

INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PARAIBANO
CAMPUS CAJAZEIRAS

CARLOS AUGUSTO LEAL MEMORIA
IAN ROLIM DE MEDEIROS

**PROJETO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO DE GÁS
EM EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO**

Cajazeiras-PB
2026

CARLOS AUGUSTO LEAL MEMORIA
IAN ROLIM DE MEDEIRO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO DE GÁS
EM EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia de Controle e Automação do
Instituto Federal do Sertão Paraibano-
Campus Cajazeiras, sob Orientação do Prof.
Joab Sobreira de Andrade e Coorientação do
Prof. Emanuel Raimundo Queiroz Chaves
Junior.

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

- M533p Memoria, Carlos Augusto Leal.
Projeto de um sistema de monitoramento de pressão de gás em equipamentos de ar-condicionado / Carlos Augusto Leal Memoria, Ian Rolim de Medeiros.– 2026.
- 42f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2026.
- Orientador(a): Prof. Joab Sobreira de Andrade.
Coorientador(a): Prof. Emanuel Raimundo Queiroz Chaves Junior.
1. Controle automático. 2. Monitoramento de pressão. 3. Ar-condicionado. 4. Automação. I. Medeiros, Ian Rolim de. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

CARLOS AUGUSTO LEAL MEMORIA
IAN ROLIM DE MEDEIROS

**PROJETO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO DE GÁS EM
EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso Engenharia de
Controle e Automação do Instituto Federal
do Sertão Paraibano-*Campus* Cajazeiras,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel.

Aprovado em 17 de julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JOAB SOBREIRA DE ANDRADE**
Data: 24/07/2026 20:14:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joab Sobreira de Andrade – IFSPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **EMANOEL RAIMUNDO QUEIROZ CHAVES JUNIOR**
Data: 24/07/2026 19:06:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Emanoel Raimundo Queiroz Chaves Junior – IFSPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA**
Data: 25/07/2026 10:16:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo Pereira de Lucena Silva – IFSPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Aos nossos pais, pelo amor, apoio incondicional e pelos valores transmitidos ao longo da vida, que foram fundamentais para a realização desta conquista. A todos que fizeram parte dessa trajetória, oferecendo apoio e confiança ao longo desta jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, pela vida, pela saúde e pela força concedida ao longo desta jornada, permitindo a superação dos desafios enfrentados.

Aos nossos pais, pelo amor, carinho e pelos ensinamentos que foram essenciais para nossa formação pessoal e acadêmica.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), atualmente Instituto Federal do Sertão Paraibano (IFSPB), *Campus* Cajazeiras, pela oportunidade de realização deste curso e pelo suporte oferecido ao longo da graduação.

Ao nosso orientador e coorientador, pela orientação, paciência e dedicação, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, bem como pelos conhecimentos compartilhados ao longo deste processo.

Aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação, pelos ensinamentos e pela contribuição na formação acadêmica.

Aos amigos e colegas, pelo apoio, incentivo e momentos compartilhados ao longo dessa trajetória.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, nossos sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de pressão de gás aplicado a equipamentos de ar-condicionados, com o objetivo de integrar ferramentas tradicionais de manutenção a tecnologias de automação e internet das coisas. A pesquisa caracteriza-se como aplicada e experimental, com o uso de revisão bibliográfica, visando propor um projeto para supervisão remota de variáveis de processo. A metodologia envolveu o estudo de componentes de refrigeração, instrumentação e sistemas de controle, seguido da construção de um protótipo utilizando microcontrolador ESP32, sensor de vazão, comunicação via protocolo MQTT e interface gráfica desenvolvida na plataforma *Node-RED*. O sistema foi capaz de realizar a leitura de dados em tempo real, processando sinais por meio de rotinas de interrupção e transmitindo as informações via rede *Wi-Fi* para um ambiente supervisão. Os resultados mostram um funcionamento estável, coletando dados necessários para transmissão, além de mostrar uma visualização em tempo real por meio de uma *dashboard* intuitiva. A análise comparativa entre o sistema ideal e sua aplicação em um cenário real mostrou que a viabilidade do uso de transdutores de pressão para monitoramento de gases refrigerantes, possibilita a identificação de falhas operacionais como variações de pressão inadequadas. Conclui-se que o sistema proposto apresenta potencial para auxiliar profissionais da área de climatização, garantindo que seja uma alternativa eficiente e de fácil implementação para monitoramento remoto, com possibilidade de expansão para aplicações reais e integração com novos sensores e sistemas de armazenamento de dados.

Palavras-chave: monitoramento remoto; ar-condicionado; automação; internet das coisas.

ABSTRACT

This work presents the development of a gas pressure monitoring system applied to air conditioning equipment, aiming to integrate traditional maintenance tools with automation technologies and the Internet of Things. The research is characterized as applied and experimental, supported by bibliographic review, with the purpose of proposing a project for remote monitoring of process variables. The methodology involved the study of refrigeration components, instrumentation, and control systems, followed by the construction of a prototype using an ESP32 microcontroller, a flow sensor, MQTT protocol communication, and a graphical interface developed on the Node-RED platform. The system was able to perform real-time data acquisition, processing signals through interrupt routines and transmitting the information via Wi-Fi to a supervisory environment. The results demonstrate stable operation, enabling the collection of necessary data for transmission, as well as real-time visualization through an intuitive dashboard. The comparative analysis between the ideal system and its application in a real scenario showed that the feasibility of using pressure transducers for monitoring refrigerant gases allows the identification of operational faults, such as inadequate pressure variations. It is concluded that the proposed system has the potential to assist professionals in the air conditioning field, providing an efficient and easily implementable alternative for remote monitoring, with possibilities for expansion to real applications and integration with new sensors and data storage systems.

Keywords: remote monitoring; air conditioning; automation; internet of things.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manômetro conectado a uma unidade condensadora	13
Figura 2 – Ciclo de refrigeração no ar-condicionado.....	16
Figura 3 – Adaptador de pressão.....	18
Figura 4 – Transdutor de pressão	18
Figura 5 – Placa ESP32 usada no projeto	19
Figura 6 – Etapas de desenvolvimento do projeto	24
Figura 7 – Componentes utilizados para realização do projeto	25
Figura 8 – Porta de comunicação da ESP32.....	26
Figura 9 – Configuração do Arduino IDE.....	26
Figura 10 – Fluxograma de instrução ao sistema	27
Figura 11 – Configuração <i>Wi-Fi</i> com ESP32	28
Figura 12 – Tela inicial do software MQTT <i>Explorer</i>	29
Figura 13 – MQTT <i>Explorer</i> demonstrando os dados de monitoramento.....	30
Figura 14 – “cmd” confirmando a execução do programa.....	31
Figura 15 – Dashboard de trabalho do <i>Node-RED</i>	32
Figura 16 – Ambiente de análise que mostrará os dados medido em tempo real.....	33
Figura 17 – Leitura em nível baixo de operação	35
Figura 18 – Leitura em nível normal de operação	35
Figura 19 – Leitura em nível alto de operação	36
Figura 20 – Tubulação estrangulada	37
Figura 21 – Esquema de interligação.....	38
Figura 22 – Tabela comparativa de dados.....	39
Figura 23 – Tabela gerada pelo fabricante	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	11
2.1	Objetivo Geral.....	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	Manômetro	12
3.1.1	<i>História do Manômetro.....</i>	<i>12</i>
3.1.2	<i>A Importância do Uso do Manômetro no Ar-condicionado.....</i>	<i>12</i>
3.1.3	<i>Medidas de Uso.....</i>	<i>13</i>
3.1.4	<i>Composição do Manômetro.....</i>	<i>14</i>
3.2	Gases Refrigerantes.....	14
3.2.1	<i>Relação entre os Gases Refrigerantes e o Uso do Manômetro</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Sistema Termodinâmico dos Gases de Refrigeração Atuando sobre o Manômetro.....</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Leis, Tratados e Normas que Regulam o Uso</i>	<i>17</i>
3.2.4	<i>Pressões de Operação dos Refrigerantes.....</i>	<i>17</i>
3.3	Adaptador de Pressão de Gás em Sistemas de Ar-condicionado.....	17
3.4	Transdutor de Pressão 4 – 20 mA.....	18
3.5	Estudo sobre o Sistema de Controle	19
3.5.1	<i>Microcontrolador ESP32.....</i>	<i>19</i>
3.5.2	<i>Comunicação Industrial Modbus.....</i>	<i>20</i>
3.5.3	<i>Tecnologia Wi-Fi.....</i>	<i>21</i>
3.5.4	<i>NODE-RED</i>	<i>22</i>
4	METODOLOGIA	24
5	ANÁLISE E RESULTADOS	34
5.1	Análise do Projeto Real.....	34
5.2	Análise do Projeto Ideal.....	36
6	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, principalmente na Região Nordeste, quando se fala em mudanças climáticas, tem-se o problema das altas temperaturas que, de acordo com INPE (2025), as previsões meteorológicas mostram registros de temperatura na faixa dos 32°C a quase 38°C em certas épocas do ano. Com isso, a cada dia se torna indispensável o uso de equipamentos de climatização como ar-condicionado e climatizadores.

Por isso, para manter esses equipamentos operando da maneira correta conta-se com o auxílio de técnicos ou especialistas que trabalhem na área de climatização, com o uso de ferramentas específicas como o manômetro para identificar problemas que possam ser apresentados pelos sistemas de ar-condicionado, facilitando a realização de serviços de maneira prática e eficiente.

Normalmente, o manômetro é a ferramenta utilizada para o trabalho de medir o nível de quantidade de gás no aparelho de ar-condicionado (Bega; Delmée; Cohn, 2011). Porém, existe a falta de exploração em unir o manômetro à tecnologia para supervisão via monitoramento, o que poderia apresentar vantagens como um controle mais preciso de informações, menor necessidade de manutenção e com maior eficiência de trabalho.

Diante disso, o projeto de monitoramento de pressão do gás em ares-condicionados visa atrelar uma nova tecnologia com as ferramentas de trabalho, planejando um mecanismo para supervisão de sistemas de ar-condicionado, analisando suas devidas vantagens, modo de instalação, controle pelo usuário, e a viabilidade de implementação por meio de simulação e aplicações, empregando monitoramento remoto.

A implantação do monitoramento desta natureza, permite que não seja preciso o deslocamento para o local de instalação, a fim de registrar o diagnóstico, já que o equipamento de medição de pressão fará a análise a distância, atuando de maneira remota. Contudo, será necessário o deslocamento do técnico ou especialista para o local de trabalho caso tenha a necessidade de realizar a manutenção do equipamento.

Após o estudo, pesquisa e aprofundamento no tema ligado à refrigeração e automação, foi desenvolvido um projeto para contribuir no auxílio da manutenção nos equipamentos de ares-condicionados. A proposta é mostrar o desenvolvimento de um adaptador que trabalhe fazendo a leitura de dados via monitoramento, colocando em prática as ferramentas e tecnologias disponíveis, tornando-se uma ferramenta inovadora e relevante do ponto de vista tecnológico.

2 OBJETIVO GERAL

Nesta seção apresenta-se os objetivos geral e específicos que nortearam o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão (TCC).

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um projeto de dispositivo para monitoramento da pressão de gases em sistemas de ar-condicionado.

