



ISSN 2447-6102

Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia

<https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/index>



PPG-INTEGRIDADE

Artigo

Sistema Inteligente de Monitoramento de Vagas de Estacionamento via Comunicação Serial Arduino-ESP32

Ferrão, D.P.G.¹, Santos, W.F. .G.², Meyer, Y.A.³, e Ximenes, T.S.S.^{4,*}

¹ Discente da Faculdade de Tecnologia da Unicamp; d233279@dac.unicamp.br

² Discente da Faculdade de Tecnologia da Unicamp; w195550@dac.unicamp.br

³ Docente da Faculdade de Tecnologia da Unicamp; yameyer@unicamp.br

⁴ Docente da Faculdade de Tecnologia da Unicamp; talia@unicamp.br

* Correspondência: talia@unicamp.br

Received: 3/12/2025; Accepted: 19/03/2026; Published: 19/03/2026

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação experimental de um protótipo físico para monitoramento inteligente de vagas de estacionamento, com comunicação serial entre as placas microcontroladoras Arduino Uno e ESP32. O sistema integra sensores ultrassônicos e infravermelhos para detecção de veículos, acionando sinalizações visuais e sonoras em tempo real. Os dados são transmitidos via UART, permitindo análise e controle integrados. Os testes de bancada indicaram taxa de acerto de aproximadamente 95%, estabilidade na comunicação e rápida resposta dos sensores. O projeto demonstrou viabilidade prática, baixo custo de implementação e potencial de aplicação em estacionamentos de pequeno e médio porte, com arquitetura modular que favorece a escalabilidade para um número maior de vagas.

Palavras-chave: IoT; Arduino; ESP32; Comunicação serial; Estacionamento inteligente.

Abstract: This article presents the development and experimental validation of a physical prototype for intelligent monitoring of parking spaces, implementing serial communication between Arduino Uno and ESP32 microcontroller boards. The system integrates ultrasonic and infrared sensors for vehicle detection, triggering visual and audible signals in real time. Data are transmitted via UART, enabling integrated analysis and control. Bench tests demonstrated an accuracy rate of approximately 95%, stable communication, and fast sensor response. The project demonstrates practical feasibility, low implementation cost, and potential application in small and medium-sized parking facilities, with a modular architecture that supports scalability to a larger number of parking spaces.

Keywords: IoT; Arduino; ESP32; Serial communication; Smart parking.

1. Introdução

O crescimento contínuo da frota de veículos e a limitação de vagas nos centros urbanos têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento inteligente capazes de otimizar a mobilidade e reduzir congestionamentos, contribuindo para ambientes urbanos mais acessíveis e eficientes (Barberio e Gallo, 2024; Gualberto, 2024). Nesse contexto, sistemas de estacionamento inteligentes baseados em Internet das Coisas (IoT) tornaram-se uma das principais tendências tecnológicas, empregando sensores, microcontroladores e comunicação sem fio para detecção automática da ocupação de vagas (Alam et al., 2023; Abdulsheeb et al., 2024). A crescente demanda por automação e por tecnologias que facilitem o cotidiano da sociedade reforça essa tendência, como evidenciado em estudos sobre a automação de estacionamentos (Moko Smart, 2022).

Diversas abordagens tecnológicas são usadas na detecção de veículos, incluindo sensores ultrassônicos, infravermelhos e magnéticos (Nascimento-Júnior et al, 2020), além de soluções mais avançadas baseadas em visão computacional e técnicas de inteligência artificial (Grbic e Koch, 2023; Servino et al, 2023). Esses recursos permitem alta



precisão na identificação de veículos e possibilitam diferenciação entre vagas comuns e vagas prioritárias destinadas a pessoas com deficiência, idosos, gestantes e outros grupos protegidos, seguindo normas e direitos humanos (Brasil, 2024).

No contexto de hardware embarcado, plataformas como Arduino (Arduinodocs, 2025) e ESP32 (Maker Hero, 2025) destacam-se pela versatilidade, baixo custo e compatibilidade com diversos sensores, consideradas ideais para essas automações. A comunicação entre esses dispositivos é comumente realizada por meio da interface UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), um método de comunicação serial assíncrona amplamente empregado em sistemas embarcados devido à sua robustez e baixa latência (Circuit Designer, 2025). Nesse trabalho, o Arduino Uno executa a leitura dos sensores ultrassônico e infravermelho, enquanto o ESP32 recebe os dados via UART e realiza o acionamento dos indicadores luminosos e sonoros.

O artigo apresenta ainda simulações realizadas na plataforma Wokwi (Wokwi, 2025), além de vídeos com testes práticos do protótipo físico de duas e quatro vagas. Esses experimentos demonstram a estabilidade da comunicação, o comportamento dos sensores e o desempenho geral do sistema, reforçando sua viabilidade e possibilitando a análise da escalabilidade para diferentes quantidades de vagas monitoradas.

Além disso, o trabalho dialoga com pesquisas recentes sobre tecnologias de apoio, acessibilidade e mobilidade inclusiva. Estudos relacionados a barreiras tecnológicas enfrentadas por idosos, aplicações de visão computacional para monitoramento de acidentes domésticos e o desenvolvimento de tecnologias assistivas, como cadeiras de rodas inteligentes baseadas em Arduino, sensores e SLAM, evidenciam a relevância de soluções acessíveis, modulares e de baixo custo, alinhadas aos princípios de inclusão social (Morais et al., 2025; Ziza e Ximenes, 2022).

