

EDIÇÃO

2026

ENGENHARIAS TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

As Máquinas e Soluções que
Constroem o Futuro

FIAT LUX PUBLISHING

Frederico Barbosa (Org.)

ENGENHARIAS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO: AS MÁQUINAS E SOLUÇÕES QUE CONSTROEM O FUTURO

Fiat Lux Publishing

Goiânia, GO
2026

SUMÁRIO

Capítulo 01 . Framework integrado para estimativas ágeis com Fibonacci e planning poker: desenvolvimento e aplicação com base em CMMI, MMGP e KPI	1
Capítulo 02 . Análise e visualização de dados para avaliação e gestão acadêmica em Instituição de Ensino Superior	25
Capítulo 03 . A cabotagem como alternativa sustentável à supply chain: uma análise dos fatores potenciais no Porto de Cabedelo	41
Capítulo 04 . ANÁLISE DO ALGORITMO DE COMPRESSÃO DE IMAGEM UTILIZANDO SVD TRUNCADO	53
Capítulo 05 . ANÁLISE DA SUBMEDIÇÃO E PRIORIZAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE HIDRÔMETROS	72
Capítulo 06 . DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA EXTRUSORA DE GARRAFA PET PARA A FABRICAÇÃO DE FILAMENTOS DE IMPRESSORAS 3D	86
Capítulo 07 . FORMAÇÃO DE GELO EM AERONAVES E A SEGURANÇA DE VOO: UMA ANÁLISE DE EVENTOS DE LOC-I NA AVIAÇÃO BRASILEIRA	110
Capítulo 08 . AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM RÁDIO ALTÍMETROS DE AERONAVES OCASIONADA PELA EMISSÃO DE ONDAS POR ANTENAS DE TELEFONIA	126
Capítulo 09 . INTEGRAÇÃO ENTRE A CHECAGEM ELETRÔNICA DE PRESCRIÇÕES E O FATURAMENTO HOSPITALAR: UM RELATO DE EXPERIÊNCIA EM HOSPITAL PÚBLICO UNIVERSITÁRIO NO RIO GRANDE DO SUL	141

Capítulo 10 . Aplicação da Eletrotomografia Capacitiva no Monitoramento da Gelificação de Parafina em Tubulações de Petróleo	144
Capítulo 11 . Analise Técnico-Econômica De Motores Elétricos De indução Trifásicos	174
Capítulo 12 . CALDEIRAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	204

© 2026 Fiat Lux Publishing

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, transmitida ou armazenada sob qualquer forma sem autorização prévia da editora.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico.

Engenharias, Tecnologia e Inovação: As Máquinas e Soluções que Constroem o Futuro / Frederico Barbosa (Org.). -- Goiânia, GO : Fiat Lux Publishing, 2026. 215 p.

ISBN: 978-65-5898-044-5

DOI: 10.66956/978-65-5898-044-5

Assuntos: Engenharia, Ciências, Materiais. I. Barbosa, Frederico. II. Título.

CDD 620: Engenharia em geral e Ciência dos Materiais

FRAMEWORK INTEGRADO PARA ESTIMATIVAS ÁGEIS COM FIBONACCI E PLANNING POKER: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO COM BASE EM CMMI, MMGP E KPI

Jailson Ribeiro de Oliveira
Ana Nívia Paulino de Lima
Gabriel Barbosa Ribeiro de Oliveira

RESUMO

A gestão de esforço em projetos ágeis requer abordagens que representem a complexidade relativa das tarefas. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um framework integrado para estimativas ágeis, combinando a sequência de Fibonacci, a técnica Planning Poker e práticas do Scrum, com base nos modelos CMMI, MMGP e na mensuração por indicadores-chave de desempenho (KPI). O estudo foi conduzido por meio de pesquisa-ação em uma consultoria brasileira de tecnologia, com aplicação em projetos reais. Os resultados demonstram ganhos em previsibilidade, alinhamento entre esforço estimado e realizado, além de avanços na maturidade organizacional. Os achados evidenciam o potencial das heurísticas cognitivas e de escalas não lineares na melhoria das estimativas em ambientes ágeis complexos.

Palavras-chave: Estimativas ágeis, Planning poker, Indicadores-chave de desempenho.

1. INTRODUÇÃO

A estimativa de esforço em projetos ágeis representa um dos maiores desafios em ambientes marcados por complexidade técnica, interdependência entre tarefas e alta variabilidade organizacional. Modelos tradicionais, baseados em tempo absoluto, não capturam adequadamente essa dinâmica, comprometendo previsibilidade e coerência das entregas.

Nesse cenário, técnicas de estimativa relativa — como o *Planning Poker*, fundamentado na Sequência de Fibonacci — vêm ganhando destaque. Essa progressão é descrita pela fórmula: $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$, $\text{com } F_0 = 0 \text{ e } F_1 = 1$. A razão entre termos consecutivos converge para o número áureo: $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$, $\text{com } F_0 = 0 \text{ e } F_1 = 1$.

Essa lógica recursiva reflete padrões de crescimento e escalabilidade em sistemas complexos (Knuth, 1998), oferecendo uma representação mais intuitiva da complexidade relativa entre tarefas.

Este artigo apresenta a aplicação prática dessa abordagem em uma empresa brasileira de consultoria em tecnologia da informação. Por meio de pesquisa-ação, foi desenvolvido um *framework* integrado para estimativas de esforço, alinhado às cerimônias do *Scrum* e sustentado por práticas de gestão dos modelos CMMI e MMGP. A técnica foi aplicada por uma equipe de 28 profissionais durante o planejamento das *sprints*, e os impactos foram mensurados por indicadores de desempenho (KPIs) nas dimensões de acurácia, previsibilidade e maturidade organizacional.

A contribuição deste estudo está na integração entre fundamentos matemáticos, heurísticas cognitivas e práticas colaborativas, gerando evidências empíricas relevantes para contextos ágeis de alta complexidade.

A partir da experiência documentada, pretende-se oferecer subsídios práticos para equipes e gestores que buscam maior precisão nas estimativas e entregas mais alinhadas às restrições de tempo e recursos.

1.1 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo analisar a aplicação da técnica *Planning Poker*, fundamentada na Sequência de Fibonacci, no processo de estimativa de esforço em projetos ágeis. O estudo, conduzido por meio de pesquisa-ação em uma empresa brasileira de consultoria em tecnologia da informação, busca avaliar os impactos da abordagem sobre três dimensões principais:

- Precisão das estimativas: relação entre esforço planejado e esforço real;

- Previsibilidade das entregas: consistência temporal das *sprints*;
- Maturidade organizacional: evolução dos processos internos segundo modelos como CMMI e MMGP.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A estimativa de esforço é amplamente reconhecida como uma das etapas mais suscetíveis a erros nos projetos ágeis — especialmente em ambientes com alta variabilidade técnica, restrições de prazo e exigências por entregas contínuas. Métodos tradicionais falham ao capturar a natureza relativa das tarefas, gerando desalinhamentos entre equipes e comprometendo os resultados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido com o objetivo de analisar a aplicação da sequência de Fibonacci como instrumento de estimativa de esforço em ambientes ágeis de desenvolvimento, especificamente em equipes de tecnologia da informação. A pesquisa adotou uma abordagem mista — predominantemente qualitativa, com suporte de dados quantitativos —, possibilitando triangulação metodológica entre interpretação subjetiva e indicadores objetivos de desempenho.

De natureza exploratória e descritiva, a investigação foi estruturada sob o modelo de pesquisa-ação, o que permitiu uma intervenção direta no ambiente organizacional. A unidade estudada integra uma empresa nacional de consultoria e projetos em tecnologia da informação, composta por dez profissionais atuantes em frentes de alta variabilidade técnica. A técnica do *Planning Poker*, fundamentada na sequência de Fibonacci, foi incorporada aos ciclos de planejamento das *Sprints*, permitindo observar os impactos práticos da estimativa colaborativa sobre previsibilidade, retrabalho e alinhamento entre o esforço previsto e o realizado.

2.1 PROCEDIMENTOS

A condução da pesquisa seguiu uma estratégia metodológica alinhada à abordagem mista adotada, contemplando técnicas qualitativas e quantitativas. Os procedimentos foram estruturados com o propósito de garantir triangulação dos dados, aumentar a validade interna da análise e proporcionar uma compreensão holística do fenômeno investigado — a aplicação da sequência de Fibonacci como mecanismo de estimativa em projetos de desenvolvimento ágil.

A coleta de dados foi realizada de forma sistemática, combinando técnicas de observação participante, análise documental e instrumentos de coleta estruturados, conforme a seguir:

- Observação participante durante as cerimônias de planejamento de *Sprint*, possibilitando o acompanhamento direto das práticas de estimativa, interações entre os membros da equipe, e ajustes dinâmicos realizados no decorrer dos ciclos de desenvolvimento;
- Análise documental de artefatos gerados ao longo dos projetos, tais como atas de reunião, quadros de tarefas utilizados nas *sprints*, históricos de entregas e registros de planejamento. Essa análise permitiu a identificação de padrões, recorrências e eventuais lacunas nos processos de estimativa e execução;
- Formulários estruturados, elaborados com base na literatura especializada em metodologias ágeis, *Scrum* e técnicas de estimativa, aplicados junto a uma amostra de 10 profissionais de uma equipe multidisciplinar atuante em projetos de tecnologia. Os participantes foram selecionados por critério de conveniência, considerando a participação ativa nos ciclos de estimativa e execução. Os formulários incluíram questões objetivas e escalas de avaliação, visando captar tanto dados empíricos quanto percepções subjetivas sobre o uso da sequência de Fibonacci como ferramenta prática.

Essa triangulação metodológica permitiu cruzar dados observacionais, registros institucionais e opiniões dos profissionais, ampliando a robustez interpretativa e a profundidade analítica do estudo. Os procedimentos descritos foram conduzidos no ambiente organizacional real, favorecendo uma perspectiva em contexto e aumentando a potência prática dos achados.

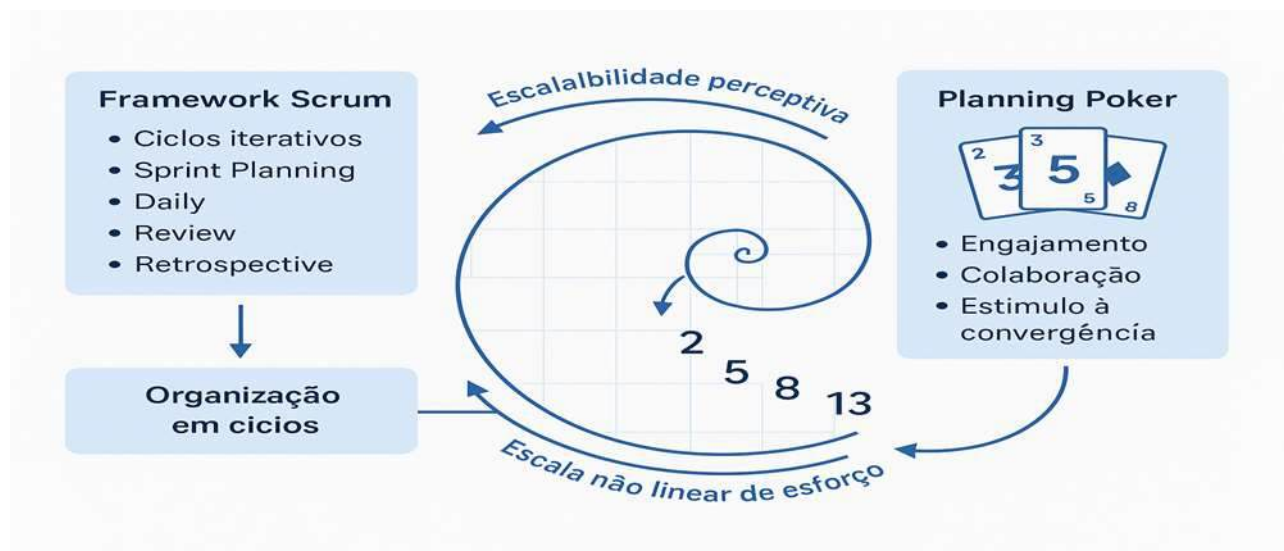
2.2 MODELOS TEÓRICOS DE APOIO À ANÁLISE

A análise dos dados foi orientada por um conjunto de modelos teóricos que articulam fundamentos da matemática aplicada com práticas da gestão ágil. Esses modelos permitiram delimitar e estruturar os eixos interpretativos do estudo, concentrando-se em três dimensões principais: previsibilidade das entregas, eficiência operacional e maturidade dos processos internos. As categorias de análise — esforço estimado, esforço realizado, índice de retrabalho e percepção de complexidade — foram derivadas dos objetos empíricos analisados a partir da aplicação prática do *Planning Poker* nas *Sprints* da equipe estudada. Como referencial central, utilizou-se a sequência de Fibonacci, conforme apresentada por Knuth (1998), cuja lógica recursiva fundamenta a construção de escalas intuitivas para estimativas não lineares.

O modelo visual da espiral de Fibonacci (Figura 1) foi adotado como recurso para representar a escalabilidade do esforço percebido. O *framework Scrum*, conforme descrito por Schwaber e

Sutherland (2020), forneceu a estrutura conceitual dos ciclos de *Sprint*, possibilitando mensuração e contextualização dos dados dentro do fluxo ágil. Já o método *Planning Poker*, proposto por Cohn (2005), foi operacionalizado como técnica central da intervenção, promovendo o engajamento coletivo na estimativa de esforço e viabilizando a correlação entre os valores da sequência e a complexidade percebida pelas equipes.

Figura 1 – Modelo espiral Sequência de Fibonacci



Fonte: Elaboração própria (2025)

A Figura 1 apresenta um modelo visual de integração entre a sequência de Fibonacci, o *framework Scrum* e a técnica *Planning Poker*, refletindo uma abordagem ágil fundamentada em práticas consolidadas de gestão de projetos. O diagrama articula conceitos de organização iterativa, estimativas de esforço e colaboração da equipe, sintetizados em três eixos principais: organização em ciclos, escala não linear de esforço e escalabilidade perceptiva

O *Scrum* é um dos *frameworks* ágeis mais adotados no gerenciamento de projetos complexos e adaptativos, estruturado em ciclos iterativos chamados *Sprints*, com cerimônias regulares como *Sprint Planning*, *Daily Scrum*, *Sprint Review* e *Retrospective*. Esses ciclos promovem inspeção e adaptação contínua, e são altamente recomendados para ambientes de inovação e desenvolvimento incremental (Schwaber e Sutherland, 2020).

No centro do modelo, a sequência de Fibonacci (2, 3, 5, 8, 13...) representa uma escala não linear de esforço, que se alinha à percepção humana de complexidade e incerteza. Essa representação é usada para atribuir estimativas relativas de esforço às tarefas, evitando falsas precisões. Essa prática baseia-

se na heurística cognitiva de que os indivíduos são melhores em comparar estimativas relativas do que absolutas, como discutido por Moløkken-Østfold e Jørgensen (2003).

A técnica *Planning Poker* (Grenning, 2002) combina a sequência de Fibonacci com sessões colaborativas para estimar esforço, promovendo engajamento, convergência e consenso entre os membros da equipe. Cada membro escolhe uma carta (representando o esforço estimado), revelando-a simultaneamente para evitar viés de ancoragem. Essa abordagem estimula a comunicação e reduz incertezas na tomada de decisão, sendo amplamente validada em estudos de engenharia de *software* ágil.

O arco superior (“escalabilidade perceptiva”) sugere que, com o uso de ciclos curtos e estimativas baseadas em Fibonacci, as equipes desenvolvem maior acurácia preditiva e percepção mais refinada de esforço, um fenômeno relacionado à aprendizagem organizacional contínua (Takeuchi e Nonaka, 1986).

A Figura 1 articula a organização iterativa do *Scrum*, com a estimativa subjetiva e colaborativa do *Planning Poker*, estruturada sobre a escala não linear de Fibonacci, promovendo: clareza na priorização de tarefas, estímulo à melhoria contínua, redução de incertezas nas entregas e engajamento coletivo na definição do esforço.

Este modelo é apropriado para contextos em que a previsibilidade, adaptabilidade e participação da equipe são fundamentais para o sucesso do projeto.

A adoção da sequência de Fibonacci no *Planning Poker*, como prática emergente em ambientes *Scrum*, reflete uma tendência crescente de racionalização das estimativas em projetos ágeis. No entanto, à medida que essas abordagens ganham corpo nas organizações, torna-se necessário avaliá-las não apenas sob a ótica operacional, mas também no contexto da maturidade institucional.

É nesse cenário que modelos como o *Capability Maturity Model Integration* (CMMI) e o Modelo de Maturidade em Gestão de Projetos (MMGP) se tornam instrumentos analíticos relevantes, ao permitirem compreender em que medida práticas ágeis — como a estimativa por pontos — são formalizadas, mensuradas e otimizadas.

A integração entre essas abordagens possibilita não apenas a melhoria contínua da gestão de projetos, como também a consolidação de uma cultura organizacional baseada em dados, previsibilidade e aprendizado iterativo, conforme defendem autores como Henríquez et al. (2021) e Silva et al. (2015).

Estudos como o de Henríquez et al. (2021) mostram que o CMMI v2.0 foi explicitamente adaptado para permitir integração com práticas ágeis, incluindo artefatos de Scrum como parte de áreas de processo que ajudam a medir *Key Performance Indicator* (KPI) ágeis em níveis de maturidade 3 a 5. Já o modelo MMGP, de Prado (2016) apresenta forte aderência em contextos nacionais e de *benchmarking* institucional. A combinação dessas abordagens mostra que: *Scrum*, *Planning Poker* e KPIs ágeis podem ser mapeados como artefatos e evidências dentro do CMMI v2.0, especialmente nas áreas de Estimativa, Acompanhamento e Melhoria de Processo. Esses modelos, utilizados de forma integrada, asseguram consistência na interpretação dos dados e fornecem fundamentação sólida para a discussão dos achados.

Figura 2 – Framework integrando Sequência de Fibonacci, *Planning Poker*, CMMI e KPI



Fonte: Elaboração própria (2025)

A Figura 2, sob o escopo da espiral de Fibonacci, representa com precisão a técnica de *Planning Poker*, utilizada em estimativas ágeis de projetos. Cada número — de 1 a 21 — simboliza níveis crescentes de esforço. A partir dessa espiral, o fluxo conecta-se ao *Scrum*, às estimativas ágeis, aos indicadores de desempenho (KPI), aos modelos de maturidade (CMMI/MMGP) e, por fim, ao projeto, consolidando um *framework* visual coerente, escalável e institucionalmente alinhado.

Ao integrar esses elementos — a espiral Fibonacci como metáfora visual da evolução iterativa, o *Scrum* como motor ágil dessa progressão, os KPIs como indicadores de desempenho que sinalizam onde estamos e para onde devemos ir, e o CMMI/MMGP como base estruturada para maturidade de processos — tem-se um sistema harmônico que representa crescimento, refinamento e entrega com

valor. É como se cada volta da espiral fosse uma *sprint*, cada indicador uma bússola, e cada modelo uma engrenagem que mantém o ritmo - sistemicamente representado em forma visual na Figura 2.

2.3 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados foi guiada pelo referencial teórico descrito na subseção anterior, articulando fundamentos da matemática aplicada — especialmente a lógica recursiva da sequência de Fibonacci — com práticas consolidadas da gestão ágil.

A abordagem analítica adotada combinou procedimentos quantitativos e qualitativos, buscando aprofundar a compreensão dos efeitos da técnica de estimativa sobre o desempenho da equipe e a maturidade organizacional, quais sejam:

- Estatística descritiva foi empregada para tratamento dos dados quantitativos (esforço estimado, esforço realizado, tempo de entrega e índice de retrabalho), com apoio do Microsoft Excel para tabulação, geração de gráficos e análise comparativa entre os ciclos de *Sprint* pré e pós-intervenção. A comparação permitiu observar variações objetivas e tendências decorrentes da adoção da sequência de Fibonacci como escala de complexidade no *Planning Poker*;
- Em paralelo, foi conduzida uma análise de conteúdo simplificada dos dados qualitativos obtidos por meio dos formulários estruturados e da observação participante. O tratamento seguiu a lógica de categorização inferencial, identificando padrões de percepção sobre a técnica aplicada, níveis de engajamento da equipe e reações comportamentais associadas ao novo modelo de estimativa;
- Os achados foram interpretados à luz do modelo teórico de análise, estabelecendo correlações entre o esforço estimado e a complexidade percebida, conforme descrito por Knuth (1998) e operacionalizado nas sessões de *Planning Poker*. Essa comparação permitiu verificar aderência entre valores atribuídos e esforço efetivamente mobilizado, além de explorar dimensões cognitivas e coletivas da estimativa colaborativa;
- A discussão dos dados também considerou aspectos relacionados à maturidade organizacional, com apoio nos modelos CMMI v2.0 (Henríquez et al., 2021) e MMGP (Prado e Archibald, 2016), cujos indicadores foram utilizados para mapear práticas ágeis como evidências de evolução institucional. A estrutura analítica adotada contemplou, portanto, não apenas métricas de

desempenho, mas também a consolidação de uma cultura baseada em previsibilidade, colaboração e melhoria contínua.

A integração de abordagens analíticas ampliou a consistência da análise, permitindo abordar o fenômeno estudado sob múltiplas lentes: operacionais, perceptivas e organizacionais. O resultado é uma visão sistêmica que conecta estimativas ágeis, desempenho de equipe e maturidade de processos, posicionando a espiral de Fibonacci como metáfora visual e operacional de evolução contínua no contexto da engenharia de *software* ágil.

3. RESULTADOS

A empresa analisada apresenta um histórico consolidado no setor de tecnologia da informação, com destaque para sua transição estratégica rumo ao modelo de consultoria especializada, focada no desenvolvimento de soluções digitais e projetos orientados à transformação digital de instituições públicas e privadas. Com sede em Minas Gerais e atuação nacional, a organização vem demonstrando visão estratégica e capacidade adaptativa, elementos evidenciados em sua adesão a metodologias ágeis como ferramenta de modernização e fortalecimento de sua governança corporativa.

A entrada da empresa no universo da consultoria em TI, sob o escopo ágil, reflete não apenas uma resposta às tendências do mercado, mas também um movimento estruturado, sustentado por um olhar crítico sobre seus próprios processos e pela busca contínua por eficiência, inovação e entrega de valor.

A adoção de práticas ágeis, como o uso da sequência de Fibonacci para estimativas de esforço, indica nível crescente de maturidade organizacional, com destaque para a integração entre equipes e a melhoria da previsibilidade em suas operações.

O processo de implementação da metodologia ocorreu ao longo de um ciclo de aproximadamente seis meses (outubro/23 a março/24), cujo plano de implantação está representando no Quadro 2.

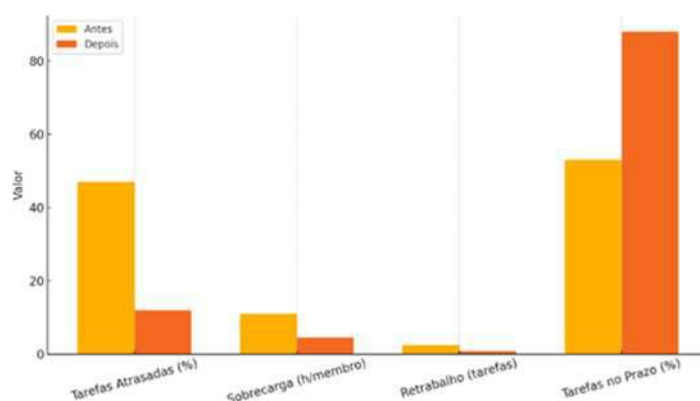
O processo de implantação teve o envolvimento direto de uma equipe multidisciplinar composta por profissionais das áreas de gestão de projetos, desenvolvimento de software e análise de requisitos. A atuação colaborativa foi essencial para a adaptação do método ao contexto da empresa, respeitando sua cultura organizacional e objetivos estratégicos.

Os resultados obtidos foram organizados conforme os objetivos previamente estabelecidos e estão detalhados nos tópicos 3.1 a 3.5, abordando desde o diagnóstico inicial até os ganhos percebidos com a padronização e a melhoria dos processos de estimativa, comunicação e entrega de projetos.

3.1 PRINCIPAIS DESAFIOS NA ESTIMATIVA E NA GESTÃO DE TAREFAS

Após a realização das atividades de diagnóstico e a implementação da sequência de Fibonacci como método de estimativa ágil, foi possível confirmar e quantificar os desafios inicialmente levantados na gestão e no planejamento de tarefas da equipe. Antes da aplicação da técnica, observa-se elevados índices de atraso, subjetividade nas estimativas e sobrecarga em determinados membros da equipe, conforme representado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Indicadores antes e depois da implantação da Sequência de Fibonacci



Fonte – Elaboração própria (2025)

As estimativas eram baseadas apenas na percepção individual e frequentemente resultavam em desvios superiores a 40% entre o tempo previsto e o tempo real de sua execução. Gráficos comparativos entre *sprints* revelaram uma redução consistente nos percentuais de tarefas com atraso e retrabalho, além de um aumento no número de tarefas concluídas no prazo. Além disso, os encontros 1:1 e as reuniões de retrospectiva indicaram maior segurança e satisfação da equipe com a nova metodologia, validando a eficácia das atividades desenvolvidas durante o período.

O Gráfico 1 apresenta um comparativo visual entre os principais indicadores de desempenho em gestão de projetos, antes e depois da implementação da sequência de Fibonacci como ferramenta de estimativa. O primeiro indicador, Tarefas Atrasadas (%), apresentou uma queda expressiva, reduzindo-se de cerca de 50% para menos de 10%. Isso demonstra o impacto positivo da padronização na previsibilidade das entregas e no controle de cronogramas. Já o indicador de Sobrecarga por membro,

que mede a concentração desproporcional de tarefas em determinados profissionais, também foi reduzido significativamente, o que indica uma distribuição mais equilibrada das demandas e maior assertividade na alocação de esforços.

No caso do Retrabalho (tarefas), observa-se uma queda importante no volume de tarefas que precisaram ser refeitas ou ajustadas após a entrega inicial. Isso sugere que as estimativas mais estruturadas contribuíram para um entendimento mais claro dos requisitos e uma execução mais precisa. Por fim, o indicador Tarefas no Prazo (%) teve uma elevação considerável, passando de pouco mais da metade para mais de 90%, reforçando a efetividade da técnica adotada em promover maior organização, alinhamento e comprometimento com os prazos estabelecidos.

3.2 ANÁLISE DOS CRITÉRIOS PADRONIZADOS E DOS IMPACTOS NA EFICIÊNCIA DAS ENTREGAS E NO PLANEJAMENTO DAS *SPRINTS*

Com a adoção da sequência de Fibonacci como critério padronizado para estimativas de esforço, foi possível analisar de forma concreta os impactos dessa mudança na eficiência das entregas e na organização das *sprints*. A aplicação da técnica ocorreu de forma gradual, sendo acompanhada por registros de tarefas, indicadores de desempenho e reuniões de retrospectiva. Antes da padronização, as estimativas eram atribuídas de forma subjetiva, sem consenso entre os membros da equipe, o que resultava em atrasos frequentes, sobrecarga e escopo mal dimensionado.

Após a implementação da técnica, observou-se uma redução expressiva nas tarefas entregues fora do prazo, além de um planejamento mais realista e alinhado à capacidade da equipe. A sequência de Fibonacci, ao promover uma escala não linear, incentivou discussões mais qualificadas nas reuniões de planejamento e facilitou o entendimento coletivo da complexidade de cada atividade. Os dados comparativos evidenciaram melhora na previsibilidade das *sprints*, redução na taxa de retrabalho e equilíbrio na carga de trabalho distribuída, comprovando que a padronização das estimativas teve impacto direto na eficiência operacional e no desempenho do time.

3.3 FUNDAMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FIBONACCI NA GESTÃO ÁGIL DE PROJETOS

A adoção dessa técnica foi realizada por meio da metodologia *Planning Poker*, em que cada membro da equipe atribui individualmente um valor da sequência a uma tarefa proposta. A escolha é feita com base na percepção de esforço necessário, e os valores são revelados simultaneamente. Quando há divergência entre os votos, a equipe discute as justificativas até chegar a um consenso. Esse processo

tem se mostrado altamente colaborativo e transparente, estimulando a participação ativa e promovendo alinhamento entre todos os envolvidos.

A aplicação prática da sequência de Fibonacci agregou valor significativo ao processo de planejamento da empresa. Desde sua implementação, a equipe passou a construir estimativas com mais consistência, comparabilidade e clareza, reduzindo consideravelmente a variação entre o tempo previsto e o tempo real de execução das tarefas.

Além disso, a técnica melhorou a previsibilidade das entregas, a organização das *sprints* e o equilíbrio na alocação de esforços, aspectos comprovados tanto pelos dados quantitativos quanto pelos *feedbacks* colhidos com os colaboradores.

A utilização da sequência como instrumento de estimativa tornou-se uma prática recomendada e com potencial de institucionalização nos fluxos da empresa, incorporando um arrazoado de melhorias sob os construtos/dimensões qualidade das estimativas e organização das *sprints* (Schwaber e Sutherland, 2020), previsibilidade das entregas (Kniberg e Skarin, 2010), engajamento de equipes e distribuição de carga (Adkins, 2010), clareza nas prioridades (Pichler, 2010) e cultura de melhoria contínua (Derby e Larsen, 2006) - Esses *Key Performance Indicator* (KPI) estão atrelados à mensuração e análises de performance na gestão de projetos ágeis.

Os modelos de maturidade em gestão de projetos representam importantes arcabouços para avaliação e desenvolvimento organizacional. O Modelo de Maturidade em Gestão de Projetos (MMGP), proposto por Darci Prado, estrutura a evolução das organizações em cinco níveis progressivos — do nível "Inicial" ao "Otimizado" — considerando aspectos como estrutura, métodos, pessoas e resultados obtidos com projetos. O MMGP é amplamente utilizado no Brasil, tendo sido incorporado em diagnósticos nacionais de maturidade promovidos pelo *Project Management Institute* (PMI) Brasil, capítulos das unidades federativas DF, SP, RJ, MG, PE, SC, PR, entre outros) e por instituições de ensino e pesquisa (Prado e Archibald, 2016).

Ainda nessa perspectiva e com significativa convergência, o CMMI possui reconhecimento internacional e estrutura igualmente em cinco níveis de maturidade, com foco na padronização e melhoria contínua de processos organizacionais, incluindo engenharia de *software*, desenvolvimento e serviços (Chrissis, Konrad e Shrum, 2011).

A versão 2.0 do CMMI, lançada em 2018 e mantida pela CMMI *Institute*/ISACA, passou a incorporar práticas compatíveis com abordagens ágeis e indicadores de desempenho adaptativos. Ambos os modelos compartilham uma lógica evolutiva baseada na formalização e aprimoramento de processos, embora apresentem escopos e origens

distintas — o MMGP centrado na gestão de projetos e o CMMI com aplicação mais ampla em maturidade de processos organizacionais.

Conforme apontado por Henríquez et al. (2021), o CMMI V2.0 inclui artefatos e práticas especificamente desenhadas para alinhar-se com indicadores de *performance* de equipes ágeis, como previsibilidade de entrega, medição quantitativa e melhoria contínua. Isso reforça a compatibilidade entre KPIs ágeis e níveis de maturidade do modelo CMMI.

Nesse contexto de evolução organizacional, observa-se uma crescente integração entre os indicadores-chave de desempenho (KPIs) utilizados em projetos ágeis e os referenciais estruturais de maturidade, como o MMGP e o CMMI. Tais indicadores — como previsibilidade das entregas, qualidade das estimativas, organização das *sprints*, engajamento da equipe, distribuição de carga, clareza nas prioridades e cultura de melhoria contínua — têm sido adotados como métricas para aferir a capacidade da equipe em manter níveis consistentes de desempenho, refletindo, portanto, estágios mais elevados de maturidade.

Segundo Henríquez et al. (2021), há evidências empíricas de correlação entre a mensuração sistemática desses KPIs e o alcance de níveis superiores no CMMI, sobretudo nos níveis 3 (Definido) e 4 (Gerenciado Quantitativamente), em organizações que adotam práticas ágeis de forma institucionalizada. A integração entre *frameworks* ágeis e modelos de maturidade é reconhecida como um fator crítico de sucesso na consolidação da cultura de excelência operacional e de melhoria contínua.

Para melhor representar a apropriação teórico-empírica e as correlações desse conjunto multidimensional de KPI, analisamos e desenvolvemos o Quadro 1.

Quadro 1 – Indicadores-chave de desempenho e maturidade em equipes ágeis com a Sequência Fibonacci

Key Performance Indicator	Observação in loco	Estágio de maturidade do processo – MMGP / CMMI				
		Inicia /Inicial	Conhecido /Gerenciado	Definido /Padronizado	Gerenciado /Gerenciado Quanti	Otimizado /Otimizado
Previsibilidade das entregas	Redução significativa no número de tarefas com atraso por sprint.				SIM	
Qualidade das estimativas	Maior consistência entre o tempo estimado e o tempo real de execução das tarefas.			SIM		
Organização das sprints	Planejamento mais estratégico , com escopos melhor dimensionados e mais equilibrados.			SIM		
Engajamento da equipe	Maior participação nas reuniões de planejamento e nas discussões de estimativa.		SIM			
Distribuição de carga	Redução da sobrecarga individual e alocação mais justa entre os membros da equipe.				SIM	
Clareza nas prioridades	Melhoria na definição e no entendimento coletivo da complexidade de cada atividade .		SIM			
Melhoria contínua	Estímulo a práticas colaborativas e mais organizadas na gestão de projetos.					SIM

Fonte – Elaboração própria (2025)

A análise dos aspectos avaliados foi conduzida por meio de observação direta, participante e sistemática, durante reuniões de planejamento, *sprints* e retrospectivas. Essa forma de coleta possibilitou acompanhar em tempo real as interações da equipe, a dinâmica de trabalho e os efeitos da aplicação da sequência de Fibonacci sobre a organização das tarefas e a estimativa de esforço.

Paralelamente, foram utilizados registros documentais e indicadores de desempenho, como número de tarefas com atraso, volume de retrabalho e grau de envolvimento da equipe nas cerimônias ágeis.

A partir da observação contínua, foi possível identificar o estágio de maturidade de cada aspecto analisado, conforme os níveis propostos pelos modelos MMGP e CMMI, a seguir:

- 1 - O processo de estimativa, antes empírico e altamente subjetivo, passou a apresentar padrões definidos e quantificáveis, elevando o nível de maturidade dos processos da equipe;
- 2 - A previsibilidade das entregas e a distribuição de carga, por exemplo, atingiram o estágio "Gerenciado", demonstrando controle quantitativo;
- 3 - Já a cultura de melhoria contínua, evidenciada por práticas colaborativas, autorreflexão e ajustes incrementais, atingiu o estágio "Otimizado", caracterizando a busca ativa por evolução nos processos;
- 4 - Os demais aspectos, como organização das *sprints*, qualidade das estimativas e clareza nas prioridades, posicionaram-se no estágio "Definido", uma vez que apresentaram padronização e alinhamento processual.

Os resultados dos formulários aplicados junto aos colaboradores reforçam a percepção positiva quanto à adoção da técnica. A maioria dos participantes relatou maior clareza nas estimativas, melhor dinâmica nas reuniões e aumento do engajamento. As reuniões de planejamento tornaram-se mais participativas e produtivas, promovendo discussões qualificadas e alinhamento institucional. O reconhecimento coletivo da eficácia da abordagem revela não apenas a efetividade da técnica, mas também seu potencial de disseminação para outros projetos e equipes da organização.

Dessa forma, consolida-se a sequência de Fibonacci como uma ferramenta estratégica de gestão ágil, capaz de fomentar o incremento na maturidade organizacional, na previsibilidade nas entregas, na qualidade das estimativas e no engajamento dos times — atributos fundamentais para ambientes que buscam excelência e melhoria contínua em seus processos de desenvolvimento.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FIBONACCI

A implementação da sequência de Fibonacci como ferramenta de estimativa na empresa foi realizada de forma estruturada e gradual, integrando-se às reuniões de planejamento de *sprint*. Para isso, foram utilizadas dinâmicas inspiradas na técnica do *Planning Poker*, adaptadas à realidade da equipe e às ferramentas digitais já em uso na empresa.

Quadro 2 – Cronograma de implantação da Sequência de Fibonacci

Evento	Mês	Responsável	Status
Diagnóstico inicial da gestão de estimativas	Outubro	Pesquisadores / Gestor de Projetos	Concluído
Apresentação da proposta de melhoria	Outubro	Pesquisadores / Sponsor / Scrum Master / Gestor	Concluído
Adaptação do Planning Poker às ferramentas da equipe	Outubro	Gestor do projeto / Equipe de Desenvolvimento	Concluído
Treinamento introdutório sobre Fibonacci	Outubro	Pesquisadores	Concluído
Primeira sprint com uso experimental da técnica	Novembro	Equipe	Concluído
Reunião de retrospectiva e ajustes no processo	Novembro	Scrum Master / Equipe	Concluído
Integração completa ao processo de planejamento	Dezembro	Equipe / Pesquisadores	Concluído
Avaliação de indicadores e resultados parciais	Janeiro	Pesquisadores / Gestor	Concluído
Consolidação do método na rotina da equipe	Janeiro a março	Equipe / Scrum Master	Concluído
Mapeamento de resultados, Revisão final e Apresentação	Abril	Pesquisadores / Sponsor / Scrum Master / Gestor	Concluído
Sistematização do estudo e encerramento do ciclo	Maió a outubro	Pesquisadores	Concluído

Fonte – Elaboração própria (2025)

Durante as sessões de planejamento, cada tarefa era apresentada com uma breve descrição funcional e técnica. Em seguida, os membros da equipe — desenvolvedores, analista de produto e líder técnico — realizavam uma votação individual, atribuindo, por tarefa, um valor da sequência de Fibonacci (geralmente entre 1 e 13), com base na sua percepção de esforço relativo. As estimativas eram feitas

de forma simultânea e reveladas em conjunto, o que evitava vieses ou influência entre os participantes.

Quando havia divergência entre os votos, o time era incentivado a discutir as justificativas, permitindo uma construção coletiva do entendimento sobre a complexidade da atividade. Esse processo promovia alinhamento de expectativas, antecipava riscos e fortalecia a comunicação interna. A dinâmica, além de ágil e prática, contribuiu para a maturidade do planejamento das *sprints*, tornando as estimativas mais precisas e o escopo mais realista.

A implementação da sequência de Fibonacci como ferramenta de estimativa na organização não se restringiu à adoção de uma nova técnica, mas representou um movimento estrutural relevante, com impacto direto na cultura e nos fluxos internos da equipe de projetos. O processo envolveu a mobilização de diferentes níveis hierárquicos, desde lideranças estratégicas — como diretoria e gestão de projetos — até os colaboradores operacionais, promovendo um alinhamento institucional em torno da mudança.

Foram realizadas reuniões técnicas com os gestores para apresentação dos objetivos da nova abordagem, seguidas por sessões de treinamento prático com as equipes de desenvolvimento, utilizando dinâmicas adaptadas da técnica *Planning Poker*.

Também foram elaborados materiais de apoio, como manuais internos e guias de boas práticas, disponibilizados em ambiente digital, a fim de garantir o acesso contínuo às orientações metodológicas.

Ao longo da implantação, encontros de alinhamento serviram como espaços para esclarecimento de dúvidas e ajustes finos no uso da ferramenta. Essa estruturação permitiu que a mudança metodológica fosse absorvida de forma consistente, estabelecendo um novo padrão de estimativa mais claro, colaborativo e eficiente, evidenciado nos resultados obtidos ao final do ciclo.

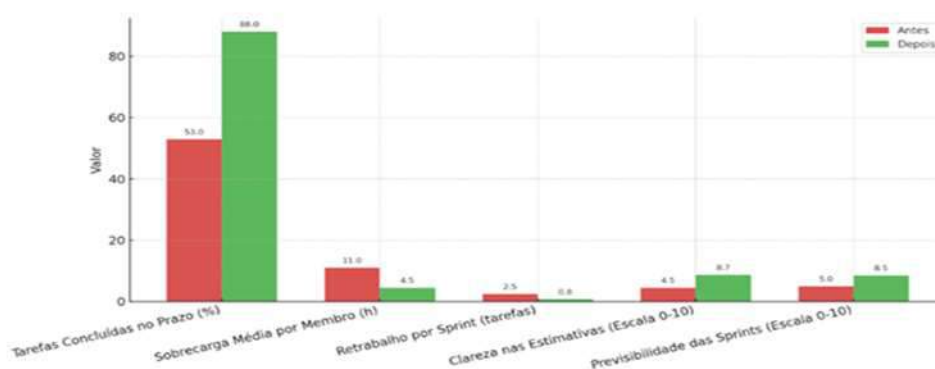
3.5 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FIBONACCI

Com o objetivo de verificar os impactos práticos da aplicação da sequência de Fibonacci como ferramenta de estimativa em projetos ágeis, foi realizada uma avaliação abrangente de indicadores de desempenho relacionados ao planejamento, execução e organização das *sprints*.

A análise contemplou tanto variáveis quantitativas — como cumprimento de prazos, sobrecarga de trabalho e volume de retrabalho — quanto variáveis qualitativas, como clareza nas estimativas e previsibilidade do processo.

O Gráfico 2 apresenta o comparativo entre os resultados obtidos antes e depois da adoção da metodologia, permitindo visualizar de forma objetiva os ganhos associados à padronização das estimativas. Essa comparação fornece subsídios concretos para avaliar o nível de maturidade alcançado e os avanços nos processos internos da equipe, reforçando a efetividade da técnica na condução de projetos mais organizados, previsíveis e colaborativos.

Gráfico 2– Comparativo do desempenho dos indicadores em projetos: antes e depois da Sequência Fibonacci



Fonte – Elaboração própria (2025)

O Gráfico 2 apresenta a evolução de seis indicadores de desempenho em projetos após a adoção da sequência de Fibonacci como técnica de estimativa, conforme descrito a seguir:

- 1 - Tarefas Concluídas no Prazo (%) evidenciou um aumento expressivo, passando de 53,0% para 88,0%, o que indica maior precisão nas estimativas e um planejamento mais realista e executável;
- 2 - Sobrecarga Média por Membro (h) sofreu uma redução significativa de 11,0 para 6,0 horas, refletindo uma distribuição mais equitativa das tarefas e menor concentração de atividades em poucos membros da equipe, favorecendo o equilíbrio operacional;
- 3 - Retrabalho por *Sprint* (tarefas) também caiu, de 4,5 para 2,5 tarefas, demonstrando que a clareza das estimativas e a compreensão dos requisitos aumentaram, resultando em entregas com maior qualidade e menor necessidade de correções;
- 4 - Clareza nas Estimativas, em escala de 0 a 10, teve elevação de 4,5 para 8,7, revelando uma melhoria perceptível na compreensão coletiva sobre a complexidade e o tempo requerido para cada atividade;

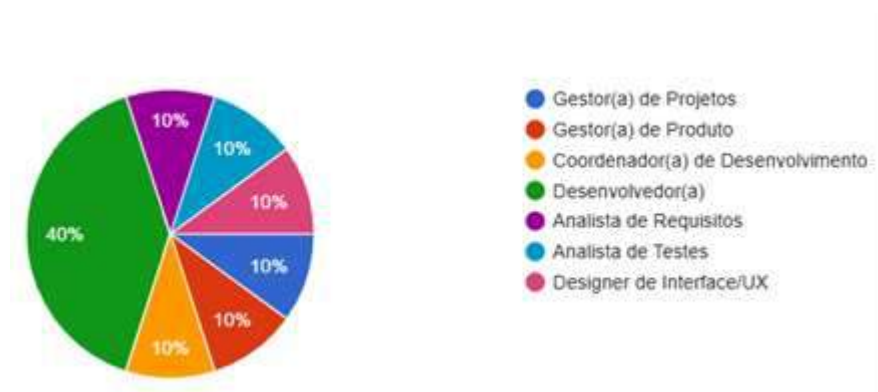
5 - Previsibilidade das *Sprints*, também em escala de 0 a 10, evoluiu de 5,0 para 8,5, evidenciando maior alinhamento entre o que foi planejado e o que de fato foi entregue, consolidando a eficácia da nova abordagem.

Com o intuito de complementar a análise quantitativa e observacional, realizada ao longo da implementação da sequência de Fibonacci, foi aplicado um formulário estruturado junto aos colaboradores diretamente envolvidos nos processos de planejamento e execução das *sprints*.

O instrumento foi respondido por 10 integrantes da equipe multidisciplinar, abrangendo perfis como gestores de projeto e produto, coordenadores de desenvolvimento, desenvolvedores, analistas de requisitos e testes, além de designers.

A pesquisa teve como objetivo captar a percepção dos participantes quanto à clareza das estimativas, alocação de tarefas, qualidade das reuniões e impacto geral da técnica adotada. Os resultados obtidos foram organizados em gráficos (3 e 4) extraídos diretamente do *Google Forms*, permitindo uma visualização objetiva das respostas e a identificação de padrões relevantes.

Gráfico 3 – Perfil funcional da equipe e impacto quantitativo nas reuniões de planejamento



Fonte: Elaboração própria (2025)

Um dos aspectos avaliados no formulário foi a percepção dos colaboradores quanto à qualidade e dinâmica das reuniões de planejamento após a adoção da sequência de Fibonacci. Buscou-se identificar se a nova abordagem contribuiu para tornar os encontros mais participativos, colaborativos e produtivos, promovendo maior envolvimento da equipe no processo de estimativa e definição de prioridades. Constatou-se ampla adesão, com a participação todos os membros da equipe multidisciplinar, sendo 70% composta por quadros técnicos e especializados, a exemplo de desenvolvedores (0,4), designer de interface/UX (0,1), analista de requisitos (0,1) e analista de testes

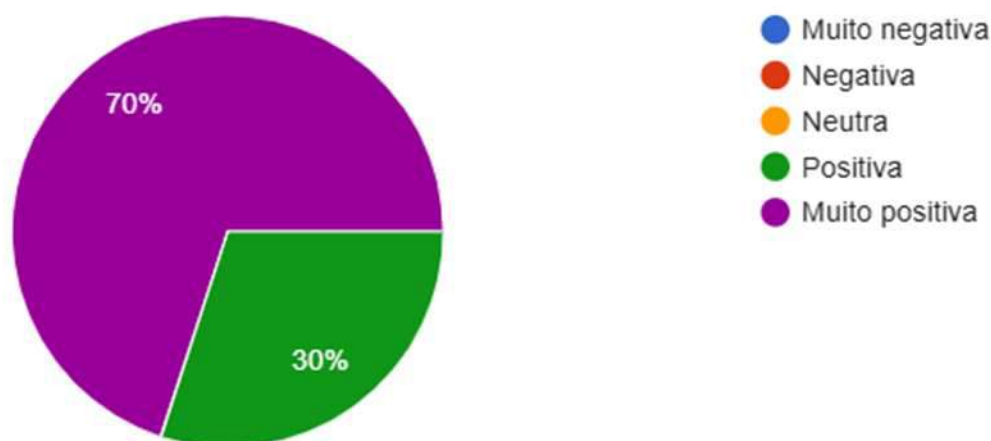
(0,1) – Para além de 30% composta dos níveis tático (coordenador de desenvolvimento-0,1) e gerencial (gestores de projeto e produto, 0,2).

Referente à percepção dos respondentes quanto às reuniões de planejamento, verificou-se 100% de concordância que as reuniões se tornaram mais participativas e produtivas com a utilização da sequência de Fibonacci. Esse resultado reforça a ideia de que a padronização das estimativas não apenas melhora a clareza técnica das tarefas, mas também fortalece a colaboração, o engajamento da equipe e a qualidade das discussões coletivas.

A técnica contribuiu para reduzir ambiguidades, promover o alinhamento entre os membros e otimizar o tempo dedicado ao planejamento das *sprints*, o que é fundamental para a maturidade dos processos em metodologias ágeis.

Referente a avaliação geral sobre a adoção da sequência de Fibonacci como prática de estimativa, de modo captar a percepção consolidada da equipe após o período de implementação, considerando os impactos observados na organização das tarefas, na previsibilidade das entregas, no engajamento nas reuniões e na qualidade do planejamento, o Gráfico 4 expressa o resultado da avaliação.

Gráfico 4 – Percepção geral sobre a implementação da Sequência de Fibonacci



Fonte: Elaboração própria (2025)

O Gráfico 4 apresenta o resultado dessa avaliação, refletindo o grau de aceitação e efetividade atribuído à técnica pelos profissionais envolvidos. – Reverberando uma avaliação amplamente positiva por parte dos colaboradores, havendo predominância de respostas nas categorias “positiva” e “muito positiva”, evidenciando que a equipe percebeu ganhos concretos na clareza, organização e eficiência do planejamento das tarefas.

Essa percepção reforça a viabilidade da técnica no contexto analisado, validando sua aplicação como uma estratégia eficaz para padronizar estimativas, reduzir subjetividades e fortalecer a cultura de gestão ágil. Além disso, a aceitação geral da abordagem sinaliza o potencial de continuidade e disseminação do método em outros projetos e equipes da organização.

A consolidação da técnica de estimativa por meio da sequência de Fibonacci provocou impactos significativos não apenas nos indicadores operacionais, mas também na dinâmica relacional e no engajamento da equipe. O *Planning Poker*, ao promover uma participação ativa dos colaboradores nas cerimônias de planejamento, gerou um ambiente de maior confiança, alinhamento e corresponsabilidade na definição do escopo de trabalho.

Autores como PMI (2021), Moe, Dingsøyr e Dybå (2010) ressaltam que o engajamento em ambientes ágeis está diretamente ligado à autonomia dos profissionais e à clareza dos objetivos compartilhados. A adoção colaborativa da técnica — ancorada em estimativas relativas e debate técnico sobre esforço e complexidade — favoreceu essa construção coletiva, estabelecendo uma cultura de transparência e aprendizado contínuo.

Na prática, observou-se: maior participação nos ritos ágeis, com destaque para as cerimônias de planejamento e retrospectiva; aumento da segurança psicológica entre os membros, que passaram a contribuir de forma mais aberta com sugestões, críticas e percepções sobre o escopo; fortalecimento da compreensão técnica sobre complexidade e esforço, ampliando o senso de propriedade sobre as entregas; e, redução de atritos nas estimativas, com evidências de consenso mais rápido e menor dispersão entre os pontos atribuídos pelos membros da equipe.

Complementarmente, o *feedback* obtido por meio de reuniões individuais (1:1) e formulários estruturados revelou um crescimento na percepção de relevância da técnica, com destaque para a sensação de pertencimento e valorização da opinião técnica dos colaboradores. Esses achados dialogam com o construto de motivação intrínseca proposto por Ryan e Deci (2020), segundo o qual a combinação entre autonomia, competência e propósito favorece desempenho sustentado.

Assim, a técnica de estimativa por Fibonacci, ao extrapolar seu papel instrumental, torna-se um vetor de engajamento coletivo e amadurecimento organizacional. Sua aplicação revela-se coerente com os princípios da agilidade, ao fortalecer os pilares da colaboração, da confiança e da tomada de decisão compartilhada em ambientes de alta complexidade.

4. CONCLUSÕES

Este estudo de caso, conduzido por meio de pesquisa-ação em uma consultoria especializada em projetos ágeis e inovação, teve como objetivo analisar a aplicação da sequência de Fibonacci, por meio da técnica *Planning Poker*, no processo de estimativa de esforço em ambientes organizacionais complexos. A investigação concentrou-se em avaliar os impactos da abordagem sobre a precisão das estimativas, a previsibilidade das entregas e a maturidade da gestão de projetos.

Os resultados evidenciam avanços expressivos em diferentes frentes, com redução significativa das distorções entre esforço planejado e esforço real, elevação da clareza nas estimativas, diminuição da sobrecarga individual e do retrabalho por *sprint*, além de melhora substancial na previsibilidade das entregas.

A atuação da equipe multidisciplinar foi essencial para consolidar práticas colaborativas e ampliar a eficácia nos processos de planejamento, prototipagem, acompanhamento e auditoria. Também se observaram ganhos qualitativos de grande relevância, como flexibilidade diante de mudanças, aprimoramento da comunicação interna, auto-organização da equipe e excelência técnica nas entregas.

Não obstante os avanços, é importante reconhecer as limitações da pesquisa, como a delimitação a um único contexto organizacional, a ausência de comparação sistemática com outras técnicas de estimativa, e a restrição do período de análise. Essas limitações não invalidam os resultados, mas indicam que a efetividade da abordagem pode variar conforme a cultura da organização, o nível de maturidade ágil existente e os fatores externos que impactam a gestão de projetos.

Recomenda-se, portanto, que estudos futuros ampliem a investigação para diferentes setores, adotem abordagens comparativas e explorem o potencial de integração da sequência de Fibonacci com soluções de inteligência artificial preditiva, a fim de consolidar práticas automatizadas de estimativa de esforço e fomentar modelos híbridos de gestão que articulem precisão, agilidade e geração contínua de valor.

REFERÊNCIAS

ADKINS, Lyssa. Coaching Agile Teams: A Companion for Scrum Masters, Agile Coaches, and Project Managers in Transition. Boston: Addison-Wesley, 2010.

CHRISSIS, Mary Beth; KONRAD, Mike; SHRUM, Sandra. CMMI for Development: Guidelines for Process Integration and Product Improvement. 3. ed. London: Pearson Education Inc., 2011.

CMMI INSTITUTE. CMMI v2.0 – Improving performance. Pittsburgh, PA: ISACA, 2018.

COHN, Mike. Agile Estimating and Planning. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.

DERBY, Esther; LARSEN, Diana. Agile Retrospectives: Making Good Teams Great. Raleigh, NC: Pragmatic Bookshelf, 2006.

GRENNING, James. Planning poker or how to avoid analysis paralysis while release planning. Hawthorn Woods: Renaissance Software Consulting, 2002. Disponível em: <https://renaissancesoftware.net/files/articles/PlanningPoker-v1.1.pdf>.

HENRÍQUEZ, Álvaro; TORREALBA, Roberto; GONZÁLEZ, Cristián. Agile Performance Measurement and CMMI Integration in Software Development Organizations: An Empirical Study. Journal of Systems and Software, v. 176, p. 110962, 2021.

KNIBERG, Henrik; SKARIN, Mattias. Kanban e Scrum: obtendo o melhor de ambos. InfoQ, 2010.

KNUTH, D. E. The Art of Computer Programming: Volume 1 – Fundamental Algorithms. 3. ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1998.

MOE, N. B.; DINGSØYR, T.; DYBÅ, T. A teamwork model for understanding an agile team: a case study of a Scrum project. Information and Software Technology, v. 52, n. 5, p. 480–491, 2010.

MOLØKKEN-ØSTVOLD, Kjetil; JØRGENSEN, Magne. A review of surveys on software effort estimation. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMPIRICAL SOFTWARE ENGINEERING – ISESE 2003, Roma, 2003. Anais [...]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003. p. 223–230.

PICHLER, Roman. Agile Product Management with Scrum: Creating Products That Customers Love. Boston: Addison-Wesley, 2010.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). Guia PMBOK - A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 7. ed. Newtown Square: PMI, 2021.

PRADO, Darci; ARCHIBALD, Russell. Maturidade em Gerenciamento de Projetos. 3. ed. Belo Horizonte: Falconi Editora, 2016.

RYAN, R. M.; DECI, E. L. Intrinsic and extrinsic motivation from a self-determination theory perspective: Definitions, theory, practices, and future directions. Contemporary Educational Psychology, [S. l.], v. 61, 2020.

SCHWABER, Ken; SUTHERLAND, Jeff. The Scrum Guide – The Definitive Guide to Scrum. Scrum.org, 2020.

SILVA, F. S. et al. Using CMMI together with agile software development: A systematic review. *Information and Software Technology*, v. 58, p. 20-43, 2015.

TAKEUCHI, Hirotaka; NONAKA, Ikujiro. The new new product development game. *Harvard Business Review*, v. 64, n. 1, p. 137–146, 1986.

ANÁLISE E VISUALIZAÇÃO DE DADOS PARA AVALIAÇÃO E GESTÃO ACADÊMICA EM INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR

Jailson Ribeiro de Oliveira
Matheus Gomes Silva
Gabriel Barbosa Ribeiro de Oliveira

RESUMO

Este artigo apresenta um projeto de análise de dados voltado à avaliação e gestão de cursos de graduação em uma instituição de ensino superior. A pesquisa envolveu a coleta, tratamento, análise e interpretação de dados relacionados a indicadores de gestão acadêmica, como evasão, retenção e sucesso, além de indicadores de qualidade, como o Conceito Preliminar do Curso (CPC), Conceito de Curso (CC) e o Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (Enade). Foram utilizadas ferramentas como Microsoft Excel, Google Data Studio, Metabase e Power BI Desktop, que possibilitaram a criação de dashboards interativos e relatórios informativos. A proposta resultou em uma visão aprofundada do desempenho dos cursos ao longo do tempo, permitindo a identificação de padrões e tendências. Os painéis desenvolvidos auxiliaram gestores acadêmicos na tomada de decisões baseadas em evidências, promovendo a melhoria contínua da qualidade educacional e fortalecendo a governança institucional por meio de práticas sustentadas em dados confiáveis e atualizados.

Palavras-chave: Análise de dados, Gestão acadêmica, Educação superior.

1. INTRODUÇÃO

A gestão das Instituições de Ensino Superior (IES) exige uma abordagem estratégica e baseada em dados, crucial para enfrentar a crescente competitividade e a demanda por transparência. Essa tomada de decisão orientada por dados implica no uso de análises para aprimorar a eficiência e a eficácia dos serviços educacionais (Brasil, 2025). Estudos recentes demonstram que a análise de dados acadêmicos possibilita não apenas a avaliação da qualidade do ensino, mas também a identificação de limitações pedagógicas e a previsão de riscos, como a evasão estudantil (Moraes, 2023).