2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- analisar diversos aspectos dos gases refrigerantes R-22, R-410A e R-32;
- estudar a utilização de controladores, para uso em monitoramento remoto;
- criar um dispositivo ou protótipo real, para testes de medição, controle e averiguação de grandezas e, fluidos;
- avaliar os dados obtidos com no sistema real proposto a fim de verificar sua aplicação em sistemas de ar-condicionado;
- aplicar técnicas de monitoramento em tempo real para fins de diagnóstico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Antes de discorrer sobre o projeto faz-se necessário apresentar alguns conceitos e objetos importantes para o estudo, como manômetro, adaptador de pressão, transdutor de pressão, além de um estudo dos gases que serão focados neste projeto.

3.1 Manômetro

Quanto ao manômetro apresenta-se conceitos, história, composição do manômetro e medidas de segurança.

3.1.1 História do Manômetro

O termo manômetro tem origem no francês *manomètre*, instrumento utilizado a partir do século XVIII, e deriva de raízes greco-latinas associadas à ideia de medida de pressão dos fluidos. Os primeiros conceitos relacionados à medição de pressão remontam ao século XVII, período marcado pelos estudos fundamentais sobre pressão atmosférica desenvolvidos por Evangelista Torricelli e Blaise Pascal, que estabeleceram as bases científicas para a compreensão do comportamento dos fluidos sob diferentes condições de pressão (Fox; Guinness, 2006).

A evolução desses estudos possibilitou o desenvolvimento de instrumentos cada vez mais precisos para a medição de pressão. Entre eles, destaca-se o manômetro de tubo Bourdon, inventado e patenteado no século XIX pelo engenheiro francês Eugène Bourdon (1808–1884). Esse dispositivo baseia-se na deformação elástica de um tubo metálico curvado quando submetido à pressão interna, convertendo essa deformação em um movimento mecânico que permite a indicação direta do valor da pressão (Bega; Delmée; Cohn, 2011).

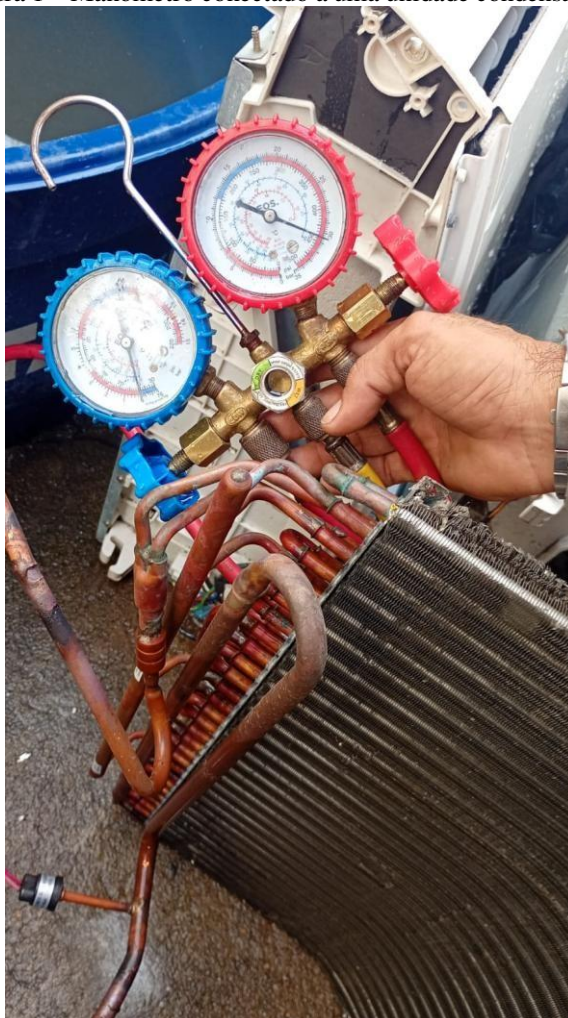
A invenção do manômetro Bourdon representou um avanço significativo na instrumentação industrial, pois tornou viável a medição mecânica de pressões mais elevadas de forma segura, confiável e de fácil aplicação no cotidiano industrial. Devido à sua robustez, simplicidade construtiva, esse tipo de manômetro permanece amplamente utilizado em sistemas industriais, laboratoriais e de controle de processos até os dias atuais (Encyclopaedia Britannica, 2024).

3.1.2 A Importância do Uso do Manômetro no Ar-condicionado

O uso de manômetro, conforme mostrado na Figura 1, para o auxílio de manutenção em equipamentos é importante, sendo necessário para realizar a medição da pressão de operação

do fluido refrigerante no ciclo, atuando em alta e baixa pressão em equipamentos de ar-condicionados residenciais que variam normalmente na faixa de capacidade entre 9.000 BTU's a 24.000 BTU's, apresentando diferentes tipos de pressão de gás.

Figura 1 – Manômetro conectado a uma unidade condensadora.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.1.3 Medidas de Uso

Antes de utilizar o manômetro deve-se realizar algumas técnicas para a sua utilização de forma segura, sendo:

- escolha da escala adequada: necessário selecionar no manômetro a escala que seja significativamente maior que a pressão de operação esperada. Nunca usar um manômetro de baixa capacidade em serviço de alta pressão, podendo ocasionar leitura incorreta do gás;
- instalação com válvula isoladora entre o processo e o manômetro para permitir manutenção sem descarregar o sistema. Fechar a válvula para aliviar a pressão antes de remover o manômetro;
- proteção contra vibração e choque: em ambientes com vibração o uso do manômetro

preenchido com líquido deve ter um suporte rígido ou localizá-lo em posição remota com tubulação flexível;

- montagem correta: importante a instalação em posição recomendada, com conexões curtas e sem tensões mecânicas;
- calibração periódica e substituição quando houver sinais de falha como saltos do ponteiro e vazamentos. Segundo as normas de fabricantes, recomenda-se não utilizar medidores em aplicações críticas sem verificação;
- cuidado com a exposição do fluido de gás e caso, o fluido apresente algum sinal inflamável, acrescentar dispositivos de bloqueio, ventilação, e procedimentos de trabalho, como o uso de EPI (Equipamento de Proteção Individual) ao remover ou isolar o manômetro (Produttivo, 2023).

3.1.4 Composição do Manômetro

Segundo Bega, Delmée e Cohn (2011), os componentes principais de um manômetro são: tubo como elemento sensível tipo *Bourdon* (*Bourdon tube*), mecanismo que compõe as engrenagens, ponteiro, mostrador tipo dial, caixa, visor e conexões, onde considera-se:

- *Bourdon tube*: pode ser feito de uma liga de cobre/latão (*copper alloy*) para pressões moderadas e gases não corrosivos; ou pode ser de bronze fosforoso (*phosphor bronze*) ou latões especiais para fluidos corrosivos e altas temperaturas/pressões;
- Caixa (*case*): pode ser de aço inoxidável, aço pintado, latão; com visor em vidro, policarbonato ou acrílico;
- a seleção do material deve considerar compatibilidade química com o fluido (inflamável, corrosivo), temperatura de processo e a faixa de pressão.

3.2 Gases Refrigerantes

Os fluidos refrigerantes têm papel importante no sistema de refrigeração e climatização, sendo responsáveis pelo transporte de calor nos ciclos termodinâmicos. Os gases mais utilizados para esse tipo de operação são: R-22, R-410A e o R-32. Cada um com propriedades físicas e químicas diferentes e impactos ambientais distintos.

O fluido refrigerante R-22, sendo apresentado como HCFC-22 ou clorodifluorometano, pertence à classe dos hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) que foi amplamente utilizado em sistemas de refrigeração e ar-condicionado ao longo de décadas. Sua popularização deve-se às boas propriedades termodinâmicas, como elevada capacidade de troca térmica, facilidade de compressão e relativa estabilidade química, características que favoreceram sua aplicação em

equipamentos residenciais, comerciais e industriais (DER-ES, 2025).

Contudo, o R-22 contém cloro em sua composição, o que lhe confere um Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP, sigla do termo em inglês *Ozone Depletion Potential*). Além disso, possui elevado Potencial de Aquecimento Global (GWP, sigla do termo em inglês *Global Warming Potential*), caracterizando-o como um gás de efeito estufa preocupante para a atmosfera quando liberado indevidamente (DER-ES, 2025).

O fluido de gás refrigerante R-410A é uma mistura composta pelos hidrofluorcarbonos R-32 (difluorometano) e R-125 (pentafluoretano), utilizada principalmente em sistemas de climatização e refrigeração modernos como substituto do antigo R-22. Por não conter átomos de cloro em sua composição, o R-410A é caracterizado como um refrigerante que não contribui diretamente para o empobrecimento da camada de ozônio estratosférica (Gás Servei, 2024a).

O R-32 é um hidrofluorcarbono puro (difluorometano) que apresenta GWP menor em comparação ao R-410A e não contribui para a destruição da camada de ozônio. Além de que, possui maior eficiência energética por unidade de massa, o que tem favorecido sua utilização em equipamentos mais novos. No entanto, o R-32 é classificado como A2L por possuir baixa inflamabilidade, exigindo cuidados adicionais de projeto e instalação (Gás Servei, 2024b).

3.2.1 Relação entre os Gases Refrigerantes e o Uso do Manômetro

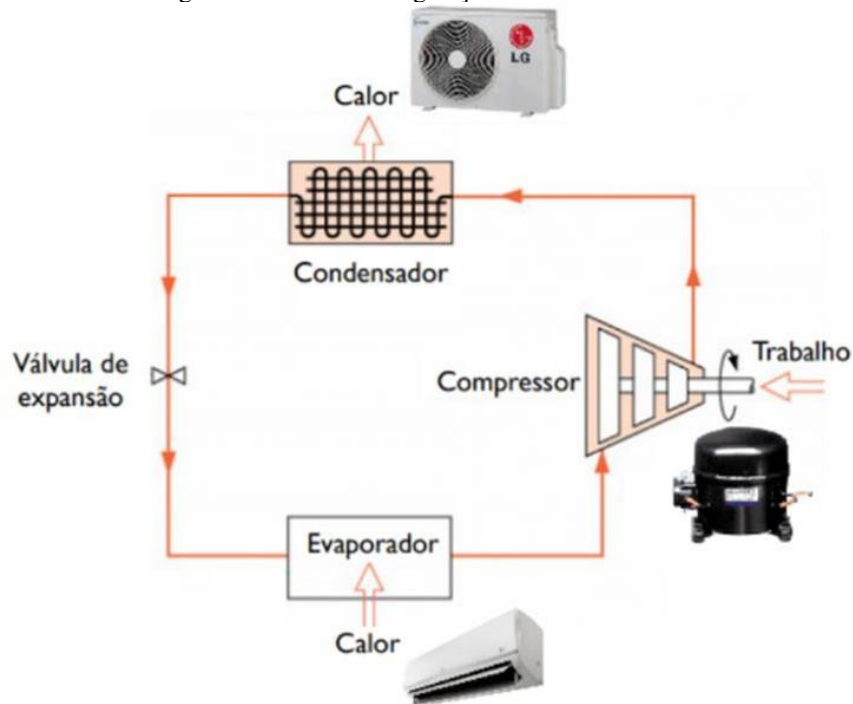
Cada tipo de gás refrigerante opera em uma faixa característica de pressão, o que exige um manômetro adequado e calibrado para cada fluido. O R-22, tradicionalmente utilizado em condicionadores de ar, trabalha em pressões mais baixas em comparação aos novos gases. Já o R-410A e o R-32, considerados substitutos mais eficientes e ambientalmente adequados, operam em pressões significativamente mais altas, podendo chegar a quase o dobro das pressões do R-22 para a mesma temperatura de evaporação/condensação.

