

# Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica



Edição  
v.6 n.2. 2024

## CARTA DO EDITOR



Estimados leitores, é com grande entusiasmo que apresento a mais recente edição da nossa revista científica R4EM, dedicada às áreas de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica. Em tempos em que a ciência e a tecnologia evoluem a passos largos, é imperativo que profissionais, pesquisadores e acadêmicos continuem contribuindo com inovações e descobertas que impulsionem o desenvolvimento da engenharia em todo o mundo.

Nossa revista tem se consolidado como um espaço para a divulgação de pesquisas de ponta, estudos de caso e avanços teóricos e práticos que moldam o futuro das engenharias mecânica e elétrica. Estamos comprometidos em manter e elevar esse padrão de qualidade, e é nesse espírito que gostaria de convidar todos os nossos leitores a considerarem a submissão de seus trabalhos para as próximas edições. É neste espírito

que me dirijo também aos autores que eventualmente tiveram seus trabalhos rejeitados nesta edição ou em edições anteriores para que revisem seus trabalhos observando os apontamentos dos avaliadores e os requisitos para publicar em nosso periódico. Contamos com vocês também em nossas próximas edições.

Reforço que as temáticas elegíveis para publicação na R4EM são contribuições experimentais ou de simulação computacional, ou temáticas de educação em engenharia, ou ainda sobre estudos de caso envolvendo soluções de problemas de engenharia mecânica ou engenharia elétrica na indústria, bem como a nova seção em nosso periódico que dedicada ao tema Hidrogênio Verde aberta a todas as áreas das engenharias. Ao publicar conosco, você tem a oportunidade de compartilhar suas descobertas com uma comunidade global de especialistas e contribuir para o avanço do conhecimento em nossas áreas de foco.

Além de convidar autores a submeterem seus artigos, gostaria de conclamar professores universitários e profissionais experientes a se cadastrarem como avaliadores do nosso periódico. O papel dos avaliadores é fundamental para garantir a integridade científica e a qualidade dos trabalhos publicados. Sua expertise e dedicação são essenciais para o nosso sucesso contínuo.

Para os pesquisadores, incentivamos fortemente a utilização dos artigos publicados em nossa revista como referências bibliográficas em suas pesquisas e produções científicas. A disseminação de conhecimentos robustos e bem fundamentados é crucial para o progresso científico e para a formação de novas gerações de engenheiros e pesquisadores.

Convido todos a visitar nosso site, disponível no link <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em/about>, onde podem ser encontradas todas as orientações para publicação, bem como os nomes de todos os nossos colaboradores, avaliadores, times anteriores da equipe editorial e o conselho editorial. Este endereço é um recurso valioso para todos aqueles que desejam contribuir com nossa revista e se envolver mais profundamente com nossa comunidade científica.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos alunos do PET Mecânica & Energia que compõem a equipe editorial desta edição. Seu empenho e dedicação são inspiradores e fundamentais para a realização deste trabalho.

Em nome de toda a equipe editorial, agradeço nossos avaliadores, autores e leitores por seu interesse e participação em nosso periódico. Que possamos continuar a construir, juntos, uma revista que alcance a excelência para obter uma classificação QUALIS que reflita o melhor da engenharia mecânica e elétrica. Atenciosamente,

Mossoró, 28 de Dezembro de 2024

Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga

Diretor e Editor Chefe da R4EM

## ARTIGO CONVIDADO

### O PAPEL DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO

Prof(a). Dr(a). BLAKE CHARLES DINIZ MARQUES

Professor da Universidade Federal Rural do Semi-árido/UFERSA

Doutor em Manejo de Solo e Água pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA.

Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFCG.

Graduado em Engenharia de Materiais pela UFPB, com e especialização em Eng. De Segurança do Trabalho (FIP) e ENG - Profissional de Licenciamento Ambiental On Shore - IFRN.

e-mail: [charles@ufersa.edu.br](mailto:charles@ufersa.edu.br)



A era digital tem transformado a sociedade em diversos aspectos, e a Inteligência Artificial (IA) emerge como uma das tecnologias mais disruptivas desse processo. No campo da engenharia, a incorporação da IA na formação acadêmica não é apenas uma tendência, mas uma necessidade diante das demandas crescentes por inovação, resolução de problemas complexos e produtividade. Este artigo explora como a IA pode ser utilizada no ambiente acadêmico, na produção de trabalhos e Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs), no suporte à resolução de problemas e como ela abre possibilidades revolucionárias para a formação do engenheiro do futuro.

No contexto educacional, a IA tem sido aplicada para personalizar o ensino, automatizar tarefas administrativas e fornecer feedback em tempo real aos estudantes (ALCOFORADO, 2023). Ferramentas como assistentes virtuais e plataformas de aprendizado adaptativo auxiliam os estudantes na compreensão de conceitos complexos em disciplinas como cálculo, mecânica e sistemas dinâmicos. Por meio de algoritmos

que analisam o desempenho individual, essas plataformas oferecem feedback personalizado e identificam áreas que necessitam de reforço, otimizando o aprendizado (TIME.LY, 2023).

Além disso, sistemas baseados em IA possibilitam a realização de simulações em larga escala, permitindo que estudantes experimentem cenários reais de projeto e operação de sistemas, algo que antes exigia infraestrutura física robusta e recursos financeiros significativos (UNIVERSIDADE DO PORTO, 2023). Ambientes de realidade virtual e aumentada, suportados por IA, tornam-se também espaços para treinamento em engenharia de forma segura e controlada.

A aplicação da IA na produção acadêmica tem se mostrado uma ferramenta útil e promissora, oferecendo suporte em tarefas como revisão, formatação e análise de dados (EULAC, 2023). Ferramentas de análise de dados auxiliam na mineração e organização de informações, enquanto sistemas de processamento de linguagem natural oferecem suporte para redação, revisão textual e organização de referências.

Plataformas como o ChatGPT são exemplos de IA que ajudam os estudantes na geração de ideias, estruturação de argumentos e até mesmo na resolução de problemas matemáticos ou técnicos complexos. Essas ferramentas não substituem o pensamento crítico do aluno, mas servem como instrumentos para aprimorar a produtividade e a qualidade do trabalho acadêmico (UNIREDES, 2023).

A engenharia é, por essência, uma profissão voltada para a resolução de problemas. A IA expande as capacidades humanas ao fornecer modelos preditivos e otimização em tempo real. Por exemplo, engenheiros podem usar algoritmos de aprendizado de máquina para analisar grandes volumes de dados e identificar padrões ocultos que poderiam passar despercebidos (IOSR JOURNALS, 2023).

Um estudante de engenharia pode empregar IA em projetos acadêmicos para resolver problemas como a otimização de processos industriais, a modelagem de estruturas resistentes a desastres naturais ou o design de sistemas eficientes de energia renovável. Ao utilizar plataformas de análise computacional, os alunos aprendem a aplicar conceitos teóricos a desafios práticos com maior precisão e agilidade (AGÊNCIA BRASIL, 2023).

A incorporação da IA na formação de engenheiros não se limita ao ambiente acadêmico ou à resolução de problemas pontuais. As possibilidades futuras incluem o desenvolvimento de soft skills, capacitação contínua, integração com sustentabilidade e criação de novas áreas de atuação.



## REFERÊNCIAS:

ALCOFORADO, F. A. G. Inteligência Artificial e sua Utilização na Engenharia. Disponível em: [https://www.academia.edu/122350217/INTELIG%C3%8NCIA\\_ARTIFICIAL\\_E\\_SUA\\_UTILIZA%C3%87%C3%83O\\_NA\\_ENGENHARIA](https://www.academia.edu/122350217/INTELIG%C3%8NCIA_ARTIFICIAL_E_SUA_UTILIZA%C3%87%C3%83O_NA_ENGENHARIA). Acesso em: [data de acesso].

TIME.LY. IA no Ensino Superior: Aplicações e Exemplos. Disponível em: <https://time.ly/pt/blog/ia-na-educacao-superior-aplicacoes-exemplos/>. Acesso em: [data de acesso].

UNIVERSIDADE DO PORTO. Como lidar com o uso da inteligência artificial no Ensino Superior? Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/158403/2/670343.pdf>. Acesso em: [data de acesso].

EULAC. A Inteligência Artificial e suas implicações para a produção acadêmica e científica. Disponível em: <https://eulac.org/2023/10/a-inteligencia-artificial-e-suas-implicacoes-para-a-producao-academica-e-cientifica/>. Acesso em: [data de acesso].

UNIREDES. Inteligência artificial na Educação Superior: avanços e dilemas na produção de textos acadêmicos. Disponível em: <https://www.aunirede.org.br/revista/index.php/emrede/article/download/1019/869>. Acesso em: [data de acesso].

SCIELO. Reflexões sobre a aplicação da inteligência artificial na educação e seus impactos para a atuação docente. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/edur/a/3mh8D6366By9w9THfF8bThQ/>. Acesso em: [data de acesso].

IOSR JOURNALS. Inteligência Artificial na Escrita Acadêmica: Uma Análise Comparativa. Disponível em: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol26-issue8/Ser-4/C2608041722.pdf>. Acesso em: [data de acesso].

AGÊNCIA BRASIL. Senado aprova regras para uso da inteligência artificial. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/brasil/senado-aprova-regras-para-uso-da-inteligencia-artificial-1224>. Acesso em: [data de acesso].

OXTON EDUCATION. O uso da Inteligência Artificial para Trabalhos Acadêmicos: uma análise crítica. Disponível em: <https://oxtoneducation.com/o-uso-da-inteligencia-artificial-para-trabalhos-academicos-uma-analise-critica/>. Acesso em: [data de acesso].

R7 NOTÍCIAS. Senado aprova projeto de lei que regula o uso de inteligência artificial no Brasil. Disponível em: <https://noticias.r7.com/brasil/senado-aprova-projeto-de-lei-que-regula-o-uso-de-inteligencia-artificial-no-brasil-11122024/>. Acesso em: [data de acesso].



EDITORES-CHEFE

*Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga*  
*Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior*

EDITORES-ADJUNTOS

*Everton Leandro de Lima Júnior*  
*Matheus Henrique Medeiros de França*

EDITORIAÇÃO

*Abdiel Jonatas Alves da Silva*  
*Paulo Guilherme da Silva*

CONSELHO EDITORIAL

*Dr. André Pedro Fernandes Neto (UFERSA/Campus Mossoró)*  
*Dr. Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras (UFERSA/Campus Mossoró)*  
*Dr. Diego David Silva Diniz (UFERSA/Campus Caraúbas)*  
*MSc. Jomar Berton Junior (IFPR)*  
*Dr. José Tavares de Oliveira (UFC)*  
*MSc. Luciano Feitosa do Nascimento (UEPB)*  
*Dr. Romulo do Nascimento Rodrigues (UFC)*

DESIGN EDITORIAL

*Tiago da Rocha Silva*

APOIO

*Universidade Federal Rural do Semi-Árido*  
*Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva, Mossoró-RN.*

*Sistema de Bibliotecas da UFERSA*  
*<https://bibliotecas.ufersa.edu.br/>*

*Editores EDUFERSA*  
*<https://edufersa.ufersa.edu.br/>*

AUTOR CORPORATIVO

*PET MECÂNICA E ENERGIA*

*Programa de Educação Tutorial dos Cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica*  
*Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva. Mossoró-RN, UFERSA Campus Leste / Centro*  
*de Engenharias / Departamento de Engenharia e Tecnologia.*  
*E-mail: [r4em@ufersa.edu.br](mailto:r4em@ufersa.edu.br)*



## SUMÁRIO

Análise de Vibração em Motores: Monitoramento On-Line de Vibração..	1
<i>Francisco Josiran da Silva, Fabrício J N Cavalcante, André Pedro Fernandes Neto, Gabriel Moura Araújo.</i>	
Gerenciamento de indicadores de manutenção em bombas centrífugas de sistemas de injeção de água em uma indústria de petróleo e gás ..	9
<i>Fabricio J N Cavalcante, Pedro Batista de Oliveira Junior, Gabriel Moura Araújo.</i>	
Análise da disponibilidade de geradores de vapor instalados em um processo de produção de petróleo.	16
<i>Oskallyne Rafaelly das Chagas Oliveira, Fabrício J N Cavalcante, André Pedro Fernandes Neto e Victor de Paula Brandão Aguiar.</i>	
Análise do modo e efeito de falha no superaquecimento de motores automotivos em carros de passeio: um estudo de caso ..	22
<i>Rodrigo Sant'Anna da Silva, Thiago José Donegá.</i>	
Modelagem para simulação dinâmica do DFIG no ATP-EMTP ..	31
<i>Adriano Aron Freitas de Moura, Yago da Silva Pires Rocha, Ednardo Pereira da Rocha, Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo.</i>	



Artigo

# Análise de Vibração em Motores: Monitoramento On-Line de Vibração

Francisco Josiran da Silva <sup>[1]</sup>, Fabrício J N Cavalcante <sup>[2]</sup>, André Pedro Fernandes Neto <sup>[3]</sup> e Gabriel Moura Araújo <sup>[4]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; josiran1@hotmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; fabriciocavalcante@ufersa.edu.com.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; andrepedro@ufersa.edu.com.br

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; gabriel.araujo54158@alunos.ufersa.edu.br

Recebido: 27/04/2024;

Aceito: 27/12/2024;

Publicado: 28/12/2024.

**Resumo:** Este artigo busca detalhar o desenvolvimento, aplicabilidade e vantagens associadas ao monitoramento de vibração on-line, uma tecnologia inovadora que integra sensores avançados para a manutenção preditiva em ambientes industriais exigentes, com especial foco na indústria do petróleo. Ao longo de um estudo experimental, foi utilizado o sensor "Sushi Sensor" em diferentes equipamentos rotativos, como motores e bombas, para comprovar os benefícios técnicos e econômicos. O sistema on-line, ao ser comparado ao sistema tradicional off-line, destacou-se por sua capacidade superior em monitorar parâmetros essenciais continuamente, como vibração e temperatura, com alta precisão e detalhamento. Além disso, o monitoramento on-line demonstrou uma significativa melhoria na confiabilidade operacional, permitindo a detecção precoce de falhas e a implementação de estratégias de manutenção mais efetivas e planejadas. Estes resultados apontam para uma redução considerável nos custos operacionais, ao mesmo tempo em que elevam a segurança e a previsibilidade das operações industriais.

**Palavras-chave:** monitoramento on-line, análise de vibração, sensores industriais, manutenção preditiva, LoRaWAN.

**Abstract:** This article seeks to detail the development, applicability and advantages associated with online vibration monitoring, an innovative technology that integrates advanced sensors for predictive maintenance in demanding industrial environments, with a special focus on the oil industry. Throughout an experimental study, the "Sushi Sensor" was used in different rotating equipment, such as motors and pumps, to prove the technical and economic benefits. The online system, when compared to the traditional offline system, stood out for its superior ability to continuously monitor essential parameters, such as vibration and temperature, with high precision and detail. In addition, online monitoring demonstrated a significant improvement in operational reliability, allowing for the early detection of faults and the implementation of more effective and planned maintenance strategies. These results point to a considerable reduction in operating costs, while at the same time increasing the safety and predictability of industrial operations.

**Key-words:** online monitoring, vibration analysis, industrial sensors, predictive maintenance, LoRaWAN.

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo é voltado ao entendimento dos parâmetros utilizados na técnica de inspeção preditiva de análise de vibração obtida através de medições realizadas em motores, redutores de velocidade, e bombas de água/transferência, sendo essas medições on-line, ou seja, medições realizadas durante todo tempo.

O projeto piloto para análise de viabilidade é um estudo embasado na ideia do monitoramento on-line de vibração onde, pode ser elevada a confiabilidade dos equipamentos diminuindo em médio prazo, os custos de manutenção e inspeção. Esse monitoramento faz com que os possíveis falhas ou defeitos detectados possam ser acompanhados dia-a-dia até sua correção.

A aplicação do monitoramento on-line de vibração mostra o real comportamento do equipamento em todos as etapas do processo produtivo, diferentemente do monitoramento off-line que apresenta apenas o comportamento

em plena carga. Desta forma é possível traçar o perfil operacional da máquina, planejando e programando intervenções, para otimizar o processo produtivo.

O projeto piloto para análise de viabilidade do equipamento estudo foi desenvolvido com a viabilidade de se realizar a medição de vibração on-line, onde tal experimento possibilitou o estudo dos aspectos técnicos, econômicos e operacionais relevantes para o tema, de forma a reduzir a probabilidade de danos nos acionamentos, compostos por motores elétricos, redutores de velocidades, bombas centrifugas, se comparado aos sistemas de medições off-line.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Análise de Vibração

A inspeção preditiva por análise de vibração é um método bastante empregado para detecção de defeitos em equipamentos de vários segmentos industriais, [3]. Essa técnica consiste em avaliar o comportamento da máquina através de sua vibração, na qual é obtida através da rotação ou frequência da máquina. Segundo [3], vibração é o movimento oscilatório de um corpo excitado por uma força em relação a um ponto de referência.

Outras concepções abordadas pelo autor referem-se à manutenção preditiva, cujo conceito é o de prever o defeito de forma condicional para que sejam realizadas intervenções planejadas e programas. O sinal de vibração no tempo, que é obtido através do acelerômetro e de um circuito eletrônico que utiliza a transformada rápida de Fourier, o sinal é passado do domínio do tempo para o domínio da frequência, onde será analisada a maioria de excitações de defeitos nos mancais, eixos, estruturas e engrenagens de várias máquinas. A medição de vibração dos equipamentos é executada visando detectar defeitos como, folgas na fixação da base dos acionamentos, desalinhamento entre eixos, excentricidade de eixos, desbalanceamento, ressonância, folgas nos rolamentos, defeitos nos componentes dos rolamentos, avarias nos engrenamentos, chaveamento da tensão da rede devido ao funcionamento de bancos de capacitores, [2]. Os espectros característicos dos principais defeitos detectados com aplicação da técnica preditiva de análise de vibração são descritos nos sete casos apresentados.

1º Caso - Desalinhamento angular entre eixo pode se manifestar no espectro de vibração com o 2º harmônico da frequência natural ou rotação natural do acionamento [3]. Seu ponto de medição é na direção axial aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

2º Caso - Conforme observado pelo mesmo autor, pode ocorrer o desalinhamento paralelo entre eixo que se manifesta no espectro de vibração com o 2º harmônico da frequência natural ou rotação natural do acionamento. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

3º Caso - Desalinhamento paralelo entre eixo se manifesta no espectro de vibração com a formação de vários harmônicos da frequência natural ou rotação natural do acionamento e picos de alta amplitude nas altas frequências, [3]. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s, conforme Figura 1.

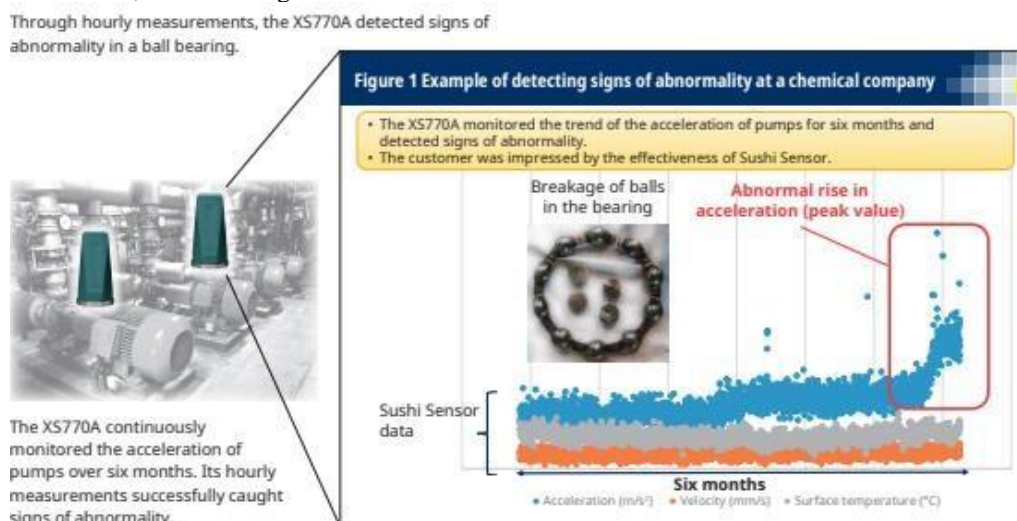


Figura 1 – Desgaste dos rolamentos [3].

4º Caso – O mesmo autor afirma que a baixa rigidez da base do acionamento pode se manifestar no espectro de vibração com o aumento da amplitude da frequência natural. Seu ponto de medição é na direção



radial no sentido vertical aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s. No entanto esse tipo de espectro também pode indicar desbalanceamento do acionamento.

