



Integração de Sistemas Embarcados de Baixo Custo e Gêmeos Digitais no Monitoramento de variáveis de Turbinas Eólicas Offshore

LUCAS MURILO ARAÚJO SILVA PEREIRA - oficialucasaraujo@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN - CREATION

LUANA PEREIRA NOGUEIRA - luanapereiranog@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN - CREATION

MARIO ORESTES AGUIRRE GONZÁLEZ - mario.gonzalez@ufrn.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN - CREATION

LUCAS THIAGO GOMES SOARES DE ARAÚJO - lucasago28@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN - CREATION

PEDRO HENRIQUE CASTRO BEZERRA - pedrocastro.pj@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN - CREATION

ÁREA: 01.ENG. DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO
SUBÁREA: 1.3 - GESTÃO DA MANUTENÇÃO

RESUMO: A CRESCENTE DEMANDA POR FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL IMPULSIONA O CRESCIMENTO E O DESENVOLVIMENTO EM NOVOS MERCADOS DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE, QUE OFERECEM ALTO POTENCIAL DE GERAÇÃO. OPERAÇÃO EM AMBIENTE OFFSHORE APRESENTA DESAFIOS SIGNIFICATIVOS, COMO ALTOS ÍNDICES DE UMIDADE, SALINIDADE E VENTOS INTENSOS, EXIGINDO SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS ROBUSTAS PARA GARANTIR A EFICIÊNCIA E A LONGEVIDADE DAS TURBINAS. NESTE CONTEXTO, A INTEGRAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS COM SISTEMAS EMBARCADOS DE BAIXO CUSTO SURGE COMO UMA ABORDAGEM PROMISSORA PARA O MONITORAMENTO INTELIGENTE E PREDITIVO DESSES ATIVOS. A UTILIZAÇÃO DE SENSORES COMO O DHT22, ANEMÔMETRO E PLATAFORMAS COMO RASPBERRY PI PICO TEM SE MOSTRADO EFICAZ NO MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS COMO TEMPERATURA, VELOCIDADE DOS VENTOS E UMIDADE. SISTEMAS COM ESSAS CARACTERÍSTICAS PERMITEM A COLETA CONTÍNUA DE DADOS EM TEMPO REAL, ALGO QUE É CRUCIAL PARA DETECTAR CONDIÇÕES ADVERSAS E MELHORAR O DESEMPENHO DA GERAÇÃO. A SIMULAÇÃO DA LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO INTEGRADA AO SISTEMAS EMBARCADOS AGREGA MAIOR CONFIABILIDADE NO SISTEMA PROJETADO. ALÉM DISSO, O BAIXO CUSTO NA OPERAÇÃO VIABILIZA ESTUDOS E IMPLEMENTAÇÃO DE SOLUÇÕES.

PALAVRAS-CHAVES: EÓLICA OFFSHORE; GÊMEOS DIGITAIS; SISTEMAS EMBARCADOS; EFICIÊNCIA ENERGÉTICA; ANÁLISE DE DADOS.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por fontes energéticas sustentáveis tem impulsionado a evolução dos parques eólicos offshore, que desempenham alto potencial em geração de energia graças à intensidade e estabilidade dos ventos marítimos. Entretanto, sua execução em ambientes oceânicos expõe desafios relevantes, dentre eles, os altos índices de umidade, salinidade e ventos intensos. Tais condições requerem soluções tecnológicas sólidas a fim de garantir a eficiência, a longevidade e a segurança das turbinas eólicas. Nesse ínterim, a combinação de gêmeos digitais com sistemas embarcados surge como uma perspectiva promissora para o monitoramento inteligente desses ativos. A turbina eólica offshore é constituída por diversos subsistemas críticos. A base de sua estrutura compreende o rotor, composto por pás conectadas a um cubo, a nacele que se define como um abrigo de componentes como o gerador, caixa de engrenagens e sistemas de controle e a torre que tem como sua funcionalidade sustentar o conjunto. Em turbinas flutuantes, a torre está conectada a uma base ancorada ao fundo do mar.