Segundo Danfoss (2019), os gases refrigerantes R-410A e R-32 operam em pressões consideravelmente mais elevadas (geralmente até 800 psi), enquanto os de R-22 trabalham em escalas menores (até 500 psi).

3.2.2 Sistema Termodinâmico dos Gases de Refrigeração Atuando sobre o Manômetro.

Um sistema de ar-condicionado pode ser entendido como um sistema termodinâmico cíclico, no qual o fluido refrigerante, passa por transformações de pressão e temperatura ao circular pelos quatro principais componentes: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Ciclo de refrigeração no ar-condicionado.



Fonte: Cubienergia (2023).

Dentro desse ciclo, o gás refrigerante alterna entre as fases gasosa e líquida, seguindo a relação pressão e temperatura descrita pelas leis da termodinâmica (Lei de Boyle-Mariotte e Equações de Clapeyron). Cada gás possui sua curva característica de saturação, o que significa que, para uma determinada temperatura, há uma pressão correspondente definida.

O manômetro atua justamente como a interface de medição entre o sistema termodinâmico do refrigerante e o técnico. Quando a mangueira do manômetro é conectada à linha de sucção ou descarga, ocorrem as seguintes situações:

- a pressão interna do refrigerante atua diretamente sobre o elemento sensível do manômetro (tubo de Bourdon);
- essa pressão é a resultante da energia interna do gás refrigerante, que depende da temperatura e do estado termodinâmico que pode ser nos estados líquidos saturados, vapor saturado ou superaquecido;
- a deformação do elemento sensível é proporcional à força exercida pelo fluido, conforme a Lei de Pascal;
- o movimento mecânico gerado é transmitido a um sistema de engrenagens e convertido em indicação visual no mostrador pelo ponteiro e escala da ferramenta.

Assim, o manômetro funciona como um tradutor do estado termodinâmico do refrigerante, permitindo verificar se o ciclo está dentro da faixa de operação adequada.

3.2.3 Leis, Tratados e Normas que Regulam o Uso

A regulamentação dos gases refrigerantes está diretamente vinculada a tratados internacionais. O Protocolo de Montreal de 1987, aplicado por diversos países, estabeleceu a eliminação progressiva de substâncias que destroem a camada de ozônio, como os CFCs (clorofluorcarboneto) e HCFCs (hidroclorofluorcarboneto), o que inclui o R-22 (Brasil, 2019). Posteriormente, segundo a Emenda de Kigali (2016), responsável pela redução de produção e consumo de HCFCs, definiu ao Protocolo de Montreal o cronograma de redução gradual (*phase-down*) dos hidrofluorcarbonos (HFCs), incluindo o R-410A, devido ao seu elevado (GWP) (Greenyellow, 2024).

A implementação do plano tem contribuído de forma significativa para o cumprimento dos compromissos ambientais assumidos pelo Brasil, promovendo a transição para gases refrigerantes mais eficientes e ambientalmente adequados, em concordância com os objetivos de proteção da camada de ozônio e mitigação das mudanças climáticas (Brasil, 2019).

3.2.4 Pressões de Operação dos Refrigerantes

As pressões de saturação dos refrigerantes variam conforme a temperatura de evaporação e condensação. Na faixa de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, observa-se os resultados mostrados no Quadro 1, medidos em vários equipamentos, com valores aproximados para as pressões de sucção e descarga.

Quadro 1 – Faixa de variação de pressão nos gases.

	Pressão de Sucção (psi)	Pressão de Descarga (psi)
R-22	60 ~ 80	150 ~ 230
R-410 ^a	100 ~ 150	300 ~ 420
R-32	110 ~ 210	280 ~ 330

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3 Adaptador de Pressão de Gás em Sistemas de Ar-condicionado

O adaptador de pressão, exemplificado na Figura 3, é um componente mecânico utilizado como interface entre o ponto de medição do sistema de refrigeração e o instrumento de medição, o manômetro. Ele possibilita que a pressão interna do circuito seja acessada de maneira controlada, garantindo segurança e praticidade durante o processo de manutenção. Seu modo de funcionamento ocorre através de conexão roscada ou de engate rápido, acoplada às válvulas de serviço dos equipamentos de ar-condicionado e quando instalado, o pino interno

pressiona o núcleo da válvula Schrader, permitindo a passagem do fluido refrigerante para o dispositivo de medição. Quando removido, a válvula se fecha automaticamente, evitando vazamentos (Danfoss, 2019).

Figura 3 – Adaptador de pressão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.4 Transdutor de Pressão 4 – 20 mA

O transdutor de pressão diferencial capacitivo como demonstrado na Figura 4, foi desenvolvido para detectar variáveis físicas do processo, como pressão, temperatura, vazão e nível, e convertê-las em sinais padronizados. Também denominados elementos primários, os sensores constituem a primeira etapa da cadeia de instrumentação, permitindo que a informação medida seja interpretada e utilizada por sistemas de controle.

Figura 4 – Transdutor de pressão.



Fonte: ACT Brasil (2024).

Junto ao sensor, o transdutor tem como função transformar a variável física em um sinal elétrico proporcional, adequado para o tratamento em equipamentos eletrônicos, tais como indicadores, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), Sistemas Digitais de Controle Distribuído (DCS) e controladores autônomos (Brasil Tec, 2025)

Sua corrente elétrica atua na faixa de 4 mA e 20 mA, no qual o valor mínimo representa o ponto inicial da escala, considerado o zero da variável de processo e o valor máximo que representa o limite superior da faixa de medição. A diferença entre esses dois valores, equivalente a 16 mA, é denominada como *spam*, e corresponde à amplitude efetiva de variação da variável.

A adoção de 4 mA como valor mínimo, conhecido como ponto zero, permite distinguir uma condição de processo em zero da ocorrência de falha, como rompimento de cabos ou ausência de alimentação.

A utilização do transistor com saída 4-20 mA possibilita diversas vantagens, entre as quais a robustez contra interferências eletromagnéticas, a facilidade de calibração e interpretação do sinal e a capacidade de detecção de falhas devido ao zero vivo (Sendo Sensor, 2024).

3.5 Estudo sobre o Sistema de Controle

Nesta seção, mostra-se os equipamentos necessários para compor o sistema de controle.

3.5.1 Microcontrolador ESP32

O ESP32 é um microcontrolador desenvolvido pela *Espressif Systems* e lançado em 2016, como uma evolução direta do modelo ESP8266. Na Figura 5 tem-se o modelo padrão do dispositivo.

Figura 5 – Placa ESP32 usada no projeto.



Fonte: Mercado Livre (2024).

Este novo chip trouxe melhorias significativas em desempenho, eficiência e conectividade, ao integrar de forma nativa os módulos *Wi-Fi* e *Bluetooth*, ampliando consideravelmente suas possibilidades de aplicação.

Além de possuir características únicas como:

- microcontrolador de *dobte* núcleo Xtensa® 32 bits para alto rendimento;
- frequência de operação ajustável de 80 a 240 MHz;

- 4 MB de memória flash para armazenamento robusto;
- suporta *Wi-Fi* 802.11 b/g/n com alcance de até 150 Mbps;
- conexão *bluetooth* BLE 4.2 para comunicação eficiente;
- operação em temperaturas de -40 °C a +85 °C para ambientes extremos.

A trajetória da *Espressif* iniciou-se em 2015, quando a empresa chinesa lançou o ESP8266, um microcontrolador que se destacou por incorporar o circuito de *Wi-Fi* diretamente no chip uma inovação para a época e por apresentar um baixo custo, o que favoreceu sua ampla adoção pela comunidade de desenvolvedores e entusiastas de eletrônica. O sucesso do ESP8266 motivou a criação do ESP32, que manteve a proposta de acessibilidade, mas adiciona novas funcionalidades e maior poder de processamento.

Graças a essas características, o ESP32 consolidou-se como uma das plataformas mais utilizadas em projetos de Internet das Coisas (IoT), automação residencial e diversas aplicações eletrônicas. Seu destaque se deve não apenas ao baixo consumo de energia e alto desempenho, bem como a sua facilidade de uso, especialmente por sua semelhança com a plataforma Arduino, o que o torna acessível tanto para iniciantes quanto para profissionais da área de tecnologia (Espressif Systems, 2016).

3.5.2 Comunicação Industrial Modbus

As redes de comunicação industrial constituem a base tecnológica da automação moderna, responsáveis por integrar e gerenciar diferentes dispositivos e sistemas dentro de um ambiente produtivo. Elas conectam sensores, atuadores, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), Interface Homem-Máquina (IHM), computadores, máquinas, rádios de comunicação, redes sem fio e robôs, permitindo a troca de informações de forma eficiente e confiável.

Historicamente, a comunicação em ambientes industriais era realizada por meio de sistemas cabeados individuais. Esse modelo apresentava sérios desafios operacionais, pois quanto maior o número de cabos, maior a complexidade de instalação, manutenção, gerenciamento e organização. Com o avanço das tecnologias, esse modelo foi substituído por redes integradas capazes de compartilhar múltiplas variáveis de controle em um único meio físico, reduzindo custos e aumentando a eficiência operacional.

Segundo Nascimento e Lucena (2003), o *Modbus* é um protocolo amplamente utilizado em sistemas de automação industrial. Fundado em 1979 pela empresa *Modicon Industrial Automation Systems* e posteriormente padronizado pela *Modbus Organization*, sendo considerado um dos protocolos mais difundidos e confiáveis do setor, devido à sua simplicidade, baixo custo de implementação e compatibilidade com uma grande variedade de

dispositivos. Seu funcionamento baseia-se em uma arquitetura mestre-escravo (ou cliente-servidor), na qual um dispositivo mestre como um sistema supervisório envia comandos de leitura ou escrita para um ou mais dispositivos escravos, que respondem de acordo com as instruções recebidas. Essa estrutura garante uma comunicação organizada e eficiente entre controladores, sensores, atuadores e interfaces de operação.

O *Modbus* atua na camada de aplicação do modelo OSI e pode operar sobre diferentes meios físicos, como RS-232, RS-485 ou *Ethernet* TCP/IP. Cada um desses padrões possui características específicas quanto à velocidade, capacidade de dispositivos conectados e extensão da rede. O *Modbus* TCP utiliza o método CSMA-CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) para evitar colisões na transmissão de pacotes e assegurar a integridade dos dados (Seixas, 2007).

Entre as funções do *Modbus* estão a leitura e escrita de registros, o controle de portas de entrada e saída e a solicitação de envio de dados. Esses recursos possibilitam o gerenciamento preciso de variáveis de processo, garantindo o controle e o monitoramento em tempo real de operações industriais de diferentes complexidades. Assim, o *Modbus* consolidou-se como um dos pilares da automação moderna, assegurando comunicações robustas, seguras e interoperáveis (Thomas, 2008).

Atualmente, as redes industriais estão presentes em todos os níveis organizacionais do chão de fábrica ao setor administrativo, viabilizando uma comunicação contínua e precisa entre equipamentos e sistemas. Essa integração garante maior eficiência produtiva, redução de falhas e monitoramento em tempo real, além de contribuir para a segurança industrial ao automatizar processos complexos e potencialmente perigosos.