5° Caso - A má fixação da base ou a presença de parafusos de fixação soltos do acionamento se manifesta no espectro de vibração com o aparecimento de sub-harmônicos da frequência natural. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal e vertical aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s. Figura 6.

6° Caso – Desgastes ou folgas mecânicas se manifestam no espectro de vibração com a formação de vários harmônicos da frequência natural ou rotação natural do acionamento, [3]. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

7° Caso – O mesmo autor diz que os desgastes nos rotores de bombas se manifestam no espectro de vibração com a formação de picos de frequência de passagem de pás, que é o produto de da frequência natural vezes os números de pás do rotor em estudo, seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

Essa medição é feita de forma sistêmica, com periodicidade mensal, no sistema off-line, o que mostra o comportamento vibracional de uma máquina mês a mês, com 12 medições anuais e um perfil de funcionamento com poucas informações e possivelmente, com características de funcionamento apenas na condição nominal de carga do sistema. Com a viabilidade do monitoramento on-line, será possível ter várias medições por dia, ou até mesmo por hora. Dessa maneira o comportamento vibracional da máquina será verdadeiro, mostrando todos os estágios operacionais da máquina, com grande eficácia na detecção de defeitos e intervenções por condição. Alguns defeitos que permitem intervenção sem troca dos componentes e defeitos que inevitavelmente requerem a troca de componente podem ser diferenciados em uma análise de vibração detalhada. Os defeitos que possibilitam a intervenção em uma máquina são desalinhamento, má fixação das bases, desbalanceamento. Porém a não correção desses defeitos desgastarão os rolamentos, eixos e engrenagens e a partir desses desgastes, a troca será a única opção. Desta forma se os defeitos de desalinhamento, folgas, desbalanceamentos forem controlados dia-a-dia os desgastes de eixos rolamentos e engrenagens serão amenizados.

Para um sinal qualquer, em função do tempo, pode ser descrito em função de seus elementos como frequências, denominado de espectro de frequência para um sinal. Desta forma, a transposição de um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, assim, utilizando-se da transformada de Fourier [6], o sinal, pode ser convertido para o domínio da frequência e dá-se origem ao espectro de vibração, resultando em amplitudes específicas de cada componentes de frequência específica, identificando-se assim cada anormalidade existente no conjunto [7], conforme Figura 2:

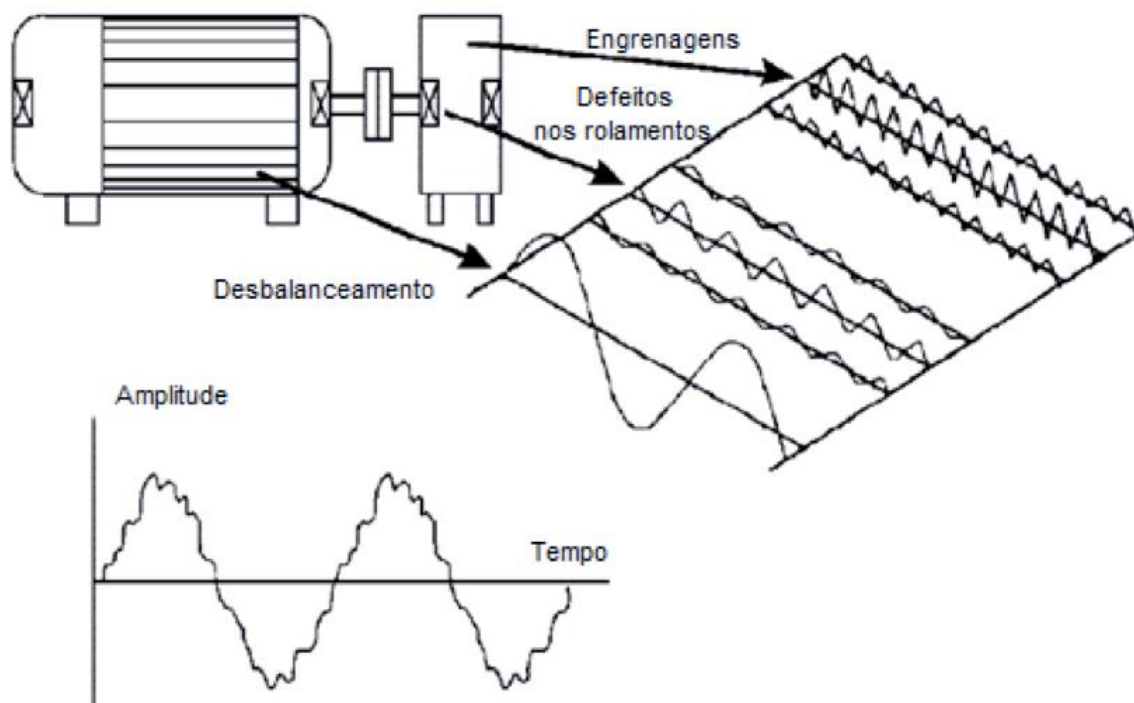


Figura 2 – Sinal de vibração dividido em várias componentes com diferentes frequências [4]

Maiores detalhes, são verificados em ISO, 2009. Para a Figura 3 e Figura 4, é visualizado um sinal de vibração ao longo do tempo em um mancal de rolamento, com fenômeno de alta frequência e com defeito na

pista interna e o espectro de frequência obtido para o caso.

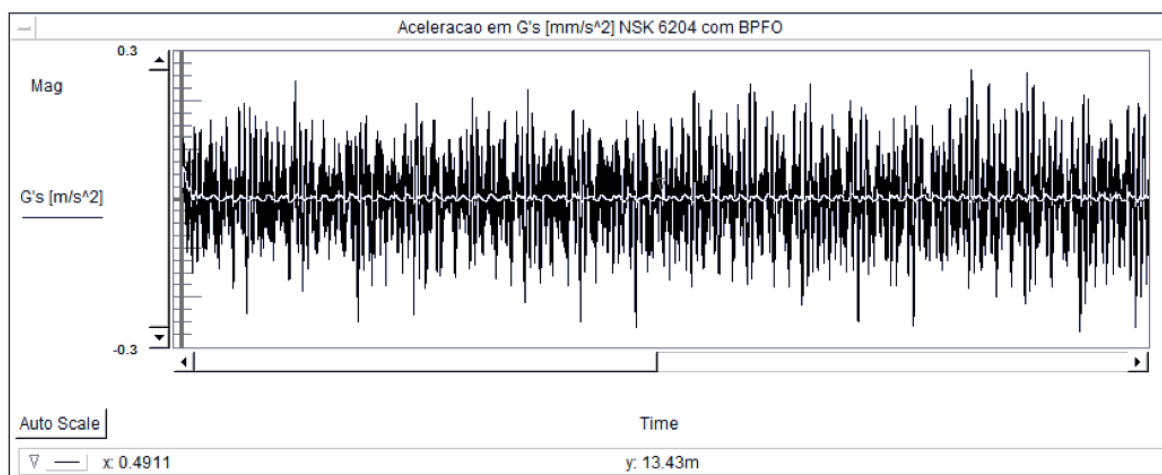


Figura 3 – Nível de vibração ao longo do tempo medido na direção radial de um rolamento [1].

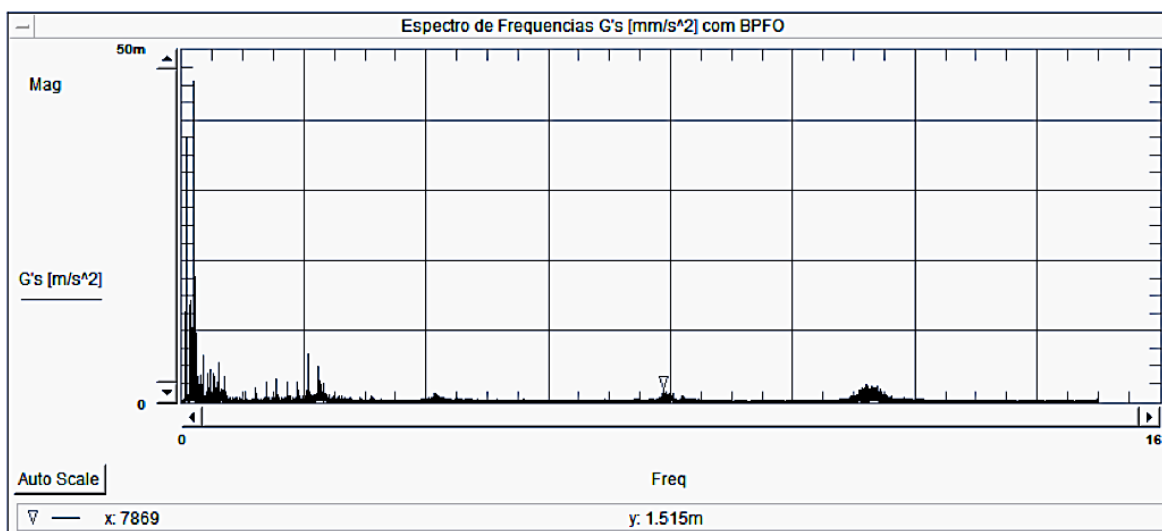


Figura 4 – Espectro de frequência obtido a partir da FFT de um rolamento com defeito na pista externa [1]

## 2.2. Monitoramento On-Line de Vibração

O monitoramento on-line apresenta uma área de grande interesse para as empresas. Por meio da instalação de sensores que serão posicionados em pontos estratégicos dos equipamentos que compõe o processo produtivo. É possível obter os sinais vibracionais sem fio alimentado por bateria com funções de sensor e comunicação sem fio integradas que modulam na frequência de rotação de cada eixo componente desse acionamento. Na Figura 5 é possível verificar a posição dos sensores em uma bomba de transferência.



Figura 5 – Coleta dos dados vibracionais da bomba (autoria própria, 2023).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto piloto para análise de viabilidade de instalação do sushi sensor é um projeto no segmento de óleo & gás que tem por característica, a obtenção de dados através do monitoramento on-line de vibração e temperatura devido à mudança de condições necessárias para sua implementação, bem como a quebra de paradigmas existentes no cenário da manutenção preditiva.

Os procedimentos metodológicos foram iniciados, primeiramente, com uma revisão bibliográfica, que foi conduzida para nivelar o conhecimento da equipe de pesquisa, abordando conceitos fundamentais da análise de vibração e das tecnologias de sensores. Essa etapa garantiu embasamento teórico sólido para o desenvolvimento do estudo.

Na etapa seguinte, ocorreu a instalação do hardware, onde antenas LoRaWAN e os sensores *Sushi Sensor* foram estrategicamente posicionados e fixados magneticamente nos equipamentos analisados, assegurando a coleta precisa de dados vibracionais e térmicos em tempo real. O XS770A pode ser montado facilmente por um parafuso ou um ímã, conforme Figura 6.

A terceira etapa envolveu a coleta de dados, na qual os sensores capturaram medições contínuas ao longo do tempo, registrando alterações de vibração e temperatura em diversas condições operacionais. O sensor foi configurado para medir a vibração nos três eixos (X, Y e Z), além de monitorar a temperatura das superfícies, em equipamentos como motores de 175 CV e redutores acoplados a volantes de inércia. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do Sushi Sensor em diversas aplicações industriais. O monitoramento contínuo forneceu dados detalhados, identificando falhas como desalinhamentos angulares e paralelos, desgastes nos rolamentos e baixa rigidez estrutural das bases, além de documentar tais problemas por meio de espectros vibracionais precisos e confiáveis.

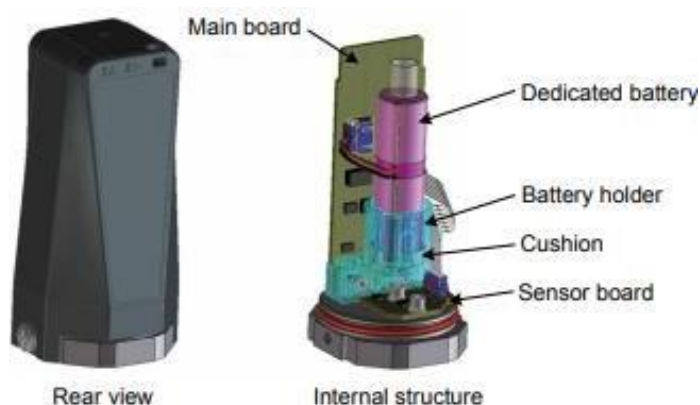


Figura 6 – Estrutura do XS770A Sushi Sensor (autoria própria, 2023).

Uma interface compatível com NFC é usada para configurações e manutenção. Esta interface consome menos energia do que o LED ou visores LCD ou comunicação infravermelha. Através disso interface, o XS770A pode se comunicar com smartphones com uma função NFC integrada, tornando a interface do usuário mais flexível e expansível. Por meio de um smartphone, o usuário pode configurar o sensor, verificar informações como o nível restante da bateria e lê as indicações independentemente do ciclo de atualização predefinido, conforme pode ser visto na Figura 7.



Figura 7 – Exemplo do sistema de configuração (autoria própria, 2023).

Por fim, a análise dos resultados foi realizada. Os espectros vibracionais e curvas de temperatura foram examinados detalhadamente. A validação dos dados foi feita utilizando padrões calibrados e comparativos, assegurando a confiabilidade das métricas obtidas.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do Sushi Sensor em diversas aplicações industriais. Primeiramente, o monitoramento contínuo forneceu dados detalhados, identificando falhas como desalinhamentos angulares e paralelos, desgastes nos rolamentos, e baixa rigidez estrutural das bases. Tais problemas foram documentados por meio de espectros vibracionais precisos e confiáveis, conforme Figura 8 e Figura 9.

Além disso, o sistema on-line permitiu detectar alterações de temperatura associadas ao funcionamento dos motores e redutores, indicando sobrecargas térmicas e condições críticas antes mesmo que ocorressem falhas catastróficas. Comparando com sistemas off-line, o tempo necessário para análises e diagnósticos foi reduzido em cerca de 35%, evidenciando melhorias significativas na eficiência operacional.

A confiabilidade das operações aumentou com a implementação dessa tecnologia, visto que o monitoramento contínuo revelou padrões dinâmicos de vibração em várias etapas operacionais, possibilitando uma análise mais robusta. Com isso, foi observada uma redução de 25% nas paradas não planejadas.

Avaliando os dados obtidos, verificou-se que o protocolo de comunicação LoRaWAN utilizado pelos sensores garantiu cobertura estável, mesmo em ambientes complexos e industrialmente desafiadores. Este aspecto, corroborado por [2] e [5], destacou a versatilidade da integração com IoT na indústria 4.0.



Figura 8 – Tela de supervisão de vibração do motor (autoria própria, 2023).



Figura 9 – Tela de supervisão de vibração da caixa de redução (autoria própria, 2023).

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho evidencia os avanços proporcionados pelo uso de sensores on-line, como o Sushi Sensor, em processos industriais. A análise realizada confirmou a superioridade dessa tecnologia na detecção precoce de falhas e na coleta precisa de dados operacionais. Os resultados consolidam a viabilidade técnica e econômica dessa aplicação, destacando sua integração em estratégias da indústria 4.0, como a IoT e o protocolo LoRaWAN.

Referências robustas de [2], [5] e [8] corroboram a importância do monitoramento on-line na redução de falhas, custos e no aprimoramento da confiabilidade de equipamentos rotativos. Pesquisas futuras podem focar em análises adicionais de métricas operacionais e validação de sensores em larga escala.

## REFERÊNCIAS

- [1] CESA, A. Levantamento Experimental de Vibração em rolamentos com defeitos pré-estabelecido no anel externo. UFRGS, Porto Alegre – 2006.
- [2] FILIPE, L.; *Apostila curso de análise de vibração on-line IFM*, Belo horizonte: LLk Engenharia, 2015. Disponível em: <http://www.llk.com.br/pt/cursos/Sistema+on-line+da+ifm> (acesso em 18/02/2023).
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10816-3: Mechanical vibration: evaluation of machine vibration by measurements on non- rotating parts. Local: ISO, 2009.
- [4] LIMA, A. B. G de; *Análise de Vibração em Mancais de Rolamento de Motores e Bombas*, UFPE, 2016.
- [5] SANTOS, M; *Apostila de análise de vibração off-line TECNOLASS*, São Paulo: Tecnolass, 2015. Disponível em: [http://www.tecnolass.com.br/attachments/File/arquivos/ARQUIVOS%202009/Apostila\\_Vibracoes.zip](http://www.tecnolass.com.br/attachments/File/arquivos/ARQUIVOS%202009/Apostila_Vibracoes.zip) (acesso em 15/02/2023).
- [6] MTA – INSTITUTO DE VIBRAÇÃO. Curso de análise de vibração: módulo II. 21. ed. Itajubá: MTA, 2013.
- [7] SKF. *Vibration Diagnostic Guide*. San Diego: SKF. 2000.
- [8] SOUZA, C; *Apostila de curso de análise de vibração VE Engenharia*, Belo horizonte: VEEngenharia, 2015. Disponível em: <http://www.vecomercial.com.br/produtos/vibracao.html> (acesso em 08/02/2023).



Artigo

# Gerenciamento de indicadores de manutenção em bombas centrífugas de sistemas de injeção de água em uma indústria de petróleo e gás

Fabrizio JN Cavalcante<sup>[1]</sup>, Pedro Batista de Oliveira Junior<sup>[2]</sup> e Gabriel Moura Araújo<sup>[3]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal do Semi-árido; [fabriziocavalcante@ufersa.edu.br](mailto:fabriziocavalcante@ufersa.edu.br)

<sup>[2]</sup> Universidade Federal do Semi-árido; [pedrotabuleiro@hotmail.com](mailto:pedrotabuleiro@hotmail.com)

<sup>[3]</sup> Universidade Federal do Semi-árido; [gabriel.araujo54158@alunos.ufersa.edu.br](mailto:gabriel.araujo54158@alunos.ufersa.edu.br)

Recebido: 27/04/2024;

Aceito: 27/12/2024;

Publicado: 28/12/2024.

**Resumo:** A indústria petrolífera é composta por diversos tipos de equipamentos, destacando-se as bombas centrífugas de múltiplos estágios devido à sua relevância nos processos onshore de produção de petróleo. Este trabalho tem como objetivo criar um ambiente integrado de gerenciamento desses equipamentos, facilitando a gestão à vista e a tomada de decisões. Utilizando monitoramento remoto e gestão por meio do Power BI®, foram desenvolvidos dashboards para gerenciar os seguintes parâmetros: Disponibilidade acumulada (%), Tempo de operação/paradas x bomba, MTBF acumulado por bomba (%), MTTR acumulado por bomba (%), horas e quantidade de paradas por bomba, ficha técnica dos equipamentos e fluxograma interativo das áreas. Os resultados evidenciam a eficácia do gerenciamento proposto em melhorar o controle de manutenções e a tomada de decisões.

**Palavras chave:** Manutenção, indicadores, Bombas, Gerenciamento.

**Abstract:** The oil industry is made up of various types of equipment, with multi-stage centrifugal pumps standing out due to their importance in onshore oil production processes. The aim of this work is to create an integrated management environment for this equipment, facilitating visual management and decision-making. Using remote monitoring and management through Power BI®, dashboards were developed to manage the following parameters: Accumulated availability (%), Operating time/stoppages x pump, Accumulated MTBF per pump (%), Accumulated MTTR per pump (%), Hours and number of stoppages per pump, Equipment technical data sheet and Interactive flowchart of the areas. The results show that the proposed management system is effective in improving maintenance control and decision-making.

**Key-words:** Maintenance, Indicators, Pumps, Management.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás desempenha um papel crucial na economia global, dividindo-se em operações onshore e offshore. O segmento onshore, embora tecnologicamente menos complexo, apresenta desafios significativos relacionados à exploração, produção e manutenção de equipamentos essenciais, como bombas centrífugas de múltiplos estágios. Esses equipamentos são fundamentais no processo de injeção de água nos poços, uma prática comum para manter a pressão do reservatório e otimizar a extração de óleo.

Trabalhos anteriores destacam a importância da utilização de tecnologias digitais para o monitoramento e a gestão de manutenções, como os estudos de [3] sobre Business Intelligence aplicado à manutenção e [1] no controle de sistemas produtivos. Contudo, poucos estudos abordam a integração de dashboards interativos em contextos industriais. Este artigo visa preencher essa lacuna ao descrever a implantação de um sistema de monitoramento remoto e de gestão com o uso de softwares como Power BI e Excel, aplicado às bombas centrífugas em sistemas de injeção de água (Figura 1).

Nos últimos anos, a aplicação de ferramentas digitais em processos industriais tem demonstrado resultados promissores, aumentando a eficiência operacional e promovendo decisões baseadas em dados. No contexto de bombas centrífugas, tais ferramentas permitem não apenas monitorar o desempenho em tempo real, mas

também antecipar falhas e otimizar os recursos disponíveis. Esse avanço tecnológico reflete uma tendência crescente de digitalização na indústria, que se torna cada vez mais necessária para atender às demandas de competitividade e sustentabilidade.