O funcionamento se inicia com o movimento das pás pelo vento, que gira o rotor e transmite a energia mecânica à multiplicadora também denominada como gearbox, a qual aumenta a rotação e aciona o gerador. Este converte a energia mecânica em energia elétrica e geralmente corrente alternada trifásica (AC), com tensão e frequência que variam conforme o modelo da turbina (LIBERATORE *et al.*, 2020).

Após a geração, a eletricidade percorre através de um sistema de conversão e condicionamento, que pode possuir retificadores e inversores, especialmente em turbinas com geradores e ímãs permanentes. A partir disso, a energia é enviada para uma subestação offshore, incumbido de levar a tensão da corrente no sentido de facilitar a transmissão por longas distâncias até a costa. A tensão é convertida para níveis compatíveis com a malha elétrica terrestre, comumente usando transformadores elevadores e sistemas de controle de frequência. Em seguida, a energia é transportada por cabos submarinos de alta tensão até uma subestação *onshore*, onde é integrada à rede elétrica nacional (GARLICK *et al.*, 2023).

Esse processo exige o monitoramento rigoroso de variáveis ambientais e operacionais para evitar falhas e otimizar o desempenho. Um dos pontos mais vulneráveis da turbina é a nacele, a qual abriga componentes eletrônicos e mecânicos de alto valor. A umidade excessiva nesse determinado compartimento pode causar condensação interna, falhas nos circuitos eletrônicos, corrosão e perda no isolamento dos cabos, reduzindo drasticamente a vida útil dos

equipamentos (STADTMANN; RASHEED,2024). Monitorar a temperatura e a umidade relativa é, portanto, fundamental para prevenir danos silenciosos e evitar manutenções corretivas emergenciais.

Nesse sentido, outra variável crítica vem a ser a velocidade do vento, fiscalizada por anemômetros instalados na parte superior da turbina. Caso a medição da velocidade apresente valores elevados, acima de 25m/s, as turbinas entram em modo de proteção, interrompendo a operação a fim de evitar sobrecargas nas pás, fadiga estrutural e danos no gerador. Um sistema embarcado ligado a um modelo gêmeo digital proporciona a antecipação dessas condições extremas, facilitando a realização das manutenções programadas no decorrer de janelas climáticas seguras e economicamente viáveis.

A utilização da plataforma Wokwi propicia simulações confiáveis desses circuitos anteriormente à instalação em campo, contribuindo para o desenvolvimento e testes de soluções embarcadas. Ao integrar esses dados com um gêmeo digital é possível prever falhas, ajustar parâmetros operacionais dinamicamente e otimizar o ciclo de vida e durabilidade dos componentes. Diante do exposto, este artigo exhibe uma proposta de monitoramento inteligente para parques eólicos *offshore*, embasado na integração de sistemas embarcados e gêmeos digitais, com ênfase na coleta e análise contínua de variáveis ambientais e estruturais. A abordagem visa ampliar a confiabilidade operacional, reduzir custos de manutenção e favorecer uma gestão preditiva da infraestrutura eólica marítima.