3.5.3 Tecnologia Wi-Fi

O avanço das tecnologias de comunicação sem fio, impulsionado pela crescente demanda por conexões mais rápidas, estáveis e de maior capacidade, levou a um grande desenvolvimento do protocolo *Wi-Fi*. Esse protocolo, tecnicamente denominado IEEE 802.11, é uma tecnologia de Rede de Área Local Sem Fio (sigla em inglês *WLAN*) que permite a transmissão de dados entre dispositivos e roteadores sem a necessidade de cabos, utilizando ondas de rádio como meio de comunicação. A evolução do *Wi-Fi* envolveu melhorias significativas em diversos aspectos, como protocolos de modulação e taxas de codificação.

A modulação é o processo pelo qual um sinal é alterado para transportar dados de forma eficiente. Protocolos de modulação mais robustos permitem transmitir uma maior quantidade de informações em um mesmo intervalo de tempo, mas exigem ambientes com menor nível de

interferência eletromagnética. Já as taxas de codificação definem a proporção entre os dados úteis transmitidos e os dados reservados para a correção de erros.

Desde suas primeiras versões, o *Wi-Fi* foi projetado para se adaptar automaticamente às condições do ambiente. O protocolo é capaz de mensurar o nível de ruído e ajustar seus parâmetros de operação de modo a reduzir o número de retransmissões de pacotes e otimizar a velocidade de comunicação. Assim, em locais com baixa interferência, o sistema utiliza modulações que possibilitam altas taxas de transmissão. Em contrapartida, em ambientes com muitas redes ou dispositivos operando na mesma frequência, o *Wi-Fi* reduz a complexidade da modulação, priorizando a estabilidade e minimizando colisões de pacotes.

O núcleo do *Wi-Fi* é o Ponto de Acesso, que atua como uma estação base responsável por intermediar a comunicação entre os dispositivos conectados. A principal rede utilizada é a *Wi-Fi*: Infraestrutura em LAN baseada em *Wi-Fi*, é o modelo mais comum, utilizado em residências e empresas, onde os dispositivos se conectam por meio de um roteador ou ponto de acesso, podendo fornecer ou não conexão à Internet: caracteriza-se pela comunicação direta entre dispositivos, sem a presença de um ponto de acesso central. Nessa topologia, um dispositivo assume a função de “mestre” e os demais operam como “escravos”. Esse tipo de rede é frequentemente usado para compartilhamento de dados entre computadores.

Em termos de topologia, o *Wi-Fi* adota majoritariamente a estrutura em estrela, na qual o ponto de acesso funciona como o *gateway* para a internet, centralizando a comunicação entre os dispositivos. Cada ponto de acesso pode suportar até 250 conexões simultâneas, embora, em aplicações comerciais, seja comum o limite de cerca de 50 dispositivos ativos por rede.

Os padrões de operação do *Wi-Fi* variam operando na faixa de 2,4 GHz, com taxas de transferência entre 150 e 200 Mbps, cobrindo normalmente um raio de até 50 metros e na faixa de 5 GHz oferecendo velocidades que podem variar de 500 Mbps a 1 Gbps, proporcionando maior desempenho e menor interferência (Stallings, 2015).

3.5.4 NODE-RED

Segundo seus criadores: O’Leary e Canter, o *Node-RED* é uma ferramenta de código aberto baseada em programação de fluxo (*flow-based programming*), desenvolvida pela IBM, que realiza a programação orientada a fluxos por meio de uma interface gráfica acessível via navegador (*Node-RED*, 2016). A plataforma oferece uma grande variedade de nós com finalidades específicas que podem ser conectados de maneira intuitiva para estabelecer o fluxo de informações e construir aplicações complexas sem a necessidade de programação extensa. Cada nó possui uma função bem definida gerenciando detalhes técnicos de um projeto

automaticamente, tornando o desenvolvimento mais ágil e acessível.

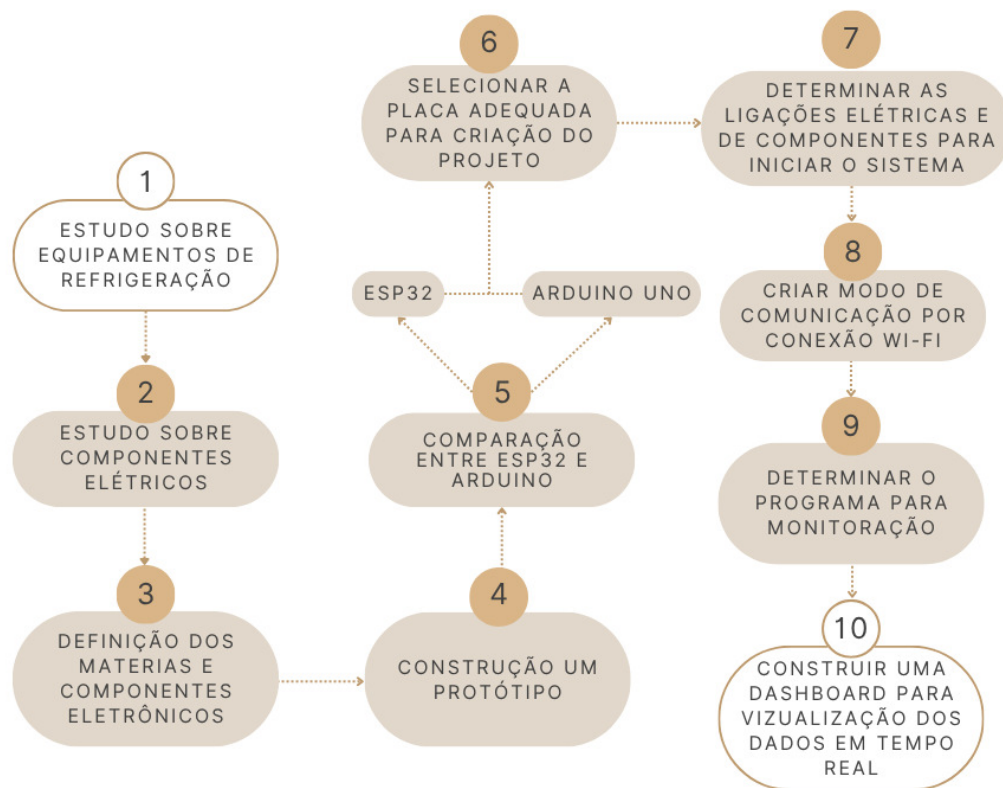
Além de sua flexibilidade, o *Node-RED* suporta diferentes protocolos de comunicação, como HTTP, MQTT e TCP, possibilitando conexões locais por porta serial e integração com bancos de dados. Além disso, outro diferencial da ferramenta é a capacidade de criar painéis interativos de visualização com gráficos, tabelas e botões, que permitem monitorar e controlar sistemas em tempo real. A plataforma ainda possibilita a implementação de funções personalizadas utilizando *JavaScript*, diretamente pelo navegador.

Os fluxos criados na plataforma são armazenados no formato JSON, o que permite importar, exportar e compartilhar configurações de maneira simples entre diferentes projetos e dispositivos. Essa característica facilita o *backup*, a migração e a reutilização de fluxos, promovendo maior flexibilidade e escalabilidade das aplicações desenvolvidas.

4 METODOLOGIA

A metodologia abordada neste trabalho trata-se de uma pesquisa aplicada e experimental, complementada por pesquisas bibliográficas, visando construir conhecimento necessário para desenvolver uma ferramenta alternativa eficiente de trabalho. Para isso, foram pesquisados materiais previamente publicados, como normas internacionais e trabalhos acadêmicos, os quais serviram de base para aplicações práticas realizadas durante o período de execução. Essas práticas foram planejadas para coletar diagnósticos de pressão de gás sendo obtidos após uma série de etapas, definidas na figura 6 do Fluxograma.

Figura 6 – Etapas de desenvolvimento do projeto



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Portanto, a metodologia deste projeto teve como ponto de partida o estudo sobre os componentes de refrigeração e os componentes elétricos a serem utilizados no projeto de monitoramento.

Embora o objetivo teórico deste trabalho seja o monitoramento da pressão do gás em sistemas de refrigeração por meio de um transdutor de pressão, optou-se pela utilização de um sensor de vazão durante o desenvolvimento experimental. Essa escolha foi motivada principalmente pelo menor custo de aquisição do componente, pela facilidade de montagem em bancada e possibilidade de reproduzir a mesma lógica de funcionamento necessária para o sistema de monitoramento. No projeto real desenvolvido neste trabalho, o sensor de vazão foi

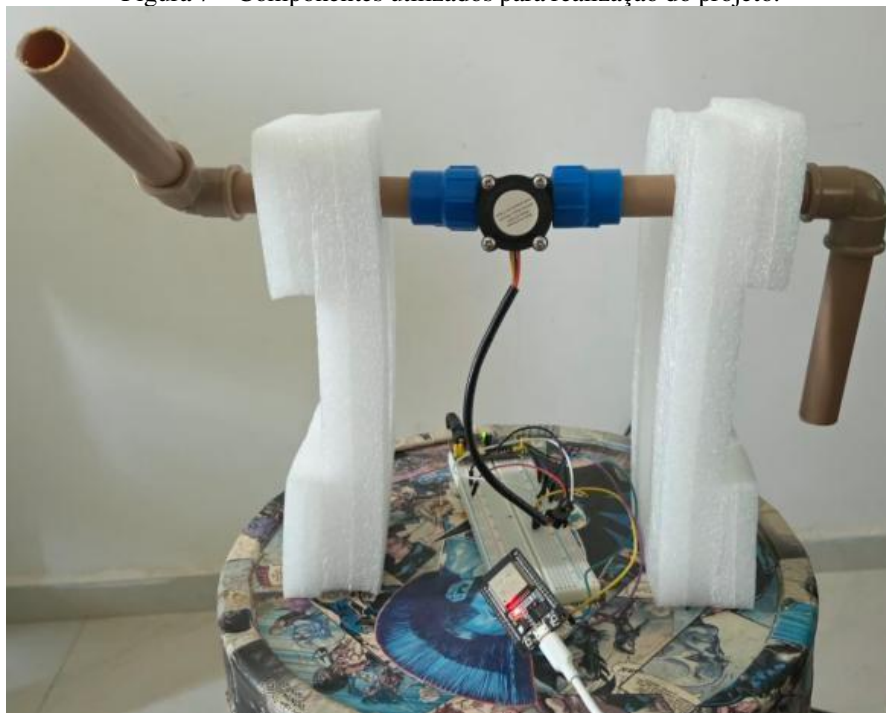
utilizado para gerar pulsos elétricos proporcionais à passagem do fluido, permitindo validar a aquisição, transmissão e visualização dos dados. Já no projeto ideal, esses pulsos seriam substituídos por sinais vindos de um transdutor de pressão instalado no sistema de refrigeração.

Para desenvolvimento do projeto experimental foram utilizados:

- 1 metro de cano PVC, 20 mm;
- Sensor de vazão;
- ESP32 *Wi-Fi* integrado;
- Fonte 5 V/3.3 V;
- Resistor de 10 k Ω ;
- Cabos para conexão;
- Cabo de conexão de dados 2.1 A (Micro USB).

Em seguida foi feita a montagem em escala reduzida para representação do sistema, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Componentes utilizados para realização do projeto.