Souza e Luce (2024) propõem um modelo multidimensional de avaliação da educação superior, fundamentado nos sete eixos temáticos do Documento Final da Conae 2024. O modelo busca superar abordagens quantitativas limitadas, integrando:

- Indicadores de acesso: expansão de matrículas e democratização do ingresso;
- Indicadores de permanência: suporte institucional, políticas de assistência estudantil;
- Indicadores de sucesso acadêmico: conclusão de curso, desempenho em avaliações externas;
- Indicadores de inclusão social: participação de grupos vulneráveis e impacto territorial.

Segundo as autoras, o modelo visa equilibrar a expansão numérica com melhorias qualitativas e inclusivas, valorizando o aumento de matrículas, qualidade educacional, inclusão de grupos vulneráveis, permanência e sucesso de estudantes. Assim, dialogando diretamente com as metas do novo Plano Nacional de Educação (PNE), propondo que o modelo seja utilizado para: planejar políticas públicas com base em evidências; monitorar desigualdades regionais e institucionais; avaliar o impacto social da educação superior; e guiar estratégias de qualificação da massificação. Portanto, emerge a estruturação e a implementação de um modelo multidimensional que integre indicadores de acesso, permanência, sucesso acadêmico e inclusão social”, alinhado ao PNE 2024–2034 (Souza e Luce, 2024).

Carvalho e Oliveira (2022) realizam uma análise crítica das metas 12, 13 e 14 do Plano Nacional de Educação (PNE 2014–2024), que tratam da expansão e qualidade da educação superior, postulando que os indicadores CPC e CC, embora amplamente utilizados pelo MEC, não têm sido suficientes para garantir qualidade acadêmica, pois privilegiam aspectos estruturais e de desempenho pontual, sem considerar processos formativos, permanência estudantil e impacto social.

Conforme detalhado na Nota Técnica nº 4/2023, elaborada pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), a metodologia de cálculo do Conceito Preliminar de

Curso (CPC) no ciclo avaliativo de 2022 se estrutura em quatro dimensões principais: desempenho dos estudantes no Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE), valor agregado pelo curso (medido pelo Indicador de Diferença entre os Desempenhos Observado e Esperado – IDD), composição do corpo docente e percepção discente obtida por meio do Questionário do Estudante. O documento esclarece que o CPC é uma medida relativa que posiciona cada curso em relação à média da área de avaliação correspondente, sendo calculado com base em dados do Censo da Educação Superior e do ENADE (INEP, 2023).

Conforme construto do INEP (2025), alinhado ao Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES), seguindo o cronograma do ciclo avaliativo, a cada ENADE é apresentado o relatório com os resultados consolidados dos principais indicadores de qualidade da educação superior brasileira referentes ao ciclo avaliativo. Os indicadores divulgados incluem: Conceito ENADE (CE): desempenho dos estudantes concluintes; Indicador de Diferença entre os Desempenhos Observado e Esperado (IDD): valor agregado pelo curso; Conceito Preliminar de Curso (CPC): indicador sintético que agrega CE, IDD, corpo docente e infraestrutura; Conceito de Curso (CC): resultado da avaliação in loco; Índice Geral de Cursos Avaliados da Instituição (IGC): média ponderada dos CPCs e CCs da instituição.

Referente aos Indicadores de Qualidade da Educação Superior, INEP (2025) reforça os pilares do Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES), instituído pela Lei nº 10.861/2004, ao consolidar as métricas oficiais e publicizá-las para diagnóstico e análise do ecossistema da educação superior no país, subsidiando a melhoria do planejamento, da governança e a tomada de decisão. Esses indicadores operam de forma articulada, permitindo análises qualitativas e quantitativas sobre infraestrutura, organização didático-pedagógica, composição docente e desempenho discente, refletindo diretamente sobre os processos de regulação, supervisão e melhoria institucional. Conforme descreve o INEP (2025), esses indicadores são expressos em escala contínua e em cinco níveis, e têm relação direta com o Ciclo Avaliativo do ENADE, que determina as áreas de avaliação e os cursos a elas vinculados, evidenciando o caráter comparativo, normativo e formativo das métricas adotadas pelo SINAES.

As Instituições de Ensino Superior (IES) podem se apropriar dos indicadores de avaliação derivados do SINAES — como o Conceito Preliminar de Curso (CPC), o Conceito de Curso (CC), o Indicador de Diferença entre os Desempenhos Observado e Esperado (IDD), o Índice Geral de Cursos (IGC) e os resultados do Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE) — de maneira estratégica, para além do cumprimento das exigências regulatórias. A apropriação desses dados permite que as

instituições desenvolvam ações consistentes de gestão acadêmica, pedagógica e institucional (INEP, 2025; STANGE, AZEVEDO e CATANI, 2022; SOUZA e LUCE, 2024).

No âmbito do planejamento curricular e pedagógico, os resultados podem ser utilizados para revisar e alinhar as matrizes curriculares com os itens avaliados no ENADE, promovendo metodologias que fortaleçam competências como raciocínio crítico, leitura, escrita e resolução de problemas. Também servem de subsídio à formação continuada de docentes, aproximando os objetivos dos cursos das exigências dos ciclos avaliativos (INEP, 2025).

A partir da perspectiva de gestão da qualidade, os indicadores permitem mapear pontos fortes e vulnerabilidades específicas por área de conhecimento, campus ou unidade. O cruzamento com dados internos facilita o monitoramento de desempenho, permanência estudantil e infraestrutura, contribuindo para o estabelecimento de metas institucionais em áreas como qualificação docente e inovação pedagógica (STANGE, AZEVEDO e CATANI, 2022).

No apoio ao estudante, os resultados do ENADE e do Questionário do Estudante viabilizam a criação de programas focados em dificuldades acadêmicas específicas, bem como em estratégias de assistência estudantil, tutoria e acolhimento institucional. Além disso, as informações coletadas revelam percepções discentes sobre a organização didático-pedagógica e as condições de oferta, orientando ações corretivas (INEP, 2023).

No campo da comunicação institucional, os indicadores de qualidade podem ser empregados para reforçar a transparência junto à comunidade acadêmica, aos conselhos reguladores e à sociedade civil. A divulgação criteriosa dos conceitos obtidos contribui para a valorização dos cursos e fortalece a imagem institucional, além de servir como instrumento de captação de recursos e credenciamento (SOUZA e LUCE, 2024).

Portanto, essas métricas podem fomentar a produção científica interna por meio de projetos de iniciação e pesquisa aplicada voltados à avaliação educacional, bem como a construção de painéis interativos de gestão da informação, integrando os dados do SINAES com os sistemas internos da instituição. A apropriação crítica, contextualizada e propositiva dos indicadores transforma os resultados avaliativos em insumos concretos para uma educação superior com mais qualidade, equidade e relevância social. Segundo a CAPES (2025), as abordagens multidimensionais na avaliação contribuem para ampliar o potencial formativo e científico das instituições, promovendo articulação entre dados avaliativos, pesquisa institucional e impacto social.

Em um cenário de constante evolução e desafios, tecnologias de Analytics e Business Intelligence (BI) destacam-se como ferramentas essenciais. Elas permitem transformar dados em insights estratégicos, permitindo decisões mais ágeis e embasadas, conforme defendido por Melo Júnior (2024).

Este artigo apresenta os resultados de um projeto de análise e visualização de dados desenvolvido para monitorar a gestão de cursos de graduação em uma universidade federal. O objetivo geral foi aplicar técnicas de Business Intelligence (BI) para subsidiar a gestão acadêmica e contribuir para a melhoria contínua da qualidade do ensino.

Vários exemplos internacionais demonstram o potencial transformador da análise de dados no ensino superior. Três casos emblemáticos destacam-se: a Georgia State University aumentou suas taxas de graduação após implementar sistemas preditivos para identificar alunos em risco (Georgia State University, s.d.); a Carnegie Mellon University desenvolveu uma plataforma adaptativa que reduziu o tempo de aprendizagem e melhorou os resultados acadêmicos (Lovett; Meyaer; Thile, 2008); e a Stanford University criou ferramentas de análise linguística que melhoraram a efetividade das interações professor-aluno (Stanford University, 2023).

Esses exemplos ilustram como a ciência de dados pode promover eficiência acadêmica, equidade educacional e sustentabilidade institucional, objetivos centrais deste trabalho.

A análise de dados no Brasil, porém, enfrenta desafios únicos. Segundo Alcantara et al. (2015), dados educacionais no país frequentemente enfrentam problemas relacionados à completude, qualidade e formatos inadequados. A falta de padronização no armazenamento de dados não estruturados, como PDFs e planilhas não padronizadas, é um obstáculo significativo para a implementação de soluções analíticas eficientes.

Uma das abordagens mais eficazes para enfrentar esses desafios é a construção de dashboards acessíveis. Esses painéis democratizam o acesso à informação, permitindo que gestores, coordenadores e demais atores institucionais tomem decisões baseadas em dados concretos, e não em suposições (Otsuka, 2024). A visualização de dados no formato de Data Storytelling transforma números e gráficos em narrativas significativas, facilitando a compreensão e o uso dos dados na gestão educacional.

A análise e visualização de dados emergem como ferramentas essenciais para a melhoria da gestão acadêmica e o fortalecimento da qualidade educacional. Este projeto ilustra a aplicação prática da Ciência de Dados Educacionais no enfrentamento dos desafios estruturais do ensino superior

brasileiro, evidenciando o papel estratégico das tecnologias de BI na construção de uma educação de qualidade, mais eficiente e inclusiva.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa caracterizou-se como um estudo de caso exploratório e descritivo, focado na aplicação prática de técnicas de análise e visualização de dados para aprimorar a avaliação e gestão acadêmica em uma Instituição de Ensino Superior (IES). O ambiente de estudo foi uma instituição pública de grande porte que gera um volume significativo de dados sobre seus alunos e cursos.

A abordagem metodológica adotada visou não apenas descrever os indicadores, mas também oferecer ferramentas visuais para facilitar a tomada de decisão pelos gestores acadêmicos, alinhando-se às recomendações de Few (2012) para visualização de dados eficaz.

2.1 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada a partir de diversas fontes internas e externas, garantindo a abrangência dos indicadores de gestão acadêmica e de qualidade. As principais fontes incluíram:

- ❏ **Gerência de Inteligência da Informação (GII) da UFPB:** Responsável pelo fornecimento de bancos de dados primários em formato CSV, os quais continham informações detalhadas sobre o histórico acadêmico de alunos e os dados estruturais dos cursos.
- ❏ **Metabase da UFPB:** Plataforma interna de Business Intelligence (BI) da instituição, utilizada para extrair dados específicos e pré-processados relacionados aos cursos de graduação e a métricas acadêmicas já consolidadas.
- ❏ **Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP):** Órgão oficial responsável pelos dados educacionais brasileiros. Informações sobre indicadores de qualidade dos cursos, como Conceito Preliminar do Curso (CPC), Conceito de Curso (CC) e Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE), foram extraídas diretamente do seu site oficial (Brasil, 2022).
- ❏ **Sistema do Ministério da Educação (MEC) e Site E-mec:** Empregados para consulta e verificação de informações complementares, especialmente no que se refere aos dados mais

recentes do ENADE (edição 2022), e para validação cruzada de informações de cursos (Brasil, 2023).

1.1. Tratamento e Preparação de Dados

A etapa de tratamento e preparação de dados foi crucial devido à natureza heterogênea e, por vezes, inconsistente das fontes de dados. Este processo, caracterizado como uma fase de engenharia de dados (Kimball e Ross, 2013), envolveu as seguintes subetapas:

- **Identificação e Correção de Inconsistências:** Realizou-se uma análise minuciosa dos dados para identificar e retificar erros, como informações desatualizadas, inconsistências de formatação, duplicações de registros e valores discrepantes.
- **Preenchimento de Dados Faltantes:** Quando aplicável e metodologicamente justificado, dados ausentes foram preenchidos por meio de lógicas de inferência ou através de novas solicitações à equipe da GII e consultas adicionais às fontes originais, visando maximizar a completude das bases de dados.
- **Conversão e Estruturação de Formatos:** Arquivos em formatos não estruturados, como documentos PDF contendo relações de alunos do ENADE, foram convertidos e estruturados em tabelas organizadas, seguindo técnicas de manipulação de dados (Wickham, 2014).
- **Transformação e Modelagem:** Foram aplicadas fórmulas, lógicas condicionais e operações de *data transformation* utilizando ferramentas como Microsoft Excel e Power BI Desktop. Esta etapa foi fundamental para criar novas variáveis, calcular indicadores de desempenho (evasão, retenção, sucesso, etc.) e modelar os dados em estruturas otimizadas para as análises subsequentes e a construção de dashboards.

É importante destacar que a necessidade de realizar novas solicitações de dados e a conversão de arquivos PDF evidenciaram desafios inerentes à qualidade e acessibilidade dos dados institucionais, reforçando a criticidade desta etapa para a garantia da confiabilidade das análises.

1.3 FERRAMENTAS E PROCESSO DE ANÁLISE E VISUALIZAÇÃO

Para a execução das atividades de análise e visualização de dados, foram empregadas ferramentas tecnológicas específicas, que apoiaram desde o pré-processamento até a entrega dos painéis interativos:

- **Microsoft Excel:** Utilizado nas fases iniciais para organização, limpeza básica e transformações preliminares dos dados, servindo como uma plataforma eficiente para o pré-processamento antes da importação para ferramentas de Business Intelligence (BI) mais robustas.
- **Power BI Desktop:** Ferramenta central empregada para a conexão, transformação e modelagem avançada dos dados. Sua capacidade de integrar informações de diferentes origens e permitir a criação de modelos de dados complexos foi essencial para a estruturação das bases que alimentaram os dashboards.
- **Metabase:** Utilizado para coletar e explorar dados já existentes no ambiente da instituição, atuando como uma ponte para dados internos que alimentaram as análises e forneceram contexto para os indicadores.
- **Google Data Studio (atualmente Looker Studio):** Empregada para a criação e desenvolvimento dos painéis interativos e relatórios finais. Sua facilidade de uso, capacidade de conexão a diversas fontes de dados e recursos de compartilhamento online tornaram-na ideal para a construção de dashboards de gestão acadêmica e de qualidade, visando a democratização do acesso à informação.

O processo de visualização foi conduzido de forma iterativa e interativa, iniciando com esboços conceituais dos dashboards e evoluindo para refinamentos contínuos. Este refinamento foi baseado no *feedback* constante das partes interessadas (gestores acadêmicos e analistas), bem como na disponibilidade e qualidade dos dados ao longo do projeto.

O objetivo primordial era assegurar que os painéis não apenas apresentassem os dados de forma precisa e acurada, mas que também fossem intuitivos, eficazes na comunicação de *insights* e, consequentemente, que impulsionassem a tomada de decisão estratégica na IES.

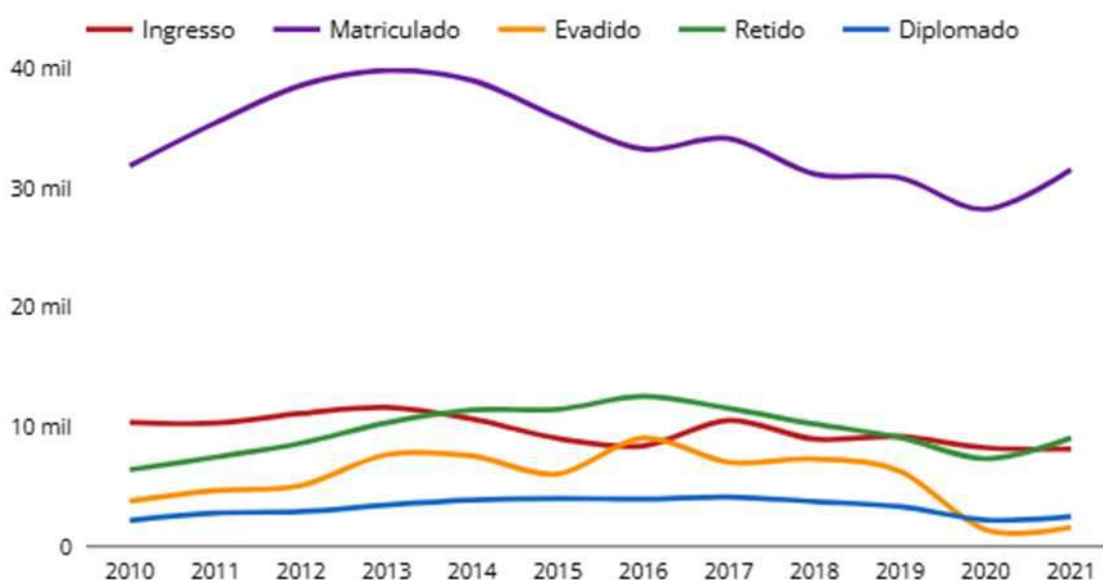
3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DE INDICADORES DE GESTÃO ACADÊMICA

O projeto concentrou-se na análise e visualização de indicadores de evasão, retenção e sucesso dos cursos de graduação. Foram utilizados bancos de dados fornecidos pela Gerência de Inteligência da Informação (GII) da instituição. Após o tratamento e a limpeza dos dados, painéis interativos foram desenvolvidos no Google Data Studio para consolidar as informações de forma clara e acessível.

Uma análise de série temporal, abrangendo 13 anos (2010 a 2022), foi realizada e visualizada nos dashboards, permitindo avaliar o desenvolvimento dos cursos em relação aos alunos evadidos, retidos e diplomados (sucesso).

FIGURA 1. Série temporal dos dados de Ingresso, Matriculados, Evadidos, Retidos e Diplomados



Fonte: Elaboração Própria (2024).

A análise da evasão aponta os cursos e períodos com maiores taxas de abandono, enquanto os indicadores de retenção evidenciam a capacidade da instituição de manter seus estudantes ativos ao longo do tempo. Por fim, os dados de sucesso medem a efetividade da universidade em formar alunos, servindo como termômetro do desempenho institucional.

Estas visualizações proporcionou uma visão clara dos cursos que demandam atenção especial, facilitando a identificação de padrões e tendências e a busca por soluções para melhorar as taxas e

aprimorar a qualidade. A capacidade de visualizar a evolução temporal dos indicadores permite uma compreensão mais profunda dos ciclos de vida dos cursos e das intervenções necessárias.

A Figura 2 apresenta a visualização dos dados de evasão mostrando a porcentagem de alunos que abandonaram seus cursos entre 2010 e 2021. O pico de evasão ocorreu em 2020, com 27,49%, seguido por uma queda significativa em 2021, chegando a 10,04%. Essa redução representa uma melhora de 63,5%, possivelmente relacionada a mudanças nas políticas de permanência durante a pandemia. A visualização também permite comparar a evasão com um referencial externo e identificar os cursos com maiores índices de abandono.

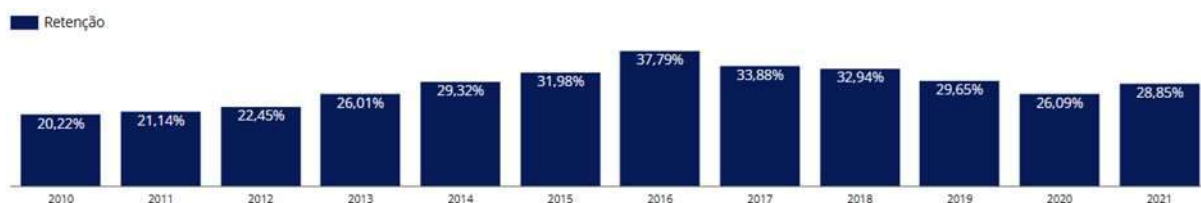
Figura 2. Dados de Evasão - Painel Indicadores de Gestão Acadêmica.



Fonte: Elaboração Própria (2024).

Os dados de retenção indicam o percentual de estudantes que permanecem ativos no curso, mas ainda não concluíram. O ano de 2016 apresentou o maior índice, com 37,79%, seguido de uma leve queda nos anos seguintes. Em 2021, o índice foi de 28,85%, indicando um aumento de 10,6% em relação ao ano anterior, como mostra a Figura 3. Essa informação é importante para avaliar o tempo de permanência e possíveis atrasos na formação dos estudantes.

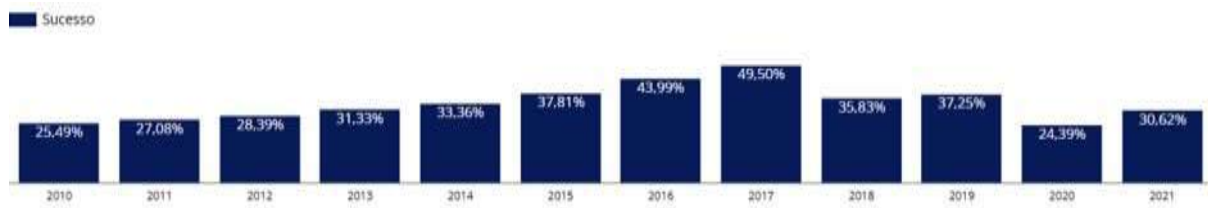
Figura 3. Dados de Retenção - Painel de Indicadores de Gestão Acadêmica.



Fonte: Elaboração Própria (2024).

Enquanto a Figura 4, mostra a visualização de sucesso acadêmico revela a porcentagem de alunos que conseguiram se diplomar em relação aos ingressantes. Os melhores resultados ocorreram em 2017 (49,50%) e 2016 (43,99%), enquanto em 2021 o índice foi de 30,62%, mostrando uma recuperação em relação a 2020 (24,39%). Esses dados evidenciam a eficiência da instituição na formação de seus alunos e servem como base para o aprimoramento das políticas acadêmicas.

Figura 4. Dados de Sucesso Acadêmico - Painel de Indicadores de Gestão Acadêmica.



3.2 ANÁLISE DE INDICADORES DE QUALIDADE

A construção de bancos de dados para indicadores de qualidade envolveu informações do INEP sobre o Conceito Preliminar do Curso (CPC), Conceito de Curso (CC) e Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (Enade). Dados de 2004 a 2009 foram incorporados à série histórica (2010 a 2019). Consultas ao site E-mec foram necessárias para complementar informações com base no código do curso, destacando a importância da validação cruzada para garantir a completude e a precisão dos dados.

Um painel de qualidade foi elaborado no Google Data Studio, conforme ilustrado na Figura 5, analisando 86 cursos avaliados entre 2004 e 2019. Este dashboard permitiu identificar visualmente cursos com avaliações insatisfatórias e os pontos específicos que necessitavam de melhoria, subsidiando decisões para as próximas avaliações.

Figura 5. Cards do quantitativo de cursos, centros e anos avaliados - Painel de Indicadores de Qualidade



Fonte: Elaboração Própria (2024).

A visualização da série histórica de CPC e Enade por curso foi crucial para entender o desempenho ao longo do tempo e planejar possíveis intervenções pedagógicas.

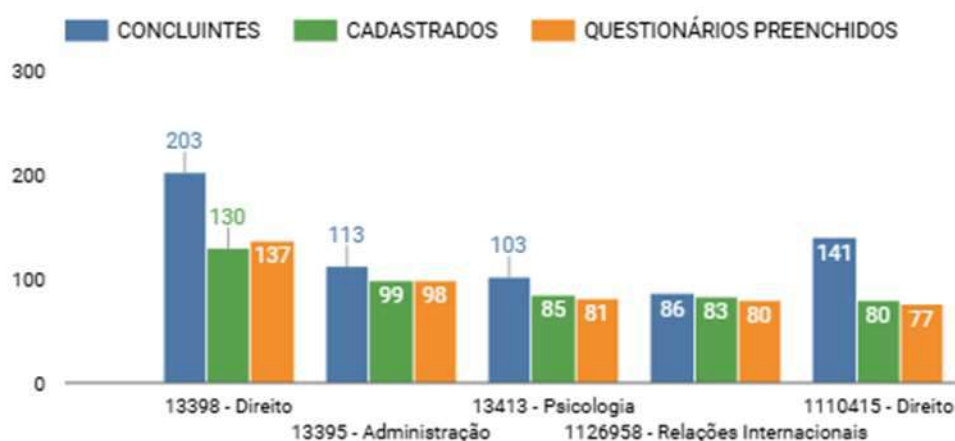
Tabela 1. Dados de CPC e ENADE do curso de Engenharia de Produção - Painel de Indicadores de Qualidade do Ensino Superior.

Ano	Código do Curso	Área de Enquadramento	Centro	(NC) Nota Contínua do Enade	CPC Faixa	(NIDD) Nota Padronizada - IDD	Nota Corpo Docente
2019	122934	Engenharia De Produção	CT	3.39	4	null	1.31
2017	122934	Engenharia De Produção	CT	3.64	4	2.64	1.33
2014	122934	Engenharia De Produção	CT	3.39	4	3.39	1.21
2011	122934	Engenharia De Produção	CT	2.92	4	3.76	1.26

3.3 MONITORAMENTO DO ENADE 2022

O monitoramento do Enade 2022 envolveu o acompanhamento diário das inscrições e do preenchimento do questionário, desde julho até novembro de 2022. Painéis de controle foram criados para visualizar a evolução do quantitativo de alunos ingressantes, concluintes participantes e cadastros completos preenchidos. Os dados foram obtidos do sistema do MEC.

Figura 6. Quantitativo de inscritos, cadastrados e questionários preenchidos do ENADE 2022 - Painel Acompanhamento ENADE 2022.



Fonte: Elaboração Própria (2022).

Figura 7. Porcentagem em Relação aos Concluintes Inscritos no ENADE 2022 - Painel Acompanhamento ENADE 2022.



Fonte: Elaboração Própria (2022).

A visualização em tempo real desses indicadores permitiu à gestão acadêmica identificar rapidamente gargalos e planejar ações proativas para incentivar a participação dos estudantes. Isso demonstra o poder da visualização de dados em um contexto operacional e tático, onde a agilidade na resposta é crucial.

4. CONCLUSÕES

O projeto de análise e visualização de dados demonstrou o valor inestimável da transformação de dados brutos em insights acionáveis para a gestão acadêmica de uma instituição de ensino superior. A aplicação prática de técnicas de coleta, tratamento e visualização de dados foi fundamental para compreender cenários complexos e tomar decisões estratégicas mais embasadas.

Apesar dos desafios inerentes à qualidade e heterogeneidade dos dados, a metodologia adotada permitiu a superação dessas barreiras, reforçando a importância de um processo robusto de engenharia de dados. A proficiência adquirida no uso de ferramentas como Excel, Google Data Studio, Metabase e Power BI Desktop foi crucial para a construção de dashboards que não apenas apresentavam dados, mas contavam uma história, facilitando a interpretação e a colaboração entre as equipes de gestão.

Os painéis desenvolvidos para indicadores de gestão acadêmica e de qualidade proporcionaram uma visão clara e em tempo real do desempenho dos cursos, permitindo a identificação de padrões, tendências e áreas que necessitavam de intervenção. O monitoramento do Enade 2022 exemplificou como a visualização ágil de dados pode apoiar ações proativas e influenciar resultados futuros.

Para o futuro, a evolução desses dashboards pode incluir a integração de análises preditivas, utilizando técnicas de Machine Learning para prever tendências e riscos. Além disso, a contínua otimização da qualidade dos dados e a exploração de novas ferramentas de visualização serão essenciais para manter a relevância e o impacto das análises na gestão educacional. Este projeto reafirma a Ciência de Dados como uma disciplina indispensável para a governança moderna em IES.

REFERÊNCIAS

ALCANTARA, Williams; BANDEIRA, Judson; BARBOSA, Armando; LIMA, André; ÁVILA, Thiago; BITTERCOURT, Ig; ISOTANI, Seiji. Desafios no uso de Dados Abertos Conectados na Educação Brasileira. In: WORKSHOP DE DESAFIOS DA COMPUTAÇÃO APLICADA À EDUCAÇÃO (DESAFIE!), 4., 2015, Recife. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2015. p. 11-20. DOI: <https://doi.org/10.5753/desafie.2015.10036>.

BRASIL. Decisão baseada em dados. Governo Digital. Disponível em: <https://www.gov.br/governodigital/pt-br/infraestrutura-nacional-de-dados/decisao-baseada-em-dados>. Acesso em: 5 jul. 2025.

BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP). Indicadores de Qualidade da Educação Superior – 2022. Brasília, 2022.

BRASIL. Ministério da Educação (MEC). Portaria nº 1.070/2023 – Diretrizes do ENADE 2023. Brasília, 2023.

CARVALHO, Renata R. da S.; OLIVEIRA, João F. Expansão e qualidade da educação superior: um balanço das metas 12, 13 e 14 do PNE 2014–2024. Avaliação (Campinas), v. 27, n. 2, p. 227–247, 2022.

BRASIL. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Diretrizes para o ciclo avaliativo 2025–2028. Brasília: CAPES, 2025.

FEW, S. Show Me the Numbers: Designing Tables and Graphs to Enlighten. 2nd ed. Analytics Press, 2012.

GEORGIA STATE UNIVERSITY. Our Approach. Leading With Predictive Analytics Student Success Programs, s.d. Disponível em: <https://success.gsu.edu/approach/>. Acesso em: 3 jul. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. Nota Técnica nº 4/2023 – Metodologia de cálculo do CPC 2022. Brasília: INEP, 2023. Disponível em: https://download.inep.gov.br/educacao_superior/enade/notas_tecnicas/2023/nota_tecnica_n_4_2023_cei_cggi_daes_descricao_da_metodologia_de_calculo_do_cpc.pdf. Acesso em: 06 jul. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. Indicadores de Qualidade da Educação Superior 2023. Brasília: INEP, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/centrais-de-conteudo/noticias/enade/disponiveis-indicadores-de-qualidade-da-educacao-superior>. Acesso em: 06 jul. 2025.

KIMBALL, R.; ROSS, M. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling. 3rd ed. Wiley, 2013.

LOVETT, Marsha; MEYER, Oded; THILLE, Candace. The Open Learning Initiative: Measuring the Effectiveness of the OLI Statistics Course in Accelerating Student Learning. Journal of Interactive Media in Education, [S.l.], v. 2008, n. 1, 2008. DOI: 10.5334/2008-14.

MELO JÚNIOR, H. G.; FRANQUEIRA, A. da S.; SANTOS, S. M. A. V.; REZENDE, C. K.; SILVA, P. R. de O.; SILVA, R. A. Tomada de decisão baseada em dados: uso de dados para aprimorar a eficiência e eficácia na gestão escolar. CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, [S. l.], v. 17, n. 9, p. e10385, 2024. DOI:

10.55905/revconv.17n.9-098. Disponível em:
<https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/10385>. Acesso em: 5 jul. 2025.

OTSU-KA, Juliana; EQUIPE EBAC. Dashboard: o que é, para que serve, tipos, como fazer e utilizar um. EBAC – Escola Britânica de Artes Criativas e Tecnologia, 05 maio 2025. Disponível em: <<https://ebaonline.com.br/blog/o-que-e-um-dashboard-e-como-fazer-um>>. Acesso em: 25 jun. 2025.

RONSANI MORAIS, Cristopher. A importância da coleta e análise de dados educacionais. Sponte, 24 out. 2023. Disponível em: <https://www.sponte.com.br/blog/coleta-e-analise-de-dados-educacionais>. Acesso em: 26 jun. 2025.

STANFORD UNIVERSITY. AI feedback tool improves teaching practices. Stanford News, 3 maio 2023. Disponível em: <https://news.stanford.edu/stories/2023/05/ai-feedback-tool-improves-teaching-practices>. Acesso em: 5 jul. 2025.

STANGE, Carlos Eduardo B.; AZEVEDO, Mário Luiz N.; CATANI, Afrânio M. Avaliação institucional e educação superior: contexto, regulações e novas tendências – a multidimensionalidade em foco. Revista Brasileira de Política e Administração da Educação, Goiânia, v. 38, n. 1, p. 122–140, 2022.

SOUZA, Brunna de; LUCE, Maria Beatriz. Massificação e qualidade na Educação Superior: análise multidimensional a partir da Conae 2024. Retratos da Escola, Brasília, v. 18, n. 2, p. 563–585, 2024. Disponível em: Retratos da Escola.

WICKHAM, H. Tidy Data. Journal of Statistical Software, v. 59, n. 10, 2014.

A CABOTAGEM COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL À SUPPLY CHAIN: UMA ANÁLISE DOS FATORES POTENCIAIS NO PORTO DE CABEDELO

Jailson Ribeiro de Oliveira
Yanaê Prado Barbosa Santos
Gabriel Barbosa Ribeiro de Oliveira

RESUMO

Este artigo analisa a cabotagem como alternativa logística estratégica e sustentável no contexto brasileiro, com foco específico no Porto de Cabedelo, localizado na Paraíba. O estudo tem como objetivo avaliar o potencial da cabotagem para promover a redução de custos operacionais e de emissões ambientais no setor de transportes, justificando-se pela crescente demanda por soluções logísticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis. A metodologia adotada consistiu em uma pesquisa exploratória e descritiva, fundamentada na análise de dados secundários provenientes do Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL) e de fontes oficiais governamentais. A pesquisa também levou em consideração os impactos da Lei nº 14.301/2022, conhecida como BR do Mar, sobre a expansão e dinamização do transporte marítimo de curta distância no Brasil. Os resultados apontam para um crescimento de 6,3% nas operações do Porto de Cabedelo em 2024, evidenciando o avanço da cabotagem como uma solução viável, embora ainda limitada por desafios estruturais, como a insuficiência de infraestrutura portuária e a necessidade de maior integração intermodal. Conclui-se que a cabotagem, se adequadamente incentivada, pode desempenhar papel central na transformação do modelo logístico nacional, sobretudo em regiões estratégicas como o Nordeste.

Palavras-chave: Cabotagem, logística sustentável, Infraestrutura portuária.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma vasta costa litorânea, com quase oito mil quilômetros de extensão, que oferece um grande potencial para o desenvolvimento do transporte aquaviário, especialmente o modal de cabotagem. No entanto, apesar dessas condições geográficas favoráveis, segundo dados do **Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL)**, o modal rodoviário responde por cerca de 75% da movimentação de cargas no Brasil, evidenciando um desbalanceamento significativo na matriz de transportes do país. Esse desequilíbrio na matriz de transporte gera uma série de segmentos negativos, como altos custos operacionais, elevado nível de poluição urbana, congestionamentos das rodovias e uma maior incidência ao transporte aquaviário.

A cabotagem, definida pela Lei 10.893/2004 como o transporte realizado entre portos brasileiros por via marítima ou uma combinação de vias marítimas e interiores, apresenta-se como uma alternativa estratégica para equilibrar a matriz de transportes do Brasil. Com vantagens como maior eficiência energética, maior capacidade de transporte e menor emissão de poluentes, o modal de cabotagem oferece soluções sustentáveis e econômicas para o setor logístico (CNT, 2013). No entanto, a utilização desse modal enfrenta desafios significativos, como a infraestrutura portuária insuficiente, a burocracia nas operações e a alta carga tributária, que restringem o seu crescimento e a plena exploração de seu potencial.

Nesse contexto, essa pesquisa busca analisar oportunidades e contextos relevantes a cerca desse tema de fato bem importante, do transporte de cabotagem no Brasil, com ênfase nas possibilidades de desenvolvimento do Porto de Cabedelo, na Paraíba. Localizado em uma região estratégica do Nordeste, o Porto de Cabedelo pode desempenhar um papel importante no fortalecimento da cabotagem como alternativa **logística no país**, aproveitando-se de sua proximidade com os grandes centros de consumo e de políticas de incentivo ao uso do modal, como o programa BR do Mar. A pesquisa visa, ainda, explorar como a cabotagem pode contribuir para um sistema de transporte mais sustentável, eficiente e competitivo, e evidencia a importância de investimentos em infraestrutura e a integração multimodal para o crescimento dessa estratégia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Por definição o *Council of Logistics Management*, logística é definida como o processo de planejamento, implementação e controle do fluxo eficiente e economicamente eficaz de matérias

primas, estoque em processo, produtos acabados, e informações relacionadas, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, visando satisfazer as necessidades dos clientes.

A **cadeia de suprimentos** envolve todas as atividades necessárias para a produção e distribuição de um bem ou serviço, desde a aquisição de matérias-primas até a entrega do produto final ao consumidor. Ela é composta por diversas etapas interconectadas, incluindo o transporte, o armazenamento, o gerenciamento de estoques e o processamento de pedidos. A eficiência de uma cadeia de suprimentos bem gerida pode trazer benefícios como a redução de custos, a melhoria nos prazos de entrega e um melhor atendimento às necessidades do cliente. De acordo com Ballou (2006), a integração de todos esses processos é fundamental para a otimização da logística e para a criação de valor para o cliente final, mantendo o foco em entregar o produto correto, no tempo certo e ao menor custo possível.

Além disso, em um ambiente de negócios globalizado, as cadeias de suprimentos estão se tornando cada vez mais complexas e exigem o uso de tecnologias avançadas para monitoramento e coordenação entre os diversos elos da cadeia, garantindo flexibilidade e resiliência em face de desafios operacionais.

Diante desses segmentos precedentes para a abordagem da pesquisa, e das suas importâncias falamos agora sobre o **modal marítimo** é um dos meios de transporte mais importantes para o comércio internacional, de acordo com relatórios da *Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento* (UNCTAD) responsável por cerca de 95% do transporte global de mercadorias. Ele se destaca pela capacidade de movimentar grandes volumes de cargas, sejam estas líquidas, sólidas, unitizadas ou a granel. A principal vantagem desse modal é seu custo relativamente baixo, especialmente para longas distâncias, além da flexibilidade em acomodar diferentes tipos de mercadorias. No entanto, o transporte marítimo também apresenta limitações, como a maior lentidão em comparação a outros modais e a dependência de transbordo para transporte terrestre após o desembarque nos portos. Para que a logística marítima seja eficiente, é necessária uma integração com modais rodoviário e ferroviário, que completam a distribuição das mercadorias até seus destinos finais.

A cabotagem no Brasil representa uma alternativa estratégica para a distribuição logística em um território de dimensões continentais, favorecido por uma extensa costa marítima e potencial hidroviário. Segundo estudo de Silva (2017), a cabotagem se consolida como um meio de transporte eficiente e ambientalmente sustentável, contribuindo não apenas para a proteção do meio ambiente,

mas também para o fortalecimento da soberania e da segurança nacional, conforme dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2013).

O autor destaca que, ao reequilibrar a matriz de transportes brasileira — historicamente concentrada no modal rodoviário —, a cabotagem contribui para a redução de custos logísticos e melhora a eficiência operacional das empresas. Além disso, evidencia-se que, ao ser integrada a outros modais, como o ferroviário e o rodoviário, a cabotagem possibilita uma solução logística mais robusta e abrangente, favorecendo o desempenho da cadeia de suprimentos e promovendo maior competitividade no setor.

O pensamento de Dias (2010) é utilizado para enfatizar o potencial de crescimento desse modal. A LOGIN, uma das maiores empresas de cabotagem no Brasil, já registrou um crescimento de 35% na movimentação de mercadorias pela costa brasileira, evidenciando o impacto positivo desse modal no cenário logístico. Com essa expansão, a cabotagem torna-se uma alternativa viável ao transporte rodoviário de longa distância, complementando a cadeia logística nacional.

Além disso, o modal marítimo também apresenta outros benefícios, como a maior capacidade de carga e menores custos operacionais, apesar dos desafios relacionados à lentidão nas viagens e à dependência de outros modais nos portos. (DIAS;2010).

3. MÉTODOS EMPREGADOS PARA COLETA DE DADOS E ESCOLHA DOS REFERENCIAIS

A metodologia adotada nesta pesquisa combina abordagem qualitativa e exploratória, por meio de análise documental e estudo de caso. Para embasar a investigação sobre o modal de cabotagem no Brasil, com foco específico no Porto de Cabedelo (PB), foram utilizados dados extraídos de fontes institucionais confiáveis e atualizadas, como o *Indicadores Logísticos de Cabotagem* disponibilizado pelo Instituto de Logística e Supply Chain (ILOS), relatórios do Governo da Paraíba, da Confederação Nacional do Transporte (CNT), da ANTAQ, entre outros.

O relatório do ILOS fornece uma visão aprofundada sobre o desempenho da cabotagem, permitindo a análise de variáveis como volume de cargas movimentadas por porto, custos operacionais comparativos entre modais, eficiência energética, vantagens competitivas e principais barreiras enfrentadas, notadamente em infraestrutura portuária e regulação. Com base nesses dados, direcionou-se o estudo ao Porto de Cabedelo, que tem demonstrado resultados expressivos nos últimos anos e se apresenta como um exemplo promissor de expansão logística regional.

A escolha dos referenciais teóricos também seguiu critérios de relevância, atualidade e aplicabilidade ao contexto logístico nacional. Foram utilizados autores clássicos como Ballou (2006) e pesquisadores contemporâneos como Silva (2017) e Santos (2017), além de estudos técnicos e normativos publicados por instituições governamentais e setoriais.

Dessa forma, a partir da análise documental, foi possível não apenas entender os benefícios logísticos e sustentáveis da cabotagem, mas também contrastá-los com os entraves do atual modelo rodoviário predominante. Essa comparação se faz necessária para compreender as distorções da matriz de transporte brasileira e justificar a urgência de discutir alternativas mais equilibradas, como será apresentado a seguir.

3.1. A IMPORTÂNCIA DE DISCUTIR A PROBLEMÁTICA DO MODAL RODOVIÁRIO NO BRASIL

Discutir a predominância do modal rodoviário no Brasil é relevante compreender os desequilíbrios estruturais da matriz de transporte nacional. Apesar de sua capilaridade e flexibilidade, esse modal é responsável por cerca de **58% da movimentação de cargas no país**, segundo dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2021). Essa concentração excessiva compromete a eficiência logística, que poderia ser redistribuída de maneira mais racional entre modais como a cabotagem e a ferrovia (IPEA, 2022).

A dependência do transporte rodoviário gera impactos significativos na **competitividade das cadeias produtivas brasileiras**, devido aos elevados custos com combustíveis, pedágios, manutenção de frota e má conservação da malha viária (CNT, 2023). Além disso, há frequentes **gargalos logísticos** nas rodovias, como congestionamentos e interdições, que aumentam os prazos e reduzem a confiabilidade nas entregas (PELOG, 2022). O modal também concentra um alto índice de **sinistros e perdas de carga**, especialmente em longos trajetos com pouca infraestrutura de apoio (ANTT, 2021).

Do ponto de vista ambiental, o modal rodoviário contribui significativamente para a emissão de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2022), **mais de 90% das emissões do setor de transportes no Brasil vêm do modal rodoviário**, o que evidencia sua participação desproporcional na degradação ambiental. Essa realidade contraria os compromissos assumidos pelo Brasil em acordos internacionais como o Acordo de Paris (MMA, 2021).

Portanto, discutir essa problemática é essencial para estimular o uso de alternativas logísticas mais **sustentáveis e economicamente viáveis**, como a cabotagem, que apresenta menor custo por

tonelada-quilômetro e menor emissão de GEE (ANTF, 2022). Também se torna necessário promover **políticas públicas de incentivo à intermodalidade**, com investimentos em infraestrutura ferroviária e portuária, e maior integração entre os modais existentes (IPEA, 2022).

3.2 FATORES DETERMINANTES PARA A ESCOLHA DO MODAL: CABOTAGEM

A partir de uma matriz orientadora elaborada com base em critérios logísticos e operacionais, foram definidos os principais fatores que influenciam a escolha entre modais de transporte, com foco nos diferenciais da cabotagem. A estrutura utiliza a Escala Likert (1 a 5) para avaliação da relevância de variáveis como congestionamento, eficiência, riscos, custos e emissões.

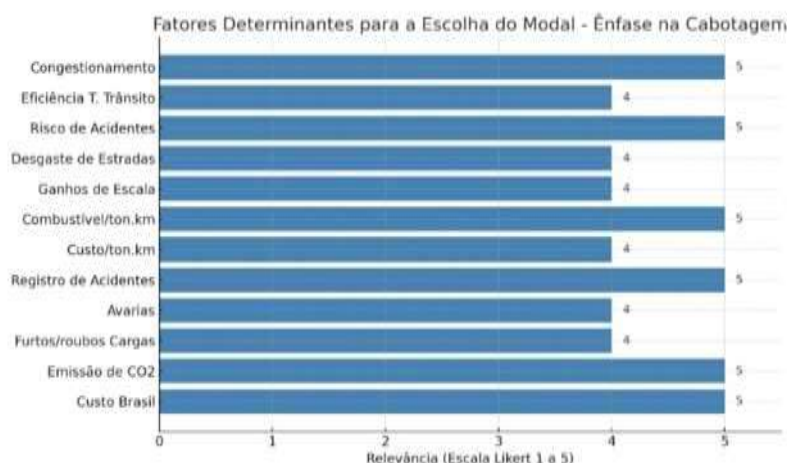
Entre as variáveis levantadas, destacam-se:

- **Congestionamento:** A cabotagem reduz a pressão sobre as rodovias, aliviando os gargalos logísticos urbanos e interestaduais, o que contribui para um fluxo mais eficiente de veículos e mercadorias nas regiões metropolitanas e corredores logísticos (IPEA, 2022; CNT, 2023).
- **Eficiência no tempo de trânsito:** Apesar de operar a velocidades médias inferiores ao transporte rodoviário em certos trechos, a cabotagem oferece **maior previsibilidade e regularidade**, especialmente em trajetos de longa distância, o que a torna eficiente na composição de cadeias logísticas complexas (PELOG, 2022; ANTAQ, 2021).
- **Risco de acidentes e avarias:** O transporte marítimo apresenta índices **consideravelmente menores de sinistros, roubos e avarias** em comparação ao modal rodoviário, o que **aumenta a confiabilidade e reduz perdas financeiras** (ANTT, 2021; ANTAQ, 2021).
- **Desgaste de infraestrutura:** O uso da cabotagem contribui para **a preservação das rodovias**, diminuindo o desgaste físico causado pelo tráfego intenso de veículos pesados, o que impacta positivamente nos custos de manutenção da malha viária (CNT, 2023; IPEA, 2022).
- **Ganho de escala e consumo energético:** A cabotagem permite o transporte de grandes volumes por viagem, o que **diminui o consumo de combustível por tonelada-quilômetro**, promovendo maior eficiência energética no transporte de cargas (ANTF, 2022; EPE, 2020).
- **Emissão de CO₂ e impacto ambiental:** O modal marítimo emite **menores volumes de gases de efeito estufa** por tonelada transportada, o que o torna uma **alternativa estratégica para a sustentabilidade no setor logístico** (SEEG, 2022; MMA, 2021).

- **Custo Brasil:** A diversificação da matriz de transporte com maior uso da cabotagem contribui para **reduzir o "Custo Brasil"**, ao mitigar perdas logísticas, reduzir sinistros e aumentar a competitividade sistêmica da economia (CNI, 2021; PELOG, 2022).

A matriz a seguir contribui para a identificação de fatores prioritários no desenho de políticas públicas e decisões logísticas empresariais, ressaltando a necessidade de incentivo à diversificação modal.

Gráfico 1. Matriz de identificação dos fatores prioritários.



Fonte: Autora, 2025.

4. PRINCIPAIS RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS E CASE PRÁTICO E APLICAÇÃO DO TEMA

Como já mencionado anteriormente, utilizamos como base a cabotagem no Porto de Cabedelo. Essa seção discute as oportunidades do modal marítimo no Porto de Cabedelo.

Potencial de crescimento da Cabotagem, o modal marítimo, especialmente a cabotagem, oferece oportunidades de crescimento para o Porto de Cabedelo, visto que o Brasil tem como já dito uma vasta costa litorânea e a cabotagem representa uma alternativa eficiente ao transporte rodoviário de longa distância. Cabedelo, com sua localização no Nordeste, e tendo em vista que é um Porto ainda pequeno e que precisa ser trabalhado, pode se beneficiar desse cenário ao escoar mercadorias para outras regiões do país, o que pode aliviar o congestionamento nas rodovias e oferecer uma solução mais econômica e ambientalmente amigável.

Um dos principais atrativos do modal marítimo é a sua capacidade de movimentar grandes volumes de carga a um custo menor do que o modal rodoviário, especialmente em distâncias maiores. Isso pode ser uma vantagem significativa para Cabedelo, que pode se tornar um ponto importante para a distribuição de cargas do Norte e Nordeste para o Sul e Sudeste, reduzindo o custo logístico e

aumentando a competitividade das empresas que utilizam o porto, além de alinhar por exemplo rotas do modal rodoviário como a linha que passa por Campina Grande, e cidades vizinhas que possuem grande movimentação de insumos agrícolas para a exportação.

A cabotagem também é reconhecida por ser mais **sustentável**, uma vez que emite menos gases poluentes por tonelada de carga transportada em comparação ao transporte rodoviário. O Porto de Cabedelo pode aproveitar essa vantagem para promover sua utilização por empresas comprometidas com metas de sustentabilidade, como já acontece de uma menor escala e que melhorando sua imagem e ampliando sua base de clientes, principalmente em um cenário de maior preocupação ambiental.

Incentivos governamentais e programas de fomento, o governo brasileiro, por meio de programas como o *BR do Mar*, tem incentivado o crescimento da cabotagem com o objetivo de equilibrar a matriz de transporte. O Porto de Cabedelo pode se beneficiar dessas políticas de incentivo, como redução de tributos e facilitação de investimentos em infraestrutura, para ampliar sua capacidade operacional e atrair novos fluxos de mercadorias.

De acordo com o portal Porto de Cabedelo apresentou um crescimento significativo de 6,32% nas operações em 2024, movimentando 1.065.745 toneladas de cargas até setembro, em comparação com 1.002.358 toneladas no mesmo período do ano anterior. Esse aumento é atribuído aos esforços contínuos da Companhia Docas da Paraíba para otimizar operações e modernizar a infraestrutura do porto, conforme destacado pelo diretor-presidente, Ricardo Barbosa.

Janeiro foi o mês de maior movimentação até agora, com 157.021 toneladas, enquanto setembro se destacou com a movimentação de petcoke e combustíveis, totalizando 71.752 toneladas e 32.445 toneladas, respectivamente. Além disso, o porto tem avançado em melhorias estruturais, incluindo reformas nos armazéns e a construção de uma nova sede administrativa, parte de um grande programa de investimentos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, observa-se que o modal de cabotagem possui um papel estratégico na reconfiguração da matriz de transporte brasileira, sobretudo por seu potencial de contribuir com a redução de custos logísticos, a mitigação de impactos ambientais e o aumento da eficiência operacional nas cadeias de suprimentos. A análise do desempenho do Porto de Cabedelo,

especialmente com o crescimento de 6,32% nas operações registrado em 2024, evidencia um movimento positivo de expansão e adaptação às novas demandas logísticas e regulatórias.

Esse crescimento não se limita apenas ao volume de cargas movimentadas, mas reflete o compromisso com a modernização da infraestrutura, a diversificação de cargas e a adoção de práticas mais sustentáveis, alinhadas à agenda ESG. Tais avanços indicam que o Porto de Cabedelo possui condições concretas de consolidar-se como um hub logístico regional, com capacidade para atrair novos fluxos comerciais e integrar-se de forma mais eficiente à malha intermodal brasileira.

Além disso, os dados analisados ao longo do estudo apontam que o fortalecimento da cabotagem exige políticas públicas consistentes, investimentos em infraestrutura portuária, incentivos fiscais e o desenvolvimento de soluções tecnológicas voltadas à digitalização e rastreabilidade. A experiência do Porto de Cabedelo, portanto, pode servir de referência para outras regiões costeiras que buscam diversificar seus modais e superar a dependência histórica do transporte rodoviário.

Em síntese, a cabotagem não deve ser vista apenas como um complemento, mas como um eixo estruturante da logística nacional. Com ações coordenadas entre governo, iniciativa privada e academia, é possível potencializar seus benefícios e promover uma transformação sustentável e competitiva no setor de transportes do Brasil.

REFERÊNCIAS

ANTAQ – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. Anuário Estatístico 2021. Brasília: ANTAQ, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br/noticias/2022/setor-portuario-movimenta-1-2-bilhao-de-toneladas-de-cargas-em-2021/anuario-2021-vf-003.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ANTF – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. Comparativo de Emissões entre Modais, 2022. Brasília: ANTF, 2022. Disponível em: <https://www.antf.org.br/comparativo-de-emissoes-entre-modais>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ANTF – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. Por que o Brasil vai bem de trem. Brasília: ANTF, 2022. Disponível em: <https://www.antf.org.br/por-que-o-brasil-vai-bem-de-trem/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Dados Estatísticos sobre Transportes de Cargas. Brasília: ANTT, 2021. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/en/graficos-e-estatisticas>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Relatório Anual de Transportes de Cargas no Brasil, 2021. Brasília: ANTT, 2021. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/en/graficos-e-estatisticas>. Acesso em: 11 abr. 2025.

BALLOU, R. H. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Custo Brasil: país perde o equivalente a 20% do PIB com ineficiência. Brasília: CNI, 2021. Disponível em: <https://imprensa.portaldaindustria.com.br/releases/custo-brasil-pais-perde-o-equivalente-a-20-do-pib-com-ineficiencia/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Anuário CNT do Transporte 2023. Brasília: CNT, 2023. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias, 2023. Brasília: CNT, 2023. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Atlas da Eficiência Energética no Brasil 2020. Brasília: EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf. Acesso em: 11 abr. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA. Mais crescimento: Porto de Cabedelo já acumula 6,3% de aumento nas operações em 2024. Disponível em: <https://portodecabedelo.pb.gov.br/2024/10/14/mais-crescimento-porto-de-cabedelo-ja-acumula-63-de-aumento-nas-operacoes-em-2024/>. Acesso em: 19 out. 2024.

ILOS – INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN. Indicadores logísticos da cabotagem, 2024. Disponível em: <https://ilos.com.br/publicacoes/indicadores-logisticos-cabotagem/>. Acesso em: 19 out. 2024.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Matriz de Transporte e Planejamento Logístico no Brasil, 2022. Brasília: IPEA, 2022. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=38284. Acesso em: 11 abr. 2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Transportes e Desenvolvimento Econômico. Brasília: IPEA, 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/component/assuntos/interna?id=232>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Plano Estratégico de Logística e Transportes (PELOG), 2022. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/plano-estrategico-de-logistica-e-transportes>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Brasília: MMA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/repositorio/grupo-de-trabalho-inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviaros>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Relatório de Contribuições Nacionais Determinadas (NDCs), 2021. Brasília: MMA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/clima/ndc>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Planejamento Estratégico 2024-2027. Brasília: Governo Federal, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/portal-da-estrategia/planejamento-estrategico-2024-2027/planejamento-estrategia>. Acesso em: 11 abr. 2025.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA (ONTL). Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/>. Acesso em: 19 out. 2024.

SANTOS, K. S. Logística brasileira: um estudo teórico do modal aquaviário (cabotagem). João Pessoa: UFPB, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/1765/1/KSS10082017.pdf>. Acesso em: 19 out. 2024.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Relatório do Setor de Transporte, 2022. São Paulo: SEEG, 2022. Disponível em: <https://seeg.eco.br/relatorios/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

SILVA, C. D. L. Logística de Cabotagem: Alternativa de Distribuição para o Brasil. João Pessoa: UFPB, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/1832/1/CDLS28082017.pdf>. Acesso em: 19 out. 2024.

SILVA, F. A.; RIBEIRO, M. N. A logística de cabotagem: análise do caso brasileiro. Produção, v. 30, e20210131, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/JjyCGNdbZQc4bSTMQnMFKpB/?lang=pt>. Acesso em: 21 out. 2024.

ANÁLISE DO ALGORITMO DE COMPRESSÃO DE IMAGEM UTILIZANDO SVD TRUNCADO

João Vitor Leal Cruz
Samuel Oliveira e Silva
Kauan Bezerra Benvindo
André Francisco Coelho Castro

RESUMO

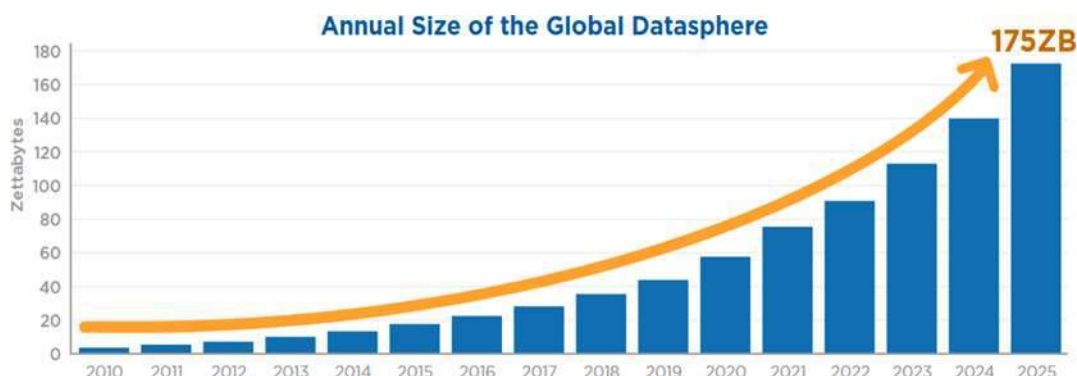
Este trabalho aborda a compressão de imagens em tons de cinza por meio da decomposição de valores singulares truncada, com objetivo de quantificar o equilíbrio entre a redução do tamanho do arquivo e a preservação da qualidade visual. Para isso, foi montado um conjunto de vinte e nove imagens de diferentes resoluções e níveis de complexidade de textura. Cada imagem foi convertida para escala de cinza e submetida à decomposição de valores singulares truncada, sendo depois reconstruída variando o número de componentes significativos. Em cada configuração, calcularam-se a taxa de compressão, o erro quadrático médio e a relação sinal-ruído de pico em decibéis. Os experimentos foram realizados em ambiente Python, utilizando bibliotecas padrão para álgebra linear sem otimizações de hardware. Os resultados mostram como o aumento do número de componentes afeta simultaneamente a eficiência de compressão e a fidelidade visual, fornecendo um conjunto de tabelas e gráficos que ilustram a curva de desempenho do método. Como conclusão, verifica-se que a técnica se apresenta viável para aplicações acadêmicas, abrindo caminho para investigações futuras em imagens coloridas e implementações otimizadas.