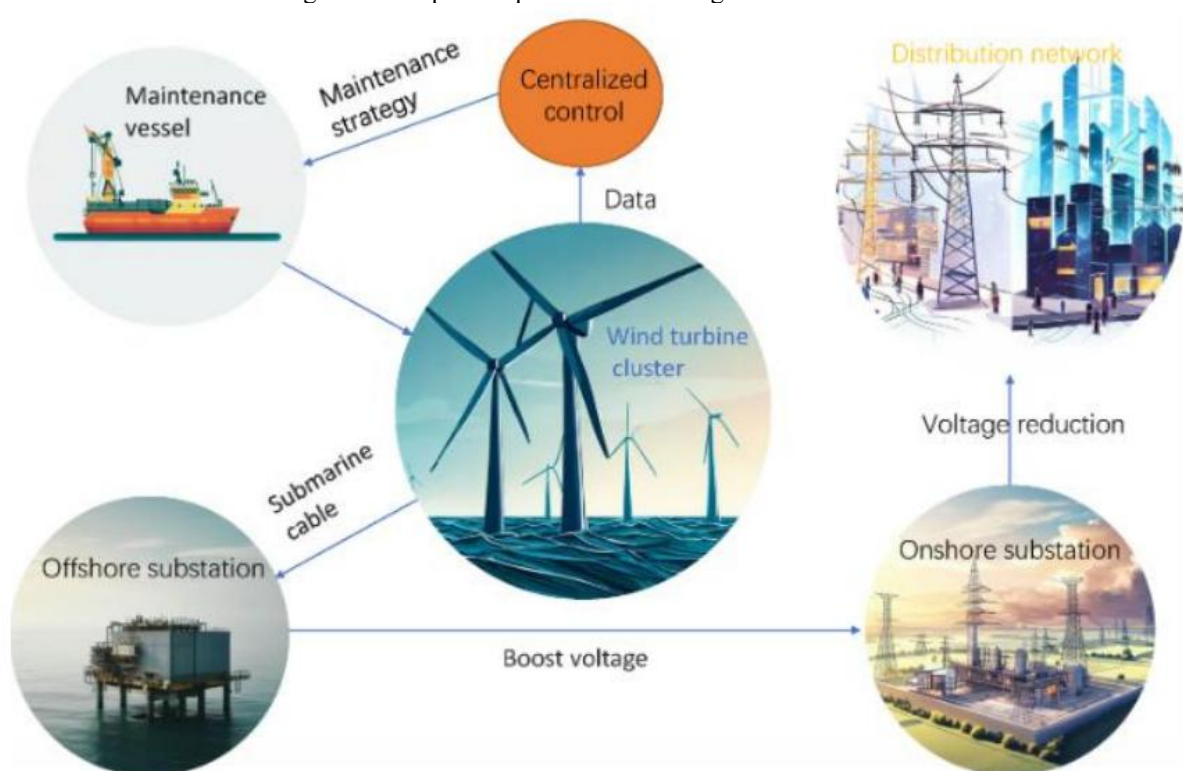
Esse artigo está estruturado em 5 seções. A seção 2 apresenta o referencial teórico abordando a capacidade de parques eólicos *offshore*, o funcionamento de uma usina de geração eólica offshore e aprofundando nos sistemas embarcados. A seção 3 descreve o método utilizado para alcance dos objetivos da pesquisa. A seção 4 apresenta os resultados e discussões da pesquisa. Por fim, na Seção 5 são detalhadas as principais conclusões do estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Recentemente a energia eólica tem se apresentado como uma das fontes mais promissoras para a diversificação da matriz energética global, sobretudo em áreas costeiras com ventos contínuos e com maior intensidade. De acordo com Jahangiri *et al.* (2020), parques eólicos offshore apresentam maior fator de capacidade em comparação com os *onshore*, devido à intensificação dos ventos.

A geração eólica é marcada pela transformação da energia cinética em elétrica por meio de um gerador, na offshore a turbina é localizada no mar tendo algumas mudanças devido esse tipo de implantação. A Figura 1 apresenta um esquema do funcionamento de uma usina de geração eólica offshore.

Figura 1 – Esquema operacional da energia eólica offshore



Fonte: YANG *et al.* (2023)

A operação em um ambiente offshore é marcada também por desafios ambientais únicos, como o impacto da salinidade e da alta umidade, que exigem soluções avançadas referente ao monitoramento e manutenção.

Gêmeos digitais são representações virtuais de ativos físicos que capturam dados em tempo real e possibilitam a análise preditiva do comportamento dos sistemas que compõem uma usina eólica offshore. Em parques eólicos offshore, esses modelos virtuais são usados para simular condições de operação e prever falhas, permitindo intervenções de manutenção proativas e, assim, aumentando a eficiência (PIMENTA *et al.*, 2020).

A utilização de gêmeos digitais tem apresentado resultados positivos, como no caso do projeto WindTwin, que aplica modelagem física e aprendizado de máquina para prever falhas em componentes críticos.