Dessa forma, este trabalho insere-se no contexto da expansão das tecnologias IoT e dos sistemas inteligentes de mobilidade urbana, contribuindo com o desenvolvimento de um protótipo funcional, escalável e de baixo custo para o monitoramento automático de vagas. O objetivo principal foi conceber, implementar e validar um protótipo de estacionamento inteligente, inicialmente com duas vagas e posteriormente ampliado para quatro e dez vagas, analisando seu desempenho, estabilidade operacional e potencial de escalabilidade. A solução proposta fundamenta-se em literatura contemporânea, experimentos reais e em simulações digitais, demonstrando sua viabilidade técnica para aplicações em estacionamentos de pequeno, médio e grande porte. Ressalta-se que o objetivo deste trabalho não é realizar comparação com sistemas já implementados no mercado, mas sim validar tecnicamente a solução proposta por meio de demonstrações experimentais, evidenciando seu correto funcionamento e sua capacidade de expansão para futuras aplicações comerciais.

2. Materiais e Métodos

O sistema desenvolvido para o monitoramento inteligente de vagas utilizou-se de uma combinação de microcontroladores, sensores e atuadores selecionados para garantir baixo custo, simplicidade de implementação e compatibilidade elétrica entre todos os módulos.

2.1. Protótipo de Estacionamento para Duas Vagas

O primeiro passo foi elaborar um protótipo de estacionamento para apenas duas vagas, a fim de testar o funcionamento do sistema básico. Os materiais utilizados para esse desenvolvimento estão listados na Tabela 1 e explicados ao longo dessa subseção.

Tabela 1. Lista dos materiais utilizados para o protótipo de estacionamento para duas vagas

Material	Breve descrição	Preço*
Arduino Uno R3	Placa microcontroladora	R\$ 53,90
ESP32 Devkit V1	Placa microcontroladora	R\$ 42,90
<i>Buzzer</i>	Atuador sonoro	R\$ 8,90 (5 unidades)
AJ-SR04M	Sensor ultrassônico	R\$ 38,90
Sensor infravermelho Sharp	Sensor de distância para utilização em vaga especial	R\$ 49,90

LED vermelho	Atuador visível para indicação de vaga ocupada	R\$ 2,00 (10 unidades)
LED verde	Atuador visível para indicação de vaga livre	R\$ 2,00 (10 unidades)
LED amarelo	Atuador visível para vaga especial	R\$ 2,00 (10 unidades)
Resistores de 220 Ohms	Resistores para limitação de corrente dos LEDs	R\$ 0,75 (10 unidades)
<i>Protoboards</i> de 400 pontos	Matriz de contato para montagem do sistema	R\$ 6,90
<i>Jumpers</i>	Cabos para conexões dos componentes	R\$ 7,90 (40 unidades)

*Os valores foram retirados no dia 11/02/2026 em <https://www.robocore.net/busca/>.

O protótipo inicial, projetado para duas vagas, sendo uma vaga comum e uma vaga especial, foi construído com base na integração entre um Arduino Uno R3 e um ESP32 DevKit V1. O Arduino assumiu a função de realizar a leitura dos sensores, processar os dados e determinar o estado de ocupação das vagas, enquanto o ESP32 ficou responsável por receber essas informações via comunicação serial e acionar os indicadores visuais por meio dos LEDs e sonoros via *buzzer*.

No que se refere aos dispositivos de detecção, a vaga comum foi monitorada por meio de um sensor ultrassônico do modelo AJ-SR04M, que mede distância utilizando pulsos e permite identificar a aproximação de um veículo com boa estabilidade e resistência a interferências (Bastos, 2025). Esse modelo, por ser à prova d'água, apresenta desempenho satisfatório para eventuais aplicações externas. Optou-se por utilizar esse modelo para vaga comum, por ser capaz de detectar veículos de diferentes tamanhos e formatos; ter bom desempenho em ambientes internos e externos e ter custo acessível, possibilitando a aplicação em maior quantidade de vagas.

Já a vaga especial utilizou um sensor infravermelho Sharp, que detecta objetos próximos por reflexão de luz e oferece resposta mais rápida com maior precisão em distâncias curtas, além de melhor controle do ponto exato de leitura, características adequadas para vagas com acessibilidade ou uso prioritário (Arduino e Cia, 2019). Portanto, devido ao seu custo mais elevado, este sensor foi escolhido para ser utilizado apenas nas vagas especiais, reduzindo o custo do projeto total e atendendo os objetivos propostos. A combinação dos dois tipos de sensores tem como objetivo aumentar a confiabilidade do sistema, já que cada tecnologia responde de maneira diferente às condições ambientais.

Para a sinalização dos estados das vagas, foram empregados LEDs de cores distintas, conectados diretamente ao ESP32. O LED verde indicou vagas livres, enquanto o LED vermelho representou a ocupação das mesmas. Para a vaga especial, utilizou-se um LED amarelo para reforçar visualmente seu estado e foi usado um LED azul que quando aceso indica que a vaga está desocupada. Além disso, um *buzzer* foi incorporado ao protótipo com o intuito de fornecer alerta sonoro sempre que a vaga especial estivesse ocupada, reforçando a diferenciação funcional entre os dois tipos de vaga monitorados.

A montagem física foi realizada em *protoboards*, permitindo ajustes rápidos e reorganização dos circuitos durante os testes. Cabos *jumpers* foram utilizados para interligar os sensores, LEDs, *buzzer* e placas microcontroladoras e fazer a ligação entre eles, inclusive entre o Arduino e ESP32. Resistores de 220 Ohms foram adicionados às linhas dos LEDs para limitar a corrente e evitar danos aos componentes. Na ligação do sensor ultrassônico, foi necessária a utilização de um divisor resistivo ou level shifter no pino ECHO, devido à diferença de níveis lógicos entre os dispositivos.