Palavras-chave: compressão de imagem; svd truncado; python.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço e a normalização do uso da internet, houve um aumento expressivo na quantidade de informações que circulam pela rede (figura 1). Além do volume, a qualidade dessas informações também evoluiu, como a resolução das imagens (quantidade de pixels), a frequência de reprodução de sons (em kHz ou mHz) e a fluidez dos vídeos (frames por segundo).

Figura 1 - Tamanho Anual da *Global Datasphere*



Fonte: Data Age 2025, sponsored by Seagate with data from IDC Global DataSphere (2020)

Como é possível perceber na figura 1, que ilustra uma série histórica, o volume dos dados vem crescendo de forma exorbitante ao longo dos anos, sendo previsto alcançar 175 Zettabytes, que correspondem a 175 bilhões de Terabytes. Tal fato se consagra pela evolução tecnológica dos computadores e celulares, que é o meio pelo qual os dados percorrem a internet.

Esse crescimento, impulsionado tanto pelo aumento no número de usuários quanto pela evolução tecnológica, trouxe consigo um desafio significativo: a expansão exorbitante da carga de dados em rede.

Para mitigar esse problema, diversas técnicas de otimização foram desenvolvidas, sendo a compressão de imagens o foco deste trabalho, que tem como objetivo a implementação de um algoritmo para compressão de imagens em escala de cinza com base na versão truncada do método de Decomposição de Valores Singulares (SVD).

As imagens digitais, fundamentais em diversas áreas como medicina, entretenimento e segurança, frequentemente contêm redundâncias que aumentam o consumo de espaço de armazenamento e largura de banda. Assim, a compressão de imagens torna-se uma ferramenta essencial para otimizar recursos computacionais e melhorar a experiência do usuário.

A técnica explorada neste trabalho, o SVD, é uma abordagem matemática amplamente utilizada na análise e aproximação de matrizes. O método escolhido, o SVD truncado, permite obter uma versão comprimida da imagem original, preservando suas principais características visuais. O que será avaliado utilizando

algumas métricas como Relação Sinal-Ruído de Pico (PSNR), Erro Quadrático Médio (MSE) e taxa de compressão.

O uso do SVD é justificado pois suas bases matemáticas são usadas nos mais diversos campos, como Dongarra et al. (2018, p. 810, tradução nossa¹) explicou que “as aplicações são tão diversas quanto squares data fitting, compressão de imagem, reconhecimento facial, análise do componente principal, análise latente semântica e o cálculo da norma 2, número de condição e posto numérico de uma matriz”.

Portanto, a relevância deste trabalho está na avaliação da eficiência do método SVD truncado, ao se verificar estaticamente os valores obtidos de sua taxa de compressão, erro quadrático médio e relação sinal-ruído de pico, o que tanto de forma direta fala sobre seu funcionamento na compressão de imagem, quanto pode indiretamente mostrar indícios sobre sua efetividade nos demais campos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COMPRESSÃO DE DADOS

Todo algoritmo produz uma ação sobre dados e esses dados existem nas estruturas mais variada, desde textos, imagens, sons e etc, contudo nem sempre os dados são utilizados em sua forma pura, isso ocorre pela influência da Teoria da Informação, que segundo Cover e Thomas (2006, p. 1, tradução nossa²) “responde duas questões fundamentais na teoria da comunicação: qual a compressão de dados final (resposta: entropia H), e qual a taxa de transmissão de comunicação final (resposta: capacidade do canal C).”

Dessa forma, em busca de otimizar a manipulação dos dados, seja apresentando, modificando, armazenando e transmitindo, existe a compressão de dados, “a arte ou ciência de representar informação de forma compacta” (Sayood, 2012, p. 1, tradução nossa³). Tal representação compacta se refere à forma primária

dos dados, ou seja, os bytes que os compõem, a fim de atingir o objetivo de compactá-lo, faz-se necessário reduzir a quantidade de bytes utilizada para armazenar a informação.

No entanto, esse seria somente um dos algoritmos, algoritmo de compressão, que fazem parte do processo de compressão, pois existe o algoritmo de

reconstrução, que atua sobre o produto gerado pelo primeiro e produz uma reconstrução da informação comprimida. Durante esse segundo processo, há chance de uma perda de informação em referência à contida no original, que o leva às classificações dos processos de compressão em Lossless (sem perda) e Lossy (com perda). (Sayood, 2012, p. 3-4)

Logo, levando em consideração que o trabalho em questão trata de imagens, o algoritmo produzido nesse trabalho terá como seu fim a compressão de imagens.

2.2 COMPRESSÃO DE IMAGEM

Dentre as técnicas de compressão de dados, a compressão de imagem trabalha especificamente com imagens digitais, que são formadas por capturas do mundo real ou de uma imagem gerada previamente, que são chamados pixels ou pels (picture elements), originados de uma fonte contínua em espaço e amplitude. (Jones e Rabbani, 1991, p. 4) Isso irá resultar numa organização em forma de matriz, para que se possa representar todos os valores que compõem a imagem em sua altura e largura, até mesmo suas possíveis camadas. Ademais, tais técnicas até mesmo levando seu nome como a extensão da imagem que foi gerada, como *Joint Photographic Experts Group* (JPEG) e *Portable Network Graphics* (PNG).

Entretanto, as imagens possuem dentro de sua estrutura de representação uma considerável quantidade de informações desnecessárias. Tal fato é apontado de forma exímia por Jones e Rabbani (1991, p. 3, tradução nossa⁴) que explicam: “imagens digitais, em sua representação canônica, geralmente contém uma significativa quantidade de redundância.”.

Seguindo essa lógica, as imagens digitais podem ter seu conteúdo reduzido sem necessariamente ter um prejuízo visível à informação que é passada, pois a redundância serve apenas para ocupar o espaço de armazenamento sem que haja acréscimo de novas informações ao conteúdo. Por isso, mesmo que a técnica de compressão utilizada neste trabalho, Decomposição em Valores Singulares, seja classificada como *Lossy*, dependendo da forma de sua implementação o grau de perda da imagem é mínimo, sendo muitas vezes imperceptível para o observador.

2.3 JPEG

O formato JPEG é originado do método de mesmo nome, que é “projetado para comprimir imagens coloridas ou em tons de cinzas de cenas naturais, que são do mundo real” (Dhawan, 2011, p. 23, tradução nossa⁵). Sua compressão é baseada na formulação matemática da Transformação Discreta de Cosseno (DCT), o que tem por função a conversão de um sinal em outro tipo, o qual pode ser aplicado às imagens, transformando elas, que são representações matriciais do espaço, em dados números, ou seja, coeficientes.

Seu processo começa pela segmentação da imagem em camadas de blocos 8x8, os quais são definidos assim pelo tempo de execução que cresce exponencialmente quanto maior for. Esses blocos sofrendo do uso do DCT são transformados para coeficientes dentro do domínio de frequência, os quais são rearranjados de acordo com sua magnitude de informação, para serem comprimidos posteriormente por estratégias como codificação *run length*, codificação aritmética ou codificação de Huffman (Dhawan, 2011, p. 23).

Sua fórmula para matrizes de duas dimensões é:

$$DCT(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2N}} C(i) C(j) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} pixel(x, y) \cos \left[\frac{(2x+1)i\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)j\pi}{2N} \right]$$

$$C(x) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \text{ se } x = 0, \text{ senão } 1 \text{ se } x > 0.$$

Existe essa diferenciação para a fórmula de duas dimensões, porque existe também a aplicação do DCT em matrizes de uma dimensão, a qual pode ser feita usando somente um passo a passo estruturado e tabelas, mas sem necessidade de formalização matemática. Além disso, existe o padrão JPEG que fornece um codec, o qual define como uma imagem deve ser comprimida em uma linha de *bytes* e descomprimida novamente em uma imagem. Tal tabela é utilizada para normalizar os coeficientes obtidos.

2.4 DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES

O método de Decomposição em Valores Singulares permite trabalhar abrangentemente com matrizes, pois ele é orientado a dados, o que possibilita efetuar suas operações puramente com o que é recebido como *input*, sem a necessidade de algum auxílio ou conhecimento externo ou intuitivo. Além disso, ele é muito importante na computação dentre os métodos de aproximação de matriz existentes, pois

fornece uma decomposição numericamente estável e que é garantido de existir (Brunton e Kutz, 2017, p. 4). Segue-se a sua fórmula:

$$X = U\Sigma V^*$$

Por meio da análise do posto de uma matriz, que corresponde aos valores singulares não nulos r , é possível entender a relação de dependência entre as colunas e linhas de uma dada matriz, essa relação de dependência revela a existência e, caso haja, uma quantificação da redundância dentro dessa matriz. O que é tratado por meio da aproximação de baixo posto, em que uma matriz $X_{n \times m}$ é representada por meio de duas matrizes unitárias ortogonais U e V^* , que descrevem respectivamente as linhas e colunas da matriz X , contudo enquanto X se utiliza de m linhas e n colunas, $U_{m \times m}$ descreve suas linhas por meio de m linhas e m colunas. De forma igual, é possível descrever a relação da matriz unitária ortogonal $V_{n \times n}$ com a matriz X , V sendo composta por n linhas e n colunas. Ambas podendo ser escrita conforme segue:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}.$$

Enquanto que os elementos de U são definidos pela fórmula:

$$u_i = \frac{1}{\sigma_i} X v_i, i = 1, \dots, m.$$

O símbolo $(*)$ está aqui para representar uma transposta conjugada, que cumpre a função de manter a ortonormalidade das matrizes, assim garantindo, por consequência, a unitariedade de V , essa sendo uma característica amplamente explorada durante toda a execução dessa operação. Pode-se notar também, que tal característica contribui para a capacidade do método SVD, em que ele consegue operar sobre qualquer matriz, desde que ele consegue atuar sobre matrizes reais e complexas.

A matriz Σ é uma matriz diagonal, que tem como valores apenas números não negativos organizados de forma hierárquica, isso acontece dessa maneira, pois ela serve como um descritor da magnitude das informações que estão contidas na matriz X , ou seja, os valores dos elemento σ_{ij} , sendo $i = j$, são

organizados tal que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq 0$. Portanto, a matriz Σ é utilizada como o limitador de até qual grau de informação seria relevante para ser mantido ou excluído do resultado desejado da aproximação.

É possível concluir, seguindo o exposto, que pode-se representar a matriz X em forma do produto de seus fatores ou fatorada:

$$X = \begin{matrix} u & \sigma & v^* \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix} + \dots + \begin{matrix} u & \sigma & v^* \\ r & r & r \end{matrix} = \sum_{i=1}^r \begin{matrix} u & \sigma & v^* \\ i & i & i \end{matrix}.$$

2.5 DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES TRUNCADA

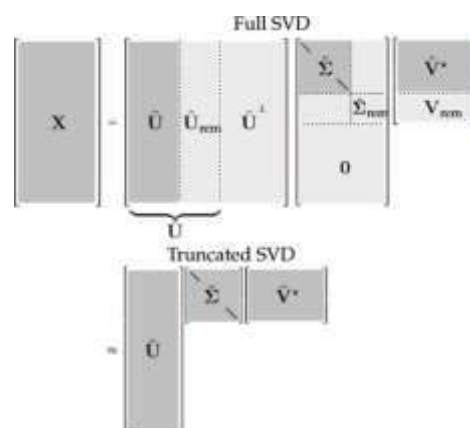
A aproximação que é feita usando o SVD ao se decidir qual a magnitude da informação a ser usada, pode ser feita de forma empírica, ao se testar repetidas vezes e alcançar um resultado desejado. Mas, “Schmidt (de Gram-Schmidt) generalizou o SVD para espaços de função e desenvolveu uma teorema de aproximação, estabelecendo o SVD truncado como uma ótima aproximação de baixo posto da matriz subjacente X .” (Brunton e Kutz, 2017, p. 8, tradução nossa⁶)

Logo, ao se utilizar da fatorização que o SVD possibilita para fazer a aproximação de uma dada matriz decomposta, utiliza-se da técnica do SVD truncado, em que é feita a seleção dos k primeiros valores singulares, obtendo-se a representação da matriz original de forma consistente, pois a relevância da informação perdida pode ser considerada irrisória.

Dessa forma, tomando que $k < r$, em que r representa o posto e os valores singulares não nulos da

matriz original X , é possível reescrever a representação da $X_k = \sum_{i=1}^k \begin{matrix} u & \sigma & v^* \\ i & i & i \end{matrix}$ (figura 2). Tendo-se, portanto, uma das melhores aproximações de posto k dessa dada matriz, pois essa aproximação mantém os valores singulares com uma maior magnitude de informação, a qual comumente consegue representar entre 90% a 99% da matriz original no truncamento. (Brunton e Kutz, 2017, p. 35)

Figura 2 - Demonstração do SVD truncado



Fonte: Brunton e Kutz (2022)

Observando a figura 2, é possível observar a forma como é truncada a matriz original, a fim de diminuir seu tamanho, enquanto mantém-se a parte mais relevante da informação dentro da matriz truncada que é produzida.

2.6 ALGORITMO

Para o funcionamento de qualquer processo ou para a “ação”, como a citado acima, dentro de um dispositivo de computação existe a necessidade da criação e implementação de um algoritmo, especificamente um algoritmo computacional, que segundo Cormen (2014, p. 2) “é um conjunto de etapas para executar uma tarefa descrita com precisão suficiente para que um computador possa executá-la”.

Há a necessidade dessa discriminação, pois a palavra “algoritmo” possui um significado de maior abrangência, como bem conceituado por Manzano (2000, p. 6) “algoritmos são regras formais para a obtenção de um resultado ou da solução de um problema, englobando fórmulas de expressões aritméticas”.

É possível perceber pela definição apresentada acima, que o dado conceito de algoritmo surge sob influência da área matemática, em que, embora, exija um rigor na sequenciação dos passos lógicos, sendo indispensável a coerência e coesão, na parte prática da implementação pelo matemático de algum algoritmo podem ocorrer saltos lógicos. Tal capacidade, de adaptar o algoritmo durante a sua execução, encontra-se em falta nos dispositivos de computação nativamente e mesmo que haja a possibilidade disso, não se enquadra no escopo do atual projeto.

Portanto, a ação que o algoritmo computacional proposto irá permitir o computador realizar, se caracteriza como uma ação estática, que segundo Farrer (1999) “ação é um acontecimento que, a partir de um estado inicial, após um período de tempo finito, produz um estado final previsível e bem definido”.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo analisar a eficiência do método de compressão de imagem SVD truncado, por meio da aplicação do método em várias imagens e fazendo a avaliação de suas compressão se utilizando de métricas como erro quadrático médio (MSE), relação sinal-ruído de pico (PSNR) e taxa de compressão.

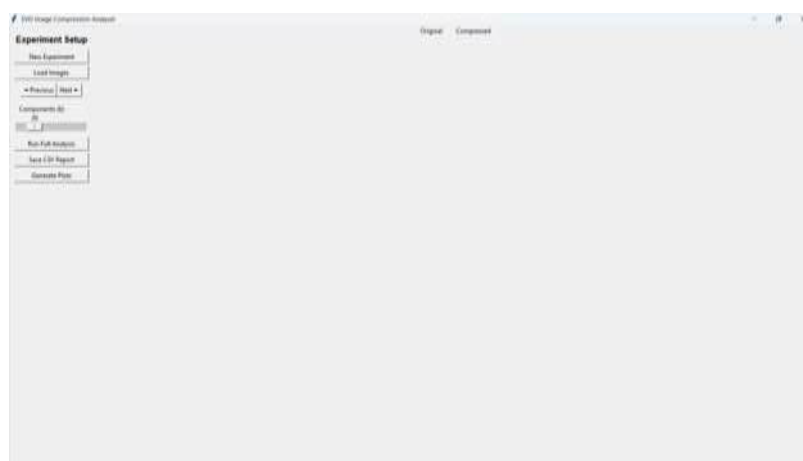
Tal forma de análise torna essa pesquisa de natureza experimental, por se propor a realizar simulações do método desenvolvido sob condições controladas, que seriam a do notebook pessoal do autor executando as instruções criadas também pelo autor do trabalho em questão. O ambiente de execução é composto por: Windows 11 (versão 10.0.26100), CPU Intel(R) Core(TM) I5-1235U, GPU Intel(R) Iris(R) Xe Graphics e memória RAM de 8GB.

Essas condições se enquadram na definição do Gil(2002, p. 47) sobre pesquisa experimental, que segundo ele “consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observações dos efeitos que a variável produz no objeto.”

Em relação ao objeto de estudo, aquele que foi selecionado é um processo de compressão de imagem baseado no método SVD truncado, que foi desenvolvido em linguagem de programação python, junto dele houve a seleção de um dataset de 1344 imagens, das quais apenas algumas foram selecionadas. As bibliotecas python utilizadas foram: os (versão do python 3.12.10), numpy (versão 1.26.4), tkinter (versão 8.6), PIL (versão 11.3.0), sklearn (versão 1.7.0), pandas (versão 1.5.2) e matplotlib (3.10.3).

A biblioteca tkinter foi utilizada para o desenvolvimento da Interface Gráfica do Usuário (GUI) (figura 3).

Figura 3 - Interface Tkinter



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Pode-se perceber pela visualização da figura 3, que a interface possui alguns componentes, em sua maioria botões. *New Experiment* é o acionador de todo o processo, o qual irá permitir rodar as análises

e fazer a geração dos arquivos de gráfico com *Generate Plots* e salvar os arquivos com as métricas em *Save CSV Report*.

Esses botões funcionam junto com o *slider* do componente *k*, que serve para gerar relatórios manuais, mas é possível rodar o algoritmo por 10 valores de *k* automaticamente acionando o botão *Run Full Analysis*, o qual já salva os gráficos.

Load Images tem como função selecionar a pasta das imagens utilizadas, fazendo com que sejam carregadas para dentro do programa. Junto a ele, têm-se os botões *Previous* e *Next*, que servem para navegar entre as imagens carregadas.

O código em si foi desenvolvido de forma modular, que significa a divisão em métodos, o que permite uma melhor leitura e facilita a manuseabilidade dele, pois ao alterar alguma funcionalidade, se faz necessário apenas modificar uma parte isolada, do que o conjunto como um todo. Há um total de 11 métodos construídos, mas para a execução do SVD truncado e mensuração de métricas se fazem necessários 2 deles (figura 4).

