



PROPOSTA DE UM ROTEIRO TÉCNICO DIGITAL PARA DESMONTAGEM E MONTAGEM DO MOTOR DE AERONAVE TFE-731

PROPOSAL FOR A DIGITAL TECHNICAL GUIDE FOR DISASSEMBLY AND ASSEMBLING THE TFE-731 AIRCRAFT ENGINE

PAULO SÉRGIO ANTÔNIO | paulo.antonio01@fatec.sp.gov.br | FATEC SÃO JOSÉ DOS CAMPOS/SP

JESSÉ GERMANO SÉRIO | jesse.serio@fatec.sp.gov.br | FATEC SÃO JOSÉ DOS CAMPOS/SP

GERSON CARLOS FAVALLI | gc.favalli@fatec.sp.gov.br | FATEC SÃO JOSÉ DOS CAMPOS/SP

SARDES APARECIDA BATISTA | sardes.batista@cps.sp.gov.br | FATEC SÃO JOSÉ DOS CAMPOS /SP

ROQUE ANTÔNIO DE MOURA | roque.amoura@unitau.br | UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ /SP

RESUMO

O presente trabalho tem como tema o desenvolvimento de um roteiro técnico digital voltado à desmontagem e montagem do motor de aeronave turbofan TFE-731, com foco na aplicação prática dos conhecimentos adquiridos na disciplina de manutenção de propulsores aeronáuticos. O principal objetivo é proporcionar uma referência sistematizada e didática que possa ser utilizada por técnicos e alunos da área aeronáutica, otimizando os processos de manutenção do referido motor. A metodologia adotada baseia-se na análise detalhada de manuais técnicos do fabricante, complementada por observações práticas e registros fotográficos realizados durante a execução das atividades em ambiente de oficina. O procedimento de desmontagem foi estruturado respeitando rigorosamente a sequência lógica e segura indicada pelos manuais, incluindo a remoção do Fan dos módulos do compressor e da câmara de combustão, bem como o manuseio adequado das ferramentas específicas exigidas para cada etapa. Já a montagem seguiu a ordem inversa, com ênfase no correto torqueamento de parafusos, alinhamento de componentes e testes de continuidade e rotação livre. Ao longo do processo, foram observadas boas práticas de segurança e controle de FOD (*Foreign Object Damage*), além da verificação do desgaste de peças e avaliação de sua reutilização conforme critérios de limite de uso. Como resultado, o trabalho entregou um roteiro claro, ilustrado e tecnicamente embasado, que pode ser utilizado com seu anexo como material de apoio tanto em treinamentos quanto na rotina de oficinas homologadas.

Palavras-chave: Roteiro técnico; Desmontagem e montagem; Motor turbofan TFE-731; Manutenção de propulsores aeronáuticos.

ABSTRACT

This work focuses on the development of a digital technical guide for the disassembly and assembly of the TFE-731 turbofan aircraft engine, emphasizing the practical application of knowledge acquired in the aeronautical propulsion maintenance course. The main objective is to provide systematized and didactic reference that can be used by technicians and students in the aeronautical field, optimizing the maintenance processes of this engine. The methodology adopted is based on a detailed analysis of the manufacturer's technical manuals, complemented by practical observations and photographic records made during the execution of activities in a workshop environment. The disassembly procedure was structured strictly respecting the logical and safe sequence indicated by the manuals, including the removal of the fan from the compressor modules and the combustion chamber, as well as the proper handling of the specific tools required for each step. The assembly followed the reverse order, with emphasis on the correct torque of screws, alignment of components, and continuity and free rotation tests. Throughout the process, good safety practices and FOD (*Foreign Object Damage*) control were observed, in addition to verifying the wear of parts and evaluating their reuse according to usage limit criteria. As a result, the work delivered a clear, illustrated, and technically sound roadmap, which can be used with its appendix as support material both in training and in the routine of certified workshops.

Keywords: Technical roadmap; Disassembly and assembly; TFE-731 turbofan engine; Aircraft engine maintenance.

1. INTRODUÇÃO

A atividade de desmontagem e montagem de motores é complexa e requer a máxima atenção. Por meio de um roteiro de desmontagem e montagem detalhando passo a passo e com orientação técnica, essa atividade torna-se menos difícil de ser executada assegurando que a atividade de manutenção ocorra de forma correta, precisa e aprendizado seguro (Andrade¹; Moura; Oliveira, 2026).

Nesse sentido, um motor aeronáutico *turbofan* de codificação comercial TFE-731 que revolucionou a aviação executiva, impulsionando jatos de médio porte com sua eficiência e confiabilidade (Benevides *et al.*, 2025).

Como qualquer motor aeronáutico, tem na sua manutenção uma componente crítica para garantir sua operação sem falhar, ou seja, exige uma manutenção criteriosa e bem-sucedida com a execução correta e precisa das atividades de desmontagem e montagem respeitando os limites cognitivo dos discentes (Moura *et al.*, 2024; Andrade² *et al.*, 2026).

