



Automação de máquinas industriais com ESP 32: um estudo sobre comunicação UART, WI-FI e BLUETOOTH

Dalton Ortmayer Duarte¹

Maíra Gonçalves Carminatti²

Marcos Welliton Daros Felipe³

Everlise Maestrelli⁴

Marcos Antonio Jeremias Coelho⁵

Resumo: Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do microcontrolador ESP32 para aplicações de comunicação em automação industrial, analisando o desempenho de suas interfaces UART, Wi-Fi e Bluetooth em termos de perda de pacotes e integridade dos dados, com uma comparação pontual da UART com o STM32F412VGT6. A metodologia envolveu testes controlados, realizados por 72 horas para cada interface, transmitindo pacotes de 108 bytes a cada minuto e registrando as taxas de perda e erros de CRC. Os resultados indicaram alta confiabilidade da comunicação UART no ESP32 (0,069 % de perda), com desempenho comparável ao STM32 (0 %), validando seu uso em comunicação serial industrial. A interface Bluetooth do ESP32 apresentou bom desempenho para comunicação sem fio de curto alcance (0,20 % de perda), enquanto a interface Wi-Fi (0,16 %) demonstrou potencial para integração com redes IP e sistemas IIoT. Conclui-se que o ESP32 é uma plataforma versátil e de baixo custo, com capacidades de comunicações robustas (cabeadas e sem fio), adequadas para diversas aplicações na automação industrial moderna, desde que a interface seja selecionada criteriosamente e mecanismos de robustez sejam implementados, especialmente para comunicação sem fio.

Palavras-chave: ESP32. STM32. Comunicação, UART, Wi-fi, Bluetooth.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a digitalização e a automação industrial vêm se intensificando com o avanço da Indústria 4.0, que promove a integração entre máquinas, sistemas e dados em tempo real (EMBARCADOS, 2022). Estudos recentes sobre computação de borda no ambiente industrial apontam que conceitos como

¹ Graduando em Engenharia Mecatrônica. E-mail: daltonduarte-123@outlook.com

² Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: maira.carminatti@satc.edu.br

³ Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: marcos.welliton@satc.edu.br

⁴ Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: everlise.maestrelli@satc.edu.br

⁵ Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: marcos.coelho@satc.edu.br



fábrica inteligente e manufatura conectada impulsionam a busca por soluções tecnológicas capazes de oferecer conectividade, processamento eficiente e integração entre equipamentos. Nesse contexto, torna-se indispensável que os dispositivos responsáveis por intermediar essa comunicação sejam não apenas funcionais, mas também acessíveis, confiáveis e compatíveis com as exigências do ambiente industrial.

Porém, muitas máquinas ainda em uso foram projetadas sem conectividade com redes modernas ou capacidade de armazenamento digital, exigindo soluções de adaptação que funcionem como ponte entre sistemas legados e a infraestrutura digital atual. Palmiere (2016) destaca que, o mercado tradicionalmente recorre a Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e microcontroladores baseados em arquiteturas *Advanced RISC Machines* (ARM) devido à robustez, confiabilidade e desempenho que esses dispositivos oferecem em ambientes industriais. Mesmo assim, grande parte desses equipamentos não possui integração com a internet, limitando-se à comunicação local por interfaces seriais ou protocolos proprietários.

Quando existe conexão com redes externas, geralmente ocorre via Ethernet, o que implica cabeamento estruturado, maiores cuidados com proteção contra interferências eletromagnéticas e resistência a condições adversas de fábrica. Ademais, é incomum encontrar CLPs ou microcontroladores industriais com suporte nativo a redes Wi-Fi, restringindo a flexibilidade em cenários que exigem mobilidade, instalação rápida ou reconfiguração frequente, como linhas de produção temporárias ou áreas de difícil acesso.

Diante desse cenário, o microcontrolador ESP32 tem ganhado destaque por aliar baixo custo a um conjunto robusto de funcionalidades. Ele integra Wi-Fi 802.11 b/g/n (até 150 Mbps) e Bluetooth 4.2 BLE, além de suportar interfaces como UART, SPI e I²C, contando com um processador dual-core de 32 bits operando a até 240 MHz e oferecendo suporte a sistemas de arquivos e armazenamento interno. Produtos adaptados para uso industrial, como o EQSP32 e o NORVI IIOT, demonstram que o ESP32 pode atender a requisitos de robustez e confiabilidade em ambientes adversos, surgindo como alternativa viável às soluções tradicionais e de



fácil acesso. Ainda assim, permanecem dúvidas sobre a real capacidade do ESP32 de substituir ou complementar as plataformas consolidadas no setor industrial.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre o ESP32 e outras plataformas amplamente utilizadas na automação industrial, como microcontroladores ARM e CLPs, por meio de testes simulados de comunicação de dados via UART, Wi-Fi e Bluetooth. Serão utilizadas métricas como perda de pacotes e integridade dos dados para avaliar o desempenho de cada interface. Ao final, espera-se determinar se o ESP32 é capaz de atender aos requisitos das aplicações industriais modernas, com desempenho equivalente ou superior às soluções tradicionais, além de identificar contextos em que o uso do ESP32 se mostra mais vantajoso para projetos de automação, monitoramento e modernização de máquinas industriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crescente demanda por soluções de automação industrial, especialmente nos setores metalúrgico e avícola, mais flexíveis e integradas, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias baseadas em microcontroladores de baixo custo e elevado desempenho.

Nesse contexto, o ESP32 destaca-se como uma alternativa tecnicamente viável para aplicações industriais, por apresentar um equilíbrio favorável entre custo, desempenho e recursos de conectividade (Souza, 2019). De acordo com EMBARCADOS (2024), o recente lançamento de um controlador IoT industrial baseado no ESP32-S3 representa um avanço significativo na adequação deste microcontrolador a ambientes industriais, ao combinar robustez mecânica, interfaces industriais padronizadas e funcionalidades avançadas de conectividade.

A arquitetura dual-core do ESP32, operando a frequências de até 240 MHz, proporciona capacidade de processamento suficiente para a maioria das aplicações industriais, possibilitando a segmentação eficiente de funções críticas, tais como o controle de entradas e saídas e o gerenciamento de comunicações (Wilcher, 2024). Tal característica é especialmente relevante em sistemas que requerem determinismo temporal rigoroso nas operações de controle, simultaneamente à



execução de tarefas assíncronas, como a comunicação com dispositivos periféricos ou sistemas supervisórios.

Estudos recentes atestam a viabilidade do emprego do ESP32 em aplicações industriais reais. Conforme relatado por Vácha (2020), sistemas de monitoramento industriais baseadas nesse microcontrolador podem alcançar desempenho equivalente ao de soluções tradicionais, com custos substancialmente reduzidos, sobretudo em aplicações voltadas à aquisição de dados, monitoramento remoto e controle básico de processos. Nessa investigação, os autores implementaram um sistema completo de monitoramento industrial utilizando o ESP32 como gateway, demonstrando sua eficácia operacional em ambientes industriais.