Figura 4 - Métodos de Compressão e Avaliação

```
135 def process_image(self, k):
136     if self.original_image is None:
137         return None
138
139     img_float = self.original_image.astype(np.float64) / 255.0
140     svd = TruncatedSVD(n_components=k)
141     reduced = svd.fit_transform(img_float)
142     restored = svd.inverse_transform(reduced)
143     return restored
144
145 def calculate_metrics(self, original, compressed, k):
146     h, w = original.shape
147
148     # Storage calculations
149     original_bytes = (h * w * 8) / 1024
150     compressed_bytes = (k * (h + w + 1) * 8) / 1024
151
152     # Quality metrics
153     original_float = original.astype(np.float64) / 255.0
154     compressed_clipped = np.clip(compressed, 0, 1)
155
156     mse = mean_squared_error(original_float, compressed_clipped)
157     psnr = peak_signal_noise_ratio(original_float, compressed_clipped, data_range=1.0)
158     ratio = compressed_bytes / original_bytes
159
160     return {
161         'filename': os.path.basename(self.image_files[self.current_index]),
162         'dimensions': f"({w})x({h})",
163         'k': k,
164         'max_k': self.max_k,
165         'mse': mse,
166         'psnr': psnr,
167         'compression_ratio': ratio,
168         'original_kb': original_bytes,
169         'compressed_kb': compressed_bytes
170     }
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como visível na figura 4, para a compressão da imagem foi utilizado a classe *TruncatedSVD* disponibilizada pela biblioteca *sklearn* e por meio dela usa-se os métodos *fit_transform* e *inverse_transform*, os quais, respectivamente, fazem a redução da matriz com o parâmetro *k* passado,

que vai de 5 até a dimensão de menor valor da matriz, o que seria $\min(\text{altura}, \text{largura})-1$. Posteriormente, a matriz comprimida passa pelo processo de reconstrução, para que seja possível a sua visualização, pois a função `fit_transform` retorna as matrizes que compõe o SVD separadas e já truncadas.

Abaixo da função de compressão, existe a função responsável pelo cálculo das métricas. As imagens foram todas equalizadas no seu data type para ficarem compatíveis com o tipo produzido pela compressão via SVD, que é o float64.

Então para saber o valor o da taxa de compressão é preciso calcular os tamanhos ocupados por cada imagem, multiplicando sua quantidade de pixels pelos bytes representando cada um desses pixels. Prosseguindo, usa-se funções prontas para calcular tanto o MSE quanto o PSNR. Ademais, todas as informações que foram utilizadas são retornadas para criação de uma linha no arquivo do relatório.

No que tange à seleção do dataset de imagens (figura 5), ele teve suas imagens colocadas em tons de cinza, para reduzir a escala de trabalho computacional necessária. As imagens serão retiradas do Super Resolution Benchmarks (Agustsson e Timofte, 2017), que é um dataset voltado para trabalhos de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, mas que será útil para o proposto na pesquisa. Ele contém imagens das mais variadas formas (tabela 1), mas foram selecionadas as imagens mais coesas dentro do formato bitmap, somando 29.

Figura 5 - Exemplo de Imagens do Dataset



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 1 - Quantidade de imagem por tamanho

dimensions	qtd_files
480x720	6
610x488	1
618x453	1
627x482	1
632x505	1
634x438	1
634x505	1
640x512	3
768x512	14

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Vale ressaltar também que as variáveis estudadas e que são exibidas nos resultados são de natureza quantitativa, pois existem enquanto traduções numéricas do fenômeno em estudo, que é a compressão de imagem. Por intermédio das métricas supracitadas, pode-se ter um entendimento estatístico de quão bem utilizável será o SVD truncado desenvolvido, especificamente e respectivamente, quão próxima a imagem comprimida está da original e quão bem comprimida está a imagem.

Aprofundando-se nas métricas, o MSE é utilizado para medir a distância entre a imagem comprimida e a original, fornecendo uma estimativa quantitativa do grau de distorção causado pela compressão. Embora o MSE seja amplamente utilizado devido à sua simplicidade, ele pode ser complementado por outras métricas, como o PSNR, que é mais intuitivo para avaliar a qualidade percebida de imagens comprimidas. Isso permite uma análise mais robusta e comparativa entre diferentes técnicas de compressão, ampliando a compreensão sobre a eficácia do método desenvolvido.

Sendo fórmulas complementares, ao se utilizar o MSE para fazer a comparação entre duas imagens O e C , respectivamente, a sua versão original e sua versão comprimida, ambas de tamanho M e N :

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ||O(i,j) - C(i,j)||^2,$$

obtêm-se assim o resultado que será utilizado no PSNR:

$$PSNR: 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX}{\sqrt{MSE}} \right)$$

$$PSNR: 20 \cdot \log_{10} (MAX_I) - 10 \cdot \log_{10} (MSE).$$

em que MAX indica o valor máximo de pixel possível em uma imagem. Por estar trabalhando com bits

(B), use-se $MAX_I = 2^B - 1$.

Ademais, sobre a taxa de compressão, essa é uma métrica que está intrinsecamente relacionada ao processo de compressão, no caso concreto do SVD truncado, por causa da sua aproximação de baixo-posto, essa métrica vai depender de quantos k valores singulares foram selecionados, quanto menor k , menor a quantidade de informação necessária para representar

a imagem, logo maior a taxa de compressão. A fim, de descobrir seu valor exato usa-se $T = \frac{TmC}{TmO}$ em que TmO significa tamanho da imagem original e TmC significa tamanho da imagem comprimida.

3 RESULTADOS

Para uma análise dos resultados na primeira imagem do *dataset* pode-se observar na tabela 2, que contém a evolução das métricas.

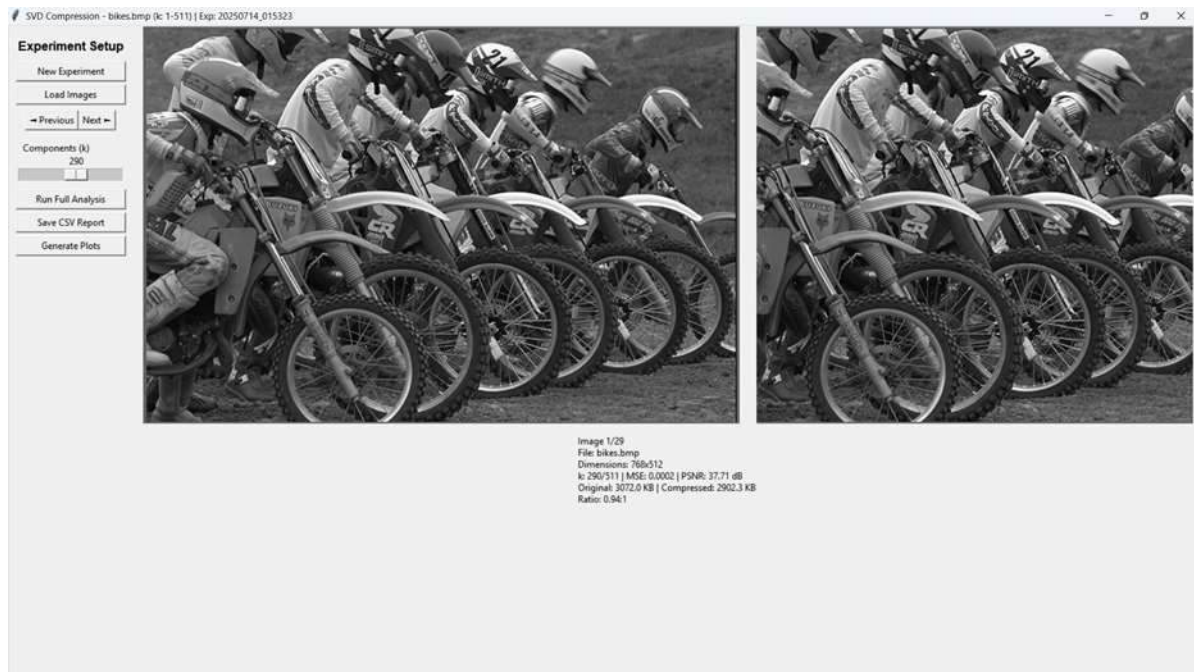
Tabela 2 - Evolução do MSE, PSNR, Taxa de Compressão por k

arquivo	dimensões	k	max_k	mse	psnr	taxa de compressão
bikes.bmp	768x512	5	511	0.021632704792209852	16.648891762200865	0.01628875732421875
bikes.bmp	768x512	61	511	0.005049603308275487	22.96742738276172	0.19872283935546875
bikes.bmp	768x512	117	511	0.002219421873175775 2	26.5376013815645	0.38115692138671875
bikes.bmp	768x512	173	511	0.001021388397601926 5	29.908090797936563	0.5635910034179688
bikes.bmp	768x512	229	511	0.000451265580342486 64	33.45567790427099	0.7460250854492188
bikes.bmp	768x512	286	511	0.000181631297659890 36	37.40809314240939	0.9317169189453125
bikes.bmp	768x512	342	511	6.515891840541811e-05	41.86026133302404	1.1141510009765625
bikes.bmp	768x512	398	511	1.900684920414055e-05	47.21089870860375	1.2965850830078125
bikes.bmp	768x512	454	511	3.815312143598176e-06	54.18469925154266	1.4790191650390625
bikes.bmp	768x512	511	511	2.159269592776668e-29	286.65693131011824	1.6647109985351562

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

De acordo com a tabela, é possível estabelecer uma relação inversamente proporcional entre as métricas MSE e PSNR, as quais demonstram por meios diferentes quão próxima da imagem original está a imagem comprimida. Além disso, o melhor valor de PSNR obtido durante os testes dessa imagem foi em torno de 37 dB, o que visualmente representa pouca diferença para a imagem original como pode ser observado na figura 7 logo abaixo.

Figura 7 - Imagem Original vs Imagem Comprimida



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Seguindo adiante, na tabela 3, em que há a seleção da média de compressão pelo tamanho da respectiva imagem, pode-se perceber que a taxa de compressão vai de 41% a 50%, o que mostra um ótimo grau de compressão para imagens do tipo bitmap, que um formato de imagem praticamente sem compressão nenhuma.

Tabela 3 - Taxa de Compressão por Tamanho de Imagem

dimensions	compression_ratio
480x720	0.473774112654321
610x488	0.41275262026337006
618x453	0.49332866589987406
627x482	0.5019621857359354
632x505	0.41147136232610604
634x438	0.4829991501375625
634x505	0.4108942124496361

640x512	0.4116851806640625
768x512	0.47291692097981763

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Sabendo de todas as informações supracitadas, chega-se à questão sobre os melhores valores de k para a faixa de tamanho trabalhada. A resposta encontra-se na tabela 4, que traz os valores de k com seus respectivos números de MSE, PSNR, todos próximos ou dentro do padrão tolerável de variação visual da imagem, e da taxa de compressão, que se mantém na média já citada na tabela acima.

Tabela 4 - Média das Métricas para os Melhores Valores de k .

	mse		psnr		compression_ratio	
	mean	max	mean	max	mean	max
k						
101	0.0004670938262668	0.0004670938262	33.305958728876	33.305958728876	0.390263313311	0.39026331331115
		668	48	48	1505	05
104	0.0020169187074708	0.0020169187074	26.953116058072	26.953116058072	0.398236853197	0.39823685319731
		708	247	247	311	1
110	0.0010211029781184	0.00102110297811	29.909304571556	29.909304571556	0.404018344616	0.40401834461672
		84	063	063	7285	85
112	0.0006119314031901	0.0006119314031	32.132972590402	32.132972590402	0.413490997043	0.41349099704380
		901	69	69	8054	54
115	0.001426435453388	0.0020043722395	28.846852281744	30.713488355010	0.409757543757	0.41004511843589
		304	702	764	41047	42
117	0.00222652102992533	0.0032448323180	27.161760762541	30.728936034995	0.411685180664	0.41168518066406
	34	11	56	733	0625	25

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, investigou-se a aplicação do SVD truncado como técnica de compressão de imagens em tons de cinza. A análise de 29 amostras indicou que valores de k de 101 até 117 apresentam o melhor compromisso entre redução do tamanho do arquivo (taxa média de compressão entre 40%) e preservação da qualidade visual (PSNR médio por volta de 30 dB). Esses resultados corroboram achados de estudos anteriores, demonstrando que o SVD oferece uma estratégia viável quando busca-se compressão sem perdas drásticas de fidelidade.

Entretanto, algumas limitações do presente estudo merecem destaque. Primeiro, o experimento concentrou-se exclusivamente em imagens monocromáticas, o que restringe a aplicabilidade direta dos resultados a cenários de imagens coloridas. Além disso, a seleção das amostras, embora tenha

considerado variações de resolução e conteúdo, não explorou exaustivamente casos de alta e baixíssima complexidade de textura. Por fim, a implementação em Python puro, sem otimizações via bibliotecas de baixo nível ou processamento paralelo, pode não refletir a performance real em aplicações de larga escala.

Como desdobramento para trabalhos futuros, propõe-se estender o estudo para imagens coloridas, seja tratando cada canal RGB separadamente ou aplicando versões do SVD a tensores tridimensionais e incorporar métricas perceptuais como SSIM e MS-SSIM para complementar o PSNR na avaliação de qualidade visual. Essas iniciativas pavimentam o caminho para um estudo futuro que investigará a integração do SVD truncado em fluxos de processamento ao vivo, avaliando sua viabilidade em cenários de vídeo em tempo real.

REFERÊNCIAS

- BRUNTON, Steven L.; KUTZ, J. Nathan. Data-Driven Science and Engineering:: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control. 2. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2022. 614 p. ISBN 978-1009098489.
- CORMEN, Thomas H. Algorithms Unlocked. [S. l.]: The MIT Press, 2013. 188 p. ISBN 978-0-262-51880-2.
- COVER, Thomas M.; THOMAS, Joy A. Elements of Information Theory. 2. ed. [S. l.]: Wiley-Interscience, 2006. 748 p. ISBN 978-0-471-24195-9.
- DONGARRA, Jack et al. The Singular Value Decomposition: Anatomy of Optimizing an Algorithm for Extreme Scale. SIAM Review, [S. l.], v. 60, n. 4, p. 808 - 865, jan. 2018. Recebido pelos editores em 21 de fevereiro de 2017; aceito para publicação (em forma revista) 22 de março de 2018; publicado eletronicamente em 8 de novembro de 2018.
- DHAWAN, Sachin. A Review of Image Compression and Comparison of its Algorithms. IJECT 2(1), [s. l.], v. 2, p. 22-26, março 2011.
- EIRIKUR AGUSTSSON; RADU TIMOFTE. NTIRE 2017 Challenge on Single Image Super-Resolution: Dataset and Study. Computer Vision and Pattern Recognition, 21 jul. 2017.
- FARRER, H. Pascal estruturado. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- GIL, Antonio Carlos. Como Elaborar Projetos De Pesquisa. 4. ed. [S. l.]: EDITORA ATLAS, 2002. 175 p. ISBN 85-224-3169-8.
- JONES, Paul W.; RABBANI, Majid. Digital Image Compression Techniques. [S. l.]: SPIE--The International Society for Optical Engineering, 1991. 221 p. ISBN0-8194-0648-1.
- MANZANO, José Augusto N. G., Estudo Dirigido: ALGORITMOS - Editora Érica, 2000.
- SAYOOD, Khalid. Introduction to Data Compression. 4. ed. [S. l.]: Morgan Kaufmann, 2012. 768 p. ISBN 978-0-12-415796-5.

NOTAS

Nota 1

No original: Applications are as diverse as least squares data fitting [53], image compression [3], facial recognition [111], principal component analysis [92], latent semantic analysis [28], and computing the 2-norm, condition number, and numerical rank of a matrix.

Nota 2

No original: Information theory answers two fundamental questions in communication theory: What is the ultimate data compression (answer: the entropy H), and what is the ultimate transmission rate of communication (answer: the channel capacity C).

Nota 3

No original: In brief, data compression is the art or science of representing information in a compact form

Nota 4

No original: Fortunately, digital images, in their canonical representation, generally contain a significant amount of redundancy.

Nota 5

No original: JPEG is designed for compressing full-color or gray-scale images of natural, real-world scenes.

Nota 6

No original: Schmidt (of Gram-Schmidt) generalized the SVD to function spaces and developed an approximation theorem, establishing truncated SVD as the optimal low-rank approximation of the underlying matrix X .

ANÁLISE DA SUBMEDIÇÃO E PRIORIZAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE HIDRÔMETROS

DANIEL SORIANO GONÇALVES
ANDREA TERESA RICCIÓ BARBOSA

RESUMO

As perdas de água constituem um dos principais desafios do saneamento, com implicações econômicas, operacionais e ambientais. Destaca-se entre os componentes das perdas aparentes, a submedição de hidrômetros pela sua relevância, pois compromete a acurácia da micromedição e reduz a receita das companhias. Este estudo analisa a submedição em Distritos de Medição e Controle (DMCs) do sistema de abastecimento de água da cidade de Ponta Porã – MS, buscando priorizar a substituição de hidrômetros com maior impacto no retorno operacional. A pesquisa se baseou na metodologia da *International Water Association* (IWA), utilizando a Calculadora de Balanço Hídrico desenvolvida pela Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento (AESBE) e adaptada pela Empresa de Saneamento do Estado de Mato Grosso do Sul (SANESUL). Desta forma, foram coletados e organizados dados operacionais e comerciais, contemplando volumes produzidos e consumidos, ligações clandestinas, idade do parque de medidores e violações de hidrômetros. O diagnóstico revelou que a submedição representa aproximadamente 11% do volume consumido, com hidrômetros acima de sete anos de uso, respondendo pela maior parcela das perdas. A análise setorial dos DMCs permitiu identificar áreas prioritárias para substituição, em que um número reduzido de hidrômetros pode recuperar volumes expressivos. Os resultados evidenciam que a aplicação sistemática do Índice de Desempenho da Medição (IDM) e do Balanço Hídrico fornece subsídios robustos para decisões estratégicas de renovação do parque de medidores. Conclui-se que o direcionamento das substituições, associado à setorização e ao monitoramento contínuo, é fundamental para reduzir perdas aparentes, melhorar a eficiência operacional e assegurar maior confiabilidade nos registros de consumo.

Palavras-chave: Submedição; Micromedição; Hidrômetro; Perdas de Água.

1. INTRODUÇÃO

As perdas de água representam um dos principais desafios do saneamento no Brasil, com impactos operacionais, econômicos e ambientais. Entre os componentes das perdas aparentes, a submedição de hidrômetros – decorrente de desgaste, envelhecimento, seleção inadequada de classes metrológicas e condições de operação – compromete a acurácia da micromedição e, por consequência, o faturamento e a governança dos sistemas. Nesse contexto, guias técnicos nacionais têm recomendado o uso de métodos padronizados para estimar a submedição do parque e orientar a renovação dos medidores, articulando-a com políticas de controle de perdas e setorização.

Este trabalho organiza e discute uma análise aplicada de submedição, com foco na priorização da substituição de hidrômetros em DMCs de Ponta Porã – MS, previamente submetidos a ações de pesquisa de vazamentos e combate a fraudes, mas que ainda apresentam indicadores de perdas elevados. O objetivo é apresentar uma abordagem prática, transparente e replicável que apoie a tomada de decisão sobre onde e quanto intervir para maximizar o retorno operacional no curto e no médio prazo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A Portaria 436 do INMETRO (2007) define o hidrômetro como um equipamento legalmente reconhecido que deve medir, acumular e mostrar ao usuário e à operadora o volume de água consumido, dentro de condições normativas. Essa definição dá segurança jurídica e técnica, pois, padroniza as exigências mínimas que os fabricantes devem cumprir e que as concessionárias devem observar ao utilizar esses instrumentos.

A micromedição é o principal instrumento entre o consumo individual e o sistema comercial das companhias de saneamento. Conforme Balbinot e Brusamarello (2019) a medição de fluxo não é apenas uma tarefa técnica, mas uma ferramenta estratégica que influencia diretamente os custos de produção, a confiabilidade operacional e a sustentabilidade do processo industrial.

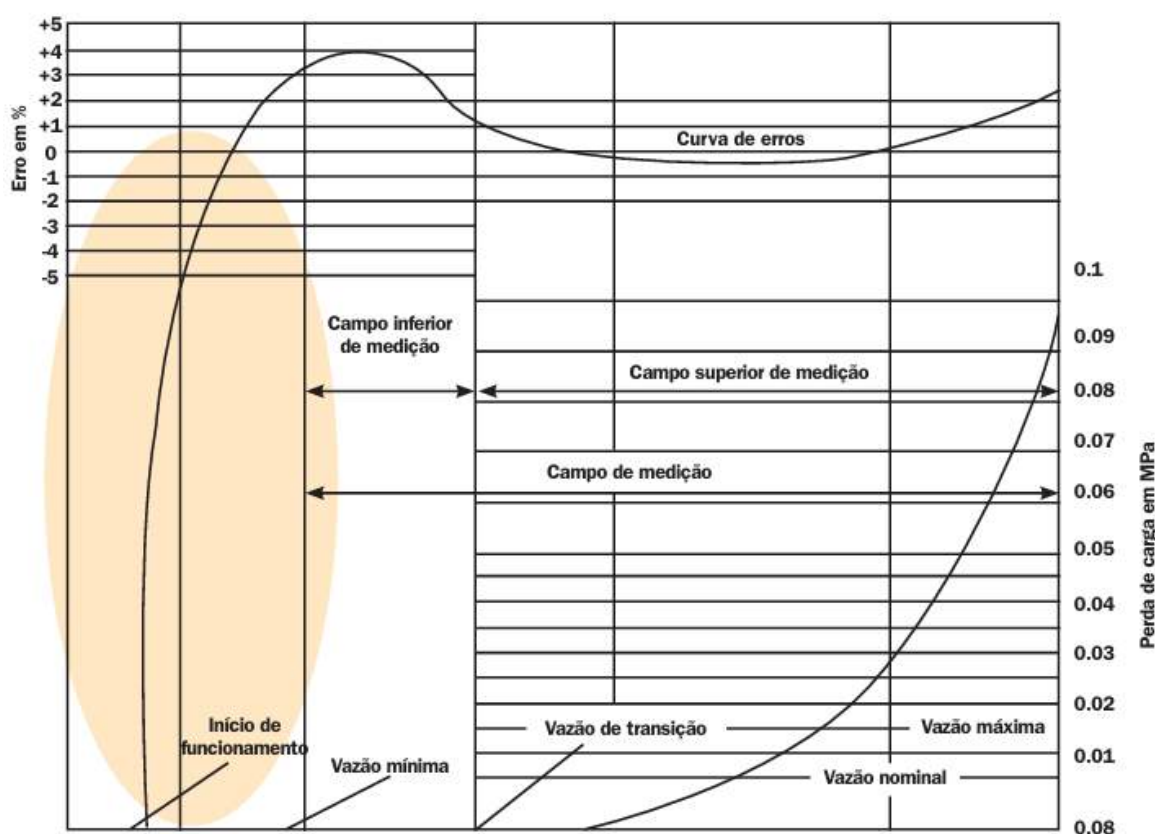
A submedição – entendida como a diferença entre o volume efetivamente consumido e o volume registrado pelo hidrômetro – constitui parcela relevante das perdas aparentes e tende a aumentar com a idade de instalação, o desgaste mecânico e a operação fora das faixas de vazão mais sensíveis dos medidores (Tsutiya, 2006). A literatura técnica nacional recomenda métodos para estimativa da submedição do parque, como a curva de desempenho da medição em função do tempo de instalação, bem como estudos amostrais com perfis de consumo.

Conforme Piechnicki *et al.* (2011), as perdas causadas pelos erros de medição nos hidrômetros representam uma parcela significativa das chamadas perdas aparentes, impactando diretamente tanto o índice de perdas de água quanto o faturamento das companhias de saneamento. Esse efeito ocorre porque a submedição compromete a confiabilidade dos volumes registrados, reduzindo a receita arrecadada e dificultando a gestão eficiente dos recursos hídricos.

De acordo com AESBE (2015), nos sistemas de abastecimento de água no Brasil, os hidrômetros residenciais são, em sua maioria, do tipo velocimétrico, pertencentes às classes B ou C. A capacidade nominal desses medidores varia geralmente entre 0,75 m³/h, 1,5 m³/h ou 2,5 m³/h, sendo escolhida conforme o perfil de consumo do usuário.

O Guia Prático da AESBE (2015) traz ainda, o comportamento típico de um hidrômetro taquimétrico para água fria, conforme observado na Figura 1, relacionando dois aspectos fundamentais: o erro de medição e a perda de carga em função da vazão.

Figura 1 – Curva de Erros e Curva de Perda de Carga para hidrômetros taquimétricos para água fria.



Fonte: AESBE (2015).

Na curva de erros (parte superior), nota-se que em baixas vazões o hidrômetro submede, pois ainda não tem sensibilidade para registrar pequenos filetes – zona chamada de campo inferior de medição,

com tolerância de até $\pm 5\%$. Conforme a vazão se aproxima da nominal, entra no campo superior, onde a precisão é maior e os erros se estabilizam em $\pm 2\%$. Já próximo da vazão máxima pode ocorrer leve supermedição, mas ainda dentro dos limites normativos.

A curva de perda de carga indica a resistência dos hidrômetros: quanto maior a vazão, maior a perda de pressão, devendo ser controlada para não comprometer o abastecimento.

O Guia Prático da AESBE (2015) aborda ainda que, em residências abastecidas por caixas d'água com boias de controle, o consumo não ocorre de forma contínua em grandes vazões, mas sim em pequenos filetes e intermitências, fazendo com que esses volumes entrem na faixa de baixas vazões (menores que 30 L/h), que corresponde ao campo inferior de medição dos hidrômetros. Isso significa que parte significativa do consumo domiciliar pode não ser devidamente registrada, gerando perdas aparentes para a companhia de saneamento.

O primeiro passo para estruturar um programa de redução de perdas é a adequada elaboração do Balanço Hídrico, que definirá os volumes perdidos de maneira aparente e real (Tsutiya, 2006). Utilizando dados de um período anual é possível estimar a quantidade de volume perdido para cada item que compõe a perda aparente e real. No que tange às perdas aparentes, a submedição de hidrômetro possui grande peso volumétrico. O cálculo da estimativa de submedição para quantificar as suas perdas é apresentada na norma da ABNT NBR 15.538 (2023) – *Medidores de água potável*, que estabelece a Curva de Desempenho de Medição. Essa curva indica a eficiência média dos hidrômetros ao longo do tempo de uso, demonstrando que equipamentos mais recentes apresentam maior confiabilidade nos registros de consumo. A cada ano de operação, o hidrômetro é associado a um Índice de Desempenho de medição (IDM), que expressa a porcentagem do volume de água efetivamente registrado, permitindo avaliar a degradação da precisão metrológica do equipamento e, consequentemente, estimar o impacto financeiro da submedição.

O controle dos volumes disponibilizados é um elemento fundamental na gestão de Sistemas de Abastecimento de Água, e os Distritos de Medição e Controle (DMC) desempenham papel decisivo nesse processo. Conforme estabelecido na ABNT NBR 12218/2017, a setorização consiste na subdivisão da rede em áreas de monitoramento hidráulico e volumétrico, permitindo a identificação precisa de anomalias e a implementação de intervenções direcionadas. Essa metodologia possibilita a redução tanto de perdas reais quanto aparentes, além de favorecer uma gestão mais eficiente da infraestrutura (Gonçalves; Lima, 2007). Nos sistemas de abastecimento modernos, os DMCs são

amplamente reconhecidos como uma das estratégias mais eficazes para o controle das perdas não faturadas, figurando entre as boas práticas recomendadas internacionalmente (Farley, 2008).

A instalação de macromedidores de vazão nas entradas dos DMCs possibilita a quantificação precisa dos volumes disponibilizados à rede. Ao serem comparados com os volumes micromedidos nos pontos de consumo, fornecem a base necessária para calcular o volume de água perdido, estabelecendo um parâmetro confiável para a realização de auditorias hidráulicas e para o monitoramento contínuo da eficiência do sistema, em que é possível verificar e quantificar as perdas de água no sistema (Thornton, 2008).

3. MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia adotada neste estudo seguiu uma abordagem sistemática, voltada à obtenção, organização e análise de dados operacionais e comerciais de um sistema de abastecimento de água urbano, com o objetivo de realizar o diagnóstico de perdas hídricas por meio do Balanço Hídrico conforme metodologia da *International Water Association* (IWA).

3.1. SELEÇÃO DA LOCALIDADE

Como objeto de estudo foi selecionado o sistema de abastecimento de água do município de Ponta Porã – MS, cuja população urbana estimada é de 92.000 habitantes (IBGE, 2022). A escolha se baseou na disponibilidade de dados operacionais e comerciais atualizados, além da relevância da localidade no contexto do saneamento do Estado do Mato Grosso do Sul.

3.2. FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO

A Calculadora de Balanço Hídrico (CBH) foi utilizada para realizar as análises, desenvolvida pelo Eng. Airton Sampaio Gomes e disponibilizada pela Associação Brasileira das Empresas de Saneamento (AESBE). As ferramentas, posteriormente aprimoradas pela Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul (SANESUL), permitem a elaboração de balanços hídricos com base nas diretrizes da IWA, desde que se disponha dos dados necessários.

3.3. COLETA E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

A coleta de dados abrangeu informações anuais referentes ao ano-base definido no estudo. Os dados foram obtidos diretamente junto aos setores operacional e comercial da unidade responsável pelo

abastecimento de Ponta Porã. Foram organizados em planilhas estruturadas e adaptados ao formato exigido pela CBH.

3.3.1. DADOS OPERACIONAIS

Coletaram-se os seguintes parâmetros operacionais:

- Volume Macromedido Total;
- Volume de Água Produzido Macromedido;
- Volume Produzido não Macromedido Total;
- Volume de Descarga de Rede;
- Descarga de Rede (uso operacional);
- Quebra de rede por terceiros (uso operacional);
- Limpeza sanitária de reservatórios (uso operacional);
- Utilização do Corpo de Bombeiros (uso operacional);
- Extensão total de rede de água;
- Volume de água tratada importada;
- Volume de água tratada exportada;
- Volume de uso operacional;
- Ligações reais de água hidrometradas – ativas;
- Ligações reais de água hidrometradas – inativas;
- Volume faturado de água – Ligações não hidrometradas;
- Volume medido de água – Total;
- Volumes medidos de ligações isentas reais ativas;
- Consumo *per capita*;
- Taxa de ocupação urbana – IBGE;
- População total atendida com abastecimento de água (SNIS);
- População Urbana atendida com água (SNIS);
- Volume Consumido Total.

3.3.2. DADOS COMERCIAIS

Além dos dados operacionais, coletaram-se informações comerciais que contribuem para a avaliação das perdas aparentes:

- Número de ligações clandestinas na rede distribuidora;
- Número de violações de hidrômetros;

- Ligações executadas diretamente por terceiros;
- Ligações executadas diretamente no imóvel;
- Religações executadas à revelia;
- Número de imóveis não cadastrados;
- Número de ligações abandonadas que seguem com pressurização até o passeio;
- Quantidade de hidrômetros por idade de instalação;
- Volume micromedido por faixa etária de hidrômetro.

3.4. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados foram verificados quanto à consistência, preenchimento e compatibilidade com os parâmetros de balanço hídrico. As inconsistências identificadas foram tratadas com base em registros históricos, estimativas técnicas e consulta aos responsáveis locais. As informações foram inseridas na planilha da AESBE/SANESUL, permitindo a obtenção dos principais indicadores de perdas reais, aparentes e totais, conforme os conceitos da IWA.

3.5. SELEÇÃO DE DISTRITOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE

Com o intuito de direcionar o diagnóstico de perdas hídricas para áreas com maior relevância operacional, foram selecionados sete Distritos de Medição e Controle (DMC) do município de Ponta Porã – MS para análise detalhada. Os DMCs contemplados foram: São João I, São João II, Andreazza A, Andreazza B, Portal Morumbi, VRP-017 e VRP-016.

A escolha desses setores fundamentou-se em relatórios operacionais internos e levantamentos históricos que evidenciaram índices persistentes de perdas, mesmo após a adoção de medidas tradicionais de controle, como pesquisas de vazamentos, ações de combate a fraudes e intervenções operacionais corretivas. Esse cenário apontou para a possível degradação do parque de hidrômetros instalado, sugerindo perdas aparentes associadas à submedição volumétrica, principalmente em aparelhos com tempo de uso elevado ou funcionamento comprometido.

Dessa forma, os DMCs selecionados passaram a compor o escopo de avaliação técnica quanto à eficiência e confiabilidade dos hidrômetros, contribuindo para a identificação de áreas prioritárias para substituição de micromedidores. Essa abordagem visa não apenas a recuperação de volumes não faturados, mas também o aprimoramento da acurácia dos dados comerciais utilizados na elaboração do balanço hídrico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos juntamente a análise desses resultados.

4.1. DIAGNÓSTICO DO BALANÇO HÍDRICO

A partir da aplicação da ferramenta de CBH proposta pela AESBE e adaptada pela SANESUL, foram consolidados os seguintes indicadores para o município de Ponta Porã – MS, baseando-se em dados anuais (2024):

- Parque de hidrômetros: 30.425 unidades;
- Volume micromedido no período: 4.268.070 m³;
- Índice de Desempenho da Medição (IDM) médio: 88,25%;
- Volume submedido estimado: 1.258.342 m³;
- Consumo real estimado: 9.676.570 m³
- Impacto da submedição: aproximadamente 11% do volume consumido não foi efetivamente faturado, conforme Figura 2.

Figura 2 – Volume de perdas.



Fonte: elaborado pelos autores.

Observou-se que os hidrômetros com 7 a 8 anos de uso são os principais responsáveis pelas perdas aparentes, acumulando 136.505 m³ não medidos apenas nessa faixa etária, conforme Figura 3. Esses

dados reforçam a necessidade de submedições direcionadas e indicam que ações pontuais em faixas etárias específicas do parque de medidores podem gerar resultados expressivos com investimento relativamente baixos.

Figura 3 – Submedição por faixa etária dos hidrômetros. IDM* – Percentual de 80 a 83%

SUBMEDIÇÃO DOS HIDRÔMETROS E ERROS DE MANUSEIO DE DADOS						
MÉTODO DA CURVA DE DESEMPENHO DA MEDIÇÃO						
TIPO	Idade (anos)	Quantidade de Hidrômetros	Volume Micromedido Período (m³)	IDM*	Estimativa de Submedição Média período (m³)	Estimativa de Consumo Período (m³)
INFORMAÇÃO AGREGADA PARA TODO O PARQUE		30.016	4.150.158	85,00%	732.381	4.882.539
CONSUMOS - ROL COMUM	0	2.551	405.581	95,00%	21.346	426.927
	1	3.761	585.411	93,50%	40.697	626.108
	2	5.007	907.718	92,00%	78.932	986.650
	3	5.351	636.859	90,30%	68.411	705.270
	4	3.857	627.601	88,50%	81.553	709.154
	5	2.203	222.567	86,80%	33.847	256.414
	6	1.198	160.004	85,00%	28.236	188.240
	7	1.594	407.296	83,00%	83.422	490.718
	8	3.072	212.330	80,00%	53.083	265.413
	9	704	42.109	77,00%	12.578	54.687
	10	149	15.641	74,00%	5.495	21.136
	11	101	10.910	71,00%	4.456	15.366
	12	110	7.686	71,00%	3.139	10.825
	13	129	4.534	71,00%	1.852	6.386
	14	108	7.531	71,00%	3.076	10.607
	15	530	14.292	71,00%	5.838	20.130
ROL ESPECIAL	1				0	0
	2				0	0
	3				0	0
	4				0	0
	5				0	0
	6				0	0
	7				0	0
	8				0	0
Total		30.425	4.268.070		1.258.342	9.676.570

Fonte: elaborado pelos autores.

4.2. ANÁLISE DE SUBMEDIÇÃO EM DMCS – SETORES PRIORITÁRIOS

Em complemento ao diagnóstico global, foi realizada uma análise detalhada por Distrito de Medição e Controle (DMC) no município, com dados do mês de agosto/2025. A finalidade foi identificar os setores com maior potencial de recuperação de volume a partir da substituição de hidrômetros antigos.

O Quadro 1, mostra os DMCS com os respectivos valores de Volume Recuperados (estimativa), a Quantidade de Hidrômetros com idades iguais ou superiores a 6 anos e um Índice de Eficiência, ideal

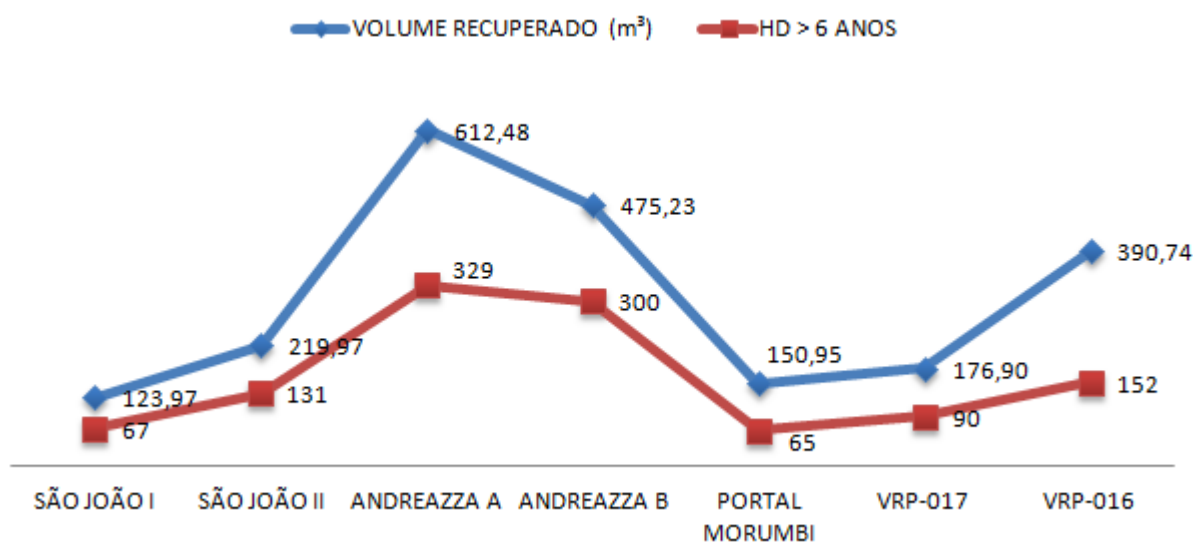
para rápida análise e tomada de decisão, que correlaciona a quantidade de hidrômetro substituído com o volume recuperado (estimado). Quanto mais próximo de zero esse índice, ou seja, mais baixo o valor, mais favorável será a intervenção no DMC estudado, pois indica que poucos hidrômetros substituídos acarretarão em grande recuperação de volume.

Quadro 1 – DMCs e volumes recuperados.

DMC	Volume Recuperado (m³)	Quantidade de HD ≥ 6 anos	Índice HD/Vol. Rec. (%)
São João I	123,97	67	54,04%
São João II	219,97	131	59,55%
Andreazza A	612,48	329	53,72%
Andreazza B	475,23	300	63,13%
Portal Morumbi	150,95	65	43,06%
VRP-017	176,90	90	50,88%
VRP-016	390,74	152	38,90%

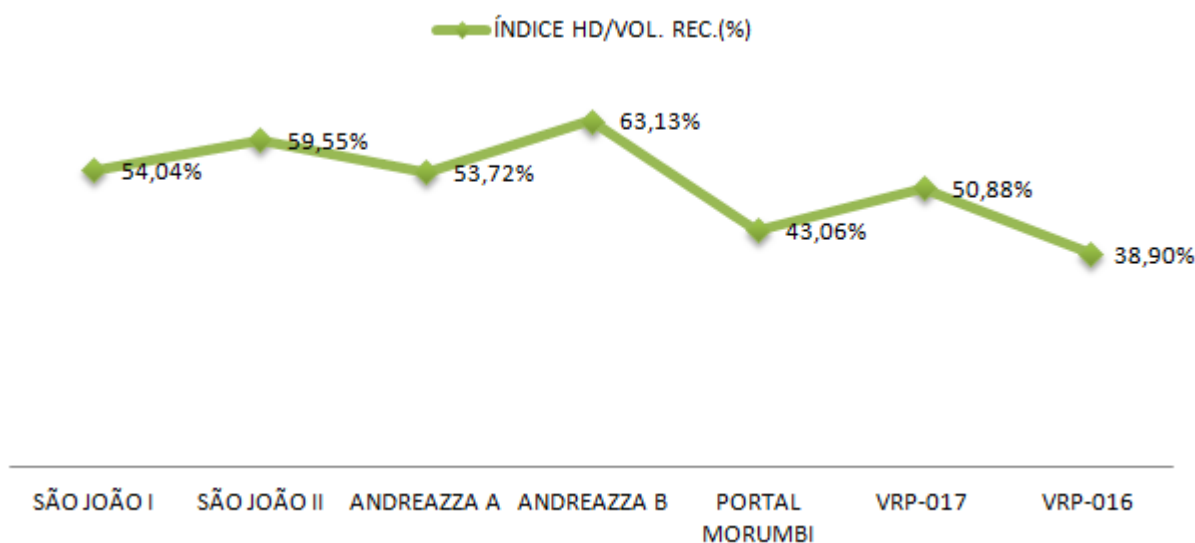
Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 4. Volume recuperado com a substituição de hidrômetros acima de 6 anos de idade.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 5. Índice Hidrômetros/Volume Recuperado (%).



Fonte: elaborado pelos autores.

1ª Prioridade – Intervenção imediata:

- DMCs: São João I, São João II, VRP-017, VRP-016 e Portal Morumbi;
- Total de hidrômetros ≥ 6 anos: 505 unidades;
- Volume potencial recuperado: 1.062,54 m³.

2ª Prioridade – Intervenção de médio prazo:

- DMCs: Andreazza A e Andreazza B;
- Total de hidrômetros ≥ 6 anos: 629 unidades;
- Volume potencial recuperado: 1.003,21 m³.

Na 1ª prioridade, observa-se a indicação para os DMCs São João I e II (198 unidades), VRP-017, VRP-016 e Portal Morumbi (307 unidades), resultando em um volume potencial recuperado de aproximadamente 1.062,54 m³. Essa escolha concentra esforços em setores com melhor relação entre o número de hidrômetros substituídos e o volume recuperado, garantindo maior retorno no curto prazo.

Na 2ª prioridade, o destaque recai sobre os DMCs Andreazza A (329 unidades) e São João II (198 unidades), que, apesar de apresentarem maior parque envelhecido, possuem índices de eficiência menos favoráveis. A substituição nesses setores representaria um volume adicional recuperado da ordem de 1.003,21 m³, consolidando ganhos expressivos em médio prazo.

Dessa forma, observa-se que a “VRP-016” possui um Índice de 38,90%, gerando grande volume recuperado realizando-se apenas 152 trocas. Seguido pelo DMC “Portal Morumbi” com um índice de 43,06%, recuperando um volume de 150,95 m³ apenas com a troca de 65 hidrômetros.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo evidenciou a relevância da submedição dos hidrômetros como componente central das perdas aparentes em sistemas de abastecimento de água. No município de Ponta Porá – MS, verificou-se que cerca de 11% do volume consumido pelos clientes não é efetivamente faturado, resultado diretamente associado ao envelhecimento do parque de medidores, em especial aqueles com 7 a 8 anos de uso, responsáveis isoladamente por aproximadamente 136.505 m³/ano de submedição.

A análise por Distritos de medição e Controle (DMCs) permitiu identificar, de forma objetiva e priorizada, os setores com maior potencial de recuperação de volumes a partir da substituição de hidrômetros. Os DMCs VRP-016 e Portal Morumbi destacaram-se pela melhor relação custo-benefício, apresentando índices de eficiência mais favoráveis, enquanto os setores Andrezza A e B concentram maior parque envelhecido, mas demandam um número mais elevado de substituições para resultados equivalentes.

A adoção de uma política de substituição planejada, fundamentada em análises técnicas como a desenvolvida neste trabalho, oferece não apenas ganhos imediatos em recuperação de receita e confiabilidade metrológica, mas também reforça a capacidade de governança operacional da concessionária. Além disso, consolida os DMCs como instrumentos estratégicos de monitoramento e controle, alinhando-se às boas práticas recomendadas pela literatura técnica e pelas normas nacionais.

Conclui-se, portanto, que a integração entre balanço hídrico, análise da curva de desempenho dos medidores e priorização setorial via DMCs constitui uma abordagem prática, replicável e de alto impacto para programas de redução de perdas. A continuidade dessa estratégia permitirá à companhia avançar em direção a patamares mais sustentáveis de eficiência operacional, econômica e ambiental, fortalecendo sua posição frente aos desafios contemporâneos do saneamento no Brasil.

REFERÊNCIAS

AESBE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS ESTADUAIS DE SANEAMENTO. Guia prático de procedimentos para estimativa de submedição no parque de hidrômetros. Brasília: AESBE, 2015.

AESBE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS ESTADUAIS DE SANEAMENTO. Guia prático para quantificação de balanços hídricos e indicadores de desempenho operacional. Brasília: AESBE, 2015.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. Medição de fluxo: fundamentos e aplicações. Curitiba: Editora Universitária Champagnat, 2019.

FARLEY, M. et al. The manager's non-revenue water handbook: a guide to understanding water losses. Malaysia: Ranhill Utilities Berhad; United States Agency for International Development (USAID), 2008.

GONÇALVES, E.; LIMA, C. V. Controle de pressões e operação de válvulas reguladoras de pressão. Guias práticos – técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água. Vol. 4. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria nº 436, de 22 de agosto de 2007. Aprova o regulamento técnico metrológico aplicável a medidores de água potável fria. Brasília, 2007.

PIECHNICKI, A. S. et al. Utilização da metodologia de análise e solução de problemas na redução das perdas de água: um estudo de caso na SANEPAR. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 3, n. 2, p. 90-99, 2011.

THORNTON, J. et al. Water loss control. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 2. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA
EXTRUSORA DE GARRAFA PET PARA
A FABRICAÇÃO DE FILAMENTOS DE
IMPRESSORAS 3D

João Pedro Abrahan Nóbrega
Júlia Loureiro Sanches

RESUMO

O objetivo deste trabalho é oferecer e desenvolver uma máquina se adequando a ODS 12° de “Consumo e produção responsáveis” para a solução do acúmulo dos resíduos sólidos, e também contribuir para reduzir a contaminação ambiental, com ênfase ao Polietileno Tereftalato - matéria prima da garrafa PET - um produto não biodegradável. O projeto propõe a criação de uma máquina extrusora com o intuito de reutilizar o termoplástico a transformando em filamentos de PET, onde serão utilizadas em impressoras 3D, onde poderão ser reutilizados de várias formas. O trabalho apresenta também os dispositivos e peças que foram utilizados na criação da máquina, assim como os desafios e soluções.

Palavras-chave: ODS; Extrusora; Termoplástico; Filamentos de PET; Impressoras 3D.

1. INTRODUÇÃO

O descarte inadequado de resíduos sólidos tem sido um desafio, principalmente o Polietileno Tereftalato, material da garrafa PET que leva em torno de 400 anos de decomposição, o que acaba levando ao acúmulo em excesso desse material. Embora a reciclagem do PET possa reduzir o desperdício, apenas uma porcentagem dele é descartada corretamente por meio da reciclagem, o restante é descartado incorretamente contaminando solos, oceanos e o próprio ar.

Em razão disso o objetivo desse trabalho é executar a criação de uma máquina extrusora para transformar Garrafa PET em filamento para impressora 3D, o transformando em matéria-prima para a produção de objetos impressos em 3d e ocorrendo uma economia nos filamentos sintéticos. Com isso contribuindo com a reutilização desse plástico, reduzindo a quantidade de garrafas PET descartadas e contribuindo também a preservar o meio ambiente. Assim cumprindo diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial: ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O polietileno Tereftalato, também conhecido pela sigla PET, é um polímero da classe dos poliésteres termoplásticos, onde a produção teve sucesso em embalagens e garrafas. A primeira amostra foi desenvolvida em 1941, porém a pesquisa para a produção em larga escala ocorreu apenas após a Segunda Guerra Mundial (ALMEIDA et al., 2013).

Se por um lado o plástico tem alta durabilidade sendo sua principal vantagem, também acaba sendo seu maior defeito, com um tempo estimado de 400 anos de decomposição (ECycle, 2022), e somando com a adição constante, seu volume no meio ambiente tende a aumentar consideravelmente, contaminando alimentos, oceanos, solos e até mesmo o ar.

De acordo com o Banco Mundial, o Brasil está no ranking de maiores produtores de lixo plástico no mundo, ocupando o quarto lugar, e reciclando apenas 1,28% desse lixo sendo cerca de 145 milhões de toneladas. (WWF, 2019).

Sendo a PET um polímero termoplástico, pode-se ser modelado e remodelado inúmeras vezes quando submetido a altas temperaturas o transformando em um material versátil, e com essa versatilidade se obtém uma variedade de itens, prolongando a vida útil do material. E nesse contexto, o método

escolhido foi a extrusão para um alto reaproveitamento de material, que consiste em fundir e remodelar o material para o formato necessário.

3. MÉTODO DE PESQUISA

A máquina proposta incorpora conhecimentos fundamentais da engenharia mecânica, desde o projeto e modelagem de componentes estruturais e móveis (Elementos de Máquinas), passando pelo desenvolvimento de sistemas de transmissão e acionamento (mecânica e elétrica), até o controle térmico e automatizado do processo (controle e eletrônica). O uso do Arduino e controladores PID como plataforma de automação permite a integração eficiente entre sensores, atuadores e interface de usuário, promovendo acessibilidade e versatilidade ao sistema.

Para a realização deste trabalho a metodologia mais utilizada é a da pesquisa exploratória e do desenvolvimento experimental. Iniciou-se com uma pesquisa e uma revisão bibliográfica, analisando outros projetos disponíveis na literatura acadêmica e técnica que são semelhantes. Com isso, utilizamos os pontos mais relevantes e eficientes de cada proposta, adaptando as necessidades e condições desse projeto.

Com base nos dados retirados, a etapa de dimensionamentos dos componentes e a seleção dos materiais foram iniciadas como temperatura ideal para a extrusão do material, diâmetro do filamento, tipos de motores a serem usados, sensores e elementos de fixação. Em seguida, os módulos da máquina foram modelados em software CAD e impressos em 3D ou fabricados manualmente. A montagem envolveu a integração dos sistemas mecânico, elétrico e eletrônico, com controle centralizado via microcontrolador arduino e PID.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

BASE PRINCIPAL: Uma chapa de madeira de 75cm de comprimento, 25cm de largura e 1,5cm de espessura será utilizada para ser a base da máquina por completo, onde irá ser montada. A madeira foi escolhida pois o mesmo permite perfurar com facilidade permitindo assim uma maior fixação dos parafusos entre os conjuntos da máquina com a madeira.

FILETADOR DE PET: Para conduzir o filetamento da PET é necessário fazer um filetador, onde a garrafa é cortada em tiras de altura de 1cm com a ponta pontuda.

A produção desse filetador utiliza dois rolamentos de skate, uma lâmina de estilete, um suporte impresso em PETG, uma haste de alumínio e parafusos de fixação.

Figura 1 – Filetador

Fonte: Autor próprio

HOTEND: Com o intuito de produzir o filamento com o diâmetro correto se utiliza o Hotend, a ideia inicial era utilizar o da impressora *Creality Ender V3*, entretanto o termopar do conjunto do controlador PID é maior que o utilizado neste bloco aquecedor, então houve a necessidade de fabricar um Hotend do zero a partir de um bloco quadrado de 50 mm. Tal mudança permitirá acoplar a resistência, termistor, bico extrusor e dois parafusos de fixação no suporte de aço.

Figura 2 - Hotend original (direita) e Hotend produzido (esquerda).

Fonte: Autor próprio

Para a montagem do Hotend foi-se escolhido a criação de um suporte com chapas de aço SAE 1020 que irá proporcionar o nivelamento do hotend com o restante do projeto e auxiliará principalmente com a dissipação de calor.

SISTEMA DE RECOLHIMENTO: Foi projetado um sistema para fazer o recolhimento do filamento após passar pelo hotend, que foi dividido em três partes: Motor, Engrenagens e eixos.

Engrenagens: O conjunto de engrenagens detém a função de limitar a velocidade do motor e converter em torque, para assim, executar o enrolamento e armazenamento do filando recém-fabricado pelo conjunto do Hotend. Segundo (FERREIRA, 2024) a velocidade linear ideal para o recolhimento do filamento é de 16mm/s. Levando isso em consideração optamos por um recolhimento de 10mm/s para obter um controle mais preciso da saída de filamento do conjunto aquecedor com um sistema de redução com 6 engrenagens, sendo 3 motoras e 3 movidas para assim rotacionar um carretel de filamentos de 1,2kg de armazenamento.

A baixa velocidade se dá devido a fragilidade do material ainda quente após a saída da extrusora, altas velocidades podem causar o rompimento do fio ou acarretar a formação de bolhas que se provam problemáticas durante o processo de impressão.

Para a montagem do conjunto, as engrenagens, plataforma de elevação, buchas e os mancais de rolamentos foi utilizado FDM em PETG e PLA. Os 3 eixos escalonados por sua vez foram usinados com o SAE 1020 e os 6 rolamentos utilizados são de segunda linha 22x8x7.

Aplicado as equações de velocidade angular e velocidade linear, assim é possível correlacionar velocidade angular da última engrenagem em razão do motor de 50 RPM.

$$\Omega = 2\pi n / 60 \rightarrow \omega = 5,236 \text{ Rad/s } \textcircled{\text{Motor}}$$

$$V = \omega \cdot r \rightarrow \omega = 0,339 \text{ Rad/s } \textcircled{\text{Carretel ou última engrenagem}}$$

Tendo tais dados é possível encontrar os valores mais adequados para os diâmetros primitivos (D_p) das engrenagens motoras (pinhão) e movidas (coroa), por intermédio das equações de relação de transmissão.

$$i = \frac{w.\text{movida}}{w.\text{motora}} = \frac{D_p.\text{motora}}{D_p.\text{movida}}$$

$$\therefore D_p.\text{Motora} = 30\text{mm e } D_p.\text{Movida} = 75\text{mm}$$

Em posse do D_p é possível desvendar outros valores de suma importância para o desenvolvimento de engrenagens, além de, fornecerem dados geométricos, dimensionais e quantitativos como o número de dentes (Z).

Para os cálculos a seguir foram adotados módulos de 2,5; potência do motor de 1,2W; ângulo de pressão de 20° (indicado para engrenagens de dentes retos segundo normas da AGMA) e rotação do carretel de 3.238 RPM.

Quadro 1 - Equações dimensionamento do pinhão.

PINHÃO/MOTORA					
Módulo			Altura:		
$M = \frac{D_p}{Z}$	2,5	[]	$H = 2,166 \times M$	5,415	m m
Diâmetro primitivo:			Espessura do Dente		
$D_p = M \times Z$	30	m m	$S = 1,57 \times M$	3,925	m m
Passo:			Distância Entre Flancos		
$P_r = M \times P_i$	7,85	m m	$C = \frac{[M \times (Z_1 + Z_2)]}{2}$	52,5	m m
Diâmetro Externo:			Espessura da Engrenagem:		

$De = Dp + (2 \times M)$	35	m m	$B = Cte \times M$	15	m m
Diâmetro Interno			Cabeça:		
$Di = Dp - (2,166 \times M)$	24,58 5	m m	$C = M$	2,5	m m
Número de Dentes			Fundo:		
$Z = \frac{Dp}{M}$	12	[]	$F = 1,666 \times M$	2,91 5	m m

Fonte: elaborado pelos autores.

Quadro 2 - Equações dimensionamentos da coroa.

COROA					
Módulo			Altura:		
$M = \frac{Dp}{Z}$	2,5	[]	$H = 2,166 \times M$	5,41 5	m m
Diâmetro primitivo:			Espessura do Dente		
$Dp = M \times Z$	75	m m	$S = 1,57 \times M$	3,92 5	m m
Passo:			Distância Entre Flancos		
$Pr = M \times Pi$	7,85	m m	$C = \frac{[M \times (Z1 + Z2)]}{2}$	52,5	m m
Diâmetro Externo:			Espessura da Engrenagem:		
$De = Dp + (2 \times M)$	80	m m	$B = Cte \times M$	15	m m
Diâmetro Interno			Cabeça:		
$Di = Dp - (2,166 \times M)$	69,58 5	m m	$C = M$	2,5	m m
Número de Dentes			Fundo:		
$Z = \frac{Dp}{M}$	30	[]	$F = 1,666 \times M$	2,91 5	m m

Fonte: elaborado pelos autores.

Embora a engrenagem motora e movida seja distinta em suas dimensões seus dentes compartilham dos mesmos valores, tal característica é de crucial importância para garantir um engrenamento correto entre as mesmas. Caso ambas resultem em dentes distintos o engrenamento será afetado garantindo um não engrenamento ou falhas estruturais nos elementos de máquina com cargas de fadiga (aplicação de forças cíclicas).

Quadro 3 - Equações dimensionais dos dentes da engrenagem.

DADOS PARA OS DENTES					
Espessura do dente -			Addendum -		
$So = \frac{To}{2} = M \times \frac{pi}{2}$	3,92 5	m m	$Hk = M$	2,5	m m
Largura entre dentes -			Dedendum -		
$Io = \frac{To}{2}$	3,92 5	m m	$Hf = 1,2 \times M$	3	m m
Passo Circula -			Altura teórica do dente -		
$To = M \times Pi$	7,85	m m	$H_z = 2,2 \times M$	5,5	m m
Altura do dente -			Folga no fundo do dente -		
$H = 2 \times M$	5	m m	$Sk = H_z - H$	0,5	m m

Fonte: elaborado pelos autores.

Para garantir uma elevada confiabilidade do projeto foi calculado as forças de momento torçor, cargas tangenciais, radiais e resultantes, a fim de, conferir o material mais adequado para a fabricação da engrenagem. Para encontrar tais dados aplicamos as seguintes equações.

Quadro 4 - Equações de momento do torçor.

MOMENTO DE TORQUE					
Potência (NEMA-17)	6,6	W	$Mt(pin\tilde{a}o) = \frac{30 \times P}{Pi \times N.coletor}$	1,261	N.m
Pi	3,14	[]		14649 7	
W.Coletor (ou) N.Motor	3,23885350 3	rp m	$Mt(engrenagem) = \frac{30 \times P}{Pi \times W.motor}$	19,46	N.m
W.Motor (ou) N.Motor	50	rp m		90265 5	

Fonte: elaborado pelos autores.

Quadro 5 - Equações de carga tangencial, radial e resultante

CARGAS ENVOLVIDAS (PINHÃO E ENGRENAGEM)					
Carga Tangencial (F_t) – Pinhão			Carga Tangencial (F_t) – Engrenagem		
$F_t = \frac{2 \times Mt}{Dp}$	0,084076433	N	$F_t = \frac{2 \times Mt}{Dp}$	0,519174041	N
Carga Radial (F_r) – Pinhão			Carga Radial (F_r) – Engrenagem		
$F_r = F_t \times (Tg a)$	0,030601299	N	$F_r = F_t \times (Tg a)$	0,188963776	N
Carga Resultante (F_n) – Pinhão			Carga Resultante (F_n) – Engrenagem		
$F_n^2 = F_t^2 + F_r^2$	0,089472265	N	$F_n^2 = F_t^2 + F_r^2$	0,552493433	N

Fonte: elaborado pelos autores.

Devido aos resultados acima serem consideravelmente irrisórios é possível viabilizar a fabricação do conjunto de máquinas em FDM, usando PETG que garante maior resistência a humidade. Para fins de comparação um Tiranossauro Rex, um dos maiores terópodes da era cretácea apresentava uma força de mordida de 35KN, um soco humano tem em média 2KN e nossa engrenagem desempenha uma força resultante de 0,55 N.

Para comensurar a resistência a flexão nos pés dos dentes da engrenagem usamos a equação de *Lewis* modificada que fornece a tensão máxima naquele ponto. Tal resultado deve ser menor ou igual a tensão admissível do material escolhido, no caso do PETG: 40 Mpa.

Quadro 6 - Equações de Lewis modificada para engrenagens, comparado PLA e PETG.

VERIFICAÇÃO DE RM (PINÃO e ENGRENAGEM)					
Q (Z=12)			4,5	Dado de interpolação	
Q (Z=3,0166)			3,0166	Dado de interpolação	
AGMA (Cte)			1	[]	
B (Espessura da engrenagem)			12	mm	
Sn1			40	Mpa (PETG)	
Sn2			50	Mpa (PLA)	
Pinhão			Engrenagem		
Tesão máxima = $(Ft \times Q \times AGMA)$ $(B \times M)$	0,01261146 5	Mpa	Tesão máxima= $(Ft \times Q \times AGMA)$ $(B \times M)$	0,0522046 8	Mpa
Tensão máxima ≤Sn1	Verdadeiro	Super Dimensionado	Tensão máxima ≤Sn1	Verdadeiro	Super Dimensionado
Tensão máxima ≤Sn2	Verdadeiro	Super Dimensionado	Tensão máxima ≤Sn2	Verdadeiro	Super Dimensionado

Fonte: elaborado pelos autores.

Quadro 7 - Tabela de torque, velocidade angular, força tangencial e diâmetro primitivo.

Nº	$(N \times m)$	$\omega(\frac{rad}{s})$	Ft (N)	Dp(mm)
1	0,229	5,236	0,015	30
2	0,573	2,094	0,015	75
3	0,573	2,094	0,038	30
4	1,432	0,838	0,038	75
5	1,432	0,838	0,095	30
6	3,582	0,339	0,095	75

Fonte: elaborado pelos autores

Eixo: Eixos são elementos sobre os quais se assentam partes giratórias de uma máquina e recebe a carga de trabalho desses elementos, que são descarregadas na estrutura da máquina (Massaroppie E et al., (2018)).

Devido à falta de materiais adequados para a fabricação de chaveta foi fabricado, com aço SAE 1020 um eixo escalonado com seções oblongas para acoplar e transmitir o movimento das engrenagens. A secção menor possui um diâmetro de 8 mm, condizente com o diâmetro interno do rolamento e a secção oblonga possui um diâmetro de 13 mm.

Figura 3 - Eixos fabricados

Fonte: Autor próprio

Para o dimensionamento é possível utilizar a teoria da falha de tensão de cisalhamento máxima (Teoria de Tresca). Todavia os resultados obtidos na aplicação desta teoria apresentaram valores muito baixos para sistemas dinâmicos. Logo o método de limite de Resistência à Fadiga Ajustado (S_e) foi escolhido. Executando o diagrama de corpo livre na estrutura é possível conferir as forças de reação de apoio, com isso encontramos o momento desempenhado pela estrutura. Considere: ($M_y=1,45 \times 10^{-4}$ Nm, $M_z=0,014$ Nm, $T=0,095$ Nm).

$$M = \sqrt{(M_y)^2 + (M_z)^2}$$

Aplicando a equação acima chegamos em um valor para momento de 0,014 Nm. Tendo em base isso, em seguida passamos para o equacionamento dos modificadores do limite de resistência (fadiga). Considerando um eixo usinado em aço SAE 1020 sem tratamentos térmicos temos $S_y=350$ MPa, $S_u=420$ MPa.

$$S_e = K_a \times K_b \times K_c \times K_d \times K_e \times (0,5 \times S_u)$$

- **K_a = Fator de modificação de condição de superfície:**

Figura 4: Tabela cálculo de condições de superfícies.

Acabamento de superfície	Fator a		Expoente b
	$S_{ut, kpsi}$	$S_{ut, MPa}$	
Retificado	1,34	1,58	-0,085
Usinado ou Trefilado a frio	2,70	4,51	-0,265
Laminado a quente	14,4	57,7	-0,718

Fonte: C.J. Noll and C. Lipson

Devido o processo de usinagem consideramos o segundo caso, logo $K_a= 0,91$.

- **K_b = fator de modificação de tamanho:**

Figura 5. Cálculo do fator de modificação de tamanho para torção e flexão.

$$K_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{0,3}\right)^{-0,107} = 0,879d^{-0,107} & 0,11 \leq d \leq 2in \\ 0,91d^{-0,157} & 2 < d \leq 10in \\ \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51mm \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254mm \end{cases}$$

Fonte: C.J. Noll and C. Lipson

Para essa etapa é necessário realizar um chute inicial para o diâmetro (5mm) e assim o fator de cálculo corrigir matematicamente. Assim chegando a $K_b= 1,044$.

- **Kc = fator de modificação da carga:**

Figura 6. Fator de cálculo para modificação de carga.

$$Kc = \begin{cases} 1 & \text{bending} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torsion} \end{cases}$$

Fonte: C.J. Noll and C. Lipson

Devido a movimentação das engrenagens a estrutura sofrerá por torção, logo Kc= 0,59.

- **Kd = fator de modificação de temperatura:**

Figura 7: Tabela modificadores de temperatura

Temperature °C	St/Srt	Temperature °F	St/Srt
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018

Fonte: C.J. Noll and C. Lipson

Considerando 35°C, por interpolação linear chegamos em Kd = 1,005.

- **Ke = fator de confiabilidade:**

Figura 8: Tabela fator de cálculo relacionando a confiabilidade do material

Reliability %	Transformation Variate Za	Reliability Factor Ke
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.236	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fonte: C.J. Noll and C. Lipson

Por não poder estimar a confiabilidade com exatidão, consideramos Ke = 1.

Como descrito no diagrama de Wohler (descreve a relação entre a amplitude da tensão cíclica (S) e o número de ciclos (N) que um material suporta até a falha por fadiga), considerando tais testes empíricos, podemos multiplicar Su (resistência última a tração) por 0,5 caso o mesmo seja menor que 200 Kpsi ou 1400 MPa. Com isso temos Su = 210MPa.

Multiplicando todos esses resultados temos o valor de limite de resistência à fadiga corrigido igual a 118,3 MPa. Em seguida, aplicamos os dados obtidos na equação de dimensionamento de projetos de eixos:

$$D = \left[\frac{32 \times n}{\pi} \times \sqrt{\left(\frac{Kt \times M}{Sn} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{Sy} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Considerando as propriedades do SAE 1020 descritas acima, torque de 0,095Nm, momento de 0,014; coeficiente de segurança (n) sendo de 5 e Kt igual a 1, temos um diâmetro mínimo necessário de 2,38mm; ou seja, o eixo de 8mm que seria ideal para acoplar no rolamento é hiper dimensionado, logo não irá falhar com as cargas consideradas.

Quadro 8 - Diâmetro mínimo em função do coeficiente de segurança e material.

COEF. DE SEGURANÇ A (N)	Aço SAE 1020	PETG
1	Ø 1,39mm	Ø 2,84mm
2	Ø 1,75mm	Ø 3,58mm
3	Ø 2,00mm	Ø 4,09mm
4	Ø 2,20mm	Ø 4,51mm
5	Ø 2,38mm	Ø 4,85mm

Fonte: elaborado pelos autores.

Dimensionamento dos rolamentos: Os rolamentos neste conjunto detêm a função de facilitar a rotação do eixo com as engrenagens e assim transmitir o movimento das mesmas de forma mais fluida. Devido o eixo, foi escolhido um modelo com diâmetro interno de 8 mm.

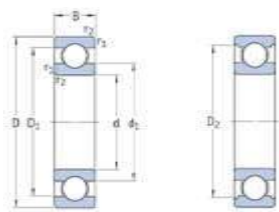
Considerando uma força axial de 2 N devido à pressão causada por pinos de retenção e uma carga radial de 1,2 kg devido ao carretel cheio, uma força radial causada pelas engrenagens de 0,095 N; somado a uma rotação de 50 RPM podemos iniciar o dimensionamento.

Aplicando a segunda lei de Newton conseguimos a força que a massa do conjunto irá causar e multiplicando a força que a engrenagem causa por um coeficiente de segurança de 2,5; obtemos em um somatório uma carga radial de 11,773 N.

Para aumentar a segurança do projeto é possível alocar a força para o meio do eixo, onde teríamos um pico no momento fletor, ou seja, essa força dividida por dois é a carga que cada rolamento deve suportar (reação A e B = 5,89 N), não há implicação de cargas anguladas.

Devido à baixa carga no sistema dinâmico podemos considerar o uso de rolamentos rígidos de uma carreira de esferas, pois são fáceis de localizar, baratos e é ideal para sistemas de alta velocidade e baixas cargas. Para fins de consulta será utilizado o Catálogo SKF (2015).

Figura 9 - Representação de um rolamento rígido de uma carreira de esferas.



Fonte: Catálogo SKF (2015)

Consultando o catálogo da SKF foi encontrado os rolamentos rígidos de uma carreira de esferas *608, tal rolamento foi escolhido como chute inicial para o dimensionamento devido a sua grande similaridade com rolamentos utilizados em skate que são abundantes e baratos.

Para critérios de dimensionamento é necessário multiplicar a força teórica por uma constante de fabricação que varia de 1 - 3 e assim obtemos a força utilizada, esse valor será utilizado nas forças axiais e radiais envolvidas. (Cte. = 1,5).

Em uma verificação de fatores de cálculo devemos aplicar a equação apresentada na tabela, e o resultado deve ser comparado com o valor tabelado mais próximo maior.

Figura 10 - Fatores de cálculo para rolamentos rígidos de esferas.

Rolamentos de uma e de duas carreiras Folga normal			
$f_0 F_a/C_0$	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3
0,345	0,22	0,56	1,99
0,689	0,26	0,56	1,71

Fonte: Catálogo SKF (2015).

Obtendo o fator de cálculo seguimos para a carga dinâmica equivalente (4,945 N).

$$P = (X \times Fr) + (Y \times Fa)$$

Antemão é necessário verificar a vida útil nominal em horas que o rolamento terá de trabalhar, para isso usamos a equação abaixo, sendo “p” uma constante que depende do tipo do rolamento (esférico = 3; rolos 10/3).

$$Lh = \frac{10^6}{60 \cdot n} \times \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Aplicando os dados na equação obtemos uma vida útil nominal de $1,13 \times 10^{11}$ horas. Em seguida partimos para o equacionamento final que visa o encontro da capacidade de carga dinâmica do rolamento, com isso podemos comparar com o valor tabelado da capacidade de carga dinâmica do rolamento de base *608 ($C = 3450$ N).

$$C_{nes} \geq P \times \left(\frac{Lh \times 60 \times n}{A_1 \times Askf \times 10^6} \right)^{\frac{1}{p}}$$

O resultado encontrado foi de 3447,99 N, ou seja, valor esse menor que 3450 N garantido pelo rolamento *608. Logo seu uso é adequado para o problema. ($A_1 = Askf = 1$).

SISTEMA ELÉTRICO: Ele foi dividido em quatro partes: componentes, ligações, programação e controle PID.

Componentes Elétricos:

- **Arduino:** É uma placa de prototipagem eletrônica muito utilizado para controle e automatização de sistemas eletrônicos, pois captam as informações geradas pelas entradas e tratam os dados de forma inteligente seguindo padrões de programação (C/ C++) para atuação das saídas que podem variar de motores, leds, reles e servo motores.

Para o controle das engrenagens o Arduino detém a função de interpretar a programação que visa manter o RPM constante, para tal controle é necessário o auxílio de uma Ponte H.

- **Ponte H L298N:** A Ponte H L298N é um módulo driver para o controle de motores que é utilizado para permitir a mudança de velocidade e sentido de giro para motores de passo e motores DC a partir de PWM (Modulação por Largura de Pulso). O modelo em questão pode controlar até 2 motores com apenas um módulo driver.

Devido a incapacidade do microcontrolador fornece a corrente mínima necessária diretamente para os motores, a ponte h faz um intermédio de potência. Podemos imaginar o Arduino como o cérebro da operação, a ponte h como os músculos para mover os motores.

- **Motor:** Utilizamos o motor de passo NEMA 17 normalmente utilizado para a movimentação de componentes de alta precisão como máquinas de impressão 3D e equipamentos de robótica. Internamente o componente possui eletroímãs que são energizados em sequência fazendo assim o motor girar com o passo de $1,8^\circ$ por passo ou 200 passos por um ciclo completo de volta.

- **Controlador REX – C100:** É um controlador de temperatura com um range de 0°C até 400°C que corrige a estabilização para o mais próximo do valor determinado como *Setpoint* por controle PID (Proporcional Integral Derivativo). É muito utilizado em fornos industriais, estufas e sistemas de aquecimento industrial.

Para o início do processo um dado proveniente das entradas (sensor de temperatura tipo K) entra no controlador, é interpretado levando em comparação com o valor de *Setpoint*, em seguida o controle PID começa a atuar a fim de estabilizar a temperatura real. Após a interpretação e correção o comando é transferido para o SSR que irá acionar a carga elétrica e assim aquecer a resistência acoplada ao Hotend que será usado para fundir a fita de PET.

Figura 11. Controlador de temperatura REX - C100



Fonte: Autor próprio

- **Termopar tipo K:** Refere-se a um sensor de temperatura que transforma calor em sinal elétrico e envia para o controlador interpretar a executar suas correções. O “tipo K” é um código padronizado (IEC e AISI) para termopares que usam cromo e trabalham sob uma faixa de temperatura de -200°C até 1350°C.

Figura 12. Sensor de temperatura Termopar tipo K



Fonte: Autor próprio

- **Resistência elétrica do tipo cartucho:** É uma resistência em forma de cilindro de níquel-cromo que converte energia elétrica em calor. Tal energia em Joules é transmitida para o Hotend por meio de condução térmica, visto que ambos os materiais estarão em contato.

Figura 13 - Resistência elétrica do tipo cartucho.

Fonte: Autor próprio

- **SSR:** É um relé de estado sólido que serve para acionar e desacionar cargas elétricas de corrente alternada (AC), muito aplicado para ligar aquecedores, motores, resistências e outros componentes por meio de sinais de controle em baixa tensão.

Os pinos 1 e 2 comutam a carga em AC e os pinos 3 e 4 recebem um sinal de controle em corrente contínua (CC). Uma das vantagens do SSR é seu funcionamento sem partes mecânicas, ou seja, menos desgaste com o tempo assim aumentando sua vida útil em comparação com modelos com partes mecânicas.

Figura 14 - Relé de estado sólido (SSR)

Fonte: Autor próprio

- **Relé auxiliar automotivo:** Serve para acionar e desacionar cargas de componentes que atuam com correntes mais altas, como: faróis, buzinas, ventoinhas, som e a bomba de combustível). É usado um sinal de baixa corrente vindo diretamente da chave ou modulo eletrônico.

Esse modelo de relé será usado complemento do SSR, pois ambos podem ser acionados pelo sinal de 12V, ou seja, o relé automotivo liga para complementar a carga. Sua pinagem 85 e 86 são referentes a bobina de comando, recebem os 12V sendo um pino positivo e outro negativo. Quando energizados fecham o contato interno. O pino 30 é de entrada de carga, geralmente ligado ao positivo da fonte de alimentação. Por fim, o pino 87 NA (Normalmente Aberto) só conecta com o pino 30 quando a bobina 85 e 86 estão completamente energizados.

Figura 15 - Representação física e elétrica de um relé auxiliar automotivo.

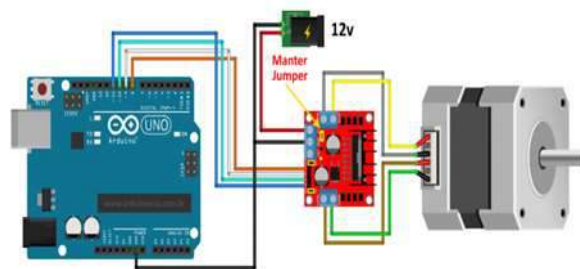


Fonte: Mercado Livre

- **Fonte 12V:** A fonte de 12V converte a energia elétrica da tomada AC 110/220V para 12V de corrente contínua (DC).

Ligação Elétrica: Para a montagem foi utilizado o Arduino UNO, Ponte H L298N, motor de passo NEMA – 17, fonte de 12V, cabo USB tipo B e cabos. Veja a montagem abaixo:

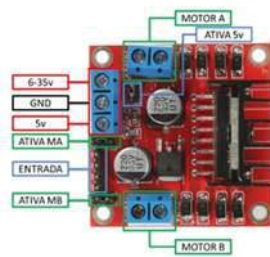
Figura 16 - Montagem elétrica do circuito de recolhimento.



Fonte: Last minute engineers.com

Esse modelo de Ponte H pode controlar simultaneamente 2 motores, todavia vamos usar os dois módulos para um único motor de passo, assim podemos controlar sua velocidade de rotação para se adequar a velocidade a linear desejada de 10mm/s e seu sentido de rotação.

As pinagens MA e MB são ligadas no Arduino para executar um controle PWM, todavia não será utilizado neste projeto tal controle, devido a isso devemos manter essas conexões em *jump* (ligação entre ela mesmo).

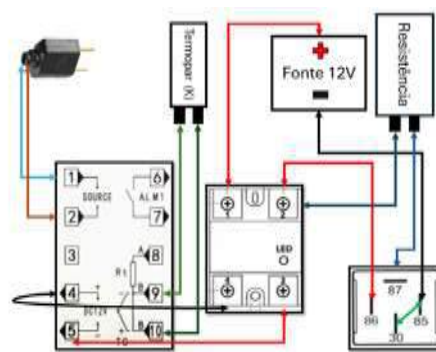
Figura 17 - Descrição da pinagem da ponte H L298N

Fonte: Last minute engineers.com

Para energizar a placa será usado uma fonte externa de 12V, devido a isso é de suma importância realizar um jump no pino “Ativa 5V”, desta forma o pino 5V será ignorado e o cabo da fonte irá para a pinagem adequada “6-35V”. O GND será ligado a fonte externa.

O barramento IN1, IN2, IN3 e IN4 servem para controlar o motor A e B, para o projeto todas as entradas do barramento serão acopladas ao motor de passo.

Ligação elétrica do conjunto de aquecimento: Para a ligação deste conjunto foi utilizado um controlador REX – C100, fonte 12V, SSR, relé auxiliar automotivo, resistência elétrica do tipo cartucho, termopar tipo k e fios de conexão de 2mm. Veja o diagrama de montagem abaixo.

Figura 18 - Representação das ligações elétricas do circuito de aquecimento do Hotend.

Fonte: Autor próprio

Programação: Para a programação do motor foi utilizado o próprio software da IDE Arduino. É de suma importância importar ao início do código a biblioteca “<Stepper.h>” que faz o controle de motores de passo.

Figura 19 - Programação do Motor de passo.