2.2. Protótipo de Estacionamento para Oito Vagas

Para a expansão do protótipo para oito vagas, optou-se por uma abordagem com uma quantidade de componentes mínima a mais adequada para a sua viabilização. Essa estratégia consistiu em acrescentar apenas os sensores necessários para aumentar a capacidade de detecção, mantendo o mesmo princípio de funcionamento. Assim, foi adicionado um novo sensor ultrassônico para cada nova vaga comum e também um novo sensor infravermelho para as outras vagas especiais, totalizando 8 sensores (4 ultrassônicos e 4 Infravermelhos), preservando a mesma lógica de operação do protótipo original. Para a expansão também foi necessário o uso de uma *protoboard* adicional, cabos extras e resistores suplementares para os LEDs correspondentes às novas vagas, tudo visando garantir que o consumo total do conjunto permanecesse dentro dos limites seguros.

Essa arquitetura modular permitiu que o sistema se expandisse sem necessidade de grandes alterações no hardware e em sua estrutura ou na programação, mantendo sua simplicidade, baixo custo e facilidade de replicação. Os materiais empregados garantiram a estabilidade das leituras, a coerência na comunicação UART e a clareza na

indicação dos estados das vagas, tanto no protótipo de duas quanto no de quatro vagas, que são semelhantes em funcionamento e na utilidade de cada componente ao sistema, isso incluindo LEDs, *buzzer*, etc, porém, claro, com uma robustez maior em se tratando do funcionamento para mais vagas por se tratar de uma complexidade maior na interpretação dos dados. Vale a pena ressaltar também que foi utilizada a fonte interna do Arduino e da ESP32 para alimentação do circuito eletrônico.

A Figura 1 mostra o protótipo físico testado, evidenciando os componentes utilizados, o funcionamento dos LEDs e a integração do sistema com o Arduino. Cada vaga é identificada por quatro LEDs, que são os azuis, amarelos, verdes e vermelhos, totalizando assim, no caso de oito vagas, dezesseis unidades. O LED azul indica que a vaga especial está livre, enquanto o LED verde sinaliza a disponibilidade da vaga comum. Já as vagas ocupadas são representadas pelos LEDs amarelo (vaga especial ocupada) e vermelho (vaga comum ocupada). Complementarmente, empregou-se o *Serial Monitor* para manipular os estados de ocupação e liberação de cada vaga, permitindo ao sistema interpretar essas informações e acionar os LEDs correspondentes de forma adequada.



Figura 1. Protótipo físico para teste de 8 vagas.

Além dos componentes físicos, toda a configuração, programação e calibração do sistema foram realizadas por meio da plataforma Arduino IDE, instalada em um computador conectado tanto ao Arduino Uno quanto ao ESP32 por cabos USB. O IDE foi utilizado para desenvolver, compilar e enviar o código-fonte para os microcontroladores, permitindo executar as funcionalidades de detecção, comunicação serial, acionamento dos indicadores e verificação das leituras em tempo real por meio do *Serial Monitor*. Esse ambiente de desenvolvimento foi definido para validar o comportamento dos sensores, ajustar os limiares de detecção e garantir o correto funcionamento integrado do sistema.

3. Desenvolvimento do Protótipo do Estacionamento

3.1. Simulação na Plataforma Wokwi

Com o objetivo de validar o comportamento lógico do sistema antes da construção do protótipo físico, foram realizadas simulações preliminares na plataforma Wokwi. A ideia se baseou em testar o funcionamento dos sensores e verificar o acionamento dos LEDs em diferentes cenários de ocupação. Como o ambiente Wokwi não permite a comunicação direta entre dois microcontroladores, a interação foi reproduzida por meio do *Serial Monitor*, que atuou como fonte de entrada dos dados, os quais, no sistema real, seriam enviados pelo Arduino ao ESP32. Dessa forma, o envio dos estados das vagas foi simulado manualmente, selecionando-se no *Serial Monitor* o tipo de veículo para a vaga que ocuparia (comum ou especial) que entraria no estacionamento, permitindo observar o acionamento correspondente de cada LED no ESP32. Paralelamente, foram criadas simulações específicas apenas com o Arduino, permitindo testar individualmente a leitura dos sensores ultrassônicos e infravermelhos, bem como o comportamento dos limiares programados para diferenciar vagas livres e ocupadas. As simulações contemplaram cenários com duas, quatro e até dez vagas, possibilitando avaliar a escalabilidade da lógica desenvolvida e servir como etapa inicial de validação da arquitetura antes da implementação em hardware.

A seguir são apresentadas imagens das simulações realizadas nesta etapa (Figuras 2 a 6), todas realizadas na plataforma online Wokwi. A Figura 2 mostra o esquema de ligação da comunicação serial das duas placas microcontroladoras.

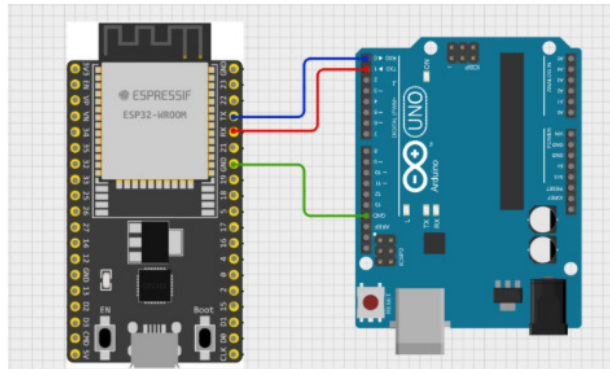


Figura 2. Diagrama de ligação entre ESP32 e Arduino (comunicação serial).

