



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

GUSTAVO CARVALHO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO
PREDITIVO EM CAIXAS MULTIPLICADORAS DE AEROGERADORES: ESTUDO
DE CASO NA EMPRESA 8.2 RENEWABLES BRASIL**

Fortaleza

2025

GUSTAVO CARVALHO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO
PREDITIVO EM CAIXAS MULTIPLICADORAS DE AEROGERADORES: ESTUDO
DE CASO NA EMPRESA 8.2 RENEWABLES BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Metalúrgica, do
Campus Pici da Universidade Federal do
Ceará - UFC, na modalidade de monografia,
como requisito parcial para a obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes
da Silva.

Fortaleza

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O47a Oliveira, Gustavo Carvalho de.

Análise de óleo lubrificante como ferramenta de diagnóstico preditivo em caixas multiplicadoras de aerogeradores : estudo de caso na empresa 8.2 Renewables Brasil. / Gustavo Carvalho de Oliveira. – 2025.

32 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

1. Caixa multiplicadora. 2. Análise de óleo. 3. Manutenção preditiva. 4. Contaminantes. 5. Aerogerador. I. Título.

CDD 628

GUSTAVO CARVALHO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO
PREDITIVO EM CAIXAS MULTIPLICADORAS DE AEROGERADORES: ESTUDO
DE CASO NA EMPRESA 8.2 RENEWABLES BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Metalúrgica, do
Campus Pici da Universidade Federal do
Ceará - UFC, na modalidade de monografia,
como requisito parcial para a obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovado em: 05/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luís Paulo Mourão dos Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a todos os docentes da Universidade Federal do Ceará que, com sabedoria, paciência e compromisso, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal. Estendo esta dedicação à pessoa cuja presença, força e amor incondicional tornaram cada passo possível — minha mãe. A ela, cuja dedicação silenciosa moldou o meu caminho, ofereço esta conquista com eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

A jornada até a conclusão deste trabalho de conclusão de curso foi longa e desafiadora, e não teria sido possível sem o apoio, a orientação e o carinho de pessoas essenciais em minha vida, a quem dedico minha mais profunda e sincera gratidão.

Em primeiro lugar, dedico este trabalho à minha mãe, Francisca Maria (Tica). Minhas palavras não são suficientes para expressar o quanto sua orientação, dedicação, esforço e conselhos foram fundamentais em cada etapa. Agradeço por todo o acompanhamento, por sempre torcer por mim e por ser a base de tudo. Este trabalho é um reflexo do seu apoio incondicional. Meu maior amor.

Agradeço imensamente à minha avó, Maria de Lurdes, por ser um símbolo de força e resiliência que sempre me inspirou a persistir, e ao meu pai, Francisco José, por sua torcida constante e por sempre acreditar nos meus sonhos, dando-me a confiança para seguir em frente. Minha gratidão se estende à minha madrinha, Socorro, cujo investimento no meu ensino foi crucial para que eu pudesse trilhar este caminho acadêmico e realizar este objetivo.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, meu muito obrigado por todo o conhecimento pacientemente compartilhado, que construiu a base técnica e intelectual para este e todos os futuros desafios.

Por fim, um agradecimento especial à minha cachorrinha, Nina, por todo o carinho, que trouxe felicidade e aconchego aos dias mais difíceis, tornando a caminhada mais leve e alegre.

RESUMO

A crescente demanda por energia eólica impulsiona a necessidade de estratégias de manutenção que garantam a disponibilidade e a confiabilidade dos aerogeradores. A caixa multiplicadora é um dos componentes mais críticos e onerosos deste sistema, operando sob condições severas. O presente trabalho tem como objetivo apresentar a eficácia da análise de óleo lubrificante como ferramenta de manutenção preditiva em caixas multiplicadoras de aerogeradores Siemens-Gamesa G97 com 12 anos de operação. A partir da atuação prática do autor na empresa 8.2 Renewables Brasil, foram interpretados laudos laboratoriais de amostras de óleo sintético (Shell Omala S3 Wind), analisando parâmetros físico-químicos e a presença de contaminantes. A metodologia consistiu na classificação dos resultados em "Normal", "Atenção" e "Trocar", com base em limites técnicos pré-estabelecidos. Os resultados de um estudo de caso com seis turbinas revelaram que os principais indicadores que levaram a ações corretivas foram o teor elevado de zinco (Zn), indicativo de degradação de aditivos, e a alta contaminação por partículas sólidas (norma ISO 4406). O estudo conclui que o monitoramento contínuo do lubrificante permite a detecção precoce de condições que levam a falhas severas, viabilizando ações corretivas planejadas que reduzem custos operacionais, aumentam a vida útil dos componentes e otimizam a gestão da manutenção dos ativos eólicos.

Palavras-chave: Análise de óleo. Caixa Multiplicadora. Aerogerador. Manutenção preditiva. Contaminantes. Lubrificação.

ABSTRACT

The growing demand for wind energy drives the need for maintenance strategies that ensure the availability and reliability of wind turbines. The gearbox is one of the most critical and costly components of this system, operating under severe conditions. This study aims to demonstrate the effectiveness of lubricating oil analysis as a predictive maintenance tool in gearboxes of Siemens-Gamesa G97 wind turbines with 12 years of operation. Based on the author's practical experience at the 8.2 Renewables Brasil company, laboratory reports of synthetic oil samples (Shell Omala S3 Wind) were interpreted, analyzing physicochemical parameters and the presence of contaminants. The methodology consisted of classifying the results into "Normal", "Attention", and "Replace" categories, based on pre-established technical limits. The results of a case study involving six turbines revealed that the main indicators leading to corrective actions were elevated zinc (Zn) content, indicative of additive degradation, and high solid particle contamination (ISO 4406 standard). The study concludes that the continuous monitoring of the lubricant allows for the early detection of conditions that lead to severe failures, enabling planned corrective actions that reduce operational costs, increase component lifespan, and optimize the maintenance management of wind assets.

Keywords: Oil analysis. Gearbox. Wind turbine. Predictive maintenance. Contaminants. Lubrication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura de uma caixa multiplicadora de aerogerador com um planetário e dois estágios paralelos.	14
Figura 2 – Manifestações de falha em pistas de rolamento: (a) macropitting e trincas axiais, (b) detalhe de trinca axial e (c) macropitting severo.	16
Figura 3 – Imagens ópticas de seção transversal mostrando a morfologia das WECs e microfissuras na superfície do rolamento.	16
Figura 4 – Relação entre a eficiência da filtragem e o fator de vida de rolamentos.	18
Figura 5 – Redução da vida útil relativa de um rolamento em função do teor de água (ppm) no óleo.	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Físico-Químicas do Óleo Shell Omala S3 Wind.....	20
Tabela 2 - Especificações Técnicas do Frasco de Coleta.	21
Tabela 3 - Limites para Diagnóstico do Óleo da Caixa Multiplicadora.	23
Tabela 4 - Resultados Consolidados das Análises de Óleo.....	24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 2.....	25
Gráfico 2 – Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 4	26
Gráfico 3 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 1	27
Gráfico 4 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 3.....	28
Gráfico 5 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 5.....	29
Gráfico 6 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 6.....	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 A Caixa Multiplicadora do Aerogerador: Função e Criticidade	14
3.2 Modos de Falha em Rolamentos de Caixas Multiplicadoras: Fissuras Brancas	15
3.3 Análise de Óleo como Ferramenta Preditiva.....	17
4.METODOLOGIA	20
4.1 Objeto de Estudo e Amostragem.....	20
4.2 Critérios de Análise e Classificação.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 Análise dos Laudos "OK" (Caixa Multiplicadora - 2 e Caixa Multiplicadora - 5)	25
5.2 Análise dos Laudos "Atenção": Foco no Teor de Zinco.....	26
5.3 Análise dos Laudos "Trocar": Níveis Críticos de Zinco e Contaminação Sólida	28
5.4 Discussão Geral.....	30
6. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis tem se expandido significativamente nas últimas décadas, com destaque para a energia eólica como uma das mais promissoras e competitivas (MARQUES et al., 2015). Os aerogeradores, equipamentos centrais desse processo, são sistemas complexos projetados para operar de forma contínua e autônoma. No entanto, estão sujeitos a falhas mecânicas, especialmente no conjunto de transmissão, a caixa multiplicadora, que sofre elevadas cargas dinâmicas durante sua operação (EVANS, 2016). Uma falha nesse equipamento pode levar a longos períodos de inatividade e custos de reparo que representam uma parcela significativa do orçamento de Operação e Manutenção (O&M) de um parque eólico. Para ilustrar a magnitude desses custos, uma única troca de óleo lubrificante em uma turbina pode chegar a custar US\$ 12.000.