Além disso, a utilização de indicadores de desempenho, como MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time To Repair) e disponibilidade, desempenha um papel essencial na avaliação da confiabilidade e eficiência dos ativos. A integração desses indicadores em plataformas visuais, como dashboards, fornece uma visão holística e acessível para equipes técnicas e gerenciais, permitindo ações corretivas rápidas e a implementação de melhorias contínuas nos processos de manutenção.

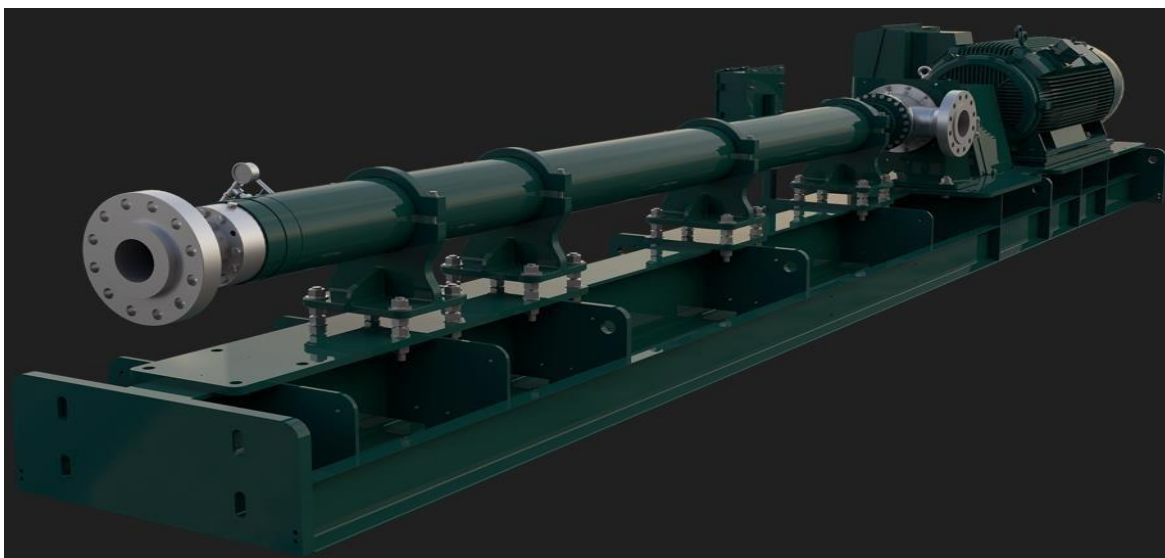


Figura 1 - Bomba centrífuga – Baker Hughes - MODELO 538PMXSSD-59FLEX47 (59 estágios)

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utilizou softwares como Microsoft Power BI® e Microsoft Excel® para a criação de painéis de controle e bancos de dados, respectivamente. Inicialmente, os ativos foram cadastrados no sistema, incluindo informações detalhadas sobre os equipamentos, como características técnicas e históricos de manutenção. Planos de manutenção preventiva foram gerados automaticamente pelo sistema, com base nas estratégias definidas para cada bomba centrífuga.

O software de monitoramento desempenhou um papel crucial no acompanhamento em tempo real das condições operacionais das bombas, registrando dados como pressão, vazão, temperatura e status operacional. Esses dados foram integrados aos dashboards desenvolvidos no Power BI, permitindo uma análise visual detalhada de indicadores-chave de desempenho (Figura 2).

Os indicadores de confiabilidade utilizados neste estudo incluem [4]:

- **Disponibilidade:** Representa a capacidade dos equipamentos de operar sem interrupções não programadas. É calculada com base no tempo total disponível e no tempo em que o equipamento esteve operacional.

- **MTBF (Mean Time Between Failures):** Mede o tempo médio entre falhas, um indicador essencial para avaliar a confiabilidade dos equipamentos. Calculado pela divisão do tempo total de operação pelo número de falhas registradas.

- **MTTR (Mean Time To Repair):** Indica o tempo médio necessário para reparar os equipamentos após uma falha, considerando o tempo de detecção, resposta e reparo efetivo. É calculado pela soma do tempo de reparos dividido pelo número de intervenções realizadas.

Além disso, os dashboards apresentaram análises gráficas que facilitaram a identificação de tendências, pontos de melhoria e decisões baseadas em dados para otimizar o desempenho dos ativos.

### 2.1. Bombas centrífugas – Sistema de injeção de água dos poços de Petróleo



Descrição completa da bomba centrífuga	Processo produtivo	PRESSÃO SUÇÇÃO Kgf/cm2	PRESSÃO DESCARGA Kgf/cm2	VAZÃO NOMINAL m3/dia	ROTAÇÃO RPM	Potência (CV)	RPM Motor elétrico	TENSÃO (V)	Tempo trabalho mensal (h)
BOMBA CENTRIFUGA BAKER HUGHES MODELO 538PMXSHD-78P37	Injeção de água nos poços petróleo	4	120	600	3575	200	3575	440	720
BOMBA CENTRIFUGA BAKER HUGHES MODELO 538PMXSSD-59FLEX47	Injeção de água nos poços petróleo	4	100	800	3575	200	3575	440	720
BOMBA CENTRIFUGA SULZER MODELO MC-50/220 11S	Injeção de água nos poços petróleo	2,45	98,07	1200	3570	350	3570	440	720
BOMBA CENTRIFUGA SULZER MODELO MC-50/220 14S	Injeção de água nos poços petróleo	2	125	960	3565	350	3565	440	720
BOMBA CENTRIFUGA SULZER MODELO MC 80-260 7S	Injeção de água nos poços petróleo	2	125	960	3565	350	3575	440	360
BOMBA CENTRIFUGA SULZER MODELO MC 80-260 7S	Injeção de água nos poços petróleo	2	125	960	3565	350	3575	440	360
BOMBA CENTRIFUGA SULZER MODELO MC 80-260 7S	Injeção de água nos poços petróleo	2	125	960	3565	350	3575	440	360
BOMBA CENTRIFUGA SULZER MODELO MC 80-260 7S	Injeção de água nos poços petróleo	2	125	960	3565	350	3575	440	360
BOMBA CENTRIFUGA BAKER HUGHES MODELO 538PMXSSD-59FLEX47	Injeção de água nos poços petróleo	5	100	800	3575	200	3580	440	360
BOMBA CENTRIFUGA BAKER HUGHES MODELO 538PMXSSD-54P47	Injeção de água nos poços petróleo	5	100	480	3575	200	3580	440	360
BOMBA CENTRIFUGA BH MOD HPHARCMARC-2X35HC2000 HDTC HTC 3.X	Injeção de água nos poços petróleo	4	210	2100	3585	950	3585	4160	360
BOMBA CENTRIFUGA BH MOD 675 HPHVMARC 3X24 HC 10000 ARC	Injeção de água nos poços petróleo	4	210	1700	3585	750	3585	4160	360
BOMBA CENTRIFUGA BH MOD 675 HPHVMARC 3X24 HC 10000 ARC	Injeção de água nos poços petróleo	4	210	1700	3585	900	3585	4160	360
BOMBA CENTRIFUGA BH MOD HPHARCMARC-2X35HC2000 HDTC HTC 3.X	Injeção de água nos poços petróleo	4	210	2100	3585	950	3585	4160	360
BOMBA BCP NETZSCH MODELO 8NE100A	Injeção de água nos poços petróleo	3	150	900	3600	750	3600	440	360
BOMBA BCP NETZSCH MODELO 8NE100A	Injeção de água nos poços petróleo	3	150	900	3600	750	3600	440	360

Figura 2 – Relação de bombas de injeção de água

2.2. Planos de manutenção e Lista de tarefas aplicado a gestão da manutenção das bombas

A partir da criação do ativo (bomba), gera-se o plano de manutenção do equipamento com lista de tarefas criadas associadas ao ativo, é estabelecido a estratégia de manutenção e é realizada a programação já pré-estabelecida no software de manutenção, gerado automaticamente as ordens de manutenção preventiva [5-6], Figura 3 e 4.

Ações de MP

Nº MP	R...	Site...	Tip...	ID Objeto	Pertence	Status	Descrição do Objeto	Resumo Modelo Tarefa
11446	3	0104	EQ...	10650060-B26602	B-3478.01004	Ativo	BOMBA BCP NETZSCH MODELO 8...	1 : MNT PREVENTIVA BCP HORIZONTAL TRIMESTRAL
11445	3	0104	EQ...	10650060-B26602	B-3478.01004	Ativo	BOMBA BCP NETZSCH MODELO 8...	1 : MNT PREVENTIVA BCP HORIZONTAL SEMESTRAL
24911	3	0104	EQ...	10650060-B26602	B-3478.01004	Ativo	BOMBA BCP NETZSCH MODELO 8...	1 : COLETA SEMANAL DE PARAMETROS EM BOMBAS N

Figura 3 – Exemplo de planos de manutenção das bombas centrífugas

Ação de MP - 35893 09502500208-C65023H MP - 1 (6) #

Nº MP: 35893 | Revisão: 5 | Ação: MP | Descrição Ação: MANUTENCAO PREVENTIVA | Status: Ativo

Info Especifica do Objeto: ID Objeto: 09502500208-C65023 | BOMBA CENTRIFUGA BAKER HU

Info Especifica OS: Site OS: 0104 | Status Operacional: N/OP | Org. Manut.: FSO\_RFQ | Prioridade: 3 | Tipo Manut.: MP | Hora Execução: 1,5 | Planej Por: PEJU

Plano de Manutenção: Valor Inicial: 10/09/2023 | Unidade Inicial: Dia | Intervalo: 5 | Unid Intervalo: Mês | Tabela Geral: Sim

Válido De: 05/06/2023 | Válido Até: | ID Calendário: |

Info MP: Última Modificação: 05/06/2023 | Última Execução: 20/03/2024 | Vencimento (%): 11 | Base na Data Executada: Não | Eliminação em (%): |

Evento: | Início: | Intervalo: |

Possui MP:  Conexões  Documentos  Substituições  Ajustes  PRTs Incompatíveis  Critério  Serviço Crítico  Requisições  Modelos de Operação de OS Obsoletos

Figura 4 (a) - Programação dos planos de manutenção

Ação de MP - 35893 09502500208-C65023H MP - 1 (6) #

Nº MP: 35893 | Revisão: 5 | Ação: MP | Descrição Ação: MANUTENCAO PREVENTIVA | Status: Ativo

Operações: Plano de Manutenção

Ordem Descrição: 10 INTR PT OU PTT PARA INICIO DOS SERVICOS

20 COM EQUIPAMENTO EM OPERACAO REALIZAR AS ATIVIDADES LISTADAS ABAIXO

30 VERIFICAR PRESSAO DO OLEO LUBRIFICANTE DO MANICAL DA CAMARA DE EMPUNHO DA BOMBA. (CASO SE APLIQUE)

40 VERIFICAR NIVEL DE OLEO DO MANICAL DA CAMARA DE EMPUNHO DA BOMBA. (CASO SE APLIQUE)

50 COMPLETAR NIVEL DE OLEO DO RESERVATORIO DA CAMARA DE EMPUNHO. CASO NECESSARIO (OLEO TURBINA EP-4E). CASO SE APLIQUE

60 COLETAR E REGISTRAR TODOS OS PARAMETROS DO EQUIPAMENTO (TEMPERATURA, VIBRAÇÕES E PRESSÕES). ATENTAR QUANTO A RUÍDOS ANORMAIS

70 VERIFICAR VAZAMENTO PELO SELO MECANICO, CASO APRESENTE VOLUME EXCESSIVO, SOLICITAR PARADA PARA REALIZAR SUBSTITUCAO

80 VERIFICAR EXISTENCIA DE VAZAMENTO DE OLEO NA CAMARA DE EMPUNHO. CASO HAJA VAZAMENTO EXCESSIVO, PARAR O EQUIPAMENTO PARA CORRECAO

90 INSPECIONAR COLORACAO DO OLEO NOS MANICAS DA BOMBA DA CAMARA DE EMPUNHO. CASO APRESENTE ANORMALIDADE, SOLICITAR PARADA PARA SUBSTITUCAO (TURBINA

100 INSPECIONAR COLORACAO DO OLEO NOS MANICAS DO MOTOR LAUMA. CASO APRESENTE ANORMALIDADE, CASO NECESSARIO SOLICITAR ORDEN CORRETIVA (OLEO TURBINA EP

110 VERIFICAR A EXISTENCIA DE VAZAMENTO DE OLEO DOS MANICAS DO MOTOR LAUMA. CASO SE APLIQUE

120 COMPLETAR NIVEL DE OLEO DO MANICAL LAUMA DO MOTOR ELETRICO. CASO NECESSARIO (OLEO TURBINA EP)

Figura 4 (b) - Lista de tarefas do plano de preventivas

2.3. Software de acompanhamento de paradas das bombas centrífugas (gerenciamento da rotina)

Para o gerenciamento da rotina dos equipamentos, utiliza-se o software para monitoramento da funcionalidade e paradas das bombas (Figura 5). Quando está na cor verde, significa que a bomba se encontra em operação, quando apresenta na cor vermelha, significa que a bomba está parada por algum motivo que pode ser: operacional, em manutenção, dentre outros, nesse momento, atua-se junto a equipe de operação para averiguar os reais motivos. Também pode-se acompanhar o desempenho da bomba (pressão, vazão, temperatura) e assim já realizar acompanhamento da performance dos equipamentos.



Figura 5 – Painel de acompanhamento de dados operacionais e paradas das bombas

#### 2.4. Processo produtivo

Após a separação do óleo e água, a água segue para o tratamento, onde visa enquadramento em condições de injeção no reservatório. Alguns aspectos são medidos para este enquadramento como TOG (teor de óleo e Graxas) e TSS (teor de sólido suspenso), existem outros também como concentração de Bacterias, Oxigênio, H2S.

Para chegar em condições de injeção a água produzida pelos poços passa por várias etapas de tratamento. A primeira é um equipamento chamado SAO (separador água óleo) que por tempo de residência e dosagem de polieletrólito obtém-se uma recuperação de óleo diminuindo TOG e TSS, após esta etapa o fluxo segue por bombas para flotador, que por aeração outras partículas de óleo de menor diâmetro são recuperadas diminuindo ainda mais o TOG. Após a saída do flotador o fluxo é direcionado através de bombas para os filtros de areia onde serão recuperadas partículas de menor granulometria, estas ficam adsorvidas nos grãos de areia e cascalho, nesta etapa é feita a dosagem de bactericida.

Após esta etapa o fluxo é direcionado para o filtro cartucho que visa fazer um polimento da água retendo partículas ainda menores e enquadrando a água para injeção. Em seguida a água vai para o tanque de água tratada e posteriormente será injetada nos poços. Antes da injeção na descarga das bombas boosters é dosado sequestrante de O<sub>2</sub> e enviado para sucção das bombas de injeção chegando nos poços.

### 3. RESULTADOS

As telas abaixo representam o ambiente desenvolvido para realização do gerenciamento integrado das manutenções preventivas e preditivas nas bombas de injeção de água nos poços produtores de petróleo.

#### 3.1. Indicadores de confiabilidade de manutenção aplicados as bombas centrífugas

A confiabilidade indica quando o quão podemos confiar no bom funcionamento do ativo, a disponibilidade é o que mostra se ele pode ser usado naquele momento e a manutenibilidade representa a facilidade com que podemos repará-lo após uma falha, Figura 6.

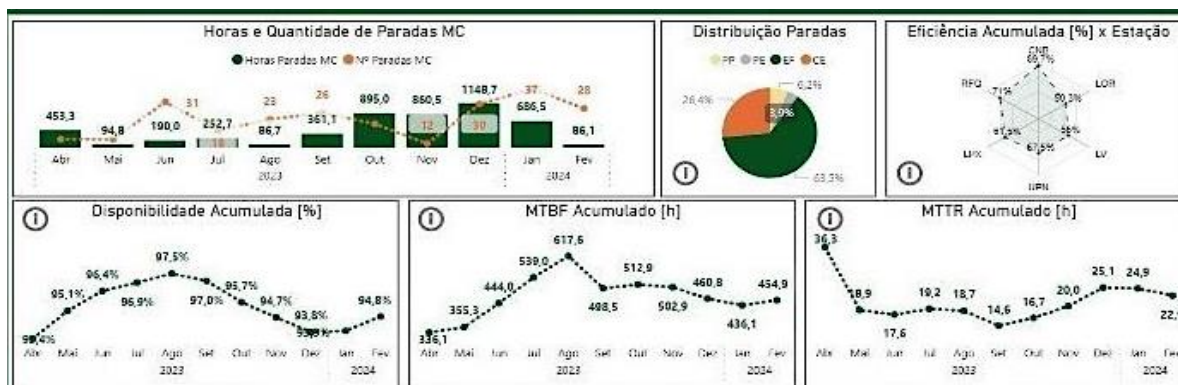


Figura 6 – Painel dos indicadores dos ativos – Resumo

### 3.2. Disponibilidade

O indicador apresentou uma tendência de estabilidade em altos níveis de disponibilidade, com valores superiores a 96% ao longo do período analisado. Esse resultado reflete a eficácia das manutenções preventivas e a baixa ocorrência de falhas inesperadas, garantindo uma operação consistente (Figura 7).

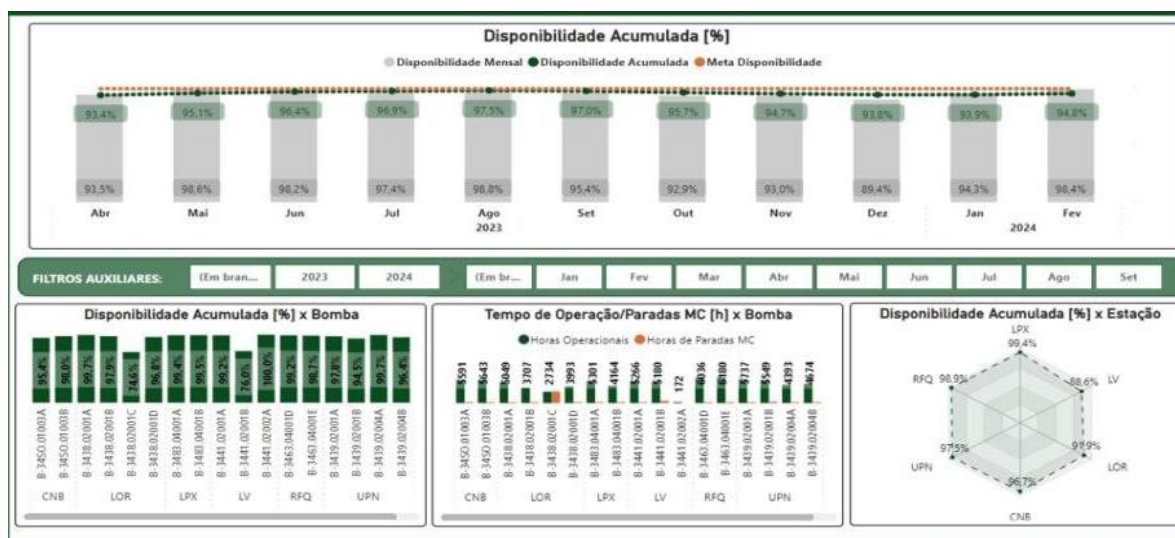


Figura 7 – Painel dos indicadores dos ativos – Disponibilidade

### 3.3. MTBF (Tempo médio entre falhas)

O tempo médio entre falhas variou ao longo do período, com picos notáveis em agosto, indicando períodos de alta confiabilidade operacional. Por outro lado, quedas em meses específicos, como abril e maio, sugerem a necessidade de ações corretivas direcionadas para eliminar recorrências de falhas (Figura 8).