A Figura 3 mostra as ligações para as sinalizações das vagas livres e ocupadas para estacionamento de 2 vagas, sendo uma comum e uma especial. O código e a simulação dessas sinalizações pode ser visto acessando o link em: <https://wokwi.com/projects/445002646198153217>.

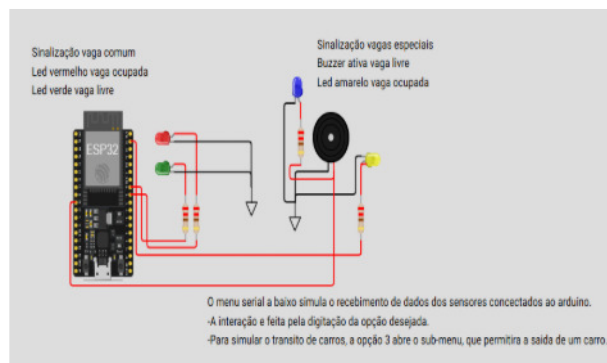


Figura 3. Simulação no Wokwi para 2 vagas: 1 comum e 1 especial.

Já a Figura 4 mostra o esquema de ligações para as sinalizações das vagas livres e ocupadas para estacionamento de 4 vagas, sendo duas comuns e duas especiais. O código e a simulação dessas sinalizações pode ser visto em: <https://wokwi.com/projects/445081149997132801>.

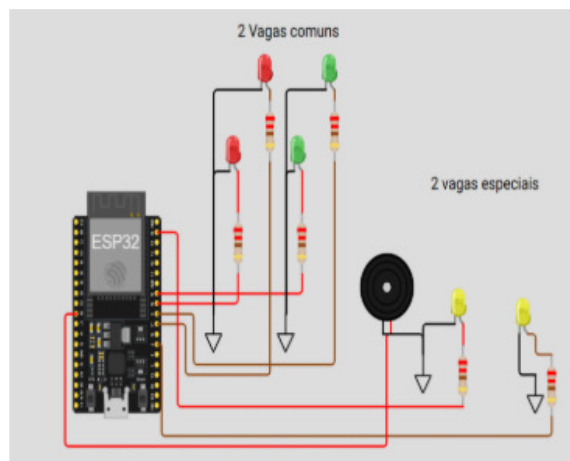


Figura 4. Simulação no Wokwi para 4 vagas: 2 comuns e 2 especiais.

E a Figura 5 ilustra o esquema de ligações das sinalizações para 10 vagas, sendo seis comuns e quatro especiais. O código e a simulação referente a essas 10 vagas pode ser acessado em: <https://wokwi.com/projects/445081717517974529>.

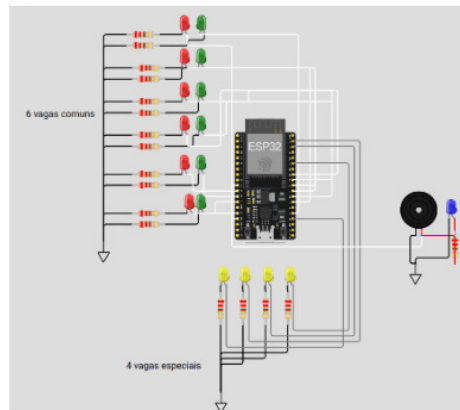


Figura 5. Simulação no Wokwi para 10 vagas: 6 comuns e 4 especiais.

A Figura 6 ilustra as ligações do Arduino com os sensores ultrassônicos. Ressalta-se que como não há os sensores infravermelhos utilizados no protótipo no simulador, eles não foram incluídos na imagem. O código dessa simulação do Arduino com os sensores na plataforma Wokwi pode ser acessado em: <https://wokwi.com/projects/445087288202289153>.

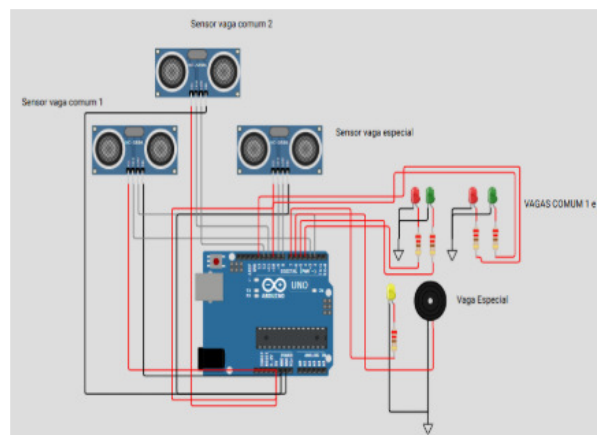


Figura 6. Simulação no Wokwi para Arduino + sensores.

3.2. Protótipo Físico

Após a validação bem sucedida de todos os testes virtuais, procedeu-se à execução do protótipo físico para duas vagas utilizando o Arduino Uno R3, como é possível observar na Figura 7. Nessa fase, os sensores ultrassônico AJ-SR04M e infravermelho Sharp foram conectados em *protoboard*, respeitando as regras de alimentação, aterramento comum e adequação dos níveis lógicos. O comportamento observado na simulação foi reproduzido com precisão, permitindo verificar se ruídos ambientais, luminosidade ou variações na superfície poderiam interferir no desempenho dos sensores. Todas as leituras foram monitoradas pelo *Serial Monitor* da IDE Arduino (vide código em: <https://docs.google.com/document/d/1qvZO9LWYxWbCqV5dOsQe7m04rsmITMkvS2RSkclBh38/edit?tab=t.0>), e as calibrações finas nos limiares foram realizadas até atingir aproximadamente 95% de exatidão na detecção.