A utilização de sistemas embarcados baseados em sensores como o DHT22 e plataformas como Raspberry Pi Pico tem se mostrado eficaz no monitoramento de variáveis ambientais essenciais, como temperatura e umidade (LIBERATORE *et al.*, 2020). Esses sistemas permitem a coleta contínua de dados em tempo real, sendo cruciais para detectar condições adversas que possam prejudicar o desempenho das turbinas. Além disso, sua baixa custo e facilidade de implementação tornam essas soluções acessíveis para grandes parques eólicos das turbinas (BRUNEL UNIVERSITY LONDON, 2025).

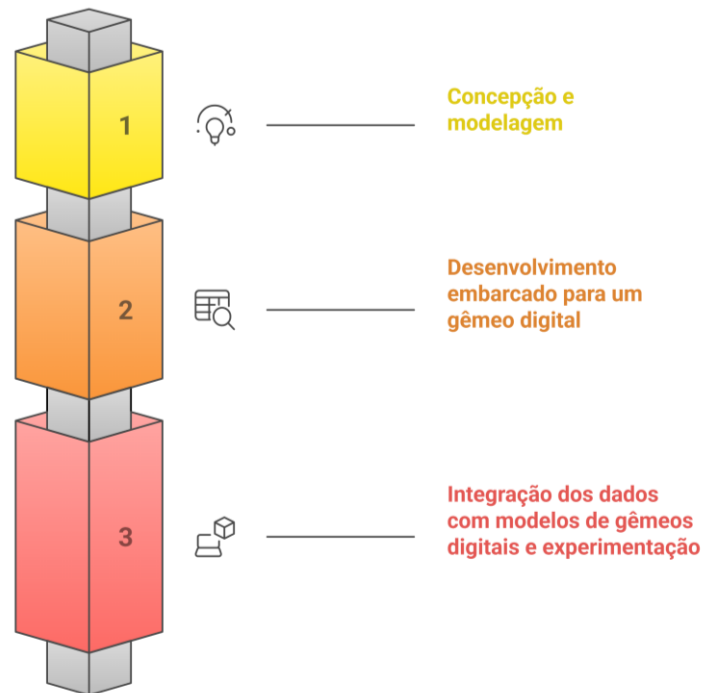
Recentes estudos estão apontando a eficácia dos gêmeos digitais utilizados para fins de manutenção preditiva de turbinas eólicas offshore. Pimenta *et al.* (2020) utilizam Unity3D e OPCUA para antecipar as falhas em componentes mecânicos, esse estudo otimiza o tempo de ação nas intervenções aumentando assim a eficiência da operação. Nas turbinas eólicas flutuantes, Stadtmann e Rasheed (2024) criaram a proposta de um gêmeo digital que emprega aprendizado não supervisionado para detectar anomalias antes que falhas ocorram, melhorando a confiabilidade e reduzindo custos de manutenção. Além disso, a integração de sensores com dispositivos lógicos programáveis tem sido explorada para monitoramento ambiental.

Esses sistemas de baixo custo permitem a coleta contínua de dados de temperatura, umidade, velocidade dos ventos e outros fatores ambientais que são fundamentais para a detecção de condições adversas que possam afetar o desempenho das turbinas. Esses estudos trazem a tona o potencial dos gêmeos digitais quando combinados a tecnologias de economicamente viáveis no aprimoramento de estudos, manutenção e operação de parques eólicos offshore.

3. METODOLOGIA

A metodologia do estudo segue uma abordagem que se divide em três etapas principais: i) Concepção e modelagem de um esquema de protótipo; ii) desenvolvimento de um sistema embarcado para um gêmeo digital; e, iii) integração dos dados coletados com modelos de gêmeos digitais e experimentação (Figura 2).

Figura 2 – Procedimento da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria (2025).

i) **Concepção e modelagem**

A primeira delas trata-se da concepção da ideia central e modelagem de um esquema de protótipo.

ii) **Desenvolvimento embarcado para um gêmeo digital**

Após essa compreensão é desenvolvido um sistema embarcado para um gêmeo digital que irá simular as condições e parâmetros do ambiente real no meio virtual e para validação da metodologia do uso de sistemas embarcados auxiliando gêmeos digitais em análises de sistemas eólicos offshore, são realizadas algumas medições e coleta de dados.