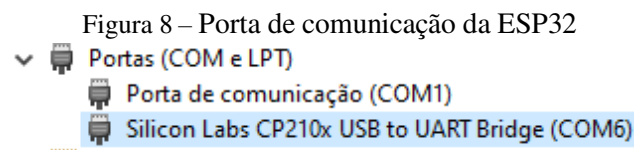


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os *softwares* utilizados foram:

- Arduino IDE;
- MQTT Explorer;
- Node-Red.

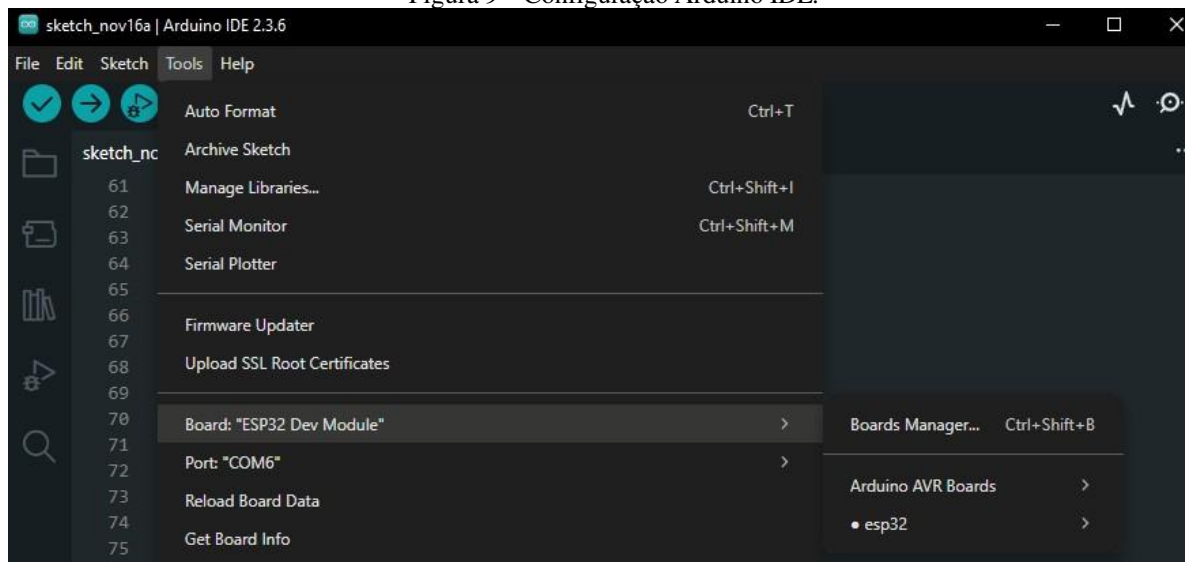
Inicialmente foi necessário realizar a conexão da ESP32 com a máquina que será usada para trabalho. A ESP32 precisa de atualizações de drivers para poder atuar corretamente na conversão de USB para serial. Instalando o *Drive* CP210x, pode-se ter o reconhecimento da máquina com a ESP32, como mostrado na Figura 8.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Dessa forma, foi executado o Arduino IDE e através dele, o programa criado, contudo, precisa-se realizar algumas configurações para que funcione corretamente: selecionar a porta de acesso de comunicação, levando em consideração a porta da máquina (COM6), selecionar a placa para reconhecer o trabalho com uma ESP32, selecionando *ESP32 Dev Module*, como visto na Figura 9.

Figura 9 – Configuração Arduino IDE.

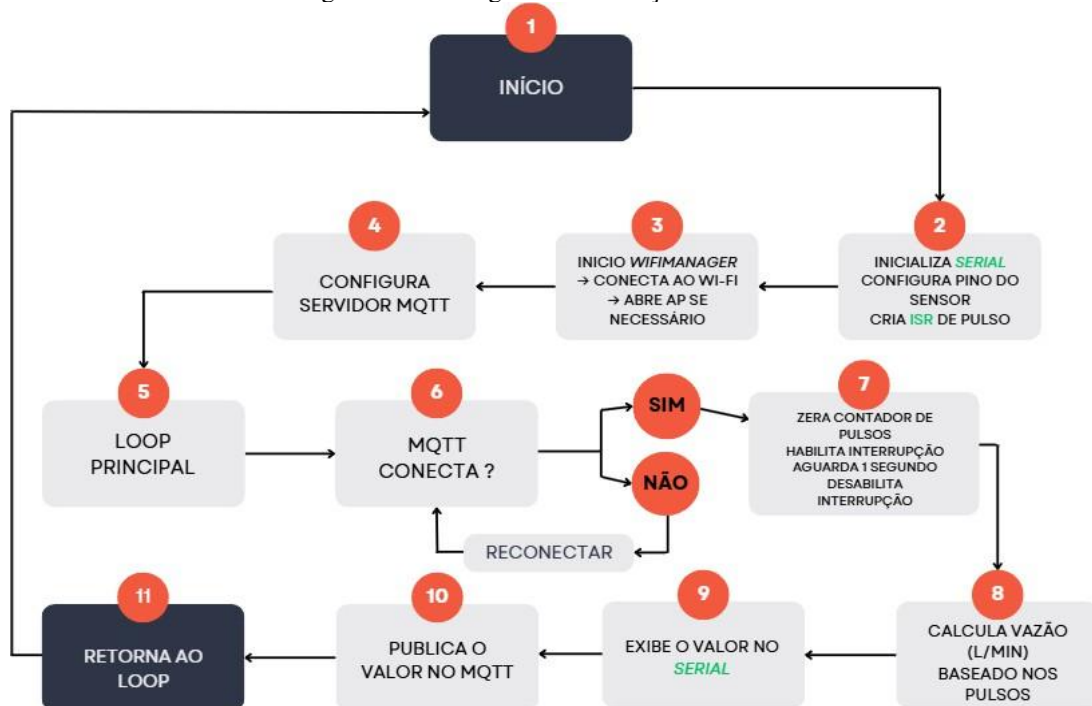


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

No projeto é realizada a leitura do sensor de vazão que envia dados coletados para um servidor MQTT. O sistema realiza a medição contínua da vazão de líquido em litros por minuto, conectando-se automaticamente ao *Wi-Fi* usando o *WiFiManager*, e publica as leituras em um tópico MQTT que irá monitorar remotamente.

Na Figura 10 que corresponde ao fluxograma mostra-se como será a interpretação do código apresentado.

Figura 10 – Fluxograma de instrução do sistema.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Rotina de Serviço de Interrupção (ISR, do inglês *Interrupt Service Routine*), constitui uma interrupção acionada por um pulso, geralmente um sinal elétrico rápido que muda de nível (subida ou descida). Quando um sensor ou dispositivo gera um pulso, o microcontrolador interrompe o fluxo normal do programa e chama automaticamente uma função especial, o ISR. Como o pulso pode ser rápido demais para um *loop* normal, a interrupção garante que nenhum pulso seja perdido.

Um ISR de pulso é usado quando é preciso:

- detectar eventos rápidos;
- contar pulsos (sendo o caso do sensor de vazão);
- registrar mudanças imediatas sem perder sinal.

As funcionalidades desse projeto são:

- leitura precisa de pulsos usando interrupção (ISR);
- cálculo da vazão em L/min;
- conexão *Wi-Fi* automática via porta de configuração do *WiFiManager*;
- reconexão automática ao *broker* MQTT;
- publicação contínua dos valores no tópico MQTT escolhido;
- código otimizado para estabilidade.

Para a leitura do Sensor de Vazão, o equipamento possui uma hélice com um ímã interno e um sensor *Hall* que gera pulsos. Cada pulso representa uma fração do volume de água que passa pelo sensor. O ESP32 capta esses pulsos através de uma interrupção, garantindo uma contagem precisa, mesmo durante outras tarefas.

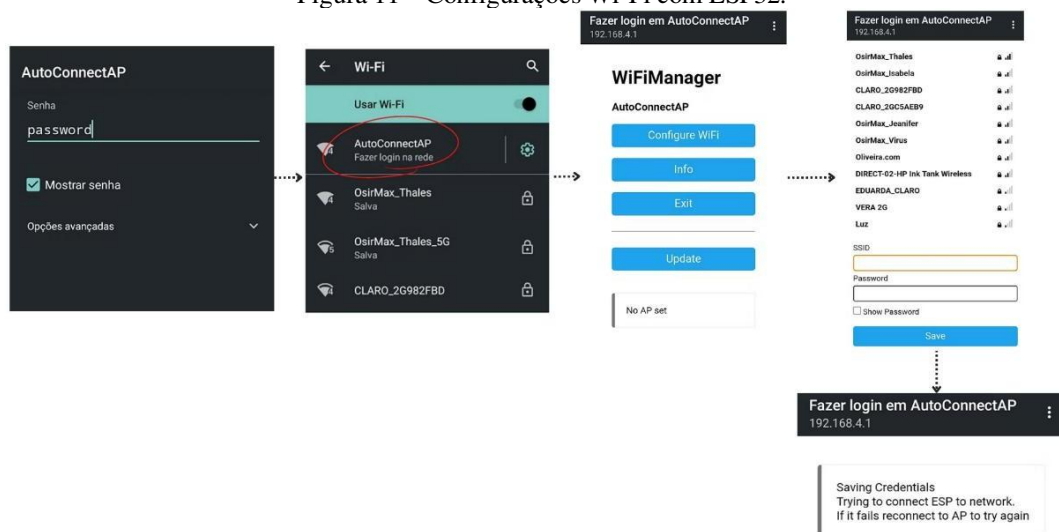
No cálculo da vazão, os pulsos são contados durante 1 segundo e em seguida, aplica-se a fórmula da taxa de vazão mostrada na Equação 1, que será convertido para litros por minuto (L/min), de acordo com código a seguir, que embora pareça complexa, a expressão é a conversão passo a passo entre pulsos → mililitros → litros → litros/minuto.

$$vazão = \frac{pulso * 2,25}{1000} * 60 \quad (1)$$

O *WiFiManager* cria automaticamente um ponto de acesso quando o ESP32 não encontra uma rede salva.

Através dos passos seguidos na Figura 11, é possível observar que o melhor método de emparelhar a rede *Wi-Fi* da ESP32 com a rede de internet usada para o projeto é usando uma conexão de 2.4 GHz, pois a ESP32 não consegue se conectar à rede 5 GHz.

Figura 11 – Configurações Wi-Fi com ESP32.



Fonte: Ferreira (2023).