```

1  #include <Stepper.h>
2  // Número de passos por rotação (geralmente 200 para NEMA 17)
3  const int stepsPerRevolution = 200;
4  // Instância da biblioteca Stepper: pinos IN1, IN2, IN3, IN4
5  Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11);
6  void setup() {
7    // Define a velocidade para 50 RPM
8    myStepper.setSpeed(50);
9    Serial.begin(9600);
10 }
11 void loop() {
12   // Gira uma volta completa no sentido horário
13   Serial.println("clockwise");
14   myStepper.step(stepsPerRevolution);
15   // Sem pausa entre os giros
16   delay(0);
17 }

```

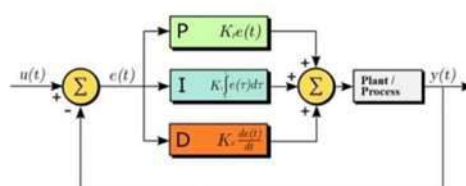
Fonte: Autor próprio

Controle PID: O sistema de controle PID funciona ajustando a saída de um sistema com base no erro entre o valor desejado e o valor medido. O controlador faz o uso de três ações: proporcional, integral e derivativo que reduzem o erro e melhoram a próxima respostas.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} \cdot e(t)$$

- **Proporcional (P):** Ajusta a saída com base na magnitude do erro (diferença entre o valor medido e o desejado). Um erro maior resulta em um ajuste proporcional mais significativo, reduzindo rapidamente a discrepância inicial e mantendo o processo próximo ao ideal.
- **Integral (I):** O elemento integral acumula os erros ao longo do tempo, ajustando a saída para eliminar desvios residuais. Ele é crucial para corrigir desvios persistentes, garantindo a precisão a longo prazo do sistema.
- **Derivativo (D):** Considera a taxa de variação do erro, ajudando a prever e mitigar flutuações futuras. Esse componente é essencial para estabilizar o sistema, evitando oscilações e garantindo uma resposta suave às mudanças.

Figura 20. Representação de um controle PID.

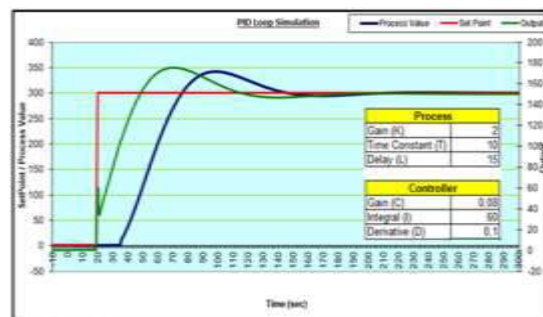
Fonte: www.embarcados.com.br

Para obtenção de um processo mais eficiente podemos somar ao processo PID um incremento que modela o sistema físico real (planta do processo). Para essa modelagem devemos considerar valores de ganhos do processo (K), constante de tempo (Ts), delay (Ls) e uma representação do erro em domínio da função de Laplace (e^{-Ls}).

$$u(t) = \left\{ \left[Kp \cdot e(t) + Ki \int_0^t e(t) dt + Kd \frac{d}{dt} \cdot e(t) \right] \times \left[\frac{K}{1 + Ts} \cdot (e^{-Ls}) \right] \right\}$$

Aplicando os valores mais adequados obtemos um gráfico com uma oscilação que se estabiliza em cerca de dois minutos na temperatura aplicada no Set Point. Embora o tempo de estabilização seja alto, os valores de picos iniciais são consideravelmente baixos.

Figura 21 - Tabela de simulação do controle PID adaptada para temperatura.



Fonte: www.citisystems.com.br

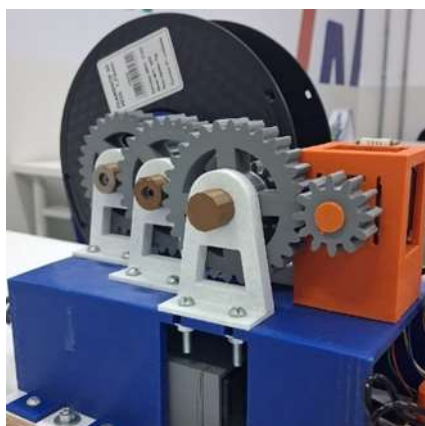
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a montagem de toda a estrutura, foi iniciado testes para verificar o funcionamento e comportamento dos componentes e a capacidade do conjunto em extrudar a fita de garrafa PET. Com os testes foi possível identificar pontos a se melhorar em futuras atualizações.

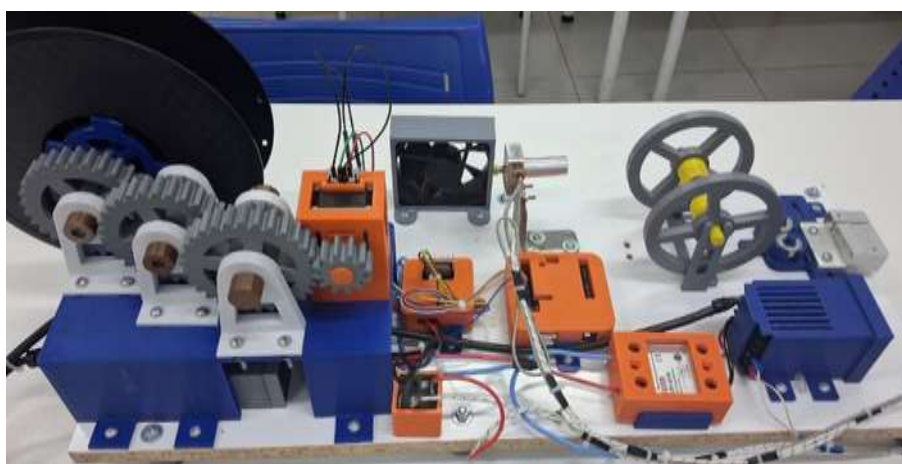
Figura 22,23 – Sistemas de Aquecimento e Filetamento.



Fonte: Autor próprio

Figura 24 – Sistema de Recolhimento.

Fonte: Autor próprio

Figura 25 – Máquina extrusora de filamentos 3D.

Fonte: Autor próprio

O filetador apresentou excelente qualidade em sua lâmina de corte, todavia em algum momento do processo de filetagem o corte passou a apresentar variações em sua altura, mesmo com o seletor de altura do filetador.

Outro fator crítico observado, foi a falta de força do sistema em puxar a fita de PET do filetador, isso decorre devido a uma força mínima que deve ser seguida, pois o sistema de recolhimento ao final do processo deve puxar o filamento pronto e a fita a ser cortada neste processo de metamorfose do PET, ou seja, baixa tração garante estabilidade no repuxo do filamento ao sair do bico. Entre tanto, não possui torque o suficiente para puxar a fita e cortar da garrafa. Ao focar em forçar o filamento ainda no bico de extrusão ele se rompe.

Para mitigar tais falhas é indicado armazenar os filetes de garrafa PET já prontos em uma bobina posicionado em uma altura semelhante ao do Hotend, desta forma o conjunto conseguira puxar tudo,

pois não terá mais de aplicar alta tração na execução do corte da garrafa, outra vantagem é a garantia da altura correta das fitas de PET presentes na bobina, pois a filetagem ocorrerá por meios externos.

Partindo para o sistema de aquecimento, foi adicionado ao controlador REX - C100 um *Setpoint* de 300°C, que se provou mais do que adequado para a metamorfose da fita de PET em filamento de impressora 3D. A demais, o controlador PID apresenta um tempo considerável para atingir um ponto de acomodação da temperatura em relação ao *Setpoint*, porém tal problema pode ser mitigado alterando para valores mais adequados a constante integrativa e derivativa, para assim atuar mais rapidamente na correção do erro.

Outra problemática encontrada foi a necessidade de utilizar um relé auxiliar automotivo para complementar o funcionamento do SSR, pois sem o mesmo o SSR não é capaz de cortar a passagem de energia, assim subindo a temperatura sem controle. Mas com a substituição do relé automotivo por mais um SSR o sistema pode executar a tarefa de forma mais adequada.

É importante destacar também a preferência de um modelo de garrafa PET em específico, tal observação decorre devido a espessura variada de cada marca, pois algumas são mais finas ou grossas que outras. Tal diferença de espessura pode afetar o processo de extrusão, causando descontinuidades no filamento ou falhas durante o processo de FDM.

Também é de suma importância definir a marca de garrafa que apresente maior área útil, tal característica decorre de partes que a espessura é constante e sem variação geométrica, tal zona geralmente se localiza ao centro da garrafa. O gargalo e a base por apresentarem mudanças em sua geometria e espessuras maiores que o centro não podem passar no processo de extrusão, pois irão requer maior tração do sistema e temperaturas mais elevadas.

Avançando para o sistema de recolhimento, ao ligar os componentes foi possível notar uma excelente sincronicidade no sistema de transmissão, característica essa denotando o bom dimensionamento dos elementos de máquinas lá presentes. Todavia em rotações superiores a 60 RPM e abaixo de 17 RPM, o conjunto passa a vibrar de forma acentuada. Devido a isso, a operação mais segura está entre de 17 a 60 RPM, cuja vibrações são menos acentuadas.

Uma forma de mitigar ainda mais as vibrações, seria a aplicação de drivers para o controle de motores como o TMC 2209 que conseguem amortecer as vibrações causadas pelo motor. Tal benefício se reflete na qualidade do material produzido quanto na integridade dos demais componentes. Outra

forma seria a impressão de um *cassing* impresso em um material com características de borracha como TPU, para dissipar a energia causadora das vibrações.

É de se considerar o aquecimento acentuado do motor de passo durante longos tempos de trabalho, tal aquecimento com o tempo pode ocasionar o derretimento da engrenagem acoplada ao seu eixo, assim alterando sua dimensionalidade e ocasionando rotações em falso. Para a solução deste problema é requerido a usinagem de uma engrenagem de um material de fácil fabricação e acessibilidade, e que garanta baixa condutividade térmica. Vale ressaltar que as demais engrenagens do sistema podem ainda ser de materiais impressos, pois o calor não as afeta, apenas a engrenagem 1 que está diretamente acoplada ao eixo motor deve ser revista.

Outra possível redundância é a instalação de um sistema de refrigeração forçada, como o uso de ventoinhas de computador ou motores com pás para servirem de ventiladores. Assim forçando o ar a interagir com a carcaça do motor e dissipar parte da energia térmica.

Para o aperfeiçoamento do sistema de recolhimento pode ser considerado ligar os pinos Ativa MA e MB ao Arduino, assim habilitando a implementação de um controle PWM, que pode ser benéfico para garantir de forma precisa a velocidade de rotação do motor e assim refletindo na velocidade linear, essa essencial para a qualidade do material a ser fabricado.

Com a viabilidade de uma máquina com capacidades de transformar um material de fácil acesso e abundante como o PET em filamentos de impressora 3D, os custos para detentores de equipamentos de FDM será drasticamente reduzido, haja vista que o quilograma de filamento produzindo industrialmente é demasiado caro.

A impressão 3D não é utilizada para produções em larga escala devido seu alto custo e longo tempo de produção de peças, seu trunfo está na prototipagem de projetos, ou seja, o erro em algum momento do processo de impressão é inevitável.

O usuário DIY (*Do It Yourself*), empresas e setores industriais de projetos podem reduzir drasticamente seus custos na compra de matéria prima com a utilização desta máquina filetadora, além de, contribuir diretamente com a diminuição da pegada de carbono ao reciclar e reutilizar matérias tão prejudiciais ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Igor Santos de et al. RECICLAGEM DE GARRAFAS PET PARA FABRICAÇÃO DE TELHAS. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/897/569>. Acesso em:
- E-CYCLE. Tempo de decomposição do plástico preocupa. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/tempo-de-decomposicao-do-plastico/>. Acesso em:
- WWF (Brasil). Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. WWF, [S. l.], 4 mar. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em:
- FERREIRA, Alvaro Augusto. Projeto de dispositivo para fabricação de filamentos para impressora 3D a partir da reciclagem de garrafas pet. 2024. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/252665>. Acesso em: 13 maio 2025.
- ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE EXTRUSÃO DE FILAMENTO PARA IMPRESSÃO 3D A PARTIR DE PET RECICLÁVEIS. SITEFA, [S. l.], v. 7, n. 1, p. e7118, 2024. DOI: 10.33635/sitefa.v7i1.314. Disponível em: <https://publicacoes.fatecsertaozinho.edu.br/sitefa/article/view/314>. Acesso em: 13 maio. 2025.
- MORENO-SCHIRIBERTSCHNIK, Francisco; MARTINEZ, Fátima. Produção de filamentos para impressão 3D a partir de garrafas plásticas recicladas. Rev. cient. UCSA, Assunção, v. 11, n. 3, p. 3-23, dez. 2024. Disponível em . Acessado em 13 maio. 2025. <https://doi.org/10.18004/ucsa/24098752/2024.011.03.003>.
- C.J. Noll and C. Lipson, "Allowable Working Stresses," Society for Experimental Stress Analysis, vol. 3, no. 2, 1946 p. 29
- SKF. Rolamentos. Pub BU/P1 10000/2 PT.BR. Outubro de 2015. Disponível em: <https://www.skf.com/10k>.
- CONTROLE PID de Forma Simples e Descomplicada. In: SILVEIRA, Cristiano. Controle PID de Forma Simples e Descomplicada. [S. l.], 14 nov. 2016. Automação Industrial, Controle de Sistemas. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/controle-pid/>. Acesso em: 1 ago. 2025.
- G. BUDYNAS, Richard. Elementos De Máquinas De Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica. 8. ed. rev. e atual. [S. l.]: AMGH, 2011. 1084 p.

FORMAÇÃO DE GELO EM AERONAVES
E A SEGURANÇA DE VOO: UMA
ANÁLISE DE EVENTOS DE LOC-I NA
AVIAÇÃO BRASILEIRA

João Miguel de Lucca
André Luís Boff

RESUMO

Este estudo busca analisar eventos de perda de controle em voo (*LOC-I*) na aviação brasileira causados pela formação de gelo em voo, buscando elucidar suas causas, contextos operacionais e falhas sistêmicas, a partir da análise de relatórios oficiais. Este estudo utilizou-se de uma abordagem qualitativa, exploratória, com delineamento bibliográfico e documental. Os dados foram extraídos de uma busca na base de dados dos relatórios finais do CENIPA, chegando-se a um contexto de análise de dois eventos distintos. O trabalho pretendeu preencher uma lacuna na literatura nacional ao associar eventos de *LOC-I* como resultado da situação de formação de gelo em voo, relação esta pouco presente, conforme buscas realizadas nas bases de dados sobre eventos aeronáuticos. A relevância acadêmica reside na interseção entre a meteorologia aeronáutica e a segurança operacional. A análise revelou que em ambos os casos houve falhas na utilização dos sistemas que combatem a formação de gelo em voo, percepção deficiente da situação de formação de gelo nas aeronaves por parte das tripulações, e descumprimento de procedimentos operacionais que culminaram na perda de controle em voo. O estudo contribuiu com o aprimoramento do entendimento sobre os resultados e riscos associados a formação de gelo em voo, propondo a necessidade da identificação e reconhecimento de áreas de ocorrência de formação de gelo. Destacou ainda melhorias como a necessidade de mudanças nos treinamentos e melhorias nos programas de treinamentos de tripulantes e revisões que destaquem o risco das operações em áreas de meteorologia adversa para a mitigação de situações de *LOC-I* induzidas pela formação de gelo.

Palavras-chave: formação de gelo em voo; perda de controle em voo; *LOC-I*.

1 INTRODUÇÃO

A formação de gelo em aeronaves é uma das situações, afetas ao seu ambiente operacional, mais críticas para a aviação. Define-se como àquela situação em que o gelo se forma e adere nas superfícies da aeronave. A sua principal causa acontece quando se encontra com água super-resfriada na atmosfera em que se realiza o voo. Normalmente, estas gotas de água super-resfriadas estão presentes dentro de nuvens onde a temperatura varia de +2°C a -20°C, podendo chegar a -40°C (Wu, 2018). O encontro deste elemento, nestas condições, com as superfícies da aeronave, gera a formação de gelo, podendo vir a afetar a aerodinâmica do voo como um todo (com possível perda de sustentação da aeronave), e mais especificamente a efetividade dos comandos de voo (ailerons, estabilizador horizontal, leme de direção e estabilizadores) (Cober, Isaac, *Strapp*, 2001; Lynch, *Khodadoust*, 2002).

Para mitigar este tipo de situação, as aeronaves normalmente possuem sistemas que combatem a formação deste gelo acumulado em voo. Estes sistemas são denominados de-ice e *anti-ice*, e normalmente são responsáveis pela prevenção/extinção do gelo acumulado em áreas mais críticas da aeronave, como bordos de ataque, entradas de ar e receptores de dados da atmosfera (ATR, 2011; González, 2017). Contudo, o gelo pode se acumular em regiões que não possuem qualquer tipo de proteção, ou mesmo em áreas protegidas, em que existe um certo atraso na ativação do sistema correspondente. Nestas situações existe uma probabilidade maior de ocorrer uma perda de controle em voo, devido à diminuição do vetor sustentação, através do aumento exponencial do arrasto provocado pelo acréscimo de gelo (Cober, Isaac, *Strapp*, 2001; Lynch, *Khodadoust*, 2002).

A perda do controle de voo, e sua consequente capacidade de manobrabilidade, intitula-se de LOC-I (*Loss of Control In-flight*), definida como àquela situação em que a tripulação não consegue manter o controle pretendido da aeronave, resultando em um desvio irrecuperável da trajetória de voo (IATA, 2015). Quando associada a formação de gelo, resulta em uma situação em que os comandos se tornam ineficientes para comandar as superfícies de voo e manter a aeronave na situação de voo pretendida, seja pelo possível travamento das superfícies devido ao acúmulo de gelo, ou seja pelo próprio aumento do peso total da aeronave (*Politovich*, 2015).

O histórico de ocorrências aeronáuticas que atribuem como fatores contribuintes o gelo excessivo em voo, ou a perda do controle durante a operação aérea, são bastante numerosos dentro da indústria aeronáutica. Contudo, pouca informação aparece da decorrência do primeiro (gelo) gerando o segundo (LOC-I). Este estudo pretende fazer um levantamento deste tipo de evento dentro do cenário

brasileiro, a partir dos relatórios de ocorrências aeronáuticas emitidos pelo CENIPA, apresentando as similaridades e diferenças encontradas sobre as ocorrências analisadas.

2 O PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO EM AERONAVES

A formação de gelo é um fenômeno crítico em que água super-resfriada, conhecida também por gotas super-resfriadas, estará no formato de chuva congelante, chuvisco congelante e/ou grandes gotas super-resfriadas. Todas ocorrem quando entram em contato com as superfícies da aeronave, congelando-se e gerando um respectivo depósito de gelo (Cober, Isaac, Strapp, 2001). Fatores meteorológicos como temperatura externa do ar, umidade, presença de nebulosidade e a existência e tamanho de gotas de água super-resfriadas são fatores importantes para a determinação da probabilidade da formação de gelo e sua severidade (Morcrette, 2019).

Neste sentido, existem duas condições para a formação de gotas super-resfriadas: a primeira é quando um hidrometeoro congelado passa por uma região de temperaturas congelantes para outra região com temperaturas sub-congelantes, adotando a condição de líquido novamente e passando por um processo de superfusão (Sánchez, 2014). A segunda condição é quando partículas de água detidas dentro de uma nuvem pelo processo de condensação, crescem por um ciclo de colisão-coalescência. Normalmente o topo de nuvens convectivas servem de origem para que tais gotas cresçam por este processo, o qual apenas é concretizado quando a velocidade da gota vence a força convectiva da nuvem (Cober, 1996). O primeiro mecanismo é normalmente associado com regiões em que ocorrem passagens frontais (Carrière. et al. 2000). Sobre a chuva congelante:

A faixa de temperatura de ocorrência da chuva congelante é bastante pequena, uma vez que as gotas de chuva congelam e se transformam em granizo em temperaturas poucos graus abaixo de zero. [...] Sabe-se que a chuva congelante geralmente consiste em precipitação leve e uniforme em uma área bastante grande (Lewis, 1951).

Já o chuvisco congelante é a condição que mais traz perigo para a aviação. Quando comparado com a chuva congelante: há a possibilidade de o chuvisco ser encontrado em uma maior variedade de temperaturas, situações meteorológicas e altitudes (Lewis, 1951). Este fenômeno possui uma taxa maior de colisão com as superfícies da aeronave, causando um maior depósito de gelo quando comparado com outros tipos de gotas super-resfriadas. Quando uma aeronave voa em uma região em que existe a ocorrência de chuvisco congelante, ele é capaz de escorrer e se depositar em forma de gelo no intradorso e extradorso da asa. A aeronave passa a ter, então, uma maior redução de performance, quando comparada a uma situação de chuva congelante (Cober, 1996). Quanto à região

de formação de grandes gotas super-resfriadas, o seguinte estudo descreve os efeitos pouco significativos deste formato:

A maioria dos voos de pesquisa foram direcionados para ou em direção a regiões frontais quentes ou de baixa pressão associadas a tempestades sinóticas de inverno em latitudes médias. As nuvens observadas eram estratiformes por natureza, sem convecção. A maioria das nuvens associadas com ambientes em que ocorriam grandes gotas super-resfriadas estavam em altitudes inferiores a 3 km, embora oito casos em distâncias superiores a 3 km e um caso a 6 km foram observados (Cober, Isaac, Strapp, 2001).

2.1 TIPOS DE GELO

Os tipos de gelo que são formados nas superfícies das aeronaves são definidos em cinco tipos: geada, geada glaceada, gelo claro, gelo escarcha ou opaco e gelo misto. Sobre os dois primeiros citados, também conhecidas por *hoar frost* e *glaze*, ambos podem se formar na aeronave tanto em solo como em voo. O *hoar frost* não apresenta efeitos significativos para a operação aérea, tampouco afeta perigosamente a aerodinâmica da aeronave, por isso não será considerado nesta análise. Por outro lado, a geada glaceada (*glaze*) pode afetar significativamente a operação aérea, porém, este tipo de gelo afeta a aeronave da mesma forma que o gelo claro, a única diferença entre ambos é o seu processo de formação, que se resume (*glaze*) a um processo de condensação de um chuvisco ou gota de chuva (ATR, 2011).

O gelo claro é considerado a forma mais perigosa de formação de gelo para a aviação. Normalmente se forma em temperaturas relativamente mais quentes, com a presença de gotas super-resfriadas maiores, alta umidade e normalmente em altas velocidades. Por conta destas condições é conhecido que o gelo claro não se forma logo quando entra em contato com a aeronave, pois a gota super-resfriada possui energia para continuar escorrendo na superfície da aeronave e, com isso, acaba se formando com mais uniformidade e de forma mais compacta, diminuindo as bolsas de ar dentro da formação. Ele também apresenta formatos específicos, se a exposição ocorrer por tempo suficiente, quando em bordos de ataque e aerofólios. Esta condição impacta mais significativamente o escoamento do fluxo de ar durante o voo (Vukits, 2002; Wu, 2018).

Já o gelo escarcha ou opaco é formado a partir do contato da aeronave com pequenas gotas super-resfriadas, normalmente em temperaturas negativas, quando voando em baixas velocidades, com baixa incidência de água ou chuva, ou com apenas o líquido das gotas super-resfriadas presentes nesta atmosfera. Este gelo se forma quando estas pequenas gotas entram em contato com a superfície da aeronave e congelam instantaneamente. A aeronave normalmente está mais fria que a atmosfera e

por isso estas gotas se congelam rapidamente mantendo seu formato original, existindo a incidência de pequenas bolhas de ar dentre este tipo de formação (Wu, 2018).

Por sua vez, o gelo misto é caracterizado pela presença dos dois tipos de gelo mencionados anteriormente, o gelo claro e o gelo opaco, podendo ser considerado o mais comum de se formar nas aeronaves em voo em regiões favoráveis à formação de gelo (ATR, 2011; Vukits, 2002). Isto acontece, porque as nuvens e regiões que favorecem a formação de gelo em aeronaves possuem características mistas – como por exemplo diferentes temperaturas (normalmente entre -10°C e -20°C), e por isso a existência de gotas de água super-resfriada com tamanhos diferentes (Wu, 2018).

2.2 SISTEMAS DE ANTI-GELO E DE-GELO DAS AERONAVES

Estes sistemas são projetados para garantir a segurança das operações aéreas, prevenindo ou removendo a formação de gelo nas superfícies críticas das aeronaves e permitindo que as aeronaves voem em regiões de formação de gelo de forma segura. Essas tecnologias são essenciais para mitigar os efeitos adversos que o gelo causa na performance, aerodinâmica, estabilidade e controle de voo (AOPA, 2004; Da Silva, Silhares, Zerbini, 2003).

O sistema de de-gelo (ou *de-ice*, em inglês) atua de forma cíclica utilizando o sistema pneumático, com a finalidade de remover o gelo que se formou na aeronave (normalmente este sistema equipa os bordos de ataque da aeronave) inflando os boots e quebrando o gelo formado; quando o sistema está desligado ou não inflado, permite que o gelo se forme nos bordos de ataque e regiões que possuem o sistema. Embora esses sistemas possam remover o gelo eficientemente, o gelo que ocorre e congela em superfícies não protegidas adjacentes pode criar maiores perigos, como os chamados "*ridges*" de gelo, que podem aumentar significativamente o arrasto e diminuir a sustentação, normalmente são resultantes da formação de gelo com a presença de grandes gotas super-resfriadas (AOPA, 2004; Lynch, Khodadoust, 2002; Da Silva, Silhares, Zerbini, 2003).

Por outro lado, o sistema de anti-gelo (ou *anti-ice* em inglês) atua de forma diferente quando comparado com o sistema de de-gelo. O sistema de anti-gelo atua de forma preventiva, ou seja, é acionado para que não haja a formação de gelo no local onde o sistema está atuando (normalmente nos bordos de ataque dos aerofólios, bocais do motor e instrumentos como tubo de pitot) e funciona de forma contínua desde o momento em que é acionado em condições de formação de gelo. As aeronaves que normalmente possuem este sistema são aeronaves de grande porte ou aeronaves a jato, normalmente o sistema atua utilizando o ar quente proveniente dos motores pelo sistema de

bleed air para aquecer as superfícies que possuem o sistema. Ainda, importa referir que outra variante do sistema de anti-gelo é conhecida como sistema anti-gelo eletrotérmico, esta variante utiliza a eletricidade como fonte de aquecimento, via resistências e indutores de calor (AOPA, 2004; Da Silva, Silveiras, Zerbini, 2003).

Pesquisas mais recentes sobre a adesão de gelo nas superfícies das aeronaves têm mostrado que fatores como temperatura ambiente, tempo de congelamento, rugosidade da superfície, quantidade de água presente na atmosfera e o ângulo de incidência das gotas super-resfriadas influenciam a força de adesão do gelo (Xue et. al, 2022). Nisso, essas tecnologias e suas limitações destacam a necessidade contínua de aperfeiçoar tanto o sistema de anti-ice quanto o de de-ice, especialmente para enfrentar os desafios impostos por condições extremas, como gelo de grandes gotas super-resfriadas, que pode comprometer severamente a segurança de voo (Lynch, Khodadoust, 2002).

3. O EVENTO LOC-I (LOSS OF CONTROL IN-FLIGHT)

A Perda de Controle em Voo (*LOC-I*) é considerada uma das situações mais letais que podem ocorrer na aviação, representando uma fração significativa das fatalidades ocorridas nos últimos dez anos – próximo dos 70%, em nível mundial. Em números mais precisos, este evento ocasionou 1.242 fatalidades, sobre um total de 2,541 fatalidades, no período de 2010 a 2014. Como definição, *LOC-I* é aquela situação em que a tripulação não consegue manter o controle pretendido da aeronave de forma satisfatória, resultando em um desvio irrecuperável da trajetória de voo (Boeing, 2025; IATA, 2015).

Diferente de outras categorias de ocorrências aeronáuticas, como o CFIT (*Controlled Flight Into Terrain*), que sempre foram significativos durante a fase da aproximação e pouso (Boeing, 2025), mas que sofreram redução em seus índices com o advento de sistemas como o GPWS; os acidentes resultantes de *LOC-I* tem constantemente crescido, e tem ocorrido em praticamente todas as fases do voo, caracterizando-se, principalmente, pela incapacidade da tripulação ou dos sistemas automatizados de controlarem a trajetória pretendida da aeronave (Lambregts et. al., 2008).

Normalmente, a situação de *LOC-I* resulta de outras situações presentes, como voo em velocidades acima do permitido, estol, falha de motor, formação de gelo, e outras circunstâncias que interferem na controlabilidade da aeronave, onde tanto fatores humanos como mecânicos contribuem para o resultado acidente. Com isso, ainda nos dias de hoje, a complexidade destas ocorrências é tamanha

que ainda não existe uma solução eficaz implementada para mitigar estes eventos relacionados a situação de LOC-I (IATA, 2015; Lambregts et. al., 2008).

Especificamente neste estudo, a formação de gelo em aeronaves se torna um fator muito importante e decisivo quando abordamos o tema de *LOC-I*, pois com esta formação ocorrendo, consequentemente a aeronave terá: um aumento do arrasto; uma diminuição da sustentação; e uma diminuição da controlabilidade, dependendo do tipo de gelo formado e do local (como visto em cenários de testes simulados, o gelo resulta em situações de diminuição da ação dos comandos, menor resposta das superfícies comandadas e assimetrias no empuxo dos motores) (Lynch, Khodadoust, 2002).

4. MÉTODO

Este estudo pretende analisar os eventos de *LOC-I* provocados pela formação de gelo em voo, a partir dos relatórios de ocorrências aeronáuticas emitidos pelo CENIPA. Para isso se utilizou uma abordagem qualitativa de análise, conceituada como uma pesquisa que não se preocupa com a representatividade numérica, mas com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, organização ou condição experimentada (Gerhardt, Silveira, 2009; Given, 2008; Godoy, 1995; Silva, 2018).

Para a obtenção de dados se utilizou uma técnica exploratória, definida por ações voltadas para uma busca na aproximação com o fenômeno analisado, através do levantamento de informações que conduzem ao conhecer mais a seu respeito. Geralmente este tipo de pesquisa se enquadra quando o assunto pesquisado é pouco explorado, buscando assim, desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias acerca do tema. Complementar a esta busca exploratória, se utilizou a técnica metodológica da pesquisa bibliográfica/documental, desenvolvida por meio da utilização de já existentes e elaborados materiais associados à temática analisada, identificados principalmente como livros e artigos científicos, de uma maneira geral (Gil, 2008; Oliveira, 2006).

De maneira prática, a busca pelos dados para este estudo se deu sobre as bases de dados disponíveis sobre ocorrências aeronáuticas com as características propostas pela questão de pesquisa, exclusivas do cenário da aviação civil nacional. As estratégias utilizadas foram realizadas pelos através dos dois passos seguintes (nem sempre frutíferas, mas importantes para a contextualização do problema):

- 1) Busca na base de dados do “Painel SIPAER”: de todas as ocorrências aeronáuticas que tivessem como fator contribuinte “meteorologia adversa” e/ou “perda de controle em voo”. Os resultados da pesquisa inicial se reduzem para um total de 79 acidentes, 33

ocorrências fatais e 100 fatalidades. Adicionando o item “perda de controle em voo” como “tipo de ocorrência”, houve uma redução no número de ocorrências para um total de 25 acidentes, 18 ocorrências fatais e 63 fatalidades. Destes resultados encontrados, nenhum foi relevante para o estudo proposto, pois quando de suas leituras, não houve a relação direta desejada pela questão de pesquisa (formação excessiva de gelo em voo ocasionando um *LOC-I*). Esta ferramenta acabou sendo desconsiderada para este estudo.

- 2) Com a negativa acima, a busca passou a ser na base de dados dos “Relatórios Finais do CENIPA”, utilizando-se a filtragem por “tipo”, para os eventos categorizados como “[LOC-I]” Os resultados obtidos após esta filtragem foi um total de 557 relatórios nesta categoria de eventos (acidentes/incidentes graves/incidentes). Após a pesquisa por termos como “formação de gelo” e “perda de controle”, de maneira conjunta, dentro destes 557 relatórios, apenas um apresentou estes fatores contribuintes presentes, se tornando então relevante, pois cumpria a relação direta citada no passo anterior.
- 3) Ampliando o passo anterior, outra filtragem foi feita mudando o enquadramento de “[LOC-I]” para “[OTHR]”, foram relacionados 297 relatórios finais. Após uma repetição da pesquisa feita no passo anterior (pelo termo “formação de gelo” e “perda de controle” dentro destes 297 relatórios), a análise identificou mais um evento relevante para este estudo, pois de forma semelhante a busca anterior, identificou-se uma outra ocorrência que teve a perda de controle em voo causada pela formação de gelo em voo.

Para analisar estes dois eventos se utilizou o método da revisão bibliográfica, que é um processo de busca, seleção, análise e síntese crítica da literatura existente sobre um tema específico. Consiste em examinar e avaliar os materiais disponíveis (mais especificamente os relatórios finais dos dois eventos selecionados, além de possíveis outros documentos disponíveis que tratam sobre eles, como reportagens à época), a fim de embasar teoricamente um estudo acadêmico (Given, 2008; Silva, 2018). Através disso, busca-se analisar as similaridades e discrepâncias encontrados nos eventos de *LOC-I* provocados pela excessiva formação de gelo durante o voo, ocasionando as referidas ocorrências aeronáuticas.

5. SIMILARIDADES E DISCREPÂNCIAS ENTRE OS EVENTOS ANALISADOS

Os dois eventos selecionados para esta análise foram os das aeronaves PP-PTU e PP-AJV. Sobre a primeira, a aeronave realizava a rota da empresa Trip Linha Aéreas com decolagem do Aeródromo Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO), Maceió, AL, com destino ao Aeródromo Deputado Luís Eduardo Magalhães (SBSV), Salvador, BA, as 21h10min (UTC) com 4 tripulantes e 58 passageiros a bordo. Por volta de 33 minutos após a decolagem, por volta das 21h43min (UTC) já nivelada no FL160 a aeronave adentrou uma região de acúmulo de gelo, com o sistema de *anti-icing* ativado e o sistema de *de-ice* desativado. Em seguida, houve uma degradação do desempenho da aeronave levando a redução da velocidade indicada (IAS) de 202kt para 192kt. A tripulação escutou um ruído similar a um *stall* de compressor, seguido de forte vibração. Na sequência a aeronave atingiu 180kt, sendo os manetes de potência reduzidas para 20% de torque, o que resultou em uma redução da IAS para 148kt, o piloto automático foi desacoplado pelo comandante e a causa da vibração não foi identificada pela tripulação (CENIPA, 2013a; Flight Safety Foundation, 2023).

Já sobre o segundo evento, da aeronave PP-AJV, ela realizaria o voo do Aeródromo de Maringá (SBMG), para o Aeródromo de Congonhas (SBSP), com decolagem prevista por volta das 21h37min (UTC), com um piloto e quatro passageiros a bordo para um voo de transporte. O plano de voo foi preenchido por telefone pelo próprio piloto, definindo um plano para um voo IFR no FL210. O voo ocorreria no período noturno e prevaleciam em rota condições meteorológicas de voo por instrumentos (IMC). Cerca de 35 minutos após a decolagem, logo após o nivelamento da aeronave, houve a perda do contato radar com os órgãos de controle de tráfego aéreo. A aeronave foi encontrada em área rural, no dia seguinte, totalmente destruída e sem sobreviventes (CENIPA, 2013b; Branco, 2022).

Em ambos os casos as aeronaves eram bimotoras, como motores turbo hélices. Ambas as aeronaves eram certificadas para operação em região de formação de gelo, possuíam sistemas de proteção contra a formação de gelo e realizavam voos sob regras de voo por instrumentos no período noturno. A primeira se tratava de um voo regular de uma empresa de linha aérea, em uma empresa aérea onde os pilotos possuíam treinamentos recorrentes e cursos oferecidos pela empresa, sobre o voo em condições de formação de gelo; o que deveria resultar em um alto nível de padronização e conhecimento acerca da aeronave e operação aérea. A segunda ocorrência se tratava de um voo da aviação executiva em uma operação caracterizada por permitir a operação com apenas um piloto (o qual estava com sua habilitação IFR vencida).

Deste evento, a análise do relatório final trouxe uma baixa preocupação do piloto em manter um nível de padronização adequado, tampouco seguir o que era apresentado para ele nos manuais da aeronave (comprovável pela baixa adesão ao uso do checklist da aeronave). Verificou-se que o modo como o piloto em comando operou a aeronave naquelas condições meteorológicas, e como lidou com a operação de um modo geral foi considerado pela comissão de investigação um fator contribuinte para o resultado acidente.

Em ambos os casos as operações aéreas ocorriam em regiões com intensa formação meteorológica e isotermas entre 0°C e -10°C, faixa de temperatura favorável para a formação de gelo severo em voo. Com relação ao evento do PP-PTU, a aeronave operava em uma região com influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, com presença de TCUs e Altostratus; enquanto no segundo evento (PP-AJV), a aeronave experimentava a passagem de uma frente fria com formações em multicamadas, nuvens do tipo cumulus e trovoadas ativas. Em ambos os cenários a formação de gelo era propícia a ocorrer e de fato ocorreu, afetando ambas as aeronaves de forma evidente. É possível afirmar que quando se espera voar em uma região de formação de gelo as chances desta formação de gelo ocorrer são grandes e os pilotos devem estar preparados para lidar com esta situação.

Com relação a fase crítica de cada ocorrência, observou-se que a fase do voo em cruzeiro foi determinante em ambos os casos. Esta fase possui características de que a formação de gelo ocorra com maior facilidade, tendo como características: pouca mudança aerodinâmica na aeronave, pois a aeronave se encontrava mais estável em voo de cruzeiro; e pouca variação de velocidade, tornando-a facilmente um grande núcleo de congelamento. Em ambos os casos, o acúmulo de gelo não detectado e/ou não tratado foi o responsável pela degradação da performance das aeronaves e posteriormente a perda de controle em voo. Este resultado reforça a relação entre as situações de formação de gelo em aeronaves e a situação de *LOC-I*.

Evidencia-se então, que nos dois acidentes, a formação de gelo apresentou características que poderiam ser percebidas de maneira prévia na operação, através dos seguintes elementos: a diminuição da performance de ambas as aeronaves, a diminuição da IAS, a formação de gelo visualmente observada pelos pilotos em voo, e posteriormente, a diminuição das respostas dos comandos aplicados por ambas as tripulações. Tais indícios presentes corroboram a ideia de que o gelo pode acometer diversas regiões da aeronave, afetando a operação aérea de diversas formas; e com sua identificação precoce pelo operador, é possível tomar ações para mitigar o perigo.

Em ambos os casos houve falhas humanas significativas, reforçando a falta de familiaridade de alguns pilotos com situações de formação de gelo e falhas nos treinamentos destas tripulações. Na análise do incidente grave da aeronave PP-PTU, a tripulação reconheceu a formação de gelo, porém, não tomaram ações corretivas perante a situação (como por exemplo, manter o sistema de *de-ice* desligado a todo momento). A ausência do *Red Bug* (que deveria ser ajustada manualmente), pode ter sido um fator determinante para a diminuição da consciência situacional do comandante com relação a sua velocidade mínima segura para operação em região de formação de gelo.

Na análise do acidente da aeronave PP-AJV também foi possível observar uma consciência situacional diminuída por parte do comandante com relação a operação em área de formação de gelo, ignorando por diversas vezes avisos da passageira sobre a formação de gelo no exterior da aeronave. O sistema de *de-ice* da aeronave não foi acionado, e a utilização do piloto automático em ambas as situações de voo em formação de gelo sem a devida resposta ativa da tripulação, foi um fator que favoreceu a perda de controle da aeronave.

Apesar de ambas as aeronaves possuírem sistemas de proteção contra a formação de gelo, e serem homologadas para este tipo de operação, em nenhum dos dois eventos as tripulações realizaram o uso devido dos sistemas da aeronave para mitigar a formação de gelo. Identificou-se em ambos os casos, que os pilotos estavam pouco familiarizados com a formação de gelo em voo, suas causas e resultados, não agindo adequadamente quando encontraram esta situação crítica. A ausência ou falha na utilização dos sistemas de proteção contra o gelo corroboraram para que a situação de *LOC-I* ocorresse, pois com a demora nas ações para mitigar a formação de gelo na aeronave, houve o surgimento de um ambiente propício para que o gelo apenas continue a se formar, afetando ainda mais a aeronave.

A perda da consciência situacional pelas tripulações, atuação inadequada frente a situações de performance degradada da aeronave, situações de *stall* e sua recuperação e a fase de cruzeiro como sendo o ponto crítico para a operação aérea no que diz respeito a operação em regiões de formação de gelo; dizem muito sobre como ambas as tripulações foram pegas de surpresa com relação aos resultados da formação de gelo em suas aeronaves. Ambas as tripulações puderam observar que estavam voando em região de formação de gelo e que possivelmente teriam que combater esta condição em voo, porém, mesmo após a observação da formação de gelo, ambas as tripulações subestimaram os resultados desta formação de gelo, gerando assim uma baixa consciência situacional perante esta situação meteorológica adversa.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou compreender e analisar os eventos de *LOC-I* provocados pela formação de gelo em voo, a partir dos relatórios de ocorrências aeronáuticas emitidos pelo CENIPA. Foi possível evidenciar, a partir das análises feitas, que mesmo com o avanço tecnológico nos sistemas de proteção contra a formação de gelo; falhas na sua operação, na percepção e consciência situacional da tripulação e na execução de procedimentos adequados para combater a formação de gelo ainda ocorrem; sendo fatores críticos que afetam a segurança de voo e contribuem para que ocorrências como as analisadas continuem gerando ocorrências graves resultantes da formação de gelo em voo.

Este estudo identificou que a falta de treinamento específico, o descumprimento de normas e procedimentos, a baixa consciência situacional e a não utilização dos sistemas embarcados na aeronave; trouxeram ameaças adicionais nas operações aéreas que são afetadas pela formação de gelo em voo e como estas situações contribuíram para que o resultado destas ocorrências fossem a perda de controle em voo. Além disso, este estudo evidenciou a importância de uma cultura organizacional voltada a segurança onde seja priorizado o treinamento dos pilotos para que seja possível combater esta situação adversa em voo.

Assim, conclui-se que o combate de situações como a formação de gelo em voo não deve se limitar apenas ao aprimoramento dos sistemas embarcados nas aeronaves, mas deve incluir o fortalecimento técnico dos pilotos, dando ênfase na formação dos tripulantes por meio de treinamentos que fortaleçam a tomada de decisão destes tripulantes e o reconhecimento de situações adversas como a formação de gelo em voo. Após as análises feitas foi possível se evidenciar que mesmo com sistemas aprimorados de proteção, não é possível substituir o papel essencial de uma tripulação na aplicação correta de procedimentos e na tomada de decisão.

Estudos futuros poderiam se aprofundar e apresentar diferentes meios de treinamentos para mitigar os resultados da formação de gelo em voo, ou ainda investigar quantitativamente a incidência de ocorrências que tiveram a formação de gelo como algo presente na aviação brasileira ao longo das décadas (não somente nos eventos já acontecidos, relatados pelos relatórios de investigação). Estes desdobramentos podem contribuir para que políticas mais eficazes sejam implementadas para a prevenção de situações de *LOC-I* como resultado da formação de gelo em voo.

REFERÊNCIAS

- ATR. (2011). *Cold weather operations: be prepared for icing*. ATR Customer Services. p. 9-11. Acesso em: 25 maio 2025. Disponível em: <https://www.theairlinepilots.com/forumarchive/atr/atr-cold-weather-operations.pdf>.
- AOPA. (2004). *Aircraft Owners and Pilots Association. Aircraft Deicing and Anti-icing Equipment*. Acesso em: 08 jul 2025. Disponível em: <https://www.aopa.org/-/media/files/aopa/home/pilot%20resources/asi/safety%20advisors/sa22.pdf>
- Branco, A. (2022). *Gelo em voo no Brasil | Acidente com King Air C-90 PP-AJV*. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TL3lipeKLWo>.
- BOEING. (2025). *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents - Worldwide Operations / 1959-2023*. Acesso em: 08 jul. 2025. Disponível em: https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf
- Carrière, J. M.; Lainard, C.; Le Bot, C.; Robart, F. (2000). *A climatological study of surface freezing precipitation in Europe*. *Meteorological Applications*. Toulouse, v. 7, n. 7, p. 229-238. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/meteorological-applications/article/abs/climatological-study-of-surface-freezing-precipitation-in-europe/71856EDC7E78FFEE715AF8C57A6DD600>. doi: <https://doi.org/10.1017/S1350482700001560>.
- CENIPA. (2013a). *Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Relatório Final IG-136/CENIPA/2013*. Acesso em: 30 out. 2024. Disponível em: https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/PP-PTU_26_07_2013_IG_Port..pdf.
- CENIPA. (2013b). *Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Relatório final A-025/CENIPA/2013*. Acesso em: 4 nov. 2024. Disponível em: https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/RF_A-025CENIPA2013_PP-AJV.pdf.
- CENIPA. (2017). *Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Norma do Comando da Aeronáutica. Brasília: Protocolos De Investigação De Ocorrências Aeronáuticas Da Aviação Civil Conduzidas Pelo Estado Brasileiro (NSCA 3-13)*. Ministério da Defesa do Brasil. Acesso em: 26 maio 2025. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/cenipa/index.php/legislacao/seguranca-de-voo?download=112:nsca3-13>.
- Cober, S. G (1996). *An example of supercooled drizzle drops formed through a collision-coalescence process*. *Journal of Applied Meteorology*, Ontario, v. 35, n. 1, p. 2250-2260. Acesso em: 13 out. 2024. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/35/12/1520-0450_1996_035_2250_aeosdd_2.0.co_2.xml.
- Cober, S. G.; Isaac, G. A.; Strapp, J. W. (2001). *Characterizations of aircraft icing environments that include supercooled large drops*. *Journal of Applied Meteorology*. Downsview, v. 40, n. 1, p. 1-6. Acesso em: 7 out. 2024. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/40/11/1520-0450_2001_040_1984_coaiet_2.0.co_2.xml.

Da Silva, G.; Silveira, O.; Zerbini, E. (2003). *Airfoil anti-ice system modeling and simulation*. In: *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 41. Reno. Anais [...]. Reno: AIAA. Acesso em: 9 nov. 2024. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2003-734>.

Flight Safety Foundation. (2023). *Incident report: Wikibase 317462*. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://asn.flightsafety.org/wikibase/317462>.

Gerhardt, T. E.; Silveira, D. T. (2009). *Métodos de pesquisa*. Porto Alegre: UFRGS. p. 120. Acesso em: 15 abril 2025. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>.

Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <https://ayanrafael.com/wp-content/uploads/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9nicas-de-pesquisa-social.pdf>.

Given, L. M. (2008). *The sage encyclopedia of qualitative research methods*. Thousand Oaks, CA: Sage.

Godoy, A. S. (1995). *Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais*. RAE - Revista de Administracao de Empresas, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 20–29. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rae/article/view/38200>.

González, S. F. (2017). *Analysis and numerical simulation of an aircraft icing episode near Adolfo Suárez Madrid-Barajas International Airport*. Madrid: Universidade Complutense de Madrid. Artigo de graduação. Acesso em: 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809517307676>.

IATA (2015). *International Air Transport Association. Loss of control in-flight accident analysis report 2010-2014*. Montreal-Geneva: IATA. v. 1, n. 1, p. 1-42. Acesso em: 21 out. 2024. Disponível em: <https://flightsafety.org/wp-content/uploads/2017/07/IATA-LOC-I-1st-Ed-2015.pdf>.

Lambregts, A. A.; Nesemeier, G.; Newman, R.; Wilborn, J. (2008). *Airplane upsets: old problem, new issues*. In: *Aiaa Modeling And Simulation Technologies Conference And Exhibit, Honolulu*. Anais [...]. Honolulu: AIAA, 2008. Acesso em: 13 out. 2024. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2008-6867>.

Lewis, W. (1951). *Meteorological aspects of aircraft icing*. In: *Compendium of Meteorology*. Washington: American Meteorological Society. E-book. Acesso em: 14 out. 2024. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=YlqmDAAQBAJ>.

Lynch, F. T.; Khodadoust, A. (2002). *Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics*. Yorba Linda, California, v. 37, n. 7, p. 5-24. Acesso em: 7 out. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042101000185>.

Morcrette, C. (2019). *Development and evaluation of in-flight icing index forecast for aviation*. *Weather and Forecasting*. Exeter, United Kingdom, v. 34, n. 3, p. 731–750. Acesso em: 28 ago. 2024. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/34/3/waf-d-18-0177_1.xml. 2024. doi: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0177.1>.

Oliveira, M. C. (2006). *Metodologias de pesquisa adotadas nos estudos sobre Balanced Scorecard*. XIII Congresso Brasileiro de Custos, [s. l.]. Acesso em: 09 jul. 2025. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/download/1701/1701>.

Politovich, M. K. (2015). *Aircraft icing*. In: *Encyclopedia of Atmospheric Science*. 2. ed. Boulder: Academic Press. E-book. Acesso em: 7 nov. 2024. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=8lpzAwAAQBAJ>.

Sánchez, J. L. (2014). *Weather features associated with aircraft icing conditions: a case study*. The Scientific World Journal, León, v. 2014, n. 1, p. 1-18. Acesso em: 28 ago. 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2014/279063>.

Silva, R. M. (2018). Estudos Qualitativos: enfoques teóricos e técnicas de coleta de informações. [S. l.]: Sobral.

Vukits, T. (2002). *Overview and risk assessment of icing for transport category aircraft and components*. In: AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 40., Reno. Anais [...]. Greenville: AIAA. p. 3-4. Acesso em: 14 out. 2024. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2002-811>.

Wu, Z. (2018). *Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety*. Beijing: Faculdade de Ciências Aeronáuticas e Engenharia. Artigo de graduação. Acesso em: 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963817317601>.

Xue, X.; Qiang, G.; Feng, Y.; Luo, T. (2022). *Experimental study on the adhesion strength of the frozen ice for aircraft moving parts*. Xian: Universidade Politécnica do Noroeste. Artigo de graduação. Acesso em: 4 set. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/9/10/589>.

AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA EM RÁDIO
ALTÍMETROS DE AERONAVES
OCASIONADA PELA EMISSÃO DE
ONDAS POR ANTENAS DE TELEFONIA

Jorge Augusto Pereira Rodrigues
Lucas Alves Moreira
Emanuelle Lorraine de Freitas Ferreira dos Santos

RESUMO

O avanço tecnológico traz diversos benefícios, como é o caso da comunicação móvel de quinta geração, 5G, pois tal tecnologia permite maior fluxo de dados com maiores velocidades de transmissão propiciando, portanto, para seus usuários, maior conforto e inúmeras possibilidades com uso de inteligência artificial. Em contrapartida, os sistemas 5G mostraram-se como uma fonte de interferências eletromagnéticas, devido às faixas de frequências reservadas às suas operações, em sistemas aeronáuticos, principalmente, em rádio altímetros e, de forma direta e indireta, aos sistemas aviônicos correlatos que tenham dependência dos rádio altímetros. O rádio altímetro, por ser um equipamento essencial durante o voo por instrumentos das aeronaves, possibilitando medição de suas alturas em relação ao solo, faz com que suas informações tenham necessariamente altos níveis de confiabilidade e precisão. Com isso qualquer anomalia que possa gerar perda em sua confiabilidade é considerada grave e com alto potencial de risco, podendo causar acidentes de grandes proporções. Devido à sua grande importância, os órgãos responsáveis pela aviação, visando garantir a segurança de procedimentos de voo, emitiram diretivas de aeronavegabilidade buscando identificar possíveis efeitos causados pela nova tecnologia 5G. Estudar e compreender a extensão dos impactos ligados a tal interferência é muito importante para a formulação de novos procedimentos que possam mitigar os efeitos das interferências, bem como adaptar equipamentos que possam ser capazes, de identificar essa anomalia, evitando-as e ou corrigindo-as, proporcionando aos pilotos, empresas, tripulantes maior segurança durante operações de pousos e decolagens por instrumentos, diminuindo os riscos. É exposto neste artigo a análise por meio de ensaio em laboratório, da atenuação do sinal de onda eletromagnética proveniente de um enlace entre antenas.

Palavras-chave: Aeronavegabilidade, Confiabilidade, Interferência, altímetro, Segurança.

1 INTRODUÇÃO

Os rádios altímetros devem atuar com o maior nível de precisão possível principalmente nas regiões onde se localizam os aeroportos, pois são nesses locais que acontecem os pousos e decolagens. (DEKKER; VAN HEIJSTER; VAN SAMBEEK, 2021).

O rádio altímetro emite uma onda eletromagnética de alta frequência modulada, através das antenas de transmissão localizadas no intradorso da fuselagem da aeronave, medindo-se o intervalo de tempo necessário para que esta onda se reflita parcialmente no solo e retorne para as antenas receptoras também instaladas na aeronave efetuando-se a conversão desse tempo decorrido, em altura. As faixas de frequências da onda emitida nas operações dos rádio altímetros são dependentes de regulamentos, tal como da finalidade para uso, restrições e viabilidade técnica (NEBYLOV; YANOVSKY, 2012).

A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) juntamente com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), regulamentam o uso da faixa de frequências entre 4200-4400 MHz para garantir a proteção dos serviços de rádio navegação aérea. O uso da faixa em torno de 4 GHz é monitorado por ambos os órgãos para se avaliar eventuais medidas de supressão de interferências (BRASIL, 2022).

Estudos têm sido realizados para avaliação da gravidade da interferência da tecnologia 5G em rádio altímetros que são dispositivos que calculam a altura das aeronaves em relação ao solo, sendo esse um sistema importante na operação de aeronaves. O governo dos Estados Unidos da América (EUA) decidiu usar as redes 5G comerciais dentro da faixa de operação de 3700 a 3980 MHz, próximas às utilizadas pelos rádios altímetros de aeronaves. Essa situação tem causado preocupação no setor de aviação civil, dadas às características das redes de quinta geração (BRASIL, 2022).

Para evitar a interferência eletromagnética no funcionamento dos rádios altímetros foram emitidas diversas *Notice To Airman* (NOTAM) por órgãos internacionais, principalmente os norte-americanos, como a *Air Line Pilots Association* (ALPA) e foram desenvolvidas ações para adiar o início da operação da banda 5G próxima a estes espaços aéreos. Além disso, alertas de segurança foram emitidos para informar aos fabricantes, companhias aéreas e órgãos responsáveis pela segurança na aviação sobre quais sistemas das aeronaves poderiam ser afetados pela interferência 5G (ALPA, 2022).

Essa maior restrição no espaço aéreo norte americano deve-se ao fato de que em outras grandes cidades do mundo a faixa de operação da tecnologia 5G é bem distinta da faixa de operação utilizada pelos rádios altímetros neste país o que proporciona uma maior margem de segurança (ALPA, 2022).

A utilização da tecnologia 5G gerou controvérsias dentro da *International Civil Aviation Organization* (ICAO), que atualmente recomenda uma separação espectral mínima de 200 MHz para as telecomunicações móveis, *International Mobile Telecommunications* (IMT), para proteger os rádios altímetros que operam na faixa de 4200 a 4400 MHz de eventuais interferências. Deve-se notar que a decisão dos Estados Unidos de usar a faixa de 3,9 GHz é diferente da decisão proposta pelo 5G do Brasil, que se encontra na faixa de 3,5 GHz (3300 a 3700 MHz) (BRASIL, 2022).

Conforme a *Federal Aviation Administration* (FAA), além da imprecisão na informação da altura da aeronave, outros sistemas embarcados que utilizam dados do rádio altímetro e, portanto, informações imprecisas ou errôneas podem comprometer a segurança do voo, sobretudo durante o pouso e a decolagem, fases do voo consideradas mais críticas frente à falhas dos rádio altímetros (FAA, 2021), conforme transcrição abaixo:

Como exemplos de sistemas afetados por essa interferência podem citar: o *Enhanced Ground Proximity Warning Systems* (EGPWS); *Traffic Alert and Collision Avoidance Systems* (TCAS); *Terrain Awareness Warning Systems* (TAWS); *Envelope Protection Systems*; *Altitude safety call outs/alerts*; *Autothrottle*; *Thrust reversers*; *Flight Director*; *Primary Flight Display of height above Ground*; *Take-off guidance systems*; *Flight Control*; *Tail strike prevention systems*; *Windshear detection systems*; *Alert/warning or alert/warning inhibit*; *Stick pusher / stick shaker*; *Engine and wing anti-ice systems*; *Automatic Flight Guidance and Control Systems* (AFGCS). (FAA, 2021, p.2).

O objetivo geral deste trabalho é estudar e identificar a interferência eletromagnética da tecnologia 5G, proveniente da emissão de ondas por antenas de telefonia, em sistemas aviônicos transceptores, sobretudo em rádio altímetros de aeronaves, bem como explicitar riscos potenciais capazes de regredir o nível de segurança dos voos e afetar a aeronavegabilidade.

Com relação ao problema de interferência da tecnologia 5G é necessário evidenciar que não é possível uma solução simples como, por exemplo, mudar a faixa de frequência dos altímetros das aeronaves, visto que, o instrumento já consolidado e em operação, fornece alta precisão para garantir o fornecimento à tripulação de uma informação confiável e segura sobre a altura da aeronave. Ruídos provocados por interferências advindas de ondas eletromagnéticas com frequências similares, bem como operação do rádio altímetro em faixa de frequência diferente para a qual foi projetado, acarretam em informações imprecisas e até mesmo erradas sobre os parâmetros de altitude da aeronave (FAA, 2021).