Nesse contexto, a manutenção preditiva (PdM) surge como uma estratégia essencial para antecipar falhas e otimizar a performance dos ativos. Dentre as diversas técnicas de PdM, a análise de óleo lubrificante é uma das ferramentas mais poderosas e consolidadas, permitindo monitorar o estado de desgaste de componentes internos, como engrenagens e rolamentos, bem como a degradação do próprio fluido lubrificante (GONZÁLEZ-GORBEÑA et al., 2018). Através da identificação de partículas metálicas, contaminantes externos e alterações nas propriedades físico-químicas do óleo, é possível diagnosticar problemas em estágio inicial, antes que evoluam para falhas severas.

Este trabalho apresenta um estudo de caso real, fundamentado nas atividades desenvolvidas na empresa 8.2 Renewables Brasil, onde o autor atua na interpretação de laudos de análise de óleo de caixas multiplicadoras de aerogeradores do modelo Siemens-Gamesa G97, com 12 anos de operação. O estudo foca na aplicação de critérios técnicos para classificar a condição do óleo e do equipamento, subsidiando a tomada de decisão para intervenções de manutenção.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicação da análise de óleo lubrificante como uma ferramenta eficaz para o diagnóstico preditivo da condição de caixas multiplicadoras em aerogeradores, utilizando como base os procedimentos e dados da empresa 8.2 Renewables Brasil.

2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a aplicabilidade de uma metodologia de diagnóstico, baseada nos limites de contaminantes em um fluido, para classificar a condição de amostras de óleo e orientar ações de manutenção preditiva.
- Identificar, a partir da análise dos laudos, os parâmetros de degradação e contaminação (partículas sólidas) como os indicadores mais críticos para a frota em estudo, em detrimento dos metais de desgaste.
- Diferenciar, com base nos dados, os modos de falha iminentes relacionados à degradação química do lubrificante daqueles causados por contaminação física severa.

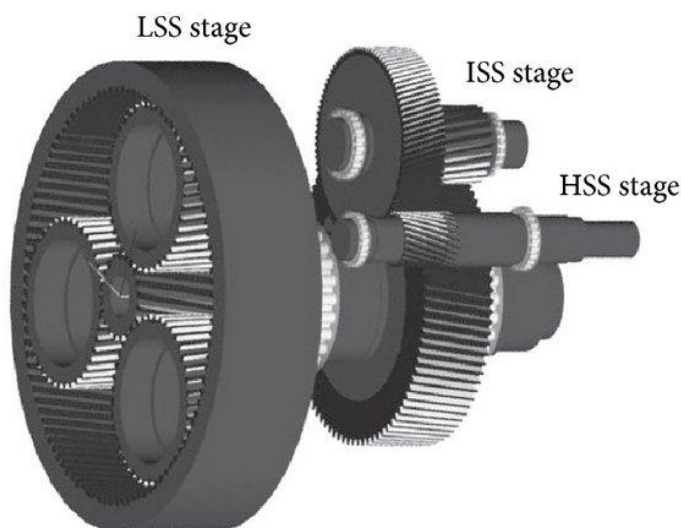
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A Caixa Multiplicadora do Aerogerador: Função e Criticidade

A caixa multiplicadora é um componente crítico em aerogeradores de grande porte. Sua principal função é converter a baixa velocidade de rotação das pás do rotor (tipicamente entre 15-20 rpm) em uma alta velocidade de rotação (acima de 1.500 rpm) necessária para que o gerador elétrico opere em sua faixa de máxima eficiência (GEAR TECHNOLOGY, 2013).

As turbinas do presente estudo, modelo Siemens-Gamesa G97, são equipadas com uma caixa multiplicadora de três estágios. A configuração típica, conforme ilustrado na Figura 1, consiste em um estágio planetário de baixa velocidade seguido por dois estágios de engrenagens helicoidais paralelas, arquitetura que permite uma grande taxa de multiplicação em um espaço compacto.

Figura 1 – Arquitetura de uma caixa multiplicadora de aerogerador com um planetário e dois estágios paralelos.



Fonte: Adaptado de Schwingshackl e Dwyer-Joyce (2015).

Devido às cargas variáveis e aos altos torques a que são submetidas, as caixas multiplicadoras são suscetíveis a modos de falha como o *pitting* (micropitting e macropitting) nas engrenagens e a fadiga por contato rolante nos rolamentos, frequentemente associadas a fenômenos como as Fissuras Brancas, ou no inglês *White Etching Cracks* (WECs) (EVANS, 2016). A lubrificação adequada é, portanto, o

fator mais crítico para mitigar esses desgastes e garantir a longevidade do componente (SINHA et al., 2014).

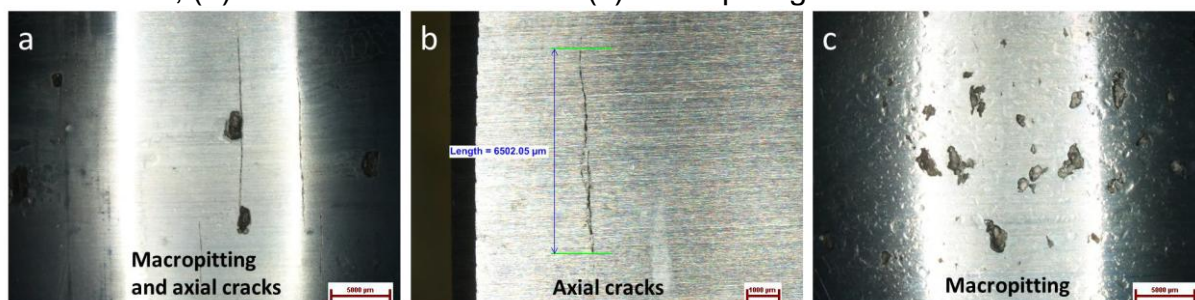
3.2 Modos de Falha em Rolamentos de Caixas Multiplicadoras: Fissuras Brancas

A confiabilidade dos rolamentos da caixa multiplicadora é um dos maiores desafios na operação de aerogeradores, sendo comum a ocorrência de falhas prematuras. Um dos mecanismos de falha mais estudados e danosos neste contexto é o fenômeno conhecido como Fissuras Brancas (WECs).

As WECs são fissuras que se formam abaixo da superfície da pista do rolamento. Sua identificação é feita por meio de análises metalográficas, onde seções do rolamento são cortadas, polidas e atacadas com um reagente químico, como o Nital 2%, para revelar a microestrutura do aço. Através de microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), observa-se que a região ao redor da fissura adquire uma aparência branca, indicando uma alteração microestrutural. Essa alteração consiste em grãos nanocristalinos com cerca de 10 nm de diâmetro.

A consequência direta da formação de Fissuras Brancas é uma falha severa e, principalmente, prematura. Para contextualizar a gravidade desse fenômeno, é preciso entender a vida projetada (ou vida L10). Este é um cálculo estatístico padronizado que representa a vida útil nominal que 90% de um lote de rolamentos idênticos deve atingir ou superar antes de falhar por fadiga. O grande problema das WECs é que elas invalidam essa projeção, causando falhas que ocorrem com apenas 1% a 20% da vida L10 calculada. Na prática, isso significa que um componente projetado para durar 20 anos pode falhar em um período de alguns meses a, no máximo, 4 anos. Na superfície, o dano se manifesta visivelmente como trincas axiais e *macropitting* (deslocamento de material), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Manifestações de falha em pistas de rolamento: (a) macropitting e trincas axiais, (b) detalhe de trinca axial e (c) macropitting severo.