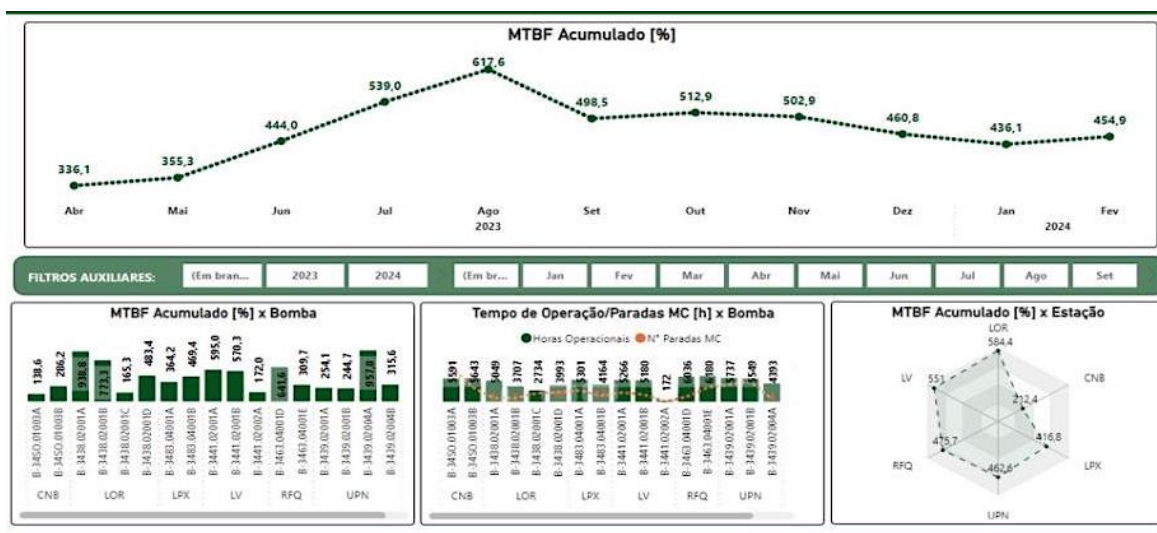


Figura 8 – Painel dos indicadores dos ativos – MTBF

### 3.4. MTTR (Tempo médio para reparo de um equipamento)

O tempo médio para reparo demonstrou uma tendência de redução gradual, especialmente nos meses finais, indicando maior eficiência nos processos de manutenção e reparo. Esse progresso pode estar associado à melhor disponibilidade de peças sobressalentes e à otimização de recursos (Figura 9).

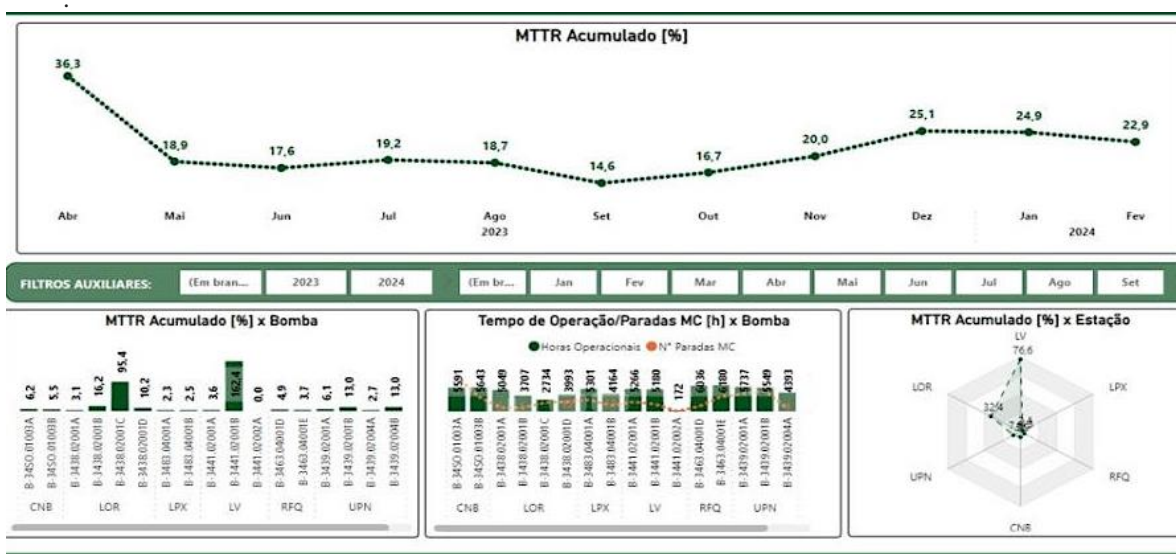


Figura 9 – Painel dos indicadores dos ativos – MTTR

## 4. CONCLUSÃO

O gerenciamento se mostrou bastante eficaz no controle das manutenções das bombas, melhorando principalmente o acompanhamento, monitoramento e tomada de decisões técnicas. Os gráficos se mostraram de fácil entendimento pela equipe de manutenção. Como ponto de melhoria, será planejado a inserção dos parâmetros analisados no sistema de gerenciamento da manutenção, com o objetivo assim de se realizar a alimentação automática dos bancos de dados.

## AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus e a minha família, minha esposa Jamaika Mesquita e filhos pelo apoio e estão sempre ao meu lado. A empresa que trabalho o qual me dá oportunidade de está exercendo minhas atividades. Aos colegas de trabalho: Lenilson Alves Dantas (Supervisor de manutenção); Luciano de Almeida Vieira (Engenheiro); Lucas Dantas da Silva (Engenheiro); Cauê Coelho Alves (Engenheiro)

Agradeço também a Universidade Federal Rural do Semi Árido da EngMan PROPPG/UFERSA”. Aos professores/facilitadores do curso de especialização em engenharia de manutenção e em especial ao professor/coordenador do curso Fabrício Cavalcante e a todos os meus colegas de curso.

#### REFERÊNCIAS

- [1] R. TODD SWINDERMAN, P. E. et al. FOUNDATIONS: Guia prático para um controle mais limpo, seguro e produtivo de pó e material a granel. 4. ed. Illinois, USA: Martin Engineering, 2009. 577 p.
- [2] P. SHAH, K. Construction, Working and Maintenance of Stackers and Reclaimers for Bulk Materials. Practical Maintenance, [S. l.], p. 46, 30 mar 2019.
- [3] SANTOS, Hugo. Business Intelligence aplicado no desenvolvimento de indicadores da manutenção 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2019;
- [4] VIANA, H. R. G. PCM – Planejamento e Controle da Manutenção, Editora Qualitymark, Rio de Janeiro – RJ, 2008;
- [5] RIBEIRO, HAROLDO - Manutenção Produtiva Total. A Bíblia do TPM, Editora Viena, 2014;
- [6] AMARAL, Fernando Dias – Gestão da Manutenção na Indústria, Editora LIDEL, Lisboa – Portugal, 2016.



Artigo

# Análise da disponibilidade de geradores de vapor instalados em um processo de produção de petróleo.

Oskallyne Rafaelly das Chagas Oliveira<sup>[1]</sup>; Fabrício J N Cavalcante<sup>[2]</sup>; André Pedro Fernandes Neto<sup>[3]</sup>; Victor de Paula Brandão Aguiar<sup>[4]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; [oskallyne@gmail.com](mailto:oskallyne@gmail.com)

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; [fabriciocavalcante@ufersa.edu.com.br](mailto:fabriciocavalcante@ufersa.edu.com.br)

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; [andrepedro@ufersa.edu.br](mailto:andrepedro@ufersa.edu.br)

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; [victor@ufersa.edu.br](mailto:victor@ufersa.edu.br)

Recebido: 01/05/2024;

Aceito: 28/12/2024;

Publicado: 28/12/2024.

*Resumo: Geradores de Vapor (GVs) são equipamentos que convertem água líquida em vapor. No processo de produção de petróleo em campos maduros, esses dispositivos possuem relevância, haja vista que, eles injetam vapor nos poços com a finalidade de manter ou aumentar a produção. Mensurar a disponibilidade desses equipamentos é um bom indicador da efetividade da manutenção, aliado a isto, antever possíveis falhas é o desejável para definição de soluções que mitiguem ou inibam quebras, isto traz benefícios diretos para continuidade operacional e consequente manutenção da produção. O objetivo deste artigo é comparar os indicadores de operacionalidade e disponibilidade de uma amostra de equipamentos ao longo do tempo e avaliar, partir da anotação das falhas a importância dessa informação para a gestão da manutenção.*

*Palavras-chave: Geradores de Vapor; Disponibilidade; petróleo, falha.*

*Abstract: Steam Generators (GVs) are equipment that convert liquid water into vapor. In the oil production process in mature fields, these devices are relevant, given that they inject steam into wells with the purpose of maintaining or increasing production. Measuring the availability of this equipment is a good indicator of maintenance effectiveness, in addition to this, anticipating possible failures is desirable for defining solutions that mitigate or inhibit breakdowns, this brings direct benefits to operational continuity and consequent maintenance of production. The objective of this article is to compare the operability and availability indicators of a sample of equipment over time and evaluate, based on failure notes, the importance of this information for maintenance management.*

*Key-words: Steam Generators; Availability; oil, failure.*

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade de produção, dentre as demais atividades do processo de exploração e produção de petróleo, é a que possibilita a retirada do óleo e gás natural do subsolo até a superfície, permitindo a recuperação dos investimentos feitos e gerando um fluxo de caixa positivo que se estende por anos ou mesmo décadas (D'ALMEIDA, 2015).

Segundo Thomas (2015), a constatação de que, ao ser aquecido, o óleo tem sua viscosidade substancialmente reduzida foi o ponto de partida para o desenvolvimento dos métodos térmicos. A extração continuada de petróleo produz uma queda de pressão nos fluídos do reservatório que a engenharia de produção tenta compensar através da injeção de água/vapor ou de gás (gás natural, CO<sub>2</sub>). O monitoramento da movimentação destes fluídos dentro do reservatório é de grande importância para a otimização da produção.

A ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), conceitua campos maduros como aqueles que estão em atividade há 25 anos ou mais e/ou têm produção igual ou superior a 70% das reservas provadas. No processo de produção de petróleo em campos maduros, faz-se necessária a utilização de algumas técnicas para extração do hidrocarboneto, uma delas é a injeção de vapor. Neste processo é injetado vapor nos

poços com intuito de manter ou aumentar a produção. Alguns equipamentos como os Geradores de Vapor têm a atribuição de fazer essa injeção, a partir da transformação da água em vapor. Como um processo crítico para a atividade de produção em campos maduros é necessário que a gestão da produção e manutenção estejam alinhadas para que haja um rápido tratamento das falhas destes equipamentos.

Avaliar apenas o tempo de operação dos Geradores de Vapor não é um indicador eficaz para o setor de manutenção deste ativo, haja vista que há paradas inerentes ao processo, como: as paradas para troca de poço, as paradas para limpeza dos dutos ou até mesmo a parada para realização das manutenções preventivas. Além da existência de redundância de equipamento em áreas identificadas como prioritárias, onde a injeção não pode ser descontinuada, em virtude da indisponibilidade de equipamento.

Silveira (2012), define que o termo utilizado para os indicadores de performance da manutenção em uma fábrica é o KPI (em inglês, Key Performance Indicators ou KPI, Indicadores de Performance na tradução). As KPIs podem mensurar diferentes performances abrangendo desde o tempo de parada das máquinas até o processo produtivo. Atualmente os softwares instalados em muitas fábricas podem oferecer algumas dezenas de KPIs, mas é preciso ter atenção a aquelas que realmente agregam valor.

Segundo a NBR 5462, disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado. Este conceito traz luz para a problemática observada, quando apenas era avaliado o tempo de operação do equipamento. Sendo que, um equipamento parado, pode estar disponível, porque a parada pode ter acontecido por uma decisão do processo, por exemplo para diminuir a cota de injeção na formação geológica por decisão da equipe de reservatório.

Extraí-se daquele conceito, que a disponibilidade de equipamento está intrinsecamente ligada a existência de falha e na seara da manutenção, restringe-se a falha de equipamento. Entender esta conceituação, auxilia na definição das métricas para cálculo do indicador disponibilidade e no plano de ação para tratativa das falhas detectadas.

O objetivo deste artigo é comparar os indicadores de operacionalidade e disponibilidade de uma amostra de equipamentos ao longo do tempo e avaliar, partir da anotação das falhas a importância dessa informação para a gestão da manutenção.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo, trata-se de um estudo de caso, como tal, este método, baseia-se em uma pesquisa abrangente sobre um assunto específico. A partir deste estudo é possível entender melhor o tema explicitado, contribuindo com insumos para novas pesquisas sobre a mesma temática. Bruney, Herman e Schoutheete (in DUARTE e BARROS, 2006) definem estudo de caso como “análise intensiva, empreendida numa única ou em algumas organizações reais.” Para eles, o estudo de caso reúne, tanto quanto possível, informações numerosas e detalhadas para apreender a totalidade de uma situação.

Na organização onde é realizado o referido estudo, a manutenção é organizada de forma centralizada, segundo Seleme (2024), as vantagens da centralização da manutenção é que esta, fornece mais flexibilidade e melhora a utilização de recursos; tais como:

- Funcionários altamente qualificados e equipamentos especiais, portanto resulta em maior eficiência;
- Permite a supervisão da linha de forma mais eficiente;
- Permite a formação profissional com melhores resultados;
- Permite a aquisição de equipamentos modernos.

No entanto, segundo o autor, a desvantagem da centralização é que:

- Tarefas que exigem habilidades especiais, consomem mais tempo de deslocamento da função organização; Supervisão de tarefas que necessitam de conhecimentos especiais se torna mais difícil e como tal, menor é o controle da manutenção;
- Menor desenvolvimento de funcionários em novas tecnologias;
- Maiores custos de transporte em razão da distância dos locais dos trabalhos de manutenção.

Dentro desta organização, os papéis dos setores de Manutenção e Operação são bem definidos, sendo os gestores das respectivas áreas, independentes e autônomos para as tomadas de decisão, prestando conta regularmente ao gestor do Ativo de produção, hierarquicamente superior aos gestores citados anteriormente. Kops (2019) afirma que o gestor é o principal protagonista do processo de gestão. Cabe a ele, segundo este autor, desenhar e desencadear o processo de gestão, quer de um conteúdo específico, quer na resolução de um desafio típico, numa situação típica, projetando uma viável e estimada linha de progressão e traçando a linha do tempo. Ao desenhar cada processo de gestão, definirá a matriz de cada processo de gestão.

No processo observado, o setor de produção, além de outras atribuições, tem a responsabilidade de realizar a cota de vapor planejada pelo setor de reservatório, a cota injetada é uma das informações mais importantes, verificadas, pois é um dos insumos determinantes para produção, por isso, ela almeja que os GVs operem o máximo possível durante todo o mês.

A missão do setor de manutenção para o ativo observado é manter a integridade e confiabilidade dos equipamentos. Xenos (2014), define que as atividades de manutenção existem para evitar a degradação dos equipamentos e das instalações, causada pelo seu desgaste natural e pelo uso, segundo este autor, ainda há muitas ideias incorretas e formas de pensar ultrapassadas sobre a essência das atividades de manutenção e sobre o seu gerenciamento, isto pode resultar em conflitos entre o departamento de manutenção e outros departamentos da empresa, principalmente os de produção.

Os equipamentos (Geradores de Vapor), objeto deste estudo, possuem parâmetros automatizados acompanhados por um supervisor como: vazão da água, pressão no poço, vapor injetado. A partir da tela do supervisor é possível perceber se o equipamento está injetando vapor ou não. Supervisor, pode ser conceituado como um sistema com uma interface gráfica para o usuário, onde é representado o estado atual do processo, possibilitando o monitoramento em tempo real de forma física ou remota.

Nas reuniões de análise de resultados da produção, o indicador de operacionalidade dos GVs era apresentado pela produção e justificado pela manutenção, quando realizado abaixo da meta definida pela organização. No entanto, algumas paradas ocorridas durante o mês não tinham relação direta com o processo de manutenção, mas paradas relacionadas à segurança operacional, otimização de recursos ou inerentes ao processo de produção.

O departamento de manutenção, percebeu a necessidade de levar para estas reuniões de resultado a disponibilidade dos GVs, evidenciando que as paradas ocorridas, nem sempre eram por falha de equipamento, mas pela própria produção ou outros setores, com o objetivo de levar para a rotina, discussões que resultassem em mitigação e solução de falhas de todos os vieses.

Dito isto, foi avaliado como o indicador de disponibilidade seria apurado e as premissas para apuração, haja vista que a base de dados da operação dos equipamentos era distinta da base de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção). Com o intuito de consolidar os dados das duas bases, inicialmente, um controle em planilha foi estruturado (Figura 1). O ponto de partida foi obter o Status: “Parado” ou “Operando” dos equipamentos, parâmetro automatizado no supervisor e o tempo de parada. O motivo e os tempos de parada eram descritos no boletim diário do operador do equipamento.

A partir desses dados foi possível definir o 2º Status: “Disponível” ou “Indisponível”. A Produção considerava o tempo parado, a partir do desligamento ou baixa eficiência do equipamento. No entanto, a manutenção precisava ser acionada para ter conhecimento da falha. O *input* para início das tratativas pela Manutenção, deveria ser a solicitação do operador para reparo, através de uma nota de manutenção. No início da implementação do indicador, foi percebido que havia algumas lacunas neste processo, pois nem sempre o operador solicitava formalmente o serviço da manutenção. Com o intuito de reforçar a cultura da importância do registro de falhas, Manutenção e Produção acordaram que o tempo de indisponibilidade de equipamento do início da falha até a solicitação da nota de manutenção seria creditado a Produção.

Data	Status 1	Status 2	Tempo parado Total (h)	Responsável	Motivo	Hora início	Hora fim	Tempo Parado Parcial	Disciplina	Anomalia	Descrição	Observação
01/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
02/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
03/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
04/05/2022	Parado	Disponível	7,3	Segurança	Passagem do 990	7:12	14:30	7:18:00				
05/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
06/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
07/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
08/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
09/05/2022	Operando	Disponível	0,0					0:00:00				
10/05/2022	Parado	Indisponível	0,5	Manutenção	Falha no CLP	15:30	16:40	1:10:00	Restauração	Falha de energia elétrica	Averiar falha no CLP do GV-X	Nota: caso
11/05/2022	Parado	Disponível	0,5	Produção	Troca de poço	16:40	0:00	7:20:00				

FIGURA 1. Exemplo de controle implementado para o GV-X (autoria própria, 2022).

### 2.1. Apuração do indicador

Bueno (2020) afirma que os indicadores de manutenção são considerados ferramentas auxiliares de gestão que fornecem dados e informações significativas para:

- Consolidação de resultados operacionais;
- Controle dos estoques de materiais e da política dos sobressalentes;
- Distribuições das atividades de acordo com a modalidade de manutenção, se corretiva, preventiva ou preditiva;
- Treinamento e capacitação de equipe;
- Estabelecimento de períodos de parada para manutenção;
- Planejamento e controle das atividades de manutenção.



## 2.1.1. Operacionalidade (Equação 01)

$$O: \frac{\sum \text{Horas do equipamento operando no mês}}{\text{Horas disponíveis do mês}} \quad (1)$$

## 2.1.2. Disponibilidade (Equação 02)

$$D: \frac{\sum \text{Horas disponíveis do equipamento no mês}}{\text{Horas disponíveis do mês}} \quad (2)$$

No final de cada mês de operação dos ativos, a disponibilidade é apurada e comparada com a operacionalidade de cada mês de acompanhamento.

Considera-se horas disponíveis, as horas em que não houve relato de falha no equipamento. Foi considerado como início do tempo em falha, o momento da abertura da nota de manutenção. O objetivo desta premissa foi estimular o registro da falha no menor tempo, se possível.

## 3. RESULTADOS

Comparando o percentual de disponibilidade (DISP%) com o percentual de Operacionalidade (OP%) de uma amostra no período observado, percebe-se que a disponibilidade ao longo do tempo não está associada ao percentual de operação do equipamento, esta diferença entre operacionalidade e disponibilidade é um tempo que não deve ser imputado ao departamento de manutenção, haja vista que neste período de parada, o equipamento está em perfeitas condições de funcionamento (Figura 2).

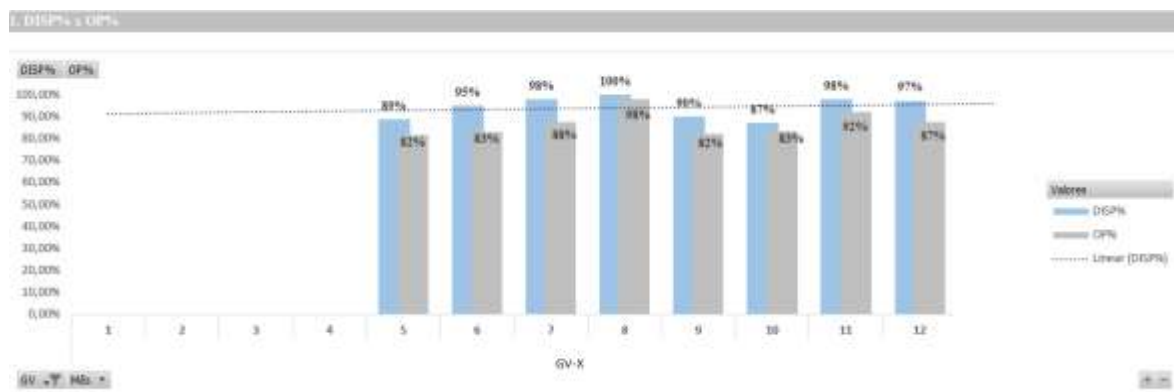


FIGURA 2. Comparação entre DISP% e OP% para o GV-X (autoria própria, 2022).

