



Desenvolvimento de um Sistema de Controle de Velocidade para um Rebocador em Escala Reduzida Utilizando ESP32, ESP-NOW e Identificação Matemática no MATLAB

Sophia Dafne Melo de Siqueira¹, Daniel Guzmán del Río²

*Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, Amazonas, Brasil,
sdmds.eng23@uea.edu.br*

*Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, Amazonas, Brasil,
drio@uea.edu.br*

Resumo: O presente estudo aborda o desenvolvimento de um sistema embarcado de comunicação sem fio e controle de velocidade para um rebocador em escala reduzida. Foi implementada a comunicação entre dispositivos ESP32 utilizando o protocolo ESP-NOW e realizada a identificação matemática da planta a partir de dados experimentais obtidos com um sinal PRBS. O modelo estimado no MATLAB foi utilizado no projeto e na avaliação de um controlador de velocidade, comprovando a viabilidade da metodologia proposta.

Palavras-chave: ESP-NOW; Sistema embarcado; Modelagem matemática; Controle de velocidade.

INTRODUÇÃO

O Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA) é uma competição nacional que reúne equipes de instituições de ensino superior com o objetivo de projetar, construir e validar embarcações em escala reduzida, promovendo a aplicação prática de conhecimentos em engenharia mecânica, elétrica, eletrônica e controle (Duna, 2026). Além do desenvolvimento estrutural da embarcação, a competição estimula a busca por soluções tecnológicas capazes de aumentar a eficiência, a confiabilidade e o desempenho dos sistemas embarcados.

Nesse contexto, o desempenho da embarcação depende diretamente da eficiência do sistema de propulsão e da capacidade de monitorar e controlar variáveis como velocidade, corrente e potência, tornando indispensável o desenvolvimento de sistemas eletrônicos confiáveis.

Entre as tecnologias utilizadas em sistemas embarcados destaca-se o ESP32, um microcontrolador amplamente empregado em aplicações de Internet das Coisas (IoT) devido ao seu elevado desempenho computacional e às interfaces de comunicação integradas. Dentre seus recursos, o protocolo ESP-NOW, desenvolvido pela Espressif Systems, permite a comunicação direta entre dispositivos ESP32 sem a necessidade de um ponto de acesso Wi-Fi. (Espressif Systems, 2024). Esse protocolo apresenta baixo consumo de energia, suporte à comunicação

unidirecional, bidirecional e multidirecional, além de mecanismos de criptografia e confiabilidade na transmissão de dados, características que o tornam adequado para aplicações de monitoramento e controle em tempo real (Galvão, 2023).

Para o desenvolvimento de sistemas de controle, entretanto, é necessário obter um modelo matemático que represente adequadamente a dinâmica da planta. Uma das abordagens mais utilizadas para essa finalidade é a identificação de sistemas, técnica que estima modelos matemáticos a partir de dados experimentais de entrada e saída do processo (Aguirre, 2007). Neste trabalho, a planta é composta por um motor CC Imobras 12V, responsável pelo sistema de propulsão da embarcação. A variável de entrada corresponde ao sinal PWM (Pulse Width Modulation) aplicado ao motor, enquanto a variável de saída foi obtida por meio de um sensor de efeito Hall, utilizado para medir a velocidade angular do eixo a partir da detecção de um campo magnético, permitindo acompanhar o comportamento dinâmico do motor (Makerhero, 2023).

Para excitar adequadamente a dinâmica da planta, empregou-se um Pseudo Random Binary Sequence (PRBS), um sinal binário pseudoaleatório aplicado ao PWM do motor. O PRBS alterna entre dois níveis de amplitude em instantes previamente definidos e, embora apresente comportamento semelhante ao de um sinal aleatório, é determinístico e reproduzível. Seu amplo conteúdo espectral possibilita excitar

diferentes modos dinâmicos da planta, tornando-o um dos sinais mais empregados na identificação de sistemas e na obtenção de modelos matemáticos representativos para o projeto de controladores (Aguirre, 2007).

