



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Gabriel Castro de Oliveira

**ESTUDO DO IMPACTO ECONÔMICO DE FALHAS EM CAIXAS DE
ENGRENAGENS DE AEROGERADORES**

Florianópolis
2024

Gabriel Castro de Oliveira

Estudo do impacto econômico de falhas em caixas de engrenagens de aerogeradores

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Eng. Diego Berti Salvaro
Coorientador: Prof. Cristiano Binder, Dr. Eng.

Florianópolis

2024

Oliveira, Gabriel Castro de
Estudo do impacto econômico de falhas em caixas de
engrenagens de aerogeradores / Gabriel Castro de
Oliveira. Orientador, Diego Berti Salvaro, coorientador, Cristiano
Binder, 2024.
73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Mecânica,
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Tribologia. 3.
Aerogeradores. 4. Desgaste. 5. Engrenagens. I. Salvaro,
Diego Berti. II. Binder, Cristiano. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Gabriel Castro de Oliveira

Estudo do impacto econômico de falhas em caixas de engrenagens de aerogeradores

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de “Bacharel em Engenharia Mecânica” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 04 de novembro de 2024.

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Banca examinadora

Orientador: Dr. Eng. Diego Berti Salvaro

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcos Paulo Nostrani, Dr. Eng

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à minha família, em especial à minha mãe Margarete e ao meu pai Riva. Sou quem sou graças a eles. À minha mãe devo todas as puxadas de orelha que me deu para que me mantivesse no bom caminho e estudasse para alcançar meus sonhos. Ao meu pai, agradeço por ter me proporcionado toda a estrutura necessária para o meu sucesso. A todos os meus 5 irmãos, agradeço por todo o apoio e incentivo. À Natália, agradeço por ter trilhado o caminho antes de mim e ter possibilitado que eu cursasse minha graduação em Florianópolis. À Lorena, ao Kauã, à Lara e ao recém-nascido João Marcos, agradeço o carinho e apoio, mesmo à distância. Amo muito todos e espero poder estar mais presente nos próximos anos.

Aos colegas e amigos que fiz durante a graduação, alicerce fundamental para que eu seguisse inabalável nos anos de graduação, sou imensamente grato. A mais de 1500 km de casa, eles foram a família que eu precisei. Em especial ao Breno, ao Raul, ao Lavaqui e ao Gazé, por serem amigos para qualquer hora, em momentos bons e ruins. Ao Artur, ao Pablo, à Ellen e ao Matias, por todo apoio emocional e pelos conselhos, às vezes duros, mas sempre sinceros. Ao Gall e à Nathalia, meu tesouro dos últimos anos, devo a eles bastante, meus parceiros nas disciplinas mais difíceis, me deram empurrões necessários para que eu conseguisse meu diploma. Ao Kairi e ao Fernando, pelos momentos de descontração e pelo apoio, mesmo que de longe. Todos os citados, saibam que também são meus irmãos.

Ao meu orientador, Diego Salvaro, agradeço imensamente por todo o conhecimento compartilhado e pela paciência durante a orientação da minha iniciação científica e do meu TCC. Ao Laboratório de Materiais, agradeço pela oportunidade de me desenvolver como estudante e pela contribuição fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço infinitamente à Engie Brasil Energia e a todos os meus colegas. A oportunidade de estagiar nessa empresa foi única e tudo isso se deve àqueles que acreditaram em mim. À Sabrina, ao Maurício, ao Murilo, à Adriely e ao Celso, agradeço por terem acreditado em meu potencial e me dado tantas oportunidades. A Manuela, ao Alberdan, a Grazielli, ao Fernando e a todo o PLP, agradeço pelo companheirismo e pela amizade.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho investiga o impacto financeiro causado pelo desgaste tribológico na caixa de engrenagens de aerogeradores. Com base em dados extraídos de relatórios de manutenção de um parque eólico em operação e em entrevistas com o engenheiro responsável, foram realizadas análises para identificar os principais danos ocorridos e quantificar o tempo de inatividade associado às falhas em caixas de engrenagens. As análises focam-se no desgaste dos dentes de engrenagens, abrangendo fenômenos que podem gerar prejuízos significativos, como *micropitting*, *pitting*, *spalling*, formação de trincas e inclusões não metálicas, estas últimas decorrentes de falhas nos processos de fabricação. É feita uma breve exposição do potencial da energia eólica no país e, da mesma forma, discutida a forma como é precificada a geração proveniente dessa matriz energética. Com esses dados obtidos de leilões de geração foi possível quantificar o valor não gerado por paradas causadas por danos. Das análises, observou-se que o tempo para uma manutenção corretiva que exija a substituição da caixa de engrenagens de um aerogerador é aproximadamente dez vezes superior ao somatório do tempo de manutenções preventivas realizadas ao longo de cinco anos, sendo de igual proporção as perdas resultantes da não geração durante essas manutenções. Por fim, foi identificado um estudo promissor em que é utilizado um processo de nitretação aplicado à superfície das engrenagens para mitigação de *pitting*.

Palavras-chave: Tribologia. Aerogeradores. Desgaste. Engrenagens. Manutenção.