Uma das principais características do TFE-731 é o seu design modular, ou seja, o motor é construído em seções separadas que facilitam a manutenção e reparo, desde que o profissional esteja habilitado para a execução da atividade de desmontagem e montagem, como por exemplo, desmontagem das vinte e duas pás do ventilador, cinquenta e duas palhetas guias e os dez suportes que são acionados por uma caixa de engrenagens acoplado a um compressor de cinco estágios com quatro axiais e um movimento radial responsável pelo bom desempenho e uma relação empuxo-peso superior que possibilita decolagem com subida mais rápida e menor taxa de emissão de poluentes e ruídos (Ain Online, 2022; Honeywell¹, 2025).

Diante da necessidade de uma manutenção precisa dos motores aeronáuticos surge a necessidade de profissionais qualificados e bem treinados além do conhecimento técnico atualizado quanto aos procedimentos e regulamentações de manutenção (ANAC, 2019).

Nesse sentido, a partir de uma solicitação desafiadora do Orientador deste trabalho, a motivação e justificativa é elaborar um roteiro de desmontagem e montagem do motor TFE-731 que possa ser utilizado como material de estudos e apoio docente no processo ensino-aprendizado em aulas práticas e como um material de consulta.

O desenvolvimento de um roteiro técnico para desmontagem e montagem do motor TFE-731 detalham os procedimentos passo a passo, com ênfase nas ferramentas necessárias e na sequência lógica das operações, visando garantir a segurança e eficiência durante os processos de manutenção. A pesquisa realizada baseou-se em fontes específicas do setor aeroespacial, como manuais técnicos e catálogos de fabricantes. Estimativas indicam que, em países industrializados, as perdas associadas à falta correta de manutenção com fenômenos como a corrosão variam entre 1,5% e 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB), o que demonstra a relevância do estudo e da prevenção desse fenômeno (Hill; Peterson, 1992; Gentil, 2011).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Motor Turbofan TFE731

A Honeywell² (2023) fornece um manual técnico abrangente do motor TFE731-5-5AR, que serve como referência principal para manutenção, especificações e funcionamento do motor. O manual é dividido em seções que abordam aspectos críticos como os sistemas de ignição, controle de combustível e diagnóstico de falhas.

Este material foi utilizado como base para o desenvolvimento de procedimentos operacionais específicos no contexto de manutenção e operação do motor TFE-731.

De acordo com Rolls-Royce (1996), em sua obra *The Jet Engine*, o autor fornece uma visão detalhada sobre os princípios de operação dos motores a jato, com ênfase nas tecnologias e inovações que permitiram o avanço das turbinas modernas.

O livro aborda os fundamentos do design e da operação de motores a jato, incluindo a análise termodinâmica e os conceitos de eficiência energética, sendo fundamental para entender o desenvolvimento e a evolução do motor *turbofan* TFE-731 (AMTP, 1998).

Ao longo das décadas, o TFE-731 foi aprimorado para atender as crescentes exigências do setor aeronáutico, incorporando avanços em materiais, aerodinâmica e controle eletrônico, garantindo maior eficiência energética, redução de emissões e melhor desempenho em altitude conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 | Linha evolutiva do motor turbofan TFE-731



Fonte: Adaptado pelos Autores (2025).

O motor TFE-731 é um *turbofan* desenvolvido pela *Garrett Airesearch*, uma divisão da Honeywell Aerospace, e foi certificado em agosto de 1972. Desde então, o motor passou por diversas evoluções, com mais de 13.000 unidades produzidas e uma marca impressionante de 100 milhões de horas de voo. Amplamente utilizado em aeronaves da aviação executiva, como o *Learjet 70/75*, *Dassault Falcon 900* e *Gulfstream G150*, o TFE-731 destaca-se pela eficiência operacional, confiabilidade e baixo custo de manutenção (Honeywell², 2023).

2.1.1 Primeira Geração – Certificação em 1972

A primeira geração do TFE-731, certificada em 1972, marcou a entrada da *Garrett Airesearch* no mercado de jatos executivos leves. O motor foi projetado como um *turbofan* de baixo *bypass*, com empuxo variando entre 3.200 e 3.700 libras-força (lbf), dependendo da versão.

Essa configuração proporcionava alta eficiência em altitudes elevadas, mantendo baixo consumo específico de combustível e ruído reduzido em comparação aos turbojatos da época. O *Learjet 35* foi uma das primeiras aeronaves equipadas com o TFE-731, consolidando sua reputação pela confiabilidade e desempenho superior.

2.1.2 Segunda Geração – TFE-731-2 e TFE-731-3 (Décadas de 1970 e 1980)

Durante as décadas de 1970 e 1980, surgiram as versões TFE-731-2 e TFE-731-3, que apresentaram melhorias no compressor, na turbina e no sistema de combustão. Essas modificações resultaram em maior empuxo, menor consumo de combustível e melhor desempenho em voo de cruzeiro (Brasil, 2025).

O modelo TFE-731-2 incorporou avanços nos materiais da turbina, aumentando a resistência térmica e a durabilidade dos componentes. Já o TFE-731-3 foi otimizado para aeronaves de maior porte, como o *Dassault Falcon 900*, oferecendo empuxo adicional e ciclo termodinâmico mais eficiente.