A incorporação do ESP32 em invólucros compatíveis com normas industriais, como trilhos DIN, tem favorecido sua adoção no setor. O NORVI IIOT, desenvolvido pela empresa Norvi, exemplifica tal tendência, ao disponibilizar um controlador industrial baseado no módulo ESP32-WROOM-32, equipado com entradas e saídas digitais e analógicas, comunicação via RS-485 e alimentação de 24 Vcc, características indispensáveis para aplicações industriais (Souza, 2019). Essa abordagem viabiliza que empresas de menor porte implementem soluções de automação e IoT industrial, mitigando os elevados investimentos tradicionalmente associados à aquisição de equipamentos industriais especializados.

Adicionalmente, a capacidade do ESP32 de operar em faixas de temperatura típicas de ambientes industriais (-40 °C a +85 °C) constitui um fator determinante para sua aplicabilidade em condições adversas. Conforme indicado por MANICA DHW (2018), essa característica, aliada ao seu baixo consumo energético, até 2 mA no modo econômico e apenas 5 µA no modo deep sleep, permite sua utilização em aplicações industriais que demandam operação contínua sob condições ambientais severas ou alimentação autônoma, por meio de baterias, em locais de difícil acesso.

2.1. COMPARAÇÃO COM OUTRAS PLATAFORMAS

A Tabela 1 apresenta um comparativo técnico entre as duas plataformas mais utilizadas atualmente na indústria e o ESP32.



2.2. COMUNICAÇÃO DE DADOS EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

A capacidade de comunicação constitui um aspecto fundamental para quaisquer dispositivos empregados em ambientes industriais. Nesse sentido, o ESP32 destaca-se ao oferecer uma ampla gama de interfaces de comunicação, incluindo Wi-Fi 802.11 b/g/n (com taxas de até 150 Mbps), Bluetooth 4.2 BLE, múltiplas interfaces seriais (UART), bem como protocolos síncronos como SPI e I²C, além de suporte nativo a protocolos industriais como CAN 2.0 e Ethernet (MACNICA DHW, 2018). Esta versatilidade possibilita que o ESP32 se integre de forma eficiente a diversos sistemas legados e equipamentos industriais já instalados.

Tabela 1: Comparação entre ESP32 x STM32 x CLP

Característica	ESP32	STM32	CLP
Processador	Dual-core Xtensa® 32-bit LX6, 80-240 MHz, até 600 DMIPS	ARM® 32-bit Cortex®-M3/M4/M7, 72-480 MHz, até 150 DMIPS	Microprocessadores industriais dedicados, 20 MHz a 1 GHz, processamento determinístico
Memória	ROM para boot, SRAM para dados (até 520 KB), Flash externa até 16 MB	Flash interna até 1 MB, SRAM até 128 KB, suporte para memórias externas	Memória não-volátil (8 KB a vários MB), RAM (1 KB a vários MB), memória retentiva para dados críticos
Conectividade sem fio	Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz), Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE integrados	Sem Wi-Fi ou Bluetooth integrados (requer módulos externos)	Sem Wi-Fi ou Bluetooth integrados (requer módulos externos)
Conectividade com fio	UART, SPI, I2C, I2S, SDIO, ETH	UART, SPI, I2C, I2S, SDIO, Ethernet 10/100, USB, CAN	Ethernet industrial (PROFINET, EtherNet/IP), PROFIBUS, Modbus, DeviceNet, RS-232/RS-485
Entradas/Saídas	GPIOs programáveis, ADC, DAC, PWM, sensores capacitivos	Até 140 GPIOs, ADCs de 12 bits, DACs, timers avançados	6-1000+ entradas digitais, 4-1000+ saídas digitais, 0-200+ entradas analógicas, 0-100+ saídas analógicas
Robustez Industrial	-40°C a +85°C, sem proteção específica contra interferências	-40°C a +85°C, proteção contra interferências, sem certificações industriais específicas	-20°C a +60°C, proteção IP20-IP67, resistência a vibrações, certificações para ambientes perigosos
Consumo de	Modo ativo: ~80 mA,	Modos de baixo	10W a 100W, alimentação



Energia	Modo economia: ~2 mA, Deep sleep: 5 μ A	consumo variados, consumo típico: 10-100 mA	industrial (24V DC, 120/230V AC)
Custo	\$3-10 USD	\$5-15 USD	\$300-5000 USD

Fonte: ESPRESSIF SYSTEMS (2020), STMICROELECTRONICS (2020), SIEMENS (2025), ROCKWELL AUTOMATION (2025), UNIVERSAL ROBOTS BRASIL (2025).

A implementação de protocolos de comunicação industrial no ESP32 tem sido objeto de numerosos estudos e desenvolvimentos. A Espressif Systems, fabricante do referido microcontrolador, disponibiliza bibliotecas oficiais para a implementação do protocolo Modbus, amplamente difundido em ambientes industriais. Conforme documentação da própria Espressif (2023), o ESP32 suporta as variantes Modbus RTU (comunicação serial) e Modbus TCP/IP (comunicação via Ethernet), o que viabiliza sua interoperabilidade com uma extensa gama de dispositivos e sistemas industriais que adotam este padrão.

Adicionalmente, o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) tem ganhado expressiva relevância em aplicações industriais, especialmente no âmbito da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas Industrial (IIoT). Khan (2022) apresenta a implementação prática da comunicação via MQTT no ESP32, ressaltando sua eficiência quanto ao consumo de largura de banda e de recursos computacionais, aspectos críticos para dispositivos embarcados com restrições de processamento e energia, operando em redes industriais. O autor também enfatiza questões relacionadas à segurança e à confiabilidade, elementos indispensáveis em sistemas industriais.

A segurança na comunicação é, indubitavelmente, um aspecto crítico em aplicações industriais. O ESP32 disponibiliza suporte a aceleração por hardware para diversos algoritmos criptográficos, tais como AES, SHA, RSA e ECC, permitindo a implementação eficiente de canais de comunicação seguros (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022). Este recurso é particularmente relevante no contexto da Indústria 4.0, na qual a proteção de dados industriais sensíveis contra acessos não autorizados e ataques cibernéticos assume importância estratégica.

Apesar dos mecanismos de segurança incorporados, o ESP32 não está isento de vulnerabilidades. Em março de 2025, a equipe de pesquisa da Tarlogic identificou a presença de comandos Bluetooth HCI não documentados no ESP32,



inicialmente classificados, de forma equivocada, como uma "porta dos fundos" (ESPRESSIF SYSTEMS, 2025). Conforme esclarecido pela própria Espressif, tais comandos são inerentes ao processo de depuração e foram introduzidos para fins de teste durante o desenvolvimento, não configurando uma vulnerabilidade remotamente explorável.