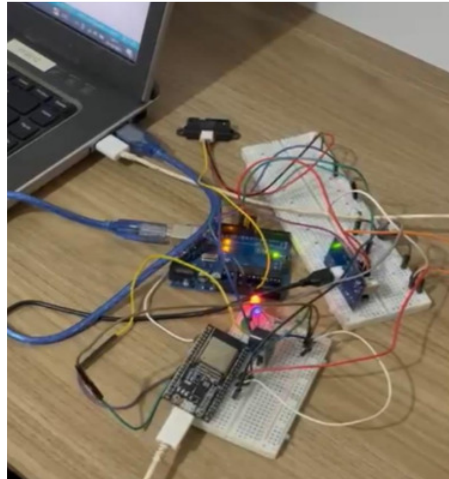


Figura 7. Teste de funcionamento do sistema físico para 2 vagas.

Com o sistema sensorial devidamente validado, integrou-se o ESP32 DevKit V1 ao projeto (Figura 8), responsável pela camada de controle e sinalização. A comunicação entre Arduino e ESP32 foi implementada via UART assíncrona, usando o envio de mensagens no formato “vagaNormal,vagaEspecial\n”. Essa arquitetura modular permitiu que o Arduino permanecesse dedicado ao sensoriamento e que o ESP32 desempenhasse exclusivamente o papel de interpretar os dados recebidos e acionar LEDs e *buzzer* conforme o estado das vagas. A comunicação serial operou a 115200 bps, mantendo estabilidade contínua durante toda a bateria de testes. Além disso, com o código utilizado sendo funcional e eficaz, que pode ser acessado em: <https://docs.google.com/document/d/1RpGuzXx8GvguilU3RnhPP72aNqCeyEpH84Z05KCX-o/edit?tab=t.0>, além de exibir com uma boa precisão a distância dos sensores aos veículos e do acionamento de diferentes colorações para cada LED requisitado em determinados momentos, também ocorreu que simultaneamente era exibido no monitor os números 1 para vaga ocupada e/ou 0 para vaga livre, sendo elas especiais ou comuns também para obtenção de controle e monitoramento das mesmas.

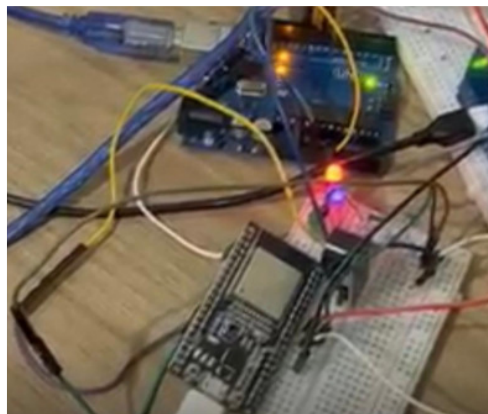


Figura 8. Ligação da ESP32 com Arduino no protótipo físico.

Os experimentos iniciais foram realizados com um protótipo composto por duas vagas, sendo uma vaga comum e uma vaga especial, utilizando sensores conectados ao Arduino e atuadores controlados pela ESP32. A lógica de sinalização adotada manteve-se constante ao longo de todas as etapas do trabalho: vaga comum livre acende LED verde, vaga comum ocupada acende LED vermelho; vaga especial livre acende LED azul e vaga especial ocupada acende LED amarelo, acompanhada do acionamento do *buzzer*, que opera apenas quando uma vaga especial está ocupada. Essa primeira etapa é ilustrada na Figura 8, que apresenta o protótipo de duas vagas, e na Figura 9, que destaca a ligação entre o Arduino e a ESP32 responsável pela sinalização.

Após validar o funcionamento do sistema com duas vagas, optou-se por expandir a solução para quatro vagas, mantendo a mesma arquitetura Arduino e ESP32. Com o auxílio do simulador Wokwi, verificou-se que o projeto poderia ser ampliado de forma segura e estável para um número ainda maior de vagas, o que levou à implementação de uma versão com oito vagas no total, sendo quatro vagas comuns e quatro vagas especiais, conforme apresentado na Figura

9. O código da simulação física do Arduino para quatro vagas por ser visto em: <https://docs.google.com/document/d/1sLSbyppUblpwNqQX9scYgiCWnjAORfi7YsAwX44usqw/edit?tab=t.0>.

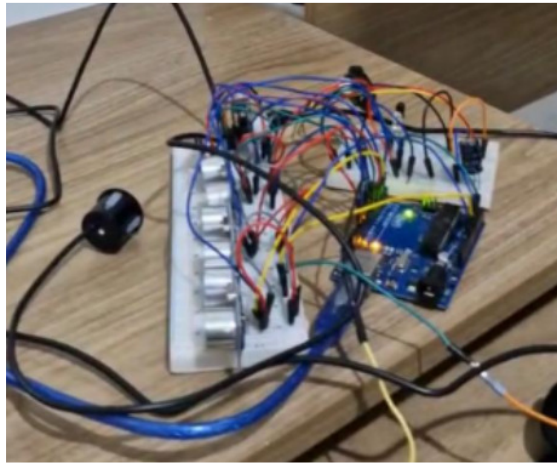


Figura 9. Sistema físico projetado para 4 vagas - somente arduino e sensores utilizados.