A estratificação do indicador por responsáveis, abre um leque de possibilidades para análise crítica (Figura 3).

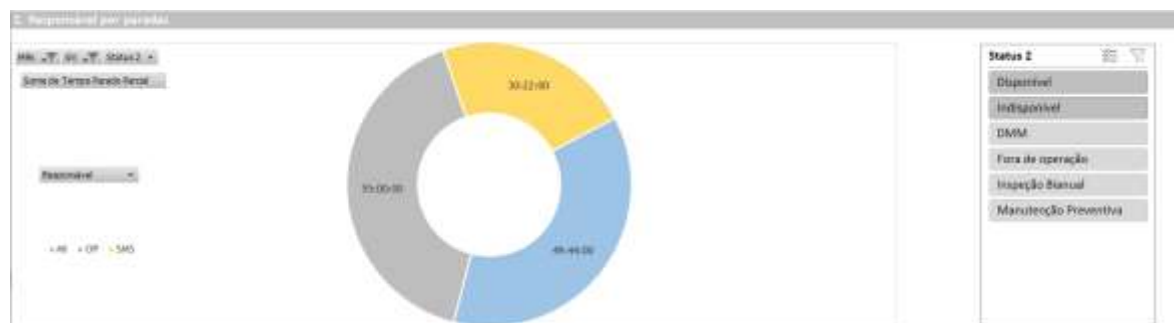


FIGURA 3. Responsáveis por paradas do GV-X no mês (autoria própria, 2022).

### 3.1 Estratificação por responsáveis

#### 3.1.1 Responsável Segurança Saúde e Meio Ambiente (SMS)

Tempo de passagem de PIG: atividade necessária para segurança do processo e das pessoas e por isso, não pode ser descartada, mas pode ser avaliada quanto a disponibilidade atual de recursos e a roteirização da sequência de equipamentos a ser realizada, haja vista a grande dispersão geográfica entre os GVs. Figura 4.

#### 3.1.2 Responsável Operação da Produção (OP)

Tempo aguardando operador: Necessidade de avaliação se a equipe de operadores está suficiente para os equipamentos instalados. Figura 4.

Tempo para troca de poço: Atividade inerente ao processo, mesmo assim, devido ao tempo dispendido, vale avaliação de otimização. Figura 4.

Tempo de sobretensão: Apesar de não ter parado os GVs, vale a avaliação com a disciplina de elétrica se é uma questão estrutural do ativo ou de prestação de serviço da concessionária de energia. Figura 4.

#### 3.1.3 Responsável Manutenção (MI)

Tempo de falha na adutora: Apesar desta falha não ser específica ao equipamento analisado (GV), a falha na adutora impacta diretamente o funcionamento dele, por isso a importância de acompanhar todo o fluxo de geração de vapor. Figura 4. e Figura 5.



FIGURA 4. Detalhamento das paradas (autoria própria, 2022).



FIGURA 5. Detalhamento da indisponibilidade (autoria própria, 2022).

## 4. CONCLUSÃO

Buscou-se no presente trabalho, demonstrar que é necessário avaliar se os indicadores acompanhados pelos setores da organização estão alinhados e contribuem além da informação do cenário atual para melhoria do processo. No caso em questão, um dos indicadores do processo de produção, Percentual de Operacionalidade do equipamento (OP%), acompanhava especificamente, se o equipamento que injeta vapor estava parado ou não, creditando equivocadamente que toda parada estaria relacionada com a falha de equipamento. Neste ponto é

necessário frisar a importância do alinhamento dos departamentos de Produção e Manutenção com uma visão de melhoria por processo, isto é, uma melhoria pautada na organização como um todo e não apenas em seus processos específicos, pois é sabido que ao longo do tempo a manutenção foi estigmatizada como um “mal” necessário, descaracterizar esta cultura, traz benefícios para toda organização. O indicador de Disponibilidade (DISP%), implementado pela Manutenção, trouxe uma outra perspectiva para problemática, o equipamento está parado, mas ele está em condições operacionais para uso. O que aconteceu? É possível otimizar este tempo de parada? O indicador aponta para a Produção que há outros atores envolvidos na realização de paradas e que por isto, pode ter possibilidade de otimização. Para a Manutenção, o percentual de disponibilidade (DISP%) e a devida estratificação das falhas que resultaram em parada, devem nortear futuras análises de falhas que retroalimentarão o processo, com possíveis revisões de planos de manutenção preventiva e preditiva, análise da qualidade de sobressalentes, avaliação da adequação do parque de equipamentos instalados com o processo, entre outras perspectivas possíveis.

#### REFERÊNCIAS

- [1] D'ALMEIDA, Albino Lopes. **Indústria do petróleo no Brasil e no mundo**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- [2] THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- [3] ANP. Resolução ANP nº 749/2018. Disponível online: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em 23/04/2024.
- [4] Indicadores de performance da manutenção industrial. Disponível online: <https://www.citisystems.com.br>. Acesso em 23/04/2024.
- [5] NBR-5462. Disponível online: <https://ufsb.edu.br>. Acesso em 23/04/2024.
- [6] DUARTE, J. ; BARROS, A.. Métodos e Técnicas de Pesquisa em Comunicação. São Paulo: Atlas S.A, 2006.
- [7] SELEME, Robson. **Manutenção industrial: mantendo a fábrica em funcionamento**. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- [8] KOPS, Darci. **Gestão organizacional e empresarial: cogitando possibilidades**. 1. ed. Porto Alegre: Educs, 2019. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- [9] XENOS, H. G. **Gerenciando a manutenção produtiva: melhores práticas para eliminar falhas nos equipamentos e maximizar a produtividade**. 2. ed. Nova Lima, MG: Falconi, 2014. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 24 abr. 2024.
- [10] BUENO, Edson Roberto Ferreira. **Gestão da manutenção de máquinas**. 1. ed. São Paulo: Contentus, 2020. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 24 abr. 2024.



# Análise do modo e efeito de falha no superaquecimento de motores automotivos em carros de passeio: um estudo de caso

Rodrigo Sant'Anna da Silva <sup>[1]</sup> e Thiago José Donegá <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade de Taubaté; [rodrigo\\_sdsilva@yahoo.com.br](mailto:rodrigo_sdsilva@yahoo.com.br)

<sup>[2]</sup> Faculdade Unyleya; [prof.thiagodonega@unyleya.edu.br](mailto:prof.thiagodonega@unyleya.edu.br)

*Recebido:* 10/09/2024;

*Aceito:* 02/10/2024;

*Publicado:* 28/12/2024;

**Resumo:** O superaquecimento de motores em carros de passeio é uma irregularidade recorrente no cenário brasileiro na vida de muitos utilitários desses veículos e que causa diversos transtornos, tanto na vida útil dos componentes desses motores quanto também pode gerar acidentes graves como incêndios. O estudo de caso que será apresentado neste trabalho busca aplicar o método de gestão baseado na ferramenta da Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA) com o propósito de mitigar ou anular o superaquecimento. Será relatada a definição e um exemplo da FMEA e as causas de superaquecimento listadas em manuais de fabricantes no contexto da preservação dos motores. Por fim será apresentado um estudo de caso prático em uma oficina mecânica aplicando a ferramenta FMEA, reforçando toda a teoria abordada e demonstrando que as quatro maiores possíveis causas de superaquecimento em motores automotivos são: líquido de arrefecimento irregular, válvula termostática irregular, ponto de ignição incorreto e óleo lubrificante irregular.

**Palavras-chave:** Arrefecimento; Carros; FMEA; Motores; Superaquecimento.

**Abstract:** The overheating of engines in passenger cars is a recurring issue in the Brazilian scenario in the life of many users of these vehicles, causing various troubles. It not only affects the lifespan of engine components but can also induce serious accidents such as fires. This case study aims to apply the management method based on the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) tool to mitigate or eliminate overheating. Firstly, the definition and an example of FMEA will be stated and then will be explored manufacturer handbooks talking about causes of overheating in the context of engine preservation. Finally, a practical case study was performed in an automotive workshop, applying the FMEA tool to reinforce the theoretical approach, evidencing that the four biggest causes of overheating in automotive engines are: irregular coolant, irregular thermostatic valve, incorrect ignition timing and irregular lubricating oil.

**Key-words:** Cooling; Cars; FMEA; Engines; Overheating

## 1. INTRODUÇÃO

O superaquecimento dos motores automotivos tem sido uma falha comum e crescente ao longo dos anos, que pode causar acidentes aos utilitários e reduzir a vida útil dos componentes mecânicos. É necessário tratar essa falha com uma análise criteriosa, prática e informativa, de modo que todos possam ter acesso às formas de abordagem inerentes à resolução desse problema.

Portanto, o objetivo deste estudo de caso é analisar as causas do superaquecimento em veículos automotores e encontrar formas de mitigar ou, até mesmo, anular este problema utilizando o método de gestão baseado na ferramenta da Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA). No intuito de tratar esse tema, a abordagem considerada neste estudo de caso iniciará com a revisão bibliográfica, descrevendo e relatando a forma de aplicação da FMEA, juntamente com a exposição do fenômeno do superaquecimento e seus efeitos, o levantamento de dados provenientes dos fabricantes de carros populares e a aplicação do modelo FMEA numa oficina mecânica.

Uma empresa de seguros altamente conhecida publicou uma lista com os dez problemas mais comuns em carros (PORTO SEGURO, 2023)[1], sendo a primeira falha citada o superaquecimento, ressaltando assim a importância de se tratar esse tema. Somado a isso, o Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Ceará (CBMCE, 2023)[2] somou somente no 1º quadrimestre de 2023 um total de 127 registros de incêndio em veículos, tais

ocorrências vêm crescendo ao longo dos anos como ilustra a Figura 1. Como uma das formas de evitar essas ocorrências o Corpo de Bombeiros alerta para a prevenção do superaquecimento em motores.

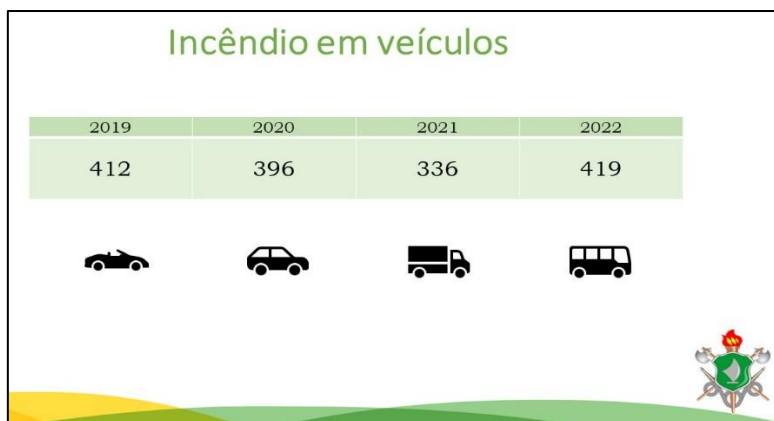


FIGURA 1. Balanço de Incêndio em Veículos (CBMCE, 2023)

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Metodologia

Este artigo utilizou a pesquisa bibliográfica como ferramenta de aplicação do estudo de caso, descrevendo a definição e forma de utilização da ferramenta de gestão da Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA), abordando a temática do superaquecimento em motores ciclo Otto (cuja queima da mistura combustível-ar é realizada através de centelha) e listando as causas de superaquecimento listadas por montadoras de veículos.

Em seguida, perante os dados coletados, foi realizado um estudo de caso numa oficina mecânica a fim de analisar no âmbito real as possíveis causas de superaquecimento dos motores veiculares, aplicando a ferramenta da FMEA. O estudo de caso seguiu os procedimentos abaixo:

1. Revisão bibliográfica sobre o método FMEA;
2. Abordagem sobre o superaquecimento em motores automotivos ciclo Otto;
3. Busca na região por uma oficina mecânica de confiança;
4. Apresentação ao gerente sobre o estudo de caso e sua finalidade;
5. Descrição da ferramenta FMEA ao gerente com a lista das possíveis causas de superaquecimento;
6. Levantamento do índice de risco de cada causa;
7. Preenchimento do formulário da ferramenta FMEA; e
8. Classificação das maiores causas de superaquecimento.

Por fim, serão expostos os resultados do estudo de caso, juntamente com a discussão destes dados com o intuito de contribuir no tratamento desses fatores que levam ao superaquecimento de motores e evitar esse fenômeno, colaborando assim para a preservação da vida útil dessa máquina e de seus componentes, gerando mais segurança aos seus usuários.

### 2.2. Revisão bibliográfica

#### 2.2.1. Análise do Modo e Efeito de Falha - FMEA

A ferramenta de Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA) tem como finalidade a identificação e priorização das potenciais falhas em equipamentos, sistemas e processos, criando um valor denominado de Número Prioritário de Risco (NPR), ou Índice de Risco, que é o produto de três fatores: Gravidade, ocorrência e detecção. O estudo de caso em que foi aplicada essa ferramenta trata-se de uma empresa de transportes que, em janeiro de 2007, contava com 1080 funcionários e uma frota composta de 251 ônibus, 16 caminhões, 14 veículos utilitários e 2 aeronaves (ROOS et. al., 2007)[3] (p. 29), gerando resultados satisfatórios.

A análise FMEA realizada nessa empresa de transporte de passageiros foi aplicada especificamente no gerenciamento do uso dos pneus, que geram grandes insatisfações aos clientes e custos para a empresa (ROOS et. al., 2007)[3] (p. 31). A Tabela 1 demonstra um exemplo de formulário elaborado pela equipe de pesquisa, onde foi aplicado um nível de 1 a 10 em cada fator, cujo produto implicou no valor do NPR de cada causa elencada e na última coluna a ação recomendada para tratar tais efeitos.

TABELA 1. Representação de um formulário da ferramenta FMEA (Adaptado de ROOS et al., 2007)[3] (p. 32).

Função	Modo de Falha	Efeito	Severidade	Causa	Ocorrência	Controle	Deteção	NPR	Ação Recomendada
Não Estourar	Estourar	Atraso na hora de chegada: Insatisfação do cliente	6	Arrastes laterais	4	E.V.E Proc.	5	120	Treinamento motorista
			6	Choques transversais	4	E.V.E Proc.	7	168	Treinamento motorista
			6	Aquecimento do bloco do topo	2	E.V.E Proc.	5	60	
			6	Golpes na montagem ou desmontagem	1	E.V.E Proc.	6	36	
			6	Infiltração na zona baixa do pneu, por quebra da borracha do talão	2	E.V.E Proc.	8	96	
			6	Montagem de pneu sem câmara em roda de pneu com câmara	1	E.V.E Proc.	1	6	
			6	Aquecimento por uso excessivo do freio ou freio mal regulado	1	E.V.E Proc.	8	48	
			6	Infiltração por perfuração, reparo ou quebra dos talões na montagem	1	E.V.E Proc.	7	42	
			6	Excesso de peso	1	E.V.E Proc.	3	18	
			6	Impacto em obstáculo	4	E.V.E Proc.	8	192	Treinamento motorista
			6	Perfuração sem reparo	1	E.V.E Proc.	6	36	
			6	Reparo em mau estado	1	E.V.E Proc.	5	30	
			6	Pressões insuficientes	4	E.V.E Proc.	7	168	Treinamento borracharia
			6	Sujeira ou oxidação na roda na região de assentamento do pneu	1	E.V.E Proc.	8	48	
			6	Danos provindos da roda de alumínio	5	E.V.E Proc.	7	210	Empregar rodas de ferro

Na aplicação da ferramenta FMEA na empresa de transporte de passageiros foi relatado que, acima do retorno financeiro alcançado, foi possível obter maior confiabilidade do serviço prestado, pois o conhecimento de três áreas distintas colaborou para a aplicação do FMEA: técnico, qualidade e borracharia. Essa agregação de conhecimentos empíricos de âmbitos diferentes proporciona maior satisfação ao cliente, que é justamente o maior alvo desejado pela empresa (ROOS et al., 2007)[3] (p. 31).

### 2.2.2. Superaquecimento em motores ciclo Otto

Assim como em qualquer outra máquina, o motor e seus componentes sofrem desgastes ao longo de sua operação e tempo de uso, apresentando assim falhas conforme relatado por Mahle (2019)[5] (p. 49). Para compreender o superaquecimento é necessário entender o processo de combustão normal, que neste estudo será considerado dentro do regime de combustão do ciclo Otto.

Os eletrodos da vela de ignição, durante a chegada do pistão ao PMS, acionam e realizam uma faísca na mistura ar/combustível. Esta centelha inicialmente provoca reações de oxidação localizadas ao redor da vela, num aumento de temperatura bem localizado em um baixo crescimento de pressão. No decorrer do aumento

das reações em cadeia a combustão se propaga e, quando os compostos preliminares atingem uma determinada concentração, a liberação de calor já é suficiente para liberar as chamas. Esses instantes iniciais à formação do núcleo, caracterizado algumas vezes pela queima de 1 a 10% da massa contida no interior do cilindro, é denominado “atraso de ignição”. A fase posterior, em que a combustão se propaga na câmara de combustão abandonando gases queimados, é chamada de “combustão normal” (BRUNETTI, 2012)[6] (p. 411-413).

Para que o pico de pressão ocorra no ponto ótimo, a faísca de ignição não pode ocorrer nem muito adiantada (durante o trabalho negativo) nem atrasada (gerando pouco trabalho positivo), pois esses dois casos geram grandes esforços e desgastes ao motor. O tempo ideal para a faísca está ilustrado na Figura 2, em “Atraso de ignição”.

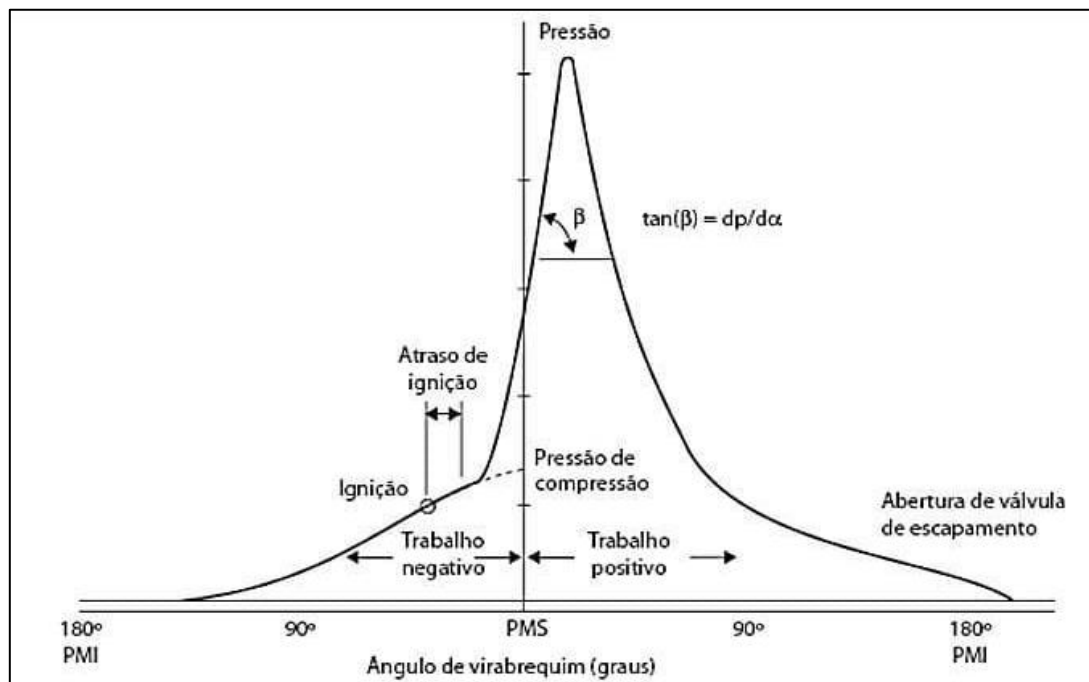


FIGURA 2. Diagrama Pressão x Ângulo de Virabrequim (BRAINLY, 2019)

Os possíveis efeitos das anormalidades no tempo da centelha das velas de ignição são chamados de detonação e pré-ignição, ilustradas na Figura 3 e descritas a seguir:

- Detonação: Trata-se da autoignição brusca gerada por uma grande massa de mistura ainda não queimada na câmara de combustão, causada pelo avanço da chama normal que eleva a pressão e temperatura desta mistura, gerando chamas secundárias de autoignição (BRUNETTI, 2012)[6] (p. 417). Esse fenômeno é gerado por uma ignição muito avançada (MAHLE, 2019)[5] (p. 51); e
- Pré-ignição: É caracterizada pela queima da mistura antes do tempo normal de combustão (ao contrário da detonação, que atrasa). Essa irregularidade pode destruir o motor em minutos, pois duas frentes de chama são queimadas simultaneamente gerando temperaturas por vezes acima de 2.200 °C e o dobro da pressão de combustão normal (cerca de 8.200 kPa ao invés de 4.100 kPa).