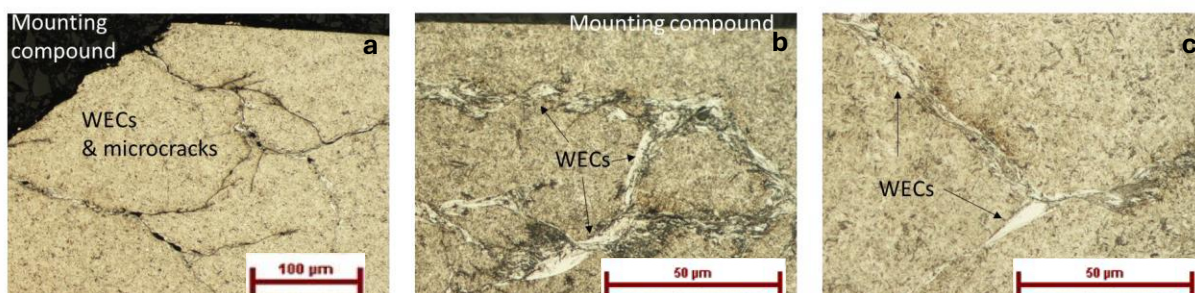
Fonte: Adaptado de Singh, Pulikollu e Smith (2017).

A origem das WECs é complexa e atribuída a uma combinação de fatores, não havendo ainda um consenso definitivo. Dentre as principais hipóteses para sua formação, destacam-se:

- Fatores Químicos: A penetração de hidrogênio no aço, originado da decomposição do lubrificante ou da contaminação por água.
- Fatores Mecânicos: Cargas transitórias e picos de torque que excedem os limites de projeto do rolamento, gerando bandas de cisalhamento adiabático.
- Fatores Metalúrgicos: A presença de concentradores de tensão no material, como inclusões não-metálicas (óxidos, sulfetos), que atuam como pontos de nucleação para as trincas.

A Figura 3 apresenta a aparência microscópica das WECs na subsuperfície do material, mostrando a rede de microfissuras que se forma e se propaga, levando à falha final do componente.

Figura 3 – Imagens ópticas de seção transversal mostrando a morfologia das WECs e microfissuras na superfície do rolamento.



Fonte: Adaptado de Singh, Pulikollu e Smith (2017).

3.3 Análise de Óleo como Ferramenta Preditiva

A análise de óleo lubrificante é uma técnica de monitoramento não invasiva que fornece um "diagnóstico" da saúde interna de uma máquina. A falha da lubrificação, especialmente devido à contaminação, é uma das principais causas de avarias nas caixas multiplicadoras de aerogeradores. A análise se baseia em três pilares principais (MDPI, 2020):

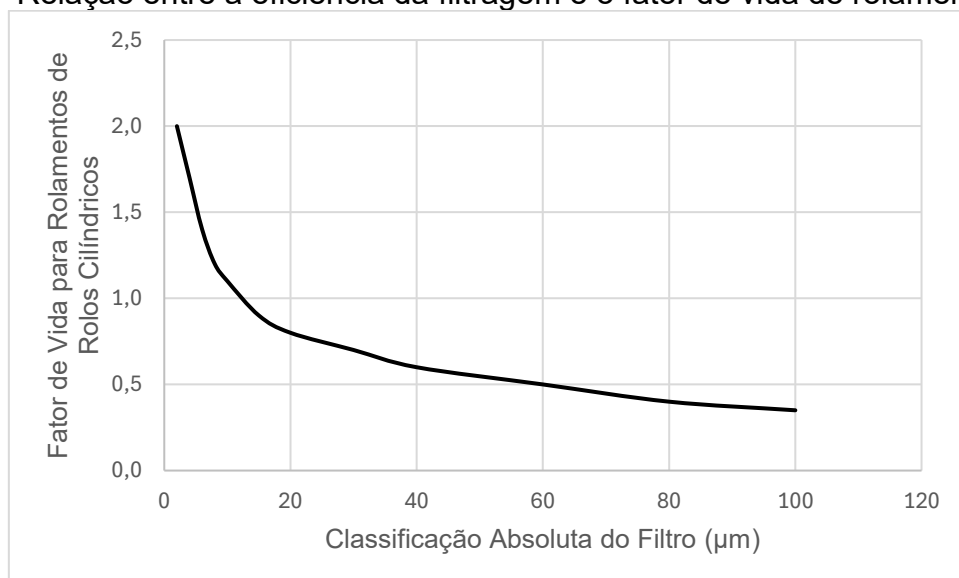
a) Análise de Desgaste: Identifica e quantifica a presença de partículas metálicas geradas pelo atrito e fadiga dos componentes. A espectrometria de emissão óptica é a técnica mais comum para detectar elementos como Ferro (Fe), Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Fósforo (P), que indicam tanto o desgaste de peças quanto a condição dos aditivos do óleo.

b) Análise das Propriedades do Óleo: Avalia a condição do próprio lubrificante para garantir que ele ainda cumpre suas funções. Os principais parâmetros são a Viscosidade, cuja alteração pode indicar oxidação ou contaminação, e o Número de Acidez Total (TAN), que mede a degradação ácida do óleo.

c) Análise de Contaminação: Mede a presença de substâncias estranhas que prejudicam a função do lubrificante e aceleram o desgaste. Os principais contaminantes são as partículas sólidas e a umidade, cujo controle é determinante para a vida útil do equipamento.

A contaminação por partículas sólidas é quantificada por normas como a ISO 4406. Um óleo contaminado atua como um fluido abrasivo, acelerando o desgaste de engrenagens e rolamentos. A norma ISO 81400-4 recomenda um nível de limpeza de 16/14/11 (indica que, em 1 mL de óleo, há até 20.000 partículas maiores que 4 μm , até 5.000 partículas maiores que 6 μm e até 640 partículas maiores que 14 μm) para garantir a longevidade dos componentes. O impacto da limpeza do óleo na vida útil de um rolamento é significativo, como apresentado na Figura 4, onde um fator de vida maior está associado a uma filtragem mais eficiente (menor "absolute filter rating").

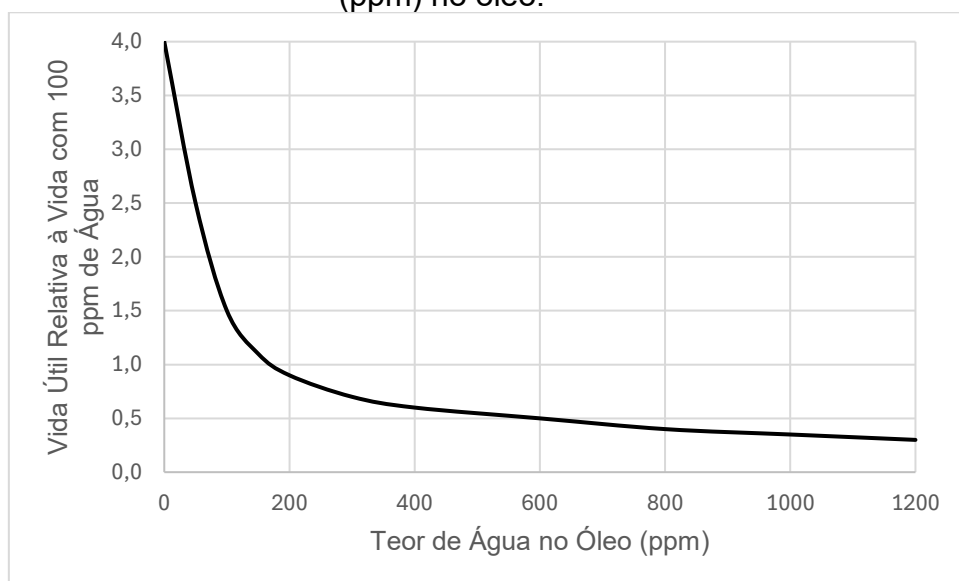
Figura 4 – Relação entre a eficiência da filtragem e o fator de vida de rolamentos.



Fonte: Adaptado de Singh, Kurien e Villayamore (2021).

A contaminação por umidade é igualmente danosa. Mesmo pequenas quantidades de água no óleo podem causar corrosão, depleção de aditivos e, principalmente, a fratura por hidrogênio, reduzindo drasticamente a vida por fadiga dos rolamentos. A Figura 5 ilustra como a vida útil de um rolamento decai exponencialmente com o aumento do teor de água no óleo. Níveis de umidade acima de 500 ppm já são considerados críticos e podem levar a uma redução de até 75% na vida útil do componente.