Com o intuito de viabilizar esse monitoramento em tempo real, sistemas embarcados baseados em microcontroladores como Raspberry Pi Pico, ESP32, ou Arduino MKR 1310 são empregados em conjunto com sensores de alta confiabilidade, além do DHT22 (temperatura e umidade), destacam-se os seguintes sensores:

- Anemômetros industriais (ex: YOUNG 05103) para velocidade e direção do vento;
- Acelerômetros e giroscópios (como MPU6050, LSM6DS3) para monitoramento de vibração, inclinação e movimento da torre;
- Sensores de pressão atmosférica (BMP280, BME280), úteis para entender variações de densidade do ar que influenciam a produção de energia;

- Sensores de corrente e tensão (ACS712, INA219), que torna possível avaliar o desempenho elétrico localmente.

iii) Integração dos dados coletados com modelos de gêmeos digitais e experimentação

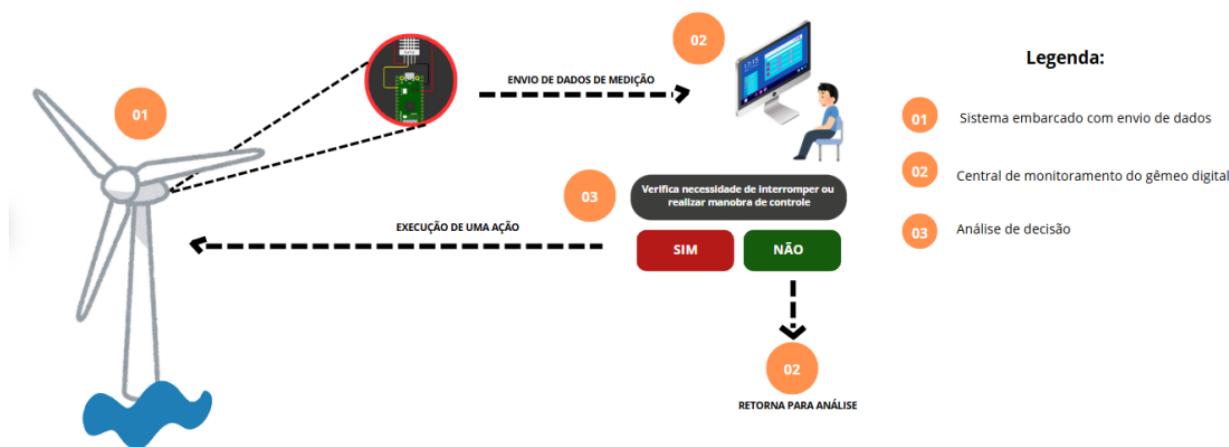
Por fim, a terceira etapa consistiu em integrar os dados coletados com modelos de gêmeos digitais, com o objetivo de visualização e a simulação do comportamento das turbinas em tempo real.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Concepção do projeto

A concepção do projeto surge com a ideia de um gêmeo digital de baixo custo para auxiliar no monitoramento de temperatura e umidade de componentes de uma torre de geração eólica offshore. Algumas ferramentas disponíveis no mercado oferecem uma boa visualização do projeto. O Autodesk Navisworks, BIM360 Team, Blender, Unity são algumas das plataformas de visualização e interação capazes de ajudar neste objetivo. Com o gêmeo digital os gestores podem analisar dados em tempo real, permitindo decisões mais precisas e tomar ações preventivas ou para melhorar a eficiência. No caso do monitoramento de temperatura interna e umidade na nacelle o controlador na central de monitoramento do parque eólico poderá tomar medidas necessárias para evitar danos a estrutura e perda de eficiência por níveis elevados de calor. Com essa ideia em mente foi gerado um esquema de funcionamento dessa coleta e envio de dados. A Figura 3 apresenta um esquema que demonstra essa interação.

Figura 3 – Esquema de monitoramento de temperatura e umidade.