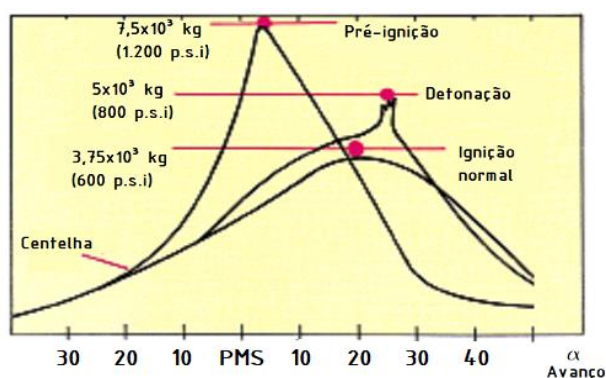


FIGURA 3. Detonação e Pré-ignição (Adaptado de MAHLE, 2019) (p. 51)

MAHLE (2019)[5] (p. 53) lista os seguintes itens que podem causar o superaquecimento:

- Bomba-d'água defeituosa;
- Correia do ventilador ou da ventoinha frouxa ou rompida;
- Falta de água no sistema de refrigeração;
- Ponto de ignição ou ponto de injeção incorreto;
- Radiador obstruído;
- Tampa do radiador defeituosa;
- Válvula termostática operando inadequadamente.

### 2.2.3. Recomendações de fabricantes

As montadoras de veículos em seus manuais, na parte que discorrem sobre as formas de agir num superaquecimento, listam os seus possíveis fatores conforme demonstrados no Quadro 1. Dentre as causas em comum, especificadas por três ou mais fabricantes, pode-se destacar: óleo lubrificante fora do especificado, líquido de arrefecimento fora do especificado e nível irregular do líquido de arrefecimento.

QUADRO 1. Fatores de superaquecimento em motores segundo as montadoras de veículos (autoria própria)

<i>FIAT</i> ( <i>Palio Fire 2016</i> ) <sup>1</sup>	<i>VOLKSWAGEN</i> ( <i>Voyage 2018</i> ) <sup>2</sup>	<i>TOYOTA</i> ( <i>Corolla 2020</i> ) <sup>3</sup>	<i>HYUNDAI</i> ( <i>HB20S 2022</i> ) <sup>4</sup>
Nível de óleo lubrificante abaixo da referência mínima;	Baixa qualidade do combustível (danos ao catalisador);	Nível irregular do óleo lubrificante;	Combustível de baixa qualidade ou fora do especificado;
Nível de óleo lubrificante acima da referência máxima;	Aditivos inadequados de gasolina (chumbo, manganês e outros componentes metálicos - danos ao catalisador);	Vazamento de óleo lubrificante;	Lubrificante de baixa qualidade ou fora do especificado;
Óleo lubrificante fora do especificado;	Reservatório de partida a frio sem gasolina aditivada;	Nível irregular do fluido de arrefecimento;	Vazamento do líquido de arrefecimento;
Nível de líquido de arrefecimento abaixo da referência mínima;	Unidade de controle do motor avariada;	Fluido de arrefecimento contaminado;	Baixo nível ou ausência do líquido de arrefecimento;
Líquido de arrefecimento fora do especificado;	Baixo nível de combustível no tanque;	Aditivos no fluido de arrefecimento;	Adição de água no líquido de arrefecimento;
Ausência de líquido de arrefecimento;	Óleo lubrificante fora do especificado;	Vazamento do fluido de arrefecimento;	Adição de álcool ou anticongelante no líquido de arrefecimento;
Envelhecimento da gasolina no reservatório de partida a frio;	Aditivos no óleo lubrificante;	Radiador excessivamente sujo;	Vazamento nas mangueiras e/ou conexões do sistema de arrefecimento;
Filtro de ar bastante sujo;	Proteção anticongelante insuficiente no líquido de arrefecimento;	Condensador excessivamente sujo;	Tampa do reservatório do líquido de arrefecimento não fechado corretamente;



Alteração nos chicotes elétricos de injeção e/ou ignição devido à instalação de acessórios;	Líquido de arrefecimento contaminado (marrom).	Ventilador não funcionando corretamente;	Ventilador do radiador não funcionando corretamente.
Velas de ignição deterioradas ou fora do especificado.			

<sup>1</sup> (Fiat, 2016)[8] (p. 117–137)

<sup>2</sup> (Volkswagen, 2018)[9] (p. 158-178)

<sup>3</sup> (Toyota, 2020)[10] (p. 490-494)

<sup>4</sup> (Hyundai, 2023)[11] (p. 108-390)

### 3. RESULTADOS

Foi realizada a visita à Oficina Mecânica Auto Peças Novo Mundo e discutido cada possível item que levaria ao superaquecimento do motor, nos quesitos de severidade, ocorrência e detecção. Após isso, tais fatores foram multiplicados entre si e geraram o Índice de Risco (NPR). Os resultados, juntamente com as medidas de controle atuais e ações recomendadas para cada caso, foram inseridas no formulário e estão apresentadas no Apêndice A. As causas que obtiveram maior Índice de Risco foram, em ordem decrescente:

1. Líquido de arrefecimento irregular;
2. Válvula termostática irregular;
3. Ponto de ignição e/ou injeção incorreto; e
4. Óleo lubrificante irregular.

O líquido de arrefecimento foi considerado como a maior causa a ser considerada no superaquecimento de motores, podendo contribuir para a detonação na câmara de combustão devido à má refrigeração e consequente elevação da temperatura nas paredes (BRUNETI, 2012)[6] (p. 421). Somado a isso, os fabricantes alertam sobre o uso de aditivos não recomendados na mistura do líquido de arrefecimento, como a Hyundai (2023)[11] (p. 430) alerta que, para o seu modelo HB20S 2023, o único aditivo recomendado para o sistema de arrefecimento é o anticongelante de etilenoglicol de alta qualidade, que evita a corrosão de seus componentes, cujas peças são compostas de alumínio. O uso da água e de outros aditivos não recomendados (álcool, metanol, dentre outros) no fluido de arrefecimento pode ocasionar também danos sérios ao motor, e os fabricantes alertam para a sua devida substituição periódica, a exemplo da Hyundai (2023)[11] (p. 417) que alerta para a primeira substituição a partir de 100.000 km rodados ou 60 meses e as trocas subsequentes a cada 40.000 km ou 24 meses.

No segundo componente listado, a válvula termostática, que é responsável pelo gerenciamento da vazão do líquido de arrefecimento (MAHLE, 2019)[5] (p. 47), tem papel importante na regulação da temperatura de funcionamento do motor, revelando assim o grau de contribuição que seu mau funcionamento possui no superaquecimento.

Quanto ao ponto de ignição incorreto, Mahle (2019)[5] (p. 50) confirma o seu grau de severidade. A detonação (ponto de ignição muito avançado) pode gerar defeitos na cabeça do pistão e torná-lo inutilizável, já a pré-ignição (ponto de ignição muito atrasado) por sua vez pode ocasionar furos no topo do pistão. A adição irregular de circuitos elétricos no carro também pode afetar esse sistema. A Figura 4 ilustra os efeitos devidos à ocorrência do adiantamento ou atraso do ponto de ignição. O *scanner* automotivo é uma ferramenta crucial para detectar irregularidades neste quesito.



FIGURA 4. Fenômenos devido ao adiantamento ou atraso do ponto de ignição (MAHLE, 2019) (p. 87-88)

(a) Efeitos da detonação (b) Efeitos da pré-ignição

E por fim a quarta maior causa levantada pelo formulário FMEA aplicado para a tratativa do superaquecimento em motores foi o óleo lubrificante irregular, seja devido à sua composição irregular ou nível baixo. Tal causa gera o fenômeno da lavagem de cilindro, ilustrado na Figura 5, que consiste na deterioração dos anéis devido ao maior atrito ocasionado pela lubrificação deficiente. Tal efeito gera vazamentos de combustível da câmara de combustão para o cárter, elevando o nível de óleo e a pressão interna do motor (GRUPO OFICINA BRASIL, 2021)[12].



FIGURA 5. Lavagem de cilindro (MAHLE, 2019) (p. 115)

#### 4. CONCLUSÃO

A partir do levantamento dos índices de cada possível efeito que levaria o motor do automóvel ao superaquecimento foi verificado que três das quatro causas elencadas estão intimamente ligadas ao controle de temperatura, sendo essas o líquido de arrefecimento irregular, a válvula termostática irregular e o óleo lubrificante irregular. Portanto, é essencial que cada usuário verifique no manual de seu veículo qual o tipo e composição ideal do líquido de arrefecimento e óleo lubrificante, pois ao seguir as definições do fabricante a vida útil dos motores será estendida, havendo também a prevenção do superaquecimento. Somado a isso, é crucial acompanhar o plano de manutenção e realizar as trocas de óleo e líquido de arrefecimento em seu período determinado, juntamente com a monitoração do ponto de ignição através do *scanner* automotivo por meio de um técnico especializado.

A ferramenta FMEA se mostrou eficaz para analisar o fenômeno do superaquecimento em motores ciclo Otto por ser possível aliar a experiência profissional de quem convive com esses casos juntamente com as recomendações dos fabricantes e referências bibliográficas, aumentando assim o rigor dos resultados obtidos, além de indicar também ações corretivas e preventivas.

O estudo realizado nessa abordagem revelou itens importantes a serem considerados para a priorização na manutenção de motores automotivos, a fim de evitar cada vez mais as ocorrências do superaquecimento. Como sugestão para trabalhos futuros é possível realizar o formulário FMEA aplicado neste estudo de caso

em mais oficinas mecânicas a fins de comparação, realizar a abordagem de outros tipos de falha que podem surgir em carros de passeio e aplicar essa ferramenta em motores do ciclo Diesel (ônibus e caminhões).

#### REFERÊNCIAS

- [1] PORTO SEGURO. Os 10 problemas mais comuns em carros e como evitá-los. Disponível online: <https://blog.portoseguro.com.br/os-10-problemas-mais-comuns-em-carros-e-como-evita-los> (acesso em 28/08/2024).
- [2] CBMCE. Combate a Incêndio: Corpo de Bombeiros apagou 127 incêndios em veículos no 1º quadrimestre de 2023. Disponível online: <https://www.bombeiros.ce.gov.br/2023/05/03/corpo-de-bombeiros-apagou-127-incendios-em-veiculos-no-1o-quadrimestre-de-2023/> (acesso em 28/08/2024).
- [3] ROOS, C.; DIESEL, L.; MORAES, J. A. R.; DA ROSA, L. C. Aplicação da Ferramenta FMEA: Estudo de Caso em uma Empresa do Setor de Transporte de Passageiros. *TECNO-LÓGICA* 2007, *Volume 11*, p. 29-32. DOI: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v11i1.157>.
- [4] PALADY, P. *FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram*, 3a ed. Editora: IMAM São Paulo, Brasil, 2004. 270 p.
- [5] MAHLE. *Curso Mahle Metal Leve: Motores de Combustão Interna*. Editora: Mahle Metal Leve S.A. São Paulo, Brasil, 2019. 228 p.
- [6] BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna: Volume 1*, 1a ed. Editora: Blucher São Paulo, Brasil, 2012. 553 p.
- [7] BRAINLY. Exercício Preparatório ENEM: Motores de Combustão Interna. Disponível online: <https://brainly.com.br/tarefa/20860765> (acesso em 28/08/2024).
- [8] FIAT. Palio Fire: Manual de Uso e Manutenção 2016. Disponível online: <https://servicos.fiat.com.br/content/dam/fiat/products/handbooks/171/2016/handbook-2016-palio-fire.pdf> (acesso em 28/08/2024).
- [9] VOLKSWAGEN. Manual de Instruções: Voyage 2018. Disponível online: [https://www.vw.com.br/idhub/content/dam/onehub\\_pkw/importers/br/literatura-de-bordo/manual-voyage/MY%202018\\_D191.5B1.VOY.66.pdf](https://www.vw.com.br/idhub/content/dam/onehub_pkw/importers/br/literatura-de-bordo/manual-voyage/MY%202018_D191.5B1.VOY.66.pdf) (acesso em 28/08/2024).
- [10] TOYOTA. Manual do Proprietário: Corolla 2020. Disponível online: <https://media.toyota.com.ar/94d07cd9-fbca-44b4-97b6-36263ccb0841.pdf> (acesso em 28/08/2024).
- [11] HYUNDAI. Manual do Proprietário: HB20 2023. Disponível online: [https://www.hyundai.com.br/content/dam/hmb/download-manuais/manual-hb20-2023-A1SO-PB2304A\\_Site.pdf](https://www.hyundai.com.br/content/dam/hmb/download-manuais/manual-hb20-2023-A1SO-PB2304A_Site.pdf) (acesso em 28/08/2024).
- [12] GRUPO OFICINA BRASIL. Desvendando os segredos dos anéis do pistão que resultam em desempenho do motor e economia. Disponível online: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/motos-e-servicos/desvendando-os-segredos-dos-aneis-do-pistao-que-resultam-em-desempenho-do-motor-e-economia> (acesso em 28/08/2024).

## APÊNDICE A – FORMULÁRIO FMEA UTILIZADO NA OFICINA MECÂNICA

FMEA - Análise de Modo e Efeito de Falha								Pg. 1	
Objeto: Superaquecimento de motor automotivo em carro de passeio									
Cliente: Mecânica Auto Peças Novo Mundo				Data:	Elaborador: Eng. Rodrigo				
				01/07/23					
Resp.: Eng. Rodrigo		Nº FMEA: 001		Revisão: A		Aprovado por: Mecânica Auto Peças Novo Mundo			
Função	Modo de Falha	Efeito	Causa	Severidade	Ocorrência	Deteção	Índice de Risco - NPR	Controle atual	Ação Recomendada
Não superaquecer o motor	Superaquecimento	Baixo rendimento, queda na vida útil e riscos de acidentes	Combustível irregular	3	1	10	30	Amostra	Substituir
			Baixo nível de combustível	2	2	4	16	Med. Nível	Completar
			<b>Óleo lubrificante irregular</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>120</b>	<b>Amostra</b>	<b>Substituir</b>
			Baixo nível de óleo lubrificante	7	2	2	28	Vareta	Completar
			<b>Líq. de arrefecimento irregular</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>280</b>	<b>Amostra</b>	<b>Substituir</b>
			Ausência de líquido de arrefecimento	8	6	1	48	Vareta/Visual	Completar
			Reservatório do líquido de arrefecimento não fechado corretamente	10	6	1	60	Visual	Ajustar
			Reservatório de partida a frio com gasolina irregular/comum	2	2	4	16	Visual	Substituir
			Filtro de ar irregular	3	2	2	12	Visual/Km	Substituir/ Limpeza
			Unidade de controle do motor irregular	4	4	5	80	Scanner	Revisão
			Radiador irregular	8	6	2	96	Visual	Substituir/ Limpeza
			Ventilador do radiador irregular	8	5	2	80	Visual	Ajustar/ Substituir
			Condensador irregular	4	2	4	32	Visual	Substituir/ Limpeza
			Bomba de água irregular	9	7	1	63	Visual/Ruído	Substituir
			<b>Ponto de ignição e/ou injeção incorreto</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>126</b>	<b>Scanner</b>	<b>Ajustar</b>
			Alteração nos chicotes elétricos de ignição e/ou injeção	6	2	3	36	Multímetro	Reparo
<b>Válvula termostática irregular</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>168</b>	<b>Visual/Contato</b>	<b>Substituir</b>			



Artigo

# Modelagem para simulação dinâmica do DFIG no ATP-EMTP

Adriano Aron Freitas de Moura <sup>[1]</sup>, Yago da Silva Pires Rocha <sup>[2]</sup>, Ednardo Pereira da Rocha <sup>[3]</sup>, Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo <sup>[4]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; [adrianoaron@ufersa.edu.br](mailto:adrianoaron@ufersa.edu.br)

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; [eng.yagorocha@gmail.com](mailto:eng.yagorocha@gmail.com)

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; [ednardo.pereira@ufersa.edu.br](mailto:ednardo.pereira@ufersa.edu.br)

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; [daniel.crisostomo@ufersa.edu.br](mailto:daniel.crisostomo@ufersa.edu.br)

*Recebido:* 11/09/2024;

*Aceito:* 11/12/2024;

*Publicado:* 28/12/2024;

**Resumo:** O gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) possibilita um controle das potências ativa, reativa e fator de potência do estator da máquina. A principal contribuição do presente trabalho está em analisar matematicamente o DFIG através de modelos que reflitam os mesmos cálculos realizados pelo software ATP-EMTP em regime dinâmico, conhecendo o comportamento transitório das grandezas elétricas em vários pontos do DFIG e posteriormente comparando os resultados das simulações obtidos com os modelos matemáticos desenvolvidos. Realizaram-se simulações computacionais para obter a operação do DFIG, e por fim, foi realizada uma análise dos efeitos que produzem cada tipo de operação da máquina, analisando valores de correntes em regime dinâmico. Para atingir os objetivos, a modelagem do sistema foi simulada no software ATP-EMTP e comparada com as equações implementadas em MATLAB®. Os resultados obtidos pela simulação validaram a modelagem matemática adotada, comprovando a eficiência do modelo em representar as correntes do estator e do rotor nos eixos d e q obtidas nas simulações. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram a funcionalidade do ATP-EMTP para a simulação de um DFIG, tornando possíveis diversos estudos de melhoria no desempenho do sistema através da modelagem matemática desenvolvida.

**Palavras-chave:** DFIG; transitórios eletromagnéticos; ATP-EMTP

**Abstract:** The doubly fed induction generator (DFIG) allows control of the active and reactive powers and power factor of the machine stator. The main contribution of this work is to mathematically analyze the DFIG through models that reflect the same calculations performed by the ATP-EMTP software in dynamic regime, knowing the transient behavior of the electrical quantities at various points of the DFIG and subsequently comparing the results of the simulations obtained with the mathematical models developed. Computer simulations were performed to obtain the operation of the DFIG, and finally, an analysis of the effects produced by each type of machine operation was performed, analyzing current values in dynamic regime. To achieve the objectives, the system modeling was simulated in the ATP-EMTP software and compared with the equations implemented in MATLAB®. The results obtained by the simulation validated the adopted mathematical modeling, proving the efficiency of the model in representing the stator and rotor currents on the d and q axes obtained in the simulations. The results obtained in this work showed the functionality of ATP-EMTP for the simulation of a DFIG, making possible several studies to improve the system's performance through the developed mathematical modeling.

**Key-words:** DFIG; electromagnetic transients; ATP-EMTP

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, vários países já esboçam propostas iniciais para aliviar a demanda de combustíveis fósseis para a produção de energia, e algumas delas diz a respeito às políticas de desenvolvimento de energias renováveis, visando aumentar a exploração de recursos naturais até então pouco aproveitados e contribuindo para o aumento no rendimento global dessas fontes [1]. Dentre as possibilidades de fontes de energia que supram essa necessidade, a energia eólica é considerada uma das mais importantes e promissoras, principalmente devido a sua viabilidade econômica, baixa relação custo/benefício de exploração e por apresentar um rápido desenvolvimento tecnológico, com potencial de crescimento exponencial ao longo dos anos [2].

Além da dependência que grandes nações têm de fontes não renováveis, mudanças climáticas drásticas induzidas pelo aquecimento global e pela demanda crescente de energia, obrigaram o crescimento da energia renovável em todo o mundo. A energia eólica é pioneira entre as fontes renováveis e tem crescido tanto em capacidade quanto em tecnologia adotada. A energia eólica avançou adicionando mais 54 GW em 2016 e atingiu uma capacidade global total de 486,8 GW [3]. Com a tendência atual, prevê-se atingir uma capacidade eólica instalada acumulada de mais de 2000 GW até 2023 [3]. As grandes mudanças nos últimos 30 anos de geração de energia eólica incluem mudanças em suas tecnologias elétricas e mecânicas e técnicas de controle utilizadas nos requisitos de integração do sistema.

No Brasil, o Rio Grande do Norte (RN) é o estado líder em produção de energia eólica. A produção local, de todos os parques do estado, está integrada ao sistema interligado nacional, que é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do país, que escoar a produção de acordo com as demandas de cada região. O RN possui hoje, segundo a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do RN, 224 empreendimentos em operação, com capacidade de produzir até 6,8 gigawatts. Além disso, há ainda 63 parques eólicos em construção e 85 já contratados.