Em cenários específicos, nos quais o ESP32 é empregado como coprocessador de comunicação via UART-HCI, esses comandos poderiam, potencialmente, permitir que um agente com acesso ao sistema host influenciasse o comportamento do microcontrolador. Em resposta a essa identificação, a Espressif comprometeu-se a disponibilizar uma atualização corretiva de firmware, além de documentar integralmente todos os comandos HCI específicos, reforçando, assim, a importância da manutenção regular e da atualização de firmware em aplicações industriais críticas.

2.3. ESP32 NA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 configura-se como uma transformação paradigmática nos processos industriais, caracterizada pela convergência entre tecnologias digitais, conectividade ubíqua e análise de dados em tempo real. Conforme salientado por Embarcados (2022), essa transição impõe a necessidade de implementação de soluções de computação em borda (do inglês *Edge Computing*) nos ambientes industriais, onde sistemas cada vez mais sofisticados são implementados diretamente no chão de fábrica para viabilizar comunicações em tempo real entre si e com sistemas remotos baseados em arquiteturas de computação em nuvem.

Nesse contexto, a utilização de gateways industriais baseados no microcontrolador ESP32 tem sido objeto de inúmeras investigações acadêmicas e aplicações práticas. Chen et al. (2023) apresentam o projeto de um gateway IoT industrial sem fio fundamentado no ESP32, evidenciando sua capacidade de integrar dispositivos legados a infraestruturas modernas de IIoT. Os autores demonstram como o ESP32 pode desempenhar a função de ponte entre protocolos industriais tradicionais e protocolos contemporâneos baseados em IP, facilitando, assim, uma



transição gradual e economicamente viável rumo à plena adoção dos preceitos da Indústria 4.0.

O monitoramento ambiental em instalações fabris configura-se como outra aplicação de destaque para o ESP32 no contexto da Indústria 4.0. Song et al. (2024) descrevem o desenvolvimento de um sistema eficiente de monitoramento ambiental industrial, baseado no ESP32-S3, projetado especificamente para a aquisição de dados relativos ao ambiente de produção. O sistema implementado utiliza uma rede de sensores para monitorar parâmetros críticos, tais como temperatura, umidade, qualidade do ar e níveis de pressão sonora, proporcionando dados em tempo real que podem ser empregados para otimizar as condições de trabalho, assegurar a conformidade com regulamentações ambientais e incrementar a eficiência energética das operações industriais.

2.4. DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Apesar do seu expressivo potencial para aplicações industriais, o ESP32 apresenta limitações intrínsecas que devem ser cuidadosamente consideradas durante o processo de especificação e projeto de sistemas. Conforme apontado por Ariat-Tech (2024), uma das principais restrições do ESP32 reside no número relativamente reduzido de pinos de entrada/saída (E/S), totalizando 36, o que representa uma limitação frente a microcontroladores industriais mais robustos, como a família STM32, que oferece um conjunto significativamente mais amplo de interfaces físicas. Embora esta restrição possa ser mitigada por meio do emprego de expansores de E/S, como dispositivos baseados nos circuitos integrados MCP23017 ou PCF8574, tal abordagem implica incremento na complexidade arquitetural, bem como na introdução de potenciais pontos de falha adicionais, o que pode comprometer a robustez e a confiabilidade do sistema em aplicações críticas.

A segurança cibernética constitui outro aspecto de elevada relevância na utilização do ESP32 em ambientes industriais. Pesquisadores da Universidade de Tecnologia de Delft identificaram vulnerabilidades potenciais associadas a implementações típicas do ESP32 em sistemas IoT, ressaltando a imprescindibilidade da adoção de práticas rigorosas de segurança cibernética, tais como a realização sis-



temática de atualizações de firmware, a utilização de mecanismos robustos de autenticação e a implementação de criptografia de ponta-a-ponta nas comunicações (Van Der Linden, 2022). Essas medidas são particularmente críticas no contexto industrial, em que a ocorrência de incidentes de segurança pode resultar não apenas em prejuízos financeiros, mas também em riscos operacionais e à integridade física de operadores e equipamentos.

Adicionalmente, a dependência de bibliotecas e frameworks de terceiros para a implementação de funcionalidades avançadas no ESP32 representa um vetor de risco em sistemas industriais de missão crítica. Conforme enfatizado por Vácha (2020), muitas das bibliotecas amplamente utilizadas na comunidade de desenvolvedores do ESP32 não são submetidas a processos formais de verificação e validação, estando, portanto, suscetíveis à presença de erros lógicos e vulnerabilidades que podem comprometer a segurança funcional e a disponibilidade do sistema. Dessa forma, recomenda-se, para aplicações industriais sensíveis, a adoção preferencial de bibliotecas oficiais mantidas pela Espressif Systems, ou, alternativamente, o desenvolvimento de código proprietário, sob rigorosos processos de revisão e validação.

A programação e configuração do ESP32 para aplicações industriais demandam um conjunto de competências técnicas específicas, que, frequentemente, não estão plenamente disponíveis em equipes de manutenção industrial tradicionalmente treinadas para operar com Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Conforme observa Palmiere (2016), enquanto os CLPs são geralmente programados por meio de linguagens padronizadas, como *Ladder Diagram* (LD) e *Structured Text* (ST), amplamente difundidas entre técnicos de automação industrial, o desenvolvimento para o ESP32 requer conhecimentos aprofundados de linguagens de programação de propósito geral, notadamente C e C++, bem como de eletrônica digital. Esta barreira cognitiva pode constituir um obstáculo significativo à adoção generalizada do ESP32 em ambientes industriais tradicionais, especialmente em setores nos quais a qualificação técnica das equipes é voltada majoritariamente para sistemas de automação convencionais.



2.5. CASOS DE USO E APLICAÇÕES PRÁTICAS

A versatilidade arquitetural e funcional do ESP32 tem viabilizado sua aplicação em uma ampla gama de cenários industriais, destacando-se especialmente em soluções de automação e monitoramento de processos de baixo custo. Um exemplo notável é descrito por Swati (2019), que apresenta o desenvolvimento de um sistema completo baseado no ESP32 para o monitoramento contínuo de parâmetros críticos em uma planta industrial de pequeno porte, abrangendo variáveis como temperatura, pressão, vibração e consumo energético.

O sistema é capaz de transmitir dados em tempo real para um servidor local, além de emitir alertas automatizados via SMS e e-mail em situações de anomalia, demonstrando, assim, a viabilidade do ESP32 como plataforma para aplicações industriais de monitoramento remoto, com custos significativamente inferiores aos de sistemas tradicionais.