Figura 5 – Redução da vida útil relativa de um rolamento em função do teor de água (ppm) no óleo.



Fonte: Adaptado de Singh, Kurien e Villayamore (2021).

Portanto, a análise periódica desses contaminantes é uma ferramenta preditiva essencial, pois permite identificar e quantificar os riscos diretos à integridade e longevidade dos componentes mais críticos de uma caixa multiplicadora.

4.METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como um estudo de caso descritivo e quantitativo. A metodologia foi desenvolvida com base nos procedimentos operacionais da 8.2 Renewables Brasil para o monitoramento de ativos eólicos.

4.1 Objeto de Estudo e Amostragem

O estudo foi realizado com base em amostras de óleo lubrificante retiradas de seis aerogeradores Siemens-Gamesa G97 de um mesmo parque eólico, todos com aproximadamente 12 anos de operação. O lubrificante em uso é o óleo sintético Shell Omala S3 Wind 320, projetado especificamente para as condições severas encontradas em caixas de multiplicação de turbinas eólicas. As propriedades físico-químicas deste óleo, conforme fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1 e servem como referência para a condição de um fluido novo.

Tabela 1 - Propriedades Físico-Químicas do Óleo Shell Omala S3 Wind.

Propriedades	Método	Shell Omala S3 Wind
Grau de viscosidade	ISO 3448	320
Viscosidade cinemática a 40 °C (mm²/s)	ISO 3448	320
Viscosidade cinemática a 100 °C (mm²/s)	ISO 3448	24,6
Índice de viscosidade	ISO 2909	98
Ponto de fulgor, COC (°C)	ISO 2592	>230
Ponto de fluidez (°C)	ISO 3016	-21
Densidade a 15 °C (kg/m³)	ISO 12185	901
Teste de capacidade de carga FZG	DIN 51354-2	-
Estágio de falha de carga A/8.3/90	-	>14
Estágio de falha de carga A/16.6/90	-	>14

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica Shell Omala S3 Wind (2024).

Conforme detalhado na Tabela 1, a viscosidade cinemática a 40 °C de 320 cSt (mm²/s) é o principal parâmetro de referência para este estudo. As análises laboratoriais apresentadas na seção de resultados (Seção 5) medem o desvio em relação a este valor nominal. Variações significativas nesta propriedade podem indicar degradação do óleo por oxidação (aumento da viscosidade) ou contaminação por outros fluidos (redução da viscosidade), impactando diretamente a capacidade do óleo de formar um filme lubrificante protetor.

As amostras foram coletadas por técnicos de campo seguindo um protocolo padronizado para garantir a representatividade e evitar contaminação cruzada. Para o armazenamento e envio ao laboratório, foram utilizados frascos de polipropileno (PP) com tampa de rosca, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 2. A escolha deste material é fundamental para garantir a integridade da amostra, uma vez que sua composição é quimicamente resistente a óleos e graxas, e sua tampa com vedação previne a entrada de contaminantes externos durante o transporte.

Tabela 2 - Especificações Técnicas do Frasco de Coleta.

Propriedade	Valor
Capacidade nominal	250 mL
Material	Polipropileno (PP)
Altura total	~125 mm
Diâmetro externo (base)	~60 mm
Bocal / Rosca	GL 32 (rosca padrão para frascos)
Tampa	Rosca com vedação (sem anel interno)
Cor	Natural translúcido (ligeiramente leitoso)
Peso do frasco	~35 a 45 g
Densidade	0,90–0,91 g/cm ³
Temperatura máxima	Até 121 °C (autoclavável)
Temperatura mínima	~-10 °C
Resistência química	Boa: resiste a óleos, graxas, ácidos leves
Rigidez dielétrica	~25–40 kV/mm
Resistência ao impacto	Média
Índice de fusão	3–5 g/10 min (230 °C / 2,16 kg)

Fonte: Adaptado de Nalgon (2022).

As amostras foram enviadas a um laboratório terceirizado especializado (cuja identidade é preservada) para a realização de um conjunto de ensaios, incluindo espectrometria de metais, contagem de partículas, medição de teor de água, viscosidade e acidez.

A determinação das concentrações de elementos metálicos (medidos em ppm) foi realizada por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). Este método é o padrão da indústria para análise de metais em óleos lubrificantes, regido pela norma ASTM D5185.

O equipamento utilizado pelo laboratório é um Espectrômetro de Emissão Óptica. O princípio de funcionamento ocorre da seguinte forma:

1. A amostra de óleo, previamente diluída em um solvente, é transformada em um aerossol fino (nebulizada) e injetada no coração do equipamento: uma tocha de plasma de gás argônio aquecido a temperaturas altíssimas, entre 6.000 e 10.000 °C.
2. Neste ambiente extremo, as moléculas do óleo são atomizadas. Os átomos de cada elemento metálico (Ferro, Zinco, Cobre etc.) absorvem a energia do plasma e seus elétrons saltam para um nível de energia mais alto, chamado de estado excitado.
3. Este estado é instável, e os elétrons retornam imediatamente ao seu nível de energia normal. Ao fazer isso, eles liberam a energia absorvida na forma de luz.
4. O ponto fundamental da técnica é que cada elemento químico emite luz em comprimentos de onda (ou "cores") únicos e específicos, que funcionam como uma "impressão digital" atômica.
5. O espectrômetro detecta quais comprimentos de onda estão presentes, identificando os elementos na amostra, e mede a intensidade da luz em cada um deles. A intensidade da luz é diretamente proporcional à concentração do elemento.

Ao final do processo, o software do equipamento calcula a concentração de cada elemento em partes por milhão (ppm). São estes os dados quantitativos que compõem os gráficos espectrofotométricos apresentados na seção de Resultados e Discussão deste trabalho.

4.2 Critérios de Análise e Classificação

Após o recebimento dos laudos laboratoriais, a interpretação e o diagnóstico foram realizados pelo autor, seguindo os critérios internos da 8.2 Renewables Brasil. Esses critérios estabelecem limites para os principais parâmetros, classificando cada resultado em três níveis de severidade: "Normal", "Atenção" e "Trocar".

Tabela 3 - Limites para Diagnóstico do Óleo da Caixa Multiplicadora.

Parâmetros	Unidade	Normal	Atenção	Trocar
Viscosidade Mínima a 40°C	cSt	≥ 300	290 a 300	< 290
Viscosidade Máxima a 40°C	cSt	≤ 330	330 a 350	>350
Água (H ₂ O)	ppm	≤ 300	301 a 500	> 500
NAS 1638	-	≤ 6	7 a 8	> 8
TAN	mg KOH/g	≤ 2,5	-	>2,5
Aluminio	ppm	≤ 8	8 a 13	> 13
Cobre	ppm	≤ 20	21 a 30	> 30
Ferro	ppm	≤ 50	51 a 60	> 60
Chumbo	ppm	≤ 8	9 a 11	> 11
Cromo	ppm	≤ 3	3 a 5	> 5
Zinco	ppm	≤ 40	41 a 50	> 50
Estanho	ppm	≤ 40	41 a 50	> 50
PQ index	100 ml	≤ 120	-	> 120

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base no conjunto de normas internacionais (ISO e ASTM), normas militares (NAS) e critérios operacionais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados os laudos de 6 caixas multiplicadoras de 6 turbinas, nomeadas ficticiamente de Caixa Multiplicadora 1, Caixa Multiplicadora 2, Caixa Multiplicadora 3, Caixa Multiplicadora 4, Caixa Multiplicadora 5 e Caixa Multiplicadora 6. Os resultados consolidados permitiram uma avaliação comparativa da condição de cada equipamento.

Tabela 4 - Resultados Consolidados das Análises de Óleo.

