 - Includes.	40
Figura 19 – Código STM32F103VET6 - Variáveis.	41
Figura 20 – Código STM32F103VET6 - while.	41
Figura 21 – Código STM32F103VET6 - <i>MAX6675_Read_Temp(void)</i>	42
Figura 22 – MAX6675 - Tabela de bits.	42
Figura 23 – Código STM32F103VET6 - <i>MAX6675_Return_Temp_To_DAC(floatTempK)</i>	42
Figura 24 – Diagrama de Blocos - Interligação transmissor e Mini-PLC.	44
Figura 25 – Interligação transmissor e Mini-PLC.	44
Figura 26 – Diagrama de blocos - Interligação Mini-PLC e supervisorio.	45
Figura 27 – Interligação Mini-PLC e supervisorio.	45
Figura 28 – Montagem final do sistema.	46
Figura 29 – Software PIC16F887 - LDmicro.	48
Figura 30 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 0°C.	50
Figura 31 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 9°C.	52
Figura 32 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 63°C.	54
Figura 33 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 80°C.	55
Figura 34 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 108°C.	57
Figura 35 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 134°C.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre Tensão de Entrada e Corrente de Saída	39
Tabela 2 – Tabela de medições de temperatura	49
Tabela 3 – Tabela de Dados Estatísticos	49
Tabela 4 – Tabela de Repetitividade de Temperatura	50
Tabela 5 – Tabela de medições de temperatura	51
Tabela 6 – Tabela de Dados Estatísticos	51
Tabela 7 – Tabela de Repetitividade de Temperatura	51
Tabela 8 – Tabela de medições de temperatura	53
Tabela 9 – Tabela de Dados Estatísticos	53
Tabela 10 – Tabela de Repetitividade de Temperatura	53
Tabela 11 – Tabela de medições de temperatura	54
Tabela 12 – Estatísticas da amostra	55
Tabela 13 – Tabela de Repetitividade de Temperatura	55
Tabela 14 – Tabela de medições de temperatura	56
Tabela 15 – Valores Estatísticos	56
Tabela 16 – Tabela de Repetitividade de Temperatura	57
Tabela 17 – Tabela de medições de temperatura	58
Tabela 18 – Dados estatísticos.	58
Tabela 19 – Tabela de Repetitividade de Temperatura	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEP	Sistema
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
TLB	<i>Translation Lookaside Buffer</i>
CISC	<i>Complex Instruction Set Computer</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
USART	<i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ	Letra grega Gama
Λ	Lambda
ζ	Letra grega minúscula zeta
ξ	Letra grega minúscula qsi
\in	Pertence
Ω	Ohm
μ	Micro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
1.2	Justificativa	15
1.3	Organização do Texto	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	<i>Sensor</i>	<i>17</i>
2.2	Transmissor e transdutor	17
<i>2.2.1</i>	<i>Termopar tipo K e o efeito Seebeck</i>	<i>18</i>
<i>2.2.2</i>	<i>MAX6675</i>	<i>19</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Condicionamento de sinais analógicos</i>	<i>21</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Conversão A/D</i>	<i>23</i>
2.3	Os sistemas embarcados e os microcontroladores	23
2.4	A arquitetura ARM	25
2.5	Microcontroladores ARM frente à outras arquiteturas	26
2.6	STM32F103VET6	27
2.7	Conversor Digital-Analógico (DAC)	28
2.8	Conversor V/I	29
2.9	PIC16F887	30
2.10	Protocolo USART	31
3	METODOLOGIA	32
3.1	Seleção dos componentes	32
3.2	Arquitetura do equipamento	33
<i>3.2.1</i>	<i>Proposta de circuito eletrônico</i>	<i>33</i>
3.3	Montagem do protótipo, testes e validação das medições	34
4	RESULTADOS	35
4.1	Montagem do protótipo	35
<i>4.1.1</i>	<i>Integração do Termopar K ao STM32F103VET6</i>	<i>35</i>

4.1.2	<i>Integração do STM32F103VET6 ao conversor VII</i>	36
[black]4.1.2.1	<i>Simulação do Conversor VI</i>	38
4.1.3	<i>Desenvolvimento do código do STM32F103VET6</i>	40
4.1.4	<i>Integração do transmissor com o sistema para aquisição da variável</i>	43
[black]4.1.4.1	Integração do transmissor com o Mini-PLC	43
[black]4.1.4.2	Integração do Mini-PLC com o sistema supervisorio	45
4.1.5	<i>Montagem final</i>	46
4.2	Desenvolvimento dos Softwares	46
4.2.1	<i>STM32F103VET6</i>	46
4.2.2	<i>PIC16F887 (mini-CLP)</i>	47
4.3	Dados Experimentais	48
4.3.1	<i>Situação 1: Medição de baixas temperaturas - Ambiente não controlado</i>	48
[black]4.3.1.1	<i>Gelo em copo térmico (aproximadamente 0°C)</i>	49
[black]4.3.1.2	<i>Água gelada no copo térmico (aproximadamente 9°C)</i>	51
4.3.2	<i>Situação 2: Medição de médias temperaturas - Ambiente parcialmente controlado</i>	52
[black]4.3.2.1	<i>Estufa regulada a 63°C</i>	52
[black]4.3.2.2	<i>Estufa regulada a 80°C</i>	54
[black]4.3.2.3	<i>Estufa regulada a 108°C</i>	56
[black]4.3.2.4	<i>Estufa regulada a 134°C</i>	58
4.4	Discussão dos Resultados	60
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Em uma era onde a indústria é consolidada, é visível todos os dias a evolução, a atualização, e a otimização das plantas produtivas em todos os setores. É comum ver em várias linhas de produção equipamentos antigos, com elevado custo de manutenção ou que necessitam de mão de obra extremamente especializada e específica para que continuem exercendo suas funções com eficiência.

Neste cenário, a necessidade de sistemas de monitoramento e transmissão de variáveis mais simplificados mas que ofereçam uma robustez igual ou superior se torna evidente. Dunn afirma: "Devido aos rápidos avanços da tecnologia, os instrumentos em uso hoje podem estar obsoletos amanhã. Essas mudanças são impulsionadas pela necessidade de maior precisão, qualidade, exatidão e desempenho."(DUNN, 2005)

Este trabalho foca no desenvolvimento do protótipo de um transmissor de variáveis de campo, utilizando microcontroladores ARM de 32 bits. A motivação para este projeto surge da necessidade de uma solução simples, robusta e econômica que possa atender às diversas necessidades e demandas da indústria. A integração de tecnologias avançadas de microcontroladores ARM com a captação e transmissão de dados de variáveis de campo tem o potencial de fornecer um sistema capaz de oferecer informações precisas e em tempo real para os sistemas de controle e supervisão industrial através de um sistema portátil e simples.

Através da utilização de métodos de programação em linguagens C/C++ específicas para microcontroladores ARM, este trabalho propõe converter os valores brutos gerados pelos medidores físicos em variáveis concisas a nível de controle. Essa conversão visa não apenas possibilitar a leitura precisa das variáveis pelo controlador durante o processo produtivo, mas também permitir que o operador visualize essas informações no sistema de supervisão e controle da planta industrial, contando com um sistema simples, de menor custo e que possibilite uma manutenção ágil.

O desenvolvimento deste transmissor de variáveis de campo representa uma possibilidade de avanço significativo nos processos automação industrial, desde a instrumentação até o controle de indicadores produtivos, fornecendo uma solução tecnológica porém de baixo custo, de forma a contribuir para a eficiência operacional, acessibilidade e aumento da segurança nos processos industriais.

Este trabalho detalhará o processo de desenvolvimento do transmissor, discutirá os desafios encontrados e apresentará os resultados obtidos.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um transmissor de variáveis de campo utilizando microcontrolador ARM 32bits.

1.1.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Elaborar um protótipo do transmissor de variáveis de campo;
- Integrar o microcontrolador ARM 32 bits com conversor de sinais de tensão para corrente (0-5V para 4...20mA), através da leitura do sinal do sensor e utilização do conversor digital/analógico (DAC) do microcontrolador, integrado a um conversor V/I;
- Desenvolver um sistema para leitura a nível de controle (PLC);
- Desenvolver um sistema de supervisão da variável lida;
- Realizar a leitura de variável de campo a nível de controle;
- Verificar a eficiência e concisão das variáveis transmitidas pelo sistema.

1.2 Justificativa

Na grande maioria das aplicações industriais, é essencial a transmissão de variáveis a nível de campo para o nível de controle via cabo através de sinais de corrente de 4 a 20mA, ou de sinais de tensão de 0-10V, 1-5V e $\pm 10V$. Contudo, o custo de instalação e manutenção dos dispositivos atualmente utilizados tende a ser elevado, especialmente em casos de expansão ou realocação de dispositivos. (SENAI, 2012)

Este fator ressalta a necessidade de uma solução mais flexível, portátil e economicamente viável para a aquisição de variáveis a serem utilizadas no monitoramento e controle de processos industriais.

O desenvolvimento do transmissor proposto representa não apenas uma oportunidade de melhoria na eficiência operacional, mas também a promoção da inovação e competitividade através da acessibilidade e adaptabilidade do dispositivo às necessidades mais específicas da indústria.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, o que inclui inicialmente seu contexto e motivação, os objetivos a serem alcançados com a elaboração, sua justificativa e organização. No Capítulo 2, é realizada uma revisão teórica e literária sobre o tema, abordando os conceitos principais relacionados à aquisição e transmissão de variáveis de campo. No Capítulo 3, são descritas as principais metodologias utilizadas, são descritos os componentes de hardware do dispositivo transmissor proposto, assim como a linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento da aplicação do microcontrolador, os amplificadores operacionais que compõem o conversor de tensão para corrente, e os demais equipamentos utilizados para construção e aplicação do protótipo. No capítulo 4, são expostos os resultados alcançados, sendo a construção final do protótipo e a análise das variáveis transmitidas como exemplo. No Capítulo 5, foi realizada uma síntese sobre todo o desenvolvimento, as principais conclusões do trabalho. Finalmente, no Capítulo 6, foi apresentada a lista de referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento do projeto e da monografia.

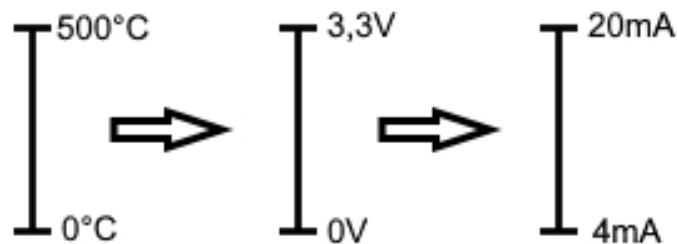
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica do trabalho, demonstrando os principais conceitos para a elaboração do projeto e o desenvolvimento do protótipo de um transmissor de variáveis de campo por meio de microcontrolador ARM 32 bits.

2.1 *Sensor*

O sensor é um dispositivo que realiza a medição inicial e a conversão de energia de uma variável em informações analógicas, digitais, elétricas ou pneumáticas.(JOHNSON, 2014). Os sensores podem ser exemplificados por dispositivos como termopares, utilizados para medição de temperatura, pelas células de carga, para realizar a medição de valores de pressão, ou sensores ultrassônicos, utilizados para várias medições que envolvem distância, como a medição de nível.

Figura 1 – Exemplificação das escalas de conversão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

2.2 **Transmissor e transdutor**

Um transmissor é um dispositivo que detecta uma variável de processo por meio de um sensor ou elemento primário de medição e tem uma saída cujo valor em estado estacionário varia apenas como uma função predeterminada da variável de processo. O sensor pode ser uma parte integrante, como em um transmissor de pressão conectado diretamente, ou uma parte separada, como em um transmissor de temperatura acionado por termopar.(LIPTÁK, 2003)

De forma objetiva, o transmissor converte informações físicas em sinais elétricos padronizados, permitindo que o sistema de controle processe e atue de acordo com a variável medida. No contexto da instrumentação industrial, é importante relacionar o papel do transdutor neste sistema: o transdutor é o elemento responsável por transformar a grandeza física (como pressão, temperatura, vazão ou nível) em um sinal elétrico proporcional, geralmente de baixa intensidade. O transmissor, por sua vez, recebe esse sinal do transdutor e realiza o condicionamento necessário, amplificando e adequando o sinal para um formato padronizado — por exemplo, corrente de 4-20mA ou tensão de 0-10V — apropriado para a transmissão.

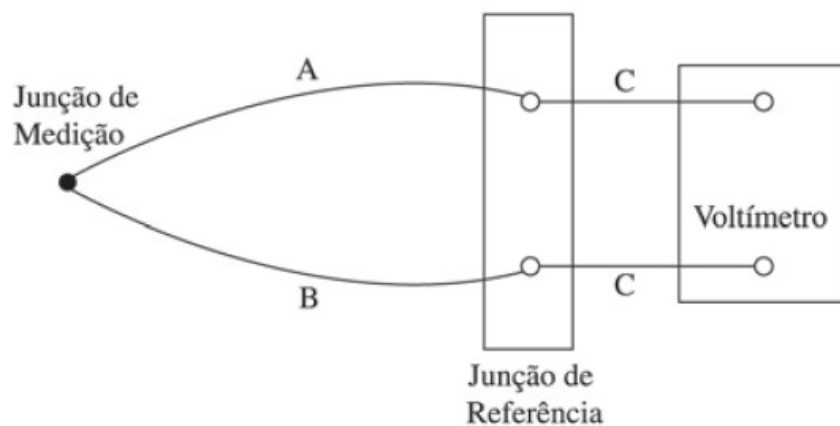
Dessa maneira, o transdutor atua como o dispositivo sensível à variável de interesse, enquanto o transmissor funciona como uma interface entre o campo e o sistema de controle, assegurando a integridade e compatibilidade do sinal enviado para processamento. (INDUSTRIAIS, 2018)

2.2.1 Termopar tipo K e o efeito Seebeck

O termopar é um dispositivo formado pela união de duas diferentes ligas metálicas, completas por um circuito elétrico que unem as outras extremidades das ligas para formar uma segunda junção. Sempre que as temperaturas das duas extremidades forem diferentes, uma corrente elétrica será gerada através de uma diferença de potencial elétrico entre os dois pontos. Na prática, essa diferença de potencial é proporcional à diferença de temperatura entre as diferentes junções, sendo este o chamado efeito *Seebeck*, através do qual é realizada a medição da temperatura.(DUNN, 2005)

A medição de temperatura usando termopares é feita usando circuitos abertos com duas junções, sendo uma delas, a junta de referência, mantida em uma temperatura constante, e a outra, a junta quente, onde se deseja medir a temperatura (MOREIRA, 2002), conforme demonstrado da Fig.2.

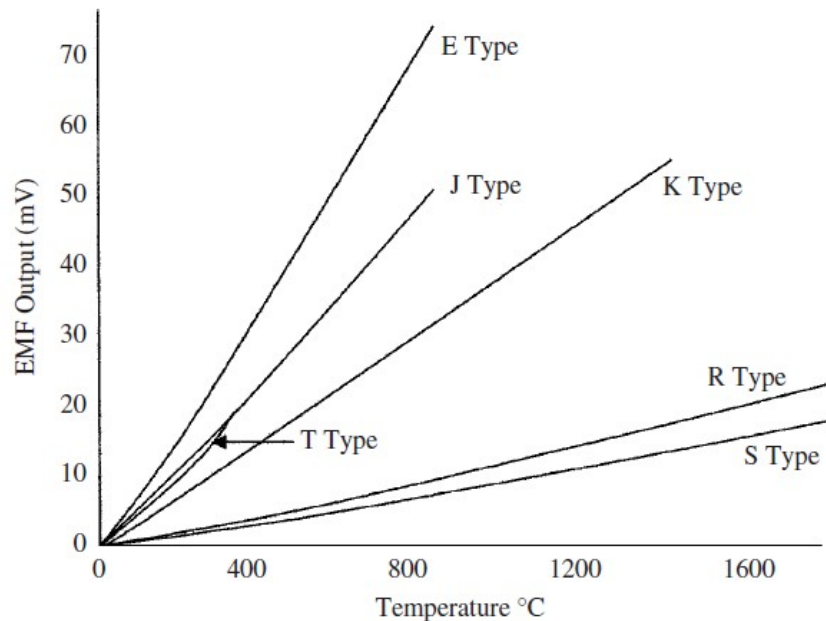
Figura 2 – Conexão de termopar ao multímetro.



Fonte: (MOREIRA, 2002)

Existem três categorias de tipos de termopares: termopares padronizados de metal nobre (R, S, B), termopares padronizados de metal base (K, J, N, E, T) e termopares não definidos por letras. Na prática, a distinção entre “base” e “nobre” é que metais nobres contêm platina e metais base contêm níquel. (MOREIRA, 2002)

Figura 3 – Comparação das curvas dos termopares.