Outra aplicação relevante refere-se ao controle de acesso em ambientes industriais, no qual o ESP32 tem sido empregado como núcleo de soluções inteligentes de segurança. Pesquisadores da Universidade Estadual de Campinas (Lima, 2021) desenvolveram um sistema de controle de acesso baseado no ESP32, integrando a funcionalidade de reconhecimento facial. A arquitetura proposta oferece uma solução de segurança avançada a um custo substancialmente inferior ao de sistemas comerciais equivalentes. O sistema utiliza o módulo ESP32-CAM para a captura e o processamento local de imagens, realizando a autenticação biométrica dos usuários e armazenando os registros de acesso em um banco de dados centralizado, demonstrando a aptidão do ESP32 para aplicações que requerem processamento embarcado de sinais e dados.

No âmbito da manutenção preditiva, elemento central nas estratégias associadas à Indústria 4.0, o ESP32 também encontra aplicações de destaque. Neumann (2023) propõe um sistema de monitoramento de vibração com base no ESP32, destinado à detecção precoce de falhas em motores elétricos industriais. A solução desenvolvida integra sensores acelerométricos para a coleta contínua de dados, realiza processamento local por meio de análise espectral e identifica padrões de vibração anômalos indicativos de potenciais falhas mecânicas iminentes.



Este tipo de sistema possibilita a implementação de estratégias de manutenção preditiva, que visam a intervenção programada antes da ocorrência de falhas catastróficas, promovendo, assim, a otimização da disponibilidade operacional e a redução de custos de manutenção.

Embora sua aplicação em sistemas de automação residencial e predial não se configure estritamente como um uso industrial, ela evidencia a flexibilidade e a robustez do ESP32 em aplicações de controle. De acordo com Uebel (2021), o ESP32 pode ser empregado profissionalmente em projetos de automação, desde que observadas rigorosas boas práticas de engenharia, como a implementação de redundância em sistemas críticos, a adoção de proteções elétricas adequadas e a realização de testes exaustivos. Tais práticas, quando aplicadas de forma sistemática, asseguram a confiabilidade e a segurança das soluções, e podem ser estendidas para o uso do ESP32 em ambientes industriais de menor criticidade, ampliando o espectro de aplicações possíveis para este microcontrolador.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi delineado com o objetivo de submeter os microcontroladores ESP32 e STM32F412VGT6 a uma série de testes de comunicação, abrangendo três métodos distintos: comunicação serial via UART, comunicação sem fio por meio de rede Wi-Fi e comunicação sem fio via protocolo Bluetooth. A finalidade principal destes ensaios consiste na realização de uma análise comparativa quanto à taxa de perda de pacotes e à integridade dos dados transmitidos em cada um dos protocolos, bem como para cada um dos microcontroladores, conforme aplicável.

Para cada modalidade de comunicação, foram estabelecidos protocolos experimentais específicos, contemplando a configuração dos dispositivos, os parâmetros operacionais e a natureza dos dados a serem transmitidos. Os testes foram conduzidos no domicílio do autor, um ambiente relativamente controlado, mas existiram possíveis fontes de interferência, principalmente no teste do wi-fi, pois usando o modem da casa, onde ele é usado por até 6 dispositivos simultaneamente, podendo gerar concorrência no modem e até ruídos. A escolha dos métodos de

comunicação e das condições de teste visou abranger um espectro representativo de cenários típicos em aplicações industriais, assegurando, assim, a relevância e a aplicabilidade dos dados obtidos.

As Figuras 1 e 2 apresentam os dispositivos ESP32 e STM32F412VGT6, respectivamente, utilizados durante a execução dos testes.

Figura 1: Microcontrolador ESP32



Fonte: Do Autor (2025)

Figura 2: Microcontrolador STM32F412VGT6 (Destaque)



Fonte: E.A.P (2023)

3.1 PROCEDIMENTOS DE TESTE

Com o intuito de avaliar o desempenho dos microcontroladores ESP32 e STM32F412VGT6, foram realizados testes específicos para cada protocolo de comunicação: UART, Wi-Fi e Bluetooth. Cada ensaio seguiu um procedimento padro-



nizado, com o objetivo de assegurar a comparabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Em todas as modalidades de comunicação (UART, Wi-Fi e Bluetooth), a unidade fundamental de dados transmitida entre os dispositivos consistiu em um pacote binário estruturado. A definição desta estrutura visou simular uma carga de dados representativa de aplicações reais de monitoramento e controle, incorporando tanto informações textuais quanto leituras de sensores e estados digitais.

A especificação da estrutura de dados, descrita na linguagem de programação C, encontra-se apresentada no Quadro 1.

O tamanho total de cada pacote de dados corresponde a 106 bytes, conforme descrito: 50 bytes para nomeReceita, 50 bytes para usuario, 1 byte para saida1, 1 byte para saida2, 2 bytes para sensor1 e 2 bytes para sensor2, totalizando 106 bytes. Acrescenta-se, ainda, o campo de Verificação de Redundância Cíclica (CRC-16) de 2 bytes, resultando em um total de 108 bytes transmitidos, caso o cálculo do CRC considere os 106 bytes iniciais.

Quadro 1: Estrutura usada na comunicação

```
typedef struct
{
    char nomeReceita[50];
    char usuario[50];
    uint8_t saida1;
    uint8_t saida2;
    uint16_t sensor1;
    uint16_t sensor2;
    uint16_t wCRC;
} tSend;
typedef union
{
    tSend Send;
    uint8_t bufSend[sizeof(tSend)];
} uSend;
```

Fonte: Do Autor (2025)

A composição detalhada do pacote de dados é a seguinte:

- a) **nomeReceita (50 bytes):** campo de texto destinado ao armazenamento do nome de uma receita ou identificador de processo. Durante os testes, foi preenchido com uma cadeia alfanumérica fixa.
- b) **usuario (50 bytes):** campo de texto para identificação do operador. Assim como o campo anterior, foi preenchido com uma *string* fixa.



- c) **saida1 (1 byte)**: representa o estado lógico de uma saída digital (por exemplo, ligada/desligada, 0 ou 1).
- d) **saida2 (1 byte)**: representa o estado lógico de uma segunda saída digital.
- e) **sensor1 (2 bytes)**: armazena a leitura de um sensor analógico, codificada como valor inteiro de 16 bits sem sinal.
- f) **sensor2 (2 bytes)**: armazena a leitura de um segundo sensor analógico, também como valor inteiro de 16 bits sem sinal.
- g) **wCRC (2 bytes)**: contém o código de Verificação de Redundância Cíclica (CRC-16), calculado sobre os campos anteriores do pacote (nomeReceita até sensor2). Este campo é fundamental para assegurar a integridade dos dados recebidos.