Atualmente, os geradores mais utilizados em parques eólicos são os geradores de indução de rotor bobinado duplamente alimentados (DFIG – Doubly Fed Induction Generator). Esses geradores acoplados a turbinas formam o que se denomina Aero geradores, que transformam a ação mecânica recebida da força dos ventos em energia elétrica para o sistema [4].

O DFIG vem sendo utilizado desde a década de 1990, principalmente em turbinas eólicas de velocidade variável. Sua configuração trata-se de gerador de indução conectado à rede elétrica tanto pelo estator quanto pelo rotor. A diferença é que este último possui conversores de potência bidirecionais (conversor do lado do rotor – RSC e conversor do lado da rede - GSC) em conexão back-to-back, fazendo sua interface com a rede elétrica para assegurar a geração de energia na frequência e tensão nominal da rede elétrica independente da velocidade do rotor. A principal vantagem desse tipo de configuração é a utilização de um controle eletrônico de potência em pequena escala, aproximadamente um terço da potência do gerador, que acaba por reduzir os custos do sistema e perdas de energia [5].

Apesar de ser comum na literatura estudos com conversores, existem configurações em regime dinâmico sem a utilização deles. Essas configurações perdem as principais vantagens da utilização dos conversores, como o baixo custo e a perda de qualidade de energia. Porém é interessante analisar o comportamento da máquina sem a utilização desses equipamentos eletrônicos, verificando o comportamento dinâmico e transitório de todas as variáveis das máquinas a fim de verificar sua operação. Para a execução desse tipo de estudo, existem diversas ferramentas computacionais que aproximam o sistema simulado do sistema real, sendo possível realizar a análise em regime transitório. O MATLAB® e o ATP-EMTP são softwares muito aplicados ao setor elétrico, principalmente quando se trata de analisar simulações de transitórios eletromagnéticos [6].

## 2. MODELAGEM DO SISTEMA DE GERAÇÃO

A modelagem dos modos de operação traz consigo informações suficientemente relevantes para o entendimento do funcionamento do circuito simulado, porém de forma simples e resumida. Dessa forma, essa etapa será dividida em 4 partes: Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG), Operação do DFIG, Modelagem em Regime Permanente, Representação do Vetor Espacial no Quadro de Referências e Modelagem em Regime Dinâmico. O sistema de geração modelado no ATP-EMTP conta com um DFIG, do tipo UM4-Induction que atua em toda sua faixa de operação. As simulações realizadas limitaram-se a menos de 3 segundos, já que os fenômenos analisados se apresentam dentro deste intervalo.

### 2.1. Gerador de Indução Duplamente Alimentando (DFIG)

A expressão DFIG trata-se de uma configuração em que são alimentados tanto o estator como o enrolamento do rotor de uma máquina. As operações nos modos subsíncrono e supersíncrono do gerador são possíveis, de modo que a frequência permaneça constante. Nas máquinas síncronas, a presença de conversores torna suave a conexão, e assim, não leva aos surtos de tensão. A Figura 1 mostra uma configuração de um esquema elétrico do DFIG conectado à rede elétrica [9].

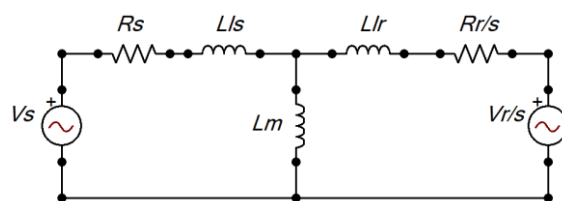


Figura 1. Circuito monofásico-equivalente de regime permanente para o DFIG.

## 2.2. Operação do DFIG

Várias configurações de geradores que trabalham em múltiplas velocidades, incluindo os geradores na configuração DFIG, onde têm um melhor aproveitamento da energia do vento, além de permitir que os parques atendam requisitos das concessionárias [8]. Um gerador de velocidade variável oferece uma alta eficiência em uma larga faixa de velocidades de vento, permitindo a capacidade de fornecimento de energia a uma tensão e frequência constante mesmo com a velocidade inconstante do rotor [11].

O gerador, durante a operação em modo subsíncrono, apresenta uma velocidade do rotor menor que a velocidade síncrona da máquina. Nesta região, o escorregamento ( $s$ ) é positivo. Para este modo de operação, o fluxo de corrente é apresentado na Figura 2 [10]. O gerador durante a operação em modo supersíncrono, a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona da máquina. Nesta região, o escorregamento ( $s$ ) é negativo. Para este modo de operação, o fluxo de corrente é apresentado na Figura 3 [12].

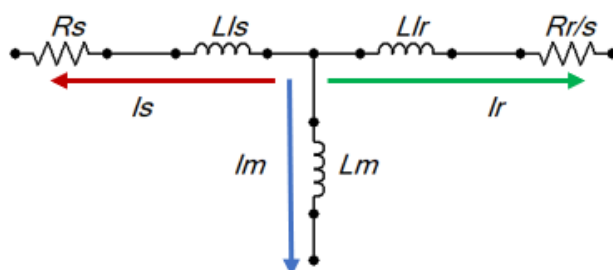


Figura 2. Fluxo de correntes no modo de operação em velocidade subsíncrono.

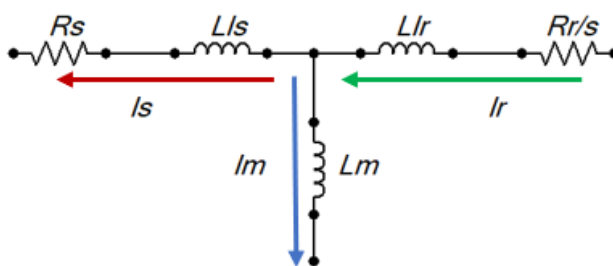


Figura 3. Fluxo de correntes no modo de operação em velocidade supersíncrono.

## 2.3. Modelagem em Regime Permanente

A Figura 4 mostra o circuito equivalente do DFIG que é equivalente ao circuito da máquina de indução com alimentação no rotor.

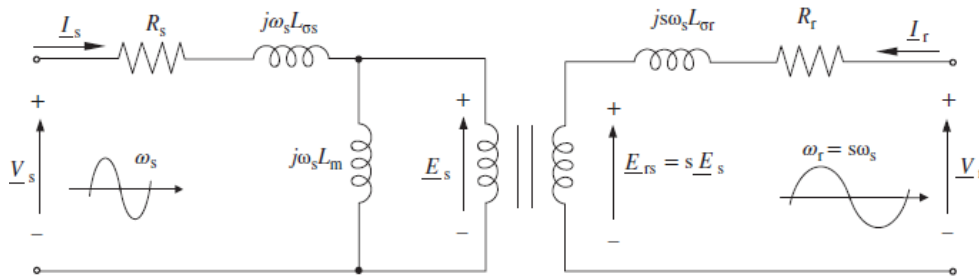


Figura 4. Circuito da máquina de indução com alimentação no rotor.

Onde:

$V_s$  – Tensão fase-neutro do estator. (V);

$\omega_s$  – Frequência elétrica das tensões do estator. (rad/s);

$Lls$  – Indutância de ligação do estator;

$Llr$  – Indutância de ligação do rotor;

$Lm$  – Indutância de magnetização;

$R_s$  – Resistência do estator;

$R_r$  – Resistência do rotor;

$s$  – Escorregamento da máquina;

$t$  – Relação de transformação entre as tensões do estator e do rotor.

Com base no circuito equivalente da Figura 4, pode-se ver que o DFIG é descrito pelas seguintes equações em regime permanente:

$$I_s = \left(\frac{S_s}{V_s}\right)^* \quad (1)$$

$$V_s = (R_s + j\omega_s Lls). I_s + V_m \quad (2)$$

$$V_m t - \frac{I_r}{t} \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s Llr\right) * t^2 = \frac{V_r t}{s} \quad (3)$$

Desconhecendo-se a relação de transformação, as tensões e correntes da máquina podem ainda ser determinadas referidas ao estator. Para isso, basta ver que o fator  $t$  pode ser cancelado na Equação (3). Assim a Equação (3) trabalha com as grandezas referidas ao rotor e a equação (4) trabalha com as grandezas referidas ao estator.

$$V_m - I_r \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s Llr\right) = V_r/s \quad (4)$$

Essas equações representam o equivalente monofásico do DFIG. Para que se possa analisar o DFIG de maneira trifásica um modelo trifásico é necessário. O ATPDraw utiliza o modo de conexão das bobinas do DFIG com o estator ligado em estrela e o rotor ligado em delta, usando a conexão Yd9.

#### 2.4. Representação do vetor espacial nos quadros de referência

Ao desenvolver o modelo dinâmico  $\alpha\beta$  do DFIG, a teoria de vetores espaciais é aplicada ao modelo elétrico básico. Assim como no modelo de estado estacionário, as equações da máquina são assumidas tanto ideais quanto lineares. A Figura 5 mostra os três diferentes quadros de referência rotativos normalmente utilizados para desenvolver modelos baseados em vetores espaciais do DFIG. O referencial do estator ( $\alpha\beta$ ) é estacionário, o referencial do rotor (DQ) gira em  $\omega_m$  e a referência síncrona (dq) gira em  $\omega_s$ . Os subscritos “s”, “r” e “a” são usados para denotar que um vetor espacial é referência ao estator, rotor e referenciais síncronos, respectivamente. Usando rotações diretas e transformação inversas, um vetor espacial pode ser representado em qualquer um desses quadros [13].



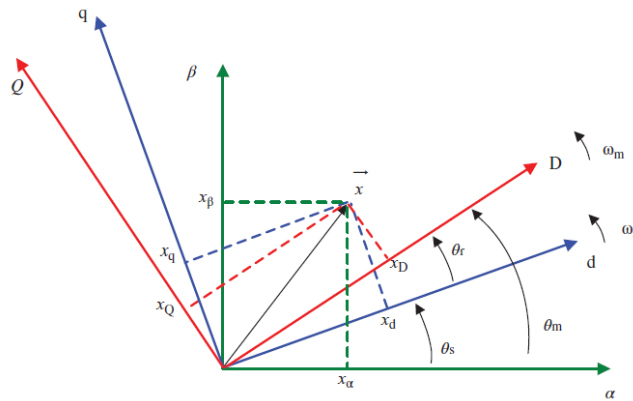


Figura 5. Representação do vetor espacial nos quadros de referência.

#### 2.4.1. Modelo $\alpha\beta$

Logo, as três bobinas do estator e do rotor separadamente, usando a teoria do vetor espacial, podem ser representadas por duas bobinas estacionárias  $\alpha\beta$  para o estator e duas bobinas giratórias DQ para o rotor, proporcionando as seguintes equações de tensão [13]:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \quad \vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} \quad (5)$$

Se ambas as equações de tensão são representadas no referencial estacionário  $\alpha\beta$ , então a equação do rotor deve ser multiplicada por  $e^{j\theta_m}$ , que produz o seguinte conjunto de equações [13]:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \Rightarrow \begin{cases} v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} \\ v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

$$\vec{v}_r^s = R_r \vec{i}_r^s + \frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} - j\omega_m \vec{\psi}_r^s \Rightarrow \begin{cases} v_{\alpha r} = R_r i_{\alpha r} + \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} + \omega_m \psi_{\beta r} \\ v_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} - \omega_m \psi_{\alpha r} \end{cases} \quad (7)$$

Segundo Abu-Rub[13], é possível derivar as expressões de fluxo do estator e do rotor na forma de vetor espacial em um referencial estacionário:

$$\vec{\psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + L_m \vec{i}_r^s \Rightarrow \begin{cases} \psi_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + L_m i_{\alpha r} \\ \psi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta r} \end{cases} \quad (8)$$

$$\vec{\psi}_r^s = L_m \vec{i}_s^s + L_r \vec{i}_r^s \Rightarrow \begin{cases} \psi_{\alpha r} = L_m i_{\alpha s} + L_r i_{\alpha r} \\ \psi_{\beta r} = L_m i_{\beta s} + L_r i_{\beta r} \end{cases} \quad (9)$$

Assim, a partir do conjunto de equações derivadas, o circuito equivalente  $\alpha\beta$  é desenvolvido conforme representado na Figura 6. Existe um circuito equivalente para cada coordenada  $\alpha\beta$ , em que toda a tensão, corrente e magnitudes de fluxo são senoidais com uma frequência de  $\omega_s$ . Por outro lado, as potências ativas e reativa dos lados do estator e do rotor podem ser calculadas de acordo com as seguintes equações [13]:

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{\alpha s} i_{\alpha s} + v_{\beta s} i_{\beta s}) \quad P_r = \frac{3}{2} (v_{\alpha r} i_{\alpha r} + v_{\beta r} i_{\beta r}) \quad (10)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{\beta s} i_{\alpha s} - v_{\alpha s} i_{\beta s}) \quad Q_r = \frac{3}{2} (v_{\beta r} i_{\alpha r} - v_{\alpha r} i_{\beta r}) \quad (11)$$

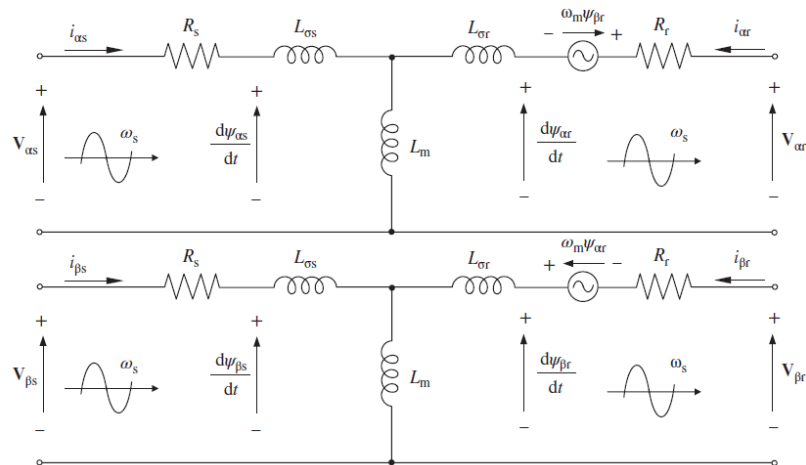


Figura 6. Circuito equivalente do modelo  $\alpha\beta$ .

#### 2.4.2. Modelo dq

O modelo de vetor espacial do DFIG também pode ser representado em um quadro de rotação síncrona. Para esse propósito, multiplica-se as expressões de tensão por  $e^{-j\theta_s}$  e  $e^{-j\theta_r}$ , respectivamente, obtemos as equações no referencial dq [13].

$$\vec{v}_s^a = R_s \vec{i}_s^a + \frac{d\vec{\psi}_s^a}{dt} - j\omega_s \vec{\psi}_s^a \Rightarrow \begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}^a}{dt} + \omega_s \psi_{qs}^a \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}^a}{dt} - \omega_s \psi_{ds}^a \end{cases} \quad (12)$$

$$\vec{v}_r^a = R_r \vec{i}_r^a + \frac{d\vec{\psi}_r^a}{dt} - j\omega_r \vec{\psi}_r^a \Rightarrow \begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}^a}{dt} + \omega_r \psi_{qr}^a \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}^a}{dt} - \omega_r \psi_{dr}^a \end{cases} \quad (13)$$

Da mesma forma, os fluxos produzem:

$$\vec{\psi}_s^a = L_s \vec{i}_s^a + L_m \vec{i}_r^a \Rightarrow \begin{cases} \psi_{ds}^a = L_s i_{ds}^a + L_m i_{dr}^a \\ \psi_{qs}^a = L_s i_{qs}^a + L_m i_{qr}^a \end{cases} \quad (14)$$

$$\vec{\psi}_r^a = L_m \vec{i}_s^a + L_r \vec{i}_r^a \Rightarrow \begin{cases} \psi_{dr}^a = L_m i_{ds}^a + L_r i_{dr}^a \\ \psi_{qr}^a = L_m i_{qs}^a + L_r i_{qr}^a \end{cases} \quad (15)$$

Assim, a partir das equações acima, o circuito elétrico equivalente em dq é obtido, conforme representado na Figura 7.

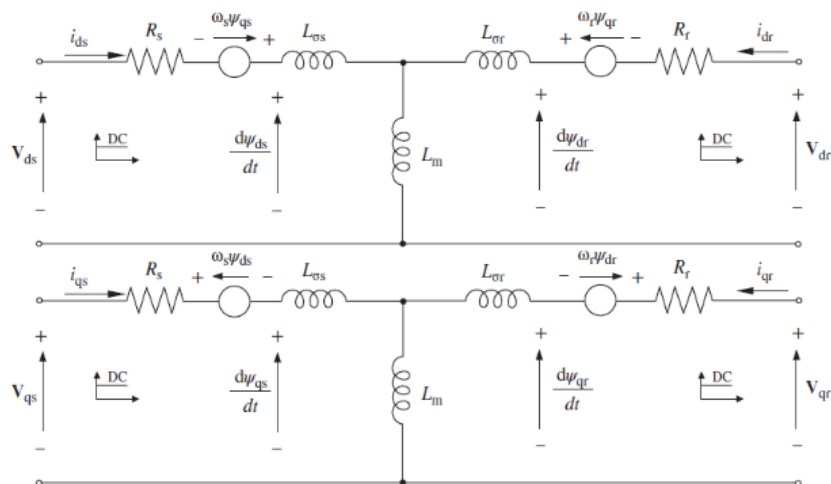


Figura 7. Circuito equivalente do modelo dq.

## 3. MODELAGEM DINÂMICA DA MÁQUINA DFIG NO ATP-EMTP

O ATP possui uma infinidade de funcionalidades, incluindo bibliotecas padrão para modelagem de componentes elétricos e sistemas de potência. Dentro dessas bibliotecas, estão elementos que representam com fidelidade fontes, linhas de transmissão, transformadores e máquinas elétricas rotativas. Além disso, combinados com elementos como resistores, indutores e capacitores, é possível modelar exatamente qualquer um dos tipos de geração. Dentro da biblioteca dedicada às máquinas elétricas rotativas existem geradores e motores síncronos, de corrente alternada e contínua. Em particular, a Máquina Universal Tipo 4 (UM\_4) é um modelo de máquina assíncrona com rotor bobinado (ou também chamado DFIG). Este modelo requer como dados de entrada, além dos próprios parâmetros da máquina, as tensões e torque mecânico do enrolamento do estator e do rotor [14].

Pela teoria convencional de máquinas elétricas, os fluxos do estator e do rotor são calculados de acordo com as expressões (de acordo com as Equações (16) e (17)):

$$\overrightarrow{\lambda_{abcs}} = L_s \overrightarrow{i_{abcs}} + L_m e^{j\theta_r} \overrightarrow{i_{abcr}} \quad (16)$$

$$\overrightarrow{\lambda_{abcr}} = L_m e^{-j\theta_r} \overrightarrow{i_{abcs}} + L_r \overrightarrow{i_{abcr}} \quad (17)$$

Mas no ATP-EMTP o ângulo  $\theta_r$  é somado com o ângulo  $90^\circ$  devido a defasagem existente entre estator e rotor. Substituindo, temos as equações para o fluxo do estator e rotor no referencial dq.

$$\lambda_{sd} = (L_s i_{sd} - L_m i_{rq}) \quad (18)$$

$$\lambda_{sq} = (L_s i_{sq} + L_m i_{rd}) \quad (19)$$

$$\lambda_{rd} = (L_r i_{rd} + L_m i_{sq}) \quad (20)$$

$$\lambda_{rq} = (L_r i_{rq} - L_m i_{sd}) \quad (21)$$

Escrevendo as equações de regime permanente de acordo com o modelo da referência temos as equações do estator:

$$V_{SQ} - R_S I_Q + \omega L_m i_q - \omega L_S I_D = 0 \quad (22)$$

$$V_{SD} - R_S I_D + \omega L_m i_d + \omega L_S I_Q = 0 \quad (23)$$

Para definir as equações do rotor, a corrente entra na fonte de tensão do rotor (Figura 2), a polaridade da fonte de tensão do rotor é invertida, logo obtemos após algumas simplificações a Equação (24).

$$\left(\frac{V_d}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_d + \omega(L_S I_D - L_m i_{qr}) - \omega(L_{lr} i_{rq} + L_{ls} i_{sd}) = 0 \quad (24)$$

Para equações do eixo d do estator introduzimos  $\Psi_{ds}$  e substituímos na Equação (24), logo temos:

$$\left(\frac{V_d}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_d + (V_{SQ} - R_S I_Q) - \omega(L_{lr} i_{rq} + L_{ls} i_{sd}) = 0 \quad (25)$$

Na equação do eixo q do rotor, temos:

$$\left(\frac{V_q}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_q + \omega(L_m i_{rd} + L_s i_{sq}) + \omega(L_{lr} i_{rd} - L_{ls} i_{sq}) = 0 \quad (26)$$

Introduzindo e substituindo  $\Psi_{qs}$ :

$$\left(\frac{V_q}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_q + (R_S i_{rd} - V_{SD}) + \omega(L_{lr} i_{rd} - L_{ls} i_{sq}) = 0 \quad (27)$$

Colocando as equações (22), (23), (25) e (27) na forma matricial e substituindo os valores nas matrizes temos as equações de regime permanente com um modelo condizente com a da simulação no ATP-EMTP.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & \omega L_m & -\omega L_S & -R_S \\ \omega L_m & 0 & -R_S & \omega L_S \\ \frac{r}{s} & -L_{lr} \omega & -L_{ls} \omega & 0 \\ L_{lr} \omega & \frac{r}{s} & R_S & -\omega L_{ls} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{SQ} \\ V_{SD} \\ V_d/s + V_{SQ} \\ V_q/s - V_{SD} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Para obter o regime dinâmico, implementamos as equações:

$$V_{SQ} - R_S I_Q - \omega \lambda_{sd} - \dot{\lambda}_{sq} = 0 \quad (29)$$

$$V_{SD} - R_S I_D + \omega \lambda_{sq} - \dot{\lambda}_{sd} = 0 \quad (30)$$

$$-V_q - R_r I_q - (\omega - \omega_r) \lambda_{rd} + \dot{\lambda}_{rq} = 0 \quad (31)$$

$$-V_d - R_r I_d + (\omega - \omega_r) \lambda_{rq} + \dot{\lambda}_{rd} = 0 \quad (32)$$

Adaptando as equações (31) e (32) em função do escorregamento, obtemos:

$$-V_q - R_r I_q - s\omega\lambda_{rd} + \dot{\lambda}_{rq} = 0 \quad (33)$$

$$-V_d - R_r I_d + s\omega\lambda_{rq} + \dot{\lambda}_{rd} = 0 \quad (34)$$

As equações (29), (30), (33) e (34) demonstram o comportamento dinâmico com um modelo condizente com a da simulação no ATP-EMTP no modo de operação subsíncrono. Para simular a operação no modo supersíncrono, usamos as equações (18) a (23), porém diferente do modo de operação subsíncrono, para definir as equações do rotor, o fluxo de corrente no circuito equivalente do DFIG é diferente. A corrente sai da fonte de tensão (Figura 3), e obtemos o mesmo equacionamento que no modo subsíncrono, porém o escorregamento é negativo, e a polaridade da fonte do rotor fica positiva.