Assim, a sequência de conexão mostrado na Figura 10 é:

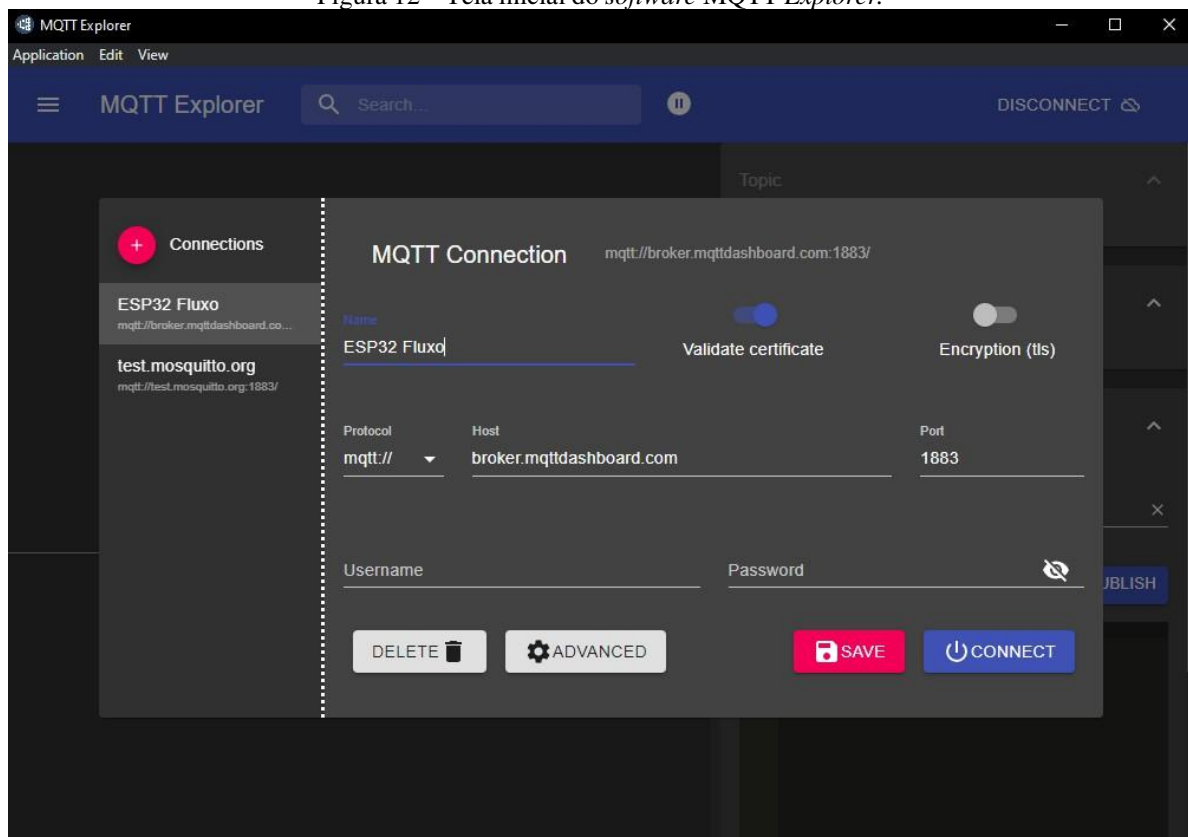
- conectar o celular/notebook ao *Wi-Fi AutoConnectAP*;
- abrir um navegador e acessar: <http://192.168.4.1>;
- escolher sua rede *Wi-Fi* para conexão (usar a rede 2.4 GHz);
- inserir a senha;
- ESP32 vai reiniciar já conectado ao *Wi-Fi*.

Após a configuração, o ESP32 salva o *Wi-Fi* e conecta-se automaticamente nas próximas vezes, avisando que a conexão foi bem-sucedida:

```
WiFi conectado!
IP: 192.168.x.x
```

A comunicação via MQTT *explorer* será de grande utilidade para visualização dos dados impressos. Quando o programa é executado tem-se o título do projeto “ESP32 Fluxo”, o *host* usado será “*broker.mqttdashboard.com*” e a porta 1883, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Tela inicial do *software* MQTT Explorer.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

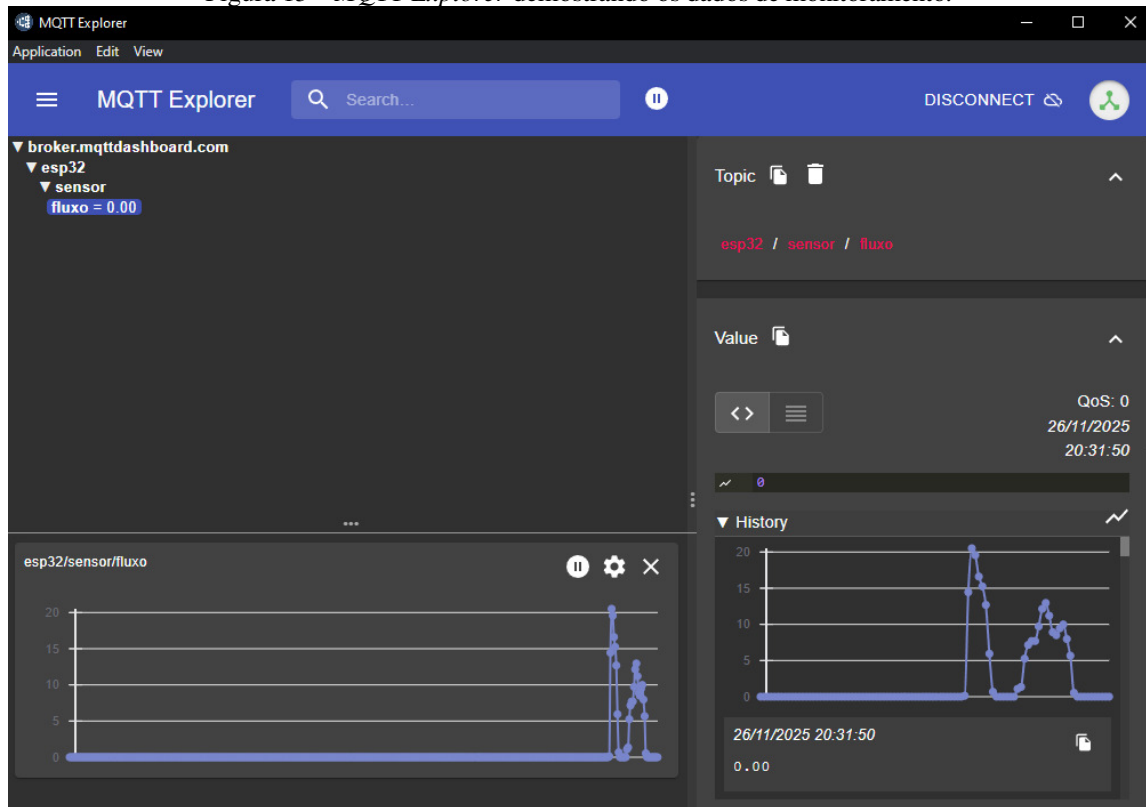
O uso do “*broker.mqttdashboard.com*” como *host* se torna interessante pois ele é um *broker* MQTT público e gratuito, usado principalmente para experimentos, sem necessidade de instalar algum programa no computador.

Já a porta 1883 será usada porque é a porta padrão do protocolo MQTT para comunicação sem criptografia.

No entanto, não houve a necessidade de implementação no código de *username* e *password*, sendo possível ser adicionado posteriormente dependendo da necessidade de restrição de uso, caso seja necessário basta incluir no código um usuário e senha.

Dando continuidade, na *dashboard* do *software*, na Figura 13, ao selecionar o “*broker.mqttdashboard.com*” em seguida ESP32, sensor e por fim o fluxo, é possível notar no canto inferior direito, o gráfico da atuação do sensor, além do histórico do valor da vazão medida e os dados impressos no tempo real. Caso a conexão MQTT seja perdida, o ESP32 tentará reconectar-se automaticamente.

Figura 13 – *MQTT Explorer* demonstrando os dados de monitoramento.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Portanto, na Figura 13, o código e o *software* que faz a leitura dos dados estão funcionando conforme esperado, contudo torna-se necessário uma *dashboard* em que esses dados sejam apresentados de maneira prática e fácil ao público, para isso, o programa *Node-Red* foi utilizado.

Esse programa para ser executado precisa ser ativado pelo “cmd” na máquina do usuário, executado como administrador e assim deverá aparecer uma mensagem como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - “cmd” confirmando a execução do programa.

```

node-red
Microsoft Windows [versão 10.0.19045.6466]
(c) Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Windows\system32>node-red
28 Nov 14:20:45 - [info]

Welcome to Node-RED
=====
28 Nov 14:20:45 - [info] Node-RED version: v4.1.1
28 Nov 14:20:45 - [info] Node.js version: v24.11.1
28 Nov 14:20:45 - [info] Windows_NT 10.0.19045 x64 LE
28 Nov 14:20:45 - [info] Loading palette nodes
28 Nov 14:20:46 - [info] Dashboard version 3.6.6 started at /ui
28 Nov 14:20:46 - [info] Settings file : C:\Users\Usuario\.node-red\settings.js
28 Nov 14:20:46 - [info] Context store : 'default' [module=memory]
28 Nov 14:20:46 - [info] User directory : \Users\Usuario\.node-red
28 Nov 14:20:46 - [warn] Projects disabled : editorTheme.projects.enabled=false
28 Nov 14:20:46 - [info] Flows file : \Users\Usuario\.node-red\flows.json
28 Nov 14:20:46 - [info] Server now running at http://127.0.0.1:1880/
28 Nov 14:20:46 - [warn]

-----
Your flow credentials file is encrypted using a system-generated key.

If the system-generated key is lost for any reason, your credentials
file will not be recoverable, you will have to delete it and re-enter
your credentials.

You should set your own key using the 'credentialSecret' option in
your settings file. Node-RED will then re-encrypt your credentials
file using your chosen key the next time you deploy a change.
-----
28 Nov 14:20:46 - [info] Starting flows
28 Nov 14:20:46 - [info] Started flows
28 Nov 14:20:47 - [info] [mqtt-broker:ESP32 - FLUX0] Connected to broker: mqtt://broker.mqttdashboard.com:1883
28 Nov 14:20:47 - [info] [mqtt-broker:MQTT Dashboard] Connected to broker: mqtt://broker.mqttdashboard.com:1883
28 Nov 14:20:53 - [info] [mqtt-broker:Broker Publico] Connected to broker: mqtt://broker.mqttdashboard.com:1883

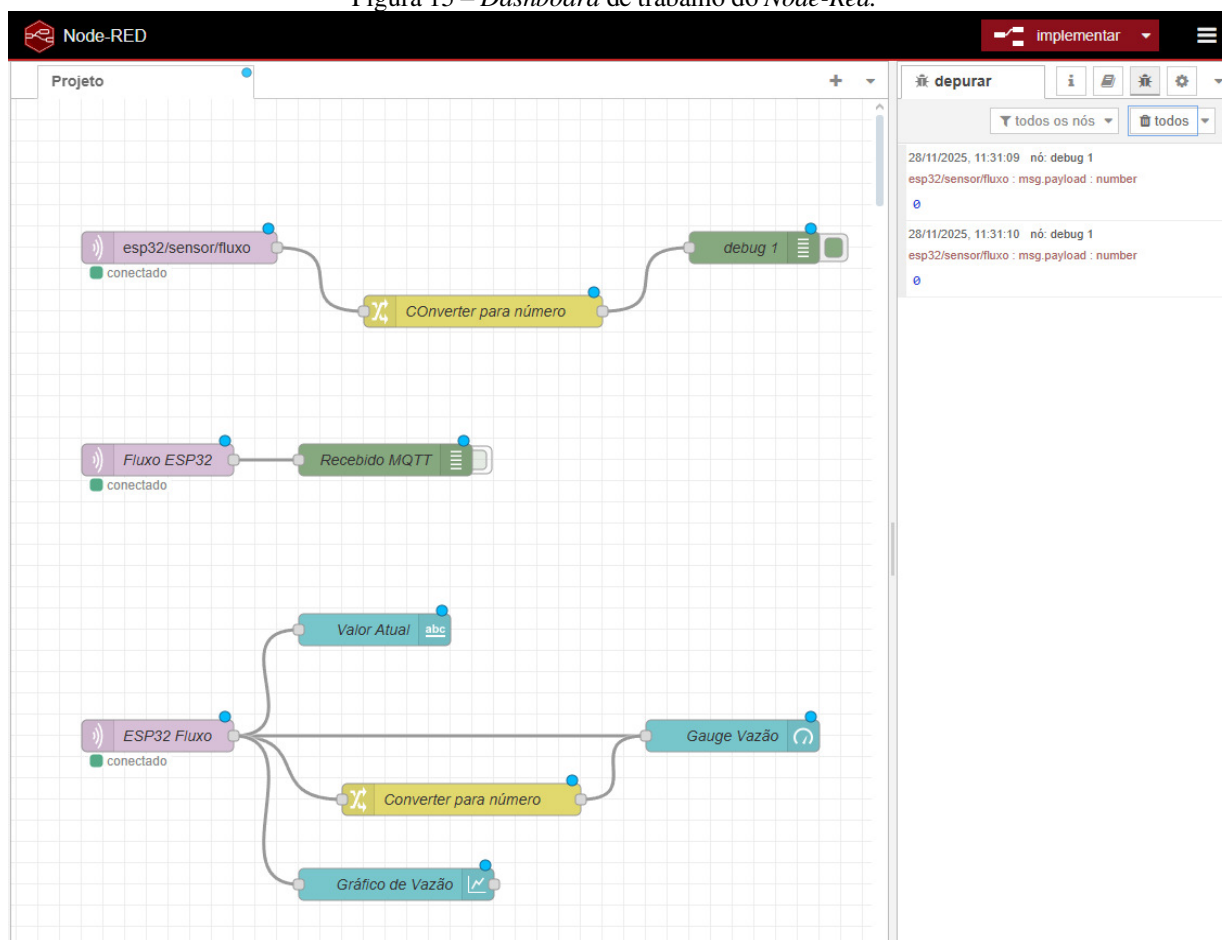
```