Parâmetros	Caixa Multiplicadora 1	Caixa Multiplicadora 2	Caixa Multiplicadora 3	Caixa Multiplicadora 4	Caixa Multiplicadora 5	Caixa Multiplicadora 6
Laudo	Atenção	Normal	Atenção	Normal	Trocar	Trocar
Viscosidade a 40° (cSt)	330,7	335,2	333,7	335,4	311,8	312,2
Água (H ₂ O) (ppm)	166	235	176	274	161	191
TAN (mg KOH/g)	1,15	1,04	0,87	0,83	0,95	0,84
Alumínio (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cobre (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cromo (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ferro (ppm)	14,2	37,86	31,11	42,05	49,4	20,26
Silício (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Chumbo (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Zinco (ppm)	43,86	37,1	42,72	22,57	51,93	17,61
Estanho (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Molibdênio (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Níquel (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Calcio (ppm)	0,13	0,1	0,1	0,12	0,31	5
Sódio (ppm)	4,17	7,29	10,78	9,79	9,04	7,6
Prata (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Boro (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Bário (ppm)	0,12	0,11	0,13	0,11	0,16	0,09
Magnésio (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Manganês (ppm)	0,1	0	0,1	0,1	0,09	0,1
Fósforo (ppm)	295,8	254	243	243,3	252,3	224,9
Titânio (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Vanádio (ppm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
NAS 1638	6	6	6	6	6	10

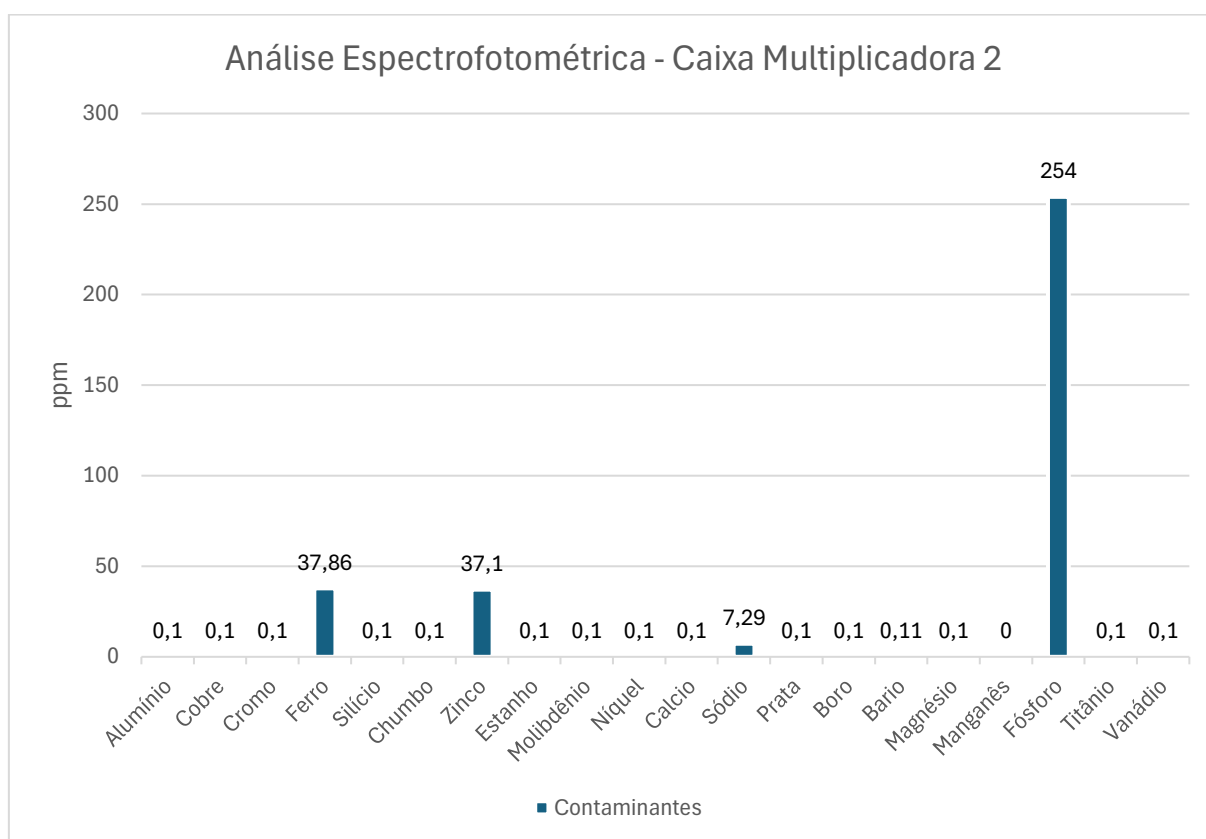
Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base nos laudos laboratoriais disponibilizados pela 8.2 Renewables Brasil.

É notável na Tabela 4 o elevado pico de Fósforo (P). É importante ressaltar que esta alta concentração não representa uma contaminação, mas sim uma característica da formulação do óleo. O Fósforo é um elemento chave em aditivos antidesgaste e de extrema pressão, como o ZDDP, essenciais para a proteção das engrenagens sob altas cargas. Portanto, o monitoramento deste elemento visa observar uma possível depleção ao longo do tempo, e não sua alta concentração inicial, que é normal e esperada.

5.1 Análise dos Laudos "OK" (Caixa Multiplicadora - 2 e Caixa Multiplicadora - 5)

As máquinas Caixa Multiplicadora 2 e Caixa Multiplicadora 5 foram classificadas como "Normal", servindo como uma linha de base para um equipamento saudável dentro do estudo. A análise espectrofotométrica da Caixa Multiplicadora 2, apresentada no Gráfico 1, corrobora o diagnóstico. Os principais metais de desgaste, Ferro (Fe) e Zinco (Zn), apresentaram concentrações de 37,86 ppm e 37,1 ppm respectivamente. Ambos os valores estão confortavelmente dentro dos limites de normalidade ($\text{Fe} \leq 50 \text{ ppm}$ e $\text{Zn} \leq 40 \text{ ppm}$), indicando ausência de desgaste anormal e boa condição do pacote de aditivos.