Segundo De Moura *et al.* (2025) é preciso se preocupar com a saúde e integridade dos profissionais. Além disso, houve aprimoramento nos processos de injeção de combustível, promovendo combustão mais limpa e redução das emissões de poluentes.

2.1.3 Terceira Geração – TFE-731-4 (Década de 1990)

A terceira geração, introduzida na década de 1990, trouxe o TFE-731-4, destinado a aeronaves de médio porte, como o Gulfstream G150 e o Learjet 60. Nessa fase, o projeto do motor passou por significativas melhorias aerodinâmicas e estruturais, incluindo a adoção de um compressor axial e centrífugo otimizado, que elevou a eficiência de compressão e reduziu o consumo específico de combustível.

O motor também passou a cumprir normas mais rigorosas de emissão sonora (FAA Stage 3), incorporando tratamentos acústicos e modificações no fan para atenuação de ruído. Outro avanço foi a implementação progressiva do sistema de controle eletrônico FADEC (*Full Authority Digital Engine Control*), que permitiu otimização automática do desempenho, melhor gerenciamento de falhas e redução de custos operacionais.

2.1.4 Evoluções Recentes e Sustentabilidade (2000 em diante)

A partir dos anos 2000, o foco das inovações concentrou-se na confiabilidade, manutenção e sustentabilidade ambiental. A Honeywell introduziu sensores de monitoramento contínuo, permitindo manutenção preditiva baseada em dados reais de operação.

Programas como o MSP (*Maintenance Service Plan*) passaram a oferecer suporte completo de manutenção, maximizando a disponibilidade e reduzindo o tempo de inatividade das aeronaves.

Em resposta às crescentes preocupações ambientais, o TFE-731 passou a ser compatível com Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF), podendo operar com misturas de até 50% sem prejuízo de desempenho. Essas atualizações mantiveram o TFE-731 como um dos motores *turbofan* mais duradouros e versáteis da aviação executiva moderna conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 | Resumo das principais mudanças técnicas do motor turbofan TFE-731

Aspecto	Evolução e mudança técnica
Empuxo	Inicial 3.200 - 3.700 lbf → até 4.000 lbf nas versões recentes
Compressão	Melhorias em compressor axial e centrífugo
Combustível	Injeção otimizada e compatibilidade com SAF
Controle	Adição gradual de FADEC
Ruído e emissões	Redução progressiva, atendendo normas FAA Stage 3
Manutenção e vida útil	Intervalos mais longos, monitoramento contínuo (MSP)

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

2.2 Inovações tecnológicas e avanços de desempenho

Diversas melhorias tecnológicas foram implementadas ao longo da vida útil do motor TFE-731. O modelo TFE731-50R, por exemplo, incorporou mais de 70 inovações significativas, como a introdução de tecnologias aprimoradas no núcleo do motor e carretel de baixa pressão, que aumentaram a eficiência térmica e reduziram o consumo de combustível. Além disso, a introdução do controle eletrônico digital do motor (DEEC) resultou em maior precisão no gerenciamento do desempenho do motor (Honeywell², 2023).

A versão mais recente, o TFE731-60, oferece 5.000 libras de empuxo na decolagem, representando um aumento de 12% na eficiência de combustível em comparação aos modelos anteriores. Tais melhorias, além de incrementar o desempenho, também contribuem para a sustentabilidade, com a adoção de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF), que já podem ser utilizados em até 50% sem modificações no motor (*Aviation Week*, 2023).

2.3 Manutenção e suporte ao motor TFE-731

A manutenção do motor TFE-731 é um fator essencial para garantir sua performance, segurança e prolongamento da vida útil. A Honeywell Aerospace disponibiliza um amplo suporte técnico por meio de uma rede global de centros de serviço certificados, com destaque para o programa MSP (*Maintenance Service Plan*).

O plano oferece monitoramento contínuo do estado dos motores, permitindo a detecção preditiva de falhas antes que se tornem problemas críticos. Além disso, a Honeywell implementou um programa de incentivo baseado no uso do MSP, que recompensa operadores que mantêm o motor em condições ideais de operação. Essa iniciativa visa reduzir o consumo de combustível e aumentar a durabilidade dos componentes, reforçando a filosofia de manutenção preditiva e sustentável (Honeywell², 2023).

De acordo com *Duncan Aviation* (2023), a manutenção programada do motor TFE-731 é estruturada em dois grandes marcos de inspeção que seguem cronogramas rígidos e são executadas conforme diretrizes dos manuais de manutenção da Honeywell e Service Bulletins (SBs) aplicáveis.

- Major Periodic Inspection (MPI)
- Compressor Zone Inspection (CZI)

2.3.1 Major Periodic Inspection (MPI)

A MPI (*Major Periodic Inspection*) é uma inspeção periódica maior, com foco principal nos componentes da seção quente do motor, tais como a turbina, câmara de combustão e exaustor. O objetivo é identificar desgaste, corrosão e fissuras nos componentes submetidos a altas temperaturas e tensões mecânicas, garantindo que o motor opere dentro dos limites de segurança estabelecidos.