Fonte: (DUNN, 2005)

O termopar tipo K, o qual será utilizado neste projeto, é constituído por fios de Cromel (90% Níquel e 10% Cromo), sendo este o termoelemento positivo, e de Alumel (95% Níquel e 5% Alumínio), sendo este o termoelemento negativo. Possui faixa de utilização de -200°C a 1260°C , e é aplicável para ambientes oxidantes e inertes.

A escolha deste tipo de termopar se deu pela sua disponibilidade, baixo custo, linearidade, e pelo seu vasto uso na indústria, sendo uma solução validada e bastante conhecida.

O range de utilização será limitado de 0°C a $1023,75^{\circ}\text{C}$, de acordo com as limitações do equipamento.

2.2.2 MAX6675

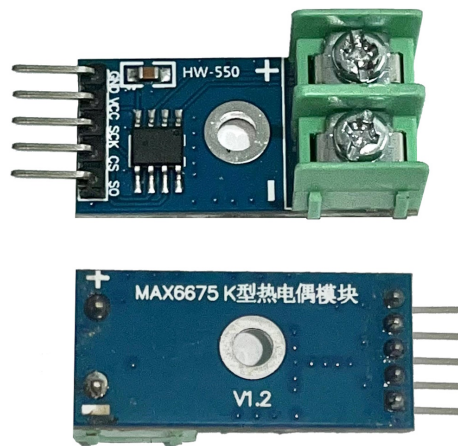
O módulo MAX6675, da empresa *Maxim Integrated Products*, é um componente crucial na utilização de um sensor Termopar tipo K, ambos sendo citados, na maioria das vezes, como um único equipamento. O MAX6675 é um conversor de sinal do Termopar para digital, com compensação de junção fria.

O MAX6675 possui um hardware de condicionamento de sinais que converte o sinal do termopar para uma tensão compatível com os canais de entrada do conversor analógico-digital, enviando a variável através de um sinal de 12 bits, através do pino SO. A sequência de todos os bits em 0 significa que a leitura do termopar é de 0°C , enquanto a sequência de todos os bits em 1 traduz-se em uma leitura do termopar de $1023,75^{\circ}\text{C}$. As entradas de sinal T+ e T- conectam em um circuito interno que reduz a introdução de erros por ruídos vindos dos fios do termopar.

(MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2002)

O módulo do MAX6675 utilizado está embarcado na placa HW-550, que pode ser observada na Figura 3.

Figura 4 – MAX6675.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Antes de converter as tensões termoeletricas para valores de temperatura, é necessária a compensação da diferença entre o lado da junção-fria (temperatura ambiente) e a referência virtual de 0°C. Para um Termopar tipo K, as mudanças de tensão de $41\mu V/^\circ C$, que aproxima as características do termopar com a seguinte equação linear:

$$V_{OUT} = (41\mu/C) * (T_R - T_{AMB})$$

Sendo V_{OUT} a tensão de saída do termopar (μV), T_R a temperatura da junção do termopar ($^\circ C$) e T_{AMB} a temperatura ambiente ($^\circ C$) na junção fria. (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2002)

A função do termopar é medir a temperatura na junta quente, e na sua saída encontrar a diferença de temperatura entre a junta quente e a junta fria, que é a temperatura de referência. A junção quente do termopar pode ler de $0^\circ C$ até $1023,75^\circ C$. o terminal frio (equivalente à temperatura ambiente da placa onde o MAX6675 está conectado) pode medir apenas no range de $-20^\circ C$ até $85^\circ C$, sendo esse o intervalo de funcionamento do módulo, obrigatoriamente. (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2002)

Além destes dados, é importante verificar que o módulo MAX6675 pode apresentar uma diferença máxima de 8 unidades do menor bit significativo (LSB) do conversor AD em relação à temperatura real, conforme o datasheet do equipamento. (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2002)

Como a resolução de cada LSB no MAX6675 é de $0,25^{\circ}\text{C}$, é possível verificar que o erro máximo de leitura do MAX6675 é de:

$$8\text{LSB} * 0,25^{\circ}\text{C} = 2,0^{\circ}\text{C}$$

Ou seja, para qualquer temperatura medida no range de 0°C a 700°C , o valor lido pelo MAX6675 pode diferir até $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ do valor real. (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2002)

2.2.3 Condicionamento de sinais analógicos

Quando uma variável física é medida por um sensor e transformada em um sinal, geralmente é necessário o condicionamento deste sinal para que o sinal seja transmitido de maneira confiável e os elementos de mais alto nível como os controladores possam interpretá-lo. O condicionamento de sinais analógicos fornece as operações para transformar a saída de um sensor em um formato aplicável para interface com outros elementos do laço de controle de um processo. (JOHNSON, 2014)

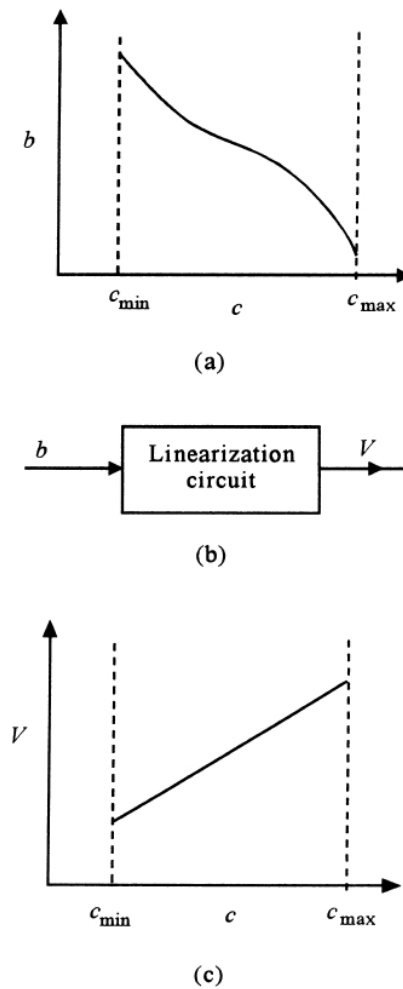
O condicionamento dos sinais analógicos passa por três principais aspectos: o condicionamento de magnitude e bias do sinal, a linearização e a conversão.

O ajuste de magnitude e o ajuste de bias são alguns dos tipos mais comuns de condicionamento de sinais, e são exemplificados por Johnson da seguinte forma:

“(...) a tensão de saída de alguns sensores pode variar de 0,2 a 0,6 V conforme uma variável de processo muda ao longo de uma faixa de medição. No entanto, o equipamento ao qual essa saída do sensor deve ser conectada pode requerer uma tensão que varie de 0 a 5 V para a mesma variação da variável de processo. Realizamos o condicionamento de sinal necessário primeiro mudando o zero para ocorrer quando a saída do sensor é de 0,2 V. Isso pode ser feito simplesmente subtraindo 0,2 da saída do sensor, o que é chamado de deslocamento de zero ou ajuste de bias. Agora temos uma tensão que varia de 0 a 0,4 V, então precisamos aumentar essa tensão. Se multiplicarmos a tensão por 12,5, a nova saída irá variar de 0 a 5 V, conforme necessário. Isso é chamado de amplificação, e 12,5 é chamado de ganho. Em alguns casos, precisamos diminuir a saída de um sensor, o que é chamado de atenuação.”(JOHNSON, 2014).

A linearização se faz necessária devido à não linearidade entre os valores gerados por diferentes sensores, por possuírem características físicas e eletrônicas intrínsecas, e os valores da variável de processo a ser medida. Para exemplificar este processo, é possível analisar a Figura 5, que representa o sinal de saída na Figura 5(a), o sinal simbolicamente em passagem pela linearização na Figura 5(b) e o sinal de tensão linear com a variável de processo na Figura 5(c).

Figura 5 – Linearização de sinais.



Fonte: JOHNSON, 2014.

No protótipo desenvolvido neste trabalho, o MAX6675 tem o papel de realizar a linearização do sinal do Termopar K, enviando-o via SPI¹ ao microcontrolador.

¹ SPI (*Serial Peripheral Interface*) é um protocolo de comunicação serial síncrona, utilizado para troca de dados entre microcontroladores e periféricos, como o caso de sensores.

2.2.4 Conversão A/D

A conversão do sinal analógico em digital se faz crucial para os sistemas modernos, que tipicamente utilizam processadores digitais. Essa conversão possibilita que o sinal condicionado, linearizado e ajustado em termos de magnitude seja convertido em uma forma que possa ser interpretada e processada pelo sistema.

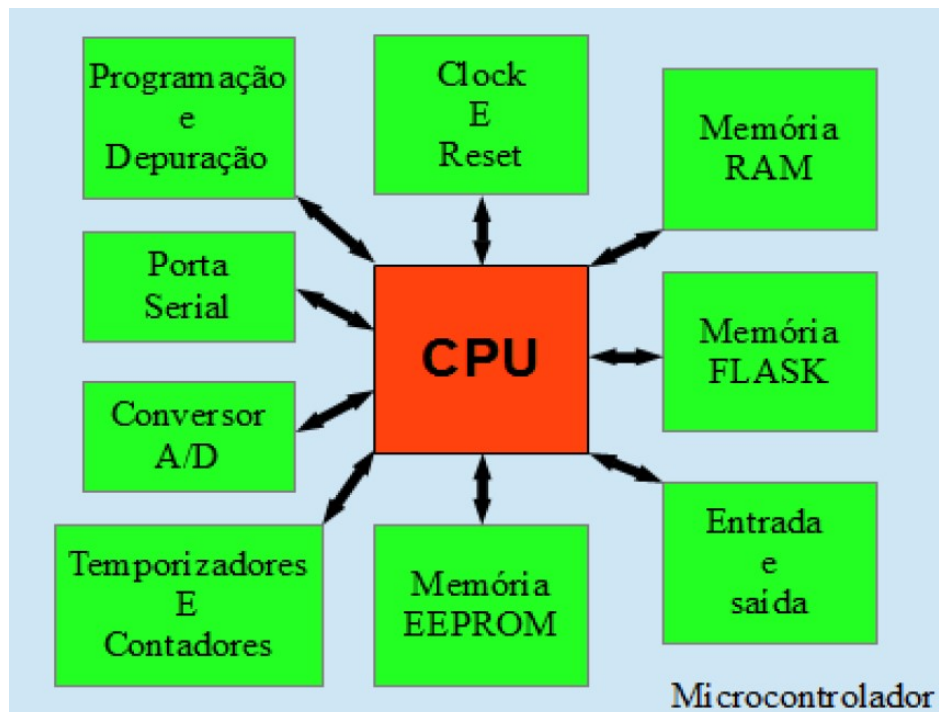
2.3 Os sistemas embarcados e os microcontroladores

A tecnologia por trás dos sistemas embarcados, apesar de moderna, já é consolidada e amplamente utilizada no cotidiano, e está presente em praticamente todos os aparelhos eletrônicos utilizados no cotidiano das pessoas.

Estes aparelhos são normalmente controlados por três núcleos distintos: um microprocessador, um microcontrolador ou um sistema digital sem software (FPGA). (PERIM, 2017)

Os Microcontroladores, de maneira geral, representam a evolução dos microprocessadores, e surgiram com a criação dos SoCs (*System on Chip*), que são sistemas completos em um único chip, destinados a acelerar o desenvolvimento de soluções de controle eletrônico na indústria.

Figura 6 – Componentes de um microcontrolador.



Fonte: KERSCHBAUMER, s.d.

Os microcontroladores contam com um conjunto de componentes básicos, necessários para seu funcionamento. (KERSCHBAUMER, s.d.)

A Unidade Central de Processamento (CPU) é o coração do microcontrolador. Ela executa as instruções armazenadas na memória, realiza cálculos e controla todos os outros componentes do microcontrolador. A CPU processa dados e gerencia as operações do sistema, assegurando que todas as tarefas sejam realizadas conforme programado. (IBM, 2024)

O Clock e o Reset são dois componentes críticos para o funcionamento do microcontrolador. O clock fornece o sinal de temporização necessário para sincronizar todas as operações dentro do microcontrolador. A velocidade do clock determina a rapidez com que a CPU e outros componentes funcionam. O reset, por outro lado, inicializa o microcontrolador, colocando-o em um estado conhecido. O sinal de reset é usado para reiniciar a CPU e os periféricos em resposta a condições específicas ou para iniciar a operação do sistema. (MINHO, 2012)

A Memória RAM (*Random Access Memory*, ou memória de acesso aleatório) é utilizada para armazenar dados temporários e variáveis durante a execução dos programas. Ela é volátil, o que significa que perde seus dados quando o microcontrolador é desligado. Em contraste, a Memória Flash é uma memória não volátil usada para armazenar o firmware ou o código do programa. A Flash mantém seus dados mesmo quando o microcontrolador é desligado, permitindo que o código seja executado cada vez que o dispositivo é ligado. (KERSCHBAUMER, s.d.)

A Memória EEPROM é outro tipo de memória não volátil, utilizada para armazenar dados que precisam ser preservados entre ciclos de energia, como configurações ou parâmetros do usuário. Diferente da Flash, a EEPROM pode ser escrita e lida em pequenas quantidades de dados. (KERSCHBAUMER, s.d.)

As portas de Entrada e Saída (I/O) são essenciais para a comunicação do microcontrolador com dispositivos externos, como sensores, atuadores e outros microcontroladores. As portas de I/O permitem que o microcontrolador interaja com o ambiente externo, lendo entradas e controlando saídas conforme necessário.

O Conversor A/D (Analógico/Digital) é um módulo que converte sinais analógicos em valores digitais que podem ser processados pela CPU. A família STM32 F1xx tem um módulo de conversão digital analógico de 12 bits – (DAC) com dois canais de saída independentes – DAC1 (pino PA4) e DAC2 (pino PA5). Os canais podem ser configurados em modo de 8 bits ou de 12 bits e as conversões podem ser feitas de forma independente ou simultâneas. (SCHELLER, 2018)

A USART (*Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter*) é um módulo de comunicação serial com inúmeras possibilidades de configurações de trabalho, o que lhe permite ser aplicada em uma infinidade de sistemas eletrônicos. A grande vantagem da USART é que muitos dispositivos eletrônicos modernos suportam seu protocolo de comunicação. (LIMA; VILLAÇA, 2012)

Os módulos de Programação e Depuração são interfaces que permitem a programação do microcontrolador com o código de aplicação e a depuração do código para detectar e corrigir erros. As ferramentas de depuração permitem ao desenvolvedor inspecionar e controlar a execução do

programa, garantindo que ele funcione corretamente.

Por fim, os Temporizadores e Contadores são módulos utilizados para contar eventos ou medir intervalos de tempo. Eles são essenciais para tarefas como geração de sinais PWM (Pulse Width Modulation), medições de tempo e criação de delays precisos. Esses componentes trabalham em conjunto para fornecer ao programa meios de escolher o intervalo de tempo entre ações, permitindo o sincronismo temporal de tarefas concomitantes. (PERIM, 2017)

Além dos componentes mencionados, os microcontroladores podem ter outros elementos, como controladores de comunicação, geradores de PWM, temporizadores watchdog, módulos de comunicação sem fio, sensores integrados, geradores de relógio em tempo real (RTC), módulos de segurança e controladores de display. Esses componentes adicionais podem ampliar ainda mais as capacidades dos microcontroladores, permitindo seu uso em uma vasta gama de aplicações mais complexas e especializadas. (PERIM, 2017)

2.4 A arquitetura ARM

Os microcontroladores ARM são CPUs de 32 bits que adotam a filosofia RISC (*Reduced Instruction Set Computer* - Computador com Conjunto Reduzido de Instruções) (PEREIRA, 2007), e caracterizam-se por fatores como simplicidade, baixo custo, consumo reduzido e modularidade. São reconhecidos pela alta velocidade de processamento, diversidade de modelos e fabricantes, bem como pela disponibilidade de software. Esses dispositivos são amplamente utilizados em uma grande variedade de equipamentos portáteis, domésticos e até mesmo industriais.

Diferente de muitas empresas de computador, a ARM não fabrica qualquer microprocessador. Em vez disso, ela cria projetos e ferramentas e bibliotecas para o desenvolvedor baseadas em ARM, licenciando-as para projetistas de sistemas e fabricantes de chips. (TANENBAUM, 2013)

Existem três perfis de arquitetura: A, R e M.

O perfil A (*Applications*) é voltado para o alto desempenho e é projetado para executar sistemas operacionais complexos, como Linux ou Windows. É comumente encontrado em dispositivos de rede, sistemas de controle embarcados e diversos dispositivos *IoT*².

O perfil R (*Real-time*) é destinado a sistemas com requisitos de tempo real, comum em aplicações que exigem respostas rápidas e previsíveis, como sistemas de controle industrial e automação.

O perfil M (*Microcontroller*) é focado em dispositivos pequenos e de baixo consumo de energia. Projetado para executar em microcontroladores, é ideal para dispositivos altamente eficientes em termos de energia, como sensores *IoT* e dispositivos embarcados de baixo consumo.

