

Gêmeo digital de um protótipo de motor a jato em escala: integração de simulação e controle em tempo real

Carlos Alexandre Luciano Amancio, 061240048@faculdade.cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Paulo Cesar da Silva Emanuel, pro8808@cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um aplicativo que apresente o conceito de um gêmeo digital para um protótipo de motor a jato em escala, integrando monitoramento, simulação e controle em tempo real. O estudo fundamenta-se nos conceitos da Indústria 4.0 e nos princípios de gêmeos digitais, que permitem a criação de réplicas virtuais de sistemas físicos capazes de fornecer dados, previsões e suporte à tomada de decisão. A metodologia adotada compreende a utilização de um modelo de motor a jato impresso em 3D, acoplado a um motor elétrico e instrumentado com sensores de rotação, temperatura, corrente elétrica, vibração e pressão, de forma a permitir a obtenção de dados críticos do sistema. A interface de supervisão e controle foi desenvolvida por aplicativo, permitindo o acionamento bidirecional entre o protótipo físico e o ambiente digital, incluindo botões de comando, indicadores de status, gráficos e visualização em tempo real das variáveis. Além disso, foram implementadas funções preditivas, como aviso de manutenção preventiva, análise de eficiência energética e alertas de falha por excesso de temperatura ou vibração. Espera-se como principais resultados a integração físico-virtual e a demonstração do potencial de aplicação de gêmeos digitais em ambientes acadêmicos, industriais e educacionais, contribuindo para a disseminação de práticas relacionadas à automação, simulação e monitoramento inteligente.

Palavras-chave: Motor. Gêmeo. Controle. Sensores. Interface.

Introdução

O avanço das tecnologias de engenharia de controle e automação tem permitido o desenvolvimento de sistemas cada vez mais complexos, nos quais a integração entre protótipos físicos e suas representações digitais desempenha um papel central na melhoria do desempenho, confiabilidade e eficiência operacional (FRANCO, 2024). Em particular, os motores a jato têm se tornado um campo promissor para experimentos de controle, monitoramento e simulação, visto que estes sistemas apresentam dinâmicas rápidas e exigem precisão elevada no gerenciamento de variáveis críticas, como pressão, temperatura, velocidade rotacional e consumo de combustível (MASCHIETTO, 2014).

Apesar dos significativos progressos obtidos com softwares de simulação e modelagem, ainda persiste o desafio de reproduzir de forma fidedigna o comportamento real de um motor em tempo real, permitindo uma análise contínua que sirva tanto para ajustes imediatos quanto para predição de falhas ou otimização de desempenho. (TIAN, 2020).

Neste contexto, a proposta do presente trabalho consiste na implementação de um gêmeo digital de um motor a jato em escala, integrando um protótipo físico construído por meio de impressão 3D, sensores para coleta de dados em tempo real e um aplicativo móvel que possibilita controle bidirecional entre o protótipo e sua réplica digital.

O conceito de gêmeo digital, fundamental para este estudo, consiste na criação de uma representação virtual precisa de um sistema físico, capaz de monitorar e antecipar seu comportamento mediante simulações, análises preditivas e ajustes operacionais, gerando informações valiosas para a tomada de decisão em ambientes de engenharia complexos (QIAN, 2022).

Ao aplicar este conceito a um motor a jato em escala, busca-se demonstrar a viabilidade de sincronização entre o mundo físico e digital, permitindo não apenas monitoramento remoto e visualização de dados, mas também a implementação de estratégias de controle que respondam de maneira dinâmica às alterações do sistema.

O referencial teórico deste trabalho abrange diversos conceitos interligados. Primeiramente, abordam-se fundamentos de gêmeos digitais, que incluem modelagem matemática, integração de sensores, transmissão de dados em tempo real e processamento de informações para simulação e previsão de comportamento. Em segundo lugar, são considerados os princípios da automação e controle de sistemas dinâmicos, englobando técnicas de aquisição de dados, comunicação entre dispositivos e protocolos de controle bidirecional, essenciais para assegurar que o protótipo físico e sua contraparte digital permaneçam sincronizados. Adicionalmente, são analisadas tecnologias de prototipagem rápida, especialmente a impressão 3D, que permite a fabricação precisa de componentes complexos e a rápida iteração de designs experimentais, tornando possível testar diferentes configurações de motor e avaliar seu desempenho de maneira segura e econômica.

Figura 1 – Representação ilustrativa de gêmeo digital de motor a jato



Fonte: A voz da Indústria (2022)

Metodologia

O desenvolvimento do presente trabalho foi estruturado em etapas integradas e complementares, contemplando desde o projeto físico do protótipo até a validação do gêmeo digital em tempo real.