2.3.2 Compressor Zone Inspection (CZI)

A CZI (*Compressor Zone Inspection*) é uma inspeção mais abrangente e complexa, envolvendo a desmontagem completa da zona do compressor (de baixa e alta pressão).

Essa etapa permite uma análise detalhada da integridade estrutural, além de avaliação dos estágios do compressor axial, centrífugo e mancais (Kroes; Wild; Loughhead, 2012; Merçon *et al.*, 2004).

Trata-se de uma das fases mais críticas do ciclo de manutenção, pois identifica microfissuras e deformações que podem evoluir para falhas catastróficas se não forem corrigidas.

2.4 Sustentabilidade e o futuro do motor TFE-731

Com a crescente demanda por soluções mais sustentáveis, a Honeywell tem trabalhado para adaptar o motor TFE731 a combustíveis de aviação sustentáveis (SAF).

O motor já pode operar com até 50% de SAF sem modificações, e a empresa está em processo de certificação para permitir o uso de até 100% de SAF, contribuindo significativamente para a redução das emissões de carbono na aviação (Honeywell², 2023).

Além da compatibilidade com SAF, o TFE-731 tem recebido melhorias em eficiência e performance. Versões mais recentes, como o TFE-731-50R, incorporam avanços no núcleo do motor, no sistema de baixa pressão (*low-pressure spool*), no controle eletrônico digital (*Digital Electronic Engine Control – DEEC*) e no conjunto de nacela e reversor de empuxo, resultando em reduções de até 8% no consumo específico de combustível, dependendo da altitude de operação (Honeywell³, 2023).

Segundo Moura e Moura (2019) as melhorias tecnológicas contribuem não apenas para a redução de custos operacionais, mas também para menores emissões de poluentes, incluindo CO₂ e NO_x. A Honeywell também tem investido em tecnologias emergentes voltadas à sustentabilidade, como diagnósticos em tempo real, monitoramento preditivo e programas de incentivo baseados no uso (*usage-based programs*), que recompensam operadores por práticas de voo mais eficientes (Honeywell³, 2023).

Outra frente de inovação envolve combustores mais limpos, injetores de combustível avançados e arquiteturas de motores de próxima geração, visando atender regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas. No âmbito da cadeia de suprimentos, a Honeywell, por meio da tecnologia UOP *Ecofining*, tem atuado na produção de SAF a partir de matérias-primas renováveis e resíduos, como óleo de cozinha usado e gordura animal. Empresas parceiras, como a Repsol, já projetam produzir até 240 mil toneladas métricas anuais de SAF e diesel renovável utilizando essa tecnologia (Callister; Rethwisch, 2016; Cumpsty; Heyes, 2015).

Tais iniciativas são fundamentais para garantir escala e disponibilidade do combustível sustentável, considerado um dos maiores desafios para sua adoção em larga escala (Oliveira Junior *et al.*, 2025; Pinheiro, 2023). A combinação de tecnologias mais limpas e SAF será essencial para que a aviação atinja metas globais de redução de emissões estabelecidas por acordos internacionais, como

o CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) e o Acordo de Paris.

Dessa forma, o TFE-731, apesar de ser um motor projetado na década de 1970, continua em evolução e alinhado às demandas ambientais atuais, reforçando seu papel como referência em confiabilidade e inovação sustentável no setor aeronáutico (Wild, 2014; Rozenfeld, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia PDCA

Esse trabalho utilizou o método de estudo de caso com abordagem quantitativa e qualitativa. Os estudos de caso podem ser apresentados com combinações de métodos qualitativos e quantitativos, aplicados em diversas situações, na investigação de fenômenos individuais, grupais, organizacionais que permitem uma perspectiva holística e num contexto real (Yin, 2018).

O desenvolvimento do manual de montagem e desmontagem do motor TFE-731 foi baseado nos princípios da melhoria contínua, utilizando o ciclo PDCA (Planejar, Executar, Verificar e Agir) como metodologia de apoio. Essa abordagem permitiu o aprimoramento constante das etapas do projeto, garantindo maior eficiência e qualidade na elaboração do material técnico.

Durante a fase de Planejamento (Plan), foram definidos os objetivos, as atividades e os recursos necessários para a elaboração do manual. Na etapa de Execução (Do), os procedimentos foram aplicados de forma prática no laboratório de motores da FATEC São José dos Campos, com o registro detalhado de cada etapa da desmontagem e montagem (Miguel *et al.*, 2018).

Em seguida, na fase de Verificação (Check), os resultados foram analisados e validados por meio de testes com alunos do curso de Manutenção de Aeronaves, permitindo identificar pontos de melhoria no conteúdo e na clareza das instruções. Por fim, na etapa de Ação (Act), as correções e aperfeiçoamentos sugeridos foram incorporados ao manual, consolidando um processo cíclico de aprimoramento contínuo.