² *IoT* (*Internet of Things*) é um conceito que se refere à interconexão digital de objetos cotidianos com a internet, conexão dos objetos mais do que das pessoas. Em outras palavras, a internet das coisas nada mais é que uma rede de objetos físicos capaz de reunir e de transmitir dados.

A Arquitetura ARM inclui recursos de gerenciamento de energia e memória avançados, como caches e TLBs (*Translation Lookaside Buffers*)³, para otimizar o desempenho do sistema.

Os microcontroladores ARM representam uma solução altamente eficiente e versátil para uma ampla gama de aplicações, impulsionando a inovação e o desenvolvimento de dispositivos cada vez mais sofisticados e conectados.

Os microcontroladores da linha de desempenho de alta densidade STM32F103xC/D/E possuem recursos que os tornam adequados para uma ampla gama de aplicações, como por exemplo, acionamentos de motores, controle de aplicações, equipamentos médicos e portáteis, plataformas GPS, PLCs, inversores, scanners, sistemas de alarme, HVAC e aplicações em equipamentos industriais.

2.5 Microcontroladores ARM frente à outras arquiteturas

Além dos microcontroladores ARM de 32 bits, existem outras tecnologias e arquiteturas comparáveis, como as arquiteturas x86, AVR e PIC.

A x86 é uma arquitetura de conjunto de instruções complexas (CISC)⁴ amplamente utilizada em computadores pessoais e servidores. É comumente encontrada em computadores, servidores e sistemas embarcados de alta performance. Essa arquitetura oferece grande variedade de instruções complexas e recursos de gerenciamento de memória, contudo tende a consumir mais energia do que arquiteturas RISC⁵, como ARM, principalmente em aplicações de baixa potência.

AVR é uma arquitetura de microcontrolador de 8 bits, desenvolvida pela empresa Atmel, e conhecida por sua simplicidade e eficiência. É comumente utilizada em dispositivos embarcados de baixa potência. Embora seja eficiente em termos de energia, os microcontroladores AVR podem não ser tão poderosos quanto os ARM de 32 bits quanto ao desempenho bruto e seus recursos.

A arquitetura PIC foi desenvolvida pela Microchip Technology, conhecida pela ampla disponibilidade e baixo custo. É comumente utilizada em grande variedade de aplicações, incluindo automação industrial, dispositivos médicos, controle de motores e etc. Oferece um conjunto de instruções RISC simplificado, e é altamente otimizado para aplicações em tempo real. Ainda que ofereçam flexibilidade e usabilidade, os microcontroladores PIC podem ser menos poderosos

³ TLB (*Translation Lookaside Buffer*) é uma parte da CPU usada para acelerar o processo de tradução de endereços virtuais para endereços físicos. A TLB é um cache que armazena traduções recentes para que possam ser rapidamente acessadas pela CPU.

⁴ CISC (*Complex Instruction Set Computer*) é um tipo de arquitetura de processadores caracterizada pelo uso de um conjunto extenso e altamente especializado de instruções complexas. Esses processadores são projetados para executar uma ampla variedade de operações com um número reduzido de linhas de código em nível mais baixo.

⁵ RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) é um tipo de arquitetura de processadores caracterizada pelo uso de um conjunto simplificado e altamente otimizado de instruções. Esses processadores são projetados para executar operações com eficiência, realizando mais instruções em menos tempo.

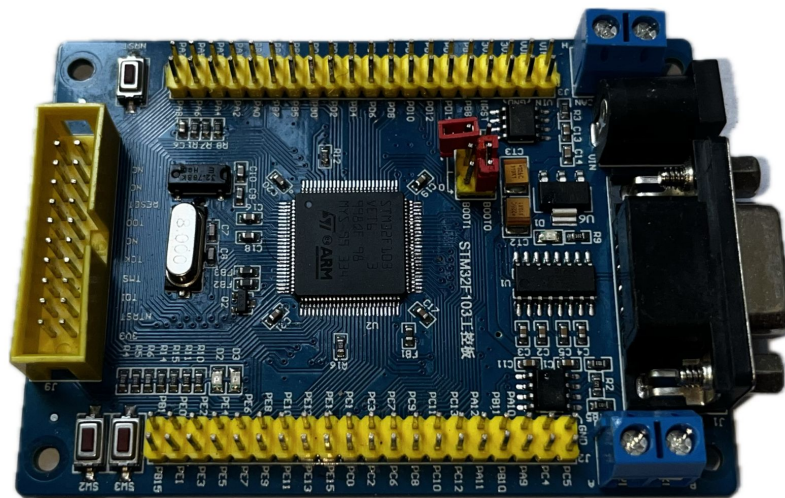
e ter menos recursos do que os microcontroladores ARM de 32 bits. Do ponto de vista de algumas pessoas, os PICs não poderiam ser considerados máquinas RISC, pois realizam operações diretamente com dados em memória (PEREIRA, 2007).

Em suma, os microcontroladores ARM de 32 bits se destacam pela arquitetura RISC, e proporcionam uma combinação única entre desempenho, eficiência, flexibilidade e facilidade de programação. Essas características tornam-os uma escolha popular para uma ampla gama de aplicações, e também a escolha para o desenvolvimento do meu projeto.

2.6 STM32F103VET6

O STM32F103VET6, da empresa STMicroelectronics, pertence à linha de alta densidade da família de microcontroladores STM32F1. Utilizando um núcleo ARM Cortex-M3 de 32 bits, opera até 72MHz, o que permite desempenho confiável em aplicações embarcadas, mesmo operando múltiplas tarefas simultaneamente.

Figura 7 – Placa de desenvolvimento - STM32F103VET6.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

É um modelo que possui 512 kB de memória Flash e 64kB de SRAM, e conta com três conversores analógico-digital (ADC) de 12 bits, permitindo medições precisas de sinais analógicos, e possui também dois conversores digital-analógico (DAC) de 12 bits, que facilitam o desenvolvimento de saídas analógicas, como a geração do sinal de 0 a 3V.

No quesito de conectividade, o STM32F103VET6 oferece grande variedade de interfaces de comunicação, como USARTs, SPIs, I2Cs, interface USB 2.0 e suporte a barramento CAN. Essa versatilidade garante uma ampla compatibilidade com sensores, módulos externos e até mesmo sistemas supervisórios. (STMICROELECTRONICS, 2023)

Apesar de conter recursos que superam a complexidade do protótipo proposto, a escolha do microcontrolador STM32F103VET6 neste projeto é justificada por uma combinação de fatores, sendo estes o custo acessível, a facilidade de uso, a riqueza de documentações e a confiabilidade do equipamento em aplicações embarcadas. Existem outros microcontroladores capazes de atender perfeitamente aos requisitos do sistema, como a aquisição de sinal analógico, o processamento básico de sinal e a conversão para saída em corrente, contudo, o STM32 se destacou por reunir esta riqueza de recursos em um único chip.

Apesar da sua robustez e da disponibilidade de recursos que, de certa forma, excedem a complexidade do protótipo desenvolvido, sua utilização não representa um exagero técnico ou financeiro, pois se trata de um componente de baixo custo, com excelente relação custo-benefício.

Pode-se dizer que a motivação da escolha deste microcontrolador para a aplicação se deu pela praticidade, acessibilidade e versatilidade do STM32, o que é extremamente valioso em contextos de desenvolvimento de protótipos.

2.7 Conversor Digital-Analógico (DAC)

O conversor digital-analógico (DAC) presente no microcontrolador STM32F103VET6 é um periférico integrado que permite a conversão de valores digitais em sinais de tensão analógica contínua. Este modelo conta com dois canais DAC independentes, ambos com resolução de 12 bits, o que proporciona 4096 níveis discretos de saída, permitindo uma representação analógica de valores digitais.

No contexto deste projeto, o DAC é utilizado para gerar uma tensão de saída proporcional à medição de temperatura do Termopar K, permitindo que essa tensão seja transformada em um sinal de corrente industrial de 4 a 20mA pelo conversor integrado ao sistema. Essa funcionalidade torna o DAC um elemento essencial na transmissão da variável medida, através da transição do domínio digital para o domínio analógico.

A incerteza da saída do DAC do microcontrolador STM32F103VET6 foi avaliada com base nas especificações do fabricante (Tabela 63, página 108/130 do datasheet).

O termo LSB (*Least Significant Bit*) é utilizado em conversores digital-analógico (DAC) para representar o menor incremento possível na saída analógica do conversor, e pode ser calculado por:

$$\text{LSB} = V_{ref}/2^N$$

Que, calculando a correspondência para $V_{ref} = 3,3V$ para 12 bits, é equivalente a:

$$\text{LSB} = 3,3V/2^{12} = 0,805mV$$

Os principais erros explicitamente caracterizados para o STMF103VET6 são:

Diferença máxima da saída analógica: a tensão máxima de saída, com buffer ativado, é limitada a “ $V_{DDA} - 0,2V$ ”, ou seja, 3,1 V para $V_{DDA} = 3,3$ V. Esta característica limita o range útil da saída, mas não configura um erro de medição, e sim uma limitação da faixa de conversão.

Erro de linearidade diferencial (DNL): máximo de ± 2 LSB para resolução de 12 bits, equivalente a $\pm 1,61$ mV ou, considerando os limites de 0 a $200^{\circ}C$, $\pm 0,1^{\circ}C$, sendo insignificante com relação à resolução da medição realizada pelo sensor.

Erro de linearidade integral (INL): máximo de ± 4 LSB para resolução de 12 bits, equivalente a $\pm 3,22$ mV ou, considerando os limites de 0 a $200^{\circ}C$, $\pm 0,21^{\circ}C$, sendo insignificante com relação à resolução da medição realizada pelo sensor.

A incerteza do sensor MAX6675 ($\pm 2^{\circ}C$) deve ser considerada separadamente e, para uma estimativa combinada de incerteza, pode ser somada ao erro de linearidade do DAC em quadratura.

2.8 Conversor V/I

O conversor V/I detêm um simples porém importante papel neste projeto, pois é responsável por condicionar o sinal de transmissão para a faixa de 4-20mA, que é o range mais comumente utilizado na indústria para transmissão de variáveis para sistemas de controle. A conversão de sinais de tensão para corrente é extremamente útil e uma prática comum na indústria para transmitir sinais de instrumentos como sensores e transdutores, responsáveis pela medição das variáveis de um processo, que podem ser de temperatura, pressão, fluxo, entre outras.(DUNN, 2005) O módulo conversor pode ser verificado na Figura 6.

Figura 8 – Conversor VI.

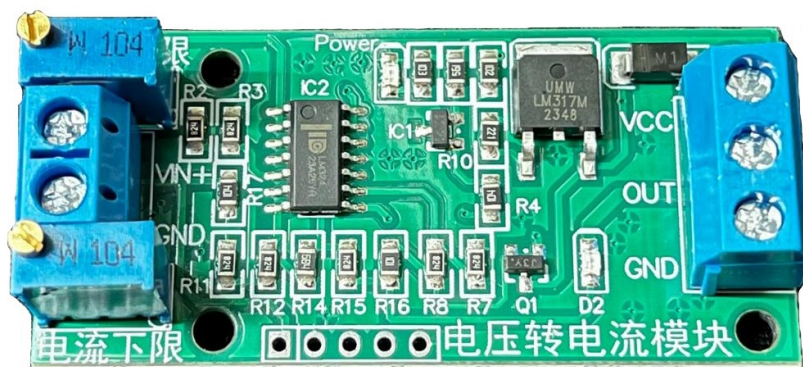
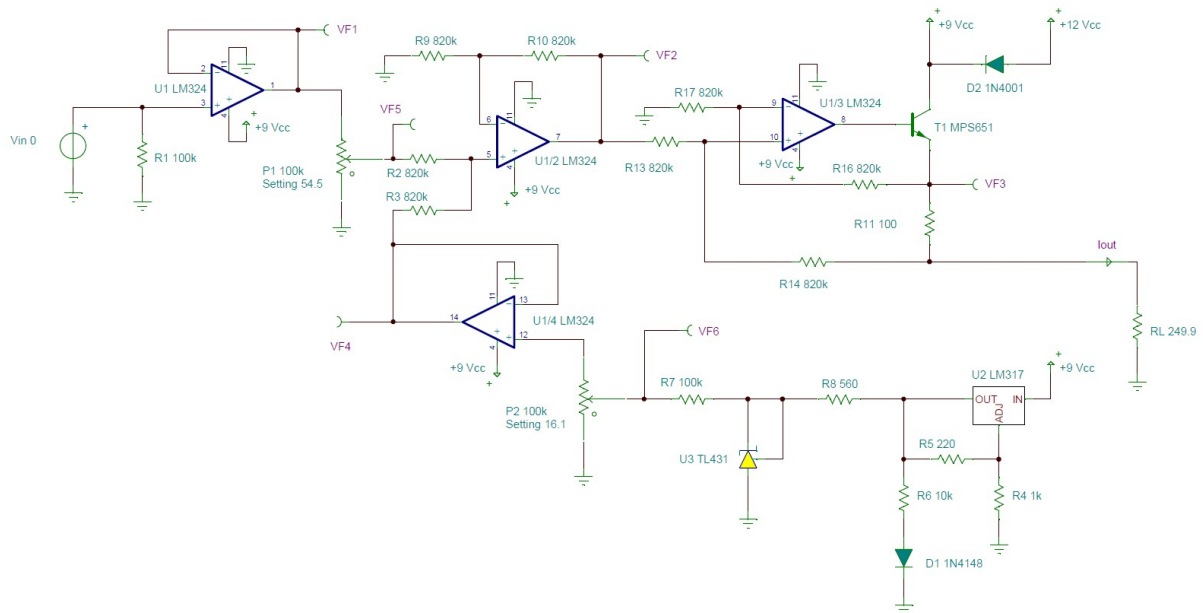


Figura 9 – Conversor VI - Esquemático.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

2.9 PIC16F887

O PIC16F887, da empresa Microchip Technology, é um microcontrolador de 8 bits da família PIC16, amplamente utilizado em aplicações embarcadas devido à sua robustez, simplicidade e eficiência energética. Baseado em uma arquitetura RISC, é capaz de operar a até 20 MHz, executando a maioria das instruções em um único ciclo, o que garante desempenho satisfatório em aplicações de controle e aquisição de dados.

Este modelo possui 8 KWords (8192 palavras) de memória Flash, 368 bytes de RAM e 256 bytes de memória EEPROM, oferecendo recursos suficientes para o armazenamento do programa, variáveis temporárias e dados persistentes. O microcontrolador dispõe de um conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits, com até 14 canais de entrada, ideal para a leitura de sinais analógicos com resolução intermediária. Além disso, conta com módulos PWM de 10 bits, comparadores analógicos, temporizadores de 8 e 16 bits, e recursos de comunicação serial como EUSART, SPI e I2C, todos integrados ao módulo MSSP. (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2009)

O PIC16F887 foi selecionado para a aplicação apenas como uma solução, considerando que o mesmo faz parte apenas do sistema de aquisição e exibição da variável medida, e não do protótipo, efetivamente.

Este hardware foi disponibilizado pelo Professor Helbert de Sá, orientador do desenvolvimento do projeto.

2.10 Protocolo USART

A USART (*Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter*) é um periférico de comunicação serial muito versátil encontrado em diversos microcontroladores, como o STM32F103VET6 e o PIC16F887. Ela permite a troca simultânea de dados digitais por meio de duas linhas principais: uma para transmissão (TX) e outra para recepção (RX), operando em modo full duplex. A USART pode funcionar tanto em modo assíncrono, semelhante ao padrão RS-232, quanto em modo síncrono, que utiliza um sinal de clock compartilhado.

No modo assíncrono, amplamente utilizado e adotado neste projeto, os dados são enviados em quadros que incluem um bit de início, de 5 a 9 bits de dados, um bit opcional de paridade para detecção de erros, e um ou dois bits de parada. Para que a comunicação seja eficiente, receptor e transmissor devem estar configurados para a mesma taxa de transmissão (baud rate). A USART também dispõe de uma lógica interna para geração e verificação de paridade, além de filtros anti-ruído e detecção de erros, garantindo maior robustez no enlace.

O hardware da USART é composto por três blocos principais: o gerador de clock, o transmissor e receptor, e os registradores de controle. O gerador de clock provê o sinal tanto para transmissor quanto para receptor, suportando quatro modos de operação: assíncrono normal, assíncrono com dobro de velocidade, síncrono mestre e síncrono escravo (onde o pino XCK é utilizado). O transmissor possui registradores temporários que permitem uma transmissão contínua e sem atrasos, enquanto o receptor, que possui a lógica mais complexa, recupera o sinal de clock no modo assíncrono e detecta erros de paridade e transmissão.

Devido à sua simplicidade na conexão — usando apenas as linhas TX e RX — e à eficiência na comunicação, a USART é amplamente empregada em sistemas embarcados para interligar microcontroladores a módulos periféricos, como sensores, dispositivos Bluetooth, computadores ou sistemas supervisórios. Neste projeto, ela é usada para fazer a interface entre o PIC16F887 e um supervisório em C#, possibilitando o envio dos dados de temperatura processados para visualização e eventual registro.(KERSCHBAUMER, s.d.)