Com esse modelo calcula-se o torque eletromagnético, a velocidade angular e o ângulo do rotor, entre outras variáveis internas, como o fluxo magnético e as correntes de todos os enrolamentos.

#### 4. SIMULAÇÃO DO DFIG EM REGIME DINÂMICO

Para a validação da metodologia, foi utilizado o modelo de projeto do ATP das Figuras 2 e 3, que representa com precisão todos os modos de operação da máquina. Os cálculos matemáticos foram desenvolvidos a partir do modelo do ATP como referência, e os dados disponíveis através de simulação em script no software Matlab. Os parâmetros do DFIG modelado são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do DFIG modelado.

Parâmetro	Valor	Unidade
Conexão do rotor	Yd9	-
Frequência nominal	50	Hz
Indutância de magnetização	0.0025	H
Indutância de dispersão do estator	0.000087	H
Indutância de dispersão do rotor	0.000087	H
Escorregamento (subsíncrono)	10	%
Escorregamento (supersíncrono)	-2.5	%
$R_{ESTATOR}$	0.0026	$\Omega$
$R_{ROTOR}$	0.0029	$\Omega$
P	2	MW
Q	0	MVAr

Os dados de simulação no ATP-EMTP e Matlab, através das equações mencionadas em modo subsíncrono com funcionamento da máquina em regime permanente podem ser vistos nas Figura 8 e Tabela 2. Os dados fazem uma análise entre as correntes e tensões entregues a partir de valores de  $V_{SQ}$  e  $V_{SD}$  e valores de potência ativa e reativa de acordo com a Equação (35).

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_D \\ I_Q \\ V_d/s \\ V_q/s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & \omega L_m & -\omega L_S & -R_S & 0 & 0 \\ \omega L_m & 0 & -R_S & \omega L_S & 0 & 0 \\ \frac{r}{s} & -L_{lr}\omega & -L_{ls}\omega & 0 & 1 & 0 \\ L_{lr}\omega & \frac{r}{s} & R_S & -L_{ls}\omega & 0 & 1 \\ 0 & 0 & V_{SD} & V_{SQ} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{SQ} & -V_{SD} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{SQ} \\ V_{SD} \\ V_{SQ} \\ -V_{SD} \\ -2P_{gen}/3 \\ -2Q_{gen}/3 \end{bmatrix} \quad (35)$$

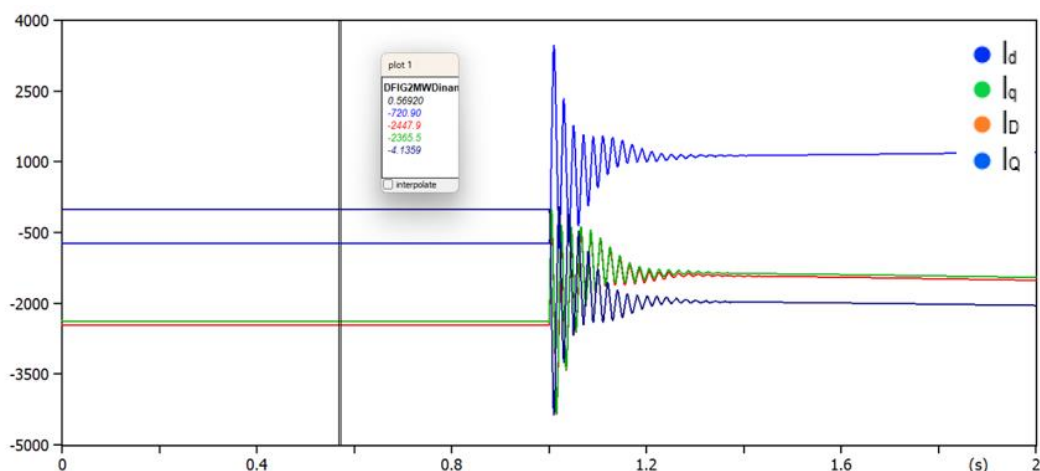


Figura 8 - Dados de simulação do MATLAB® em regime permanente no modo subsíncrono.

Tabela 2. Parâmetros do DFIG modelado em regime permanente.

Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%) ( $\frac{Mat}{ATP} - 1$ )
$I_d$	725,2	720,90	0,59
$I_q$	2449,0	2447,9	0,04
$I_D$	2366,7	2365	0,07
$I_Q$	0	4,17	0,04

A primeira simulação foi realizada com o sistema sem nenhum tipo de interferência, onde foi possível analisar se o funcionamento do circuito estava como descrito na equação. Na Figura 8, pode-se observar que as correntes do referencial dq se comportam como esperado, tanto na simulação em MATLAB® (cálculos com as equações desenvolvidas implementadas em script), como em simulação no ATP-EMTP (parâmetro principal). Quando analisado a diferença de  $I_d$ ,  $I_q$  (rotor),  $I_D$  e  $I_Q$  (estator) nos programas de simulação através de uma equação de erro percentual, percebermos a eficiência do modelo, já que em todos os casos, o erro percentual foi menor que um por cento.

Com os dados de simulação em regime permanente corretos, aplicamos as equações de regime permanente e temos como resultado uma matriz 2 x 2 com os resultados de  $I_d$  e  $I_q$  com referências tanto no estator, como no rotor no modo subsíncrono. Os resultados da simulação estão demonstrados na Figura 9 e na Tabela 3.

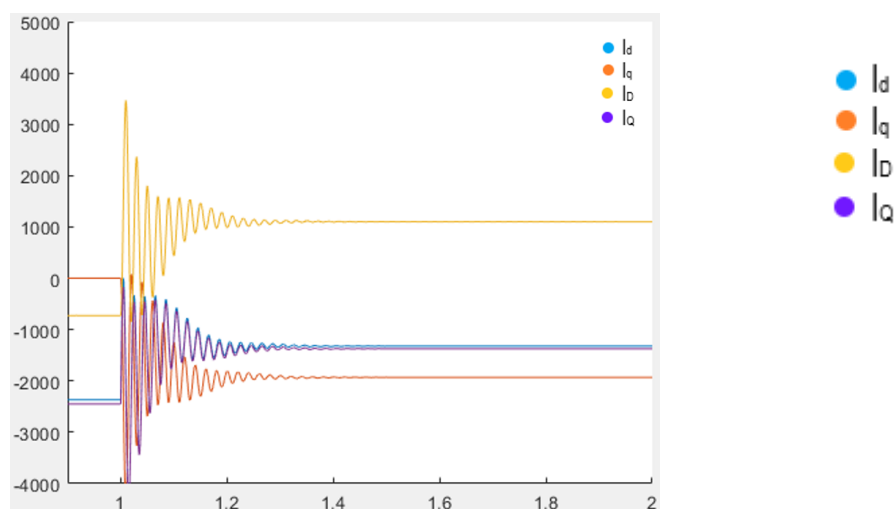


Figura 9 - Dados de simulação do MATLAB® em regime dinâmico no modo subsíncrono.

Tabela 3 - Correntes do DFIG em regime dinâmico no modo subsíncrono.

Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%) ( $\frac{Mat}{ATP} - 1$ )
$I_d$	1320,6	1298,7	1,60
$I_q$	1930,3	1922,5	0,40
$I_D$	1101,8	1099,1	0,24
$I_Q$	1370,3	1356,8	0,99

A segunda simulação foi realizada, e como esperado o resultado foi condizente com o do software ATP-EMTP mostrando a eficiência do modelo. Na Figura 9, pode-se observar como as correntes do referencial dq se comportam. Analisando a eficiência do modelo em estabilizar a corrente, percebe-se que o mesmo apesar de levar pouco tempo para alcançar o objetivo, o modelo quando injetado correntes em regime dinâmico, leva mais tempo para se estabilizar (1,4 segundos). Quando analisado a diferença de  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $I_D$  nos programas de simulação através de uma equação de erro percentual, percebermos a eficiência do modelo, já que em todos os casos, o erro percentual foi menor que 2 por cento. Antes e após o distúrbio a tensão de pico do estator é mudada de uma fonte equilibrada de 563,38 V para 700 V.

A simulação do modo de operação supersíncrono, tem comportamento similar ao do subsíncrono devido ao mesmo equacionamento observando que como o escorregamento é negativo, a polaridade da fonte do rotor fica positiva. Para analisar os resultados deste modo de operação, focamos em analisar os momentos de corrente antes e depois da estabilização proporcionado pelo modelo, logo as Figuras 10 a 12 e a Tabela 4 apresentam os valores de simulação do modo supersíncrono em regime dinâmico.

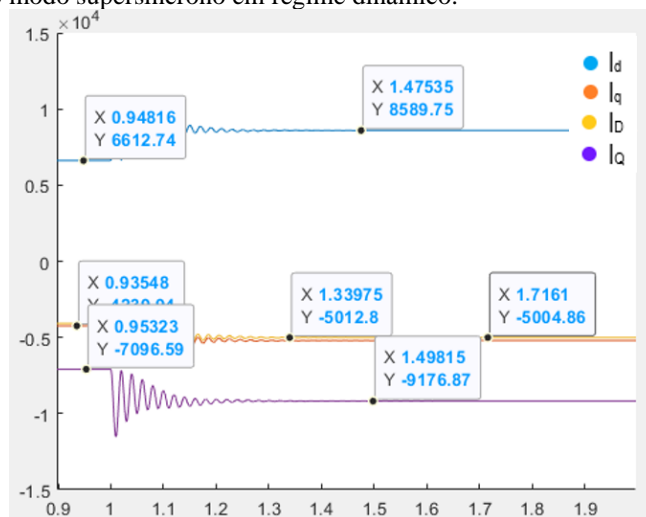


Figura 10 - Dados de simulação do MATLAB® em regime permanente no modo supersíncrono.

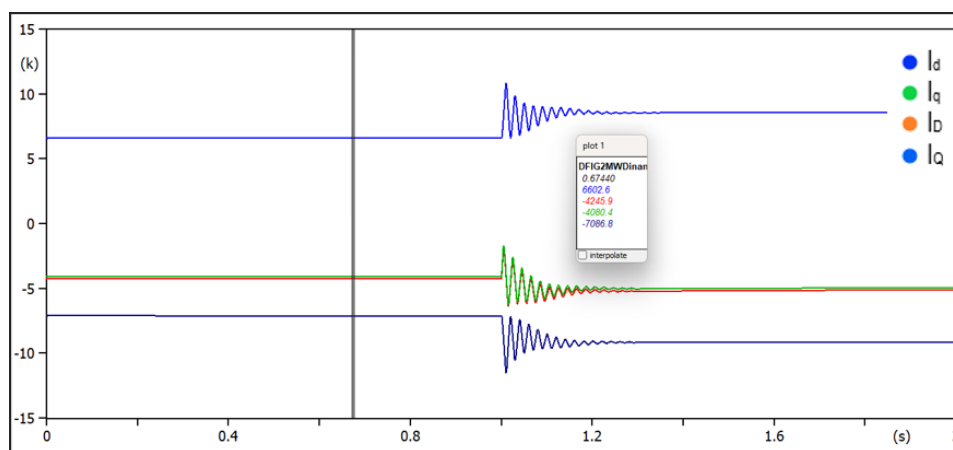


Figura 11 - Dados de simulação do ATP-EMTP em regime permanente no modo supersíncrono antes da estabilização.

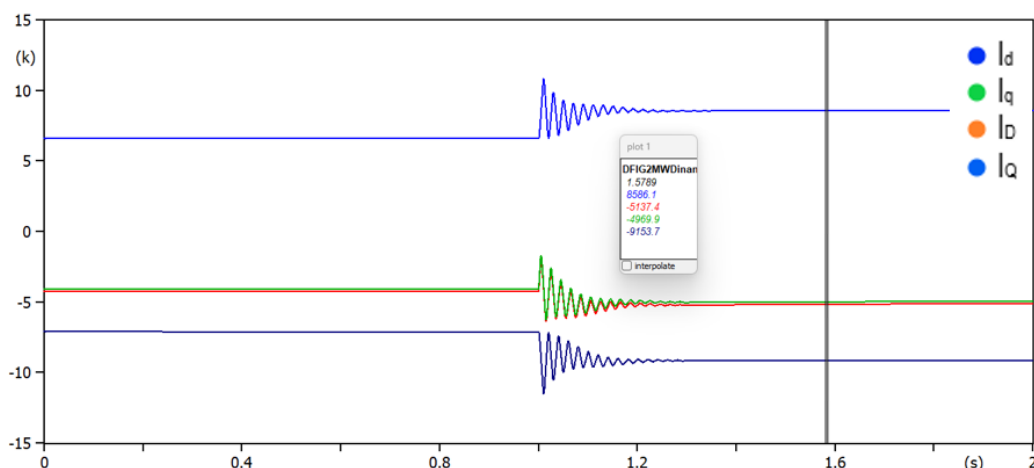


Figura 12 - Dados de simulação do ATP-EMTP em regime permanente no modo supersíncrono depois da estabilização.

Tabela 4 - Correntes do DFIG modelado em regime dinâmico no modo supersíncrono.

T = 0,7 segundos			
Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%)   ( $\frac{Mat}{ATP} - 1$ )
$I_d$	6612,7	6602,6	0,15
$I_q$	4220,1	4245,9	0,60
$I_D$	4037,9	4080,4	1,04
$I_Q$	7096,6	7086,8	0,13
T = 1,6 segundos			
Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%)   ( $\frac{Mat}{ATP} - 1$ )
$I_d$	8559,8	8586,1	0,30
$I_q$	5012,8	5137,4	2,42
$I_D$	5004,9	4969,9	0,70
$I_Q$	9176,9	9153,7	0,25

A simulação do modo de operação supersíncrono, tem comportamento similar ao do subsíncrono devido ao mesmo equacionamento observando que como o escorregamento é negativo, a polaridade da fonte do rotor fica positiva. Para analisar os resultados deste modo de operação, focamos em analisar os momentos de corrente antes e depois da estabilização proporcionado pelo modelo, logo as Figuras 10 a 12 e a Tabela 4 apresentam os valores de simulação do modo supersíncrono em regime dinâmico.

O resultado após a estabilização analisado no tempo  $t=1,58s$  na Figura 12, como esperado foi condizente com as simulações no ATP-EMTP. O comportamento se mostrou praticamente igual ao do modo subsíncrono, apresentando um valor inicial, que logo após sofrer uma perturbação variou seu valor até estabilizar. Quando analisado a diferença de  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $I_D$ ,  $I_Q$  nos programas de simulação através de uma equação de erro percentual, confirmamos a eficiência do modelo nos dois principais modo de operação, já que em todos os casos, o erro percentual foi menor que três por cento. Além disso, o modelo levou pouco mais de 1,2 s para corrigir o distúrbio.

## 5. CONCLUSÃO

A principal contribuição do presente trabalho está em analisar matematicamente o DFIG através de modelos que reflitam os mesmos cálculos realizados pelo software ATP-EMTP em regime dinâmico, conhecendo o comportamento transitório das grandezas elétricas em vários pontos da topologia DFIG. Para alcançar o objetivo, foi necessário definir a configuração do sistema para analisar as operações subsíncrona e supersíncrona da máquina em regime dinâmico, descrever o modelo matemático que representa a configuração escolhida do DFIG, calcular parâmetros de tensão e correntes para os circuitos escolhidos para modelagem da rede, implementar o trabalho no ambiente de simulação ATP-EMTP e MATLAB® e comparar os resultados obtidos.

A partir dos resultados das simulações, foi possível utilizar o MATLAB® e o ATP-EMTP para verificar a operação dos parâmetros elétricos de corrente em alguns modos de operação do DFIG em regime dinâmico verificando o desempenho da metodologia em operar em toda faixa de velocidade da máquina. Dessa forma, pode ser estabelecido que a atuação do modelo foi realizada de forma satisfatória.

Os resultados obtidos neste artigo mostraram a funcionalidade do ATP e MATLAB® para a simulação de um DFIG, e mostrou-se indispensável para entendimento do funcionamento das máquinas de turbinas eólicas, implementadas no ATP-EMTP e usando DFIG; tornando possíveis diversos estudos de melhoria no desempenho do sistema. Como trabalhos futuros, seria interessante trabalhar os efeitos dos conversores do lado da máquina e do lado da rede na operação dinâmica do DFIG.

## AGRADECIMENTOS

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

## REFERÊNCIAS

- [1] LEI, Y. et al. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 1, p. 257–264, mar. 2006.
- [2] ACKERMANN, T. *Wind Power in Power Systems*. 1. ed. Stockholm, Sweden: John Wiley & Sons, 2005
- [3] GWEC: ‘Global wind report 2016’. Available at <http://files.gwec.net/files/GWR2016.pdf>, Acesso em Maio de 2023.
- [4] COSTA, Elvis. Modelagem dos geradores de indução e do compensador SVC, estruturas eólicas e análise de estabilidade de tensão. 2017. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022. Cap. 1.
- [5] SILVA, Bruno. Análise transitória de faltas de geradores de indução duplamente alimentados no contexto da energia eólica. 2018. Dissertação (Energia Elétrica) - Escola Politécnica, USP, 2018.
- [6] SAMUEL NETO, A.; PINHEIRO, E. L. R.; NEVES, F. A. S.; SILVA, S. R.; ROSAS, P. A. C. Análise dinâmica da conexão ao sistema elétrico de usinas eólicas usando ATPdraw. *Eletrônica de Potência*, v. 10, n. 2, 2005.
- [7] SILVA, Jorge; LIMA, Luciano; FERREIRA, Alessandra. Uma experiência didática com base no emprego do Matlab nos cursos de graduação da faculdade de engenharia da UERJ. UERJ, Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 2004.
- [8] DORF, R. C., BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 8 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001, 659p.
- [9] PINTO, Milton de Oliveira et al. *Fundamentos de energia eólica*. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2013.
- [10] LIMA, F.K. DE A., LIMA, S.L., WATANABE, E.H. (2012). The Challenges of Wind Turbines Technologies and their Possible Impacts on the Electric Distribution Network, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos de Potência (SBSE).
- [11] ABAD, G. et al. *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. 1. ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [12] EL-SHARKAWI, M. A. “Wind Energy an Introduction,” CRC Pressy, Vol. 1, No. 3, 2016.
- [13] H. ABU-RUB, M. MALINOWSKI, K. AL-HADDAD. *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*. IEEE Press, United Kingdom, 2014.
- [14] GIUDI, G. D. Initialization of the DFIG Machine for Electromagnetic Transients Calculation. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 16, NO. 2, FEB. 2018