Após a aquisição dos dados experimentais, o MATLAB, desenvolvido pela MathWorks, é amplamente utilizado em engenharia para modelagem matemática, simulação e projeto de sistemas de controle. A partir do modelo identificado, foi projetado um controlador Linear Quadratic Regulator (LQR), técnica de controle ótimo baseada na representação em espaço de estados, que determina uma lei de controle capaz de minimizar simultaneamente os desvios das variáveis de estado e o esforço de controle, proporcionando maior estabilidade e desempenho ao sistema (Ogata, 2010). O controlador foi implementado e avaliado por meio de simulações no ambiente MATLAB.

Assim, este estudo teve como objetivo desenvolver um sistema embarcado para um rebocador em escala reduzida, integrando comunicação sem fio via ESP-NOW, o desenvolvimento das placas de circuito impresso (PCBs) dos módulos transmissor e receptor, a aquisição de dados experimentais do sistema de propulsão, a identificação matemática da planta por meio do MATLAB/System Identification Toolbox e o projeto de um controlador de velocidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa e qualitativa, pois há uma abordagem experimental, desenvolvida em um rebocador em escala reduzida destinado a competições de nautimodelismo. Inicialmente, foi realizado o levantamento bibliográfico sobre sistemas de controle, protocolos de comunicação sem fio, identificação de sistemas e modelagem matemática, visando fundamentar o desenvolvimento do projeto.

Na etapa de implementação, foi desenvolvido um sistema embarcado baseado no microcontrolador ESP32, responsável pela comunicação entre os módulos transmissor (TX) e receptor (RX) por meio do protocolo ESP-NOW. Em seguida, foram projetadas e fabricadas as placas de circuito impresso (PCB) dos módulos, proporcionando maior confiabilidade e integração ao sistema eletrônico.

Para a obtenção do modelo matemático da planta, o motor de corrente contínua foi acionado por uma ponte H, tendo como entrada um sinal PWM gerado segundo a técnica PRBS (Pseudo Random Binary Sequence), enquanto a velocidade angular foi medida por um sensor de efeito Hall. Os dados experimentais

de entrada (PWM) e saída (velocidade angular) foram armazenados em arquivos CSV e importados para o MATLAB.

A identificação matemática foi realizada utilizando a System Identification Toolbox, permitindo a estimação de um modelo discreto representativo da dinâmica do sistema. A partir do modelo identificado, foi projetado um controlador de velocidade no ambiente MATLAB, cujo desempenho foi avaliado por meio de simulações computacionais. A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas durante a execução do trabalho.

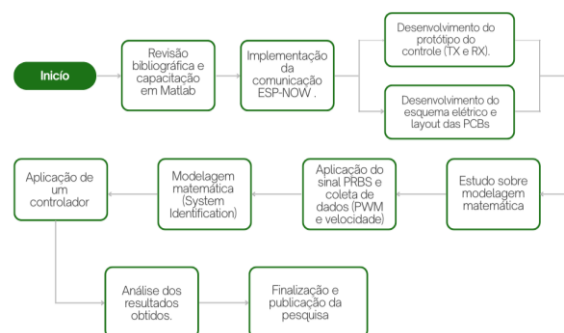


Figura 1 - Fluxograma da metodologia

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação da comunicação sem fio utilizando, o protocolo ESP-NOW, apresentou desempenho satisfatório durante os testes experimentais, possibilitando a troca de informações entre os módulos transmissor (TX) e receptor (RX) de forma rápida e estável, sem a necessidade de um roteador Wi-Fi. Essas características corroboram o descrito por Espressif Systems (2024), que destaca o protocolo como uma solução de baixa latência e elevada confiabilidade para aplicações embarcadas.