Para essa expansão, manteve-se a mesma lógica modular utilizada nos primeiros testes, apenas replicando os padrões de leitura e acionamento para as vagas adicionais. A ampliação exigiu a adição de novos LEDs, sensores e conexões, além de um *protoboard* complementar para acomodar o aumento de componentes. O protocolo de comunicação entre Arduino e ESP32 também foi ampliado, passando a transmitir mais informações por leitura, sem comprometer a estabilidade da UART.

Os testes físicos foram realizados diretamente no hardware, avaliando-se os tempos de leitura, a confiabilidade dos limiares configurados, possíveis interferências entre sensores ultrassônicos e o comportamento dos novos indicadores luminosos. Tanto os testes em bancada quanto as simulações no Wokwi demonstraram que o sistema permaneceu estável e com leitura correta das oito vagas, mantendo os mesmos parâmetros de precisão observados nas etapas anteriores. A Figura 10 apresenta o sistema físico configurado para quatro vagas, incluindo a distribuição dos LEDs, o *buzzer* e a ESP32 utilizada para sinalização. O código dessa parte pode ser acessado em: https://docs.google.com/document/d/19ZMgglSe-24Wkx-pqA4kTefY1oDVOeAqmnMmL2UW_KA/edit?tab=t.0.



Figura 10. Sistema físico projetado para 4 vagas - ESP32, LEDs e *buzzer* utilizados.

A metodologia permitiu que o sistema evoluísse de forma gradual, partindo de um ambiente controlado de simulação até chegar à implementação física completa das oito vagas. Inicialmente, foi realizado um teste simplificado utilizando apenas a ESP32, sem Arduino e sem sensores, no qual as oito vagas foram simuladas e monitoradas diretamente pelo *Serial Monitor*. Esse procedimento foi importante para validar o funcionamento básico da lógica de detecção e a estabilidade da comunicação. Em seguida, avançou-se para a etapa de integração com o Arduino e com os sensores físicos, permitindo avaliar o sistema em condições reais.

Ao longo de todas as fases, as validações confirmaram o bom funcionamento do modelo de detecção, a estabilidade da comunicação serial e a escalabilidade da arquitetura. Esse fluxo de desenvolvimento tornou possível

avaliar e aprimorar o desempenho do sistema em múltiplas configurações, garantindo boa confiabilidade tanto nas simulações quanto nos testes práticos.

4. Resultados e Discussões

Os resultados obtidos ao longo das etapas de simulação, desenvolvimento e validação física demonstraram a eficácia, estabilidade e escalabilidade do sistema de monitoramento inteligente de vagas proposto. A validação iniciou-se na plataforma Wokwi, onde foram realizadas simulações para verificar o funcionamento lógico do sistema antes da implementação em hardware. Nessas simulações, avaliou-se o acionamento dos LEDs, a recepção de dados via *Serial Monitor* e a resposta do sistema à variação manual dos estados de cada vaga. Foram reproduzidos cenários com duas, quatro e até dez vagas (links disponíveis no apêndice ao final do artigo), permitindo confirmar que a lógica de detecção, interpretação e sinalização estava consistente e adaptável a diferentes configurações.

Durante essa fase, observou-se que tanto os sensores ultrassônicos quanto os infravermelhos apresentaram respostas adequadas frente a variações de distância e valores analógicos, possibilitando o refinamento dos limiares de detecção. Esse ajuste prévio foi fundamental para reduzir inconsistências na etapa física, evidenciando a importância da validação virtual como estratégia de otimização do sistema.

Na etapa experimental, para validação quantitativa do sistema de detecção de vagas, foram realizadas 40 medições distribuídas em quatro cenários controlados, considerando variações de distância, presença ou ausência de veículo e condições de iluminação, conforme a Tabela 2. Os testes avaliaram o desempenho dos sensores ultrassônico e infravermelho com base nos limiares definidos no projeto.

Tabela 2. Cenários experimentais e desempenho do sistema de detecção

Cenário	Sensor	Limiar Adotado	Iluminação	Presença Real	Amostras	Acertos	Erros	Tipo de Erro
C1	Ultrassônico	< 20 cm	Ambiente interno	Ocupado	10	10	0	—
C2	Ultrassônico	> 20 cm	Ambiente interno	Livre	10	9	1	1 FN
C3	Infravermelho	> 300	Ambiente interno	Ocupado	10	10	0	—
C4	Infravermelho	< 300	Baixa iluminação	Livre	10	9	1	1 FN
Total	—	—	—	—	40	38	2	2 FN

Do total de 40 amostras analisadas, foram obtidos 38 acertos e 2 erros, alcançando aproximadamente 95% de exatidão nas leituras. Os erros identificados foram classificados como falsos negativos, ocorrendo em condições próximas aos valores de limiar estabelecidos. Não foram registrados falsos positivos durante os testes, indicando elevada confiabilidade na identificação de vagas livres. Observou-se ainda baixa variabilidade entre as repetições experimentais, evidenciando estabilidade no comportamento do sistema mesmo sob diferentes condições de iluminação.

A Figura 11 apresenta a relação entre a distância medida pelo sensor ultrassônico e o estado detectado pelo sistema. Verifica-se separação consistente entre valores inferiores a 20 cm, classificados como ocupados, e valores superiores a 20 cm, classificados como livres. Os falsos negativos registrados ocorreram em medições muito próximas ao limiar definido, indicando a existência de uma pequena zona de transição, sem impacto significativo no desempenho global do sistema.