Gráfico 1 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 2

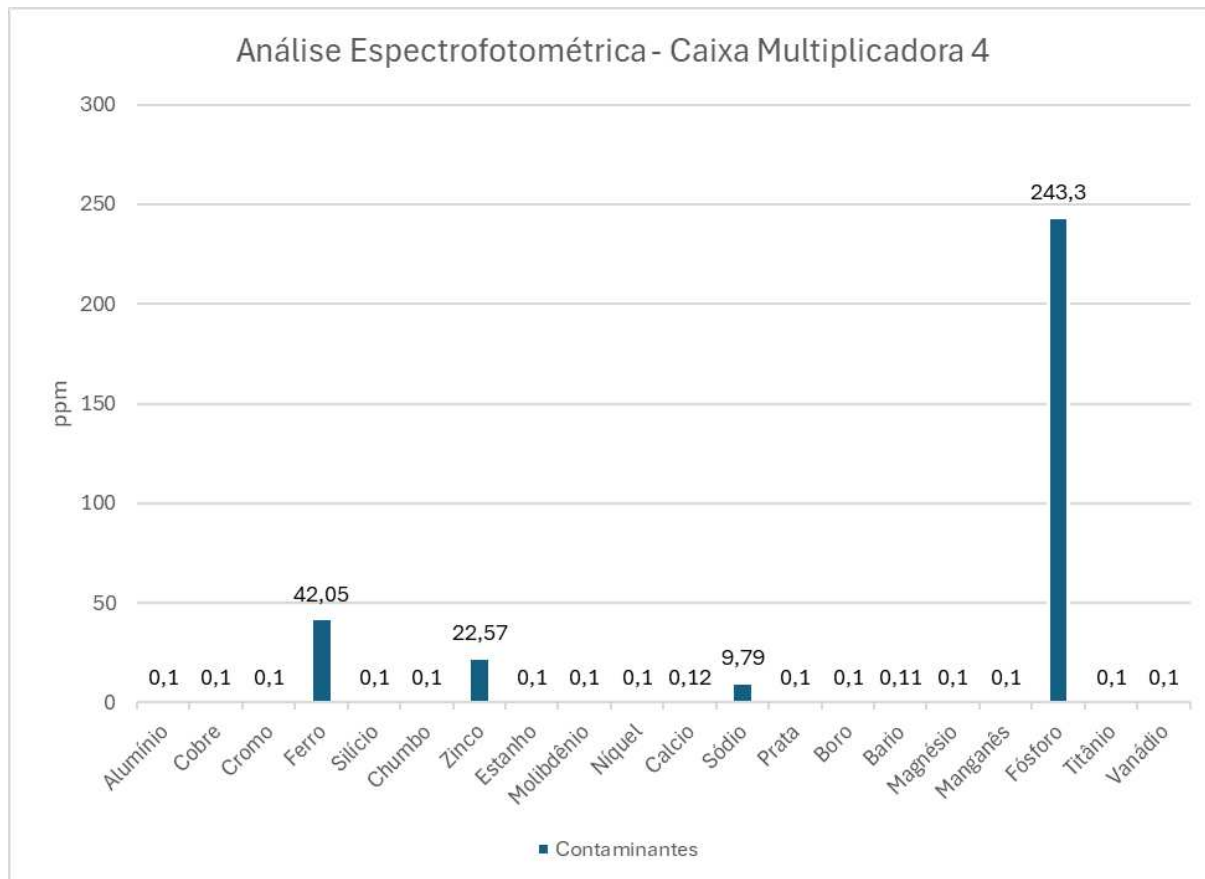


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

De forma semelhante, a Caixa Multiplicadora 4 (Gráfico 2) também apresentou resultados dentro da normalidade. O teor de Ferro (Fe) foi de 42,05 ppm e o de Zinco (Zn), 22,57 ppm. Embora o nível de Ferro seja ligeiramente superior ao da Caixa

Multiplicadora 2, ele permanece na faixa de operação segura. A ausência de alarmes em qualquer parâmetro confirma o laudo "OK" e a condição satisfatória do sistema.

Gráfico 2 – Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 4

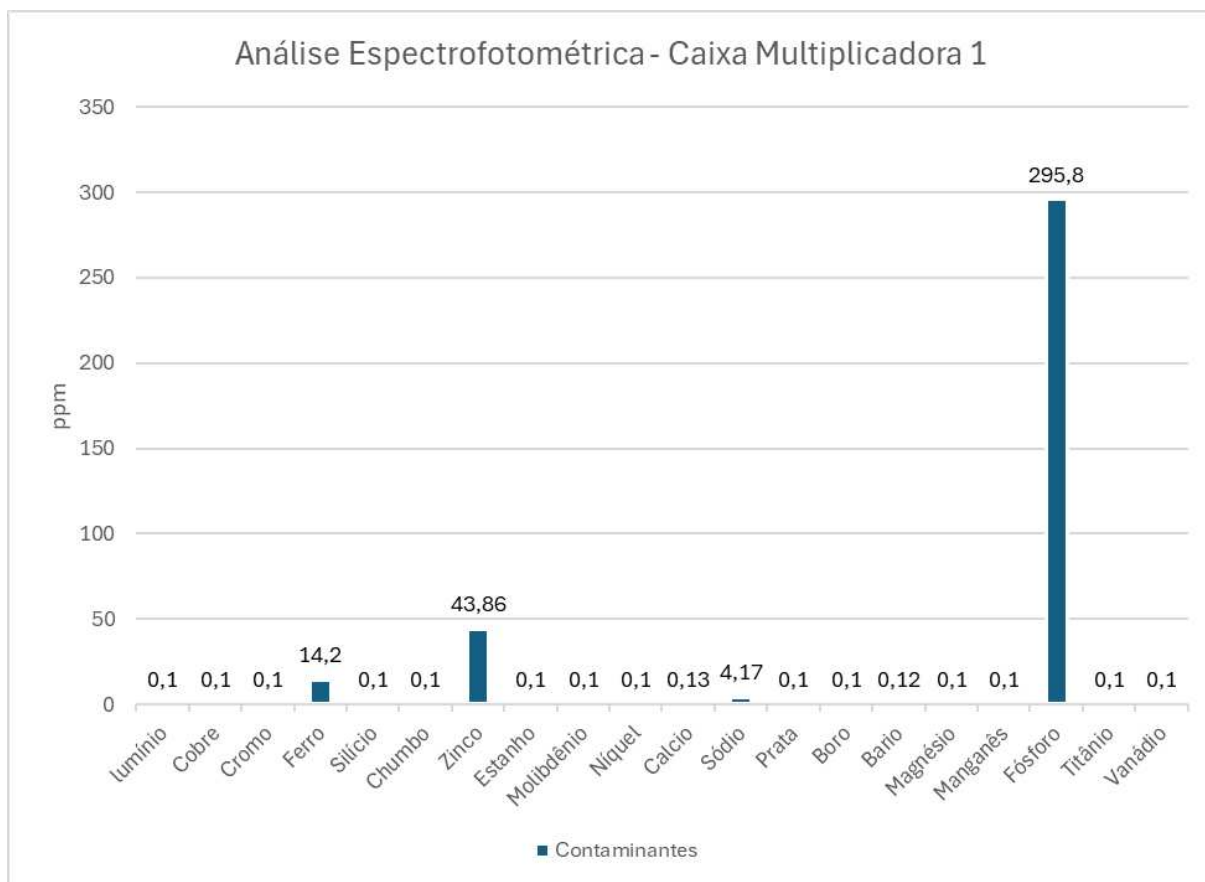


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

5.2 Análise dos Laudos "Atenção": Foco no Teor de Zinco

Duas máquinas foram classificadas na faixa de "Atenção", indicando a necessidade de um monitoramento mais frequente para acompanhar a evolução de parâmetros específicos. Para a Caixa Multiplicadora 1 (Gráfico 3), o elemento que motivou o estado de atenção foi o Zinco (Zn), com uma concentração de 43,86 ppm. Este valor situa-se na faixa de "Atenção" do critério de análise (41 a 50 ppm). Enquanto o Ferro (14,2 ppm) está baixo, o comportamento do Zinco sugere o início de uma degradação dos aditivos do óleo. Portanto, a recomendação de acompanhar a tendência é uma ação preditiva para evitar que o lubrificante perca sua capacidade de proteção.

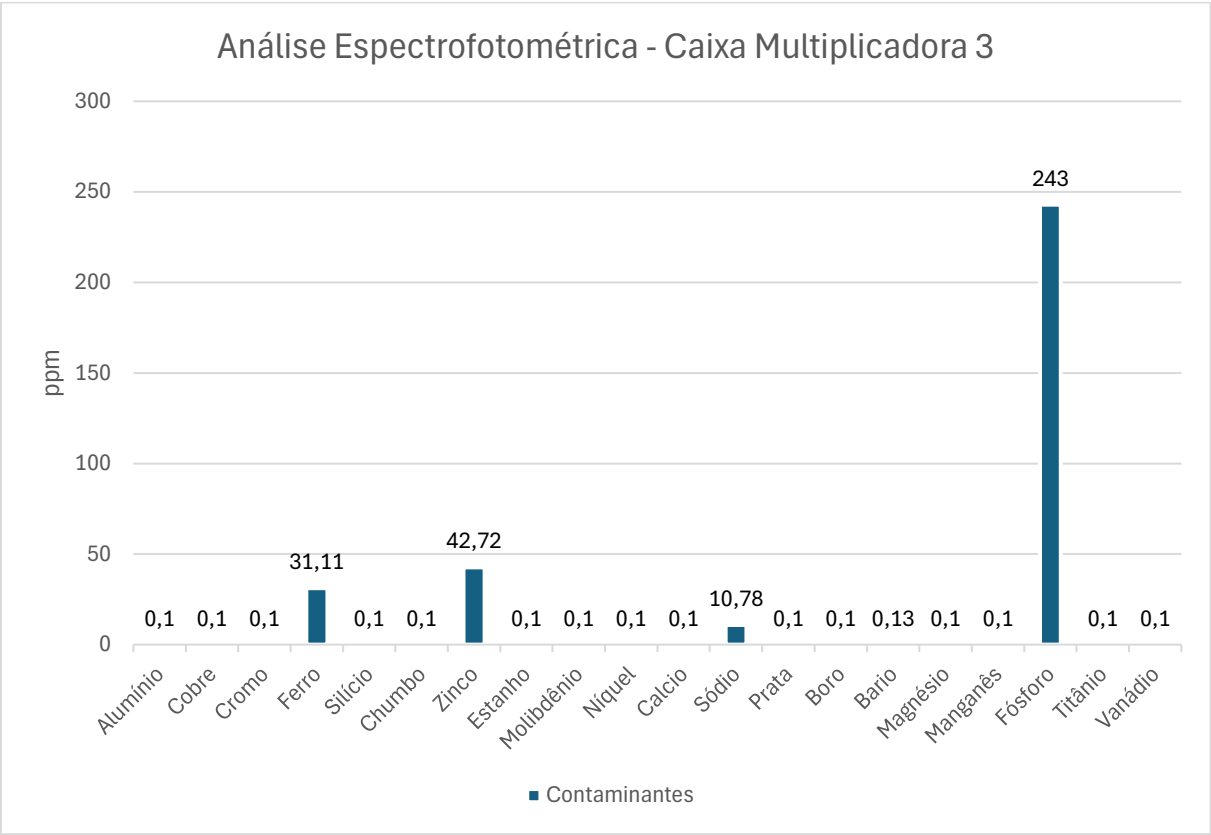
Gráfico 3 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 1