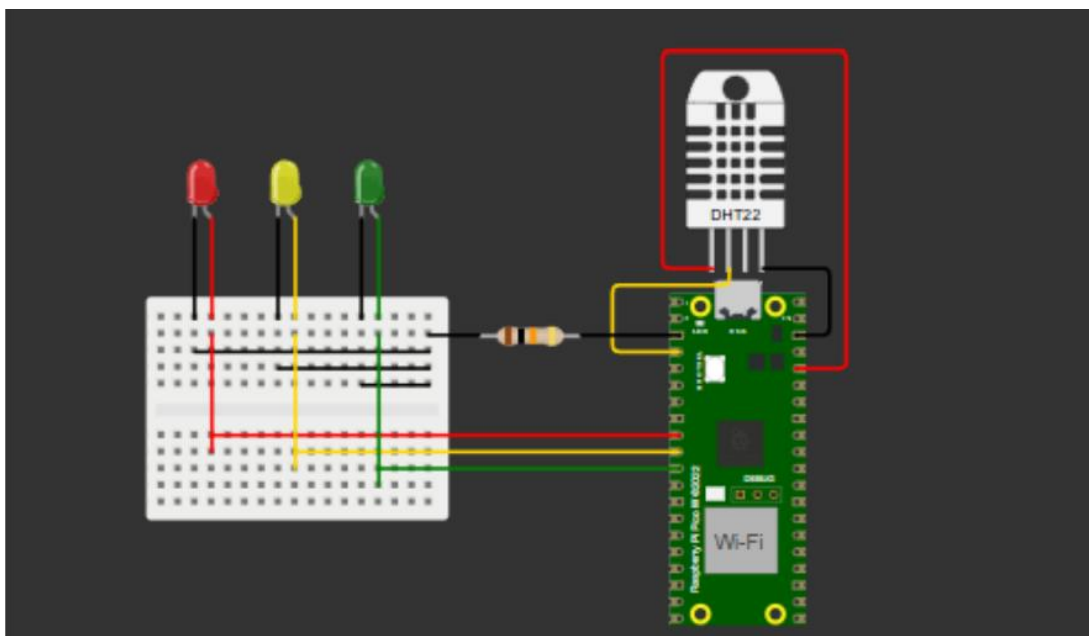


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2. Projeto do sistema embarcado

Tratando-se desse sistema, a etapa seguinte envolve o projeto do sistema embarcado baseando-se em sensores ambientais como o DHT22, o qual, será integrado ao microcontrolador Raspberry Pi Pico. O sistema deve coletar dados de temperatura e umidade, monitorando as condições ambientais dentro da nacela da turbina. Tal sistema passará pela simulação em uma plataforma de programação que aceite diferentes linguagens e placas programáveis, que se pode citar como sugestão a plataforma gratuita Wokwi. Na Figura 4 é possível observar um modelo realizado integrando o sensor DHT22 com a placa Raspberry Pi Pico.

Figura 4 – Simulação digital do sensor DHT22.



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3 Integração com gêmeo digital e experimentação

Em seguida, a etapa consiste em integrar os dados coletados com modelos de gêmeos digitais, permitindo a visualização e a simulação do comportamento das turbinas em tempo real. As ferramentas Unity3D, TwinCAT ou Blender podem ser utilizadas para criar um modelo virtual da turbina que responde aos dados dos sensores. Sobretudo, os programas que utilizam a filosofia BIM (*Building Information Modeling*), como exemplo podendo citar o Autodesk Revit, podendo ser utilizado para a modelagem 3D e parametrização.

O próximo passo envolve a validação do sistema em um ambiente simulado que replica as condições reais de um parque eólico offshore. O desempenho do sistema será

medido em termos de precisão, confiabilidade e tempo de resposta na detecção de falhas. Para esse último procedimento, uma placa como a Raspberry Pi Pico pode ser programada juntamente a um modelo físico sujeito a condições climáticas, sendo a coleta dos dados e validação a confirmação da eficiência do uso do sistema embarcado com sensores acessíveis para aquisição em um conjunto acoplado a um gêmeo digital para eólica offshore.