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em seguida, para acessar o programa, executa-se “localhost:1880”, que é o endereço local onde o *Node-Red* está rodando no computador. Sua execução ocorre por navegador, pois o *Node-Red* funciona como um servidor *web*. Então, como mostrado na Figura 15, tem-se o programa sendo executado junto aos blocos de função.

O programa servirá como uma interface para realizar a leitura de dados e para isso utiliza-se blocos com características diferentes de atuação.

- Rosa, sendo o MQTT *in* (recebe o sinal da ESP32);
- Amarelo, bloco “change” faz a conversão de uma variável *string* para número;
- Verde, o que será impresso;
- Azul, blocos de função para criação de interface de apresentação.

Figura 15 – *Dashboard* de trabalho do *Node-Red*.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Com isso, pode-se executar o ambiente de análise de dados para usuários que será através do “<http://localhost:1880/ui/>” conforme Figura 16, onde é possível ver a *dashboard* com gráfico, medição e registro do tempo de operação.

Figura 16 – Ambiente de análise que mostrará os dados sendo medidos em tempo real.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

5 ANÁLISE E RESULTADOS

Para descrever a análise dos resultados obtidos, é preciso inicialmente entender o projeto real, destacando pontos importantes sobre ele e o método de monitoramento, em seguida entender e analisar o projeto ideal, associando-os a fim de traçar um paralelo entre o que foi possível montar na prática e o modelo teórico ou idealizado.

5.1 Análise do Projeto Real

A associação do experimental do projeto em escala reduzida com um projeto real mostra uma aplicação que para fins de demonstração apresenta resultados relevantes, relacionado a aplicação para monitoramento. E sua conexão está relacionada com o método de leitura dos dados, que no caso do sensor de vazão irá fazer a leitura da passagem da água/vento transcrevendo o sinal em pulso elétrico e realizando a leitura correta, já no transdutor de pressão a leitura será dada pela pressão de gás que irá passar pelo sistema de refrigeração, sendo feita de maneira parecida, com a leitura da pressão e conversão para pulso elétrico.

Além disso, o sistema supervisor é um incremento ideal para análise dos dados, pois nele tem-se a interpretação dos dados como deve ser, analisando a vazão, o histórico de leitura durante o tempo analisado, além da quantidade de dados recebidos pelo sistema. Durante os testes realizados, o sensor apresentou leituras estáveis de vazão, com variações diretamente relacionadas às alterações do fluxo no sistema experimental. Os valores registrados mostraram resultados corretos ao funcionamento do sensor, no qual o aumento da vazão provoca aumento na frequência dos pulsos gerados.

Na Figura 17 mostra-se os dados recebidos do sistema em escala reduzida. Para o teste foi realizada a operação em região de baixa atuação onde a vazão está no nível mais baixo, indicado pela cor verde, indicando que o sistema está atuando com pouco fluxo.

Figura 17 – Leitura em nível baixo de operação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Figura 18, tem-se o nível de atuação normal, onde será a faixa normal de operação do sistema. Nota-se que o sistema fica em amarelo pois será a zona de atuação recomendada de operação do sistema.

Figura 18 – Leitura em nível normal de operação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Já na Figura 19, é possível observar a variação da vazão ao longo do tempo, onde, o nível alto mostra uma leitura em estado vermelho indicando que o sistema está operando em alta vazão, prejudicando sua vida útil, o que pode ocasionar a quebra do sensor, comprometendo a leitura dos dados e de todo o sistema.

Figura 19 – Leitura em nível alto de operação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

É possível observar também que o sistema respondeu rapidamente às mudanças de fluxo, evidenciando que a leitura por interrupção utilizada no ESP32 foi eficaz para evitar perda de pulsos. Além de que, foi possível verificar que a comunicação via *Wi-Fi* e MQTT ocorreu de forma estável durante os testes, sem perda significativa de dados.

5.2 Análise do Projeto Ideal

Embora o protótipo experimental tenha sido desenvolvido utilizando um sensor de vazão, o objetivo final deste trabalho consiste na aplicação da mesma arquitetura de monitoramento em sistemas de refrigeração por meio de um transdutor de pressão. A utilização do sensor de vazão permitiu realizar a validação, transmissão e supervisão dos dados utilizando componentes de controle e comunicação, como o ESP32, o protocolo MQTT e a plataforma *Node-RED*. Dessa forma, o protótipo desenvolvido não tem como finalidade reproduzir o sistema final, mas comprovar a viabilidade da arquitetura. No projeto ideal, o sensor de vazão seria substituído por um transdutor de pressão adequado para refrigeração, tendo como base a mesma lógica de processamento e monitoramento dos dados.

Considerando-se esse sistema, a aplicação do projeto ideal utilizando um transdutor de pressão pode ser explicada de maneira semelhante à do protótipo experimental. Nesse cenário, o sistema apresentará uma *dashboard* semelhante à utilizada nos testes realizados, porém destinada ao monitoramento da pressão do gás refrigerante.

Onde a ferramenta será conectada na válvula de serviço da unidade condensadora, para receber os dados de pressão do sistema, que serão lidos e interpretados pelo transdutor de

pressão, transformados em sinal de pulso elétrico e por último, sendo enviado para o monitoramento, dessa maneira apresentando os dados lidos no supervisório.

No sistema supervisório, a interpretação ocorrerá de forma equiparada ao sistema de vazão, onde a leitura será mostrada em tempo real, em unidade de pressão (*psi*).

Quando atuado em nível alto, será interpretado que o sistema está atuando com alta pressão, que pode ser causado devido a alguns problemas, como conexões “estranguladas” mostrado na Figura 20, ou quantidade superior de gás, recomendado pelo fabricante, esses problemas podem prejudicar a leitura do transdutor, além de todo o sistema pois ele trabalha “forçado”, diminuindo sua vida útil.

Figura 20 – Tubulação estrangulada.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A atuação ideal do sistema será quando for encontrado no nível médio, na leitura da pressão estará no nível conforme sugerido pelo fabricante, referente a quantidade de gás, pressão ideal, a distância correta de instalação do equipamento. Se a unidade evaporadora for instalada com uma distância de tubulação mais longa da unidade condensadora a leitura vai demorar mais para estar correta pois o sistema vai demorar mais para poder estabilizar os dados de lidos.

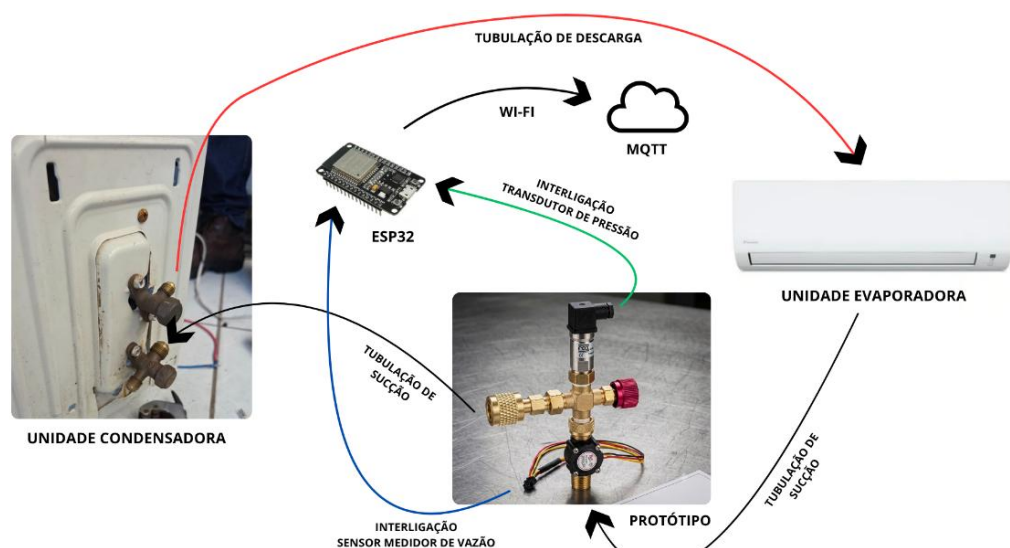
Por fim, analisando o nível baixo, é entendido que o sistema está atuando sobre baixa pressão, devido a alguns problemas como, escape de gás do sistema devido a dano causado a tubulação por onde circula o gás refrigerante, a maresia em equipamentos próximos a praia,

sofrendo ação de corrosão da tubulação, causando consequentemente o sucateamento da serpentina, gerando furos e causando a leitura de nível baixo do supervisor. Outrossim, a válvula de serviço possui um mecanismo muito frágil, que, caso seja manuseado de maneira inadequada pode causar o escape do gás sendo outro motivo causador de baixa de pressão de gás do sistema.

Assim, após a análise dos resultados obtidos no projeto real e sua comparação com a aplicação proposta para sistemas de refrigeração, verificou-se que a arquitetura de monitoramento desenvolvida se mostrou adequada para aquisição, transmissão e supervisão remota de variáveis de processo. Os testes realizados com o sensor de vazão permitiram validar o funcionamento da plataforma de controle e comunicação, demonstrando que a mesma estrutura pode ser aplicada ao monitoramento da pressão de sistemas de refrigeração mediante a substituição do sensor experimental por um transdutor de pressão apropriado. Dessa forma, o trabalho comprova a viabilidade técnica da solução proposta, tendo como diferencial o uso de tecnologias acessíveis para controle, comunicação e supervisão dos dados.

Na figura 21, mostra-se um esquema de interligação, onde observa-se o transdutor e o sensor de vazão e onde será instalado no equipamento.

Figura 21: esquema de interligação.



Fonte: Elaborado por autores (2026).