Inicialmente, foi realizado o projeto do motor a jato em escala utilizando o software de modelagem 3D Inventor, priorizando fidelidade geométrica em relação a motores reais, resistência mecânica adequada à operação experimental e adaptações para instalação de sensores e suportes estruturais.

A turbina foi fabricada por impressão 3D em PLA, contemplando rotor, estator e elementos de fixação, garantindo alinhamento, segurança e funcionalidade mínima para testes controlados.

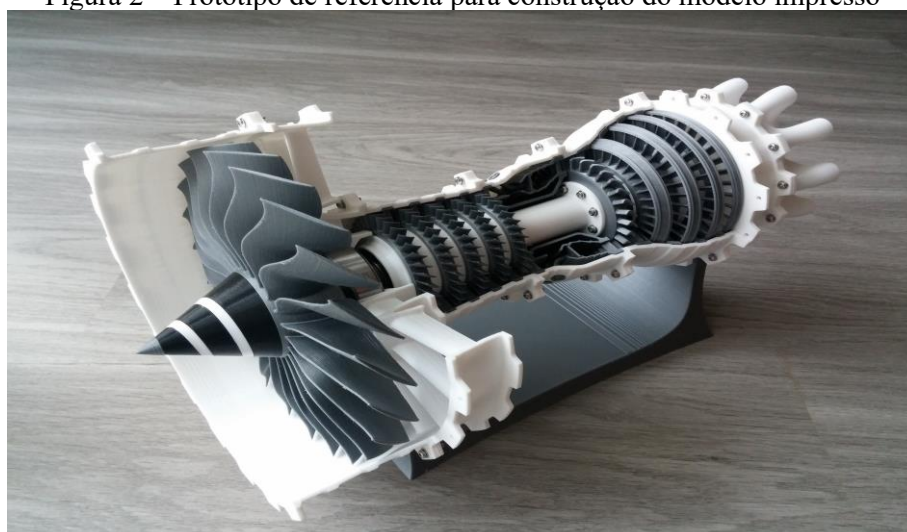
Na etapa seguinte, foram integrados sensores de rotação, temperatura e pressão, posicionados estrategicamente no protótipo para fornecer dados precisos do funcionamento do motor. O sensor de rotação monitorou a velocidade angular do rotor, o sensor de temperatura registrou variações térmicas do motor e o sensor de pressão mediu a pressão do fluxo de ar gerado pela turbina. Todos os sensores foram calibrados previamente, e os sinais adquiridos pelo microcontrolador ESP32 foram processados de forma que fosse garantida a confiabilidade e continuidade da comunicação.

Paralelamente, foi implementado o gêmeo digital no aplicativo, consistindo em um modelo virtual capaz de replicar em tempo real o comportamento do motor físico com base nos dados recebidos. O sistema permite controle bidirecional, possibilitando o envio de comandos pelo aplicativo para ajuste de parâmetros operacionais, como velocidade, enquanto o estado atualizado do protótipo é refletido instantaneamente no modelo digital.

A sincronização entre protótipo físico e gêmeo digital foi realizada com programação dedicada no microcontrolador, utilizando timers, filtros e tratamento de erros de comunicação, assegurando estabilidade do sistema e confiabilidade na transmissão de dados.

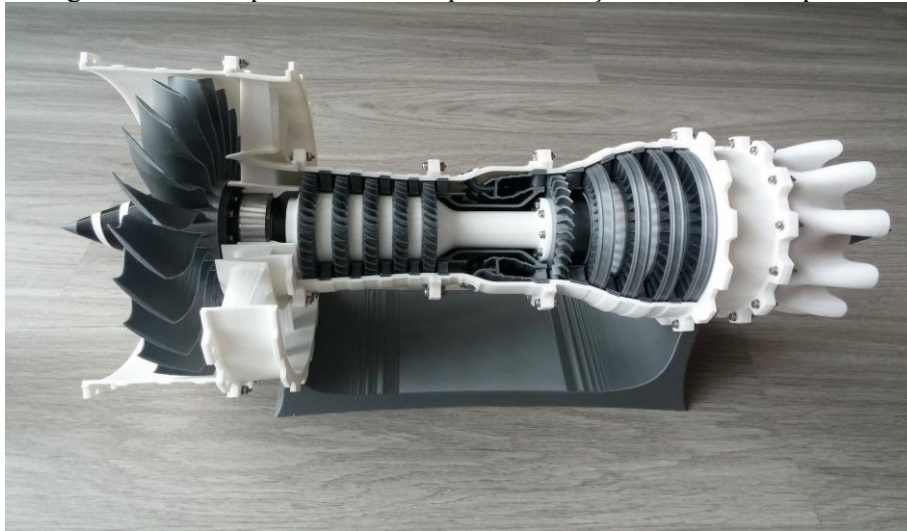
Para validação experimental, foram realizados testes controlados, nos quais variações de rotação, temperatura e pressão foram monitoradas, registradas e comparadas com os valores simulados no gêmeo digital. Gráficos gerados pelo aplicativo permitiram análise de tendências e previsões de comportamento. Esta metodologia proporciona a integração completa entre protótipo físico e gêmeo digital, demonstrando a aplicabilidade dos conceitos da Indústria 4.0 em engenharia de controle e automação, promovendo monitoramento contínuo, simulação precisa, controle remoto em tempo real e fornecendo base sólida para futuras pesquisas, desenvolvimento de sistemas mais complexos e aprimoramento da confiabilidade e da precisão em projetos.