A Figura 5 apresenta parte do código programado para a coleta e envio de dados de temperatura, o algoritmo foi elaborado em linguagem C na plataforma VS Code.

Figura 5 – Parte do código em C do programa.

```
gpio_put(GPIO_RED_BUTTON, 0); // Garante que o botão esteja apagado
inicialmente

// Inicializa os LEDs
gpio_init(LED_G_PIN); // LED verde
gpio_set_dir(LED_G_PIN, GPIO_OUT);
gpio_put(LED_G_PIN, 0); // Garante que o LED verde esteja apagado
inicialmente

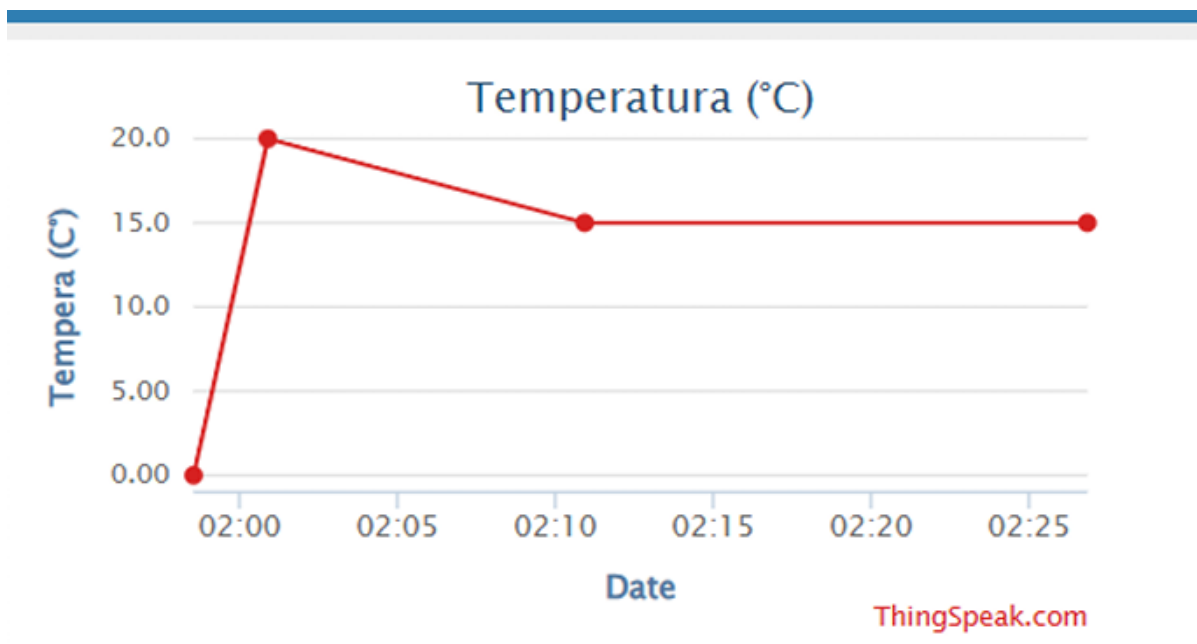
// Inicializar o display SSD1306 com I2C
i2c_init(i2c1, 400000); // Inicializa o I2C com uma taxa de 400 kHz
gpio_set_function(I2C_SDA, GPIO_FUNC_I2C);
gpio_set_function(I2C_SCL, GPIO_FUNC_I2C);
gpio_pull_up(I2C_SDA);
gpio_pull_up(I2C_SCL);

ssd1306_init();
```

Fonte: Elaboração própria (2025).

Por último, foram simulados valores de temperatura para a plataforma de uso gratuito ThingSpeak. No uso prático seria necessário a utilização de um sensor para capturar e enviar as informações de forma precisa. A Figura 6 apresenta o gráfico inicial da simulação feita.

Figura 6 – Gráfico teste gerado pelo Thingspeak.