Assim, a aplicação do PDCA demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de materiais didáticos e técnicos, promovendo padronização, segurança e maior confiabilidade nas atividades práticas realizadas em ambiente acadêmico.

O desenvolvimento do manual de montagem e desmontagem do motor TFE-731 foi baseado nos princípios da melhoria contínua, utilizando o ciclo PDCA (Planejar, Executar, Verificar e Agir)

como metodologia de apoio. Essa abordagem permitiu o aprimoramento constante das etapas do projeto, garantindo maior eficiência e qualidade na elaboração do material técnico.

Durante a fase de Planejamento (Plan), foram definidos os objetivos, as atividades e os recursos necessários para a elaboração do manual. Na etapa de Execução (Do), os procedimentos foram aplicados de forma prática no laboratório de motores da FATEC São José dos Campos, com o registro detalhado de cada etapa da desmontagem e montagem.

Em seguida, na fase de Verificação (Check), os resultados foram analisados e validados por meio de testes com alunos do curso de Manutenção de Aeronaves, permitindo identificar pontos de melhoria no conteúdo e na clareza das instruções.

Por fim, na etapa de Ação (Act), as correções e aperfeiçoamentos sugeridos foram incorporados ao manual, consolidando um processo cíclico de aprimoramento contínuo. Assim, a aplicação do PDCA demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de materiais didáticos e técnicos, promovendo padronização, segurança e maior confiabilidade nas atividades práticas realizadas em ambiente acadêmico.

3.2 Lista de Materiais e Ferramentas

Durante as atividades de desmontagem, foram empregadas ferramentas manuais, instrumentos de precisão e equipamentos auxiliares adequados ao motor TFE-731. A seleção das ferramentas foi baseada em recomendações técnicas dos manuais do fabricante e requisitos de segurança operacional conforme Quadro 2.

Quadro 2 | Resumo das ferramentas usadas no motor turbofan TFE-731

Categoria	Ferramenta	Tipo	Especificação
Ferramentas Manuais	Chaves combinadas (diversos tamanhos), chaves catraca, manivelas, chaves Allen, soquetes fixos	Conjuntos chaves mecânicas e soquetes	Aço cromo-vanádio; medidas em milímetros e polegadas. Sugestão de fabricante: Gedore
Ferramentas de Ajuste e Montagem	Punção, martelo de nylon, martelo bola, adaptador 3/8F x 1/2M, ferramenta de engate rápido	Ferramentas de impacto e acoplamento	Punção de aço temperado, martelo 400g, adaptador padrão DIN 3120. Sugestão de fabricante: Gedore
Equipamentos Auxiliares	Macaco hidráulico tipo “cegonha”, cintas de elevação, cabo de força	Equipamentos de apoio e movimentação	Capacidade de 2 tons; cintas de nylon reforçado 2”. Sugestão fabricante: Vonder e Bovenau
Instrumentos de Precisão	Torquímetro, paquímetro, micrômetro, relógio comparador	Instrumentos de medição e controle	Sugestão de fabricante: Gedore e Mitutoyo

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

3.3 Desenvolvimento do manual de montagem e desmontagem do motor TFE-731

Para a elaboração do manual técnico de desmontagem e montagem do motor TFE-731, foram determinadas as atividades que deveriam ser executadas de forma sequencial, de modo a garantir a segurança e a eficiência do processo de montagem e desmontagem do motor.

A sequência de atividades elaborada consiste em:

- Adaptar o motor à estrutura de apoio.
- Adaptar a cegonha próxima à estrutura.
- Desconectar as linhas de combustível.
- Remover acessórios e componentes externos.
- Remover a carenagem (nacelle) e painéis de acesso.
- Separar as seções principais do motor: fan, compressor, combustor e turbina.
- Inspeccionar visualmente cada componente removido.

Cada etapa das atividades descritas acima foi executada, com registros fotográficos e anotações dos detalhes e dos problemas encontrados durante o desenvolvimento de cada fase. Esses resultados foram compilados e, assim, o manual de montagem e desmontagem do motor TFE-731 foi elaborado.

Para verificar se o manual poderia ser compreendido e seguido de forma a garantir a segurança do usuário, testes de validação foram realizados com alunos do 5º e 6º períodos do curso de Tecnologia em Manutenção de Aeronaves.

Durante a execução, cada aluno registrou as dificuldades encontradas e, posteriormente, preencheu um questionário elaborado para coletar sugestões e identificar possíveis melhorias no processo. As questões foram desenvolvidas quanto aos seguintes critérios:

- Clareza das instruções.
- O passo a passo foi eficaz para a execução das atividades.
- As instruções garantiram segurança durante a execução do procedimento
- As imagens e diagramas auxiliaram na compreensão das etapas.
- O tempo de execução foi adequado e compatível com o nível de complexidade da tarefa.

Após o teste de validação, cada questionário foi analisado e gráficos de resultados foram elaborados. Após a análise dos dados obtidos, o manual foi aprimorado, incorporando as melhorias propostas. Uma nova validação foi realizada para verificar se as modificações implementadas atenderam às expectativas dos usuários.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que o manual apresenta clareza nas instruções, sequência lógica das etapas e linguagem adequada ao nível tecnológico e prático.