Assim, comprovando o funcionamento da arquitetura proposta. já na tabela da figura 22 foi proposto uma tabela comparativa de dados técnicos relacionados ao uso do sensor de vazão e o transdutor de pressão.

Figura 22: tabela comparativa de dados

Característica	Sensor de Vazão YF-S201	Transdutor de Pressão (0–6 bar / 4–20 mA)
Grandeza medida	Vazão de líquido	Pressão do fluido
Princípio de funcionamento	Turbina com sensor Hall	Sensor piezorresistivo/MEMS
Aplicação principal	Sistemas hidráulicos de água	Sistemas de refrigeração, hidráulicos e pneumáticos
Fluido recomendado	Água limpa	Gases e líquidos compatíveis
Faixa de medição	Aprox. 1 a 30 L/min	0 a 6 bar
Saída elétrica	Pulso digital (frequência)	Corrente analógica 4–20 mA
Tensão de alimentação	5 a 24 Vcc	8 a 30 Vcc (tipicamente 24 Vcc)
Corrente consumida	Até 15 mA	Loop de corrente 4–20 mA
Tipo de ligação elétrica	3 fios (VCC, GND e Sinal)	2 fios (loop de corrente)
Precisão típica	±10%	±0,25 a ±0,5% FS
Tempo de resposta	Baixo (alguns ms)	Menor que 5 ms
Resistência à vibração	Média	Alta
Proteção elétrica	Limitada	Maior imunidade a ruídos industriais
Material do corpo	Nylon e rotor plástico	Aço inoxidável 304 ou 316L
Temperatura de operação	Até aproximadamente 80 °C	Geralmente -40 °C a +85 °C
Compatibilidade com ESP32	Necessita de uso de resistor de 10 KΩ	Necessita uso de resistor de 250 Ω
Necessidade de calibração	Recomendada	Baixa; normalmente calibrado de fábrica
Custo aproximado	39,00	750,00
Vida útil	Média	Alta
Manutenção	Pode sofrer desgaste do rotor	Mínima

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em seguida, foi proposto uma tabela da figura 23, onde foi retirado das especificações técnicas do fabricante do equipamento (MIDEA, 2026). Seu principal objetivo de ser utilizado essa tabela das características do fabricante para calibragem e adequação do sensor para o sistema.

Figura 23: Tabela gerada pelo fabricante.

EQUIPAMENTO 9.000 BTU's (INVERTER)

Ponto de Operação	Amperagem (A)	Pressão de Sucção (PSI)	Vazão de Ar do Condensador (m³/h)	Condição de Operação do Compressor
Ponto 1 (Carga Mínima)	3,7	110	460	Baixa frequência (Modulação econômica)
Ponto 2	3,8	113	470	Modulação leve
Ponto 3	4	117	475	Regime intermediário
Ponto 4 (Nominal)	4,1	120	480	Regime nominal padrão (100%)
Ponto 5	4,3	123	485	Demanda térmica elevada
Ponto 6	4,4	127	490	Frequência alta
Ponto 7 (Carga Máxima)	4,5	130	500	Modo Turbo / Máximo rendimento

EQUIPAMENTO 12.000 BTU's (INVERTER)

Ponto de Operação	Amperagem (A)	Pressão de Sucção (PSI)	Vazão de Ar do Condensador (m³/h)	Condição de Operação do Compressor
Ponto 1 (Carga Mínima)	4,8	110	520	Baixa frequência (Modulação econômica)
Ponto 2	5,2	114	540	Modulação leve
Ponto 3	5,6	118	560	Regime intermediário
Ponto 4 (Nominal)	6	122	580	Regime nominal padrão (100%)
Ponto 5	6,4	126	600	Demanda térmica elevada
Ponto 6	6,8	130	620	Frequência alta
Ponto 7 (Carga Máxima)	7,2	135	650	Modo Turbo / Máximo rendimento

Fonte: Midea (2026).

Dessa forma, notando-se que o uso do sensor de vazão e o transdutor torna-se viável para a aplicação.

6 CONCLUSÃO

Com o objetivo de desenvolver um sistema de monitoramento remoto aplicado a equipamentos de ar-condicionado, este trabalho apresentou o projeto e a implementação de um protótipo utilizando automação e tecnologias IoT. A solução viabilizou a coleta, a transmissão e a visualização gráfica de variáveis de processo em tempo real, utilizando uma arquitetura acessível, robusta e replicável.

O sistema experimental foi constituído por um microcontrolador ESP32, sensor de vazão por contagem de pulsos e comunicação via protocolo *MQTT*, demonstrando funcionamento estável e consistente durante os experimentos. O emprego de rotinas de interrupção no ESP32 assegurou elevada precisão na contagem de pulsos e no cálculo da vazão em tempo real. A integração com o *broker MQTT* permitiu o envio contínuo dos dados via rede *Wi-Fi* para a plataforma *Node-RED*, na qual foi estruturado uma *dashboard* intuitiva composta por indicadores numéricos, gráficos de variação e histórico de medições. Essa interface provou ser eficiente para a supervisão do equipamento.

Um ponto relevante evidenciado nos testes foi a necessidade de aperfeiçoamento do sistema, a importância de comparação dos dados e amostragem pelo protótipo com as tabelas de dados técnicos fornecidas pelos fabricantes, que relaciona a variação da amperagem, a pressão de sucção e a vazão. Essa análise comparativa é fundamental para validação da precisão dos dados lidos, avaliar o correto rendimento do compressor inverter e identificar eventuais desvios operacionais em campo.

Dessa forma, conclui-se que o projeto atingiu os objetivos propostos, consolidando-se como uma solução tecnológica viável para auxiliar profissionais de manutenção e climatização no diagnóstico preventivo e na supervisão contínua. Para trabalhos futuros, recomenda-se a integração com sensores específicos de pressão de gás refrigerante, sensores de corrente elétrica e vazão para integração com banco de dados para análises preditivas de longo prazo e implementação de algoritmos de controle automático.

REFERÊNCIAS

- ACT BRASIL. **Transdutor de pressão TR49** – 0–600 bar (4–20 mA). 2024. Disponível em: <https://actbr.com.br/produto/transdutor-de-pressao-tr49-6-2-m3-0-600bar-4-20ma>. Acesso em: 21 nov. 2025.
- BEGA, Egídio A.; DELMÉE, Gérard J.; COHN, Pedro E. **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Ações para proteger a camada de ozônio**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/acoes-para-protetor-o-ozonio>. Acesso em: 09 out. 2025.
- BRASIL TEC. **Transdutor de pressão 0–6 bar saída 4–20 mA**. Disponível em: <https://brasiltec.ind.br/oferta/1379501/transdutor-de-pressao-06bar-saida-420ma> Acesso em: 11 mar. 2026.
- CUBIENERGIA. **Eficiência do ar-condicionado**: como funciona a refrigeração? 2023. Disponível em: <https://www.cubienergia.com/eficiencia-ar-condicionado>. Acesso em: 06 out. 2025.
- DANFOSS. **Refrigeração e ar-condicionado**: fundamentos, aplicações e fluidos refrigerantes. 2019. Disponível em: <https://www.danfoss.com/pt-br/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/main-applications-and-refrigerant-types/>. Acesso em: 30 out. 2025.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESPÍRITO SANTO – DER-ES. **Instalação do sistema de climatização**. 2025. Disponível em: https://der.es.gov.br/Media/der/Documentos/Tabela%20Referencial%20de%20Pre%C3%A7o/Referencial%20de%20Edifica%C3%A7%C3%B5es/CADERNO_ESPECIFICACOES/1610-INSTALA%C3%87%C3%83O%20DO%20SISTEMA%20DE%20CLIMATIZA%C3%87%C3%83O.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.
- ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Bourdon gauge**. 2024. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/Bourdon-gauge>. Acesso em: 05 out. 2025.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32**. 2016. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 14 nov. 2025.
- FOX, Robert; GUINNESS, Brian. **História da ciência**: da revolução científica à era moderna. Lisboa: Edições 70, 2006.
- FERREIRA, Thales Gonçalves. **Como configurar o WiFi no ESP32**. Crescer Engenharia, 27 set. 2023. Disponível em: <https://www.crescerengenharia.com/post/configurar-wifi-esp32>. Acesso em: 13 mar. 2026.
- GÁS SERVEI. **Dados técnicos – R-410A**. 2024a. Disponível em: <https://gas-servei.com/wp-content/uploads/2024/06/Dados-tecnicos-R-410A-Gas-Servei-1.pdf>. Acesso em: 04 out. 2025.
- GÁS SERVEI. **Dados técnicos – R-32**. 2024b. Disponível em: <https://gas-servei.com/wp-content/uploads/2024/06/Dados-tecnicos-R-32-Gas-Servei-1.pdf>.

content/uploads/2024/06/Dados-tecnicos-R-32-Gas-Servei-1.pdf. Acesso em: 19 out. 2025.

GREENYELLOW. **O futuro dos HCFCs e as novas alternativas para o gás R-22.** 2024. Disponível em: <https://greenyellow.com.br/o-futuro-dos-hcfc-e-as-novas-alternativas-para-o-gas-r-22-2/>. Acesso em: 22 out. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE. **Previsão do tempo e clima.** 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe>. Acesso em: 02 out. 2025.

KIGALI. **Emenda de Kigali.** 2016. Disponível em: <https://kigali.org.br/emenda-de-kigali/>. Acesso em: 15 out. 2025.

MERCADO LIVRE. **Placa ESP32 Wi-Fi + Bluetooth – 30 pinos.** 2024. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/placa-esp32-wifi-bluetooth-30-pinos/p/MLB44228504>. Acesso em: 03 nov. 2025.

MIDEA. **Midea Brasil.** Disponível em: <https://www.midea.com.br/>. Acesso em: 24 jul. 2026.

NASCIMENTO, João M. Araújo do; LUCENA, Pedro B. **Protocolo Modbus.** UFRN, 2003. Disponível em: https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho3/trabalho3_13.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

NODE-RED. **Node-RED documentation.** OpenJS Foundation, 2016. Disponível em: <https://nodered.org/docs>. Acesso em: 08 nov. 2025.

PRODUTTIVO. **O que é EPI?** 2023. Disponível em: <https://www.produttivo.com.br/blog/o-que-e-epi/>. Acesso em: 25 out. 2025.

SEIXAS, Constantino. **Protocolos orientados a caractere.** UFMG, Departamento de Engenharia Eletrônica, [2007].

SENDO SENSOR. **Transdutor de pressão 4–20 mA:** princípio de funcionamento, fio de teste e guia de solução de problemas. 2024. Disponível em: <https://sendo-sensor.com/pt/blog/transdutor-de-pressao-4-20-ma-principio-de-funcionamento-fio-de-teste-e-guia-de-solucao-de-problemas/>. Acesso em: 16 nov. 2025.

STALLINGS, William. **Redes e sistemas de comunicação de dados.** São Paulo: Pearson, 2015.

THOMAS, George. **Introduction to the modbus protocol.** 2008. Disponível em: <https://www.ccontrols.com/pdf/Extv9n4.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2025.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Restrito

Entrega de TCC

Assunto:	Entrega de TCC
Assinado por:	Carlos Augusto
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Carlos Augusto Leal Memoria, ALUNO (201922240012) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 28/07/2026 13:01:22.

Este documento foi armazenado no SUAP em 28/07/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1928029
Código de Autenticação: 2501b46f15