Fonte: Thingspeak (2025).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, este artigo apresentou uma proposta de monitoramento de parques eólicos offshore, utilizando uma combinação de sistemas embarcados e gêmeos digitais. A integração dessas tecnologias é uma alternativa para a melhoria da eficiência operacional, como também aumento da segurança com recursos economicamente viáveis, visto que, ao monitorar variáveis ambientais críticas como umidade e velocidade do vento, o sistema proposto permite a manutenção preditiva e a realização de estudos que podem gerar uma redução significativa nos custos operacionais.

Um dos resultados obtidos foram os valores de temperatura simulados na plataforma de uso gratuito ThingSpeak. No uso prático, recomenda-se a utilização de um sensor para capturar e enviar as informações de forma precisa.

A abordagem metodológica que foi utilizada na pesquisa permitiu validar a proposta de um sistema de monitoramento inteligente para parques eólicos offshore. Considerando a fase de concepção e modelagem, a estruturação do protótipo virtual e a definição das variáveis essenciais proporcionaram uma boa ideia para o desenvolvimento das fases seguintes. Na elaboração do sistema embarcado, a implementação bem-sucedida do código que foi elaborado em linguagem C para ser utilizado na placa lógica Raspberry Pi demonstrou a viabilidade técnica e a eficiência no processamento de dados em um ambiente de baixo custo necessitando de adaptações para projetos com escala maior. Por fim, a realização da

integração das informações com meios integrantes de um gêmeo digital, evidenciada pela simulação em Wokwi e pela visualização de dados simulados de temperatura na plataforma ThingSpeak, permitiu inferir a capacidade do sistema em fornecer *insights* sobre as condições operacionais e estruturais das turbinas.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que integrar tecnologias embarcadas de baixo custo, como o baseado em Raspberry Pi, com os conceitos de um digital Twin representa uma alternativa promissora e escalável para o monitoramento de variáveis importantes em turbinas eólicas offshore.

A partir dos resultados alcançados com a experimentação apresentados neste estudo, surge a luz da investigação da confiabilidade dos dados comparados a dados de sistemas já em operação. A análise de outras variáveis, incluindo dados de vibração, ruído, umidade e corrosão podem abrir espaço para novos estudos como a possibilidade de correlação entre fatores e análises estatísticas.

REFERÊNCIAS

BRUNEL UNIVERSITY LONDON. **Wind turbine digital twin for monitoring and inspection**. Disponível em: <https://www.brunel.ac.uk/research/projects/wind-turbine-digital-twin-for-monitoring-and-inspection>. Acesso em: 11 maio 2025.

GARLICK, S.; *et al.* **The role of subsea substations in offshore wind**. Disponível em: <https://www.gceocean.no/news/posts/2023/september/the-role-of-subsea-substations-in-offshore-wind/>. Acesso em: 11 maio 2025.

AHANGIRI, M.; *et al.* **A new semi-empirical wind turbine capacity factor for maximizing annual energy and hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 45, n. 58, p. 33457–33469, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920313409>. Acesso em: 11 maio 2025.

LIBERATORE, M.; *et al.* **Reliability prediction of an offshore wind turbine gearbox**. Renewable Energy, v. 145, p. 2581–2591, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119304574>. Acesso em: 11 maio 2025.

PIMENTA, R.; *et al.* **Predictive digital twin for offshore wind farms**. Energy Informatics, v. 3, n. 1, p. 1–13, 2020. Disponível em: <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-023-00257-4>. Acesso em: 11 maio 2025.

STADTMANN, F.; RASHEED, A. **Diagnostic digital twin for anomaly detection in floating offshore wind energy**. In: ASME 2024 43rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2024. Disponível em:

<https://www.northwindresearch.no/digital-twin-and-asset-management/>. Acesso em: 11 maio 2025.

YANG, Cheng; JIA, Jun; HE, Ke; XUE, Liang; JIANG, Chao; LIU, Shuangyu; ZHAO, Bochao; WU, Ming; CUI, Haoyang. **Comprehensive Analysis and Evaluation of the Operation and Maintenance of Offshore Wind Power Systems: A Survey**. *Energies*, Basel, v. 16, n. 14, art. 5562, 23 jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16145562>. Acesso em: 11 maio 2025