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O caso da Caixa Multiplicadora 3 (Gráfico 4) é análogo. O gráfico mostra que o teor de Zinco (Zn) atingiu 42,72 ppm, também na faixa de "Atenção". Assim como no caso anterior, o laudo recomenda acompanhar a progressão deste elemento, pois uma tendência de aumento contínuo pode exigir uma troca de óleo antecipada para garantir a integridade das engrenagens e rolamentos.

Gráfico 4 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 3

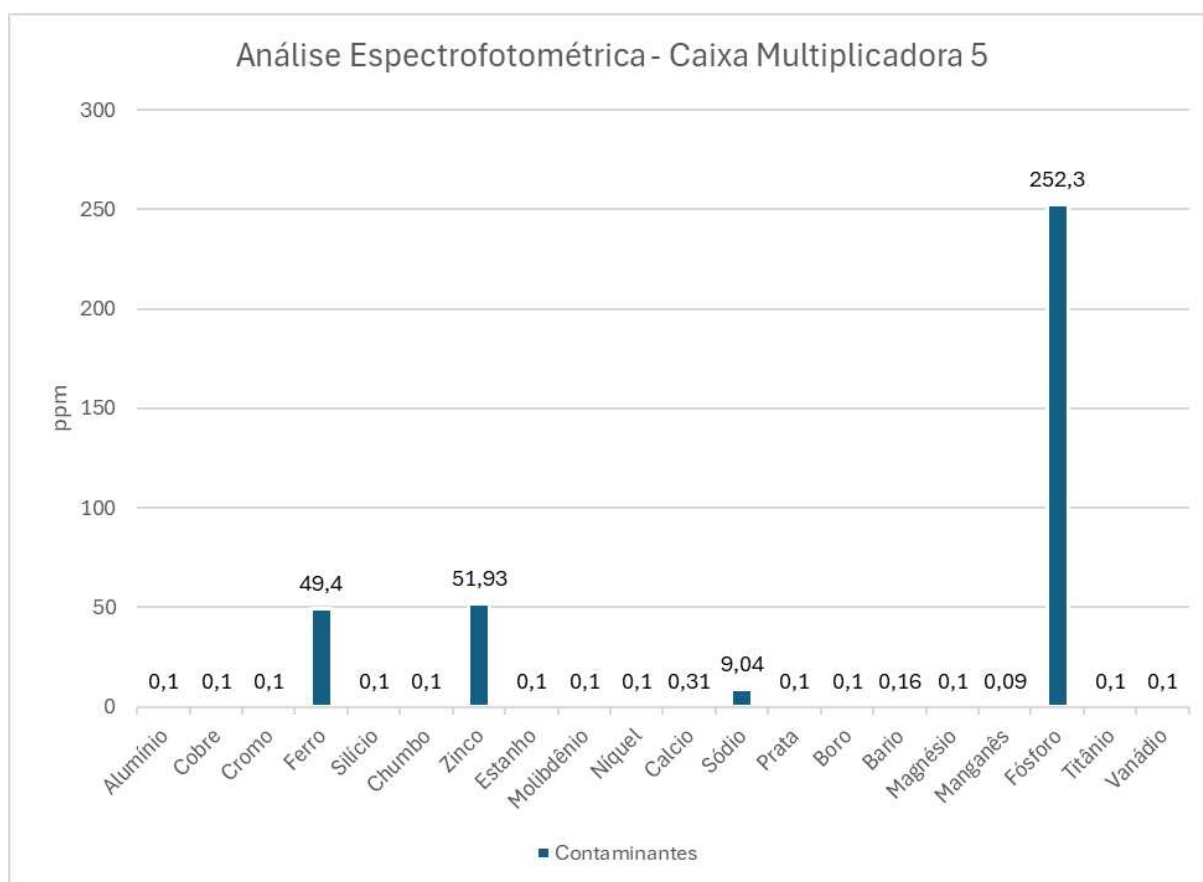


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

5.3 Análise dos Laudos "Trocar": Níveis Críticos de Zinco e Contaminação Sólida

Os laudos mais críticos foram os das máquinas Caixa Multiplicadora 5 e Caixa Multiplicadora 6, que exigiram intervenção imediata, porém, por razões distintas. A Caixa Multiplicadora 5 (Gráfico 5) apresentou um teor de Zinco (Zn) de 51,93 ppm, valor que ultrapassa o limite de "Alerta" (> 50 ppm). Além disso, o Ferro (Fe), com 49,4 ppm, estava no limiar da normalidade. O nível crítico de Zinco é o principal fator, indicando uma condição severa que pode comprometer a performance do lubrificante. A troca imediata do óleo, conforme recomendado, é a ação correta para mitigar o risco de uma falha por desgaste acelerado.

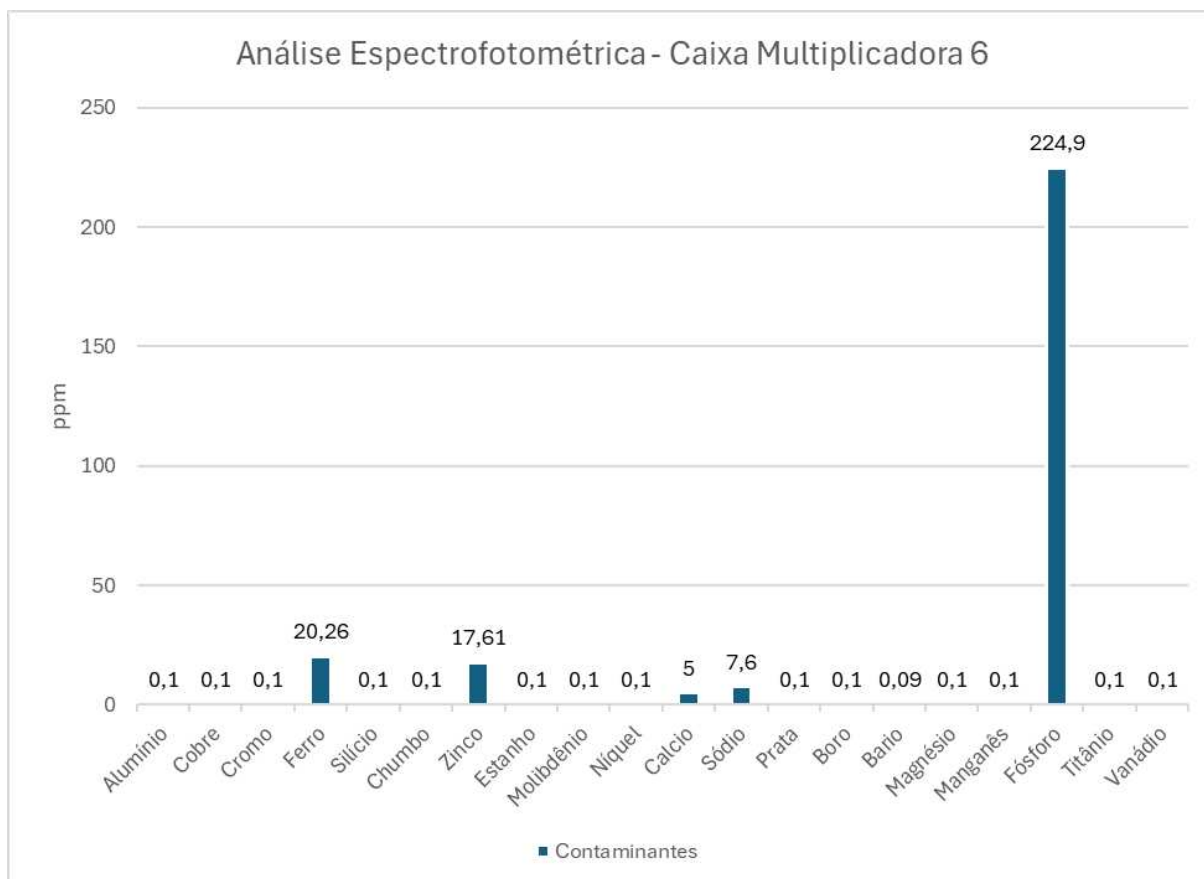
Gráfico 5 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 5