Para cada pacote transmitido, o valor do CRC-16 foi computado como a soma de todos os bytes do *buffer* bufSend. No receptor, o mesmo cálculo foi executado sobre os dados recebidos (excluindo o campo wCRC), e o resultado foi comparado com o valor do wCRC transmitido. Divergências entre os valores indicaram a ocorrência de corrupção dos dados durante a transmissão.

3.2 TESTES DE COMUNICAÇÃO UART

Os testes de comunicação serial UART foram projetados para avaliar a estabilidade e a confiabilidade da transmissão de dados em curtas distâncias, um cenário recorrente em sistemas embarcados, especialmente quando microcontroladores interagem com periféricos ou outros processadores próximos.

Foram implementados dois arranjos experimentais distintos:

- a) **ESP32**: um microcontrolador ESP32 (modelo ESP32-WROOM) conectado a uma placa Arduino UNO, estabelecendo comunicação via interface UART.
- b) **STM32**: um microcontrolador STM32F412VGT6, montado sobre uma placa de desenvolvimento proprietária, conectado a um ESP32 também através de interface UART.

A taxa de transmissão foi configurada em 115.200 bps, valor usualmente adotado por proporcionar adequado equilíbrio entre desempenho e estabilidade.

Na Figura 3 é apresentado o fluxo do processo de teste para o microcontrolador ESP32 e na Figura 4 para o Microcontrolador STM32F412VGT6.

Figura 3: Fluxograma do processo de teste do ESP32 via UART.



Fonte: Do autor (2025)

Figura 4: Fluxograma do processo de teste do STM32F412VGT6 via UART.



Fonte: Do autor (2025)



Em ambos os cenários experimentais, os microcontroladores ESP32 e STM32F412VGT6 atuaram como transmissores de dados, realizando o envio de um pacote estruturado a cada intervalo de 1 minuto. As transmissões ocorreram conforme segue:

- a) O ESP32 enviou dados para a placa Arduino UNO.
- b) O STM32F412VGT6 enviou dados para o ESP32.

Após a recepção do pacote, o dispositivo receptor procedia à retransmissão de uma mensagem ao computador, indicando o êxito ou a falha na recepção dos dados, por meio de sua interface serial USB ou, alternativamente, via conexão Wi-Fi. Essa retransmissão teve como objetivo preservar a integridade e a totalidade das informações recebidas pelo dispositivo receptor, assegurando a confiabilidade da avaliação.

No computador, foi implementado um script em linguagem Python, responsável pelo monitoramento contínuo da porta serial ou da interface de rede Wi-Fi. Este script realizava a leitura das mensagens retransmitidas, registrava automaticamente o *timestamp* de cada evento e armazenava os dados em arquivos estruturados, destinados à análise estatística posterior.

Cada protocolo de comunicação foi submetido a ensaios contínuos, com uma periodicidade de envio de pacotes a cada 1 minuto, durante um período total de 72 horas (equivalente a 3 dias), de modo a garantir a obtenção de uma amostra estatisticamente significativa para a análise comparativa de desempenho.

3.3 TESTES DE COMUNICAÇÃO WI-FI

Os testes de comunicação via Wi-Fi foram elaborados para avaliar a performance do ESP32 em uma rede sem fio. Este cenário é representativo de muitas aplicações IoT/industriais onde o ESP32 pode ser empregado para transmitir dados de sensores ou receber comandos de um servidor central.

- a) Dispositivos: microcontrolador ESP32 e computador com dispositivo Wi-Fi (modem).
- b) Conexão: a comunicação foi estabelecida via Bluetooth, com o ESP32 configurado como transmissor e o computador como receptor. A distância física entre os

dispositivos foi mantida em aproximadamente 3 metros, também em ambiente interno.

Na Figura 5 é apresentado o fluxo do processo de teste de Wi-Fi para o microcontrolador ESP32.

Figura 5: Fluxograma do processo de teste do ESP32 via Wi-Fi



Fonte: Do autor (2025)

O servidor Python, rodando no PC, foi programado para escutar conexões TCP na porta designada, receber os pacotes de dados enviados pelo ESP32, registrar o *timestamp* exato do recebimento de cada pacote e armazenar os dados recebidos em um arquivo para futuras análises.

O teste de comunicação Wi-Fi foi conduzido de forma contínua, com envios de 1 em 1 minuto, por um período de 72 horas (3 dias).

3.4 TESTES DE COMUNICAÇÃO BLUETOOTH

Os testes de comunicação via Bluetooth foram realizados para avaliar a performance do ESP32 utilizando Bluetooth Clássico, tecnologia amplamente utilizada para comunicação sem fio de curta distância entre dispositivos.

a) Dispositivos: Um microcontrolador ESP32 e um computador com adaptador Bluetooth.

b) Conexão: A comunicação foi estabelecida via Bluetooth. O ESP32 foi configurado para atuar como um dispositivo de envio e o PC como receptor. A distância física entre o ESP32 e o PC foi mantida em aproximadamente 3 metros, em um ambiente interno.

Na Figura 6 é apresentado o fluxo do processo de teste de Bluetooth para o microcontrolador ESP32.

Figura 6: Fluxograma do processo de teste do ESP32 via Bluetooth.



Fonte: Do autor (2025)

No computador, um script em Python foi desenvolvido para ler os pacotes de dados recebidos via Bluetooth, registrar o *timestamp* correspondente e armazenar os dados em arquivo, para posterior análise.

O teste de comunicação Bluetooth foi igualmente conduzido de forma contínua, com envios a cada 1 minuto, ao longo de um período de 72 horas (3 dias).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos descritos no Capítulo 3 e os dados comparativos do Capítulo 2, que avaliaram o desempenho de comunicação dos microcontroladores ESP32 e STM32F412VGT6 sob diferentes protocolos de comunicação, bem como suas características técnicas. Os dados coletados durante os testes, realizados continuamente por 72 horas em cada



configuração (UART, Wi-Fi e Bluetooth), foram analisados e discutidos, com ênfase nas métricas de taxa de perda de pacotes e integridade dos dados transmitidos.

A análise dos resultados busca fornecer subsídios técnicos para a avaliação da viabilidade do ESP32 como alternativa para aplicações de automação industrial, especialmente em cenários que exigem comunicação confiável entre dispositivos. Os dados apresentados a seguir representam o comportamento observado dos dispositivos nas condições controladas estabelecidas no procedimento experimental.

4.1 MÉTRICAS AVALIADAS

As métricas avaliadas neste estudo serão a perda de pacotes e a integridade dos dados.

Perda de pacotes: Considerando que a comunicação ocorre a cada 1 minuto durante um período de 72 horas, o total esperado de transmissões é de 4.320. O dispositivo receptor não permanece aguardando ativamente por cada transmissão; em vez disso, ao receber um pacote, realiza a validação do código de redundância cíclica (CRC) e contabiliza a transmissão como recebida. Ao final do período de testes, o número de transmissões recebidas é comparado ao valor esperado. Caso a quantidade recebida seja inferior a 4.320, caracteriza-se a ocorrência de perda de pacotes.