3 METODOLOGIA

O Capítulo 2 apresentou a fundamentação teórica, neste capítulo será apresentada a metodologia do trabalho. Serão detalhados a seleção dos componentes necessários, a montagem do circuito em simulação e todas as etapas referentes ao processo de montagem do equipamento.

3.1 Seleção dos componentes

Para a execução do trabalho, os seguintes materiais foram utilizados:

- Termopar do tipo K com módulo MAX6675.
- STM32F103VET6 em placa de desenvolvimento padronizada;
- Cabo conversor USB-Serial;
- Gravador para microcontroladores ST-Link/V2;
- Conversor tensão corrente 0-3V para 4-20mA;
- Proteus, software para realizar a simulação do circuito eletrônico e validar a ideia proposta;
- STMCubeMX, software para configuração do microcontrolador;
- Keil uVision5, software para programação do microcontrolador;
- Tina Design Suite, software de simulação de circuitos eletrônicos;
- Visual Studio / .Net Framework, para criar a interface gráfica;
- Mini PLC baseado no microcontrolador PIC16F887;
- Gravador PICKit3 para microcontroladores PIC;
- Software PICKit3 Programmer;
- Software LDmicro;
- Resistor 150Ω;
- Resistor 100Ω;
- Fonte 12V.

3.2 Arquitetura do equipamento

3.2.1 Proposta de circuito eletrônico

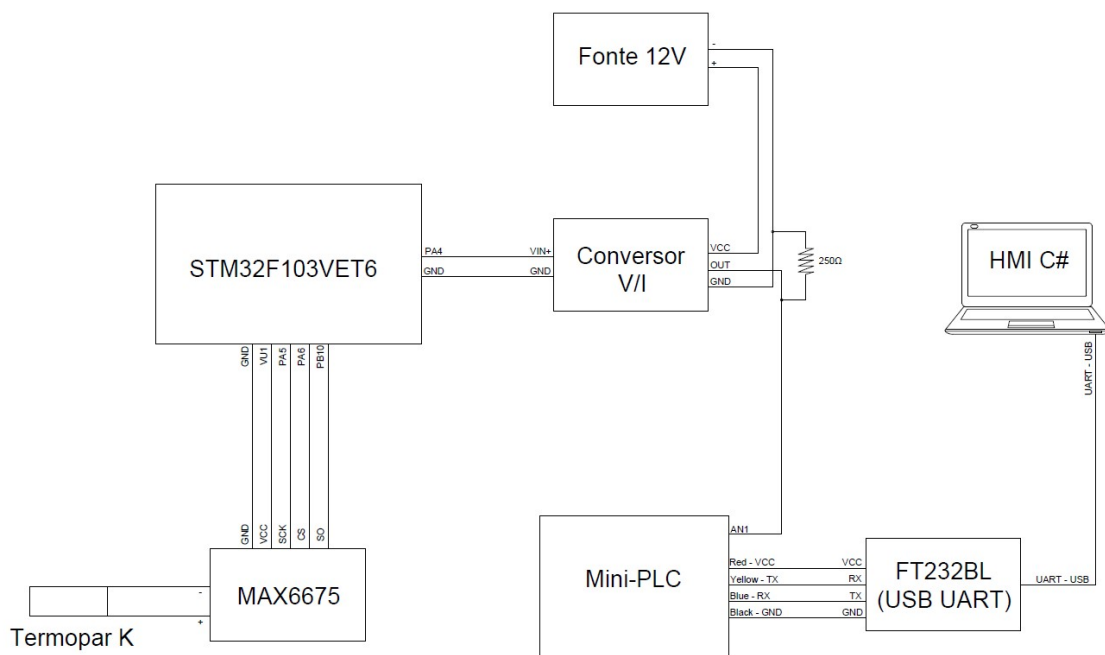
O transmissor de variáveis de campo proposto neste trabalho é composto objetivamente por uma placa de desenvolvimento com o microcontrolador STM32F103VET, acompanhada de um conversor de sinais que transforma tensões de 0 a 3V para sinais de corrente na faixa de 4-20mA.

O projeto completo possui mais dois módulos adicionais, sendo estes:

1. **Medidor de temperatura:** composto por um termopar do tipo K em conjunto com o módulo MAX6675, e responsável pela transformação da variável física em um sinal elétrico a ser interpretado;
2. **Sistema de aquisição de dados:** Composto por um mini-CLP baseado no microcontrolador PIC16F887, que recebe o sinal do transmissor, e por uma aplicação desenvolvida em C# que atua como um sistema supervisor, exibindo visualmente o valor final da variável medida.

A figura 10 apresenta o diagrama de blocos construtivo do projeto.

Figura 10 – Diagrama de Blocos - Projeto do Transmissor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.3 Montagem do protótipo, testes e validação das medições

No capítulo 4 deste trabalho, será apresentada a montagem do protótipo e a integração de todos os componentes, incluindo dos dispositivos de recebimento e apresentação da variável a nível de supervisão. Além da montagem, serão apresentadas uma série de medições de temperatura realizadas através do termopar e transmitidas pelo equipamento.

Os dados coletados serão registrados e será realizado um estudo estatístico apresentando a distribuição normal dos valores medidos. Com base nos dados, será possível calcular a média, o desvio médio, o desvio padrão e o gráfico gaussiano das medições realizadas pelo equipamento.

O estudo estatístico através da Distribuição Gaussiana visa a identificação da precisão do equipamento, a detecção de possíveis erros sistemáticos, a validação do comportamento estatístico, a avaliação da repetibilidade, a otimização do protótipo e, além de tudo, a comunicação dos resultados do trabalho proposto.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados tanto a montagem quanto os resultados obtidos a partir da implementação e testes do protótipo construído do transmissor de variáveis de campo baseado no microcontrolador ARM 32 bits STM32F103VET6. Essa abordagem tem como objetivo a avaliação da precisão, a repetitividade e a robustez do sistema desenvolvido, assegurando sua adequação às premissas do projeto proposto e avaliando sua aplicabilidade às exigências de transmissão de sinais industriais.

4.1 Montagem do protótipo

4.1.1 Integração do Termopar K ao STM32F103VET6

A primeira fase do desenvolvimento do transmissor de variáveis de campo envolve a integração do Termopar tipo K ao microcontrolador.

O termopar possui dois terminais, através dos quais é gerada a diferença de potencial proporcional à temperatura medida em seu ponto de medição através do efeito Seebeck. Esse sinal, geralmente na faixa de milivolts, é processado pelo módulo MAX6675, que amplifica e calcula a diferença de tensão entre os terminais do termopar tipo K. Além disso, o MAX6675 realiza a compensação da junção fria, assegurando uma leitura precisa da temperatura.

O sinal digitalizado é então recebido pelo STM32F103VET6 através da interface SPI (Serial Peripheral Interface) para que seja realizado o processamento inicial da variável.

A interligação realizada pode ser vista nas figuras 11 e 12.

Figura 11 – Diagrama de Blocos - interligação STM32 e Termopar K.

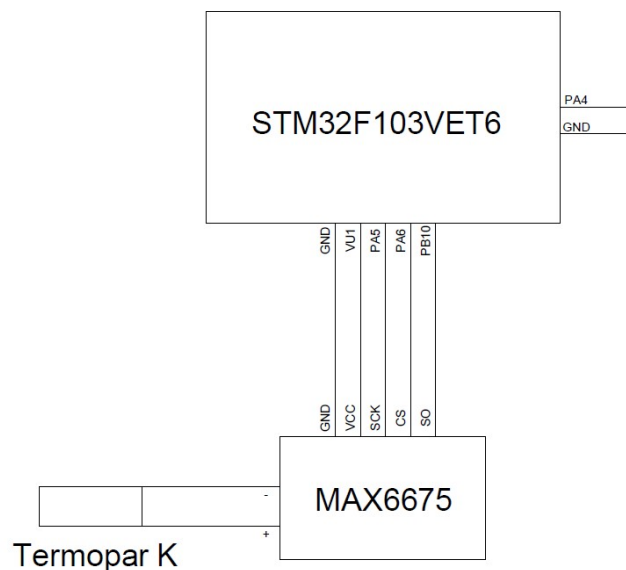
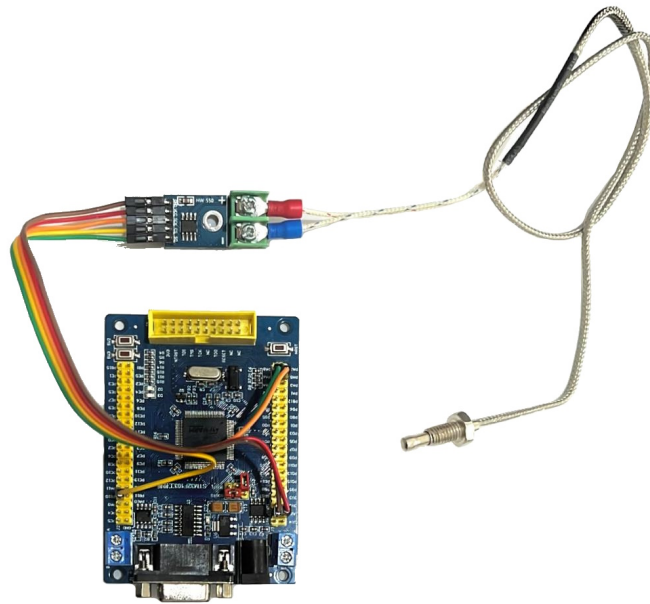


Figura 12 – interligação STM32 e Termopar K.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.1.2 Integração do STM32F103VET6 ao conversor V/I

Após a leitura e conversão do valor de temperatura medido pelo termopar, o sinal é normalizado pelo STM32F103VET6 para uma faixa de 0-3V. Contudo, essa faixa de tensão não é adequada para a transmissão de variáveis por sistemas de instrumentação. De modo a solucionar este problema, o sinal de tensão é enviado ao conversor tensão-corrente (V/I), que conforme demonstrado no capítulo 2 através de cálculos e simulações, converte o sinal para o padrão de 4-20mA, formato ideal para a transmissão e amplamente utilizado em sistemas industriais.

Antes da utilização do conversor, é necessária sua calibração, processo realizado da seguinte forma:

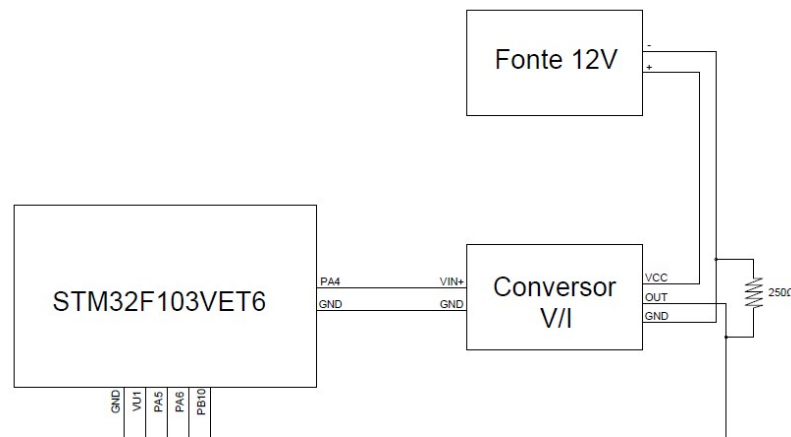
1. **Configuração inicial:** O conversor foi conectado ao pino PA4 do STM32F103VET6, configurado como uma porta de saída analógica utilizando o módulo interno DAC (Digital-to-Analog Controller), presente na arquitetura ARM. Esse módulo gera um sinal analógico de 12 bits, equivalente ao range de 0 e 4095, correspondendo a uma faixa de 0 a 3,3V na saída analógica.
2. **Ajuste de corrente mínima:** O sinal analógico foi ajustado no STM32 para seu valor mínimo (0), equivalente a uma tensão de saída de 0V no pino PA4. Utilizando o trimpot de ajuste da corrente mínima do conversor, foi configurada a saída para 4mA (medido através de amperímetro).
3. **Ajuste de corrente máxima:** O sinal analógico foi ajustado no STM32 para seu valor máximo (4095), equivalente a uma tensão de saída de 3,3V no pino PA4. Utilizando o

trimpot de ajuste da corrente máxima do conversor, foi configurada a saída para 20mA (medido através de amperímetro).

O sinal de saída do conversor é de 4 a 20mA, contudo o controlador responsável por receber este sinal na próxima etapa é capaz de ler sinais de tensão na faixa de 1-3V. A conversão é realizada eletricamente, através da aplicação de uma resistência de 250Ω. Utilizando da Lei de Ohm ($V = R * I$), obtemos o resultado de 1V para uma corrente de 4mA, e 3V para uma corrente de 20mA.

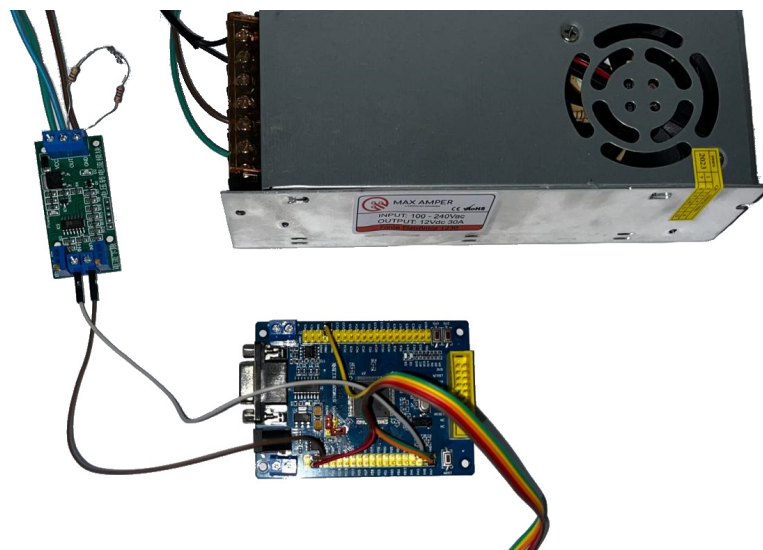
O esquema de interligação é descrito no diagrama da figura 13, e exemplificado através da montagem física apresentada na figura 14.

Figura 13 – Diagrama de Blocos - interligação STM32 e Conversor VI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 14 – interligação STM32 e Conversor VI.



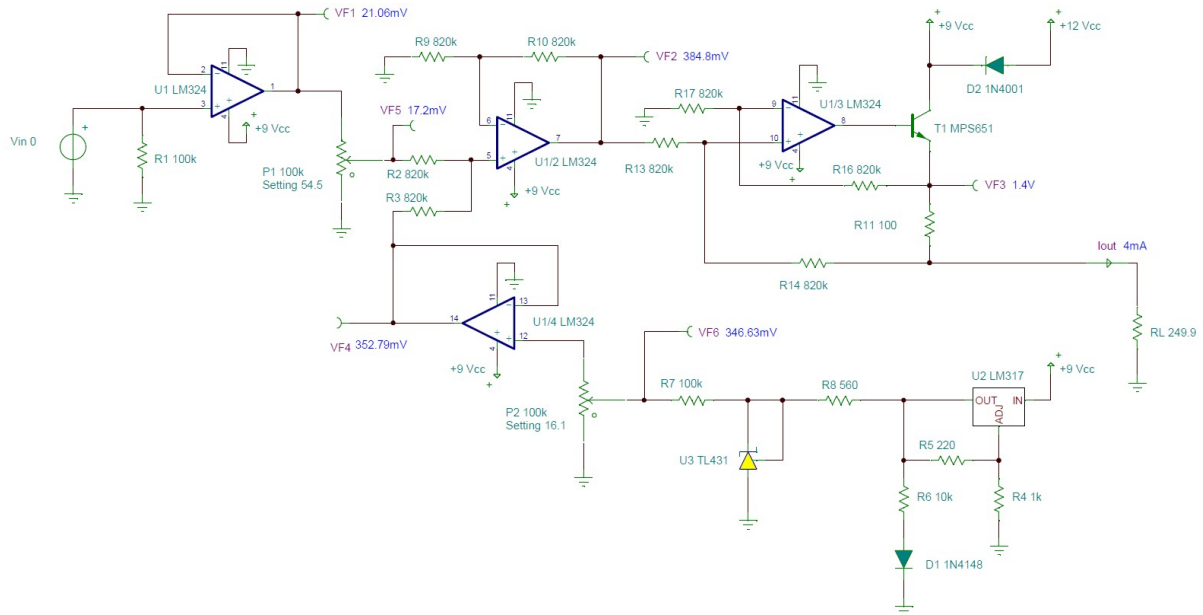
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.1.2.1 Simulação do Conversor VI

Com o objetivo de validar o funcionamento esperado do conversor de tensão para corrente, foi realizada uma simulação no software Tina-TI.