Após a validação da comunicação, foram projetadas e fabricadas as placas de circuito impresso (PCB) dos módulos TX e RX, permitindo a integração dos componentes eletrônicos em um circuito mais compacto quando comparado ao protótipo inicial em protoboard. A utilização das PCBs também reduziu interferências causadas por conexões temporárias, aumentando a confiabilidade dos testes realizados.

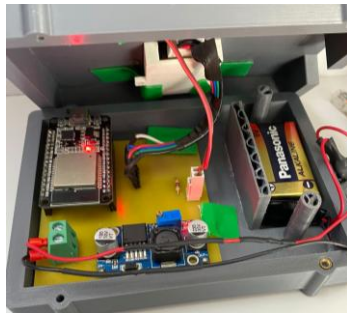


Figura 3 - PCB do transmissor (TX)

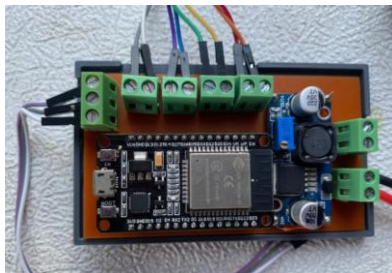


Figura 4 - PCB do receptor (RX)



Figura 5 - Teste com o piloto que irá para competição

Na etapa de identificação da planta, foi aplicado um sinal PRBS ao PWM da ponte H, promovendo uma excitação adequada da dinâmica do motor. Simultaneamente, a velocidade angular foi medida por meio do sensor de efeito Hall, possibilitando a obtenção dos pares de dados de entrada e saída necessários para a identificação matemática do sistema. A utilização do PRBS mostrou-se adequada, uma vez que seu conteúdo espectral permitiu representar diferentes regimes de operação do motor, conforme recomendado por Aguirre (2007).

Os dados experimentais foram organizados em arquivos CSV e processados no MATLAB, utilizando a System Identification Toolbox. O modelo identificado é descrito pelas Equações (1) e (2), onde a primeira representa a notação padrão de espaço de estados, e logo em seguida sendo representado pelas matrizes A, B, C e D, descritas a seguir. O modelo apresentou índice de ajuste (FIT) de 66,54%, sendo utilizado posteriormente no projeto do controlador de velocidade. Embora o modelo não represente integralmente a dinâmica da planta, esse resultado

pode ser considerado satisfatório para aplicações de controle, visto que fatores como ruídos de medição e incertezas experimentais influenciam diretamente a qualidade da identificação.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0.7824 & -0.01152 & -0.03621 \\ -0.2411 & 0.9806 & -0.08177 \\ -0.005403 & -0.003382 & -0.7629 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} -9.135 \times 10^{-5} \\ -1.332 \times 10^{-4} \\ -1.382 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \\ C &= [-3607 \quad 713.8 \quad -75.33] \\ D &= [0] \end{aligned} \quad (2)$$

Após a identificação da planta, foi projetado um controlador ótimo do tipo Linear Quadratic Regulator (LQR), utilizando o modelo discreto obtido no MATLAB. O LQR determina automaticamente o ganho de realimentação de estados a partir da minimização de uma função de custo quadrática, buscando um compromisso entre o desempenho do sistema e o esforço de controle. Para estimar os estados internos da planta, foi empregado um Filtro de Kalman, permitindo a implementação do controle mesmo sem a medição direta de todas as variáveis de estado.

Os resultados das simulações demonstraram melhora no desempenho do sistema em relação ao modelo identificado sem controle. O índice de ajuste (FIT) aumentou de 66,54% para 74,30%, correspondendo a um ganho de aproximadamente 7,8% na representação da saída do sistema, sendo estes observados nas figuras 5 e 6. Além disso, o erro quadrático médio (RMS) foi reduzido de 15,17 rad/s para 11,65 rad/s, representando uma redução de 23,18%.