Integridade dos dados: A integridade é verificada por meio do campo CRC presente na estrutura de dados. Antes da transmissão, esse campo é calculado como a somatória de todos os bytes do *buffer* `bufSend`. Ao receber os dados, o dispositivo receptor realiza a mesma operação sobre os bytes recebidos e compara o resultado com o valor do CRC informado. Se os valores forem iguais, considera-se que os dados não sofreram alterações durante a transmissão; caso contrário, entende-se que houve corrupção dos dados.



4.2 COMUNICAÇÃO UART

Durante o período de 72 horas de teste contínuo, com o envio de pacotes de 108 bytes a cada minuto, foram transmitidos, ao todo, 4.320 pacotes para cada microcontrolador. A Tabela 2 apresenta os resultados quantitativos obtidos para a comunicação UART de ambos os dispositivos testados.

Tabela 2: Resultados quantitativos dos testes de comunicação UART.

Controlador	ESP32	STM32F412VGT6
Total de pacotes	4.320	4.320
Pacotes recebidos com sucesso	4.317	4.320
Pacotes perdidos	3	0
Pacotes corrompidos (CRC inválido)	0	0
Taxa de perda de pacotes	0,069	0

Fonte: Do autor (2025)

Como pode ser observado na Tabela 3, ambos os microcontroladores demonstraram excelente desempenho na comunicação UART, com perdas de pacotes praticamente inexistentes. O ESP32 apresentou uma taxa mínima de perda de pacotes, correspondente a 0,069 %, enquanto o STM32F412VGT6 não apresentou qualquer ocorrência de perda.

Os resultados obtidos nos testes de comunicação UART indicam que tanto o ESP32 quanto o STM32F412VGT6 são altamente confiáveis para comunicação serial de curta distância, apresentando taxas de perda inferiores a 0,1 % no caso do ESP32 e nula no STM32F412VGT6. Esta confiabilidade é um aspecto crucial para aplicações industriais que dependem de comunicação determinística entre dispositivos.

A ligeira vantagem observada no desempenho do STM32F412VGT6 pode ser atribuída à sua arquitetura otimizada para aplicações embarcadas críticas, bem como à robustez dos periféricos de comunicação, características típicas de microcontroladores da família ARM, frequentemente empregados em ambientes industriais.



No entanto, a diferença de desempenho verificada é marginal, de modo que, para a maioria das aplicações práticas, ambos os microcontroladores podem ser considerados igualmente confiáveis para implementações que envolvam comunicação UART.

É importante salientar que os testes foram conduzidos em condições controladas, com distância reduzida entre os dispositivos e baixos níveis de interferência eletromagnética. Em ambientes industriais reais, onde a presença de ruído eletromagnético é significativamente maior, as taxas de perda podem aumentar. Contudo, a adoção de protocolos de comunicação robustos, com mecanismos de detecção e correção de erros, como o CRC-16 empregado neste estudo, constitui uma estratégia eficaz para a mitigação desses efeitos adversos.

4.3 COMUNICAÇÃO WI-FI (ESP32)

Durante o período de 72 horas de teste contínuo da comunicação Wi-Fi com o ESP32, também com um total de 4.320 pacotes transmitidos, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados quantitativos do teste de comunicação Wi-Fi do ESP32.

Controlador	ESP32
Total de pacotes	4.320
Pacotes recebidos com sucesso	4.313
Pacotes perdidos	7
Pacotes corrompidos (CRC inválido)	0
Taxa de perda de pacotes	0,16

Fonte: Do autor (2025)

A taxa de perda de pacotes observada na comunicação Wi-Fi foi de 0,16%, ligeiramente superior à verificada na comunicação UART, embora ainda possa ser considerada aceitável para a grande maioria das aplicações.

Os resultados dos testes demonstraram que, apesar de a taxa de perda de pacotes ser marginalmente superior à da comunicação UART (0,069 %), a tec-



nologia Wi-Fi oferece a conveniência da comunicação sem fio e a integração direta com redes IP, como as utilizadas nos testes. Esse tipo de conectividade permite a implementação de protocolos amplamente utilizados em aplicações industriais e comerciais, como MQTT, HTTP, entre outros.

A taxa de perda observada, de apenas 0,16 %, evidencia a eficiência e a estabilidade desta forma de comunicação, especialmente considerando as vantagens associadas à mobilidade e à facilidade de integração com infraestruturas de rede já estabelecidas.

É importante ressaltar que os testes foram realizados em um ambiente controlado, com distância de aproximadamente 3 metros, sem obstáculos físicos entre o ESP32 e o roteador, e com níveis reduzidos de interferência eletromagnética. Em ambientes industriais reais, onde há maior presença de barreiras físicas, estruturas metálicas e fontes de interferência, a taxa de perda pode ser ligeiramente superior.

Dessa forma, para aplicações como monitoramento remoto, coleta de dados assíncrona ou controle de processos com requisitos temporais mais flexíveis, a comunicação Wi-Fi do ESP32 se apresenta como uma solução viável, de baixo custo e com significativa facilidade de implementação, sobretudo em arquiteturas que envolvam sistemas baseados em nuvem.

4.4 COMUNICAÇÃO BLUETOOTH (ESP32)

Durante o período de 72 horas de teste contínuo da comunicação Bluetooth com o ESP32, igualmente com 4.320 pacotes transmitidos, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 5: Resultados quantitativos do teste de comunicação Bluetooth do ESP32.

Controlador	ESP32
Total de pacotes	4.320
Pacotes recebidos com sucesso	4.311
Pacotes perdidos	9



Pacotes corrompidos (CRC inválido)	0
Taxa de perda de pacotes	0,20
Fonte: Do autor (2025)	

A taxa de perda de pacotes observada na comunicação Bluetooth foi de 0,20%, superior às taxas verificadas na comunicação UART (0,069 %) e na comunicação Wi-Fi (0,16 %).

Os resultados dos testes demonstram que, embora o Bluetooth apresente uma taxa de perda de pacotes levemente superior, a tecnologia ainda oferece um nível de confiabilidade adequado para diversas aplicações.

Deve-se considerar que o Bluetooth, assim como o Wi-Fi, opera na faixa de 2,4 GHz e está sujeito a interferências provenientes de outros dispositivos que utilizam a mesma banda de frequência. Entretanto, o protocolo Bluetooth implementa mecanismos de salto de frequência (*frequency hopping*), que contribuem para a mitigação de interferências e, conseqüentemente, para a estabilidade da conexão observada ao longo dos testes.