Figura 11. Relação entre distância medida e estado detectado

Após a validação experimental controlada, foram realizados testes físicos com um protótipo inicial de duas vagas, utilizando o Arduino Uno R3 para leitura sensorial e o ESP32 para interpretação dos dados e acionamento dos atuadores. Os testes de bancada confirmaram a precisão do sensor ultrassônico AJ-SR04M nas medições de distância e a rápida resposta do sensor infravermelho Sharp na detecção de objetos próximos. As medições observadas no Serial Monitor corresponderam aos estados reais simulados, com baixa incidência de ruídos e ausência de falhas de comunicação.

A comunicação UART entre Arduino e ESP32, configurada a 115200 bps, manteve-se estável durante todos os testes, sem perda de pacotes ou truncamento de mensagens. Esse resultado confirma a adequação da arquitetura modular adotada, na qual o Arduino permanece dedicado ao sensoriamento, enquanto o ESP32 executa o processamento e controle dos indicadores visuais e sonoros. Tal separação de funções contribuiu para a estabilidade geral e facilita futuras expansões do sistema.

Com a validação do protótipo inicial, o sistema foi expandido para oito vagas, incorporando quatro sensores ultrassônicos e quatro sensores infravermelhos, além dos respectivos LEDs e reorganização das conexões em *proto-board*. Mesmo com o aumento significativo no volume de dados transmitidos, o desempenho permaneceu consistente, com leituras estáveis e baixa latência. O ESP32 continuou interpretando corretamente os estados de cada vaga, acionando LEDs verde, vermelho, amarelo e azul conforme as condições (livre, ocupada, comum ou especial), além do *buzzer* destinado à sinalização de vaga especial.

A ampliação para oito vagas evidenciou a escalabilidade da solução. A arquitetura manteve sua integridade operacional mesmo com a quadruplicação do número de sensores em relação ao protótipo inicial, demonstrando que o modelo pode crescer de forma modular sem comprometer desempenho ou confiabilidade. Os resultados obtidos alinham-se com abordagens contemporâneas de sistemas inteligentes de mobilidade, que priorizam soluções de baixo custo, modulares e de fácil implementação.

Os vídeos demonstrativos e os registros do *Serial Monitor* corroboram visualmente e tecnicamente o funcionamento adequado do sistema, evidenciando o acionamento correto dos LEDs, a resposta sonora da vaga especial e a transição consistente entre estados em tempo real. A correspondência entre os resultados das simulações virtuais e os testes físicos reforça a confiabilidade da implementação.

De forma geral, os resultados confirmam que a arquitetura proposta é funcional, estável, economicamente viável e tecnicamente adequada para aplicação em estacionamentos de pequeno, médio e grande porte. O sistema apresentou alta precisão na detecção de ocupação, boa velocidade de resposta e comportamento consistente em diferentes cenários de complexidade. Além disso, a diferenciação visual clara e o alerta sonoro para vagas especiais ampliam o valor funcional da solução, especialmente em contextos que priorizam acessibilidade.

Em síntese, a integração entre Arduino e ESP32 mostrou-se uma abordagem eficiente e escalável para o monitoramento inteligente de vagas, validando plenamente a viabilidade técnica e operacional da proposta e fundamentando sua possível expansão para um número ainda maior de vagas em aplicações reais.

5. Considerações Finais

O desenvolvimento do sistema inteligente de monitoramento de vagas baseado na comunicação serial entre Arduino Uno e ESP32 demonstrou que a arquitetura proposta atende de forma eficiente aos requisitos de detecção,

senalização e escalabilidade necessários para o controle automatizado de estacionamentos. A combinação entre sensores ultrassônicos e infravermelhos ofereceu uma solução confiável, com eficácia média de 95% na identificação de vagas ocupadas e livres, mantendo baixo custo e facilidade de implementação, que são características importantes para aplicação prática em ambientes reais.

As simulações realizadas no Wokwi, em diversas configurações de vagas, permitiram validar previamente a lógica de detecção, minimizando erros antes da montagem física e visando compreender e testar a aplicabilidade do sistema. A reprodução fiel desses comportamentos no hardware reforça a adequação dos modelos empregados e confirma que o sistema se comporta de maneira previsível e estável mesmo com o aumento da complexidade, como observado na migração de duas para oito vagas. Os vídeos registrados durante os testes físicos demonstram visualmente a estabilidade do sistema, a aplicação correta da lógica de sinalização e o funcionamento integrado entre sensores, Arduino e ESP32, reforçando a boa confiabilidade dos resultados.

A arquitetura modular adotada se mostrou particularmente vantajosa, permitindo que as funções fossem distribuídas de forma clara entre leitura sensorial e controle lógico. Esse desenho facilita futuras expansões, podendo incluir sensores magnéticos, integração com plataformas IoT, uso de ESP32-CAM para visão computacional e suporte a um número maior de vagas sem comprometer a estabilidade do sistema.

O sistema proposto combina simplicidade, eficiência e confiabilidade, representando uma solução viável e promissora para o monitoramento automatizado de vagas de estacionamento. O conjunto de simulações, testes físicos, registros em vídeo e validações experimentais confirmam sua aplicabilidade prática, além de indicar que o modelo é capaz de alinhar-se bem às tendências contemporâneas de mobilidade urbana e acessibilidade. Esse sistema pode ser facilmente replicado e expandido para maior quantidade de vagas.

Apêndice

Os vídeos dos testes de funcionamento do sistema desenvolvido podem ser vistos em:

- <https://drive.google.com/file/d/1Mt7d0YA5NADN6jJSFQn03DDY99WAhNTW/view?usp=sharing> (para 2 vagas).
- <https://drive.google.com/file/d/1UcUxzeBHspGHs9DdZaBjirUKdVQQQ5zO/view?usp=sharing> (para 8 vagas somente usando a ESP32).
- <https://drive.google.com/file/d/16XEFMyIwY1Yx6uo1ehv6lqSrZNBzMDTT/view?usp=sharing> (sistema completo).