Dessa forma, para garantir que o setor da aviação mantenha a alta confiabilidade para os usuários e toda a área aeronáutica é fundamental identificar os efeitos dessa interferência, bem como propor soluções eficientes para que essa temática não interfira no bom andamento da atividade aérea.

Face ao exposto, o artigo é justificado pela necessidade de se entender as possíveis falhas ocasionadas por interferências eletromagnéticas em sistemas aviônicos com foco no rádio altímetro, além de elucidar os fatores importantes que deveriam ser avaliados para permitir maior segurança em aeroportos com infraestrutura de sistemas de telefonia 5G, com base nas declarações dos órgãos competentes acerca do assunto.

A possível conexão com o problema em foco neste trabalho, que é a interferência de sinais de 5G com a antena receptora do rádio altímetro de aeronaves e o método de análise por meio de ensaio em laboratório, é a possibilidade de tornar as antenas receptoras das aeronaves menos “sensíveis” às ondas eletromagnéticas provenientes de antenas 5G próximas às cabeceiras dos aeroportos, atenuando as ondas que cheguem a estas antenas em direções não alinhadas com o solo próximo, na vertical da aeronave, que é a direção de interesse do rádio altímetro.

A proposta compreende em apresentar-se após a introdução, a seção 2, relacionada ao referencial teórico, contribuindo neste com a temática da tecnologia 5G e sobre a interferência eletromagnética em sistemas aviônicos com foco nos rádio altímetros. Na seção 3, é exposta a metodologia aplicada para validar o referencial teórico, juntamente com os resultados de ensaios eletromagnéticos para comprovação e eficiência das blindagens de ondas. Já na seção 4, aborda-se os resultados obtidos por meio do ensaio em laboratório. Em seguida, na seção 5, obtém a conclusão deste artigo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O avanço da tecnologia 5G permite o aprimoramento do sinal digital, bem como o célere avanço dos processos industriais, entre outras facilidades para toda a sociedade, pois proporcionará a capacidade de uma quantidade muito maior de dispositivos conectados ao mesmo tempo em uma grande rede, por causa da maior capacidade de banda, por isso, além de telefones móveis, a tecnologia 5G pretende abranger outros variados tipos de dispositivos, além da comunicação entre máquinas (GUPTA; JHA, 2015).

Ademais, por conta da alta velocidade de conexão oferecida através da tecnologia 5G, será possível interligar e conectar serviços de alta complexidade, inclusive da área de saúde, com muito mais confiabilidade, bem como melhor qualidade dos dados compartilhados na rede (HUANG *et al.*, 2017).

A tecnologia 5G caracteriza-se por utilizar, além de frequências mais baixas (acima de 1 GHz) ondas milimétricas de altas frequências, entre 30 GHz e 300 GHz, sendo assim possui uma maior banda e consequentemente maior capacidade de envio de informação através da rede sem fio. Contudo, essa alta frequência é mais suscetível ao enfretamento de obstáculos devido seu alcance, por tal motivo, o princípio de funcionamento dessa tecnologia prevê a utilização de um elevado número de células, que na verdade são transceptores, para possibilitar a expansão de sua área de alcance. Dentre esses locais de instalações de antenas 5G estão evidentemente os aeroportos (RUSSELL, 2018).

De acordo com Strohmeier *et al.* (2016), na área aeronáutica a tecnologia 5G, poderá ser aplicada nas mais variadas formas, como na integração da comunicação entre fabricantes, companhias aéreas e pilotos, com isso será possível avaliar e encontrar soluções mais ágeis para problemas relacionados a projeto, manutenção e operação das aeronaves. Esses problemas poderão ser inclusive solucionados em tempo real de forma remota com maior qualidade e precisão em relação aos serviços realizados atualmente. Outro importante segmento da aviação que será beneficiado é o controle do tráfego aéreo, com uma estrutura de transmissão e recepção de dados de forma mais efetiva e confiável.

Os sistemas de rádio navegação são utilizados em aeronaves para determinar a sua posição por meio de auxílios de rádio. Em meados de 1920 o exército americano iniciou uma pesquisa chamada Voo Cego que tinha o intuito de criar formas para que um voo em ambientes de baixa visibilidade pudesse ser feito, uma vez que na época só era realizado em condições diurnas e com o céu limpo (CARVALHO, 2015).

A pesquisa definiu três instrumentos necessários para a realização segura de voos: um instrumento altímetro, que permitisse evitar montanhas e elevações, um instrumento de referência para o horizonte natural, um instrumento de navegação que orientasse o piloto para o destino sem a necessidade de referência visual externa. Definiu-se que a melhor alternativa seria a utilização do rádio. O Rádio Farol Não Direcional - *Non Directional Beacon* (NDB) foi o primeiro equipamento utilizado para navegação aérea por rádio. O seu funcionamento se baseia na emissão de uma onda portadora não modulada em *Low Frequency* (LF) e *Medium Frequency* (MF) em todas as direções. A antena direcional da aeronave capta esse sinal e permite que o piloto siga a direção até a antena transmissora (CARVALHO, 2015).

As antenas receptoras *Loop* e *Sense*, embarcadas na aeronave, captam e disponibilizam dois sinais para o receptor. O sinal *Loop* fornece dois pontos opostos como possíveis localizações da estação transmissora no solo, NDB, por sua vez, o *Sense* seleciona a posição correta da estação. O *Automatic*

Direction Finder (ADF), instalado na aeronave, localiza a posição da estação em relação à proa da aeronave (CARVALHO, 2015).

O rádio altímetro é um sistema que opera na faixa de frequência de 4,2 GHz a 4,4 GHz. A onda eletromagnética é direcionada através de antena transmissora em direção ao solo, conforme demonstrada na Figura 1, obtendo maior precisão para baixas altitudes, ou seja, até 2500 pés. Os instrumentos que informam à tripulação a altura da aeronave podem ser do tipo dedicado como apresentado na Figura 2 (a), ou em um display eletrônico, conforme Figura 2 (b). (TOOLEY; WYATT, 2018).

Figura 1: Funcionamento de um Rádio Altimetro. Fonte: Tooley e Wyatt (2018)

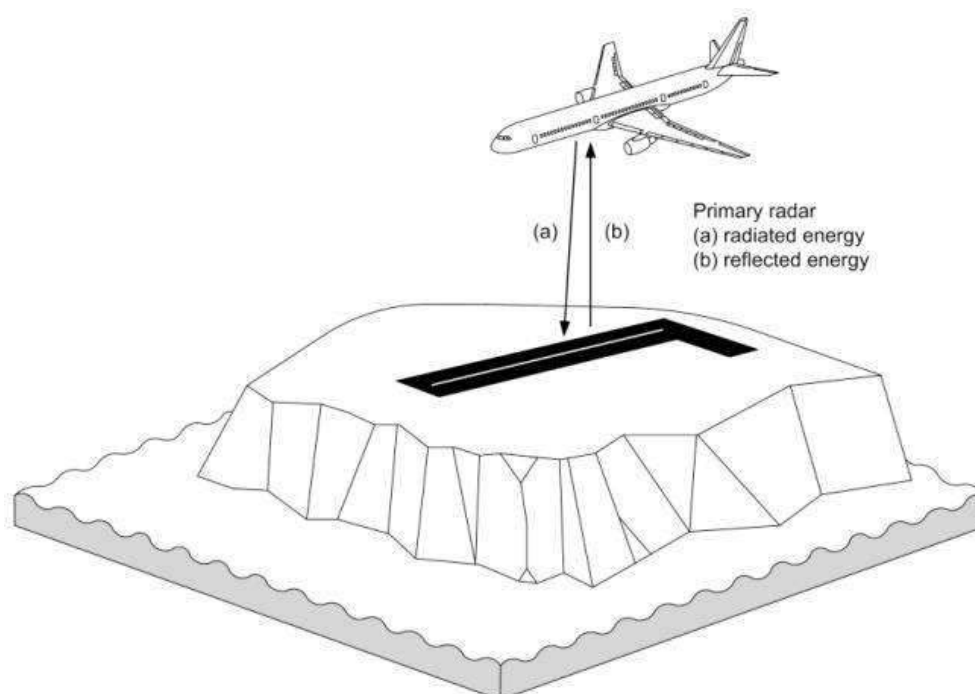
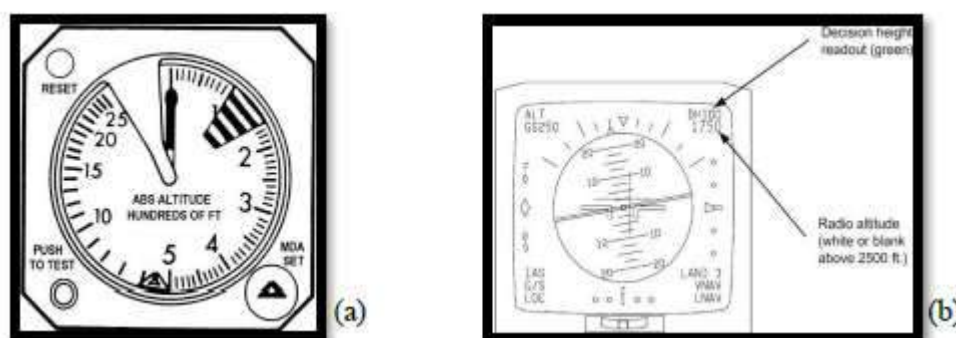


Figura 2: (a) Rádio Altimetro dedicado (b) Display eletrônico com Rádio Altimetro. Fonte: Tooley e Wyatt (2018)



Com a expansão recente das redes de telecomunicações sem fio públicas, alguns países autorizaram as operadoras a explorar a oferta de sistemas 5G, utilizando faixas de frequências próximas às

utilizadas pelos sistemas rádio altímetros de aeronaves. Esta proximidade de frequência pode acarretar em interferências entre estes sistemas degradando ou tornando inseguras as operações de aproximações para pouso em algumas cabeceiras próximas às antenas 5G.

Em rádio comunicação chama-se de interferência à contaminação de um sinal portador de informação, por outro sinal estranho, denominado ruído, que tenha frequência semelhante. Nessa situação, ao invés de receber um sinal puro contendo apenas informações úteis o receptor recebe um sinal contaminado, com informações não confiáveis (HIGUTI; KITANO, 2022).

Interferências eletromagnéticas que causem perturbação, alteração de desempenho, erro de interpretação, perda de informação, degradação e até a interrupção de um serviço de radiocomunicações, que opere de acordo com o regulamento *Radio Technical Commission for Aeronautics* (RTCA) são consideradas como fatores de riscos potenciais (DECEA, 2021).

Atualmente é preocupante para a indústria da aviação que a frequência do serviço de sinal 5G dos Estados Unidos esteja muito próximo do espectro usado pelos rádios altímetros. A precaução do FAA com a interferência fez com que, a entidade emitisse a diretriz que proíbe os pilotos de utilizarem o equipamento em certas localidades para operações de pouso que possam ser afetadas pela interferência em aeroportos onde as condições de baixa visibilidade exijam voo por instrumento (FAA, 2021).

As companhias aéreas e os órgãos reguladores da aviação dos Estados Unidos alertaram que as antenas de sinais 5G perto dos aeroportos podem distorcer as leituras do rádio altímetro, que informam aos pilotos a distância da aeronave em relação ao solo, pois o serviço de telefonia móvel 5G lançado nos EUA, atua no espectro de ondas entre 3,7 e 3,98 GHz conhecido como banda C (FAA, 2021).

O rádio altímetro é mais preciso do que um altímetro barométrico e, por esse motivo, é usado onde a altitude da aeronave sobre o solo precisa ser medida com precisão durante o pouso automático ou outras operações de baixa altitude. O receptor no rádio altímetro é altamente preciso, mas pode fornecer resultados errôneos na presença de emissões de frequências próximas. Em geral os rádio altímetros da aviação comercial operam na banda de 4,2 - 4,4 GHz. Com a implementação dos novos sistemas de telecomunicação a proximidade entre as frequências, podem contaminar o sinal recebido pelo equipamento tornando o risco real (FAA, 2021).

O comportamento errôneo ou inesperado do altímetro de radar leva diretamente a uma perda de consciência situacional para a tripulação de voo. Essa perda de consciência situacional não apenas apresenta um impacto imediato na capacidade da tripulação de voo de manter a operação segura da aeronave por si só, mas também exige que a tripulação de voo tente compensar a falta de informações confiáveis sobre a altitude acima do solo. Usando outros sensores e dicas visuais, se disponíveis. Isso leva ainda a um risco de saturação de tarefas para a tripulação de voo, particularmente durante as operações ou fases de voo que exigem envolvimento contínuo da tripulação, como aproximação final e procedimentos de pouso (RTCA, 2020, p.15).

A FAA emitiu um boletim informativo com exigência para que os operadores de aeronaves regionais identificados como mais suscetíveis à interferência de sinais da banda C 5G, instalem filtros de radiofrequência até o final do ano de 2022 (FAA, 2021).

A implementação deste novo requisito de *retrofit* do filtro de radiofrequência ocorreu após meses de colaboração entre a FAA e a indústria da aviação, com o intuito de buscar uma solução de longo prazo para lidar com a suscetibilidade de alguns rádio altímetros à interferência de banda C 5G (FAA, 2021).

A *Federal Communications Commission* (FCC) emitiu um relatório que incentivou partes interessadas a estabelecer um grupo com o intuito de estudar e abordar os complexos problemas de coexistência na banda de frequência 3,7– 4,2 GHz. Esse relatório tem o intuito de permitir uma reação rápida da indústria de aviação e liderar a análise necessária para entender completamente o risco potencial de interferência prejudicial aos rádio altímetros (RTCA, 2020).

Em parceria com o FAA, o RTCA criou um grupo multissetorial conhecido como Força-Tarefa 5G. Esse grupo tem o intuito de desenvolver padrões atualizados de informações onde abrange o risco potencial e os impactos operacionais da interferência em rádio altímetro, que podem ser causados pelas operações de telecomunicações 5G perto da faixa de 4,2 a 4,4 GHz, formando a *Minimum Operational Performance Specification* (MOPS) compatível com banda adjacente dos rádio altímetros, sendo utilizada nas aprovações do equipamento pela FAA (FAA, 2021).

É fundamental que os pilotos estejam cientes e cumpram todas as restrições impostas via *Airworthiness Directive* (AD), *Aircraft Flight Manual* (AFM), as NOTAMs da FAA e da companhia aérea. As restrições do manual de voo quanto às diretivas de aeronavegabilidade juntas aos NOTAMs que informam sobre a presença do 5G ou restrições de procedimentos específicos devem ser avaliadas cuidadosamente (ALPA, 2022).

3 METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Micro-ondas. O objetivo foi comprovar a eficiência de blindagens eletromagnéticas entre duas antenas “*patch*” em linha de visada, utilizando uma barreira tipo tela metálica posicionada entre elas. A proposta está ligada à possibilidade de tornar as antenas receptoras das aeronaves menos “sensíveis” às ondas eletromagnéticas provenientes de antenas 5G próximas aos aeroportos.

Nos experimentos, os procedimentos e métodos utilizados buscaram medir a potência recebida pela antena receptora sem e com a colocação da tela metálica entre elas, inferindo-se assim o fator de atenuação obtido.

O arranjo experimental consistiu em duas antenas “*microstrip patch*” instaladas em gabarito de madeira, separadas por 50 cm e posicionadas a 6 cm da base, conforme a Figura 3. Uma das antenas foi conectada à porta de transmissão e a outra à porta de recepção de um analisador de redes *Agilent* modelo 8714ET (300 kHz – 3 GHz), conforme apresentado na Figura 4, com a frequência de operação centrada em 2,27 GHz.

Figura 3: Diagrama da montagem para ensaios. Fonte: Próprios autores 2022.



Figura 4: Analisador de Redes. Fonte: Próprios autores 2022.



O monitor de 17" foi utilizado como uma extensão do *display* para melhor visualização dos registros das medições realizadas e visualização dos espectros de ruído, de acordo com a Figura 5.

Figura 5: Display do analisador de redes. Fonte: Próprios autores 2022.

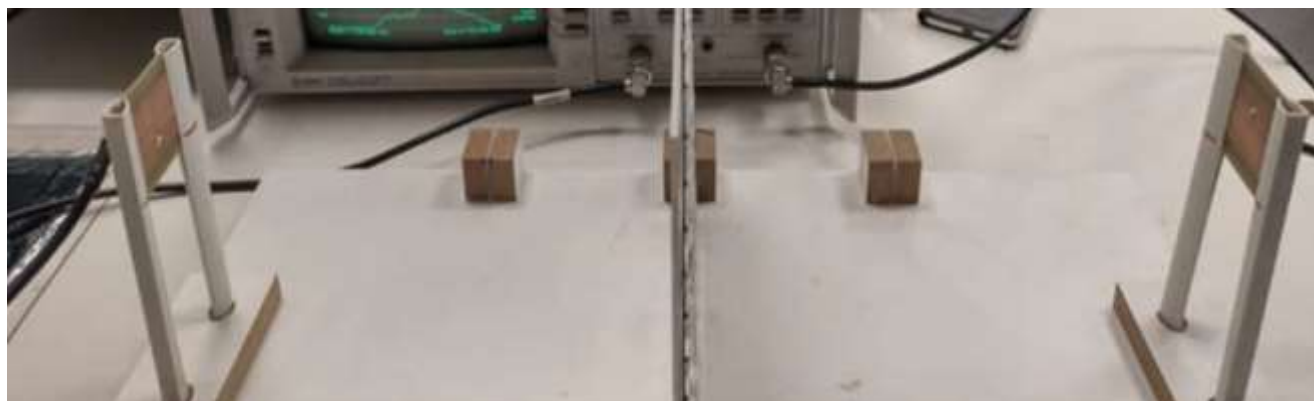


Nos ensaios foram utilizados quatro tipos de blindagens metálicas planares, com dimensões físicas de 40 cm de altura, 40 cm de largura, feitas de alumínio suportadas por placa de acrílico dielétrico, fornecendo à montagem resistência física. Durante os ensaios as placas de blindagem eram posicionadas a 25 cm das antenas. Os ensaios foram realizados com os seguintes arranjos:

Blindagem de alumínio em forma de grade (tela) com trama de 15 mm, blindagem de alumínio contendo apenas fios na horizontal, distantes 15 cm um do outro, blindagem de alumínio contendo

apenas fios na vertical distantes 15 cm um do outro, e a quarta blindagem é uma placa inteiriça. Na Figura 6 tem-se o gabarito de madeira com as duas antenas *patch* e o local ao centro onde foram posicionadas as blindagens.

Figura 6: Gabarito de Madeira com as duas antenas “*patch*”. Fonte: Próprios autores 2022.



No experimento também foram utilizados conectores especiais para interligação entre antenas e analisador de redes.

Inicialmente programou-se o analisador de redes para atuar na varredura dos sinais emitidos pelas antenas *patch* entre as frequências de 1,7 GHz até 2,7 GHz, visto que a antena utilizada no experimento transmite a 2,27 GHz. Logo em seguida selecionou-se no analisador de redes a saída denominada “*Meas 2*”, em seguida, com o auxílio do conector, realizou-se um *jump* no circuito eletrônico com o intuito de provocar um curto circuito e com isso normalizou-se a medida para criar um zero de referência fazendo com que os resultados tivessem uma alta confiabilidade pelo fato de que esse procedimento eliminou possíveis ruídos capazes de afetar os resultados emitidos pelo aparelho.

Logo após, tirou-se o *jump* e montou-se o enlace entre as duas antenas conectando o fio ligado à antena *patch* receptora na entrada denominada *in* do analisador e o fio ligado à antena transmissora na saída denominada *out*, em uma ligação em série.

Inicialmente anotou-se os valores de ruído provocados pela interferência das antenas na configuração de enlace livre, ou seja, sem nenhuma barreira e nem blindagem entre as duas antenas. Posteriormente, colocou-se no meio da placa de madeira a blindagem do tipo grade com malha de 15 mm e anotaram-se os resultados de interferência, ou seja, ruídos emitidos pelo enlace. De forma similar anotou-se os resultados obtidos para as blindagens do tipo grade somente com arame horizontal, e somente com arame vertical. Por fim, colocou-se a blindagem inteiriça.

4 RESULTADOS

A medição da perda em espaço livre resultou em uma atenuação de -24,520 dB, por sua vez, a medição com a blindagem do tipo grade com trama de 15 mm, obteve-se uma atenuação de -33,085 dB, indicando uma perda de aproximadamente 8 dB em relação ao espaço livre.

Na blindagem tipo grade com arames apenas na horizontal, a atenuação medida foi de -25,649 dB, ou seja, muito próxima à do espaço livre. Como o campo elétrico varia perpendicularmente ao plano de trabalho, esse resultado indica que essa configuração não atenua significativamente a onda.

Já na blindagem tipo grade com arames apenas na vertical, obteve-se uma atenuação de -30,590 dB, valor semelhante ao obtido com a trama de 15 mm. Isso comprova que, nesse tipo de enlace, a blindagem precisa atuar apenas na vertical, o que possibilita uma construção mais eficiente, com economia de material e tempo de montagem.

Por fim, a blindagem inteiriça, com trama tendendo a zero, apresentou uma atenuação de -42,083 dB resultado compatível com a expectativa, pois representa uma situação com densidade de arames verticais tendendo ao infinito, gerando assim a maior atenuação entre os métodos testados.

Na tabela 1 tem-se o resumo dos valores obtidos nos ensaios laboratoriais que comprovam a viabilidade das blindagens em trama metálica para campos eletromagnéticos de alta frequência.

Tabela 1: Valores de atenuação em dB obtidos com o experimento

Tipo de Blindagem	Valor obtido
Sem blindagem	-24,520 dB
Blindagem tipo grade com trama de 15 mm	-33,085 dB
Blindagem tipo grade com arame horizontal	-25,649 dB
Blindagem tipo grade com arame vertical	-30,590 dB
Blindagem inteiriça	-42,083 dB

Na tabela 2 consta os valores medidos pelo analisador de redes com a blindagem, efetuando o comparativo com o valor sem a blindagem.

Tabela 2: Comparação dos Valores de atenuação medidos

Tipo de Blindagem	Valores medidos		Diferença de Atenuação	%
	Com blindagem	Sem blindagem		
Blindagem tipo grade com 15mm de trama	-33,085 dB	-24,520 dB	8,565 dB	25,89
Blindagem tipo condutores horizontais distância 15 mm	-25,649 dB	-24,520 dB	1,129 dB	4,40
Blindagem tipo condutores verticais distância 15 mm	-30,590 dB	-24,520 dB	6,070 dB	19,84
Blindagem folha de alumínio continua	-42,083 dB	-24,520 dB	17,563 dB	41,73

5 CONCLUSÃO

Conforme descrito neste artigo, o sistema de rádio altímetro utilizados pelas aeronaves, opera na faixa de frequência entre 4,2 GHz a 4,4 GHz, sendo próximo do sinal de telecomunicações com tecnologia 5G.

A determinação dos níveis de frequência para operações dos sinais 5G é homologada pelo órgão que normatiza a telefonia no país, de acordo com a FAA, a faixa possível de operação nos EUA é de 3,7 GHz a 3,98 GHz, se aproximando do range de frequência utilizado pelos rádio altímetros, potencializando as possibilidades de interferências eletromagnéticas.

Uma possível solução para mitigar as interferências nas antenas receptoras nos rádio altímetros, proveniente das antenas transmissoras 5G no solo próximas a aeroportos, consistiria em incorporar blindagem eletromagnética para que radiações interferentes que atinjam a antena receptora da aeronave em direções inclinadas sejam atenuadas. Desta forma a operação processaria apenas a radiação refletida pelo solo através de visada direta na vertical.

Como parte prática para efeitos comparatórios, foram realizados ensaios e apresentados os resultados de testes em laboratório, que comprovaram o efeito de blindagem eletromagnética provida por obstáculos tipo grades metálicas, utilizando um set de provas que reproduziu um mini enlace operando em 2,27 GHz.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Airbus. (2016). Airbus SAS Global Market Forecast – Mapping Demand 2016-2035.

Air Line Pilots Association. (2022). Aircraft operations and radar altimeter interference from 5G (9 p.). ALPA.

Agência Nacional de Aviação Civil [ANAC]. (2022, maio 10). Anatel e ANAC acompanham convivência entre faixas futuras do 5G e radares aeronáuticos. <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2021/anatel-e-anac-acompanham-convivencia-entre-faixas-futuras-do-5g-e-radares-aeronauticos>

Carvalho, L. B. de. (2015). Introdução aos sistemas aviônicos de rádio navegação (Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá). Universidade Estadual Paulista. <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139078/000864923.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Departamento de Controle do Espaço Aéreo [DECEA]. (2021). ICA 102-11: Sistemas de radiomonitoragem (21 p.). DECEA.

Dekker, H., Van Heijster, R. M. E. M., & Van Sambeek, M. (2021). Technical feasibility study on coexistence of private IMT networks and satellite ground stations in the 3800-4200 MHz band and interference study on radar altimeters in the 4200-4400 MHz band.

Federal Aviation Administration [FAA]. (2021). AIR-21-18R1: Risk of potential adverse effects on radio altimeters (4 p.). FAA.

Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. IEEE Access, 3, 1206–1232. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7169508>

Higuti, R. T., & Kitano, C. (2022). Princípios de comunicações. Universidade Estadual Paulista. <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/optoeletronica/materias/principios-de-comunicacoes/>

Huang, J., Liu, C. X., Gao, Y., & Yang, Y. (2017). Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 35(7), 1591–1605. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2699399>

Nebylov, A., & Yanovsky, F. (2012). Aerospace sensors. Momentum Press.

Radio Technical Commission for Aeronautics [RTCA]. (2020). Assessment of C-Band mobile telecommunications interference impact on low range radar altimeter operations (RTCA paper no. 274-20/pmc-2073) (231 p.). RTCA.

Russell, C. (2018). 5G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. Environmental Research, 165, 484–495. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.016>

Tooley, M., & Wyatt, D. (2018). Aircraft communications and navigation systems (2ª ed., 346 p.). Routledge.

INTEGRAÇÃO ENTRE A CHECAGEM
ELETRÔNICA DE PRESCRIÇÕES E O
FATURAMENTO HOSPITALAR: UM
RELATO DE EXPERIÊNCIA EM
HOSPITAL PÚBLICO UNIVERSITÁRIO
NO RIO GRANDE DO SUL

JANAINA RIBEIRO DE ALMEIDA
Silvia Regina Gralha
Saulo Chaves De Aquino

Introdução: A informatização de processos hospitalares tem contribuído significativamente para a melhoria da gestão assistencial e administrativa nas instituições de saúde. A checagem eletrônica de prescrições é uma dessas inovações, permitindo o registro seguro da administração de medicamentos, materiais e procedimentos. Quando integrada ao sistema de faturamento, essa funcionalidade potencializa o controle financeiro, reduz erros e aumenta a eficiência institucional (RODRIGUES, 2000; BRASIL, 2018). Em hospitais públicos universitários, que lidam com diferentes fontes de financiamento, como SUS, convênios e pacientes particulares, integrar registros clínicos ao faturamento é essencial para garantir a sustentabilidade. Este relato descreve uma experiência vivenciada por um hospital universitário do Rio Grande do Sul que adotou essa integração há mais de uma década.

Objetivo: Relatar a experiência da integração da checagem eletrônica de itens da prescrição com o faturamento hospitalar em um hospital público e universitário, destacando os impactos assistenciais e administrativos dessa funcionalidade.

Relato de Experiência: O hospital em questão utiliza um sistema informatizado desenvolvido internamente, com módulos integrados para gestão clínica e financeira. A funcionalidade de integração entre a checagem de enfermagem e o faturamento foi implementada para otimizar a cobrança de itens utilizados durante o cuidado. O processo inicia-se com a prescrição eletrônica. Ao realizar a checagem de um item prescrito, o sistema identifica se há cobertura contratual por parte do convênio. Caso exista, o lançamento ocorre automaticamente na conta do plano; se não houver, o item é direcionado à conta particular. Para kits de cuidado, todos os componentes são lançados em conjunto. No caso de medicamentos de uso contínuo, apenas a primeira checagem é considerada para fins de cobrança, evitando lançamentos repetidos (ALMEIDA; NOVAES, 2017). A implantação exigiu a colaboração entre os setores de enfermagem, farmácia, faturamento e tecnologia da informação. Foram realizadas capacitações para padronização do uso da ferramenta e revisão das regras de negócios conforme os contratos com operadoras. A adaptação da interface do sistema também foi fundamental para garantir facilidade de uso no ambiente assistencial (REZENDE; ABREU, 2016). Após a implementação, observou-se maior agilidade no fechamento das contas, redução de glosas por inconformidades e melhoria na rastreabilidade do consumo de insumos. Os dados passaram a refletir com mais precisão os cuidados prestados, fortalecendo o controle de qualidade e a segurança do paciente (SILVA; CUNHA; GARCIA, 2021).

Considerações Finais: A integração entre checagem eletrônica e faturamento mostrou-se eficiente para qualificar os processos internos e otimizar a gestão hospitalar. A funcionalidade trouxe ganhos na acurácia dos lançamentos, contribuiu para a sustentabilidade financeira da instituição e fortaleceu o papel da tecnologia como aliada no cuidado. O sucesso dessa experiência reforça a importância da cooperação entre as áreas assistenciais e administrativas, bem como da personalização dos sistemas conforme as necessidades da instituição.

Contribuições e Implicações para a Prática: A checagem eletrônica integrada ao faturamento transforma o registro de enfermagem em um componente estratégico da gestão financeira hospitalar. Essa funcionalidade reforça a responsabilidade da equipe assistencial com os dados registrados e aproxima os setores clínico e administrativo. Para outras instituições públicas ou universitárias, a experiência aqui relatada pode servir de base para implantar soluções similares, respeitando as particularidades locais e fortalecendo a gestão baseada em informação qualificada.

APLICAÇÃO DA ELETROTOMOGRAFIA
CAPACITIVA NO MONITORAMENTO DA
GELIFICAÇÃO DE PARAFINA EM
TUBULAÇÕES DE PETRÓLEO

Felipe Matheus Korn Meneghini Martins

1. INTRODUÇÃO

O transporte de petróleo em condições operacionais severas, especialmente em ambientes de baixa temperatura, apresenta desafios significativos associados à presença de parafinas na composição do fluido. Durante o resfriamento, esses componentes podem cristalizar e formar estruturas sólidas capazes de modificar drasticamente o comportamento do escoamento, levando à gelificação parcial ou total do fluido no interior das tubulações. Esse fenômeno representa um dos principais fatores de risco para a operação segura e eficiente de sistemas de produção e transporte de petróleo, uma vez que pode resultar em aumento expressivo das perdas de carga, dificuldade de reinício do escoamento e, em casos extremos, bloqueio completo da linha.

A compreensão do processo de gelificação da parafina exige uma abordagem que considere simultaneamente aspectos termodinâmicos, estruturais e reológicos do fluido. No entanto, a observação direta da evolução interna do escoamento durante a gelificação é limitada por restrições operacionais e pela natureza opaca do sistema. Nesse contexto, técnicas de monitoramento não intrusivas têm se mostrado particularmente atrativas, pois permitem investigar o comportamento interno do fluido sem interferir no processo físico nem comprometer a integridade da tubulação.

A Eletrotomografia Capacitiva (ECT) insere-se nesse cenário como uma técnica de sensoriamento baseada na exploração de contrastes de permissividade dielétrica entre diferentes fases presentes no escoamento. Por meio da aplicação de campos elétricos alternados e da medição de capacitâncias entre eletrodos dispostos externamente ao duto, a ECT possibilita inferir, de forma indireta, a distribuição espacial das propriedades dielétricas no interior da tubulação. Essa característica torna a técnica especialmente adequada para o estudo de sistemas multifásicos e estruturalmente heterogêneos, como aqueles associados à gelificação de petróleos parafínicos.

Diferentemente de métodos intrusivos ou baseados em propriedades mecânicas locais, a ECT opera com campos elétricos distribuídos, cuja interação com o meio é governada pelas equações eletromagnéticas no regime quase-eletrostático. Como consequência, as informações obtidas refletem uma média ponderada das propriedades dielétricas ao longo do domínio sensoriado, o que impõe desafios matemáticos e computacionais relacionados à reconstrução tomográfica das imagens. A interpretação adequada dessas informações requer, portanto, uma integração cuidadosa entre fundamentos eletromagnéticos, projeto de sensores, instrumentação eletrônica e algoritmos de solução de problemas inversos.

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma sistemática e conceitual, a aplicação da Eletrotomografia Capacitiva ao monitoramento da gelificação da parafina em tubulações de petróleo. São discutidos os princípios físicos que fundamentam a técnica, o comportamento eletromagnético do sensor, a interação entre o campo elétrico e o escoamento parafínico, bem como os aspectos essenciais do circuito de aquisição de dados e dos algoritmos de reconstrução de imagem. A abordagem adotada privilegia uma análise teórica integrada, adequada ao contexto de um capítulo de livro, buscando fornecer ao leitor uma base sólida para a compreensão do potencial e das limitações da ECT nesse tipo de aplicação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Fenômeno da Gelificação da Parafina em Petróleos

Petróleos parafínicos contêm frações significativas de hidrocarbonetos de cadeia longa, predominantemente n-alcenos, que apresentam comportamento de cristalização quando submetidos a temperaturas inferiores a um determinado limiar térmico. Esse processo inicia-se com a nucleação de cristais de parafina dispersos na fase líquida, seguida pelo crescimento e pela aglomeração dessas estruturas cristalinas, culminando na formação de uma rede tridimensional contínua. Essa rede sólida é capaz de aprisionar frações líquidas e gasosas, resultando em um material com comportamento reológico viscoplástico, caracterizado pela existência de uma tensão limite de escoamento.

A gelificação altera profundamente as propriedades físicas do fluido, incluindo viscosidade aparente, densidade efetiva, condutividade térmica e propriedades dielétricas. Do ponto de vista operacional, esse fenômeno é crítico, pois pode levar à interrupção completa do escoamento em dutos e linhas de produção. O reinício do fluxo exige a aplicação de tensões superiores às observadas antes da parada, podendo causar falhas estruturais e aumento do risco operacional.

Além disso, a gelificação não ocorre de forma homogênea ao longo da seção transversal da tubulação. Gradientes térmicos, interação com as paredes do duto e efeitos gravitacionais fazem com que a cristalização se desenvolva de maneira espacialmente distribuída, formando regiões sólidas preferencialmente aderidas às paredes e zonas internas com aprisionamento de gás. Essa natureza multifásica e heterogênea torna indispensável o uso de técnicas capazes de fornecer informações espaciais em tempo real.

2.2 Propriedades Dielétricas de Sistemas Multifásicos

As propriedades dielétricas de um material descrevem sua resposta a um campo elétrico aplicado, sendo a permissividade elétrica o parâmetro central para técnicas de tomografia capacitativa. Em sistemas multifásicos, como o petróleo em processo de gelificação, a permissividade efetiva resulta da combinação das permissividades individuais de cada fase e de sua distribuição espacial.

O óleo líquido, a parafina solidificada e o gás apresentam permissividades significativamente distintas. Enquanto a fase líquida apresenta valores intermediários, a fase sólida tende a modificar a resposta dielétrica em função de sua estrutura cristalina, e a fase gasosa introduz regiões de baixíssima permissividade. A coexistência dessas fases gera contrastes dielétricos que alteram a distribuição das linhas de campo elétrico quando o sistema é submetido a um potencial alternado.

Esses contrastes constituem a base física para o sensoriamento capacitativo. Variações locais na permissividade modificam a capacitância medida entre pares de eletrodos, permitindo inferir a presença, a concentração relativa e a localização espacial das diferentes fases. Em processos transientes, como a gelificação, essas variações ocorrem de forma progressiva, possibilitando o acompanhamento contínuo da evolução estrutural do fluido.

2.3 Princípios do Sensoriamento Capacitivo

O sensoriamento capacitativo fundamenta-se no comportamento de um capacitor, no qual dois condutores separados por um meio dielétrico armazenam energia elétrica. A capacitância depende da geometria dos eletrodos e da permissividade do material interposto. Qualquer alteração nesse meio resulta em uma variação mensurável da capacitância.

Na Eletrotomografia Capacitiva, esse princípio é estendido para um conjunto de eletrodos distribuídos ao redor de uma tubulação. Cada par de eletrodos forma um capacitor virtual, cujas linhas de campo elétrico atravessam o interior do duto. Como o campo se propaga de maneira volumétrica, a capacitância medida reflete uma média ponderada da permissividade ao longo de todo o caminho das linhas de campo.

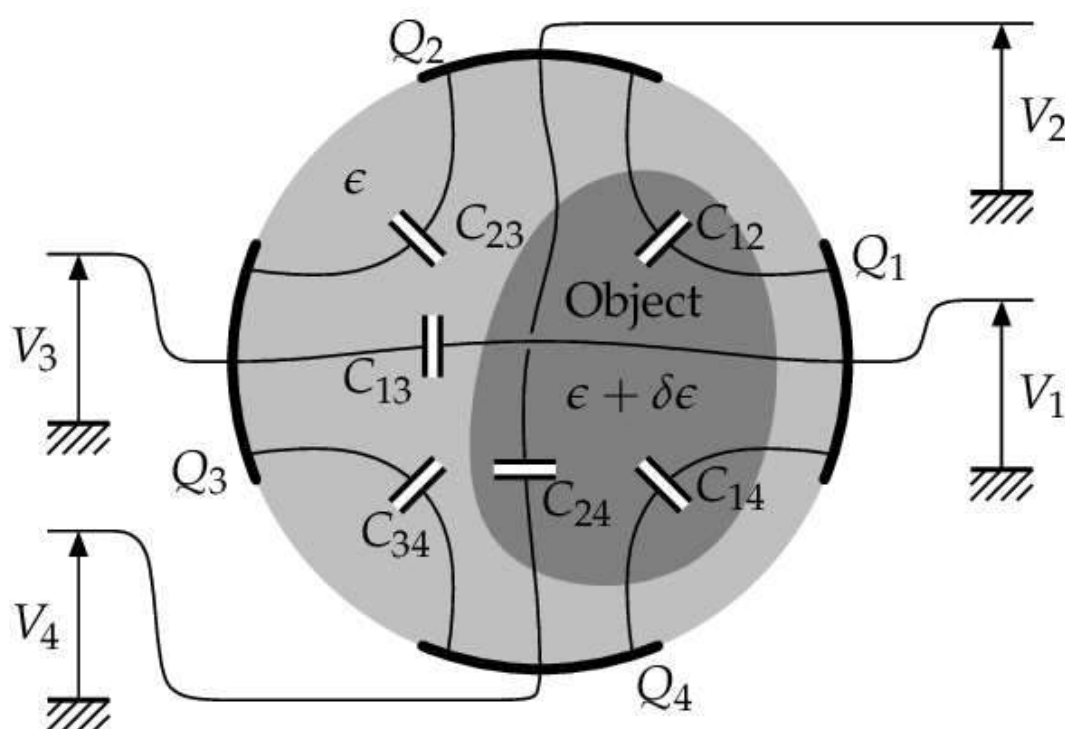
Esse caráter não local torna a ECT particularmente adequada para a análise de meios heterogêneos. Embora cada medição individual não forneça informação pontual, o conjunto completo das medições

intereletródos contém informação suficiente para a reconstrução espacial da distribuição interna de permissividade, desde que sejam empregados algoritmos matemáticos apropriados.

O princípio de funcionamento da Eletrotomografia Capacitiva baseia-se na formação de capacitâncias mútuas entre pares de eletrodos dispostos externamente à tubulação. Cada par de eletrodos pode ser interpretado como um capacitor equivalente, cuja capacitância depende da distribuição espacial da permissividade dielétrica no interior do domínio monitorado.

Essa interpretação pode ser representada por meio de um modelo conceitual de capacitâncias intereletródos, no qual a presença de materiais com diferentes propriedades dielétricas altera o valor efetivo das capacitâncias medidas. A Figura 1 ilustra esse conceito, destacando como a permissividade do meio influencia diretamente a resposta elétrica do sensor e fundamenta a obtenção de informações tomográficas a partir das medições capacitivas.

Figura 1 — Representação esquemática de um sensor de Eletrotomografia Capacitiva com eletrodos distribuídos ao redor da tubulação e distribuição qualitativa das linhas de campo elétrico no interior do domínio.



2.4 Eletrotomografia Capacitiva: Conceitos Fundamentais

A Eletrotomografia Capacitiva é uma técnica de imagem indireta pertencente à classe das tomografias elétricas. Diferentemente de métodos baseados em radiação ionizante ou ondas

acústicas, a ECT utiliza campos elétricos de baixa intensidade, o que a torna segura, robusta e adequada para ambientes industriais severos.

O sistema ECT é composto, de forma geral, por três blocos principais: o sensor capacitivo (arranjo de eletrodos), o sistema eletrônico de excitação e aquisição, e o sistema computacional de reconstrução de imagem. O sensor é instalado externamente à tubulação, preservando a integridade do escoamento e eliminando a necessidade de contato direto com o fluido.

Durante a operação, pares de eletrodos são excitados sequencialmente com sinais alternados, e as capacitâncias resultantes são medidas com alta resolução. Essas medições constituem as entradas do problema inverso da tomografia, cujo objetivo é estimar a distribuição interna de permissividade que melhor explica os dados experimentais.

2.5 Sensibilidade da ECT à Gelificação da Parafina

A aplicação da ECT ao monitoramento da gelificação da parafina baseia-se na sensibilidade do campo elétrico às mudanças estruturais do fluido. À medida que a parafina cristaliza, ocorrem alterações locais na permissividade que afetam diretamente a capacitância medida entre os eletrodos.

Regiões com maior concentração de parafina solidificada tendem a modificar o acoplamento capacitivo, enquanto a formação de bolsões gasosos provoca reduções acentuadas da capacitância devido à baixa permissividade do gás. Essas variações permitem identificar não apenas o início da gelificação, mas também sua progressão espacial ao longo do tempo.

A capacidade de mapear essas heterogeneidades torna a ECT uma ferramenta poderosa para a análise do comportamento do escoamento antes e após a solidificação. A informação espacial fornecida pelas imagens tomográficas é essencial para compreender os mecanismos que governam o aumento da resistência ao escoamento e para subsidiar estratégias de reinício seguro do fluxo.

2.6 Reconstrução Tomográfica e Interpretação Física

A reconstrução de imagens em ECT envolve a solução de um problema inverso matematicamente mal condicionado, uma vez que pequenas variações nas medições podem resultar em grandes variações na solução. Para contornar essa dificuldade, são empregados métodos iterativos regularizados, como o método de Landweber, Tikhonov e abordagens baseadas em otimização.

Esses algoritmos utilizam um modelo direto do sensor, geralmente obtido por simulações eletromagnéticas, para relacionar variações de permissividade às capacitâncias medidas. A solução é obtida de forma iterativa, ajustando progressivamente a estimativa da distribuição interna até que o erro entre medições experimentais e simuladas seja minimizado.

Do ponto de vista físico, as imagens reconstruídas representam mapas relativos de permissividade, que devem ser interpretados em conjunto com o conhecimento do processo e das propriedades do fluido. A análise temporal dessas imagens permite acompanhar a evolução da gelificação, identificar regiões críticas e correlacionar a estrutura interna com parâmetros operacionais relevantes.

3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DA ECT

3.1 Geração do Campo Elétrico Alternado

O princípio de operação da Eletrotomografia Capacitiva fundamenta-se na aplicação de sinais elétricos alternados a um conjunto de eletrodos distribuídos externamente ao redor de uma tubulação. Quando um eletrodo é excitado por um potencial alternado e outro é mantido em potencial de referência, estabelece-se um campo elétrico que se propaga através do meio dielétrico interno do duto. Esse campo não se restringe à região imediatamente adjacente aos eletrodos, mas se distribui volumetricamente por toda a seção transversal, formando linhas de fluxo sensíveis às propriedades dielétricas do material presente.

A utilização de sinais alternados é essencial para garantir que o sistema opere predominantemente em regime capacitivo, evitando a polarização permanente dos eletrodos e minimizando contribuições resistivas. Nesse regime, a corrente medida corresponde majoritariamente à corrente de deslocamento, a qual está diretamente relacionada à variação temporal do campo elétrico e à capacitância equivalente entre os eletrodos.

3.2 Interação do Campo Elétrico com o Meio Multifásico

À medida que o campo elétrico atravessa o interior da tubulação, sua distribuição espacial é influenciada pelas diferentes fases presentes no sistema. O óleo líquido, a parafina solidificada e o gás apresentam permissividades dielétricas distintas, provocando a redistribuição das linhas de campo elétrico ao longo da seção transversal.

Durante o processo de gelificação, a nucleação e o crescimento dos cristais de parafina introduzem heterogeneidades progressivas no meio. Regiões com maior concentração de fase sólida tendem a

modificar o acoplamento capacitivo, enquanto bolsões gasosos, caracterizados por permissividade significativamente menor, provocam reduções acentuadas na densidade das linhas de campo. Essas alterações refletem-se diretamente nos valores de capacitância medidos entre os pares de eletrodos.

3.3 Sequenciamento dos Pares de Eletrodos

O sistema ECT opera por meio do chaveamento sequencial dos eletrodos, de forma que diferentes combinações de pares transmissor–receptor sejam excitadas ao longo de um ciclo completo de aquisição. Para um sensor composto por N eletrodos, obtém-se um conjunto de medições capacitivas independentes, cada uma associada a uma configuração distinta do campo elétrico.

Cada medição pode ser interpretada como uma projeção elétrica da distribuição interna de permissividade. O conjunto dessas projeções fornece informação suficiente para a reconstrução tomográfica, desde que o arranjo de eletrodos apresente simetria geométrica e cobertura espacial adequada.

3.4 Aquisição da Capacitância e Condicionamento do Sinal

Os valores de capacitância medidos em sistemas de ECT situam-se tipicamente na faixa de femtofarads a picofarads, exigindo circuitos eletrônicos de alta sensibilidade e baixo nível de ruído. A corrente de deslocamento gerada pelo campo elétrico é convertida em uma tensão mensurável por meio de amplificadores de transimpedância e retificadores de precisão.

O sinal obtido passa por estágios de filtragem e amplificação controlada, com o objetivo de eliminar interferências eletromagnéticas externas, ruídos de alta frequência e variações de offset térmico. A estabilidade desses circuitos é fundamental para garantir a repetibilidade das medições ao longo do tempo, especialmente em processos transientes como a gelificação da parafina.

3.5 Modelo Direto e Formação das Projeções Elétricas

Cada valor de capacitância medido corresponde a uma média ponderada da permissividade ao longo das linhas de campo associadas a um determinado par de eletrodos. A relação entre a distribuição espacial da permissividade e as medições capacitivas é descrita por um modelo direto, que representa matematicamente o comportamento do campo elétrico no interior do sensor.

Esse modelo direto é geralmente obtido por meio de simulações eletromagnéticas baseadas no método dos elementos finitos, a partir das quais se calcula a matriz de sensibilidade do sensor. Essa matriz quantifica a contribuição de cada elemento da seção transversal para cada medição, sendo essencial para a etapa de reconstrução tomográfica.

3.6 Operação em Regime Transiente e Monitoramento Contínuo

Uma das principais vantagens do princípio de operação da ECT é sua capacidade de monitorar processos transientes de forma contínua e não intrusiva. Como o sistema realiza medições rápidas e repetitivas, é possível acompanhar em tempo real a evolução da gelificação da parafina, desde os estágios iniciais de nucleação até a formação completa da estrutura gelificada.

A análise temporal das medições e das imagens reconstruídas permite identificar o crescimento das regiões sólidas, o deslocamento de interfaces e o surgimento de zonas críticas associadas ao aumento da resistência ao escoamento. Essas informações são fundamentais para a compreensão do comportamento dinâmico do sistema e para o desenvolvimento de estratégias de controle e mitigação em aplicações industriais.

4. PROTOTIPAÇÃO DO HARDWARE DO SISTEMA DE ELETROTOMOGRAFIA CAPACITATIVA

4.1 Fundamentação Teórica da Prototipação do Sensor ECT

A prototipação do hardware de um sistema de Eletrotomografia Capacitiva não pode ser tratada apenas como uma etapa construtiva, mas como a materialização física de um modelo eletromagnético previamente definido. Diferentemente de sensores convencionais, nos quais a grandeza medida é local, o sensor ECT opera como um sistema distribuído, no qual o campo elétrico ocupa todo o domínio interno da tubulação. Dessa forma, qualquer decisão de projeto relacionada à geometria, materiais ou interconexões afeta diretamente a matriz de sensibilidade do sistema e, conseqüentemente, a qualidade da reconstrução tomográfica.

Do ponto de vista teórico, o sensor ECT pode ser descrito como uma rede de capacitores mutuamente acoplados, cujas capacitâncias dependem da permissividade dielétrica espacialmente distribuída no interior do duto. Assim, a prototipação deve garantir que as variações de permissividade induzidas pela gelificação da parafina resultem em variações capacitivas mensuráveis, distinguíveis e matematicamente bem condicionadas para o problema inverso.

4.2 Definição do Arranjo de Eletrodos e Justificativa Física

O arranjo de eletrodos adotado baseia-se em uma distribuição circular uniforme ao redor da tubulação, garantindo simetria geométrica e isotropia angular do campo elétrico médio. Essa escolha é fundamental para reduzir assimetrias artificiais na matriz de sensibilidade e evitar regiões sistematicamente subamostradas no domínio tomográfico.

Cada eletrodo atua alternadamente como emissor e receptor, formando capacitores equivalentes com todos os demais eletrodos do arranjo. A largura axial e o comprimento angular dos eletrodos foram definidos de modo a maximizar a área efetiva de acoplamento capacitivo, respeitando o compromisso entre penetração do campo elétrico e resolução espacial. Eletrodos excessivamente estreitos tendem a gerar campos altamente localizados e sensíveis a ruídos, enquanto eletrodos excessivamente largos reduzem a capacidade de discriminação espacial da tomografia.

4.3 Isolamento Dielétrico como Elemento Ativo do Sensor

A camada de isolamento dielétrico entre os eletrodos e a parede da tubulação não deve ser interpretada apenas como um elemento de segurança elétrica, mas como parte integrante do domínio eletromagnético do sensor. Teoricamente, essa camada define uma condição de contorno essencial, forçando o fechamento das linhas de campo elétrico através do fluido interno e impedindo a formação de caminhos condutivos indesejados.

A permissividade relativa e a espessura do isolante influenciam diretamente a capacitância total medida e a distribuição espacial do campo. Um isolante de permissividade elevada aumenta a capacitância de base do sistema, mas pode reduzir o contraste relativo entre diferentes fases do fluido. Por outro lado, um isolante de baixa permissividade aumenta o contraste, porém reduz a magnitude absoluta do sinal. Assim, a escolha do material isolante foi tratada como um problema de otimização eletromagnética, visando maximizar a sensibilidade às variações induzidas pela gelificação da parafina.

4.4 Aterramento Axial e Controle do Domínio de Campo

A implementação de um sistema de aterramento axial ao longo do sensor é uma decisão diretamente fundamentada em princípios eletromagnéticos. Em sensores capacitivos distribuídos, a ausência de um plano de referência bem definido favorece a dispersão das linhas de campo para fora da região de interesse, aumentando a influência de capacitâncias parasitas associadas ao ambiente e à eletrônica de aquisição.

O aterramento axial atua como uma condição de contorno que confina o campo elétrico ao interior da seção transversal da tubulação, reduzindo a sensibilidade a perturbações externas e melhorando a relação sinal-ruído das medições. Do ponto de vista teórico, essa estratégia contribui para tornar a matriz de sensibilidade mais localizada e menos dependente de efeitos externos não modelados, aumentando a robustez do problema inverso.

4.5 Prototipação Mecânica Integrada à Modelagem Eletromagnética

A prototipação mecânica do sensor foi realizada de forma integrada à modelagem eletromagnética, garantindo consistência entre o sistema físico e o modelo matemático utilizado na reconstrução tomográfica. O modelo tridimensional desenvolvido em ambiente CAD representa fielmente a geometria dos eletrodos, do isolamento dielétrico, da tubulação e do aterramento axial.

Essa geometria foi posteriormente utilizada em simulações eletromagnéticas para cálculo do campo elétrico e da matriz de sensibilidade do sensor. A coerência entre o protótipo físico e o modelo numérico é um requisito fundamental, pois discrepâncias geométricas introduzem erros sistemáticos na reconstrução, comprometendo a interpretação física das imagens tomográficas.

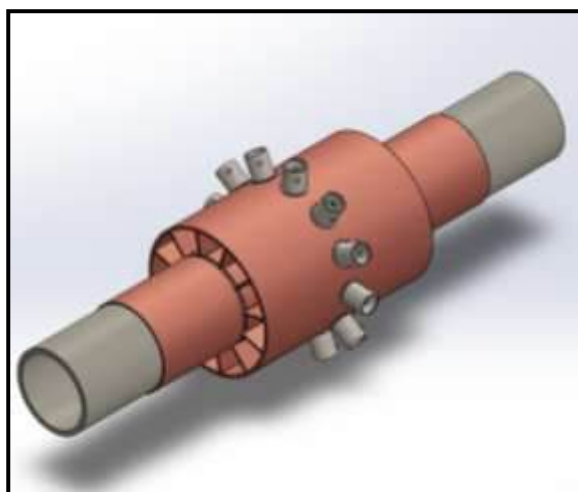


Figura 1 – Hardware Prototipado no software Solidworks

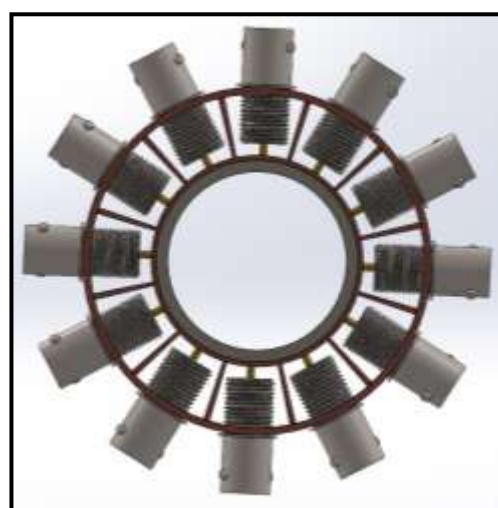


Figura 2– Hardware Prototipado no software Solidworks

4.6 Interface Sensor–Eletrônica sob a Perspectiva da Instrumentação

Sob a ótica da instrumentação, o sensor ECT pode ser modelado como uma fonte de corrente de deslocamento extremamente baixa, cujo valor depende da capacitância intereletrodos e da frequência de excitação. Essa característica impõe requisitos rigorosos ao projeto da interface entre o sensor e o circuito de aquisição.

As conexões elétricas devem apresentar impedância controlada, mínima capacitância parasita e elevada estabilidade térmica. Qualquer variação não controlada nessas interconexões pode introduzir componentes espúrias no sinal medido, mascarando as variações de interesse associadas à gelificação da parafina. Assim, a prototipação do hardware considerou a integração sensor–eletrônica como parte inseparável do sistema de medição.

4.7 Robustez Eletromecânica e Reprodutibilidade Experimental

A robustez do protótipo foi tratada como um requisito científico, e não apenas operacional. A gelificação da parafina envolve variações térmicas significativas, capazes de alterar propriedades dielétricas e dimensões físicas dos materiais. Portanto, o hardware foi concebido para minimizar variações parasitas associadas à dilatação térmica, instabilidade mecânica e deriva elétrica.

Do ponto de vista teórico-experimental, a reprodutibilidade das medições constitui um critério de validação do modelo físico adotado. Um sistema de hardware bem fundamentado assegura que as variações observadas nas capacitâncias medidas sejam atribuídas predominantemente às transformações internas do fluido, e não a instabilidades do sensor, fortalecendo a confiabilidade dos resultados tomográficos.

5. Análise Eletromagnética do Sensor de Eletrotomografia Capacitiva

5.1 Fundamentação Eletromagnética da Análise do Sensor

A análise eletromagnética do sensor de Eletrotomografia Capacitiva constitui uma etapa essencial para a validação teórica e funcional do sistema, uma vez que o desempenho tomográfico depende diretamente da distribuição do campo elétrico no interior da tubulação. Diferentemente de sensores convencionais, nos quais o campo é confinado a regiões localizadas, o sensor ECT opera com campos elétricos distribuídos, cuja geometria é fortemente influenciada pelas condições de contorno impostas pela disposição dos eletrodos, pelo isolamento dielétrico e pelo aterramento.

Do ponto de vista físico, o problema eletromagnético pode ser descrito no regime quase-eletrostático, uma vez que as dimensões do sensor são muito menores que o comprimento de onda do sinal de excitação utilizado. Nesse regime, os efeitos indutivos e radiativos podem ser desprezados, permitindo a aplicação direta das equações de Maxwell em sua forma simplificada, nas quais o campo elétrico é governado predominantemente pela permissividade dielétrica do meio.

5.2 Regime Quase-Eletrostático e Equações Governantes

A operação do sensor ECT ocorre em frequências suficientemente baixas para que o sistema possa ser tratado como quase-estático. Nesse contexto, o campo elétrico $\mathbf{E}$ é descrito pelo gradiente negativo do potencial elétrico escalar ϕ , conforme:

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi$$

A distribuição do potencial elétrico no domínio é governada pela equação de Poisson generalizada, que, na ausência de cargas livres no interior do fluido, reduz-se à equação de Laplace ponderada pela permissividade dielétrica espacialmente variável:

$$\nabla \cdot (\varepsilon(\mathbf{r}) \nabla \phi(\mathbf{r})) = 0$$

Essa equação evidencia que qualquer variação espacial da permissividade dielétrica, como aquelas induzidas pela gelificação da parafina, modifica diretamente a solução do potencial elétrico e, conseqüentemente, a distribuição do campo elétrico no interior da tubulação.

5.3 Condições de Contorno Impostas pelo Sensor

As condições de contorno exercem papel determinante na configuração do campo elétrico. No sensor ECT, os eletrodos excitados impõem potenciais elétricos conhecidos nas superfícies condutoras, enquanto os eletrodos receptores e o aterramento axial definem superfícies equipotenciais adicionais.

O isolamento dielétrico entre os eletrodos e a tubulação garante que não exista condução elétrica direta, forçando o fechamento das linhas de campo através do domínio interno. O aterramento axial atua como condição de contorno de potencial nulo, confinando o campo elétrico à região de interesse e reduzindo a influência de perturbações externas não modeladas.

Teoricamente, essas condições de contorno transformam o interior da tubulação em um domínio eletromagnético bem definido, no qual as variações de permissividade do fluido dominam a resposta do sistema.

5.4 Distribuição do Campo Elétrico e Linhas de Fluxo

A distribuição do campo elétrico no sensor ECT apresenta caráter altamente não uniforme. As linhas de campo tendem a se concentrar nas regiões próximas aos eletrodos excitados, com densidade decrescente em direção ao centro da tubulação. Essa característica é intrínseca à geometria do sensor e limita a resolução espacial em regiões centrais do domínio.

Durante a gelificação da parafina, a formação de regiões sólidas e bolsões gasosos introduz heterogeneidades dielétricas que desviam e redistribuem as linhas de campo. Regiões de maior permissividade atraem linhas de campo, enquanto regiões de baixa permissividade, como o gás, produzem zonas de rarefação do campo elétrico. Essas redistribuições são o mecanismo físico responsável pelas variações de capacitância medidas entre os eletrodos.

5.5 Capacitância Intereletrodos e Energia Eletrostática

A capacitância entre um par de eletrodos pode ser expressa, do ponto de vista energético, como:

$$C_{ij} = \frac{2W_{ij}}{V_{ij}^2}$$

em que W_{ij} representa a energia eletrostática armazenada no domínio quando o par de eletrodos $i-j$ é excitado, e V_{ij} é a diferença de potencial aplicada.

A energia eletrostática armazenada no domínio é dada por:

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d\Omega$$

Essa expressão evidencia que a capacitância medida depende da integral do produto entre a permissividade local e o quadrado do campo elétrico ao longo de todo o domínio. Assim, qualquer alteração na distribuição espacial da permissividade, como aquela causada pela gelificação da parafina, resulta em uma variação direta da capacitância intereletrodos.

5.6 Matriz de Sensibilidade e Resposta do Sensor

A matriz de sensibilidade do sensor ECT quantifica a relação entre variações locais de permissividade e variações nas capacitâncias medidas. Cada elemento dessa matriz representa a contribuição de um elemento da malha tomográfica para uma determinada medição intereletrodos.

Do ponto de vista eletromagnético, a sensibilidade é maior nas regiões onde a densidade de energia elétrica é mais elevada, tipicamente próximas aos eletrodos. Em regiões centrais da tubulação, onde o campo elétrico é mais fraco, a sensibilidade é reduzida, impondo limitações fundamentais à resolução espacial da técnica.

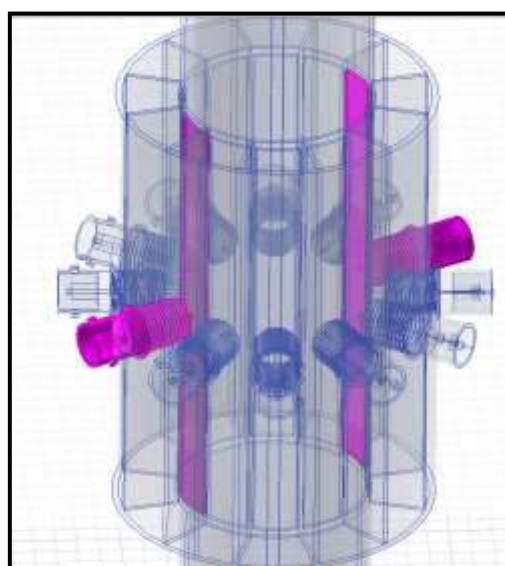
A análise eletromagnética permite identificar essas regiões de maior e menor sensibilidade, fornecendo subsídios teóricos para a interpretação das imagens reconstruídas e para a otimização do arranjo de eletrodos.

5.7 Simulação Eletromagnética como Ferramenta de Validação

A análise eletromagnética do sensor foi realizada por meio de simulações numéricas baseadas no método dos elementos finitos, utilizando a geometria real do protótipo. Essas simulações permitem

resolver numericamente a equação de Laplace no domínio tridimensional do sensor, considerando as condições de contorno impostas pelos eletrodos, pelo isolamento dielétrico e pelo aterramento axial. Os resultados das simulações fornecem mapas detalhados do potencial elétrico, do campo elétrico e da densidade de energia eletrostática, além de permitir o cálculo direto das capacitâncias intereletrodos. Essas informações são fundamentais para a construção do modelo direto utilizado na reconstrução tomográfica e para a validação da coerência entre o sensor físico e o modelo matemático adotado.

Figura 3 – Análise Eletromagnética do sensor via Ansys Maxwell



5.8 Implicações da Análise Eletromagnética para a Reconstrução Tomográfica

A análise eletromagnética fornece a base física que conecta o hardware do sensor aos algoritmos de reconstrução. A matriz de sensibilidade obtida a partir das simulações representa a ligação matemática entre a distribuição interna de permissividade e as medições capacitivas.

Qualquer imprecisão na análise eletromagnética reflete-se diretamente na qualidade da reconstrução tomográfica, introduzindo artefatos e erros sistemáticos. Assim, a análise eletromagnética não é apenas uma etapa de validação do sensor, mas um elemento central da metodologia, garantindo que o sistema ECT responda de forma consistente às variações dielétricas associadas à gelificação da parafina.

6. INTERAÇÃO DO SENSOR DE ELETROTOMOGRAFIA CAPACITATIVA COM O FLUXO PARAFÍNICO

6.1 Caracterização Física do Escoamento Durante a Gelificação

A interação entre o sensor de Eletrotomografia Capacitiva e o escoamento parafínico é governada pela evolução física do fluido durante o processo de resfriamento. À medida que a temperatura do petróleo diminui, ocorre a nucleação de cristais de parafina, seguida pelo crescimento e pela aglomeração dessas estruturas, resultando na formação de uma rede sólida tridimensional. Essa rede altera progressivamente o comportamento do escoamento, que deixa de ser puramente líquido e passa a apresentar características multifásicas e viscoplásticas.