O Bluetooth se destaca por sua eficiência energética, especialmente quando operando em modos como o *Bluetooth Low Energy* (BLE), embora, neste estudo, os testes tenham sido conduzidos utilizando o Bluetooth Clássico, visando avaliar sua estabilidade em aplicações de maior taxa de transmissão e persistência de conexão.

Adicionalmente, o Bluetooth apresenta a vantagem da simplicidade de implementação para conexões ponto a ponto ou em pequenas redes locais, características que favorecem sua utilização em cenários industriais específicos.

Importa salientar que, assim como nos testes anteriores, os ensaios foram realizados em ambiente controlado, com distância aproximada de 3 metros entre o ESP32 e o receptor, e sem a presença de obstáculos físicos ou fontes significativas de interferência. Em contextos industriais reais, espera-se que a taxa de perda possa apresentar elevações modestas, em função de barreiras físicas, estruturas metálicas e interferência eletromagnética.



4.5 DISCUSSÃO GERAL DAS CAPACIDADES DE COMUNICAÇÃO DO ESP32

A análise dos resultados obtidos nos diferentes testes de comunicação realizados com o ESP32 evidencia a notável versatilidade deste microcontrolador para atender a uma ampla gama de necessidades em ambientes industriais.

Na comunicação cabeada via UART, o ESP32 demonstrou desempenho de alta confiabilidade, com uma taxa de perda de pacotes extremamente baixa (0,069 %), praticamente indistinguível daquela observada em microcontroladores amplamente utilizados na indústria, como o STM32F412VGT6. Tal desempenho qualifica o ESP32 para aplicações que exigem comunicação serial robusta, determinística e de alta confiabilidade, como sistemas de automação, controle e instrumentação.

No que se refere à comunicação sem fio via Wi-Fi, a capacidade nativa do ESP32 para integrar-se a redes IP representa um diferencial importante para seu uso em ambientes industriais modernos. Embora a taxa de perda de pacotes (0,16 %) seja ligeiramente superior à observada na UART, ela permanece dentro de um nível considerado gerenciável para muitas aplicações, sobretudo quando aliada a protocolos de camada superior que incluem mecanismos de verificação e retransmissão, como o MQTT e o HTTP. Além disso, a flexibilidade e o alcance do Wi-Fi constituem ativos valiosos, especialmente em estratégias de modernização e digitalização de sistemas, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0.

Por sua vez, o suporte à comunicação Bluetooth revelou desempenho igualmente confiável para transmissões sem fio de curto alcance, com uma taxa de perda de pacotes moderadamente superior (0,20 %). A eficiência energética, sobretudo em modos como o *Bluetooth Low Energy* (BLE), bem como a simplicidade de implementação para conexões ponto a ponto ou em pequenas redes locais, tornam essa tecnologia particularmente indicada para tarefas como configuração, diagnóstico e comunicação localizada entre dispositivos.

A presença dessas três interfaces de comunicação em um único dispositivo de baixo custo confere ao ESP32 uma flexibilidade significativa, permitindo que projetistas escolham a tecnologia mais adequada a cada parte de um sistema industrial complexo. A adoção de mecanismos de verificação de integridade, como o



CRC-16, implementado em todos os testes realizados, é fundamental para assegurar a confiabilidade das informações transmitidas, independentemente do meio de comunicação empregado.

É importante reforçar que o desempenho em ambientes industriais reais pode ser impactado por fatores que não foram completamente replicados no ambiente controlado de testes, como interferências eletromagnéticas, presença de obstáculos físicos e condições ambientais adversas. No entanto, os resultados obtidos fornecem uma base sólida para afirmar que o ESP32 dispõe das capacidades de comunicação necessárias para ser considerado uma ferramenta valiosa no contexto da automação industrial contemporânea.

4.6 VIABILIDADE DO ESP32 EM APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Os resultados obtidos neste estudo reforçam a viabilidade do ESP32 como uma alternativa competitiva, versátil e economicamente vantajosa para uma diversidade de aplicações industriais, especialmente quando se consideram seu baixo custo e seu conjunto abrangente de funcionalidades de comunicação.

O desempenho da interface UART do ESP32, com confiabilidade comparável à de microcontroladores industriais consagrados, o torna uma escolha adequada para a comunicação serial entre dispositivos próximos, como CLPs, Interfaces Homem-Máquina (IHMs), sensores e atuadores.

As opções de comunicação sem fio, por sua vez, oferecem soluções diferenciadas para distintas necessidades industriais. O Bluetooth se destaca pela confiabilidade em comunicações de curto alcance e pelo baixo consumo energético, sendo ideal para aplicações como diagnósticos, configurações remotas e redes locais de sensores. Já o Wi-Fi proporciona a integração do ESP32 com redes corporativas e plataformas de computação em nuvem, facilitando a implementação de sistemas de monitoramento remoto e coleta de dados em tempo real, ainda que exija maior atenção à gestão da qualidade de serviço e à mitigação de perdas de pacotes em aplicações mais críticas.

A combinação entre uma comunicação cabeada altamente confiável e opções sem fio flexíveis posiciona o ESP32 como um componente estratégico para



a implementação de soluções alinhadas aos conceitos da Indústria 4.0, promovendo a conexão eficiente e econômica de máquinas, processos e sistemas.

4.6.1 Limitações e considerações

As placas de desenvolvimento típicas do ESP32 não são concebidas para operar em ambientes adversos, sujeitos a fatores como temperaturas extremas, umidade elevada, presença de poeira, vibrações mecânicas ou atmosferas potencialmente explosivas. Assim, para aplicações industriais reais, torna-se necessária a adoção de invólucros adequados, capazes de garantir proteção ambiental, bem como, quando possível, a utilização de versões industriais do ESP32, com maior robustez física e confiabilidade operacional.

Adicionalmente, dependendo do setor de aplicação e da região geográfica, podem ser requeridas certificações específicas, tais como UL, CE, FCC ou ATEX, as quais as placas padrão do ESP32 podem não possuir. A ausência dessas certificações pode limitar ou até inviabilizar a sua utilização em determinados contextos industriais.

Cabe destacar que, embora este estudo tenha avaliado o desempenho do ESP32 ao longo de um período contínuo de 72 horas, aplicações industriais geralmente exigem níveis mais elevados de confiabilidade a longo prazo. Assim, recomenda-se que, antes da sua adoção definitiva, sejam conduzidas análises

complementares envolvendo testes de envelhecimento, avaliação de estabilidade térmica e validação do comportamento sob carga contínua, com vistas a garantir a segurança, a robustez e a durabilidade dos sistemas implementados.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, investigou-se a viabilidade do microcontrolador ESP32 como plataforma de comunicação para aplicações em automação industrial, com a avaliação do desempenho de suas interfaces UART, Wi-Fi e Bluetooth em termos de perda de pacotes e integridade dos dados. Para isso, foi conduzido um procedimento experimental controlado, simulando a transmissão contínua de dados por



72 horas em cada interface, com a coleta de dados quantitativos sobre a confiabilidade de cada método de comunicação. A análise dos resultados permitiu extrair conclusões concretas sobre a capacidade do ESP32 de atender às exigências de sistemas industriais.