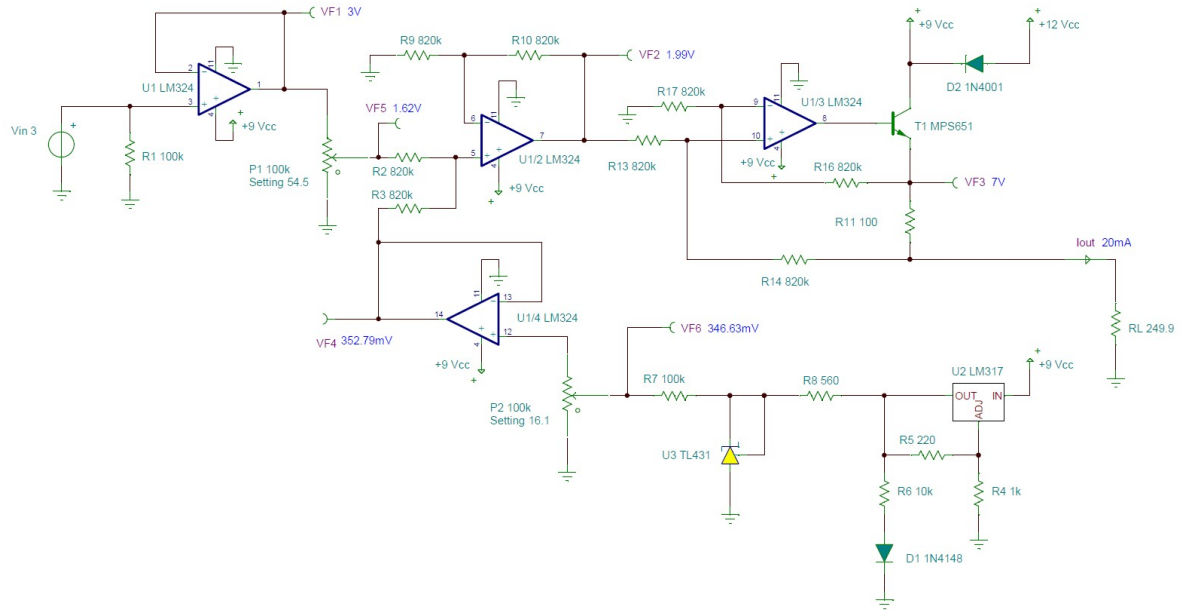
As figuras 15 e 16 apresentam a simulação do valor de entrada de 0V fornecendo um valor de corrente de saída de aproximadamente 4mA, assim como o valor de 3V fornecendo um valor de corrente de saída de aproximadamente 20mA.

Figura 15 – Conversor VI - 0V/4mA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 16 – Conversor VI - 3V/20mA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

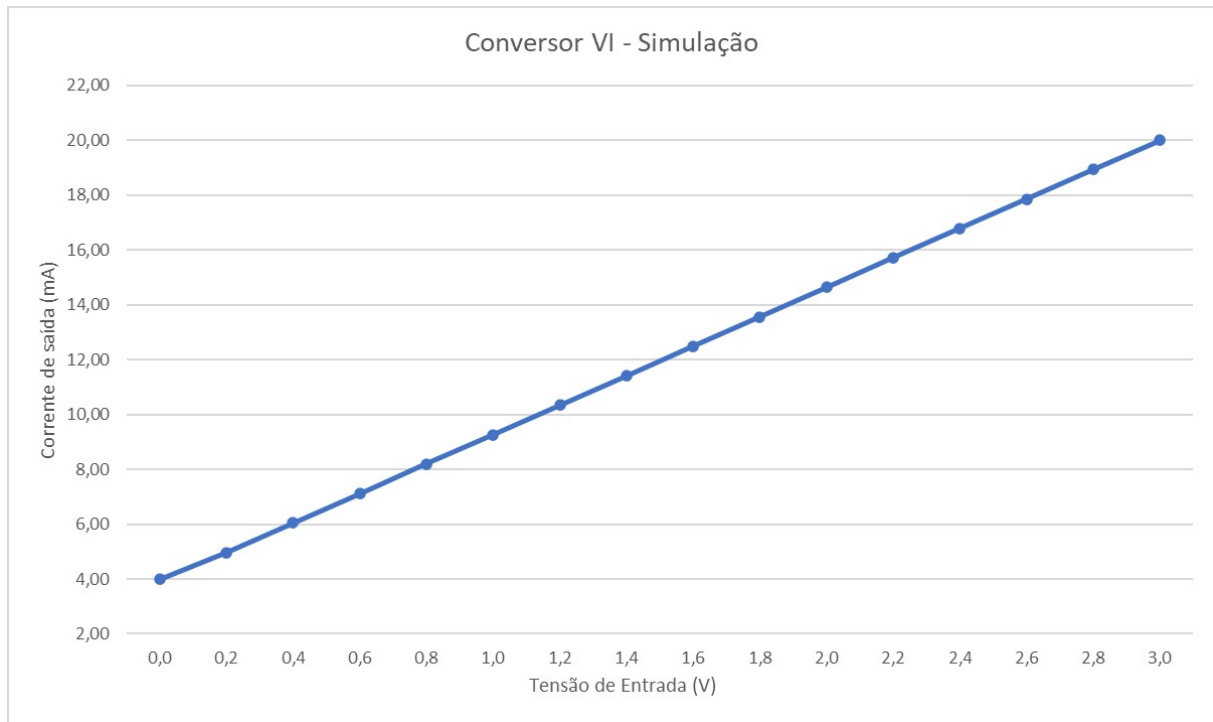
No intuito de observar o comportamento da corrente de saída em função da tensão de entrada, foram simulados os valores de entrada de 0 a 3V com incrementos de 0,2V, e registrados os valores de correntes de saída fornecidos pela simulação.

A seguir, é apresentada a tabela com os valores obtidos, bem como o gráfico da figura 17 que permite visualizar a linearidade da conversão entre as grandezas de tensão e corrente.

Tensão de Entrada (V)	Corrente de Saída (mA)
0,0	4,00
0,2	4,97
0,4	6,04
0,6	7,11
0,8	8,19
1,0	9,26
1,2	10,34
1,4	11,41
1,6	12,48
1,8	13,56
2,0	14,63
2,2	15,71
2,4	16,78
2,6	17,85
2,8	18,93
3,0	20,00

Tabela 1 – Relação entre Tensão de Entrada e Corrente de Saída

Figura 17 – Gráfico Linear - Simulação Conversor VI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.1.3 Desenvolvimento do código do STM32F103VET6

O desenvolvimento do código foi realizado através de dois ambientes: STM32CubeMX, para a configuração inicial do microcontrolador, e Keil uVision, usado no desenvolvimento do código em linguagem C, utilizando a biblioteca HAL (*Hardware Abstraction Layer*), da STMicroelectronics.

Na primeira etapa do código, foram adicionados os *includes* das bibliotecas utilizadas no desenvolvimento, sendo estas *main.h*, *stdio.h*, *stdbool.h* e *stdint.h*, conforme demonstrado na figura 18:

Figura 18 – Código STM32F103VET6 - Includes.

```
/* USER CODE END Header */
/* Includes -----*/
#include "main.h"

/* Private includes -----*/
/* USER CODE BEGIN Includes */

#include <stdio.h>
#include <stdbool.h>
#include "stdint.h"
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Em seguida, foi realizada a declaração das variáveis e estruturas, conforme demonstrado na figura 19:

Figura 19 – Código STM32F103VET6 - Variaveis.

```

/* Private variables -----*/
DAC_HandleTypeDef hdac;
SPI_HandleTypeDef hspil;
UART_HandleTypeDef huart1;

/* USER CODE BEGIN PV */

/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_SPI1_Init(void);
static void MX_USART1_UART_Init(void);
static void MX_DAC_Init(void);

/* USER CODE BEGIN PFP */

/* USER CODE END PFP */

/* Private user code -----*/
/* USER CODE BEGIN 0 */

_Bool TCF=0; // Thermocouple Connection acknowledge Flag
uint8_t DATARX[2];
float TempK, TempK1, DAC_Output, DAC_OutputVoltage;

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No ciclo de repetição principal *while(1)*, foram chamadas duas funções criadas, conforme demonstrado na figura 20, que serão dissecadas em seguida.

Figura 20 – Código STM32F103VET6 - while.

```

while (1)
{
/* USER CODE END WHILE */

/* USER CODE BEGIN 3 */

TempK = Max6675_Read_Temp();
TempK1 = TempK-4; //diferença de calibração
DAC_Output = Return_Temp_To_DAC(TempK1);
HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC1_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, DAC_Output);
DAC_OutputVoltage = (((float)Return_Temp_To_DAC(TempK1)/4095.0f)*3.0f);
HAL_Delay(1000);

}
/* USER CODE END 3 */

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A primeira função utilizada no ciclo de repetição *while(1)* foi a função *MAX6675_Read_Temp*. Essa função realiza a leitura da variável de temperatura via SPI, e a organização dos dois *bytes* lidos sequencialmente em uma *word* de 16 bits, deslocando o segundo *byte* em 8 posições. O código pode ser verificado na figura 21.

Figura 21 – Código STM32F103VET6 - *MAX6675_Read_Temp(void)*.

```
// ----- Functions -----
float Max6675_Read_Temp(void)
{
    float Temp=0; // Temperature Variable
    HAL_GPIO_WritePin(CS_GPIO_Port,CS_Pin,GPIO_PIN_RESET); // Low State for SPI Communication
    HAL_SPI_Receive(&hspi1,DATARX,2,50); // DATA Transfer
    HAL_GPIO_WritePin(CS_GPIO_Port,CS_Pin,GPIO_PIN_SET); // High State for SPI Communication
    TCF=(((DATARX[0]|(DATARX[1]<<8))>>2)& 0x0001); // State of Connecting
    Temp=(((DATARX[0]|DATARX[1]<<8))>>3); // Temperature Data Extraction
    Temp*=0.25; // Data to Centigrade Conversation
    HAL_Delay(250); // Waits for Chip Ready
    // (according to Datasheet, the max time for conversion is 220ms)
    return Temp;
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

é importante observar durante a análise do código que, como demonstrado no datasheet do MAX6675, o valor medido é composto apenas por 12 bits, sendo eles do 3 ao 15, conforme demonstrado na figura 22. (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2002)

Figura 22 – MAX6675 - Tabela de bits.

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

Fonte: (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2002).

A segunda função implementada foi a *Return_Temp_To_DAC(floatTempK)*, utilizada para converter a temperatura lida para o valor digital compatível com a resolução de 12 bits, para a faixa de 0 a 200°C. O código da função é mostrado na figura 23