4.1 Análise preliminar de riscos (*check list*)

ROTEIRO TÉCNICO PARA DESMONTAGEM E MONTAGEM DO MOTOR TFE-731

1. Objetivo

Fornecer um guia passo a passo estruturado para orientar alunos e técnicos na sequência correta, segura e lógica de desmontagem e montagem do motor turbofan Honeywell TFE-731 em ambiente de laboratório/oficina.

2. Requisitos de Segurança e Ambientais

- Equipamentos de Proteção Individual (EPIs): Uso obrigatório de óculos de segurança, botas com biqueira, luvas anticorte e protetor auricular (se houver uso de ferramentas pneumáticas).
- Precauções com Fluidos: Certificar-se de que todo o combustível, óleo lubrificante e fluidos hidráulicos foram drenados antes de iniciar. Utilizar bandejas de contenção.
- Prevenção de FOD (Foreign Object Debris): Manter a área de trabalho limpa. Todas as porcas, parafusos e arruelas removidas devem ser organizadas em gaveteiros ou sacos plásticos devidamente identificados (etiquetados).
- Sinalização: Manter o motor fixado adequadamente no suporte (stand) de manutenção, com as travas de roda acionadas (como o suporte amarelo visível na imagem).

3. Ferramental e Equipamentos Necessários

- Suporte de manutenção do motor (Engine Stand).
- Talha manual ou guindaste de oficina para remoção de módulos pesados.
- Jogo de chaves combinadas e soquetes (padrão aeronáutico - polegadas).
- Torquímetros calibrados.
- Alicates para frenagem (safety wire) e arame de frenagem.
- Extratores e ferramentas especiais especificadas pelo manual.
- Etiquetas de identificação (Tags).

4.2 Roteiro Operacional (manual passo a passo – desmontagem e montagem)

PARTE 1: ROTEIRO DE DESMONTAGEM (TEARDOWN)

Passo 1: Preparação Inicial

- 1.1. Posicionar o motor no suporte e travar as rodas.
- 1.2. Realizar uma inspeção visual externa para identificar componentes faltantes ou danos prévios.
- 1.3. Registrar o Número de Série (S/N) e as horas/ciclos do motor.

Passo 2: Remoção de Componentes Externos e Acessórios (LRUs)

- 2.1. Desconectar e remover todos os chicotes elétricos (harnesses), etiquetando cada conector.
- 2.2. Remover as tubulações externas (linhas de óleo, ar de sangria/bleed air e combustível).
- 2.3. Colocar tampas (plugs/caps) em todos os orifícios abertos.
- 2.4. Remover FCU (Fuel Control Unit) ou DEEC (se aplicável), bomba de combustível e bomba de óleo.
- 2.5. Remover o motor de partida/gerador (Starter/Generator).

Passo 3: Desmontagem do Módulo do Fan (Secção Fria)

- 3.1. Remover o spinner (cone frontal).
- 3.2. Remover os parafusos de retenção.
- 3.3. Extrair o disco do Fan e suas palhetas (cuidado extremo para não danificar o perfil aerodinâmico).
- 3.4. Remover a carcaça do Fan (Fan case).

Passo 4: Separação dos Módulos Principais

O TFE-731 é um motor modular. O roteiro deve focar na separação por seções.

- 4.1. Separar a Caixa de Engrenagens de Acessórios (Accessory Gearbox - AGB) da seção inferior.
- 4.2. Desacoplar a Seção do Compressor (LP e HP Compressors).
- 4.3. Separar a Seção Quente: Câmara de combustão e os estágios da Turbina (HP e LP Turbines).
- 4.4. Remover o bocal de exaustão (Exhaust nozzle).

PARTE 2: ROTEIRO DE MONTAGEM (BUILD-UP)

A montagem deve seguir rigorosamente a ordem inversa da desmontagem, com atenção especial aos torques.

Passo 1: União dos Módulos Principais

Acoplar a seção da Turbina à Câmara de Combustão.

Substituir juntas (gaskets) e o-rings por novos.

- 1.3. Conectar a Seção do Compressor à seção quente.
- 1.4. Instalar a Caixa de Acessórios (AGB).
- 1.5. Alinhar corretamente as engrenagens de acionamento (drive splines).

Passo 2: Montagem da Seção do Fan

- 2.1. *Instalar a carcaça do Fan.*
- 2.2. *Posicionar o disco do Fan.*
- 2.3. *Instalar as palhetas nas mesmas posições de origem (para manter o balanceamento).*
- 2.4. *Instalar e torquar o spinner.*

Passo 3: Instalação de Acessórios e Componentes Externos

- 3.1. Reinstalar o Starter/Generator, FCU, e bombas de fluidos.
- 3.2. Instalar as tubulações de ar, óleo e combustível.
- 3.3. Checar o roteamento correto para evitar atrito (chafing) devido à vibração.
- 3.4. Conectar os chicotes elétricos aos seus respectivos sensores e componentes.