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. Barberio, L. D. G.; Gallo, F. Estacionamentos rotativos e mobilidade urbana: os novos meios tecnológicos na financeirização digital. *Revista RUA*, 2024, v. 30, n. 2. DOI: DOI: 10.20396/rua.v30i2.8678500.
2. Gualberto, F. Vagas inteligentes no Brasil: conheça algumas cidades do país que contam com a tecnologia. *Mobilidade Estádio*, 05 ago. 2024. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/vagas-inteligentes-no-brasil-conheca-algumas-cidades-do-pais-que-contam-com-a-tecnologia/>. Acesso em: 02 jul. 2025.
3. Alam, M. R.; Saha, S.; Bostami, M. B.; Islam, M. S. Aaadeeb, M. S.; Islam, A. K. M. M. A Survey on IoT Driven Smart Parking Management System: Approaches, Limitations and Future Research Agenda. *IEEE Access*, 2023, v. 11. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3327306](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3327306).
4. Abdulsahab, J. A.; Al-Jawher, W. A. M.; Nafea, R. M.; Hayyawi, M. L. IoT Based Smart Parking System. *Transaction on Engineering Technology and Their Applications*, 2024, v.7, n.3. DOI: [10.36371/port.2024.3.1](https://doi.org/10.36371/port.2024.3.1).
5. Moko Smart. Sistema de estacionamento inteligente usando IoT. 2022. Disponível em: <https://www.mokosmart.com/pt/smart-parking-system-using-iot/>. Acesso em: 30 jun. 2025.
6. Nascimento-Júnior, G. L.; Souza-Junior, V; Cezário, A. L. O; Borges, J. E. V. Sistema de gerenciamento de um estacionamento inteligente utilizando sensores de efeito Hall. *Periódicos Científicos da UFRGS*, 2020. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/reic/article/download/99915/57728>. Acesso em: 30 jun. 2025.

7. Grbic, R.; Koch, B. Automatic Vision-Based Parking Slot Detection and Occupancy Classification. *Expert Systems with Applications*, 2023, v.225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120147>.
8. Servino, M. I. M.; Ximenes, R. L.; Gonzalez, L. F. G.; Ximenes, T. S. S. Computer Vision Applied to Vehicle Flow Monitoring for a Smart Campus. *Brazilian Technology Symposium - BTSym*, 2023.
9. Brasil. Ministério dos Direitos Humanos e da Cidadania. *IV Relatório Nacional de Cumprimento da Convenção Interamericana para Eliminação de Todas as Formas de Discriminação contra as Pessoas com Deficiência (CIADDIS) e o Programa de Ação para a Década das Américas pelos Direitos e pela Dignidade das Pessoas com Deficiência (PAD)*. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mdh/pt-br/navegue-por-temas/pessoa-com-deficiencia/acoes-e-programas/RELATORIOOEA2024PORTUGUES_final.pdf. Acesso em: 13 abr. 2025.
10. Arduinodocs. Uno R3. Disponível em: https://docs-arduino-cc.translate.google.com/hardware/uno-rev3/?x_tr_sl=en&x_tr_tl=pt&x_tr_hl=pt&x_tr_pto=tc&x_tr_hist=true. Acesso em: 17 dez. 2025.
11. Maker Hero. ESP32. Disponível em: <https://www.makerhero.com/categoria/wireless-esp32/?srsltid=AfmBOorAshJyo5KT3kly5BcsM1LknMNFayyOn-Af862II3LtkPgWhuUR>. Acesso em: 17 dez. 2025.
12. Wokwi. Welcome to Wokwi!. Disponível em: https://docs.wokwi.com/?utm_source=wokwi. Acesso em: 17 dez. 2025.
13. Morais, L. E. S.; Cardozo, M. S.; Ximenes, T. S. S. Desenvolvimento de um Sistema de Navegação para Aplicação em Cadeira de Rodas Automatizada de Baixo Custo. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, v. 10, p. 18-30, 2025.
14. Ziza, L. N.; Ximenes, T. S. S. Desenvolvimento de um Sistema para o Monitoramento de Acidentes Domésticos de Idosos utilizando Visão Computacional. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, v. 8, p. 36-47, 2022.
15. Circuit Designer. ESP32 and Arduino UNO serial communication interface. S.d. Disponível em: <https://docs.circuitdesigner.com/project/published/7d81e88e-5c26-46d8-859d-e40c0b87f740/esp32-and-arduino-uno-serial-communication-interface>. Acesso em: 14 nov. 2025.
16. Bastos, K. Como utilizar o sensor ultrassônico de distância JSN-SR04T / AJ-SR04M com Arduino. *Blog da Robótica*. 2025. Disponível em: <https://www.blogdarobotica.com/2025/01/29/como-utilizar-o-sensor-ultrassonico-de-distancia-jsn-sr04t-aj-sr04m-co-arduino/>. Acesso em: 14 nov. 2025.
17. Arduino e Cia. Medidor de distância com sensor Sharp IR. 2019. Disponível em: <https://arduinoecia.com.br/medidor-de-distancia-sensor-sharp-ir-gp2y0a02yk0f/?srsltid=AfmBOoqbXKNZb90nrTfdJ KISLT8 CcO2emlfZnSJe0lStWfAtaJ1-x5>. Acesso em: 14 nov. 2025.