Durante esse processo, o fluido não se solidifica de maneira homogênea. Gradientes térmicos radiais e axiais, associados à troca de calor com a parede da tubulação, promovem a formação preferencial de parafina solidificada nas regiões próximas às paredes, enquanto o núcleo do escoamento pode permanecer parcialmente líquido por períodos mais prolongados. Além disso, a retração volumétrica e a reorganização estrutural da fase sólida favorecem o aprisionamento de bolsões gasosos, aumentando a complexidade da distribuição interna de fases.

6.2 Acoplamento entre o Campo Elétrico e o Escoamento Multifásico

O sensor ECT interage com o escoamento exclusivamente por meio do campo elétrico gerado entre os eletrodos externos. Esse campo atravessa o fluido interno e responde às propriedades dielétricas locais, estabelecendo um acoplamento indireto, porém altamente sensível, entre o sensor e a estrutura interna do escoamento.

À medida que a parafina cristaliza, as variações locais de permissividade dielétrica modificam a distribuição das linhas de campo elétrico. Regiões com maior concentração de fase sólida alteram o armazenamento de energia eletrostática, enquanto regiões gasosas, caracterizadas por permissividade significativamente menor, provocam desvios acentuados do campo. Esse acoplamento permite que o sensor responda diretamente às transformações estruturais do fluido, sem a necessidade de contato físico.

6.3 Influência da Distribuição Espacial das Fases na Resposta do Sensor

A resposta do sistema ECT depende fortemente da distribuição espacial das fases no interior da tubulação. A formação de uma camada de parafina solidificada aderida às paredes do duto provoca alterações significativas nas capacitâncias intereletrodos adjacentes, uma vez que essas regiões coincidem com áreas de maior densidade de campo elétrico e maior sensibilidade do sensor.

Em contraste, heterogeneidades localizadas na região central do escoamento tendem a produzir variações capacitivas menos pronunciadas, devido à menor intensidade do campo elétrico nessa região. Essa característica impõe uma limitação física à resolução espacial da técnica, mas também fornece informações relevantes sobre a evolução do processo, uma vez que a gelificação tipicamente se inicia nas paredes e progride em direção ao centro.

A presença de bolsões gasosos introduz contrastes dielétricos extremos, resultando em assinaturas capacitivas distintas que podem ser identificadas nas medições e nas imagens tomográficas reconstruídas. Esses bolsões afetam não apenas a resposta local do sensor, mas também a conectividade da rede sólida formada pela parafina, influenciando diretamente a resistência ao escoamento.

6.4 Efeitos Dinâmicos e Regime Transiente do Escoamento

Durante o processo de gelificação, o escoamento encontra-se em regime transiente, no qual a distribuição das fases evolui continuamente ao longo do tempo. Oscilações locais de temperatura, rearranjos estruturais da rede cristalina e deslocamento de interfaces líquido-sólido provocam variações temporais na permissividade do meio.

O sistema ECT, por operar com alta taxa de aquisição e sem perturbar o escoamento, é capaz de capturar essas variações dinâmicas. A análise temporal das medições capacitivas permite acompanhar a taxa de crescimento das regiões sólidas, identificar eventos de coalescência de cristais e detectar possíveis rearranjos internos que antecedem a formação completa do gel.

6.5 Interação entre Gelificação, Campo Elétrico e Reologia do Fluido

A gelificação da parafina está diretamente associada ao aumento da resistência ao escoamento e ao surgimento de uma tensão limite de escoamento. Embora a ECT não meça diretamente propriedades reológicas, a interação entre o campo elétrico e a estrutura interna do fluido fornece indicadores indiretos da evolução reológica do sistema.

O aumento da fração sólida e a formação de uma rede contínua refletem-se em mudanças progressivas na distribuição de permissividade e, conseqüentemente, na resposta capacitativa do sensor. Assim, a evolução dos mapas tomográficos pode ser correlacionada com o aumento da rigidez estrutural do fluido e com a proximidade das condições críticas de reinício de escoamento.

6.6 Implicações para o Monitoramento e Interpretação dos Resultados

A compreensão da interação entre o sensor ECT e o escoamento parafínico é essencial para a interpretação correta dos dados tomográficos. As imagens reconstruídas devem ser analisadas considerando a natureza multifásica do fluido, a distribuição não uniforme do campo elétrico e as limitações intrínsecas de sensibilidade espacial da técnica.

Do ponto de vista metodológico, essa interação reforça a importância de integrar o conhecimento físico do escoamento com os resultados da tomografia, evitando interpretações puramente geométricas. A análise conjunta da evolução temporal das imagens e das condições térmicas e operacionais permite extrair informações relevantes sobre o mecanismo de gelificação e suas consequências para o transporte de petróleo.

7. CIRCUITO DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO SISTEMA DE ELETROTOMOGRAFIA CAPACITATIVA

7.1 Papel do Circuito de Aquisição no Problema Direto da ECT

Em sistemas de Eletrotomografia Capacitiva, o circuito de aquisição de dados não atua apenas como um subsistema auxiliar, mas integra diretamente o problema direto da tomografia. A grandeza física medida — a capacitância intereletrodos — não é observável de forma direta, sendo inferida a partir da corrente de deslocamento induzida pelo campo elétrico alternado. Dessa forma, o circuito de aquisição constitui o elo entre o domínio eletromagnético contínuo e o domínio discreto das medições utilizadas na reconstrução tomográfica.

Do ponto de vista teórico, o sinal adquirido deve preservar a relação funcional entre a distribuição espacial da permissividade dielétrica e a energia eletrostática armazenada no domínio. Qualquer não linearidade, ruído ou instabilidade introduzida pelo circuito compromete essa relação, degradando o condicionamento do problema inverso e reduzindo a fidelidade das imagens reconstruídas.

7.2 Corrente de Deslocamento e Modelagem Elétrica do Sensor

A resposta elétrica do sensor ECT pode ser modelada como um conjunto de capacitâncias mútuas dependentes da permissividade espacialmente variável do meio. Quando um sinal alternado $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$ é aplicado a um eletrodo transmissor, a corrente observada no eletrodo receptor é predominantemente a corrente de deslocamento, dada por:

$$i_a(t) = \frac{d}{dt}(C_{ij}V(t))$$

onde C_{ij} representa a capacitância efetiva entre os eletrodos i e j . Essa expressão evidencia que a corrente medida é diretamente proporcional tanto à capacitância quanto à frequência de excitação, o que impõe restrições à escolha da frequência operacional do sistema.

Frequências excessivamente baixas reduzem a amplitude do sinal medido, enquanto frequências elevadas podem introduzir efeitos indutivos e perdas dielétricas não modeladas. Assim, o circuito de aquisição deve ser projetado considerando explicitamente o regime quase-eletrostático no qual o modelo físico permanece válido.

7.3 Arquitetura Funcional do Circuito de Aquisição

A arquitetura do circuito de aquisição é concebida de forma modular, permitindo separar fisicamente e conceitualmente as funções de excitação, chaveamento, leitura e condicionamento do sinal. Essa separação é fundamental para reduzir acoplamentos indesejados entre subsistemas e garantir previsibilidade do comportamento elétrico.

O sistema pode ser descrito como composto por quatro blocos principais: (i) geração do sinal de excitação alternado, (ii) chaveamento dos eletrodos, (iii) conversão corrente–tensão e condicionamento analógico, e (iv) digitalização e sincronização. Cada bloco deve ser projetado de forma coerente com os demais, preservando a linearidade global do sistema de medição.

7.4 Chaveamento dos Eletrodos e Influência de Capacitâncias Parasitas

O circuito de chaveamento dos eletrodos é responsável por configurar o domínio eletromagnético ativo durante cada medição. Do ponto de vista teórico, o chaveamento ideal deveria introduzir apenas uma condição de contorno elétrica, sem alterar a topologia do campo. Na prática, entretanto, dispositivos de comutação introduzem resistências série, capacitâncias parasitas e caminhos de fuga.

Esses elementos parasitas podem ser modelados como capacitâncias adicionais em paralelo com o sensor, alterando a capacitância efetiva medida. Para minimizar esse efeito, o circuito de chaveamento deve apresentar capacitância parasita significativamente menor que a capacitância intereletrodos típica do sensor. Além disso, a repetibilidade do chaveamento é essencial para garantir que variações observadas nas medições sejam atribuídas ao fluido, e não à eletrônica.

7.5 Conversão Corrente–Tensão: Fundamentos e Limitações

A conversão da corrente de deslocamento em tensão é realizada por meio de amplificadores de transimpedância, cuja resposta pode ser descrita, em primeira aproximação, por:

$$V_{out}(t) = -R_f i_d(t)$$

onde R_f é a resistência de realimentação. O valor de R_f determina o ganho do sistema e deve ser escolhido considerando a faixa dinâmica das capacitâncias esperadas e o nível de ruído admissível.

Do ponto de vista teórico, o amplificador de transimpedância deve apresentar largura de banda suficiente para acompanhar a frequência de excitação, além de estabilidade frente a capacitâncias de entrada associadas ao sensor. Caso contrário, podem ocorrer oscilações, atenuação do sinal ou distorções de fase, comprometendo a linearidade da medição.

7.6 Retificação de Precisão e Extração da Informação Útil

Como o sinal de saída do amplificador de transimpedância é alternado, torna-se necessário um estágio de retificação para extrair uma grandeza proporcional à amplitude da corrente de deslocamento. A retificação de precisão é adotada para evitar erros associados à queda de tensão em diodos convencionais, que seriam da mesma ordem de grandeza do sinal medido.

Após a retificação, o sinal representa uma estimativa da magnitude efetiva da capacitância intereletrodos. Esse valor é então filtrado para remoção de componentes de alta frequência, resultando em um sinal contínuo proporcional à resposta capacitiva do sistema. Esse processamento analógico reduz a complexidade da etapa digital e melhora a relação sinal-ruído.

7.7 Digitalização, Quantização e Formação da Matriz de Medições

A etapa de digitalização converte o sinal analógico condicionado em uma representação discreta utilizada na reconstrução tomográfica. A resolução do conversor analógico-digital impõe um limite fundamental à sensibilidade do sistema, uma vez que pequenas variações capacitivas devem ser resolvidas em presença de ruído.

A sincronização entre a digitalização e o circuito de chaveamento garante que cada amostra corresponda a uma configuração específica de eletrodos. O conjunto dessas amostras forma a matriz de medições capacitivas, que constitui a entrada do algoritmo de reconstrução. Do ponto de vista matemático, essa matriz representa a discretização experimental do operador direto da tomografia.

7.8 Estabilidade, Ruído e Impacto na Reconstrução Tomográfica

A estabilidade do circuito de aquisição é um requisito essencial para a validade dos resultados tomográficos. Derivas térmicas, flutuações de alimentação e ruídos eletromagnéticos introduzem componentes aditivas e multiplicativas no sinal, que se propagam diretamente para o problema inverso.

Do ponto de vista teórico, ruídos na matriz de medições amplificam a natureza mal condicionada do problema inverso, exigindo maior regularização e reduzindo a resolução espacial das imagens reconstruídas. Assim, o projeto do circuito de aquisição não pode ser dissociado da etapa de reconstrução: a qualidade do hardware determina, em última instância, o limite físico da informação recuperável pelo sistema ECT.

8. ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO DE IMAGEM EM ELETROTOMOGRAFIA CAPACITATIVA

8.1 Natureza do Problema Inverso na ECT

A reconstrução de imagens em Eletrotomografia Capacitiva consiste na solução de um problema inverso, cujo objetivo é estimar a distribuição espacial da permissividade dielétrica no interior da tubulação a partir de um conjunto finito de medições capacitivas realizadas externamente. Esse problema é inerentemente mal posto segundo os critérios de Hadamard, uma vez que: (i) a solução pode não ser única, (ii) pequenas perturbações nas medições podem gerar grandes variações na solução, e (iii) a estabilidade numérica não é garantida sem a introdução de restrições adicionais.

Fisicamente, essa dificuldade decorre do caráter difuso do campo elétrico, que se propaga volumetricamente e integra informações ao longo de trajetórias complexas. Assim, cada medição intereletrodos representa uma média ponderada da permissividade ao longo das linhas de campo, e não uma informação local direta. O algoritmo de reconstrução deve, portanto, inferir uma distribuição espacial coerente a partir de dados globalmente integrados e ruidosos.

8.2 Formulação Matemática do Problema Direto

O ponto de partida da reconstrução tomográfica é a formulação do problema direto, que estabelece a relação funcional entre a distribuição de permissividade e as capacitâncias medidas. Após a discretização do domínio interno da tubulação em uma malha finita, essa relação pode ser expressa de forma linearizada como:

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}\boldsymbol{\varepsilon}$$

onde $\mathbf{C}$ é o vetor das capacitâncias medidas, $\boldsymbol{\varepsilon}$ representa o vetor da permissividade dielétrica em cada elemento da malha, e $\mathbf{S}$ é a matriz de sensibilidade do sensor.

A matriz de sensibilidade é obtida a partir da análise eletromagnética do sensor e quantifica a contribuição de cada elemento do domínio para cada medição capacitativa. Embora a relação física original seja não linear, a linearização em torno de um estado de referência é uma aproximação

amplamente adotada, especialmente para variações moderadas de permissividade, como aquelas observadas durante a gelificação progressiva da parafina.

8.3 Matriz de Sensibilidade e Propriedades Numéricas

A matriz de sensibilidade $\mathbf{S}$ apresenta características que influenciam diretamente o desempenho da reconstrução. Em geral, seus elementos apresentam forte concentração próxima às paredes do duto, refletindo a maior densidade do campo elétrico nessas regiões. Como consequência, a matriz é mal condicionada e apresenta elevado número de condição, o que amplifica ruídos presentes nas medições.

Além disso, o número de medições disponíveis é significativamente menor que o número de incógnitas do problema, resultando em um sistema subdeterminado. Essa característica impõe a necessidade de métodos de reconstrução iterativos e regularizados, capazes de incorporar conhecimento físico adicional e restrições implícitas à solução.

8.4 Escolha do Método de Reconstrução Iterativo

Dentre os diversos métodos disponíveis para reconstrução em ECT, o método iterativo de Landweber foi adotado neste trabalho devido à sua simplicidade conceitual, estabilidade numérica e adequação a problemas mal condicionados. O método pode ser interpretado como um procedimento de descida do gradiente aplicado à minimização do erro quadrático entre as medições experimentais e aquelas previstas pelo modelo direto.

O funcional de custo minimizado pelo método é dado por:

$$J(\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{C}_{\text{med}} - \mathbf{S}\boldsymbol{\varepsilon}\|^2$$

onde $\mathbf{C}_{\text{med}}$ representa o vetor de capacitâncias medidas experimentalmente.

8.5 Formulação Iterativa do Método de Landweber

A atualização iterativa da distribuição de permissividade no método de Landweber é expressa por:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(k+1)} = \boldsymbol{\varepsilon}^{(k)} + \alpha \mathbf{S}^T (\mathbf{C}_{\text{med}} - \mathbf{S}\boldsymbol{\varepsilon}^{(k)})$$

em que α é o parâmetro de relaxação, responsável por controlar a velocidade de convergência do algoritmo e a estabilidade da solução. Valores excessivamente elevados de α podem causar instabilidade numérica, enquanto valores muito baixos resultam em convergência lenta.

Do ponto de vista físico, cada iteração ajusta a distribuição de permissividade de modo a reduzir o erro entre as capacitâncias simuladas e medidas, redistribuindo permissividade preferencialmente nas regiões onde a sensibilidade do sensor é maior.

8.6 Regularização Implícita e Critério de Parada

O método de Landweber incorpora uma forma de regularização implícita por meio do número de iterações realizadas. Interromper o processo iterativo antes da convergência total atua como um filtro de altas frequências espaciais, reduzindo a amplificação de ruídos e produzindo imagens mais suaves e fisicamente plausíveis.

O critério de parada pode ser definido com base na norma do erro residual, no número máximo de iterações ou na estabilização visual da imagem reconstruída. No contexto da gelificação da parafina, o interesse principal reside na identificação da evolução espacial das fases, e não na reconstrução de interfaces abruptas, o que torna a regularização implícita particularmente adequada.

8.7 Interpretação Física das Imagens Reconstruídas

As imagens reconstruídas pelo algoritmo de Landweber representam mapas relativos de permissividade dielétrica, e não valores absolutos diretamente mensuráveis. Assim, sua interpretação deve considerar o estado de referência adotado e as limitações impostas pela distribuição do campo elétrico.

Regiões de maior permissividade estão associadas ao acúmulo de parafina solidificada, enquanto regiões de baixa permissividade indicam a presença de gás ou fluido menos denso. A análise temporal dessas imagens permite acompanhar a nucleação, o crescimento e a coalescência das estruturas sólidas, fornecendo informações indiretas sobre a evolução reológica do sistema.

8.8 Integração entre Análise Eletromagnética e Reconstrução

A reconstrução tomográfica depende fortemente da qualidade do modelo direto utilizado. A matriz de sensibilidade empregada no algoritmo foi obtida a partir de simulações eletromagnéticas baseadas no método dos elementos finitos, assegurando coerência entre o sensor físico e o modelo matemático.

Essa integração garante que as imagens reconstruídas reflitam de forma consistente o comportamento real do sistema, reduzindo artefatos e erros sistemáticos. Assim, o algoritmo de reconstrução não deve ser tratado como uma etapa isolada, mas como parte integrante de uma metodologia unificada que engloba sensor, eletrônica, modelagem eletromagnética e processamento computacional.

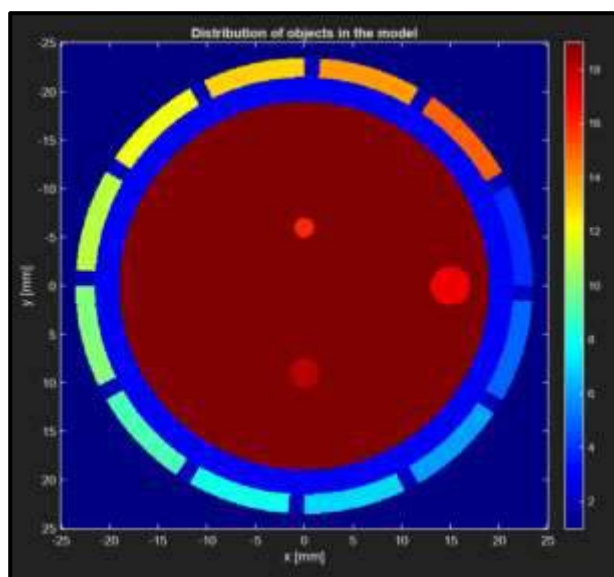


Figura 5 – Reconstrução de Imagem por meio do software MATLAB

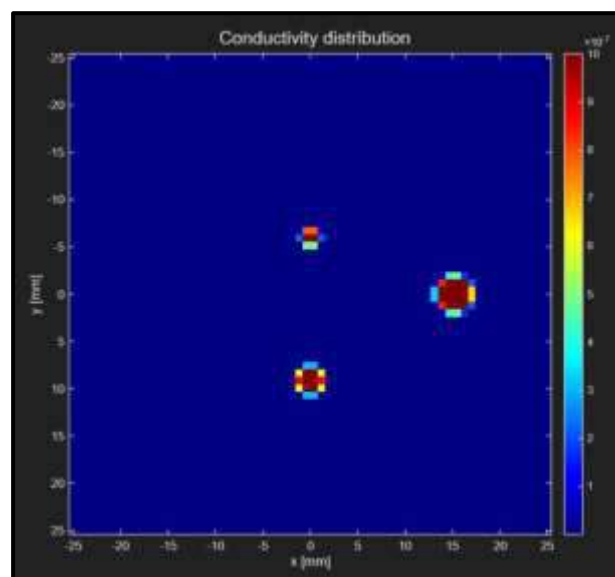


Figura 4– Reconstrução de distribuição de condutividade por meio do software MATLAB

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

9.1 Síntese do Trabalho Desenvolvido

Este trabalho apresentou uma abordagem integrada para o monitoramento do processo de gelificação da parafina em tubulações de petróleo por meio da Eletrotomografia Capacitiva (ECT). A metodologia desenvolvida combinou fundamentação teórica sólida, prototipação criteriosa do hardware, análise eletromagnética detalhada, estudo da interação sensor–escoamento e implementação de algoritmos de reconstrução de imagem, permitindo uma investigação abrangente do fenômeno sob diferentes escalas físicas.

A escolha da ECT como técnica de monitoramento mostrou-se adequada diante da natureza multifásica e dinâmica do processo de gelificação, uma vez que a técnica explora contrastes de permissividade dielétrica e opera de forma não intrusiva, possibilitando medições contínuas e espacialmente distribuídas sem interferir no escoamento.

9.2 Contribuições da Prototipação e da Análise Eletromagnética

A prototipação do sensor ECT foi conduzida com base em princípios eletromagnéticos rigorosos, tratando o hardware como a materialização física do modelo matemático adotado na reconstrução tomográfica. A definição do arranjo de eletrodos, do isolamento dielétrico e do sistema de aterramento axial permitiu estabelecer um domínio eletromagnético bem condicionado, reduzindo a influência de capacitâncias parasitas e melhorando a relação sinal–ruído das medições.

A análise eletromagnética, realizada no regime quase-eletrostático, forneceu a base física para a compreensão da distribuição do campo elétrico, da energia eletrostática armazenada no domínio e da formação da matriz de sensibilidade do sensor. Essa etapa mostrou-se essencial para garantir coerência entre o sensor físico e o modelo direto utilizado na reconstrução, reduzindo erros sistemáticos e aumentando a confiabilidade das imagens obtidas.

9.3 Interação com o Fluxo e Interpretação Física dos Resultados

A análise da interação entre o sensor ECT e o escoamento parafínico evidenciou que a resposta do sistema está diretamente associada à distribuição espacial das fases durante a gelificação. A formação preferencial de parafina solidificada junto às paredes da tubulação, bem como o aprisionamento de bolsões gasosos, produz assinaturas capacitivas características, compatíveis com as regiões de maior sensibilidade do sensor.

A capacidade da ECT de operar em regime transiente permitiu acompanhar a evolução temporal do processo, desde os estágios iniciais de nucleação até a formação da estrutura gelificada contínua. Embora a técnica não forneça medidas diretas de propriedades reológicas, os mapas de permissividade reconstruídos oferecem indicadores indiretos robustos da evolução estrutural do fluido e da proximidade das condições críticas de reinício de escoamento.

9.4 Desempenho do Circuito de Aquisição e Impacto na Reconstrução

O circuito de aquisição de dados desempenhou papel central na qualidade das medições capacitivas, uma vez que a informação tomográfica é extraída a partir da detecção de correntes de deslocamento de baixa magnitude. A arquitetura adotada, baseada em chaveamento controlado, amplificação por transimpedância, retificação de precisão e condicionamento adequado do sinal, mostrou-se compatível com as exigências de sensibilidade e estabilidade impostas pela ECT.

Do ponto de vista teórico, ficou evidente que a qualidade do circuito de aquisição impõe um limite físico à resolução e à estabilidade da reconstrução tomográfica. Ruídos e instabilidades eletrônicas amplificam a natureza mal condicionada do problema inverso, reforçando a necessidade de um projeto integrado entre hardware e algoritmo de reconstrução.

9.5 Avaliação do Algoritmo de Reconstrução de Imagem

O algoritmo iterativo de Landweber adotado para a reconstrução das imagens demonstrou-se adequado para o monitoramento da gelificação da parafina, especialmente por sua estabilidade numérica e pela regularização implícita associada ao número de iterações. Embora apresente

limitações quanto à resolução espacial e à definição de interfaces abruptas, o método mostrou-se eficaz para capturar a evolução gradual da distribuição de permissividade, que é o principal interesse no contexto do fenômeno estudado.

A integração entre a matriz de sensibilidade obtida por simulações eletromagnéticas e o algoritmo de reconstrução garantiu coerência física às imagens, permitindo uma interpretação consistente dos resultados e reduzindo a ocorrência de artefatos não relacionados ao processo real.

9.6 Limitações do Estudo

Apesar dos resultados obtidos, algumas limitações devem ser destacadas. A distribuição não uniforme do campo elétrico impõe restrições à resolução espacial, especialmente na região central da tubulação. Além disso, a linearização do problema direto representa uma aproximação válida apenas para variações moderadas de permissividade, podendo limitar a precisão da reconstrução em estágios avançados da gelificação.

Outra limitação refere-se à interpretação quantitativa das imagens reconstruídas, que representam valores relativos de permissividade e não permitem, de forma direta, a determinação absoluta da fração sólida ou de parâmetros reológicos sem calibração adicional.

9.7 Perspectivas e Trabalhos Futuros

Como perspectivas futuras, destaca-se a possibilidade de empregar métodos de reconstrução mais avançados, incluindo técnicas de regularização explícita, algoritmos baseados em aprendizado de máquina e abordagens híbridas que integrem informações físicas adicionais ao problema inverso. A ampliação do número de eletrodos e a otimização geométrica do sensor também podem contribuir para melhorias na resolução espacial.

Adicionalmente, a integração da ECT com técnicas complementares, como a espectrometria no infravermelho próximo, apresenta grande potencial para fornecer uma caracterização multiescalar do processo de gelificação, combinando informações estruturais e físico-químicas em um único sistema de monitoramento.

9.8 Conclusão Final

Conclui-se que a Eletrotomografia Capacitiva constitui uma ferramenta robusta e promissora para o monitoramento da gelificação da parafina em tubulações de petróleo. A abordagem integrada adotada neste trabalho demonstrou que, quando adequadamente fundamentada do ponto de vista teórico e implementada com rigor em termos de hardware, análise eletromagnética e reconstrução

computacional, a ECT é capaz de fornecer informações relevantes sobre a evolução estrutural do fluido e sobre as condições associadas ao reinício de escoamento.

Os resultados obtidos reforçam o potencial da técnica para aplicações experimentais e industriais, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais seguras e eficientes de operação em sistemas de transporte de petróleos parafínicos.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Eletrotomografia Capacitativa (ECT / ECVT)

A.1 Fundamentos Teóricos da ECT

- WANG, F.; MARASHDEH, Q. M.; FAN, L.-S.; WARSITO, W. Electrical Capacitance Volume Tomography: Design and Applications. *Sensors*, v. 10, n. 3, p. 1890–1915, 2010.
- GAMIO, J. C.; ORTIZ-ALEMÁN, C.; MARTÍN, R. Electrical capacitance tomography: two-phase oil–gas pipe flow imaging. *Geofísica Internacional*, v. 44, n. 3, p. 265–273, 2005.
- RASEL, R. K.; CHOWDHURY, S. M.; MARASHDEH, Q. M.; TEIXEIRA, F. L. Review of selected advances in electrical capacitance volume tomography for multiphase flow monitoring. *Energies*, v. 15, n. 14, 5285, 2022.

A.2 Sensores, Arranjos de Eletrodos e Hardware

- LI, Y.; YANG, W.; XIE, C. G.; HUANG, S. Gas–oil–water flow measurement by electrical capacitance tomography. *Measurement Science and Technology*, v. 24, 074001, 2013.
- WANG, A.; MARASHDEH, Q. M.; TEIXEIRA, F. L.; FAN, L.-S. Electrical capacitance volume tomography: comparison between 12- and 24-electrode sensors. *Progress in Electromagnetics Research M*, v. 41, p. 141–157, 2014.
- MOURA, L. F. M.; CENEDESE, E.; AZEVEDO FILHO, A. C. Estudo experimental de um sistema de tomografia capacitiva para fluxo multifásico. *RETERM*, v. 8, n. 2, p. 56–66, 2009.

B. Análise Eletromagnética e Modelagem Física

B.1 Campo Elétrico e Regime Quase-Eletrostático

- JACKSON, J. D. *Classical Electrodynamics*. 3. ed. New York: Wiley, 1999.
- SADIKU, M. N. O. *Elements of Electromagnetics*. 7. ed. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- B.2 Métodos Numéricos e Elementos Finitos
- JIN, J. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2014.
- SILVESTER, P. P.; FERRARI, R. L. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

C. Circuitos de Aquisição de Dados e Instrumentação

C.1 Medição de Capacitâncias e Corrente de Deslocamento

- HOROWITZ, P.; HILL, W. *The Art of Electronics*. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- FRANCO, S. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

C.2 Amplificadores de Transimpedância e Ruído

- OTT, H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering. Hoboken: Wiley, 2009.
- KITCHIN, C.; COUNTS, L. A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers. Analog Devices, 2006.

D. Reconstrução Tomográfica e Problemas Inversos

D.1 Problemas Inversos e Regularização

TIKHONOV, A. N.; ARSENIN, V. Y. Solutions of Ill-Posed Problems. Washington: V. H. Winston, 1977.

- KAIPIO, J.; SOMERSALO, E. Statistical and Computational Inverse Problems. New York: Springer, 2006.
- D.2 Algoritmos Iterativos (Landweber e Derivados)
- LANDWEBER, L. An iteration formula for Fredholm integral equations of the first kind. American Journal of Mathematics, v. 73, p. 615–624, 1951.
- HANKE, M.; NEUBAUER, A.; SCHERZER, O. A convergence analysis of the Landweber iteration for nonlinear ill-posed problems. Numerische Mathematik, v. 72, p. 21–37, 1995.

E. Gelificação da Parafina e Reologia de Petróleos

E.1 Cristalização, Gelificação e Estrutura do Gel

- MAGDA, J. J. et al. Time-dependent rheology of a model waxy crude oil with application to gelled pipeline restart. Energy & Fuels, 2009.
- ANDRADE, D. E. V. et al. Rheology of waxy oils: a critical review. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2024.
- E.2 Escoamento, Deposição de Parafina e Restart
- FAKROUN, A. et al. Rheology of waxy crude oils in relation to restart of gelled pipelines. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2020.
- WEN, J. et al. Progress on wax deposition characteristics and prediction models. Processes, v. 13, n. 6, 1651, 2025.

F. Normas Técnicas e Métodos de Referência

F.1 Parâmetros Termodinâmicos

- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2500 – Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products. West Conshohocken, 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D97 – Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products. West Conshohocken, 2022.

G. Integração ECT – Monitoramento Industrial

G.1 Aplicações Industriais e Multiphase Flow

- PERERA, K.; PRADEEP, C.; MYLVAGANAM, S.; TIME, R. W. Imaging of oil–water flow patterns by electrical capacitance tomography. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 56, p. 23–34, 2017.
- SINES, J. et al. Volume fraction determination of oil-continuous three-phase systems using ECVT. *Tech4Imaging Report*, 2018.

ANALISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Sandro Medice De Oliveira
Frederico Silva Moreira²
Andrea Teresa Riccio Barbosa

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise técnico-econômica aplicada a motores elétricos, com foco na modernização ou substituição, correlacionando aspectos construtivos, operacionais e energéticos. São contemplados fatores que podem justificar a racionalização do motor existente, como a análise do rendimento, dimensionamento, controle de torque, sistema de acoplamento com a carga, sistemas de refrigeração e práticas de manutenção preventiva e preditiva

Palavras-chave: eficiência energética; motores elétricos; viabilidade técnica; análise econômica

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica nas indústrias tem intensificado a busca por soluções que promovam a eficiência energética, especialmente em equipamentos de alto consumo, como é o caso dos motores elétricos de indução trifásicos. Esses motores estão entre os principais consumidores de eletricidade no setor industrial, representando uma parcela significativa dos custos operacionais das empresas (Pinheiro, Gomes; Oliveira, 2018).

Motores elétricos de indução trifásicos são amplamente utilizados no setor industrial devido à sua confiabilidade e custo relativamente baixo, tendo como função converter energia elétrica em energia mecânica, impulsionando uma variedade de processos industriais essenciais, como bombas, ventiladores, compressores e sistemas de transporte contínuo (Neto et al., 2023).

O princípio de funcionamento desses motores está baseado no fenômeno da indução eletromagnética. O estator, ao ser alimentado por corrente alternada trifásica, gera um campo magnético girante, que induz uma corrente elétrica no rotor, o qual passa a girar em função da interação entre o campo magnético induzido e o campo girante do estator (Anastacio et al., 2020).

Podem ser descritos dois tipos principais de rotores em motores de indução trifásicos, sendo eles o rotor de gaiola de esquilo e o rotor bobinado, sendo que o mais utilizado é o tipo gaiola de esquilo, caracterizado pela simplicidade de construção e baixa manutenção. Já o rotor bobinado permite obter um controle mais preciso da velocidade, mas demanda cuidados adicionais devido à presença de escovas e anéis coletores (Neto et al., 2023).

A eficiência energética dos motores de indução trifásicos está diretamente relacionada à qualidade de seu dimensionamento, condições de operação e estratégias de manutenção, sendo que o uso de inversores de frequência, por exemplo, permite ajustar a velocidade do motor conforme a necessidade da carga, contribuindo desta forma para a economia de energia elétrica e prolongamento da vida útil do equipamento (Pedro et al., 2021).

Nóbrega Sobrinho et al. (2018) ressaltam que motores mal dimensionados, ou operando fora das condições ideais, estão sujeitos a falhas como sobrecarga, desequilíbrio de fases, vibrações excessivas e superaquecimento. Caso essas falhas não sejam monitoradas adequadamente, podem comprometer o desempenho, elevar os custos operacionais e representar riscos à segurança dos processos produtivos.

De acordo com Neto et al. (2023), as perdas de energia nos motores de indução trifásicos se dividem em constantes e variáveis. No primeiro caso, as perdas constantes incluem atrito e ventilação, enquanto as variáveis ocorrem principalmente nos enrolamentos, por efeito Joule. O controle dessas perdas é fundamental para garantir maior eficiência energética e reduzir o impacto ambiental associado ao uso prolongado desses equipamentos.

A relevância do tema se intensifica diante do reconhecimento da necessidade de racionalização do uso da energia, impulsionada por fatores econômicos, regulatórios e ambientais. No Brasil, o setor industrial responde por aproximadamente 44% do consumo de energia elétrica do país, sendo que os motores elétricos de indução consomem cerca de 55% desse total (Rezende; Bispo, 2015).

Rezende e Bispo (2015) ressaltam que a utilização de máquinas com baixo rendimento acarreta desperdício de energia e aumenta significativamente os custos com eletricidade. Nesse contexto, a necessidade de promover o uso de motores mais eficientes, como estratégia para reduzir custos e otimizar processos industriais, pode ser atendida de diferentes formas — desde a substituição direta por equipamentos de alto rendimento até a adoção de medidas complementares.

Entre essas medidas, podem ser mencionadas a utilização de inversores de frequência, a melhoria no acoplamento com a carga, o resfriamento forçado e a manutenção preditiva — ações que, se bem aplicadas, contribuem não apenas para a economia de energia, mas também para a ampliação da vida útil dos motores e para a melhoria da confiabilidade operacional (Thies; Zanoni, 2016).

Segundo Fortes, Sousa e Borba (2019), a adoção de motores de alto rendimento, regulamentados por normas como a NBR 17094-1 e a IEC 60034-30-1, proporciona ganhos substanciais em eficiência, reduzindo perdas elétricas e mecânicas, e naturalmente estes ganhos se refletem em redução da sobrecarga das usinas geradoras e no alívio da pressão sobre a matriz energética nacional.

Contudo, Pinheiro, Gomes e Oliveira (2018) reconhecem que nem sempre a substituição é a melhor alternativa. Em diversos casos, ações corretivas como o condicionamento de motores, associadas à aplicação de ensaios normatizados, podem ser mais econômicas e eficientes, especialmente em motores de médio e grande porte, sendo que esta prática de condicionamento, deve ser acompanhada de uma análise precisa de rendimento, já que rebobinagens mal executadas podem comprometer seriamente a performance do equipamento.

Outra oportunidade de promover a racionalização energética se dá por meio da substituição de motores sobredimensionados por modelos mais alinhados à carga real. Este fenômeno do

sobredimensionamento é comum em instalações industriais, acarretando em baixo rendimento e desperdício de energia. Portanto, a substituição, desde que planejada pode contribuir de forma significativa para a redução do custo de operação e manutenção, ao elevar o desempenho do sistema (Rezende; Bispo, 2015).

Estes casos permitem afirmar que a análise técnico-econômica do ciclo de vida dos motores também é essencial na tomada de decisão, sendo que a economia gerada pode ser avaliada a partir do cálculo da economia anual de energia (EAE), associando-se as tarifas de energia, horas de operação e rendimento dos motores, abordagem que oferece uma estimativa realista do retorno do investimento e facilita a escolha entre manutenção corretiva, recondicionamento ou troca completa (Fortes; Sousa; Borba, 2019).

Para além da perspectiva técnica e econômica, o impacto ambiental do uso de motores ineficientes não pode ser negligenciado, considerando que o descarte inadequado de motores antigos, a pegada de carbono e o uso de materiais não recicláveis são fatores que reforçam a necessidade de políticas de sustentabilidade associadas à gestão de motores elétricos. Nesse sentido, a aplicação de normas como a ISO 50001 contribui para o desenvolvimento de sistemas de gestão energética mais eficientes e alinhados com os objetivos globais de desenvolvimento sustentável (Thies; Zanoni, 2016).

Partindo dessas considerações, o objetivo deste estudo é realizar uma análise técnico-econômica da utilização de motores de indução trifásicos em ambientes industriais, com foco na viabilidade de modernização ou substituição desses equipamentos. A análise considera suas características construtivas, eficiência energética, custos associados e impacto ambiental, com base em dados de estudos de caso e em referências normativas atualizadas.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia representa o conjunto de procedimentos sistemáticos que orientam o pesquisador ao longo de sua investigação, garantindo a organização lógica do estudo e permitindo a obtenção de resultados consistentes e válidos. Conforme argumenta Gil (2008), os procedimentos metodológicos são os instrumentos que estruturam a trajetória do pesquisador. Por sua vez, Andrade (2002) define método como o caminho adotado para alcançar um objetivo específico, a partir de estratégias e técnicas apropriadas à natureza da investigação.

De acordo com Silva e Menezes (2005), é possível classificar uma pesquisa com base em sua abordagem, natureza, objetivos e procedimentos adotados. Neste estudo, seguiram-se as etapas

metodológicas de definição do tema, formulação do problema, delimitação dos objetivos, escolha da metodologia, coleta e análise de dados, interpretação dos resultados e elaboração das conclusões.

A investigação é caracterizada como descritiva, pois busca levantar e descrever, com riqueza de detalhes, os aspectos técnicos e operacionais relacionados aos motores de indução trifásicos, bem como sua aplicação no contexto industrial (Silva; Menezes, 2005). Trata-se ainda de uma pesquisa exploratória, tendo em vista seu propósito de ampliar o entendimento acerca da viabilidade técnica e econômica da modernização ou substituição de motores de baixa eficiência.

Segundo Yin (2015), esse tipo de pesquisa é apropriado quando se deseja obter uma visão aprofundada de um fenômeno pouco explorado, o que é pertinente neste trabalho ao investigar os critérios que justificam ou não a substituição de motores antigos por modelos de alto rendimento. A pesquisa assume finalidade descritiva ao buscar compreender as características construtivas e operacionais dos motores elétricos, relacionando-as com o desempenho energético, custos operacionais e condições de instalação.

A coleta de dados é realizada por meio de estudos de caso, análises técnicas e revisão de dados documentais, permitindo ao pesquisador interpretar comportamentos de desempenho e propor alternativas de eficiência energética baseadas em evidências práticas (Gil, 2008; Goldenberg, 2007). Classifica-se também como uma pesquisa básica, uma vez que se orienta para a produção de novos conhecimentos sobre o comportamento dos motores de indução trifásicos, sem a pretensão de desenvolver um produto comercial.

Conforme apontam Gerhardt e Silveira (2009), esse tipo de pesquisa busca compreender fenômenos e ampliar o conhecimento científico de maneira geral, com foco na formulação de fundamentos teóricos. Ainda segundo Fonseca e Moraes (2002), a pesquisa básica pode ir além da simples revisão bibliográfica, incorporando dados técnicos de equipamentos e resultados obtidos a partir de diagnósticos energéticos aplicados, o que confere atualidade e relevância à discussão proposta.

Essa abordagem é reforçada por Prodanov e Freitas (2013), que destacam a importância da coleta de informações contextuais para enriquecer a fundamentação e aplicação teórica. A abordagem qualitativa é utilizada nesta pesquisa, com base na análise detalhada das variáveis envolvidas no desempenho energético dos motores elétricos e suas implicações econômicas. De acordo com Bicudo (2011), os dados qualitativos são apropriados quando se busca compreender realidades complexas, que envolvem múltiplas dimensões e interpretações.

Essa abordagem permite examinar aspectos subjetivos e contextuais relacionados às decisões de substituição ou reaproveitamento de motores elétricos, considerando desde fatores técnicos e operacionais até impactos ambientais e econômicos. Conforme destacam Gonçalves e Meirelles (2004), a pesquisa qualitativa visa compreender a dinâmica das relações envolvidas em um fenômeno, permitindo ao pesquisador interpretar com profundidade os dados e extrair significados relevantes para o tema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características e técnicas operacionais dos motores de indução trifásicos

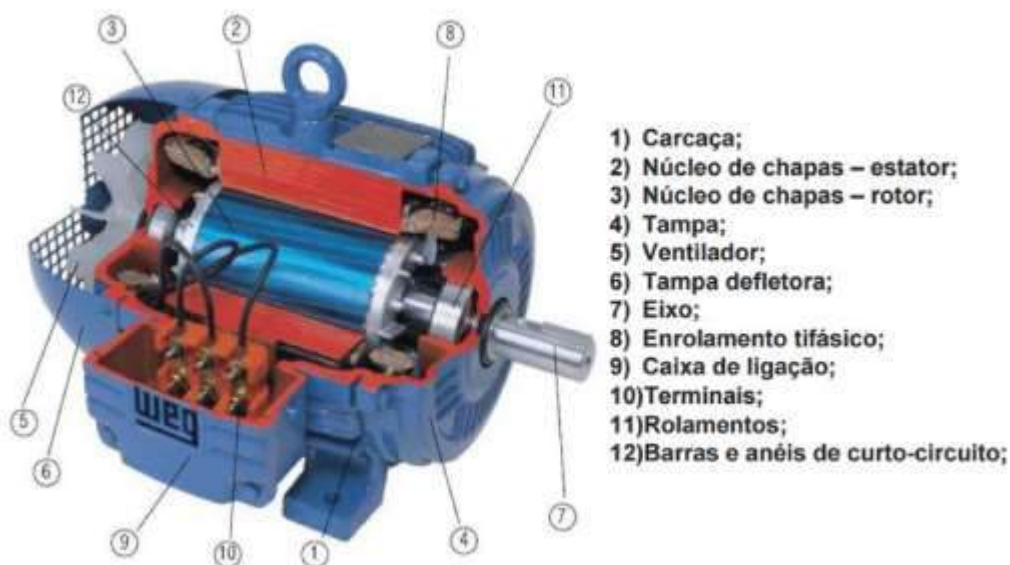
O motor elétrico é um dispositivo responsável por converter energia elétrica em energia mecânica, atingindo sua maior eficiência quando opera com cargas entre 75% e 100% da sua potência nominal (Anastacio et al., 2020). De forma geral, motores elétricos são máquinas capazes de transformar a energia elétrica fornecida pela rede em energia mecânica. No setor industrial, os motores de indução trifásicos se destacam como os mais utilizados entre os dispositivos de corrente alternada para o acionamento de cargas mecânicas (Neto et al., 2023).

Pedro et al. (2021) definem o motor de indução como o “coração da indústria”, já que sua ausência inviabilizaria o funcionamento eficiente de equipamentos como braços robóticos, esteiras transportadoras, entre outras aplicações. Além disso, esses motores apresentam baixo custo, são de fácil transporte, limpeza e simples operação. Segundo Neto et al. (2023), com base no Anuário Estatístico de Energia Elétrica, a indústria foi o maior consumidor de energia elétrica no Brasil em 2021, representando 36,3% do total consumido no país.

Esse alto consumo está diretamente relacionado ao uso intenso e contínuo dos motores elétricos, justificando o título de “coração da indústria” atribuído a eles (Neto et al., 2023). A velocidade de funcionamento desses motores pode ser ajustada com o uso de um inversor de frequência, já que o número de rotações por minuto (RPM) depende diretamente da frequência aplicada na entrada do circuito (Pedro et al., 2021).

Uma das principais características do motor de indução é que apenas o estator é conectado à rede elétrica. As correntes que circulam no rotor são geradas por indução eletromagnética, o que explica sua denominação como “motor de indução” (Pedro et al., 2021). Esse tipo de motor, ilustrado na Figura 1 e inventado por Nikola Tesla, é amplamente utilizado devido à sua robustez, simplicidade de construção, baixo custo e alta eficiência (Anastacio et al., 2020).

Figura 1. Motor elétrico de indução trifásico



De acordo com Anastacio et al. (2020), a estrutura básica de um motor elétrico é composta pelos seguintes componentes:

- Rotor: acoplado ao eixo, é o responsável por transmitir a energia mecânica gerada para a carga;
- Estator: abriga as bobinas que produzem os campos magnéticos e o núcleo, formado por chapas metálicas, que serve de suporte estrutural para essas bobinas;
- Ventilador: atua na dissipação de calor, auxiliando no resfriamento do motor;
- Rolamentos: permitem o giro do eixo em relação à carcaça, reduzindo o atrito e o desgaste.

Pedro et al. (2021) também destacam a carcaça, estrutura que sustenta todo o conjunto do motor. Essa parte geralmente é feita de ferro fundido, aço ou alumínio injetado, materiais resistentes à corrosão e que frequentemente apresentam aletas para melhorar a ventilação. Além disso, o autor menciona o núcleo de chapas magnéticas e o enrolamento trifásico, formado por três conjuntos idênticos de bobinas – uma para cada fase – que compõem o sistema trifásico conectado à rede elétrica.

O estator, parte fixa do motor, recebe a corrente elétrica e gera o campo eletromagnético necessário para o funcionamento do equipamento. Esse campo, por sua vez, induz uma força magnetomotriz no rotor, que é a parte móvel e gira em torno de seu próprio eixo devido à interação com esse campo magnético, gerando o torque. Ambos – estator e rotor – compartilham um mesmo eixo, no qual estão inseridos os enrolamentos que formam os três circuitos simétricos do sistema trifásico. É a atuação conjunta dessas partes que permite a conversão da energia elétrica em energia mecânica (Neto et al., 2023).

Na indústria, uma parcela significativa das aplicações de motores está relacionada às chamadas cargas centrífugas, como bombas, ventiladores e compressores. Nestes casos, o controle do fluxo pode ser obtido pelo ajuste da velocidade dos motores com o uso de inversores de frequência, representando um grande potencial para a redução do consumo energético. Entre os principais benefícios desse recurso estão a redução de custos, o controle remoto, a versatilidade, o aumento da qualidade e da produtividade, além de um uso mais eficiente da energia (Anastacio *et al.*, 2020).

Apesar de suas vantagens, Neto *et al.* (2023) observam que os rotores bobinados são empregados apenas em aplicações específicas. Isso se deve, principalmente, à alta demanda de manutenção dos anéis coletores e das escovas de carvão, bem como à elevada inércia desses rotores.

De modo geral, os motores de indução são considerados altamente confiáveis e exigem pouca manutenção. No entanto, como qualquer equipamento, eles estão sujeitos ao desgaste e eventual falha, influenciados por fatores como o ambiente de operação, o regime de trabalho, a forma de instalação e características do processo de fabricação. Um exemplo recorrente de falha em motores de indução trifásicos é a ruptura de barras do rotor, bastante comum em diversas aplicações industriais (Nóbrega Sobrinho *et al.*, 2018).

Correntes de partida elevadas, especialmente em situações de ventilação insuficiente, podem causar sérias perturbações térmicas e mecânicas no motor, resultando em trincas ou até mesmo na quebra das barras do rotor. Além disso, cargas mecânicas de natureza pulsante, como as geradas por compressores alternativos ou trituradores de carvão, impõem elevados níveis de tensão mecânica sobre a gaiola do rotor. Outro fator que pode contribuir para a quebra dessas barras são falhas no processo de fabricação da própria gaiola do rotor (Nóbrega Sobrinho *et al.*, 2018).

Lucena Júnior (2019) classifica as falhas em rolamentos em três categorias principais: defeitos em ponto único, defeitos em múltiplos pontos e rugosidade generalizada. O defeito em ponto único, também conhecido como falha cíclica ou localizada, afeta apenas um componente do rolamento e pode ser identificado por meio de uma frequência característica presente nos sinais de vibração, corrente elétrica, ruído ou emissão acústica.

Por outro lado, as falhas por rugosidade generalizada — também chamadas de falhas distribuídas ou não cíclicas — resultam da degradação de uma extensa área da superfície do rolamento, que se torna áspera, irregular ou deformada. Nesse caso, não há um ponto específico de falha a ser identificado. Esse tipo de desgaste pode ser causado por contaminação, falta ou perda de lubrificação, passagem

de corrente elétrica pelo eixo do motor, desalinhamento ou até pelo agravamento de falhas previamente localizadas (Lucena Júnior, 2019).

O desalinhamento ocorre quando o eixo do motor não está devidamente alinhado com a carga ou com o componente de acoplamento. Esse desalinhamento pode transferir forças danosas do eixo para o motor, provocando vibrações axiais e radiais no sistema, desgaste prematuro de rolamentos, vedações e acoplamentos, elevação da temperatura na carcaça próxima aos rolamentos, vazamentos de óleo nas vedações dos mancais, aumento da temperatura do óleo e até afrouxamento dos parafusos de fixação. Esses efeitos culminam em perda de energia e redução da eficiência operacional do motor (Pedro et al., 2021).

Características predominantes na avaliação da adequação dos motores

A confiabilidade e a disponibilidade dos motores de indução são fatores fundamentais para assegurar o funcionamento contínuo e eficiente das operações industriais (Araújo, 2022). De acordo com Louzada et al. (2022), esses motores são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo global de energia elétrica, e esse número pode chegar a cerca de 50% nos países desenvolvidos. Apesar de sua construção robusta, os motores de indução trifásicos (MITs) estão sujeitos a uma variedade de falhas, tanto de origem elétrica quanto mecânica.

Durante sua operação, esses motores enfrentam inevitáveis tensões mecânicas, elétricas, térmicas e ambientais, resultantes de fatores como variações na carga externa, instabilidades na alimentação elétrica, superaquecimento, falhas na lubrificação, vedação inadequada, ambientes com alto nível de poeira, falhas de fabricação e o próprio desgaste natural ao longo do tempo. Tais condições podem ocasionar falhas em diferentes componentes do motor (Araújo, 2022).

Araújo (2022) enfatiza a importância de manter os motores em bom estado de funcionamento, pois qualquer falha pode levar à paralisação parcial ou completa da produção, resultando em prejuízos financeiros significativos. Segundo o autor, os principais responsáveis por falhas nos motores elétricos são os rolamentos e os estatores. No entanto, quando essas falhas são identificadas precocemente por meio de manutenção preditiva, é possível prolongar a vida útil do equipamento e evitar danos maiores.

Entre as falhas mecânicas mais comuns estão: defeitos nos rolamentos, excentricidade do rotor, flexão ou desalinhamento do eixo, desalinhamentos provocados por acoplamentos mal posicionados, contaminações internas, entre outros. Por outro lado, falhas elétricas frequentes envolvem curto-

circuitos ou rupturas em espiras do estator, bem como quebras em barras ou anéis terminais do rotor (Louzada et al., 2022).

Grandezas elétricas como corrente, tensão e torque também podem fornecer indicativos relevantes sobre o estado operacional do motor, tornando-se ferramentas eficazes para a detecção precoce de falhas (Louzada et al., 2022). Estudos e pesquisas voltadas ao setor industrial indicam que uma parcela significativa das falhas em motores elétricos de indução tem origem no estator (Louzada et al., 2022). Segundo Araújo (2022), a distribuição estimada das falhas nos componentes desses motores é a seguinte:

- Falhas nos rolamentos: entre 41% e 42%
- Falhas nos enrolamentos do estator: entre 28% e 36%
- Falhas no rotor: entre 8% e 9%
- Outros tipos de falhas: entre 14% e 28%

Com base nesses dados, constata-se que os problemas nos rolamentos e nos enrolamentos do estator representam juntos pelo menos 69% das falhas totais nos motores de indução. Ainda que a ocorrência de falhas no rotor ou no eixo seja proporcionalmente menor, os danos mais severos aos rolamentos geralmente estão relacionados a condições como excentricidade do rotor, desalinhamento ou desbalanceamento do eixo, e, em alguns casos, falhas no enrolamento causadas pelo atrito com rotores danificados ou desalinhados (Araújo, 2022).

Em complemento, Pinheiro, Gomes e Oliveira (2018) destacam que a norma brasileira NBR 17094-3:2018 trata especificamente dos motores de indução trifásicos, estabelecendo os ensaios e procedimentos necessários para a avaliação de seu rendimento. Conforme a norma, o primeiro passo é a determinação dos parâmetros do circuito equivalente, que deve ser realizada por meio de três ensaios fundamentais:

- Ensaio de resistência do enrolamento do estator;
- Ensaio com rotor bloqueado;
- Ensaio a vazio.

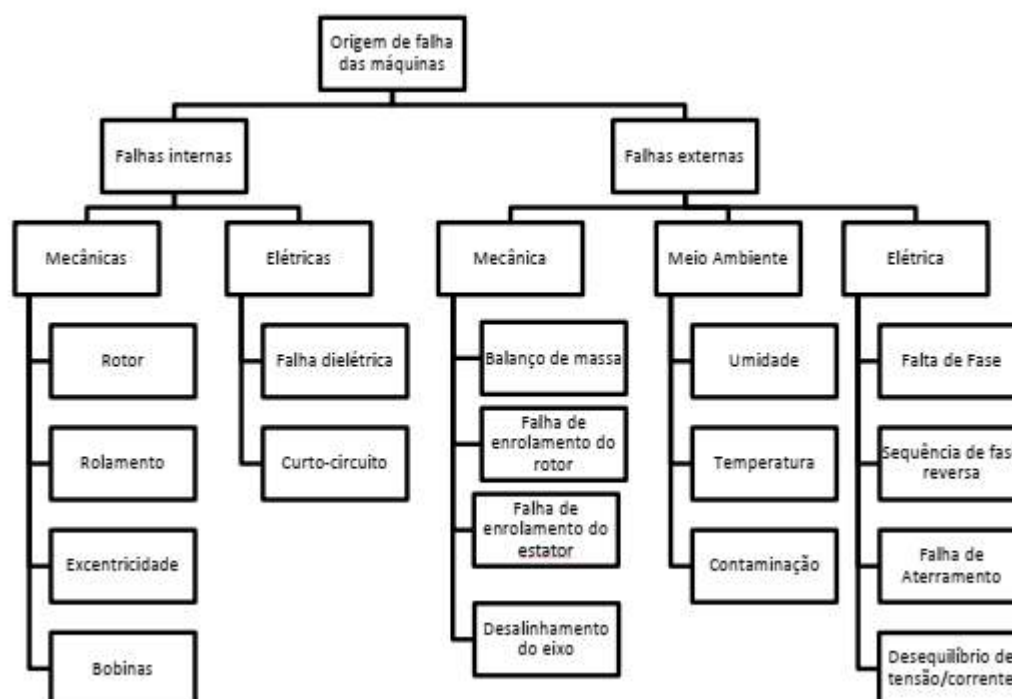
Após a realização dos ensaios elétricos iniciais, procede-se com o ensaio térmico, cuja finalidade é determinar a temperatura de referência na qual os parâmetros do circuito equivalente devem estar baseados. Esse procedimento é essencial para que se possa calcular o rendimento real do motor em condições padronizadas. Em seguida, realiza-se um ensaio de carga variável, no qual se altera a carga

aplicada ao eixo do motor de indução trifásico (MIT), com o objetivo de determinar o rendimento do motor sob diferentes níveis de carregamento (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018).

O monitoramento baseado na condição operacional da máquina é uma prática que visa melhorar o desempenho e a eficiência dos motores, prolongando sua vida útil e aumentando a produtividade. Esse tipo de monitoramento contribui significativamente para a redução de danos internos e externos, prevenindo falhas inesperadas e diminuindo o tempo de paradas não programadas (Lyra, 2019).

Os métodos de detecção de falhas em motores de indução trifásicos geralmente se baseiam na aquisição de sinais relacionados ao seu funcionamento, como corrente elétrica, vibrações mecânicas e emissões acústicas, que são posteriormente processados para a extração de informações relevantes sobre o estado da máquina. A incorporação de sistemas inteligentes a esses métodos tradicionais tem sido amplamente pesquisada e aplicada, visando aprimorar a detecção e o diagnóstico de falhas (Lyra, 2019). A Figura 4 apresenta um esquema que ilustra a classificação dos tipos de falhas.

Figura 4. Classificação das falhas



Segundo Louzada et al. (2022), a literatura técnica apresenta uma variedade de estudos voltados à identificação de falhas em motores de indução trifásicos (MITs), empregando métodos como análise espectral, análise discriminante linear, entre outras técnicas. Em muitos desses trabalhos, é comum a combinação de diferentes abordagens com o intuito de aprimorar a caracterização das falhas. No

entanto, observa-se que, na maioria dos casos, não há uma investigação aprofundada sobre quais atributos ou variáveis possuem maior relevância na identificação de defeitos, o que poderia potencializar a precisão dos diagnósticos.

Os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico têm papel fundamental em qualquer estudo técnico envolvendo essa máquina, uma vez que todo o modelo matemático do motor é formulado com base nessas grandezas. Por esse motivo, é essencial que esses parâmetros sejam determinados com a maior precisão possível. A norma NBR 17094-3:2018 apresenta, de forma detalhada, os procedimentos que devem ser seguidos na execução dos ensaios destinados à obtenção desses parâmetros (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018).

Análise Termográfica

O ensaio térmico tem como finalidade avaliar a elevação de temperatura em partes específicas do motor, acima da temperatura ambiente, quando este opera sob uma condição de carga determinada (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018). Durante sua operação, o motor elétrico realiza a conversão da energia elétrica em energia mecânica e também térmica, sendo esta última uma consequência inevitável do funcionamento (Araújo, 2022).

Segundo Araújo (2022), quanto maior for o esforço mecânico exigido do motor, maior será a dissipação de calor gerada por esse trabalho. Contudo, existe um limite máximo de temperatura que os componentes internos e externos do motor podem suportar. O aquecimento excessivo pode ser um sinal indicativo de falhas ou anomalias no funcionamento do equipamento.

Uma das formas mais eficazes de identificar essas condições é por meio da análise termográfica, uma técnica não invasiva utilizada para avaliar o estado térmico do motor. Essa análise faz uso de câmeras sensíveis à radiação infravermelha, capazes de captar o calor emitido pelos componentes do motor e transformá-lo em imagens térmicas. Através dessas imagens, é possível mapear visualmente as regiões com diferentes temperaturas superficiais, permitindo identificar pontos críticos e prevenir falhas por superaquecimento (Araújo, 2022).

Método de detecção via emissão sonora