Passo 4: Procedimentos de Segurança (Locking - Safetying)

- 4.1. Aplicar o torque cruzado especificado em todos os flanges e uniões.
- 4.2. Realizar a frenagem (safety wire / lockwire) em todos os parafusos e porcas.
- 4.3 Checar se retenção está conforme as normas padrão de aviação (FAA AC 43.13-1B).
- 4.4. Instalar contrapinos (cotter pins) onde especificado.

Passo 5: Verificação Final

- 5.1. Realizar o giro manual do rotor (motoring) pelo eixo ou pelo Fan.
- 5.2. Checar se não há atrito interno ou travamento.
- 5.3. Fazer uma inspeção final de área para garantir que nenhuma ferramenta ou peça sobrou.
- 5.4. Certificar-se que controle de Ferramentas/FOD foi cumprido.

Importante: Este é um roteiro estrutural com fins educacionais e acadêmicos. Para qualquer intervenção de manutenção real em aeronaves, é obrigatório e legalmente exigido o uso do Manual de Manutenção do Fabricante (Engine Maintenance Manual - EMM da Honeywell) em sua revisão mais atual.

4.3 Validação do Roteiro Operacional (para aula prática em oficina)

O manual foi validado e mostrou-se eficiente como ferramenta didática e seguro para aplicação em ambiente acadêmico.

Nesta etapa do trabalho, realiza-se uma análise crítica dos resultados obtidos com a elaboração e aplicação do roteiro técnico de desmontagem e montagem do motor TFE-731.

A análise foi conduzida à luz dos objetivos propostos e da revisão da literatura, considerando também as condições reais de execução em ambiente acadêmico, a viabilidade prática do processo e os principais desafios enfrentados conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 | Aula prática na oficina validando o Roteiro do motor turbofan TFE-731



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025).

As imagens ilustram uma sequência de atividades de aula prática na oficina de manutenção aeronáutica, onde os alunos, orientados por instrutores, realizam a desmontagem em equipe de um motor turbofan.

A progressão visual mostra desde a análise inicial do motor montado no suporte passando pela constante consulta ao roteiro elaborado impresso como o estágio frontal. Todo o processo evidencia um ambiente de aprendizado colaborativo e essencialmente prático, que culmina com a turma discutindo ao redor dos componentes já desmontados e posando de forma descontraída para uma foto em grupo celebrando a conclusão da tarefa prática.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo alcançou seu objetivo principal ao desenvolver e validar um roteiro técnico digital voltado à desmontagem e montagem do motor *turbofan* TFE-731, consolidando-se como um recurso de grande relevância para a instrução na área de manutenção aeronáutica.

A adoção da metodologia PDCA (Planejar, Executar, Verificar e Agir) foi determinante para o sucesso do projeto, pois possibilitou o planejamento estruturado e o aprimoramento contínuo do material a partir das vivências reais no laboratório da FATEC São José dos Campos.

Os resultados obtidos a partir da validação prática, realizada com alunos do 5º e 6º períodos do curso de Tecnologia em Manutenção de Aeronaves, evidenciaram a eficácia do Roteiro que foi elaborado em uma sequência lógica e instruções claras, proporcionando um ambiente de aprendizado seguro e alinhado às boas práticas da manutenção como o rigoroso controle de *Foreign Object Damage* (FOD) e o uso adequado de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs).

Conclui-se, portanto, que o manual desenvolvido transcende a simples compilação de dados técnicos, atuando como um elemento facilitador que aproxima a teoria da prática operacional ao se mostrar altamente viável e seguro para ser incorporado na rotina acadêmica e técnica, contribuindo para a padronização das atividades de oficina, para a mitigação de erros humanos e para a formação de profissionais mais qualificados e conscientes das exigências do setor aeroespacial.

6. TRABALHO FUTURO

Visando a continuidade e o aprimoramento desta pesquisa, sugere-se que alunos e técnicos visualizassem modelos 3D das seções modulares do motor TFE-731 sobrepostas ao ambiente real, facilitando a identificação de componentes e a compreensão dos processos de montagem antes da intervenção física.