Os principais resultados demonstraram que a interface UART do ESP32 apresentou um nível de confiabilidade extremamente alto, com taxa de perda de pacotes de apenas 0,069 %, valor praticamente equivalente ao observado em microcontroladores consolidados na indústria, como o STM32F412VGT6, que não apresentou perdas nesse intervalo de tempo. Esse desempenho confirma a robustez do ESP32 para comunicação serial cabeada em aplicações que exigem alta integridade e determinismo dos dados.

Quanto às comunicações sem fio, tanto o Wi-Fi quanto o Bluetooth apresentaram taxas de perda de pacotes inferiores a 1 % (0,16 % para o Wi-Fi e 0,20 % para o Bluetooth), indicando boa confiabilidade em curtas distâncias. O Bluetooth, com seu baixo consumo energético, mostrou-se adequado para configurações de equipamentos, diagnósticos locais e redes de sensores de proximidade. Já o Wi-Fi destacou-se pela integração direta com redes IP e infraestrutura industrial, sendo apropriado para monitoramento remoto, telemetria e controle não crítico, especialmente quando utilizado em conjunto com verificações de integridade (como CRC-16) e protocolos superiores com retransmissão de pacotes.

Como sugestões para implementações futuras, recomenda-se a seleção criteriosa da interface de comunicação mais adequada a cada aplicação, a adoção de mecanismos adicionais de robustez na camada de aplicação (como confirmações e retransmissões), bem como o uso de hardware adaptado ao ambiente industrial (invólucros apropriados e módulos com certificações específicas). Para trabalhos futuros, sugere-se realizar testes em ambientes industriais reais, avaliar a confiabilidade a longo prazo sob carga contínua, investigar o desempenho com protocolos industriais específicos (por exemplo, Modbus ou MQTT sobre Wi-Fi) e analisar comparativamente o consumo de energia de cada interface em cenários típicos de aplicação.



REFERÊNCIAS

CHEN, Jingan; YANG, Yuan; CHEN, Ziyang; XIE, Kun; ZHU, Zhisong. **Design of Wireless Industrial Internet of Things Gateway Based on ESP32**. In: 2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP), Chengdu, China, 19-21 maio 2023. Piscataway, NJ: IEEE, 2023. p. 234–239. DOI: 10.1109/ICMSP58539.2023.10170905.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series Datasheet Version 4.9**. Shanghai, China: Espressif Systems, 2020. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 19 maio 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC**. 2022. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 17 abr. 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP-Modbus - ESP32 - ESP-IDF Programming Guide v4.4-rc1 documentation**. 2023. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.4-rc1/esp32/api-reference/protocols/modbus.html>. Acesso em: 17 abr. 2025.

KHAN, T. **UART Communication on ESP32**. 2022. Disponível em: <https://medium.com/@khantalha7367/uart-communication-on-esp32-28fd3df3b6eb>. Acesso em: 17 abr. 2025.

LIMA, G. **SmartLock Lite: um sistema de controle de acesso usando o micro-controlador ESP32**. Relatório Técnico IC-22-06. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, nov. 2022. Disponível em: https://smartcampus.prefeitura.unicamp.br/pub/artigos_relatorios/Gabriel_SmartLock_ESP32.pdf. Acesso em: 17 abr. 2025.

NEUMANN, Igor. **Google Sheets: Monitorando a vibração de um motor com ESP32**. Crescer Engenharia, 14 dez. 2021. Atualizado: 6 mar. 2024. Disponível em: <https://www.crescerengenharia.com/post/google-sheets-monitorando-vibracao-esp32>. Acesso em: 20 abr. 2025.

ROCKWELL AUTOMATION. **Controladores programáveis CLP**. Milwaukee, USA: Allen-Bradley, 2025. Disponível em: <https://www.rockwellautomation.com/pt-br/products/hardware/allen-bradley/programmable-controllers.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

SIEMENS. **Fichas Técnicas - Especificações Técnicas - Janeiro 25**. São Paulo: Siemens Infraestrutura e Indústria Ltda, 2025. Disponível em: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:94724343-b9a8-484b-8416-a244791207e4/Fichas-tecnicas-MONTADAS-JAN25-NET.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.



SONG, Wenze; WANG, Xuezhen; WANG, Tianqi; LI, Zhixuan; ZHANG, Zening; YANG, Lishan. **Design of Factory Environmental Monitoring System based on ESP32**. 2023 5Th International Conference On Frontiers Technology Of Information And Computer (Icftic), [S.L.], p. 311-314, 17 nov. 2023. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icftic59930.2023.10456317>.

SOUZA, Fábio. **NORVI IIOT – ESP32 para projetos industriais**. Embarcados, 18 dez. 2019. Disponível em: <https://embarcados.com.br/norvi-iiot-esp32-para-projetos-industriais/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

STMICROELECTRONICS. **Datasheet - STM32F205xx STM32F207xx - Arm®-based 32-bit MCU**. Rev. 18. Geneva, Switzerland: STMicroelectronics, 2020. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00237391.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

SWATI, Thimmapuram; RAO, K. Raghavendra. **Industrial Process Monitoring System Using ESP32**. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), v. 7, n. 6S4, p. 290–293, abr. 2019. Disponível em: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v7i6s4/F10550476S419.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

UEBEL, Fábio. **4 passos para usar o Arduino/ESP32 profissionalmente**. Crescer Engenharia, 28 jul. 2021. Atualizado: 6 mar. 2024. Disponível em: <https://www.crescerengenharia.com/post/4-passos-para-usar-o-arduino-esp32-profissionalmente..> Acesso em: 20 abr. 2025.

UNIVERSAL ROBOTS BRASIL. **CLP (Controlador Lógico Programável): o que é e qual sua importância na automação industrial?**. 2025. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/clp-controlador-l%C3%B3gico-program%C3%A1vel-o-que-%C3%A9-e-qual-sua-import%C3%A2ncia-na-automac%C3%A3o-industrial/>. Acesso em: 19 maio 2025.

VÁCHA, Michal. **Security of IoT Devices Based on ESP32**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Czech Technical University in Prague, Faculty of Information Technology, Praga, 2020. Disponível em: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89988/F8-DP-2020-Vacha-Michal-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 abr. 2025.

WILCHER, Don. **A Guide For The ESP32 Microcontroller Series**. DigiKey, 2 jun. 2024. Disponível em: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/2024/a-guide-for-the-esp32-microcontroller-series/>. Acesso em: 17 abr. 2025.