Figura 2 – Protótipo de referência para construção do modelo impresso



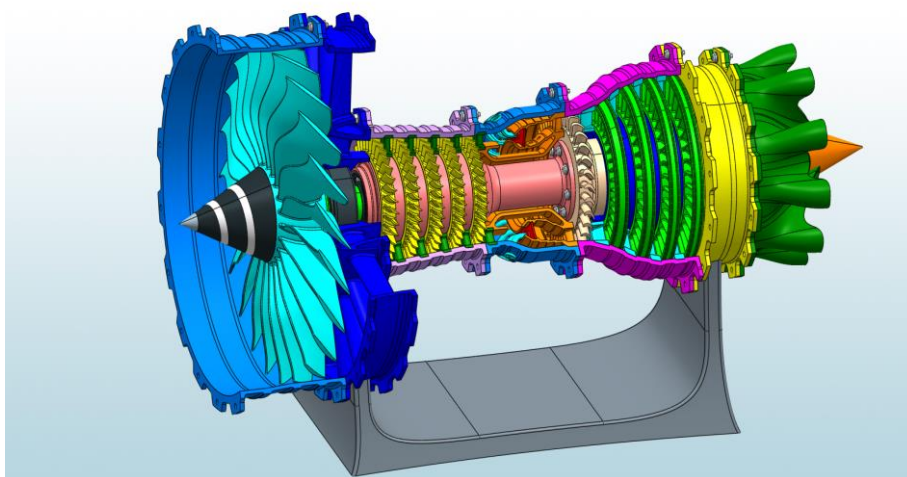
Fonte: Thingiverse (2020)

Figura 3 – Protótipo de referência para construção do modelo impresso



Fonte: Thingiverse (2020)

Figura 4 – Modelagem 3D para impressão 3D



Fonte: Thingiverse (2020)

Resultados preliminares

Os resultados preliminares do projeto indicam que a implementação do gêmeo digital permite o monitoramento em tempo real dos principais parâmetros do motor, como velocidade de rotação, temperatura e vibração, por meio de sensores integrados à turbina impressa em 3D. Foi observada a correspondência entre os dados coletados fisicamente e os dados simulados no aplicativo, evidenciando a capacidade do protótipo em refletir o comportamento real do motor. A comunicação bidirecional entre o protótipo físico e o aplicativo demonstrou efetividade na execução de comandos remotos, permitindo ajustes na velocidade de rotação e registro imediato das respostas do motor. Além disso, os gráficos gerados no aplicativo mostraram tendências consistentes, possibilitando análises preditivas básicas sobre o desempenho do sistema. Esses resultados preliminares confirmam a viabilidade do conceito de gêmeo digital aplicado, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de futuras funcionalidades, como otimização de desempenho e manutenção preditiva.

Referências

MASCHIETTO, Victor Camilo Levartoski. Modelagem das curvas de rendimento de turbinas aeronáuticas turbofan e turbojato. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Ponta Grossa, 2014.

Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16354/1/PG_DAMEC_2014_2_06.pdf. Acesso em: 08 ago. 2025.

QIAN, C.; LIU, X.; RIPLEY, C.; QIAN, M.; LIANG, F.; YU, W. Digital Twin—Cyber replica of physical things: architecture, applications and future research directions. *Future Internet*, Basel, v. 14, n. 2, p. 64, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fi14020064>. Acesso em: 10 ago. 2025.

RYALAT, M.; FRANCO, E.; ELMOAQET, H.; ALMTIREEN, N.; AL-REFAI, G. The integration of advanced mechatronic systems into Industry 4.0 for smart manufacturing. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 19, p. 8504, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16198504>. Acesso em: 15 ago. 2025.

TIAN, Yuan; CHAO, Manuel Arias; KULKARNI, Chetan; GOEBEL, Kai; FINK, Olga. Real-time model calibration with deep reinforcement learning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Oxford, v. 165, 108284, 2022. ISSN 0888-3270. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108284>. Acesso em: 14 ago. 2025.