REFERÊNCIAS

- AIN ONLINE. Honeywell's TFE731 **Turbofan Engine Turns 50**. 2022. Disponível em: <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2022-08-29/honeywells-tfe731-turbofan-engine-turns-50>. Acesso em: 10 maio 2025.
- ANAC. (2019). Agência Nacional de Aviação Civil. **Comunicado 312/01 - Base RBAC 145**. Disponível em: <https://csamro.com.br/tfe731/>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- ANDRADE¹, C. R. M.; MOURA, R. A.; OLIVEIRA, M. R. (2026). **Formação e Capacitação Docente: fatores inegociáveis para o sucesso da aprendizagem discente**. Rev. Ciências Exatas, v. 32, n.1. DOI: 10.69609/1516-2893.2026.v32.n1.a4086. <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/4086>
- ANDRADE², C. R. M.; BENEVIDES, M. P.; OLIVEIRA, M. R.; MOURA, R. A. (2026). **Neuroplanejamento sustentável para atender necessidades da aprendizagem inclusiva: intelectual, física e psicomotora**. Rev. Ciências Exatas, v. 32, n. 1, 2026. DOI: 10.69609/1516-2893.2026.v32.n1.a4089. <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/4089>
- AMTP. Acceptable Methods, Techniques, and Practices – **Aircraft Inspection and Repair**. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 1998. Disponível em: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentNumber/43.13-1B. Acesso em: 10 maio 2025.
- AVIATION WEEK. **Life Ahead for TFE731: honeywell plans to upgrade on 50th anniversary**. 2023. Disponível em: <https://aviationweek.com/shownews/nbaa/life-ahead-tfe731-honeywell-plans-upgrade-50th-anniversary>. Acesso em: 10 maio 2025.
- BENEVIDES, K. D. G.; RUFINO, L. J. G. C.; DOS SANTOS, D. F. A.; BENEVIDES, M. P.; PIMENTA, C. D.; DE OLIVEIRA, M. R.; DE MOURA, R. A. (2025). **Inteligência Artificial na educação de indivíduos adultos com 50 anos de idade ou mais: abordagem assistiva**. ARACÊ, [S. l.], v7, n8, p. e7160. DOI: [10.56238/arev7n8-085](https://doi.org/10.56238/arev7n8-085). <https://periodicos.newsciecepubl.com/arace/article/view/7160>.
- BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil – RBAC nº 43: Manutenção Preventiva, Reparos e Alterações**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbac>. Acesso em: 10 maio 2025
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CUMPSTY, N. A.; HEYES, A. **Jet Propulsion: A simple guide to the aerodynamic and thermodynamic design and performance of jet engines**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. ISBN 9781107653540.
- DE MOURA, R. A.; BENEVIDES, M. P; et al.; (2025). **Neuroergonomia no controle ... fly-by-wire e artificial feel e melhor feedback háptico**. ARACÊ, [S. l.], v7, n9, pe8071. DOI: [10.56238/arev7n9-139](https://doi.org/10.56238/arev7n9-139). Disponível em: <https://periodicos.newsciecepubl.com/arace/article/view/8071>. Acesso 13set2025.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- HILL, P.; PETERSON, C. **Mechanics and Thermodynamics of Propulsion**. 2. ed. Boston: Pearson, 1992. ISBN 9780201146592.
- HONEYWELL¹. Aerospace. TFE731-5-5AR **User's Manual**. 5. ed. Phoenix: Honeywell Aerospace, 2025. 99f.
- HONEYWELL². TFE731 Turbofan Engine. 2023. Disponível em: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/products/power-and-propulsion/engines/turbofan-engines/tfe731-turbofan-engine>. Acesso em: 10 maio 2025.
- HONEYWELL³. **Light Maintenance Manual (LMM) 72-02-01: TFE731 Turbofan Engine**. Honeywell Aerospace, 2023. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/mm-72-02-01-pdf-pdf-free.html>. Acesso em: 24 maio 2025.
- KROES, M.; WILD, T.; LOUGHEAD, W. **Fundamentos de Manutenção Aeronáutica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning,

2012. ISBN 9788522106673.

MERÇON, F. B. et al. **Corrosão: um exemplo usual de fenômeno químico**. Química Nova na Escola, São Paulo, 2004.

MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; LIMA, E. P.; et al. (2018). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora GEN LTC, 2018. ISBN 978-8535291346.

MOURA, R. A.; MOURA, M. L. S. 2019. **Aplicação da engenharia estrutural segura na montagem do veículo “baja” para aprendizado ... dos discentes**. Revista Sodebras [on line]. vol. 14. nº 12, pp 31-36. ISSN 1809-3957. DOI: [10.29367/issn.1809-3957.14.2019.162.31](https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.14.2019.162.31)

MOURA, R. A.; VILLARTA, C. J. B.; BENEVIDES, M. P.; RICETTO, M. R.; ROSA JUNIOR, O.; SANTOS, D. F. A. (2024). **Anthropometry, neuroergonomics and immersive technologies for the workplace’s future: safer**. RGSa, 18(12), e09859. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-032>

OLIVEIRA JUNIOR, H. S.; VIAGI, A. F.; MOURA, R. A. (2025). **Aplicações dos conceitos da neuroengenharia ... manutenção e autossustentabilidade**. Revista Exatas, [S. l.], v. 31, n. 2, 2025. DOI: 10.69609/1516-2893.2025.v31.a4033. <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/4033>

PINHEIRO, K. **Estudo de caso a respeito da corrosão encontrada em veículos automotores**. Universidade Federal do Ceará, Russas, 2023.

ROLLS-ROYCE plc. **The jet engine**. 5. ed. Derby: Rolls-Royce Technical Publications Department, 1996. 277f

ROZENFELD, H. **Gestão de desenvolvimento de Produtos**. Uma referência para a melhoria do processo. São Paulo. Editora Saraiva. Reimpr. 2013.

WILD, T. **Aircraft Powerplants**. 9. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 9780071799157.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