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Por fim, o caso da Caixa Multiplicadora 6 (Gráfico 6) é particularmente interessante e apresenta a importância de uma análise holística. O gráfico de metais de desgaste mostra níveis baixos e aceitáveis de Ferro (20,26 ppm) e Zinco (17,61 ppm). Esta informação, analisada isoladamente, não indicaria um problema. No entanto, a recomendação de "Trocar" foi motivada pelo "elevado nível de contaminação sólida", com um código NAS 1638 de classe 10. O laudo não especifica uma única fonte para estas partículas. A análise de morfologia indicou apenas "Traços" de borras (subprodutos da degradação do óleo) e um nível "Normal" de sujidades (contaminantes externos). Isso sugere que a contaminação era composta por partículas finas de natureza mista, não facilmente categorizadas. O diagnóstico, portanto, não foi de um desgaste ativo, mas sim de um lubrificante em condição inaceitável, que, se não corrigido, atuaria como um agente abrasivo, causando desgaste severo no futuro.

Gráfico 6 - Análise espectrofotométrica da amostra da Caixa Multiplicadora 6



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

5.4 Discussão Geral

A análise comparativa dos seis laudos mostra a capacidade da análise de óleo em diagnosticar diferentes estágios e modos de falha em uma frota de caixa multiplicadoras com 12 anos de operação. Contrariando a expectativa inicial de que o desgaste por Ferro (Fe) seria o principal indicador de problemas, o estudo revela que a degradação do óleo e a contaminação são fatores de risco mais imediatos para estes equipamentos.

Os casos de "Atenção" (Caixa Multiplicadora 1 e Caixa Multiplicadora 3) sinalizam um processo incipiente de degradação de aditivos, evidenciado pelo aumento do teor de Zinco. Mais criticamente, os casos que demandaram a troca do óleo apontam para duas situações distintas: uma degradação severa do lubrificante na Caixa Multiplicadora 5 (Zinco > 50 ppm) e uma contaminação crítica por partículas

sólidas na Caixa Multiplicadora 6 (código NAS 10). Este último caso é particularmente relevante, pois o nível de contaminação é muito superior ao recomendado pela norma ISO 81400-4, que estabelece um ideal de 16/14/11 para garantir a vida útil dos componentes, conforme destacado por Singh, Kurien e Villayamore (2021).

Isso reforça a visão de que a análise de óleo deve ser uma avaliação holística da saúde do sistema "máquina-lubrificante". Embora a presença de umidade estivesse dentro dos limites em todas as amostras, sua combinação com a alta contaminação por partículas encontrada na Caixa Multiplicadora 6 poderia, segundo a literatura, acelerar drasticamente a formação Fissuras Brancas (WECs) e outras falhas por fadiga.

Fica evidente que a metodologia de classificação em três níveis ("Normal", "Atenção", "Alerta/Trocar") se mostrou eficaz para uma gestão de risco assertiva, permitindo que a equipe de manutenção direcione recursos para os equipamentos mais críticos e planeje ações corretivas, como a microfiltração ou a troca do óleo, antes que danos irreversíveis ocorram.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a eficácia da análise de óleo lubrificante como uma ferramenta de diagnóstico preditivo indispensável para a gestão da manutenção de caixas multiplicadoras de aerogeradores com 12 anos de operação. O estudo de caso, conduzido a partir dos procedimentos da 8.2 Renewables Brasil, permitiu alcançar os objetivos propostos e gerou conclusões significativas.

Confirmou-se que a avaliação de múltiplos parâmetros é fundamental para um diagnóstico assertivo. Os gatilhos para intervenção nas máquinas estudadas não foram o desgaste acentuado por ferro, mas sim a degradação de aditivos, indicada pelo teor elevado de zinco (acima de 40 ppm), e a contaminação severa por partículas sólidas, que em um dos casos atingiu o nível crítico de NAS 10. Estes achados são de suma relevância, pois, conforme à literatura abordada, a contaminação e a perda das propriedades do óleo estão diretamente ligadas à redução da vida útil dos rolamentos e à nucleação de falhas severas, como Fissuras Brancas (WECs).

A metodologia de classificação dos laudos em "Normal", "Atenção" e "Trocar" provou ser uma ferramenta de gestão proativa, permitindo à equipe de manutenção priorizar recursos, planejar intervenções e mitigar riscos antes que evoluam para paradas não programadas e custos elevados às concessionárias eólicas.

Os resultados reforçam a importância de integrar a análise de óleo às estratégias de O&M em parques eólicos, especialmente em frotas com maior tempo de serviço. Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar o estudo correlacionando os dados da análise de óleo com dados de outras técnicas preditivas, como análise de vibração e monitoramento de temperatura, a fim de criar um modelo de diagnóstico ainda mais robusto e inteligente.

REFERÊNCIAS

- EVANS, M.-H. An updated review: White etching cracks (WECs) and axial cracks in wind turbine gearbox bearings. *Materials Science and Technology*, [S.l.], 2016.
- GEAR TECHNOLOGY. Understanding oil analysis: how it can improve reliability of wind turbine gearboxes. *Gear Technology Magazine*, [S.l.], 2013.
- GONZÁLEZ-GORBEÑA, E. et al. Analysis of the efficiency of wind turbine gearboxes using the temperature variable. *Renewable Energy (EngRxiv)*, [S.l.], 2018.
- MARQUES, C. M. et al. Performance of lubricating oils for wind turbine gear boxes and bearings. *Tribology International*, [S.l.], 2015.
- MDPI. Monitoring the oil of wind-turbine gearboxes: main degradation indicators and detection methods. *Lubricants*, v. 8, n. 2, p. 25, 2020.
- NALGON. Catálogo Técnico: Equipamentos Plásticos para Laboratório. Itupeva, SP: Nalgon, 2022.
- SCHWINGSHACKL, P. H.; DWYER-JOYCE, R. S. A new method for measuring sliding in rolling element bearings. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEARS*, 2015, Garching/Munich. *Anais... Düsseldorf: VDI-Verlag*, 2015. p.1195-1206.
- SHELL. Ficha técnica: Shell Omala S3 Wind. Rio de Janeiro: Shell Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.shell.com.br/empresas-e-negocios/lubrificantes/produtos-e-servicos/pds-folder/shell-omala-s3-wind.html>. Acesso em: 26 jul. 2025.
- SINGH, Dilip Kr; KURIEN, Jossy; VILLAYAMORE, Albert. Study and analysis of wind turbine gearbox lubrication failure and its mitigation process. *Materials Today: Proceedings*, v. 44, p. 3976-3983, 2021.
- SINGH, Harpal; PULIKOLLU, Raja; SMITH, Greg. Wind Turbine Gearbox Bearing Material Analysis to Study Crack Nucleation, Propagation, and Damage Mechanisms. In: *STLE ANNUAL MEETING & EXHIBITION*, 72., 2017, Atlanta. *Anais... Atlanta: Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, 2017. p. 1-4.
- SINHA, Y. S. et al. Significance of effective lubrication in mitigating system failures — a wind turbine gearbox case study. *Lubrication Science*, [S.l.], 2014.