Figura 23 – Código STM32F103VET6 - *MAX6675_Return_Temp_To_DAC(floatTempK)*.

```
float Return_Temp_To_DAC(float TempK) {
    uint32_t dac_value;
    dac_value = (uint32_t)((TempK / 200.0) * (4095)); // Scales the temperature to the 12-bit range (0-4095)
    if (dac_value > 4095) dac_value = 4095;
    if (dac_value < 0) dac_value = 0; // Limit extreme values
    return dac_value; // Return temp value to DAC
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.1.4 Integração do transmissor com o sistema para aquisição da variável

A aquisição final da variável de campo é realizada através da integração do transmissor projetado a um Mini-PLC e um sistema supervisorio autoral. A seguir, abordaremos a integração a estes sistemas.

Apesar de não ser o intuito deste trabalho, essa integração possibilitaria a programação de diversas outras funcionalidades úteis para a operação e o gerenciamento das plantas industriais, como gráficos de tendência, dados históricos, gerenciamento de alarmes, e até mesmo a integração com sistemas PIMS e MES.

4.1.4.1 Integração do transmissor com o Mini-PLC

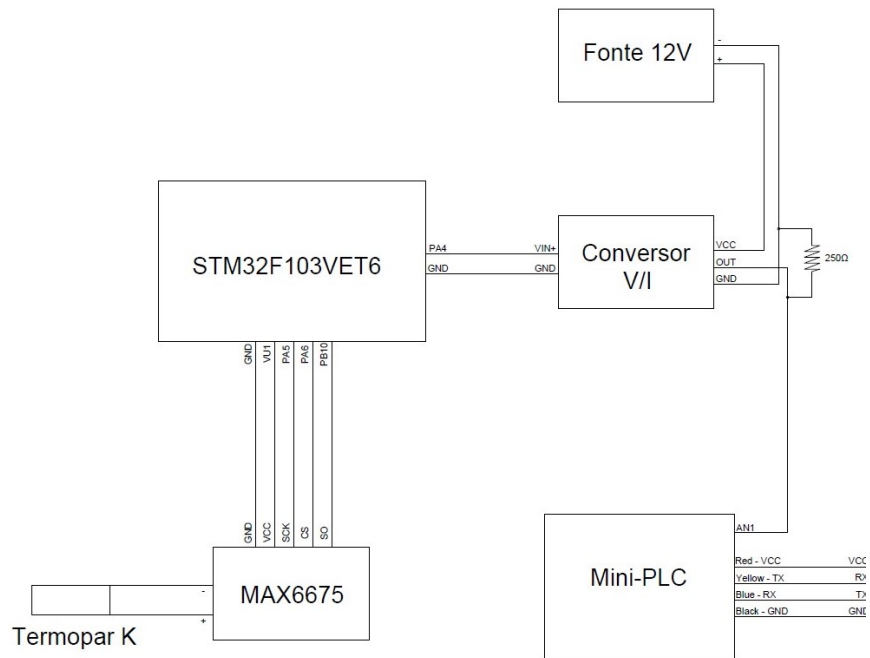
O sinal de corrente gerado pelo conversor V/I carrega consigo a informação da temperatura medida pelo termopar. Esta variável em um uso prático seria transmitida para um sistema de controle ou de monitoramento e, para que possamos comprovar a transmissão do sinal, foi desenvolvido um sistema para realizar a aquisição da variável, através da integração do transmissor com um sistema embarcado de mini-CLP, que contém um microcontrolador PIC16F887.

A leitura analógica do mini-CLP realiza a aquisição de valores de tensão na faixa de 1 a 5V, e utiliza um conversor A/D (analógico/digital) interno para converter o sinal analógico de corrente em um sinal digital. Para a conversão do sinal de corrente de 4-20 mA em uma tensão de 1-5V, foi aplicada uma resistência de 250Ω em paralelo ao sinal transmitido.

A leitura precisa deste sinal digital permite a monitoração e processamento dos dados de temperatura, sendo aplicável a sistemas de controle, supervisão, análise e alarmes.

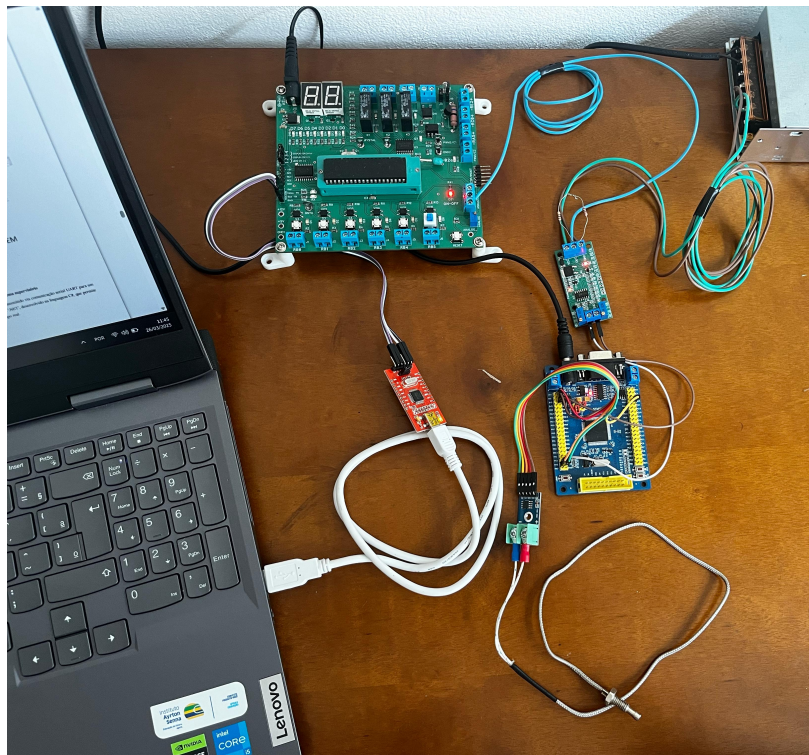
O esquema de interligação é descrito no diagrama da figura 24, e exemplificado através da montagem física apresentada na figura 25.

Figura 24 – Diagrama de Blocos - Interligação transmissor e Mini-PLC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 25 – Interligação transmissor e Mini-PLC.

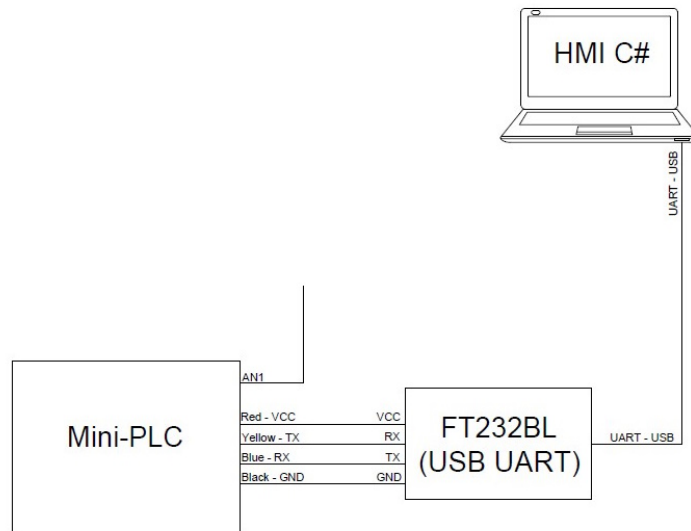


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.1.4.2 Integração do Mini-PLC com o sistema supervisório

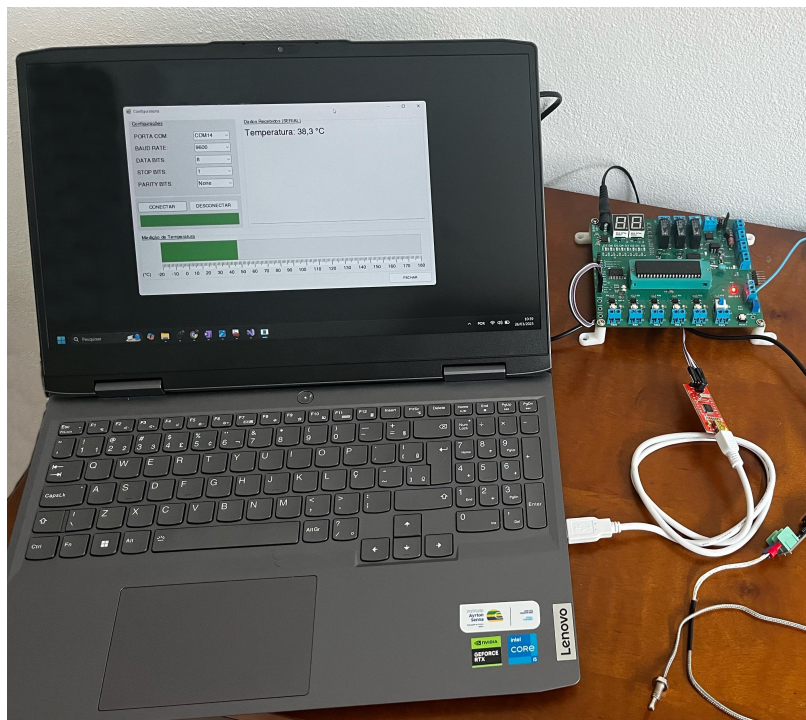
O dado recebido pelo Mini-PLC é transmitido via comunicação serial UART para um sistema supervisório baseado na plataforma '.NET', desenvolvido na linguagem C#, que permite a visualização da variável medida em tempo real.

Figura 26 – Diagrama de blocos - Interligação Mini-PLC e supervisório.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 27 – Interligação Mini-PLC e supervisório.



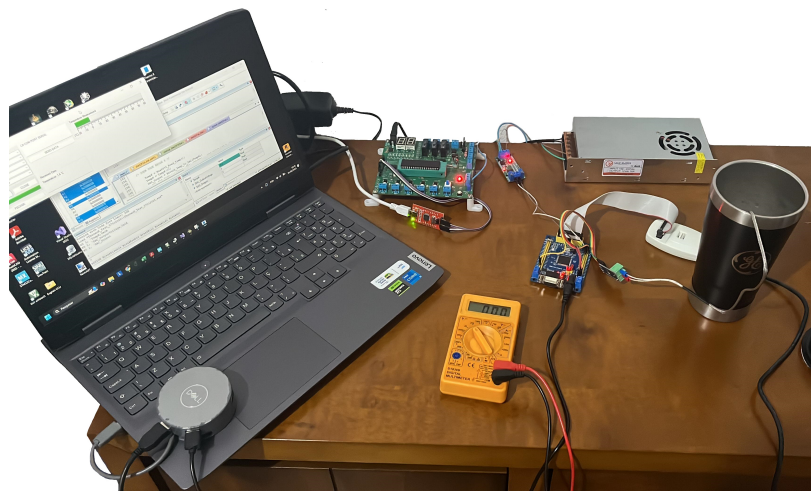
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.1.5 Montagem final

Após a montagem de todas as interligações citadas anteriormente, foi obtida a comunicação integral do sistema, desde a medição da variável pelo termopar tipo K, até a exibição em tempo real no sistema supervisorio desenvolvido.

Na figura 28 é possível verificar a montagem completa do sistema, conforme o diagrama apresentado no início deste capítulo, na figura 10.

Figura 28 – Montagem final do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.2 Desenvolvimento dos Softwares

Foram desenvolvidos três softwares: o software principal, do microcontrolador ARM STM32F103VET6, o software do PIC16F887, responsável pela aquisição final da variável, e o software do sistema supervisorio para visualização da variável medida em tempo real.

4.2.1 STM32F103VET6

O software do STM32F103VET foi programado nas linguagens C/C++ através do software Keil uVision, e a configuração inicial de hardware do microcontrolador STM32F103VET6 foi realizada utilizando a IDE¹ STM32CubeMX.

O software STM32CubeMX possui a função de geração de código, que consiste em transformar a configuração de hardware realizada em linhas de código, de maneira que possa ser alterado ou compilado em outra plataforma. Neste projeto, foi utilizado o software Keil uVision para o desenvolvimento do código para o processamento da variável de temperatura.

¹ IDE (*Integrated Development Environment*) é um ambiente de desenvolvimento integrado, utilizado para o desenvolvimento de aplicações de software com ferramentas para cada tipo de hardware reunidas em uma única interface.

A primeira fase do software consiste na configuração da interface de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*), de forma a permitir a leitura do sinal digitalizado pelo amplificador MAX6675, que converte a leitura do termopar K em um valor digital. A SPI foi configurada no modo mestre, com a frequência de clock apropriada para a comunicação com o o MAX6675, e os pinos de comunicação foram mapeados adequadamente.

Em seguida, a função principal (*main*) inicializa as funções de hardware necessárias, incluindo GPIO², e SPI. Um loop infinito é utilizado para ler continuamente a temperatura do MAX6675 e transmitir essa leitura via UART.

A função de leitura de temperatura lê os dados de temperatura do sensor MAX6675 usando SPI, e a função também verifica a conexão do termopar (indicado por 'TCF') e realiza a conversão dos dados recebidos para uma temperatura dada em graus Celsius.

A temperatura lida é enviada através do módulo DAC para o conversor tensão-corrente para que o valor de tensão (0 a 3,3V) gerado na saída analógica do microcontrolador seja convertida para o padrão de 4-20mA para que assim seja transmitida e lida pelo equipamento receptor.

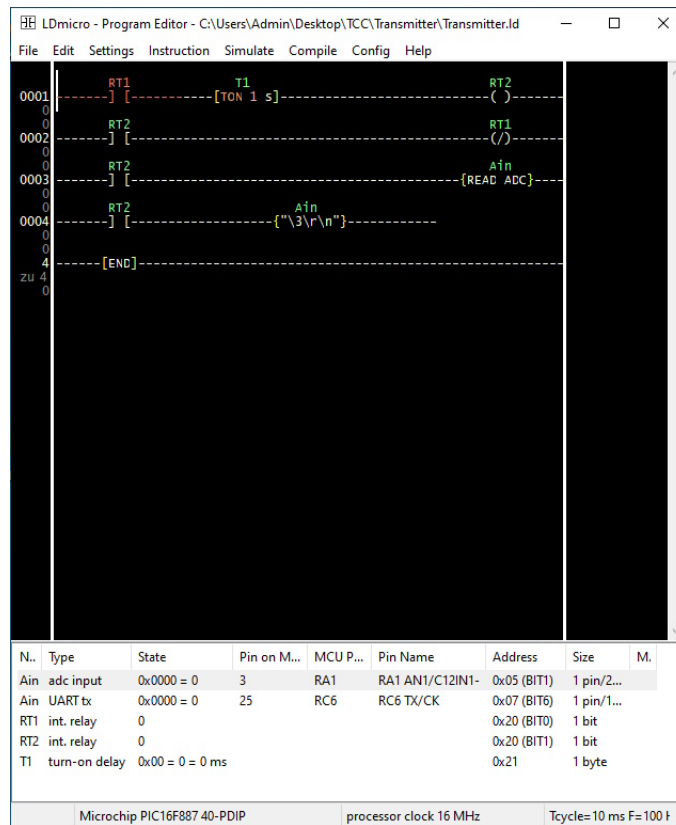
4.2.2 PIC16F887 (*mini-CLP*)

O software do microcontrolador PIC16F887 foi desenvolvido em Ladder, através do software LDmicro. Este microcontrolador, neste projeto, desempenha a função de um mini-CLP, responsável pela recepção do sinal transmitido pelo transmissor proposto no formato de 4-20mA, e converter este valor para um formato digital a ser transmitido ao sistema de simulação de supervisor.

Neste software, as tarefas realizadas são simples, focadas apenas na aquisição e transmissão da variável. O software possui um sistema cíclico para realizar a leitura do valor de entrada analógica e a transmissão via serial para o supervisor de 1 em 1 segundo.

² GPIO (*General Purpose Input/Output*) são as entradas e saídas de uso geral, sendo utilizados para a comunicação entre o dispositivo e outros componentes externos, como sensores, LEDs, botões, etc.

Figura 29 – Software PIC16F887 - LDmicro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.3 Dados Experimentais

Os experimentos foram conduzidos para avaliar o desempenho do transmissor em diferentes condições de temperatura. Foram realizadas medições em um copo térmico com gelo, no intuito de aferir a resposta do sistema em temperaturas próximas de 0°C, assim como calibrar parcialmente o sistema, e em uma estufa de secagem equipada de um termômetro de mercúrio, que auxiliou no equilíbrio dos diferentes pontos de aquecimento utilizados, simulando condições industriais. Todas as medições ao longo dos testes do projeto foram realizadas com intervalos de aproximadamente 20 segundos entre si.

Cada conjunto de medições foi analisado estatisticamente, considerando seus valores médios, desvio padrão e distribuição gaussiana, conforme apresentado nas tabelas e gráficos apresentados ao longo do capítulo.

4.3.1 Situação 1: Medição de baixas temperaturas - Ambiente não controlado

Para avaliar o funcionamento do transmissor, foram feitas medições em um copo térmico contendo gelo (aproximadamente 0°C) e medições em um recipiente com água gelada

(aproximadamente 9°C).

Cada temperatura de referência e conjunto de medições possui 2 tabelas, das quais a primeira é a tabela de dados estatísticos, que apresenta cálculos analíticos acerca das medições realizadas, e a segunda é a tabela de classes, corte e frequência, que apresenta a distribuição de medições e suas ocorrências durante os registros.

Além das tabelas, como resultado dos dados apresentados, temos o gráfico gaussiano, que apresenta visualmente a distribuição normal dos valores medidos.

4.3.1.1 Gelo em copo térmico (aproximadamente 0°C)

Item	T (°C)	Item	T (°C)	Item	T (°C)	Item	T (°C)	Item	T (°C)
1	0,4	11	0,1	21	0,4	31	0,4	41	0,4
2	0,1	12	0,3	22	0,6	32	0,4	42	0,3
3	1,0	13	0,4	23	1,0	33	0,4	43	-0,1
4	0,6	14	0,9	24	-0,3	34	0,0	44	0,3
5	0,4	15	0,7	25	0,6	35	0,4	45	0,6
6	0,3	16	0,2	26	0,7	36	0,3	46	-0,1
7	0,4	17	0,4	27	0,6	37	0,1	47	0,0
8	0,3	18	0,3	28	0,9	38	0,3	48	0,7
9	0,4	19	0,6	29	0,4	39	0,4	49	0,6
10	-0,3	20	0,6	30	1,3	40	-0,1	50	0,3

Tabela 2 – Tabela de medições de temperatura

Valor mínimo	-0,4
Valor máximo	1,3
Média	0,36
N. de amostras	50
Desvio Padrão	0,355

Tabela 3 – Tabela de Dados Estatísticos

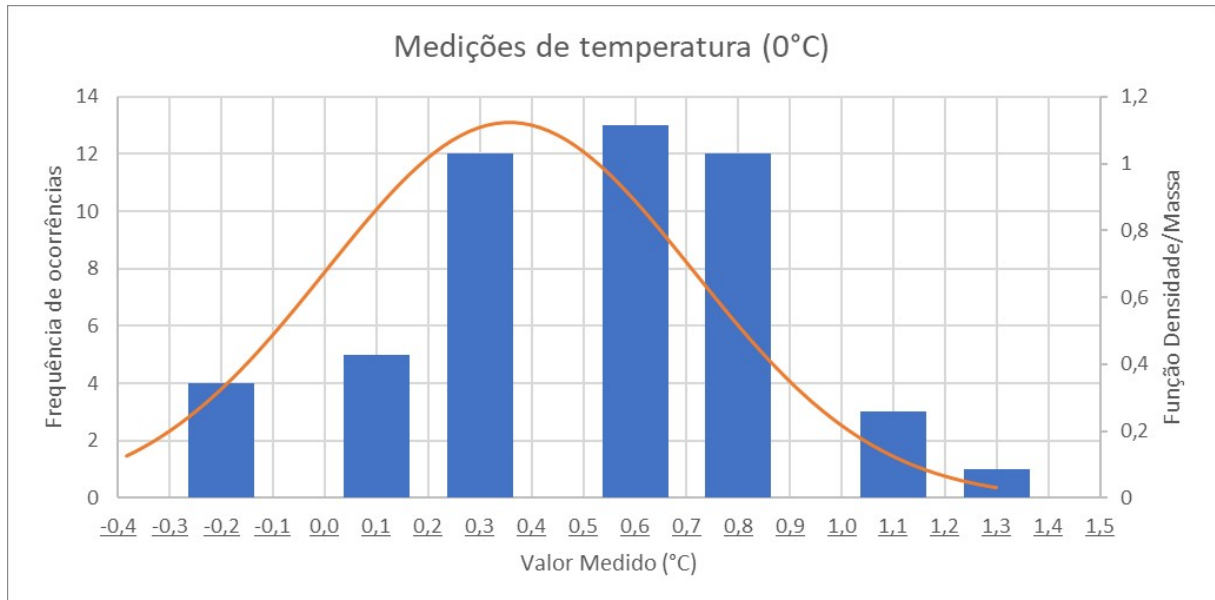
Os resultados mostraram que a temperatura medida variou entre -0,3°C e 1,3°C, com um valor médio de 0,36±2°C e um desvio padrão de 0,355°C.