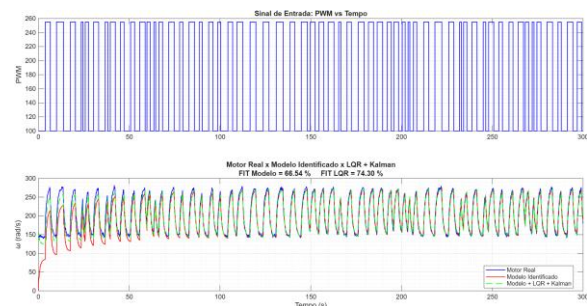


Figura 6 - Comparação das saídas do sistema

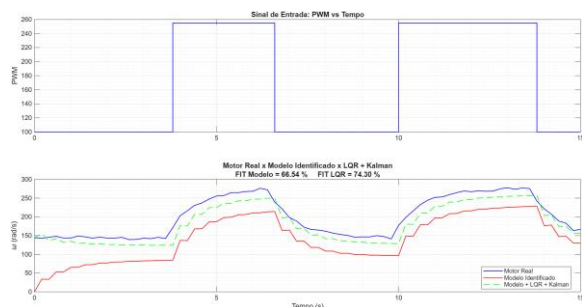


Figura 7 - Zoom da comparação das saídas do sistema

Os resultados obtidos comprovam que a metodologia empregada possibilitou integrar o desenvolvimento eletrônico do sistema embarcado com técnicas de identificação de sistemas e projeto de controle. A utilização do controlador LQR associado ao Filtro de Kalman proporcionou melhora na resposta dinâmica do sistema, demonstrando a viabilidade da estratégia adotada e estabelecendo uma base consistente para futuras implementações e validação do controlador diretamente na embarcação em condições reais de operação.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do desenvolvimento de um sistema embarcado para comunicação sem fio e controle de velocidade de um rebocador em escala reduzida. A implementação do protocolo ESP-NOW apresentou comunicação estável entre os módulos, enquanto a identificação matemática da planta, realizada a partir de dados experimentais obtidos com um sinal PRBS, permitiu a obtenção de um modelo representativo da dinâmica do sistema. Com base nesse modelo, foi possível projetar um controlador LQR associado a um Filtro de Kalman, que apresentou melhoria no desempenho em relação ao modelo identificado. Dessa forma, os objetivos propostos foram alcançados, fornecendo uma base teórica e prática para a implementação do controlador na embarcação e para futuros estudos voltados à validação experimental em condições reais de operação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por Sua presença constante, amor, força e sabedoria ao longo desta jornada. Aos meus pais, por serem meu alicerce, apoio incondicional e incentivo para que eu nunca desistisse dos meus objetivos. Ao meu companheiro de vida, por estar ao meu lado em todos os momentos, sendo meu maior incentivador. Ao meu orientador, pela dedicação, ajuda e pelos conhecimentos

compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho. À Universidade do Estado do Amazonas (UEA), por proporcionar oportunidades de aprendizado e crescimento, ampliando minha visão e expandindo minha bagagem em tecnologia e pesquisa na área de engenharia. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão da bolsa de pesquisa de um ano que financiou e viabilizou a realização deste projeto.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

Duna – Desafio Universitário de Nautidesign. **Quem somos**. Disponível em: <https://www.oficialduna.com>. Acesso em: 06 jul. 2026.

ESPRESSIF Systems. **ESP-NOW**. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>. Acesso em: 06 jul. 2026.

GALVÃO, Vinicius. **ESP-NOW: comunicação sem fio entre ESP32s**. Eletrogate, 2023. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/esp-now-comunicacao-sem-fio-entre-esp32s/>. Acesso em: 05 jul. 2026.

MakerHero. **Sensor de efeito Hall com Arduino**. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/sensor-de-efeito-hall-com-arduino/>. Acesso em: 05 jul. 2026.

MathWorks. **MATLAB**. Natick, MA: MathWorks, 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 05 jul. 2026.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.