Dentre os métodos que vêm ganhando destaque nas últimas décadas, destaca-se a análise por emissão acústica, impulsionada pela popularização e redução de custos dos dispositivos de medição sonora. O uso de sinais sonoros tem se mostrado eficaz no aumento da confiabilidade dos sistemas de

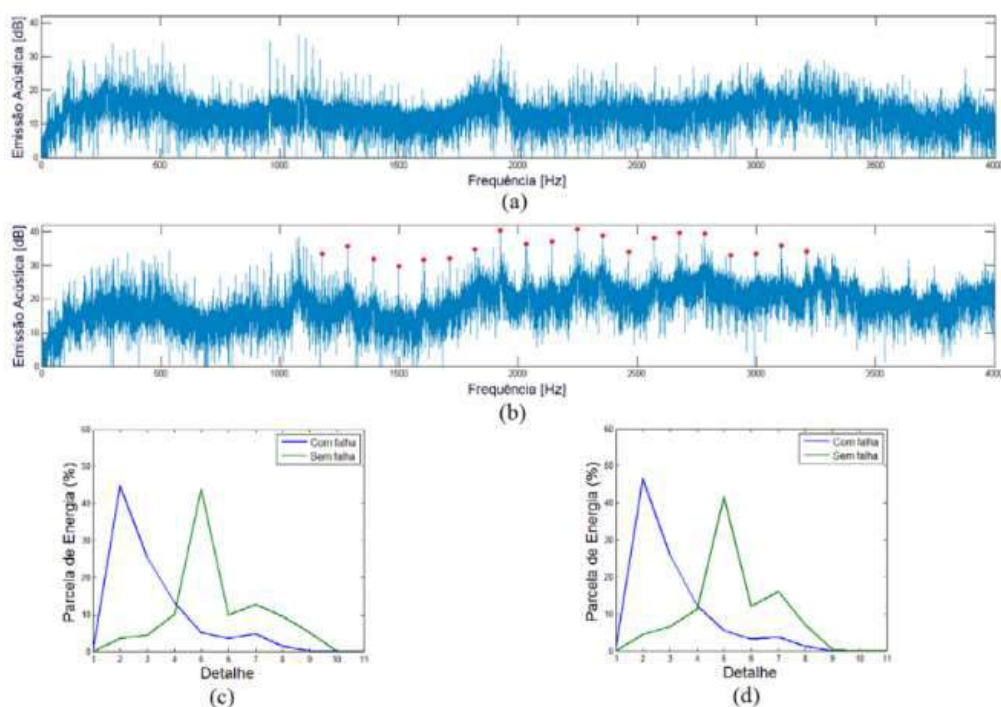
diagnóstico, uma vez que alterações audíveis podem ser identificadas precocemente, permitindo a detecção antecipada de falhas (Nóbrega Sobrinho; Sena; Lima Filho, 2021).

Segundo Lyra (2019), a vibração pode ser definida como a oscilação de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio. Em máquinas, esse fenômeno pode se transformar em um processo destrutivo, levando à falha por fadiga dos componentes. Nesse contexto, a vibração representa uma resposta às forças dinâmicas, que ocorrem em diferentes frequências e se propagam por toda a estrutura do equipamento. Essas frequências podem ser identificadas e, em muitos casos, associadas diretamente a tipos específicos de falhas.

Cada componente da máquina produz uma excitação característica, gerando padrões próprios de vibração, o que torna a análise vibracional uma ferramenta altamente eficiente para diagnóstico. Justamente por essa particularidade, defeitos em determinados elementos da máquina podem ser detectados com precisão (Lyra, 2019).

Em um estudo experimental descrito por Nóbrega Sobrinho, Sena e Lima Filho (2021), foi realizado um ensaio com o motor operando a vazio, com uma carga de 25 Nm, correspondente a 122,5% da carga nominal. A Figura 5 apresenta a distribuição de energia no enrolamento para condições com e sem falha.

Figura 5. Detecção de falha na pista externa do rolamento pela análise da emissão acústica.



Onde (a) é a Transformada Rápida de Fourier (FFT) da emissão acústica sem falha, (b) é a FFT da emissão acústica com falha, (c) e (d) é a Energia dos detalhes para duas aquisições - motor em vazio.

Conforme ilustrado na Figura 5, observaram-se picos espaçados de 107 Hz dentro da faixa de 1000 a 3500 Hz, o que indica uma possível falha na pista externa do rolamento, tendo em vista que essa é a frequência característica associada a esse tipo de falha. Tecnicamente, verificou-se uma alteração significativa na distribuição de energia entre as condições com e sem falha no rolamento. A diferença observada foi de aproximadamente 40% no nível de energia do detalhe D2, considerando o motor operando com e sem carga (Nóbrega Sobrinho; Sena; Lima Filho, 2021).

Análise econômica da substituição de motores

Além de contribuir para a redução do consumo total de energia, a eficiência energética também impulsiona o desenvolvimento do país e gera mais oportunidades de emprego. Esse tema ganha ainda mais relevância quando é considerado o aumento expressivo da demanda energética global nos últimos anos — entre 1973 e 2015, o consumo mundial de energia primária cresceu mais de 50% (Fortes; Sousa; Borba, 2019). Segundo Fortes, Sousa e Borba (2019), em 2015 o consumo energético global atingiu 13.647 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe). Deste total, 82,3% foram supridos por fontes como carvão, petróleo, hidrelétricas e gás natural (IEA, 2017). A previsão é que essa demanda continue crescendo, com um aumento estimado de 28% até 2040. No caso do Brasil, os dados mostram que o setor industrial lidera o consumo de energia elétrica, utilizando cerca de 44% da energia produzida no país.

Diante do impacto significativo do uso de motores elétricos na matriz energética nacional e da necessidade de promover a eficiência energética desses equipamentos, foi criada a Portaria Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017. Essa norma definiu o rendimento mínimo exigido para os motores MITRGE, com classificação equivalente a IR3, e passou a valer em agosto de 2019 (Gonçalves Júnior, 2021).

De acordo com Lima et al. (2022), os motores de indução trifásicos com rotor tipo gaiola de esquilo fabricados no Brasil atualmente são do tipo IR3, equivalentes ao nível "premium" nos Estados Unidos e ao IE3 na Europa. O parágrafo 4 da portaria determina que máquinas equipadas com motores que ainda seguem os antigos níveis mínimos de eficiência energética poderiam ser fabricadas e importadas até 1º de março de 2021, e comercializadas até 30 de agosto do mesmo ano. Assim, atualmente, motores classificados como IR2 (Índice de Rendimento 2) já não podem mais ser produzidos nem importados (Gonçalves Júnior, 2021).

Lima et al. (2022) destacam que substituir motores não é uma tarefa simples. Isso porque, além do aumento constante nas tarifas de energia elétrica — o que nos obriga a considerar o custo real da energia consumida ao longo de toda a vida útil do equipamento —, é essencial avaliar tanto o nível de carregamento do motor atual quanto o do novo motor. De maneira geral, os motores operam com carga entre 50% e 80%, o que indica que, ao realizar a substituição, deve-se optar por um motor com menor potência, mas com maior aproveitamento de carga.

Motores com maior eficiência energética têm ganhado espaço nas indústrias, especialmente por serem projetados para oferecer um rendimento superior aos modelos convencionais. Esses novos projetos permitem a redução no consumo de energia ao otimizar a potência de entrada, mantendo a mesma potência útil entregue no eixo. Esse ganho de eficiência se deve às melhorias no design e nos componentes do motor, planejados desde o início para minimizar as perdas (Fortes; Sousa; Borba, 2019).

Segundo Gonçalves Júnior (2021), a análise de Custo do Ciclo de Vida (CCV) é amplamente usada para determinar qual projeto ou equipamento oferece melhor viabilidade econômica. Quando se trata de motores MIT, essa análise é relativamente simples, como apontam Lima et al. (2022), sendo representada pela Equação 1:

$$CCV = I + E \quad (1)$$

No cálculo do Custo do Ciclo de Vida (CCV), a variável I representa o investimento inicial necessário para o projeto, o qual inclui a aquisição, instalação, comissionamento, testes, sistemas de proteção e controle. Já E corresponde ao custo da energia elétrica consumida durante toda a vida útil do equipamento. Não há necessidade de considerar outros custos, uma vez que os equipamentos analisados possuem similaridade tecnológica (Lima et al., 2022).

Lima et al. (2022) ressalta que o investimento para aquisição do MIT é realizado integralmente antes do início da operação, enquanto os custos com energia exigem um acompanhamento contábil preciso ao longo do tempo.

Gonçalves Júnior (2021) cita que um estudo, ao aplicar a metodologia do CCV no mercado de Brunei, observou que, embora os veículos elétricos apresentem um custo operacional menor ao longo de sua vida útil, o alto custo inicial ainda representa um obstáculo. Isso afeta negativamente sua rentabilidade em comparação aos veículos convencionais movidos a combustíveis fósseis.

Em outro estudo, que avaliou a viabilidade técnica e a rentabilidade de motores de indução de baixa potência com rendimento melhorado após rebobinagem, a análise com base no CCV indicou que os motores rebobinados apresentaram maior rentabilidade do que a simples substituição por motores IR3/IE3/Premium disponíveis no mercado. Observou-se que o maior tempo de retorno observado entre os motores rebobinados foi de dois anos, quando comparado com a troca direta por um motor novo (Gonçalves Júnior, 2021).

O custo anual da energia consumida por um MIT (CE) é representado pela Equação 2. Nessa equação, T corresponde à tarifa da energia elétrica, expressa em R\$/kWh, que pode variar ao longo do tempo (t) (Lima et al., 2022).

$$C_E = \frac{P_n \cdot L \cdot T(t) \cdot H}{\eta(L)} \quad (2)$$

O rendimento (η) também varia de acordo com a carga (L) aplicada, e H representa as horas anuais de operação do MIT. O crescimento da tarifa de energia elétrica é calculado com base em uma média histórica, refletindo a tendência de aumento. Essa tendência é expressa pela taxa de escalada da energia elétrica ($\hat{e}$), que representa a média anual das diferenças entre o reajuste tarifário da eletricidade e a inflação (Lima et al., 2022).

O Valor Presente Líquido (VPL) do fluxo de caixa relacionado ao uso de um motor elétrico pode ser calculado levando em conta a taxa de desconto (d) e a taxa de escalada da energia elétrica ($\hat{e}$), que altera o valor da tarifa (T) a cada ano. A fórmula considera a variação anual ao longo do tempo, dentro de um ciclo de vida útil de “m” anos para o motor, e está expressa na Equação 3 (Lima et al., 2022).

$$VP = \sum_{t=0}^m C_t \cdot \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \quad (3)$$

Além disso, conforme aponta Saldanha et al. (2020), o tempo necessário para recuperar o investimento feito na substituição de um motor pode ser estimado utilizando o método do Payback. Esse indicador corresponde à divisão entre o valor investido e a economia obtida com a substituição, permitindo avaliar em quanto tempo o investimento se paga.

Gonçalves Júnior (2021) menciona também o Método da Economia Líquida aplicada (Equação 4), dedicado a medição da relação custo-benefício, ou rentabilidade, entre projetos de eficiência energética, cuja proposta é mensurar a rentabilidade da troca de motores, ao comparar o Valor Presente Líquido (VPL) ao longo do ciclo de vida das opções de investimento.

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{(C_{op,a}(t) - C_{op,b}(t))}{(1+r)^t} - \Delta C_{inv} \quad (4)$$

Onde:

- VPL é o Valor Presente Líquido da economia.
- $C_{op,a}(t)$ é o custo operacional do motor atual no tempo t .
- $C_{op,b}(t)$ é o custo operacional do novo motor (mais eficiente) no tempo t .
- r é a taxa de desconto (ou taxa mínima de atratividade).
- ΔC_{inv} é o investimento adicional necessário para a troca do motor.
- n é o período de análise (ciclo de vida do motor, por exemplo).

No estudo realizado por Pinheiro, Gomes e Oliveira (2018), foi constatado que, para motores com potência superior a 7,5 cv, o recondicionamento pode ser uma alternativa mais viável economicamente do que a substituição completa por um motor novo. Isso porque o custo de reparo nesses casos é inferior à metade do valor de aquisição de um motor novo equivalente, tornando o recondicionamento a escolha mais vantajosa sob a ótica financeira.

Entretanto, é importante destacar que, após o processo de recondicionamento, diversas informações técnicas do motor podem ser alteradas ou até mesmo perdidas — entre elas, o rendimento do equipamento. Essa incerteza dificulta uma análise precisa do consumo total de energia, especialmente considerando que, no contexto brasileiro, os motores elétricos têm papel relevante no consumo nacional de energia elétrica (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018).

Saldanha et al. (2020) também apresentam uma fórmula proposta pela empresa WEG para estimar o consumo de energia em termos monetários. Nessa equação, o kWh atual refere-se ao consumo do motor atualmente instalado, enquanto o kWh proposto representa o consumo do novo motor a ser adquirido. Já o R\$/kW corresponde à tarifa de energia vigente na região, expressa em reais por quilowatt-hora, conforme apresentado na Equação 5.

$$Economia = (kWh_{atual} - kWh_{proposto}) * R\$/kW \quad (5)$$

No estudo conduzido por Fortes, Sousa e Borba (2019), foi identificado que motores da categoria super premium, com 2 a 8 pólos, apresentam uma economia mais significativa em determinadas faixas de potência. Em especial, os motores com potência entre 1,5 e 10 cv geram um impacto expressivo, com uma economia estimada em aproximadamente R\$ 5,7 bilhões ao longo de um período de 10 anos. Os

autores também verificaram uma redução significativa no consumo energético, totalizando cerca de 41.584.309 MWh considerando as potências e o número de pólos analisados.

O maior impacto em termos de economia e eficiência energética ocorre justamente nos motores de menor potência, tanto pela sua ampla presença no mercado quanto pelas variações mais expressivas nos seus índices de rendimento, quando comparados aos motores de maior porte. Apesar da percepção comum de que motores abaixo de 10 cv são pequenos demais para justificar sua substituição em larga escala — geralmente sendo descartados ou trocados apenas quando apresentam falhas —, os dados mostram o contrário (Fortes; Sousa; Borba, 2019). Segundo os autores, motores de pequeno porte representam cerca de 89% dos motores instalados no país. Além disso, a substituição por modelos mais eficientes pode gerar um ganho de 4 a 6,5 pontos percentuais no rendimento, enquanto em motores de grande porte essa melhoria tende a ser bem menor, em torno de 1 a 2 pontos percentuais.

Alternativas técnicas para aumento da eficiência sem necessidade de substituição

Atualmente, uma série de alternativas técnicas podem ser aplicadas com o objetivo de elevar a eficiência de motores de indução trifásicos sem que haja a necessidade de substituí-los. Miranda et al. (2023) propõem a combinação entre a técnica de controle vetorial indireto (IFOC) e um controlador baseado em modelo de perdas (LMC). Esse arranjo permite um ajuste dinâmico da corrente de excitação do motor (ids) conforme a demanda de torque, promovendo uma operação otimizada, especialmente em regimes de carga parcial. O controle vetorial permite, assim, separar o controle de torque e fluxo, o que, aliado ao ajuste fino do fluxo magnético, resulta na minimização das perdas elétricas.

Ainda no escopo do controle eletrônico, Miranda et al. (2023) também aplicam a modulação por vetores espaciais (Space Vector Modulation – SVM) ao sistema de acionamento, a fim de reduzir distorções harmônicas e perdas por comutação nos inversores. Essa técnica, ao maximizar a utilização do barramento CC, aumenta a precisão na aplicação dos sinais de tensão ao motor, contribuindo diretamente para a melhoria da eficiência energética em diferentes regimes de operação.

Paralelamente às estratégias de controle, Rios (2019) destaca o papel das tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT) no monitoramento em tempo real de variáveis como corrente, tensão e temperatura. A adoção de microcontroladores como o ESP32, integrados a redes sem fio e sensores, permite que os motores sejam supervisionados de forma remota, com coleta contínua de dados. Essa

abordagem proporciona não apenas diagnósticos instantâneos, mas também embasa decisões estratégicas quanto à operação e manutenção dos motores.

Nesse sentido, Neto *et al.* (2023) reforçam a importância da manutenção preditiva como fator chave para a eficiência operacional. A partir da análise de sinais de vibração, temperatura e corrente, é possível prever falhas em componentes críticos, como rolamentos e enrolamentos do estator, evitando paradas inesperadas e prolongando a vida útil das máquinas. Além disso, os autores ressaltam que essa abordagem preditiva se beneficia fortemente dos dados gerados por sistemas IoT, como destacado por Rios (2019).

Complementando essas estratégias, Jung (2020) enfatiza a influência negativa de distorções no sinal de alimentação e sugere a implementação de filtros ativos ou passivos e o balanceamento das cargas trifásicas como métodos eficientes para reduzir harmônicos, melhorando o fator de potência e, por consequência, o rendimento do motor. Essa abordagem contribui para o funcionamento estável e eficiente da máquina, mesmo em ambientes com qualidade de energia comprometida.

Anastacio *et al.* (2020) abordam outra vertente tecnológica: o uso de inversores com funções embutidas de economia de energia, como o controle *Variable Voltage Variable Frequency* (VVVF). Ao ajustar automaticamente a tensão e a frequência fornecida ao motor em função da carga exigida, essas soluções permitem operar com menor fluxo magnético quando possível, diminuindo perdas no cobre e no ferro e aumentando a eficiência em aplicações com carga variável.

Além dos aspectos elétricos e eletrônicos, fatores mecânicos também impactam diretamente a eficiência dos motores. Anastacio *et al.* (2020) ressaltam que o balanceamento inadequado da carga mecânica, desalinhamentos ou folgas podem elevar o torque resistivo, exigindo mais corrente elétrica para manter a rotação desejada. Dessa forma, a verificação periódica e a correção de tais desalinhamentos representam uma estratégia de manutenção simples, mas eficaz.

Para identificar perdas localizadas, Jung (2020) recomenda o uso de termografia, que permite visualizar pontos de aquecimento anormal na carcaça, mancais ou bornes. Esses *hotspots* geralmente indicam problemas como atrito excessivo ou contatos elétricos frouxos, cujas correções – muitas vezes simples, como reaperto de conexões ou lubrificação – geram ganhos expressivos na eficiência do motor e evitam falhas mais graves.

Neto *et al.* (2023) também destacam a importância do monitoramento do isolamento elétrico dos enrolamentos, realizado por meio de testes com megômetro. A resistência de isolamento é

diretamente correlacionada ao estado de limpeza e umidade do motor, e sua deterioração pode levar a perdas dielétricas significativas. Ao identificar esses problemas antecipadamente, evita-se o funcionamento ineficiente e o risco de falha catastrófica.

Além disso, Neto *et al.* (2023) acreditam que o uso de dados históricos pode embasar decisões como o escalonamento de cargas e o desligamento de equipamentos em horários de baixa demanda, promovendo uma operação mais estratégica e sustentável. Para que isso ocorra, o treinamento da equipe técnica e a atualização dos processos internos são fundamentais.

Controle vetorial com otimização de fluxo

O controle vetorial com otimização de fluxo, também conhecido como controle orientado por campo (*Field-Oriented Control* – FOC), constitui uma técnica avançada de acionamento que permite controlar independentemente o torque e o fluxo magnético de motores de indução trifásicos, aproximando seu comportamento ao dos motores de corrente contínua. Miranda *et al.* (2023) destacam que a estratégia *Indirect Field-Oriented Control* (IFOC), em particular, possibilita um controle dinâmico preciso, especialmente em aplicações que exigem resposta rápida e estabilidade em baixas rotações.

Em seu estudo, Miranda *et al.* (2023) propõem a integração do IFOC com o controlador baseado em modelo de perdas (LMC – *Loss Model Controller*), que ajusta a corrente do eixo direto (i_{ds}) com base na minimização da potência ativa consumida, tendo como referência o modelo matemático das perdas internas do motor. Essa abordagem permite identificar o ponto de maior eficiência para cada condição de carga e velocidade, resultando em ganhos substanciais de rendimento, especialmente em regimes de operação fora do ponto nominal, onde os motores tradicionalmente apresentam baixa eficiência.

O controle de fluxo baseado em modelo de perdas trabalha com a ideia de que o fluxo magnético ideal não deve ser fixo, mas sim ajustado em tempo real conforme a carga aplicada ao eixo do motor. Em cargas reduzidas, por exemplo, manter o mesmo fluxo magnético nominal implica em perdas desnecessárias por corrente de magnetização. Ao reduzir a corrente i_{ds} de forma controlada, é possível diminuir essas perdas sem comprometer a geração de torque (Miranda *et al.*, 2023).

Miranda *et al.* (2023) validaram esse conceito por meio de simulações e testes experimentais, observando que a relação ótima entre corrente de excitação e torque varia suavemente com a velocidade e a carga, permitindo que o controlador LMC atue com alta estabilidade.

Anastacio *et al.* (2020) corroboram esse enfoque ao destacar que a aplicação de estratégias de controle adaptativas, como a otimização de fluxo, representa uma evolução natural na busca por

eficiência energética em motores de indução trifásicos. Dessa forma, a conjugação entre controle vetorial e otimização de fluxo apresenta-se como uma solução técnica de alto desempenho, capaz de atender às exigências contemporâneas de economia de energia e sustentabilidade na indústria.

Sistemas de acionamento inteligente com IoT

O uso de sistemas de acionamento inteligentes baseados em Internet das Coisas (IoT) tem emergido como uma alternativa eficiente e de baixo custo para otimização energética de motores de indução trifásicos, sobretudo em ambientes industriais que demandam monitoramento contínuo e decisões automatizadas (Rios, 2019).

Rios (2019) discorre sobre a importância da instrumentação conectada em tempo real via redes sem fio — como Wi-Fi, ZigBee e WirelessHART — que permite a coleta e transmissão de variáveis elétricas e térmicas como corrente, tensão, temperatura e vibração. Esses dados, quando integrados a plataformas de supervisão ou sistemas em nuvem como ThingSpeak e Telegram, podem ser analisados com apoio de algoritmos para identificação de padrões de consumo, previsão de falhas e otimização da operação.

Rios (2019) pôde constatar que essa arquitetura distribuída reduz a dependência de infraestrutura física, diminui custos com cabeamento e manutenção, e favorece a escalabilidade do sistema. Além disso, Neto *et al.* (2023) enfatizam o papel da IoT como facilitadora da manutenção preditiva, permitindo que intervenções sejam realizadas com base em dados de desempenho ao invés de intervalos fixos de tempo.

Neto *et al.* (2023) argumenta que em sistemas onde sensores inteligentes monitoram continuamente o comportamento do motor, é possível identificar variações sutis em parâmetros operacionais que indicam perdas de eficiência ou o início de um processo de falha. Rios (2019) também destaca a relevância de plataformas embarcadas como o ESP32, que combina capacidade de processamento local com conectividade sem fio, possibilitando o desenvolvimento de sistemas autônomos de acionamento e supervisão.

Rios (2019) destaca que quando acoplado a inversores com capacidade de controle vetorial, o sistema IoT atua como um elo entre a automação de baixo nível e a gestão energética em tempo real, viabilizando decisões baseadas em dados para ajustar a operação do motor às condições reais de carga e demanda, promovendo ganhos efetivos de eficiência e sustentabilidade operacional.

Melhoria da qualidade do sinal de alimentação

A melhoria da qualidade do sinal de alimentação elétrica representa uma possibilidade de aumentar a eficiência de motores de indução trifásicos, especialmente em ambientes industriais onde distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão são frequentes. Jung (2020) destaca que distúrbios na forma de onda da tensão de alimentação, como harmônicos de ordem elevada e desbalanceamentos entre as fases, resultam em aumento das perdas no cobre e no ferro do motor, além de gerar esforços térmicos e magnéticos desnecessários.

Jung (2020) ressalta que esses efeitos deterioram o rendimento da máquina e reduzem sua vida útil. Como solução, propõe o uso de filtros passivos sintonizados ou filtros ativos de potência (APF), capazes de atenuar essas distorções e restabelecer a qualidade do fornecimento trifásico. Além disso, a correção do fator de potência por meio de bancos de capacitores ou controladores automáticos de potência reativa contribui para a diminuição da corrente total circulante, reduzindo as perdas ôhmicas e aumentando a eficiência do sistema de acionamento como um todo.

Anastacio *et al.* (2020) reforçam que o balanceamento das cargas entre as fases é uma prática relevante, embora muitas vezes negligenciada nas instalações industriais, considerando que um sistema trifásico desequilibrado acarreta circulação de corrente pela componente de sequência negativa, provocando aquecimento adicional e oscilações de torque, que resultam em vibração e ineficiência.

A identificação desses problemas pode ser feita com o uso de analisadores de qualidade de energia e softwares de diagnóstico, que permitem visualizar em tempo real o espectro de harmônicos e a simetria das tensões e correntes. A partir dessa análise, é possível implementar ações corretivas pontuais, envolvendo a redistribuição de cargas e instalação de transformadores de isolamento ou filtros específicos (Anastacio *et al.*, 2020).

Anastacio *et al.* (2020) acreditam que tais medidas não apenas restauram o desempenho eletromagnético ideal do motor, como também previnem falhas em equipamentos sensíveis e aumentam a confiabilidade de todo o sistema de potência. Dessa forma, a abordagem além de preservar os motores, representa uma medida importante para promover maior eficiência energética no campo industrial.

Calibração e balanceamento de carga mecânica

A calibração e o balanceamento da carga mecânica associada aos motores de indução trifásicos contribui para a eficiência energética, e também para a integridade mecânica do sistema. Anastácio *et al.* (2020) destacam que desalinhamentos de eixo, cargas excêntricas e acoplamentos mal ajustados geram esforços adicionais sobre o rotor, exigindo maior corrente de alimentação para vencer resistências mecânicas indesejadas.

Como consequência disso, esse aumento de corrente implica em maiores perdas por efeito Joule nos enrolamentos do estator e aquecimento excessivo do motor, o que reduz seu rendimento e pode levar a falhas prematuras. O balanceamento da carga, nesse contexto, não se limita à simetria do torque aplicado ao eixo, mas envolve também a adequação da inércia do sistema acoplado, o correto dimensionamento do acoplamento, seja ele elástico ou rígido, e a verificação de folgas ou desgastes em componentes rotativos (Anastácio *et al.*, 2020).

Além disso, Neto *et al.* (2023) afirma que a calibração periódica dos componentes mecânicos permite identificar variações na rigidez do acoplamento, folgas nos mancais ou desbalanceamentos em polias e volantes que podem gerar vibrações indesejadas. Estes autores também destacam a importância de se monitorar sinais de vibração e temperatura como indicadores indiretos de desequilíbrio mecânico, utilizando sensores e técnicas de manutenção preditiva para antecipar correções antes que danos maiores ocorram.

Vibrações acima dos níveis normais, por exemplo, são frequentemente causadas por desbalanceamentos que afetam diretamente a eficiência do motor ao impor cargas oscilantes e resistências não lineares ao movimento rotacional. Portanto, a atuação preventiva sobre esses fatores, por meio de intervenções simples como reapertos, alinhamentos ou troca de rolamentos, pode restabelecer as condições ideais de operação, contribuindo para o desempenho energético ideal do motor (Neto *et al.*, 2023).

Uso de inversores com funções de economia de energia e monitoramento de isolamento elétrico

Anastácio *et al.* (2020) mencionam o uso de inversores de frequência com funções de economia de energia como uma alternativa para aumentar a eficiência de motores de indução trifásicos, principalmente em aplicações que operam frequentemente com cargas parciais. Segundo os autores, esses dispositivos, ao operarem com controle de tensão e frequência variáveis, do original, *Variable*

Voltage Variable Frequency (VVVF), ajustam dinamicamente os parâmetros elétricos fornecidos ao motor conforme a demanda real do processo.

Em situações onde a carga é inferior à nominal, os inversores são capazes de reduzir a tensão aplicada sem comprometer a produção de torque, o que diminui as perdas por magnetização excessiva e reduz significativamente o consumo de energia. Compreende-se que esse ajuste automático é particularmente vantajoso em sistemas com variação de carga ao longo do tempo, como ventiladores, bombas centrífugas e compressores (Anastacio *et al.*, 2023).

Além disso, Miranda *et al.* (2023) descrevem que inversores modernos tem como diferencial integrar algoritmos de otimização energética, como o controle de fluxo otimizado (*flux optimization control*) e o modo “*sleep*” para cargas intermitentes, que desligam o motor ou o colocam em modo de baixa potência quando a carga não é exigida. Esses recursos aumentam o fator de carga médio e reduzem o tempo de operação desnecessária do motor, impactando diretamente na eficiência global do sistema.

Miranda *et al.* (2023) também ressaltam que a integração dos inversores com sistemas de controle vetorial e técnicas de modulação eficientes, como a *Space Vector Modulation* (SVM), contribui para uma comutação mais precisa das fases e uma entrega de potência mais estável, maximizando o rendimento. Isto permite afirmar que essa sinergia entre *hardware* (inversores) e *software* de controle representa uma das estratégias mais promissoras para a se obter ganhos de eficiência energética em ambientes industriais.

No que se refere ao monitoramento do isolamento elétrico, essa prática segundo Neto *et al.* (2023) permite conferir segurança operacional e maior desempenho eficiente em motores de indução trifásicos. Os autores explicam que a resistência de isolamento entre os enrolamentos e a carcaça do motor se deteriora ao longo do tempo devido à umidade, contaminação, envelhecimento térmico e vibrações, podendo resultar em fugas de corrente, perdas dielétricas e até curtos-circuitos.

A realização periódica de testes com megômetro, prática que é descrita como Teste de Resistência de Isolamento, permite identificar precocemente a degradação do dielétrico. Em se tratando especificamente de motores de baixa potência, a tensão de teste deve ser de 500 V mais duas vezes a tensão nominal, o que assegura a detecção de falhas mesmo em estágios iniciais de deterioração (Neto *et al.*, 2023).

Jung (2020) destaca que um isolamento comprometido leva à elevação de perdas indesejadas por correntes de fuga e superaquecimento dos enrolamentos, o que diminui a eficiência do motor e pode

acelerar o envelhecimento do sistema. Além disso, a continuidade da operação sob tais condições pode provocar paradas não planejadas, incêndios e riscos à integridade dos operadores.

Em seu estudo, Jung (2020) observa que, em ambientes industriais com alta umidade ou presença de agentes contaminantes, o monitoramento contínuo do isolamento deve ser integrado a sistemas de supervisão e controle, utilizando sensores dedicados ou módulos de análise embarcados. Dentro desse contexto, a correção pode envolver desde procedimentos simples, como secagem e limpeza do motor, até a substituição de componentes isolantes. Portanto, é possível afirmar que o monitoramento ativo e programado do isolamento elétrico não apenas protege o motor contra falhas, mas contribui diretamente para a manutenção de sua eficiência operacional e prolonga sua vida útil.

CONCLUSÃO

Como resultado da pesquisa, conclui-se que a modernização ou substituição de motores elétricos de indução trifásicos em instalações industriais representa uma estratégia viável e relevante para a melhoria do desempenho energético e operacional.

Foram demonstrados os principais pontos de falha que podem ocorrer em motores elétricos de indução trifásicos, abordagens técnicas adotadas para avaliação de falhas, e análises econômicas que possam embasar a adequação ou substituição de motores. Embora a substituição direta por motores mais eficientes seja muitas vezes justificável, a racionalização do equipamento existente pode ser igualmente vantajosa, desde que acompanhada por melhorias operacionais e gestão adequada.

Ademais, a pesquisa justifica sua relevância pelo apoio à tomada de decisões mais assertivas e tecnicamente fundamentadas dentro do setor industrial.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Álvaro de Souza. Análise, avaliação e validação do uso de técnicas de inteligência artificial para o diagnóstico de falhas em motores de indução. Salvador, BA, 2022. 89 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial). Salvador, 2022. Disponível em: <http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/handle/fieb/1231>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- ANASTACIO, Breno P.; PIRES, Douglas M.G.; MAGALHÃES, Jéssica de L. A.; DIAS, Marcelo P. Eficiência energética em motores elétricos de indução. ANALECTA - Centro Universitário Academia, v. 5, n. 5, 2020. Disponível em: <https://seer.uniacademia.edu.br/index.php/ANL/article/viewFile/2351/1570>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- ANDRADE, Mario M. de. Como preparar trabalhos para cursos de pós-graduação. São Paulo: Atlas, 2002.
- BICUDO, M. A. V. Pesquisa qualitativa e pesquisa qualitativa segundo a abordagem fenomenológica. São Paulo: Cortez, 2011.
- FONSECA, João José Saraiva de; MORAES, A. Metodologia da pesquisa científica. Apostila. Fortaleza: UEC, 2002.
- FORTES, Marcio Zamboti; SOUSA, Leandro Braz; BORBA, Bruno Soares Moreira Cesar. Análise do impacto econômico no setor industrial com a utilização de motores de alto rendimento. Revista Brasileira de Energia, vol. 25, n. 3, 2019. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/73405982/454.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (Orgs.). Métodos de pesquisa. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GOLDENBERG, Mirian. Arte de pesquisar: como fazer pesquisa qualitativa em Ciências Sociais. Rio de Janeiro: Record, 2007.
- GONÇALVES, Carlos A.; MEIRELLES, Anthero M. Projetos e relatórios de pesquisa em Administração. São Paulo: Atlas, 2004. Evento online www.even3.com.br/cobicet2025.
- GONÇALVES JÚNIOR, Adriano Araújo. Avaliação técnico-econômica da troca de motores em parques fabris de médio porte: simulação de cenários em regiões distintas do Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Mossoró, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/82071acd-5cd2-4a2f-b050-899b69975114>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- IEA. Key world energy statistics. Secure Sustainable Together, Paris, 2017. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2017/09/key-world-energy-statistics-2017_g1g83526/key_energ_stat-2017-en.pdf. Acesso em: 25 mar. 2025.
- JUNG, Clecio. Melhoria da robustez e eficiência em acionamentos de motores de indução trifásicos combinando as técnicas IFOC, IMC e MRAC. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24529>. Acesso em: 1 abr. 2025.

LIMA, Kelly C. D.; JUNIOR, Marcos Antônio L. M.; AGUIAR, Victor P. B.; GALVÃO, Raclenir L.; MOURA, Adriano A. F. de; PONTES, Ricardo S. T. Avaliação Técnico-Econômica da Troca de Motores Industriais pela Análise do Carregamento e Cálculo da Economia Líquida em uma Indústria Salineira. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2227. Acesso em: 31 mar. 2025.

LOUZADA, Ailton; SOUZA, Wesley Angelino de; CASTOLDI, Marcelo Favoretto; GOEDEL, Alessandro. Diagnóstico de Curto-Circuito entre Espiras de Estator de Motores de Indução Usando Fluxo de Dispersão e Dados Estatísticos. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. 2022. Disponível em: https://sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/3272. Acesso em: 31 mar. 2025.

LUCENA JÚNIOR, José Anselmo de. Análise de falha em rolamentos de motores de indução trifásico através do som utilizando densidade de máximos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18467>. Acesso em: 26 mar. 2025.

LYRA, Gabriela Jordão. Sistema inteligente para diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos via análise sonora. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/19360>. Acesso em: 26 mar. 2025.

MIRANDA, Lucas Gaspar; BELUSSO, Maria Helena; MINETTO, Tamara; TORRICO, César Rafael Claure. Implementação de controle para melhoria da eficiência energética em motores de indução trifásicos. In: *11th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2018)*. Brasil, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/30600>. Acesso em: 1 abr. 2025.

NETO, Caroline Soares Rodrigues Neto; SANTOS, Diego Resende; VIEIRA, Eric Caetano Maurício; ROCHA, Jéssica Taveira da; EUGENIO, Quéren Hapuke de Souza; CAMPOS, Carlos da Mata. Motores de indução trifásicos para operações industriais. *Brazilian Journal of Production Engineering*, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, v. 9, n. 4, p. 278–289, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42440>. Acesso em: 26 mar. 2025.

NÓBREGA SOBRINHO, C. A.; LIMA FILHO, Abel Cavalcante; SENA, Alexander Patrick Chaves de; BRITO, Jorge Nei; SILVA, Jobson Francisco da; MAFALDO, Ícaro Meireles. Transformada Wavelet para detecção de barras quebradas em Motores de Indução Trifásicos. *Revista Principia*, [S. l.], v. 1, n. 42, p. 72–83, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1663>. Acesso em: 26 mar. 2025.

NÓBREGA SOBRINHO, C. A.; SENA, A. P. C.; LIMA FILHO, A. C. Estratégias para Detecção de Falhas em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos. *Revista Principia*, [S. l.], v. 1, n. 55, p. 108–118, 2021. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id4154. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4154>. Acesso em: 31 mar. 2025.

PEDRO, Evandro J. P.; FIRMINO, Lucas B.; GUIMARÃES, Rodrigo G.; SOUZA, Tamiris A. Sistema eletrônico para monitorar a operação dos motores elétricos de indução na indústria. ANALECTA - Centro Universitário Academia, v. 6, n. 3, 2021. Disponível em: <https://seer.uniacademia.edu.br/index.php/ANL/article/download/2750/1830>. Acesso em: 26 mar. 2025.

PINHEIRO, Vinicius M.; GOMES, Luciano C.; OLIVEIRA, Cassio. A de. Plataforma experimental para análise do rendimento de motores de indução trifásicos por meio de ensaios específicos recomendados na norma técnica NBR17094-3:2018. ForScience, v. 7, n. 2, 26 set. 2019. Disponível em: <https://forscience.ifmg.edu.br/index.php/forscience/article/view/633>. Acesso em: 26 mar. 2025.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição. Editora Feevale, 2013.

REZENDE, P.H.O.; BISPO, D. Análise Econômica em Motores de Indução Trifásicos. Revista Horizonte Científico, v. 9, n. 1, 2015. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/8051/15712>. Acesso em: 26 mar. 2025.

RIOS, Artur de Almeida. Aplicação de internet das coisas no monitoramento de corrente, tensão e temperatura em motor de indução trifásico. 2019. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26442>. Acesso em: 26 mar. 2025.

SALDANHA, Sarah L. S.; SOUZA, Jorgeane M.; ARAUJO, Everton R. S.; FERREIRA, Cristiany de N. M. do Amaral. Estudo econômico referente à substituição de motores elétricos indutivos em uma indústria de papel celulose. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2020. Disponível em: https://sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1509. Acesso em: 26 mar. 2025.

SILVA, E.; MENEZES, E. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis: UFSC, 4. ed. 2005.

THIES, Eduardo; ZANONI, Cícero. Eficiência energética em sistema eletromotriz de ventilação: uma análise comparativa entre motor de indução trifásico x motor de ímã permanente. Interdisciplinary Journal of Applied Science, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 16–29, 2016. Disponível em: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/ricaucs/article/view/4744>. Acesso em: 27 mar. 2025.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. Livro, Editora Bookman, 5.ed. - Porto Alegre, 2015.

CALDEIRAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Diogo Cambraia
Luiz Gustavo de Assis Serafim

RESUMO (em Português)

Este artigo apresenta uma síntese técnico-científica sobre caldeiras aplicadas à geração de energia elétrica, com ênfase em fundamentos termodinâmicos, tipologias (flamotubulares, aquatubulares, supercríticas e de recuperação), aspectos de eficiência e controle, aplicações em ciclos Rankine e combinados (HRSG), e integração com reatores nucleares (PWR/BWR e SMR). São discutidos limites operacionais, segurança (códigos de projeto) e tendências tecnológicas, incluindo ultra-supercríticas, automação, IoT/IA e biomassa. O contexto brasileiro é analisado a partir do Balanço Energético Nacional, com destaque ao papel da cogeração industrial e do uso de biomassa. Referenciais nacionais e internacionais sustentam a revisão, com aplicações e exemplos pertinentes ao interior de Minas Gerais.

Palavras-chave: Caldeiras; geração de vapor, ciclo Rankine; HRSG; PWR; SMR; eficiência energética; biomassa.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta uma síntese técnico-científica sobre caldeiras aplicadas à geração de energia elétrica, com ênfase em fundamentos termodinâmicos, tipologias (flamotubulares, aquatubulares, supercríticas e de recuperação), aspectos de eficiência e controle, aplicações em ciclos Rankine e combinados (HRSG), e integração com reatores nucleares (PWR/BWR e SMR). São discutidos limites operacionais, segurança (códigos de projeto) e tendências tecnológicas,

partir do Balanço Energético Nacional, com destaque ao papel da cogeração industrial e do uso de biomassa. Referenciais nacionais e internacionais sustentam a revisão, com aplicações e exemplos pertinentes ao interior de Minas Gerais.

Palavras-chave: caldeiras; geração de vapor, ciclo Rankine; HRSG; PWR; SMR eficiência energética; biomassa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico fundamenta-se em obras clássicas e normas técnicas que sustentam o estudo das caldeiras na geração de energia. Autores como Moran e Shapiro (Princípios de Termodinâmica para Engenharia) e Borgnakke & Sonntag (Fundamentos da Termodinâmica) apresentam os princípios termodinâmicos essenciais para compreender os ciclos de potência, incluindo o ciclo Rankine e suas variações. Essas obras descrevem as relações entre pressão, temperatura e entalpia, fundamentais para o dimensionamento e análise de caldeiras. Complementarmente, Pera (Geradores de Vapor de Água) e Bazzo (Geração de Vapor) abordam aspectos construtivos e operacionais das caldeiras, incluindo trocadores de calor, sistemas de combustão e controle de eficiência. Torreira (Fluídos Térmicos) contribui com a análise das propriedades dos fluidos térmicos e sua influência na transferência de calor, enquanto Botelho & Bifano (Operação de Caldeiras) detalham práticas de manutenção, segurança e gerenciamento operacional. No âmbito normativo, a NR-13 estabelece requisitos para integridade estrutural e inspeção de caldeiras, garantindo conformidade legal e segurança. Dados do Balanço Energético Nacional (BEN 2024) e relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA) contextualizam a relevância das caldeiras na matriz energética brasileira e mundial, enquanto publicações da NRC e da IAEA fornecem diretrizes para sistemas nucleares (PWR/BWR) e reatores modulares (SMR). Esse conjunto de referenciais assegura a base científica e técnica para a discussão dos fundamentos, tipologias, eficiência e aplicações das caldeiras na geração de energia elétrica.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS E OPERAÇÃO REFERENCIAL TEÓRICO

fornece calor à água, que atinge elevadas pressões e temperaturas para acionar turbinas, produzir calor de processo ou viabilizar cogeração. A transferência de calor ocorre por condução, convecção e radiação, sendo o projeto da fornalha e das superfícies de troca determinante para o desempenho. Caldeiras modernas alcançam faixas superiores a 25 MPa e 600 °C, e sua eficiência depende de fatores como relação ar-combustível, qualidade da combustão, recuperação de calor de exaustão, controle de purgas e reintrodução de condensado. A segurança operacional é regida por códigos e normas de projeto e inspeção, e pela instrumentação de proteção (válvulas de alívio, intertravamentos, monitoramento contínuo de pressão/nível).

3.2 TIPOS DE CALDEIRAS E APLICAÇÕES

As tipologias clássicas abrangem: (i) flamotubulares, com gases percorrendo tubos imersos em água, indicadas para baixas a médias pressões; (ii) aquatubulares, com água nos tubos expostos ao calor, adequadas a altas pressões e grandes vazões de vapor; (iii) supercríticas e ultra-supercríticas, com operação acima do ponto crítico da água, elevando a eficiência do ciclo; (iv) de recuperação de calor (HRSG), que aproveitam a exaustão de turbinas a gás em ciclos combinados; (v) nucleares (PWR/BWR), em que o calor de fissão aquece água direta ou indiretamente; e (vi) a biomassa, empregadas amplamente em cogeração industrial.

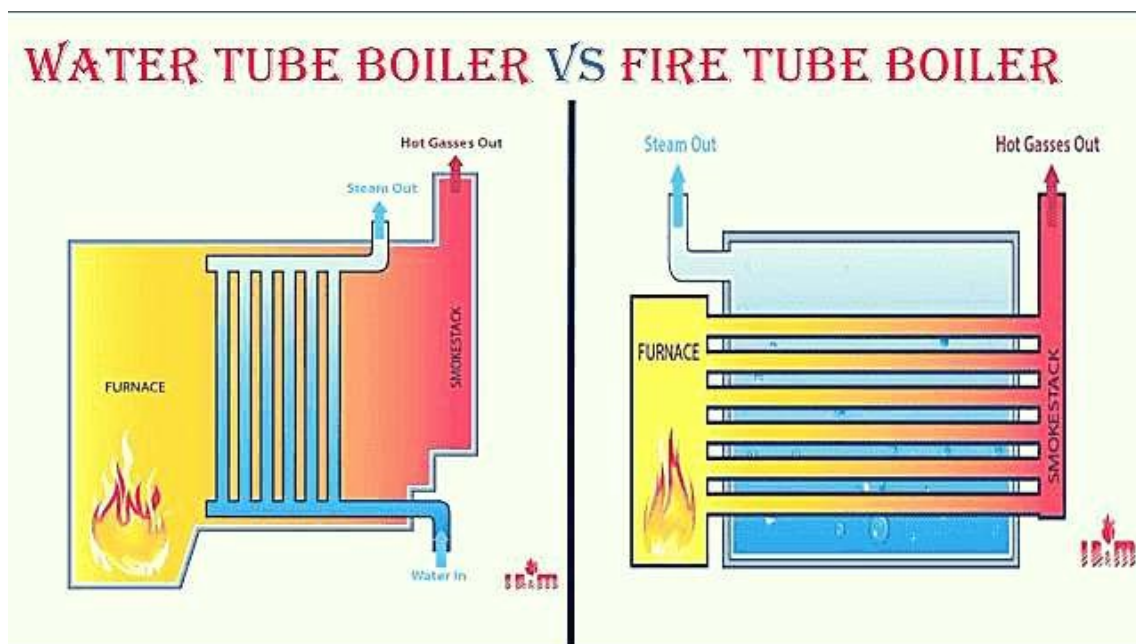


Figura 1 – Flamotubular vs. Aquatubular

[water-tube-boiler-with-pdf/](#)

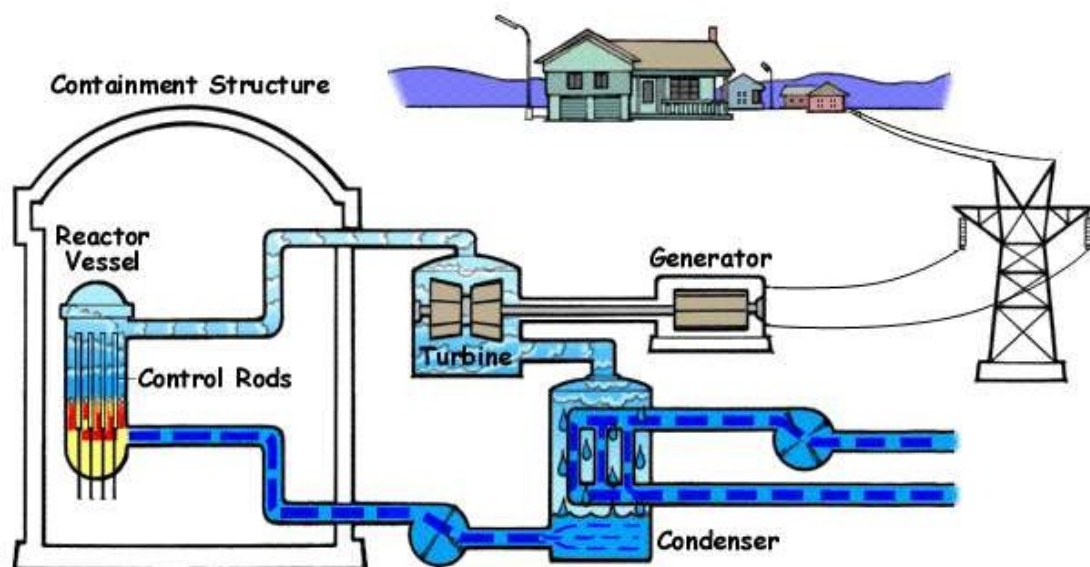


Figura 2 – Ciclo Rankine (esquema)

Fonte: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Rankine_cycle

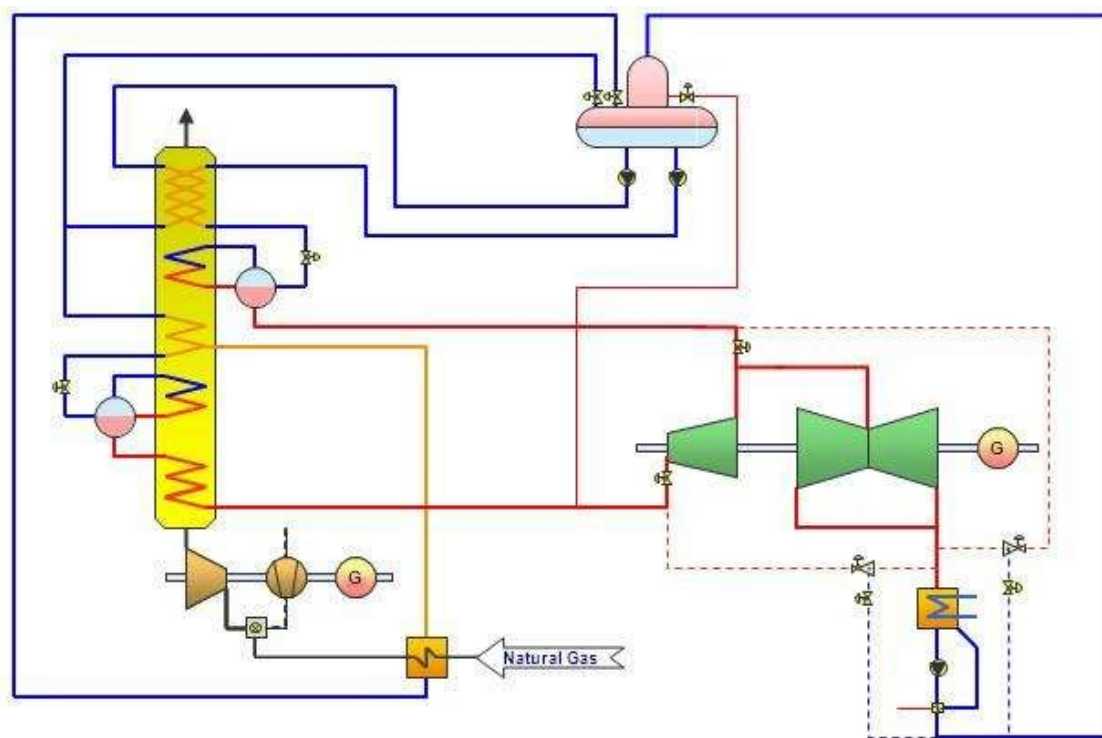


Figura 3 – HRSG em ciclo combinado

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_recovery_steam_generator

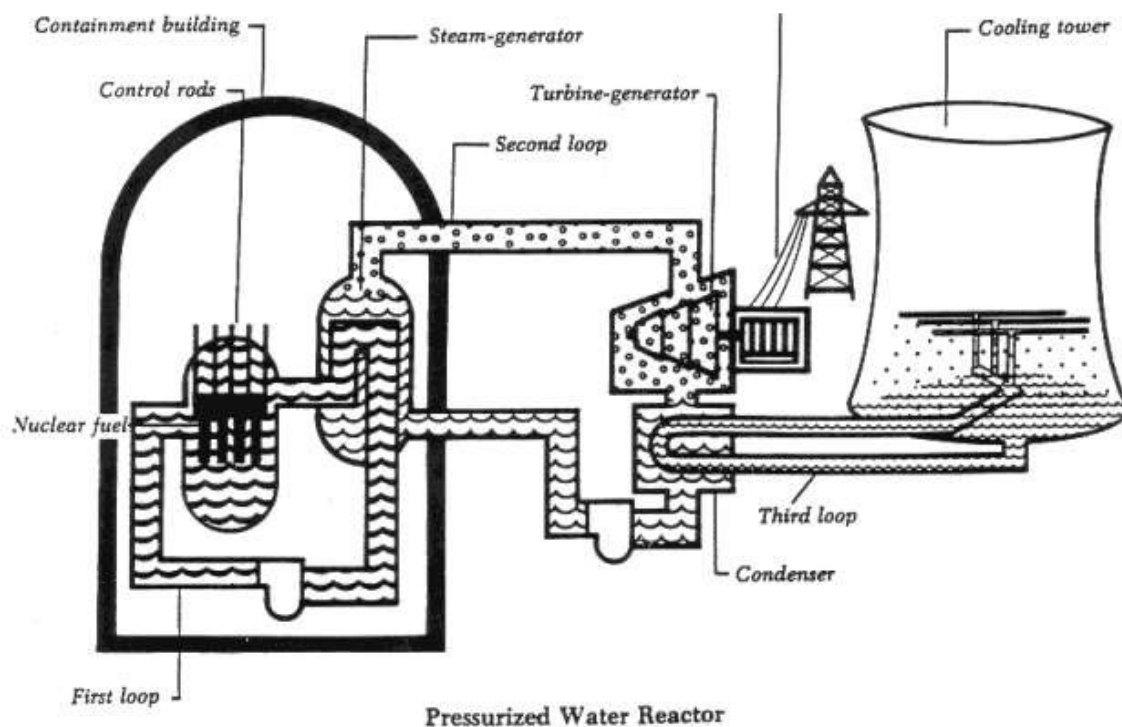


Figura 4 – Esquema PWR (reator de água pressurizada)

Fonte: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/pwr-schematic.html>

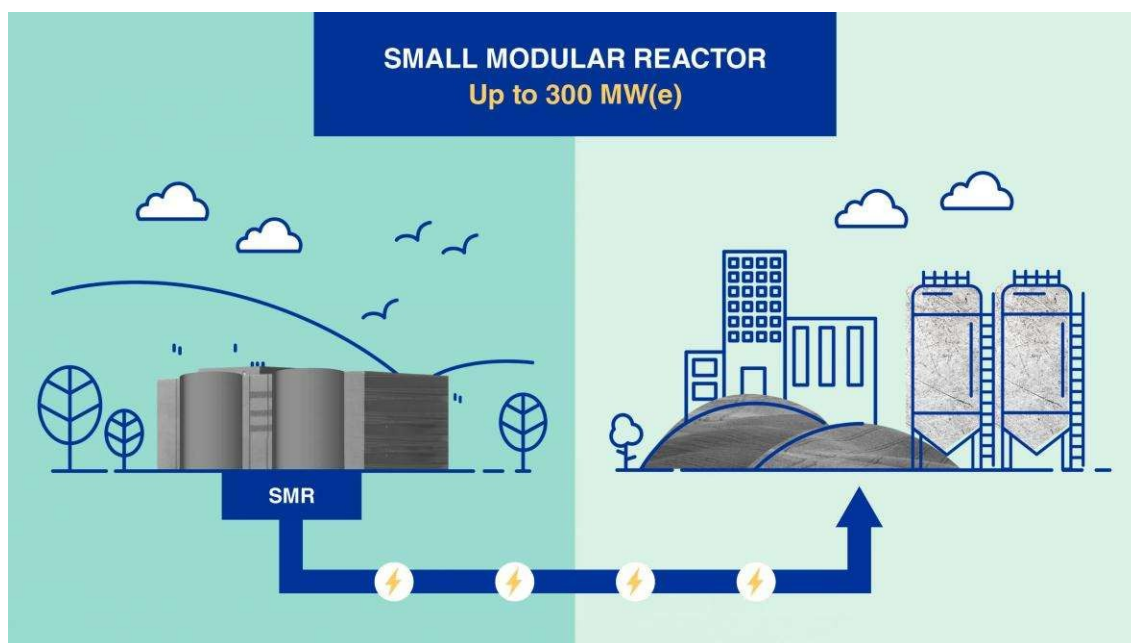


Figura 5 – Exemplo de SMR (visão esquemática)

Fonte: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>

3.3 EFICIÊNCIA, CONTROLE E SUSTENTABILIDADE

média de adição de calor e da redução da temperatura média de rejeição. No nível do equipamento, destacam-se técnicas de otimização da combustão, redução de fuligem e incrustações, emprego de economizadores, pré-aquecedores de ar e superaquecedores, além de estratégias de purgas otimizadas e retorno de condensado. Em termos ambientais, queimadores de baixa emissão, controle de NOx/SO₂, e a adoção de biomassa como combustível contribuem para reduzir a pegada de carbono. Tendências incluem automação avançada, uso de IoT e algoritmos preditivos para manutenção e operação ótima.

3.4 APLICAÇÕES EM GERAÇÃO ELÉTRICA E COGERAÇÃO

Em escala global, a geração termoelétrica permanece dominante em diversos países, com relevância para carvão, gás natural e nuclear. As caldeiras estão no cerne dos ciclos Rankine e combinados. No Brasil, segundo o BEN 2022, a cogeração industrial — especialmente com biomassa — desempenha papel estratégico, notadamente em papel e celulose, sucroenergético e setores intensivos em calor de processo.

3.5 CALDEIRAS EM REATORES NUCLEARES (PWR/BWR) E SMR

Nos reatores PWR, a caldeira atua como gerador de vapor secundário, isolando o circuito primário pressurizado do ciclo de turbina a vapor. Em BWR, a ebulição ocorre diretamente no vaso do reator, enviando vapor às turbinas. Os pequenos reatores modulares (SMR) integram geradores de vapor em arranjos compactos, com ênfase em segurança passiva e modularidade, aptos a cogeração e aplicações fora da rede.

3.6 CICLOS TERMODINÂMICOS (RANKINE, MODIFICAÇÕES E ALTERNATIVAS)

O ciclo Rankine ideal constitui a base de usinas a vapor e combina processos de compressão isentrópica (bomba), adição de calor a pressão aproximadamente constante (caldeira), expansão isentrópica (turbina) e rejeição de calor (condensador). Modificações — superaquecimento, reaquecimento e regeneração — elevam a eficiência e reduzem umidade na turbina. Discussões modernas incluem ciclos supercríticos e alternativas como o Allan (variante com arranjos de regeneração), com ganhos potenciais em condições ideais.

Entre as tendências destacam-se caldeiras ultra-supercríticas (> 48% de eficiência de planta em condições de projeto), combustão com plasma ou MILD para redução de poluentes, integração solar térmica, e controle avançado baseado em dados. No âmbito industrial, HRSGs multi-pressão com reaquecimento e SCR para NOx consolidam o padrão em ciclos combinados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos tipos de caldeiras e suas aplicações evidencia que os modelos aquatubulares apresentam maior eficiência térmica e capacidade de operação em altas pressões, sendo preferidos em usinas de grande porte e em ciclos combinados. Já os flamotubulares, embora mais simples, são adequados para aplicações industriais de menor escala. A incorporação de tecnologias como HRSGs em plantas com turbinas a gás permite ganhos significativos de eficiência global, especialmente quando associadas a sistemas de cogeração.

Nos sistemas nucleares, os geradores de vapor em reatores PWR demonstram elevada confiabilidade ao separar os circuitos primário e secundário, enquanto os BWR simplificam o arranjo ao gerar vapor diretamente no vaso do reator. Os SMRs, por sua vez, representam uma tendência emergente, com potencial para aplicações descentralizadas e integração com redes isoladas.

A eficiência térmica das caldeiras foi discutida com base em estratégias como retorno de condensado, controle de purgas, uso de economizadores e queimadores de baixa emissão. Estudos recentes indicam que caldeiras ultra-supercríticas podem atingir até 48% de eficiência de planta em condições ideais, conforme relatórios da IEA e literatura especializada.

No contexto brasileiro, os dados do Balanço Energético Nacional (BEN 2024) confirmam a relevância da cogeração com biomassa, especialmente nos setores sucroenergético e de papel e celulose. A modernização de caldeiras e a adoção de sistemas de controle avançado, como IoT e algoritmos preditivos, são apontadas como caminhos promissores para aumentar a eficiência e reduzir impactos ambientais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

elétrica e no fornecimento de calor de processo em diversos setores industriais. A evolução tecnológica, aliada à aplicação de fundamentos termodinâmicos sólidos e ao cumprimento de novas técnicas como a NK-13, permite ganhos significativos em eficiência, segurança e sustentabilidade.

A diversidade de tipologias — desde flamotubulares e aquatubulares até HRSGs e sistemas nucleares — evidencia a adaptabilidade das caldeiras às diferentes demandas energéticas. A incorporação de tecnologias emergentes, como automação avançada, controle preditivo, combustão de baixa emissão e integração com fontes renováveis, aponta para um futuro mais eficiente e ambientalmente responsável.

No contexto brasileiro, especialmente no interior de Minas Gerais, há oportunidades concretas na modernização de ativos térmicos, na ampliação da cogeração com biomassa e na adoção de sistemas híbridos e modulares. A articulação entre conhecimento técnico, inovação e políticas energéticas será essencial para consolidar avanços e garantir a segurança energética com responsabilidade ambiental.

ABSTRACT

This paper provides a technical review of boilers applied to power generation, covering thermodynamic fundamentals, boiler typologies (fire-tube, water-tube, supercritical and heat-recovery), efficiency and control aspects, applications in Rankine and combined cycles (HRSG), and integration with nuclear reactors (PWR/BWR and SMR). Operational limits, safety codes, and technology trends such as ultra-supercritical steam conditions, automation, IoT/AI and biomass are discussed. The Brazilian context is analyzed using the National Energy Balance, highlighting industrial cogeneration and biomass use. Both national and international references support the review, with examples suitable for Minas Gerais' industrial context.

Keywords: *boilers; steam generation; Rankine cycle; HRSG; PWR; SMR; energy efficiency; biomass.*

Agradecimentos

O autor expressa sua sincera gratidão ao professor orientador Fabiano Farias de Oliveira, cujo acompanhamento técnico e acadêmico foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Agradece também aos professores da disciplina Termodinâmica Aplicada e Trocas Térmicas, Luiz Carlos Vieira Guedes e Débora Alvarenga Romano, pelas contribuições teóricas e pela inspiração na compreensão dos

Dimensionamento e Inspeção, Luiz Carlos Vieira Guedes e Thiago Luis Nogueira Silva, pelo suporte nas aplicações práticas e pela orientação nas etapas de análise e validação técnica.

REFERÊNCIAS

- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 8 ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 7. ed. New York: Wiley, 2010.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2022. Brasília: EPE, 2022. Disponível VIII, <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 12 NOV 2025.
- IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. Advances in Small Modular Reactors. Vienna: IAEA, 2021. Disponível VIII, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf. Acesso em: 12 NOV 2025.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. World Nuclear Performance Report 2022. London: WNA, 2022. Disponível VIII, <https://aben.com.br/wp-content/uploads/2022/07/World-Nuclear-Performance-Report-2022.pdf>. Acesso VIII, 12 NOV 2025.
- BALESTIERI, J. A. P. A geração de energia no contexto da sustentabilidade. In: VILANOVA, M. R. N.; SHIINO, M. Y. (org.). Fronteiras da engenharia e ciências ambientais: perspectivas multidisciplinares. São Paulo: Editora UNESP, 2020. Disponível VIII, <https://books.scielo.org/id/7cnwy/pdf/vilanova-9786557140093-02.pdf>. Acesso em: 12 NOV 2025.
- SILVA, P. R. S. Avaliação de eficiência e desempenho de uma caldeira de recuperação de calor via simulações computacionais fora do ponto de projeto. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – COPPE/UFRJ, 2020. Disponível VIII, <http://hdl.handle.net/11422/21950>. Acesso em: 12 NOV 2025.
- BARBOSA, M. A. P.; THÉ PONTE, R. S.; RUFINO, M. G. Eficiência Energética em Caldeiras. In: Energia 2030 – Desafios para uma nova matriz energética, São Paulo, 2010.

Nov 2025.

CURCINO, G. M. A. Análise do Sistema Elétrico de uma Caldeira a Vapor. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/35801/1/AnaliseSistemaEletrico.pdf>.

Acesso em: 12 Nov 2025.

FERNANDES, J. R. Impacto do modelo matemático da caldeira na modelagem de usinas termoeletricas a vapor. Monografia – UDESC, 2014. Disponível em: <https://repositorio.udesc.br/handle/UDESC/13585>. Acesso em: 12 Nov 2025.

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Energia e Meio Ambiente no Brasil. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006.

KREITH, F.; GOSWAMI, D. Y. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Boca Raton: CRC Press, 2005.

ALLAM, R. J.; FETVEDT, J. E.; FURKESI, B. A.; FLEED, D. A. *The Oxy-Fuel, Supercritical CO₂ Alkam Cycle: NEW Cycle Developments to Produce Even Lower-Cost Electricity From Fossil Fuels Without Atmospheric Emissions*. In: ASME Turbo Expo 2014. Düsseldorf, 2014. DOI: 10.1115/GT2014-26952. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings/GT2014/45660/V03BT36A016/250224>. Acesso em: 14 nov. 2025.

BAZZO, E. *Geração de Vapor*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BHATT, A. et al. *EMISSION FACTORS OF INDUSTRIAL BOILERS BURNING BIOMASS-DERIVED FUELS*. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 13, n. 4 p. 241–257, 2023. DOI: 10.1080/10962247.2023.2166158. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/83308.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

BORGNAKKE, C.; SONNITAG, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica*. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

BUTELHO, IV. F. C.; BIFANO, H. IV. *Operação de Caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção*. São Paulo: Blucher, 2011.

DBDH – Danish District Heating Association. *Electrifying District Heating in the Ongoing Energy Transition*. Copenhagen, 11 dez. 2024. Disponível em: <https://dbdh.org/electrifying-district-heating/>. Acesso em: 14 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2024: ano-base 2023*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 14 nov. 2025.

Disponível em: <https://www.euroheat.org/dhc/knowledge-hub/solution-booklet-district-heating-and-cooling>. Acesso em: 14 nov. 2025.

FERNANDES, D.; WANG, S.; XU, Q.; BUSS, R.; CHEN, D. *Process and Carbon Footprint Analyses Of the Allam Cycle Power Plant Integrated with an Air Separation Unit*. Clean Technologies, v. 1 n. 1 p. 325–340, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8797/1/1/22>. Acesso em: 14 nov. 2025.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Small Modular Reactors (SMR)*. Vienna: IAEA, 2025. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>. Acesso em: 14 nov. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA/OECD, 24 out. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 14 nov. 2025.

IEA-ETSAP. *Coal-Fired Power (Technology Brief E01)*. Paris: IEA-ETSAP, 2010. Disponível em: <https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E01-coal-fired-power-GS-AD-gct.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

LOWTEMP PROJECT. *Power-to-Heat & Power-to-Gas in District Heating systems (Background Material)*. 2021. Disponível em: https://www.lowtemp.eu/wp-content/uploads/2021/01/BackgroundInfo_Power-to-Heat-and-POWER-TO-X_LowTEMP.pdf. Acesso em: 14 nov. 2025.

MORAN, IV. J.; SHAPIRO, H. P. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NRC – U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Pressurized Water Reactors (PWR)*. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reactors/power/pwrs>. Acesso em: 14 nov. 2025.

NUSSBAUMER, T. *LOW emission biomass combustion in automated boilers for heat and power*. IEA Bioenergy Task 32, 2024. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/09/Nussbaumer_IEA-Bioenergy-Task32-EMISSIONS-Report_2024_08_20.pdf. Acesso em: 14 nov. 2025.

PERA, P. *Geradores de Vapor de Água*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1966.

SOMOVA, E. V.; IUGOV, A. N.; IUMANOVSKII, A. G. *Modern Coal-Fired Power Units for Ultra-Supercritical Steam Conditions (Review)*. Thermal Engineering, v. 70, p. 81–96, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0040601523020064>. Acesso em: 14 nov. 2025.

FORREIRA, R. P. *Fluidos Térmicos*. Curitiba: Hemus, 2002.