Na tabela 3, dn indica o quanto cada medida se desvia da média, calculado por $(X_n - \bar{x})$ na quarta coluna. O desvio médio absoluto corresponde às flutuações naturais e imprevisíveis observadas nas medições sucessivas de uma mesma grandeza física, e é calculado através do produto da frequência (n) pelo valor absoluto do desvio ($|dn|$) na quinta coluna, seguido pela variância ponderada na sexta coluna, que representa o quadrado do desvio individual $(dn)^2$. Por fim, na sétima coluna, tem-se o produto entre a frequência e o quadrado do desvio, $n(dn/n)^2$, que é utilizado para o cálculo do desvio padrão ponderado.

T (°C)	n	Xn	dn = Xn - \bar{x}	n dn	(dn/n) ²	n(dn/n) ²
-0.3	2	0	-0.98	0.00	9.6E-01	0.0E+00
-0.2	0	0	-0.68	0.00	4.6E-01	0.0E+00
-0.1	0	0	-0.58	0.00	3.4E-01	0.0E+00
0.0	1	0.1	-0.48	0.48	2.3E-01	2.3E-01
0.1	0	0	-0.38	0.00	1.6E-01	0.0E+00
0.2	4	2.1	-0.28	1.12	7.8E-02	3.1E-01
0.3	3	1.7	-0.18	0.54	3.1E-02	9.2E-02
0.4	6	3.4	-0.08	0.48	5.9E-03	3.5E-02
0.5	8	4.4	0.02	0.16	4.5E-04	3.6E-03
0.6	5	3	0.12	0.60	2.1E-02	1.1E-01
0.7	3	2.1	0.22	0.66	4.6E-02	1.4E-01
0.8	2	1	0.32	0.64	1.0E-01	2.0E-01
0.9	1	0.9	0.42	0.42	1.8E-01	1.8E-01
1.0	2	2	0.52	1.04	2.7E-01	5.4E-01
1.1	1	1.1	0.62	0.62	3.8E-01	3.8E-01
1.2	3	3.6	0.72	2.16	5.2E-01	1.6E+00
1.3	0	0	0.82	0.00	7.1E-01	0.0E+00
1.4	0	0	0.92	0.00	8.5E-01	0.0E+00
	41	15.5		94.50		3.2E+02
	Σn	ΣXn		$\Sigma n dn $		$\Sigma n(dn/n)^2$

Tabela 4 – Tabela de Repetitividade de Temperatura

Figura 30 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 0°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O histograma que apresenta a curva gaussiana correspondente apresentado na Figura 20 confirma que os valores se distribuem de forma aproximadamente normal, o que indica a estabilidade do protótipo na coleta de dados.

4.3.1.2 Água gelada no copo térmico (aproximadamente 9°C)

As medições realizadas nessa condição apresentaram uma variação entre 7,4°C e 10,2°C, com média de 8,55±2°C e desvio padrão de 0,599°C.

Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados
1	8,8	11	9,1	21	8,0	31	9,1	41	-
2	8,5	12	8,2	22	9,3	32	8,8	42	-
3	8,2	13	8,5	23	9,6	33	8,2	43	-
4	8,0	14	8,8	24	9,3	34	8,2	44	-
5	8,8	15	7,7	25	8,5	35	7,0	45	-
6	8,2	16	10,2	26	8,8	36	8,8	46	-
7	8,8	17	8,8	27	8,0	37	-	47	-
8	7,4	18	8,2	28	9,3	38	-	48	-
9	9,3	19	8,2	29	7,4	39	-	49	-
10	8,5	20	8,8	30	8,8	40	-	50	-

Tabela 5 – Tabela de medições de temperatura

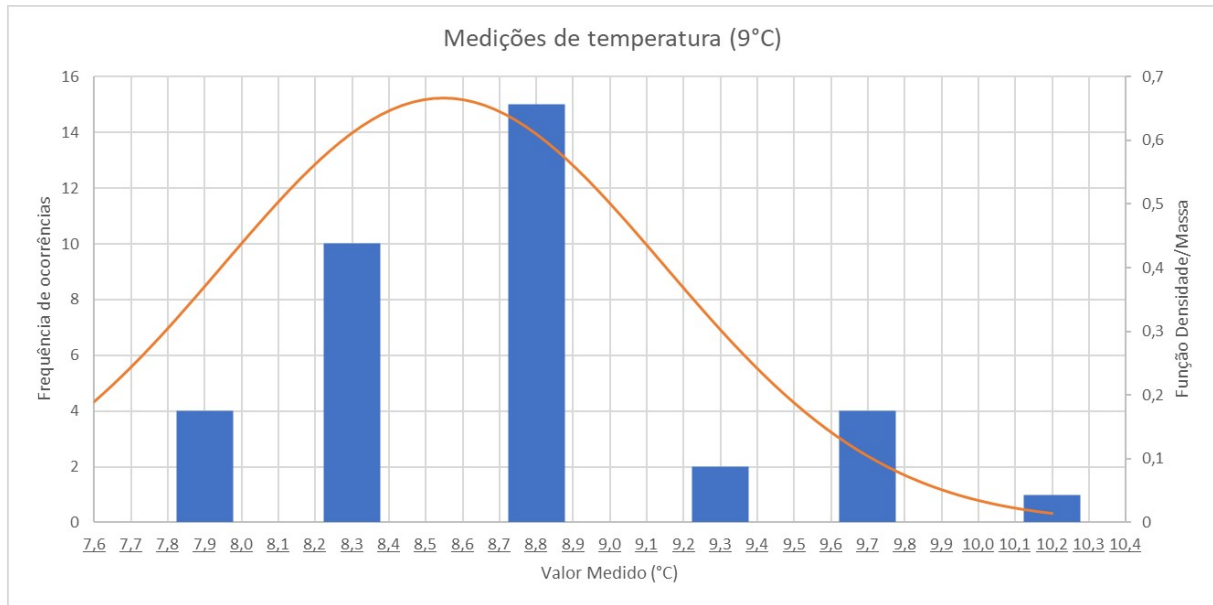
Valor mínimo	7,4
Valor máximo	10,2
Média	8,55
N. de amostras	36
Desvio Padrão	0,599

Tabela 6 – Tabela de Dados Estatísticos

T (°C)	n	Xn	dn = Xn - \bar{x}	n dn	(dn) ²	n(dn) ²
7,4	2	14,8	6,28	12,57	3,9E+01	7,9E+01
7,7	2	15,4	6,88	13,77	4,7E+01	9,5E+01
8,0	4	32	23,48	93,94	5,5E+02	2,2E+03
8,2	8	65,6	57,08	456,67	3,3E+03	2,6E+04
8,5	6	51	42,48	254,90	1,8E+03	1,1E+04
8,8	8	70,4	61,88	495,07	3,8E+03	3,1E+04
9,1	2	18,2	9,68	19,37	9,4E+01	1,9E+02
9,3	3	27,9	19,38	58,15	3,8E+02	1,1E+03
9,6	1	9,6	1,08	1,08	1,2E+00	1,2E+00
10,2	1	10,2	1,68	1,68	2,8E+00	2,8E+00
	37	315,1		1407,20		7,1E+04
	Σn	ΣXn		$\Sigma n dn $		$\Sigma n(dn)^2$

Tabela 7 – Tabela de Repetitividade de Temperatura

Figura 31 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 9°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O histograma que apresenta a curva gaussiana correspondente apresentado na Figura 21 confirma que os valores se distribuem de forma aproximadamente normal, o que indica a estabilidade do protótipo na coleta de dados.

4.3.2 Situação 2: Medição de médias temperaturas - Ambiente parcialmente controlado

A segunda etapa consiste nas medições de temperatura na estufa de secagem, ajustada para as temperaturas de 63°C, 80°C, 108°C e 134°C, aproximadamente. O ambiente criado pela estufa foi considerado um ambiente parcialmente controlado pois seu sistema de aquecimento é simplificado, utilizando um relé ON/OFF e sem referência clara de temperatura, sendo regulada por potenciômetro de forma direta.

4.3.2.1 Estufa regulada a 63°C

A temperatura variou entre 60,9°C e 64,4°C, com média de $62,65 \pm 2^\circ\text{C}$ e desvio padrão de $0,823^\circ\text{C}$.

Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados
1	62,7	11	62,4	21	62,7	31	64,4	41	-
2	62,1	12	62,4	22	62,9	32	64,1	42	-
3	61,2	13	62,7	23	63,5	33	63,8	43	-
4	62,4	14	60,9	24	63,2	34	-	44	-
5	62,1	15	62,4	25	63,5	35	-	45	-
6	61,8	16	63,8	26	63,5	36	-	46	-
7	62,7	17	62,9	27	62,4	37	-	47	-
8	61,5	18	63,2	28	62,7	38	-	48	-
9	62,4	19	61,2	29	62,7	39	-	49	-
10	62,1	20	62,1	30	62,9	40	-	50	-

Tabela 8 – Tabela de medições de temperatura

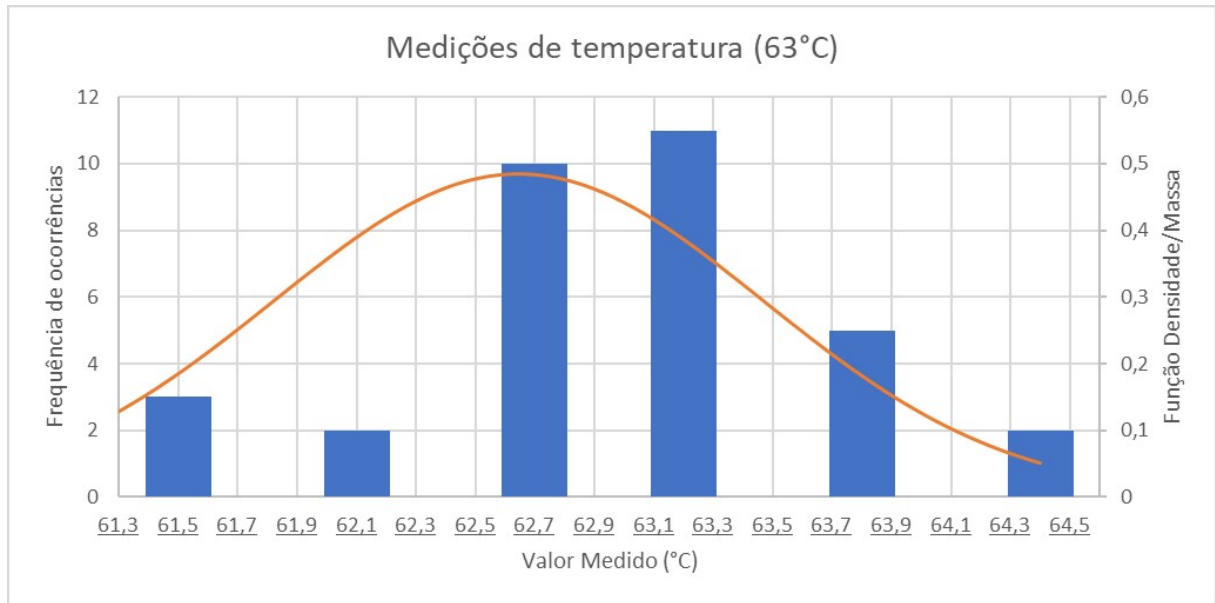
Valor mínimo	60,9
Valor máximo	64,4
Média	62,65
N. de amostras	33
Desvio Padrão	0,823

Tabela 9 – Tabela de Dados Estatísticos

T (°C)	n	Xn	dn = Xn - \bar{x}	n dn	(dn) ²	n(dn) ²
60,9	1	60,9	-1,56	1,56	2,4E+00	2,4E+00
61,2	3	183,6	121,14	363,42	1,5E+04	4,4E+04
61,5	1	61,5	-0,96	0,96	9,2E-01	9,2E-01
61,8	1	61,8	-0,66	0,66	4,3E-01	4,3E-01
62,0	1	62	-0,46	0,46	2,1E-01	2,1E-01
62,1	5	310,5	248,04	1240,20	6,2E+04	3,1E+05
62,4	5	312	249,54	1247,70	6,2E+04	3,1E+05
62,7	5	313,5	251,04	1255,20	6,3E+04	3,2E+05
62,9	4	251,6	189,14	756,56	3,6E+04	1,4E+05
63,2	1	63,2	0,74	0,74	5,5E-01	5,5E-01
63,5	3	190,5	128,04	384,12	1,6E+04	4,9E+04
63,8	2	127,6	65,14	130,28	4,2E+03	8,5E+03
	32	1998,7		5381,88		1,2E+06
	Σn	ΣXn		$\Sigma n dn $		$\Sigma n(dn)^2$

Tabela 10 – Tabela de Repetitividade de Temperatura

Figura 32 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 63°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O histograma que apresenta a curva gaussiana correspondente apresentado na Figura 22 confirma que os valores se distribuem de forma aproximadamente normal, o que indica a estabilidade do protótipo na coleta de dados.

4.3.2.2 Estufa regulada a 80°C

Os valores medidos variaram entre 77,4°C e 81,4°C, com média de 79,52±2°C e desvio padrão de 1,138°C.

Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados
1	78,5	11	78,5	21	80,8	31	80,5	41	-
2	78,0	12	79,4	22	79,1	32	81,1	42	-
3	77,4	13	78,8	23	80,2	33	-	43	-
4	78,0	14	78,8	24	80,5	34	-	44	-
5	78,0	15	79,9	25	80,5	35	-	45	-
6	78,2	16	79,9	26	79,4	36	-	46	-
7	78,0	17	79,4	27	81,4	37	-	47	-
8	79,1	18	79,4	28	81,3	38	-	48	-
9	78,0	19	81,1	29	80,2	39	-	49	-
10	79,7	20	80,2	30	81,1	40	-	50	-

Tabela 11 – Tabela de medições de temperatura

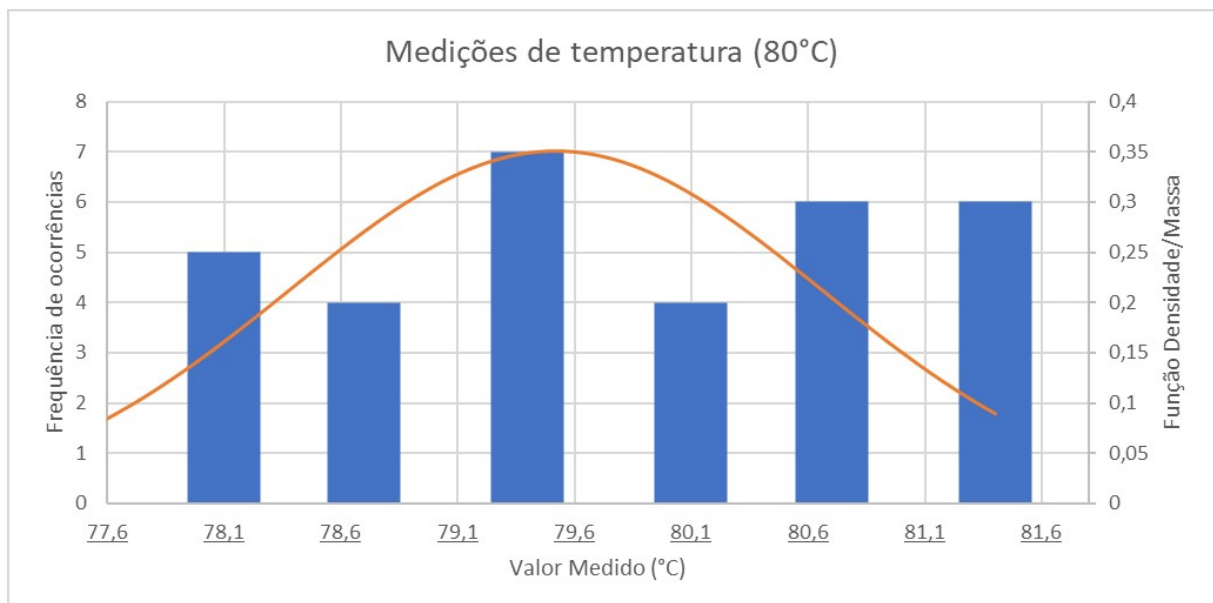
Valor mínimo	77,4
Valor máximo	81,4
Média	79,52
N. de amostras	32
Desvio Padrão	1,138

Tabela 12 – Estatísticas da amostra

T (°C)	n	Xn	dn = Xn - \bar{x}	n dn 	(dn)²	n(dn)²
77,4	1	77,4	-2,03	2,03	4,1E+00	4,1E+00
78,0	5	390	310,57	1552,86	9,6E+04	4,8E+05
78,2	1	78,2	-1,23	1,23	1,5E+00	1,5E+00
78,5	2	157	77,57	155,14	6,0E+03	1,2E+04
78,8	2	157,6	78,17	156,34	6,1E+03	1,2E+04
79,1	2	158,2	78,77	157,54	6,2E+03	1,2E+04
79,4	3	238,2	158,77	476,32	2,5E+04	7,6E+04
79,7	1	79,7	0,27	0,27	7,4E-02	7,4E-02
79,9	2	159,8	80,37	160,74	6,5E+03	1,3E+04
80,2	3	240,6	161,17	483,52	2,6E+04	7,8E+04
80,5	2	161	81,57	163,14	6,7E+03	1,3E+04
80,8	1	80,8	1,37	1,37	1,9E+00	1,9E+00
81,1	2	162,2	82,77	165,54	6,9E+03	1,4E+04
81,3	1	81,3	1,87	1,87	3,5E+00	3,5E+00
81,4	1	81,4	1,97	1,97	3,9E+00	3,9E+00
	29	2303,4		3479,91		7,1E+05
	Σn	ΣXn		$\Sigma n dn $		$\Sigma n(dn)^2$

Tabela 13 – Tabela de Repetitividade de Temperatura

Figura 33 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 80°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O histograma que apresenta a curva gaussiana correspondente apresentado na Figura 23 confirma que os valores se distribuem de forma aproximadamente normal, o que indica a estabilidade do protótipo na coleta de dados.

4.3.2.3 Estufa regulada a 108°C

A temperatura variou entre 105,9°C e 109,6°C, com média de 107,53±2°C e desvio padrão de 0,831°C.

Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados
1	106,8	11	107,6	21	107,6	31	105,9	41	-
2	107,3	12	108,5	22	107,9	32	105,9	42	-
3	107,9	13	107,6	23	107,9	33	-	43	-
4	107,1	14	107,6	24	106,5	34	-	44	-
5	109,0	15	109,6	25	107,1	35	-	45	-
6	107,3	16	107,9	26	107,3	36	-	46	-
7	108,5	17	109,5	27	107,1	37	-	47	-
8	107,9	18	108,2	28	106,3	38	-	48	-
9	108,5	19	107,9	29	106,5	39	-	49	-
10	107,6	20	107,3	30	106,5	40	-	50	-

Tabela 14 – Tabela de medições de temperatura

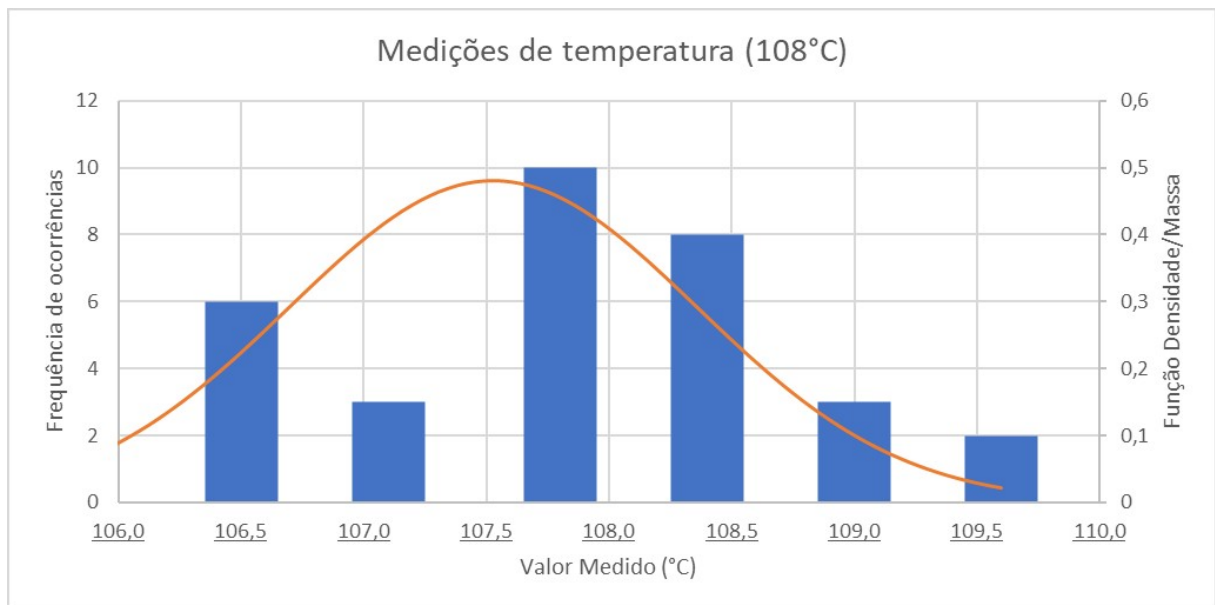
Descrição	Valor
Valor mínimo	105,9
Valor máximo	109,6
Média	107,53
N. de amostras	32
Desvio Padrão	0,831

Tabela 15 – Valores Estatísticos

T (°C)	n	Xn	dn = Xn - \bar{x}	n dn	(dn) ²	n(dn) ²
105,9	2	211,8	104,23	208,46	1,1E+04	2,2E+04
106,3	1	106,3	-1,27	1,27	1,6E+00	1,6E+00
106,5	3	319,5	211,93	635,79	4,5E+04	1,3E+05
106,8	1	106,8	-0,77	0,77	5,9E-01	5,9E-01
107,1	2	214,2	106,63	213,26	1,1E+04	2,3E+04
107,3	3	321,9	214,33	642,99	4,6E+04	1,4E+05
107,6	4	430,4	322,83	1291,32	1,0E+05	4,2E+05
107,9	3	323,7	216,13	648,39	4,7E+04	1,4E+05
108,2	1	108,2	0,63	0,63	4,0E-01	4,0E-01
108,5	2	217	109,43	218,86	1,2E+04	2,4E+04
108,9	1	108,9	1,33	1,33	1,8E+00	1,8E+00
109,0	1	109	1,43	1,43	2,0E+00	2,0E+00
109,5	1	109,5	1,93	1,93	3,7E+00	3,7E+00
109,6	1	109,6	2,03	2,03	4,1E+00	4,1E+00
	26	2796,8		3868,48		9,0E+05
	Σn	ΣXn		$\Sigma n dn $		$\Sigma n(dn)^2$

Tabela 16 – Tabela de Repetitividade de Temperatura

Figura 34 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 108°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O histograma que apresenta a curva gaussiana correspondente apresentado na Figura 24 confirma que os valores se distribuem de forma aproximadamente normal, o que indica a estabilidade do protótipo na coleta de dados.

4.3.2.4 Estufa regulada a 134°C

Para a última temperatura testada, os valores variaram entre 131,1°C e 135,8°C, com média de 133,4±2°C e desvio padrão de 1,07°C.

Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados	Item	Dados
1	135,0	11	133,9	21	134,2	31	132,4	41	-
2	134,5	12	133,2	22	133,4	32	-	42	-
3	135,0	13	133,9	23	133,8	33	-	43	-
4	133,4	14	133,9	24	132,9	34	-	44	-
5	135,5	15	135,8	25	131,8	35	-	45	-
6	133,7	16	133,2	26	131,1	36	-	46	-
7	134,2	17	133,4	27	132,6	37	-	47	-
8	133,7	18	134,2	28	133,0	38	-	48	-
9	134,5	19	133,4	29	131,8	39	-	49	-
10	133,4	20	133,4	30	131,6	40	-	50	-

Tabela 17 – Tabela de medições de temperatura

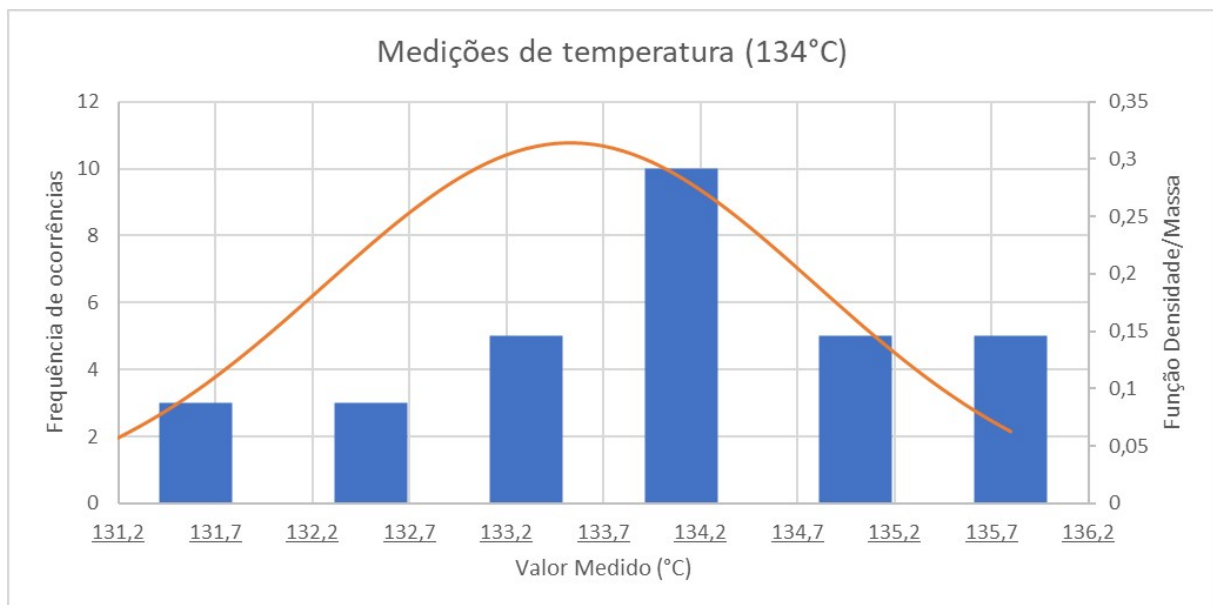
Valor mínimo	130,8
Valor máximo	135,8
Média	133,53
N. de amostras	31
Desvio Padrão	1,268

Tabela 18 – Dados estatísticos.

T (°C)	n	Xn	dn = Xn - \bar{x}	n dn	(dn) ²	n(dn) ²
131,1	1	131,1	-2,43	2,43	5,9E+00	5,9E+00
131,6	1	131,6	-1,93	1,93	3,7E+00	3,7E+00
131,8	2	263,6	130,07	260,14	1,7E+04	3,4E+04
132,4	1	132,4	-1,13	1,13	1,3E+00	1,3E+00
132,6	1	132,6	-0,93	0,93	8,6E-01	8,6E-01
132,9	1	132,9	-0,63	0,63	4,0E-01	4,0E-01
133,0	1	133	-0,53	0,53	2,8E-01	2,8E-01
133,2	2	266,4	132,87	265,74	1,8E+04	3,5E+04
133,4	4	533,6	400,07	1600,29	1,6E+05	6,4E+05
133,7	2	267,4	133,87	267,74	1,8E+04	3,6E+04
133,8	1	133,8	0,27	0,27	7,4E-02	7,4E-02
133,9	3	401,7	268,17	804,51	7,2E+04	2,2E+05
134,2	2	268,4	134,87	269,74	1,8E+04	3,6E+04
134,5	2	269	135,47	270,94	1,8E+04	3,7E+04
135,0	2	270	136,47	272,94	1,9E+04	3,7E+04
135,5	1	135,5	1,97	1,97	3,9E+00	3,9E+00
135,8	1	135,8	2,27	2,27	5,2E+00	5,2E+00
	28	3738,8		4024,14		1,1E+06
	Σn	ΣXn		$\Sigma n dn $		$\Sigma n(dn)^2$

Tabela 19 – Tabela de Repetitividade de Temperatura

Figura 35 – Gráfico Gaussiano - Temperatura final apresentada em 134°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O histograma que apresenta a curva gaussiana correspondente apresentado na Figura 25 confirma que os valores se distribuem de forma aproximadamente normal, o que indica a estabilidade do protótipo na coleta de dados.

4.4 Discussão dos Resultados

A partir das medições apresentadas, é possível afirmar que o transmissor alcançou um comportamento consistente e preciso dentro das faixas de temperatura analisadas.

Os resultados obtidos demonstram que o protótipo do transmissor proposto atende aos critérios de desempenho definidos no projeto, com média, desvio padrão e desvio médio dentro dos limites aceitáveis. A distribuição gaussiana, por sua vez, confirma o comportamento estável do sistema em condições de operação padronizadas.

Os experimentos demonstraram que o transmissor é capaz de operar de forma confiável em um amplo intervalo de temperaturas, o que sugere sua viabilidade para aplicações industriais, dentro do range definido para o protótipo.

Abordando a análise da exatidão do sistema, é possível verificar faixas de erro nas medidas de aproximadamente 4°C. Este erro é esperado, uma vez que, conforme a especificação no datasheet do módulo MAX6675, o mesmo possui uma faixa de erro de $\pm 2^\circ\text{C}$.

Somado a este erro, é necessário considerar uma margem proveniente da limitação no range de medição do termopar tipo K, que possui um range original de -200°C a 1260°C , e foi limitado em 0°C a 200°C . Esta limitação faz com que a variação da medição em relação à cada milivolt na saída do microcontrolador seja alta, trazendo tal incerteza na medição.

Os resultados obtidos validam o pleno funcionamento do transmissor desenvolvido, demonstrando sua eficácia na medição e sua aplicabilidade às necessidades da indústria.

5 CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, foram apresentados os aspectos técnicos, práticos e estatísticos do desenvolvimento de um transmissor de variáveis de campo utilizando um microcontrolador ARM 32 bits, com o objetivo de propor uma solução robusta, de baixo custo, portátil e adaptável às necessidades da indústria. Ao longo do trabalho, foi possível projetar, implementar e validar um sistema capaz de medir e transmitir variáveis de campo de maneira eficiente, abordando desde o condicionamento do sinal até a integração com um controlador e um sistema supervisório.

Os resultados obtidos mostram que o protótipo desenvolvido atende aos requisitos propostos, demonstrando precisão, repetibilidade e comportamento estatístico adequados para aplicações industriais, destacando o uso de tecnologias robustas e amplamente reconhecidas, como o termopar tipo K e o microcontrolador STM32F103VET6. A integração do dispositivo com o conversor de tensão para corrente foi bem sucedida, garantindo a eficácia e a compatibilidade do equipamento com os padrões amplamente utilizados na indústria.

Adicionalmente, a utilização de um mini-CLP baseado no microcontrolador PIC16F887 permitiu a aquisição da variável, simulando a aplicação do equipamento em um sistema real, além da visualização da variável medida em um sistema supervisório desenvolvido na linguagem C#, baseado na plataforma .NET. Esta abordagem não apenas validou a aplicabilidade do transmissor proposto, como também demonstrou seu potencial de expansão para aplicações mais complexas, como análise de tendências, gerenciamento de alarmes e integração com sistemas de dados, como PIMS e MES.

Entre os desafios enfrentados durante a elaboração do projeto, destacam-se a integração do sistema como um todo, desde a leitura do valor analógico gerado pelo módulo MAX6675 do termopar, e a leitura/transmissão via comunicação serial com o sistema supervisório.

O transmissor desenvolvido representa uma contribuição significativa para o campo da automação e instrumentação industrial, oferecendo uma solução simples e acessível, porém robusta, tecnológica e de alto desempenho. Para trabalhos futuros, sugere-se a exploração das comunicações sem fio para a transmissão de dados, a integração com outros tipos de sensores para medição de outros tipos de variáveis de campo, e o aprimoramento do sistema supervisório, com possibilidades de monitoramento em nuvem.

Por fim, este projeto reafirma a importância da exploração de soluções acessíveis e inovadoras no contexto industrial, promovendo eficiência, flexibilidade e facilidade de manutenção em sistemas de instrumentação e automação. O transmissor proposto evidencia a efetividade da integração entre tecnologias consagradas e metodologias tecnológicas pode atender às crescentes demandas da indústria moderna.

REFERÊNCIAS

- DUNN, W. C. **Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control**. United States of America: The McGraw-Hill Companies, 2005. ISBN 0071466932. Citado 4 vezes nas páginas 14, 18, 19 e 29.
- IBM. **O que é uma unidade central de processamento (CPU)?** 2024. Acesso em: 25 out. 2025. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/central-processing-unit>>. Citado na página 24.
- INDUSTRIAIS, V. I. **Quais as diferenças entre transmissor, transdutor e sensor de pressão?** 2018. Acessado em: 24 out. 2025. Disponível em: <<https://velki.com.br/pt/blog/aprenda-com-a-velki/quais-as-diferencas-entre-transmissor--transdutor-e-sensor-de-pressao->>. Citado na página 18.
- JOHNSON, C. D. **Process Control Instrumentation Technology**. Edinburgh Gate: Pearson Education Limited, 2014. ISBN 9781292026015. Citado 3 vezes nas páginas 17, 21 e 22.
- KERSCHBAUMER, R. **Apostila Microcontroladores**. [S.l.], s.d. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/407645715/Apostila-Microcontroladores-pdf>> (Acesso em: 24 out. 2025). Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 31.
- LIMA, C. B. de; VILLAÇA, M. V. M. **AVR e Arduino: Técnicas de Projeto**. 2. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2012. Disponível em PDF. ISBN 978-85-911400-1-5. Citado na página 24.
- LIPTÁK, B. G. **Instrument Engineers Handbook - Process Measurement and Analysis**. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2003. ISBN 0849310830. Citado na página 17.
- MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **Cold-Junction-Compensated K-Thermocoupleto-Digital Converter (0°C to +1024°C)**. [S.l.], 2002. Rev. 1. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 42.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC16F882/883/884/886/887 28/40/44-Pin, Enhanced Flash-Based 8-Bit CMOS Microcontrollers**. [S.l.], 2009. Rev. D. Citado na página 30.
- MINHO, U. do. **Microcontroladores PIC – Capítulo 1**. Braga, Portugal: Universidade do Minho, 2012. Disponível em: <<http://gec.di.uminho.pt/lecom/li2/material/picbook-pt.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2025. Citado na página 24.
- MOREIRA, L. Medição de temperatura usando-se termopar. **Cerâmica Industrial**, v. 1, n. 1, 2002. Citado na página 18.
- PEREIRA, F. **Tecnologia ARM: microcontroladores de 32 bits**. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2007. ISBN 9788536520407. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- PERIM, J. N. R. d. N. Victor Gonçalves de C. F. **Microcontroladores e Microprocessadores**. Paraná: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. ISBN 9788552202738. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- SHELLER, B. M. e F. **Descobrimo o Microcontrolador STM32**. MakerHero, 2018. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/img/files/download/Descobrimo%20o%20STM32.pdf>>. Citado na página 24.

SENAI, S. N. de A. I. **Instrumentação Básica I: Pressão e Nível**. Brasil: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 2012. Material didático técnico sobre instrumentação industrial. Citado na página 15.

STMICROELECTRONICS. **STM32F103xC, STM32F103xD, STM32F103xE Advanced ARM-Based 32-bit MCUs**. [S.l.], 2023. Rev. 21. Citado na página 27.

TANENBAUM, A. S. **Organização Estruturada de Computadores**. São Paulo: Editora Norte-Americana, 2013. ISBN 9788581435398. Citado na página 25.