ABSTRACT

This work investigates the financial impact caused by tribological wear in the gearbox of wind turbines. Based on data extracted from maintenance reports of an operational wind farm and interviews with the responsible engineer, analyses were conducted to identify the main damages and quantify the downtime associated with gearbox failures. The analyses focus on gear tooth wear, covering phenomena that can cause significant losses, such as micropitting, pitting, spalling, crack formation, and non-metallic inclusions, the latter resulting from manufacturing process failures. A brief overview of the potential of wind energy in the country is provided, and the pricing of generation from this energy source is discussed. With data obtained from generation auctions, it was possible to quantify the value not generated due to downtime caused by damages. The analyses showed that the time for corrective maintenance requiring the replacement of a wind turbine gearbox is approximately ten times the total time of preventive maintenance carried out over five years, with the losses resulting from non-generation during these maintenances being of equal proportion. Finally, a promising study was identified in which a nitriding process applied to the gear surfaces is used to mitigate pitting.

Keywords: Tribology. Wind turbines. Wear. Gears. Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Percentual das fontes renováveis brasileiras.....	13
Figura 2: Evolução da potência eólica mundial instalada	14
Figura 3: Principais países na potência onshore instalada em 2022.....	15
Figura 4: Perfil de dente de engrenagem.....	19
Figura 5: Tensões na superfície da engrenagem	20
Figura 6: Linhas de propagação da trinca do dente.....	21
Figura 7: Espectrograma de tensões de quatro perfis de dente. (a) curvado suave (b) reto (c) curvado acentuado (d) reto com variação	22
Figura 8: Variação das tensões de flexão dos dentes durante o engrenamento pelo método linear	23
Figura 9: Dinâmica de contato dos dentes.....	24
Figura 10: Representação das curvas de tensão e cisalhamento subsuperficiais do dente da engrenagem em contato.	26
Figura 11: Efeito do desgaste abrasivo na superfície dos dentes das engrenagens	27
Figura 12: Comparação de superfícies afetadas pelo pitting inicial (esquerda) e pelo pitting progressivo (direita)	28
Figura 13: Comparação de superfícies afetadas por micro-pitting (esquerda) e macro-pitting (direita).....	29
Figura 14: Danos causados por scuffing na superfície do dente	29
Figura 15: Trajetória da fratura na região da raiz do dente	30
Figura 16: Dente de engrenagem fraturada	31
Figura 17: Metalografia realizada em dentes de engrenagens após teste FZG. (a) Não nitretada, (b) camada com 5% de N ₂ , (c) camada com 24% de N ₂ e (d) camada com 76% de N ₂	34
Figura 18: Teste com imã no óleo	45
Figura 19: Micropitting com alguns pontos de pitting iniciados.....	45
Figura 20: Engrenagem com características de Micropitting.....	46
Figura 21: Engrenagem com pitting.....	47
Figura 22: Engrenagem apresentando Spalling.....	48
Figura 23: Engrenagem com trincas.....	49
Figura 24: Par de engrenagens fraturadas	50

Figura 25.a.b.c: Exemplos de falhas causadas por inclusões.....	51
Figura 26: Trinca em dente por falha de fabricação.....	52
Figura 27: Dentre fraturado por falha de fabricação	52
Figura 28: Exemplo de dano secundário causado pela falha no estágio planetário	54
Figura 29: Geração Elétrica 2022 e 2023	55
Figura 30: Geração de Eletricidade de 2007 a 2023	56
Figura 31: Histórico da média mensal do PLD de 2019 a 2024.....	56
Figura 32: Preços médios dos projetos eólicos aprovados nos leilões realizados pelo Governo Federal	57
Figura 33: Geração de Energia (GWh) do Conjunto Eólico Umburanas 21	58
Figura 34: Geração Líquida do Conjunto Eólico Umburanas em 2022	59
Figura 35: Geração Líquida do Conjunto Eólico Umburanas em 2023	59
Figura 36: Valor não gerado baseado na potência de um aerogerador	61
Figura 37: Geração eólica no parque Umburanas e acréscimo de 10%.....	64
Figura 38: Geração eólica total no Brasil e acréscimo de 10%.	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Aerogeradores	17
2.2	Caixa de engrenagens	17
2.2.1	Efeitos da carga sobre os dentes de engrenagens	18
2.2.2	Efeitos tribológicos sobre os dentes de engrenagens	23
2.3	Tipos de Falhas das Engrenagens	26
2.3.1	Desgaste abrasivo.....	27
2.3.2	<i>Pitting e Spalling</i>	27
2.3.3	<i>Scuffing</i>	29
2.3.4	Quebra dos Dentes (<i>Tooth Breakage</i>)	30
2.4	Processos de Manutenções	31
2.5	Tribologia	32
2.5.1	Soluções tribológicas para danos em engrenagens	33
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	Obtenção de dados reais de aerogeradores em operação	36
3.1.1	Questionário aplicado ao responsável pela manutenção	36
3.1.2	Relatórios fornecidos pelo responsável da manutenção.....	37
3.2	Pesquisa de dados de energia eólica nacionais.....	38
4	DADOS OBTIDOS	40
4.1	Dados obtidos dos aerogeradores	40
4.1.1	Perguntas para o responsável pela manutenção dos aerogeradores	40
4.1.2	Material fornecido pelo responsável pela manutenção dos aerogeradores	42

4.1.2.1	Parâmetros de funcionamento do equipamento	43
4.1.2.2	Inspeções por boroscopia	44
4.1.2.3	Análise dos relatórios de falha	50
4.2	Análise de dados de energia eólica nacionais	55
4.2.1	Geração Nacional.....	55
4.2.2	Precificação de energia gerada.....	56
4.2.3	Dados de geração da planta estudada.....	57
5	DISCUSSÃO	60
5.1	Custo por parada de aerogerador	60
5.2	Danos nas engrenagens	61
5.2.1	Mitigação dos danos	62
5.3	Geração eólica	63
6	CONCLUSÕES.....	65
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	68
8	REFERÊNCIAS	69

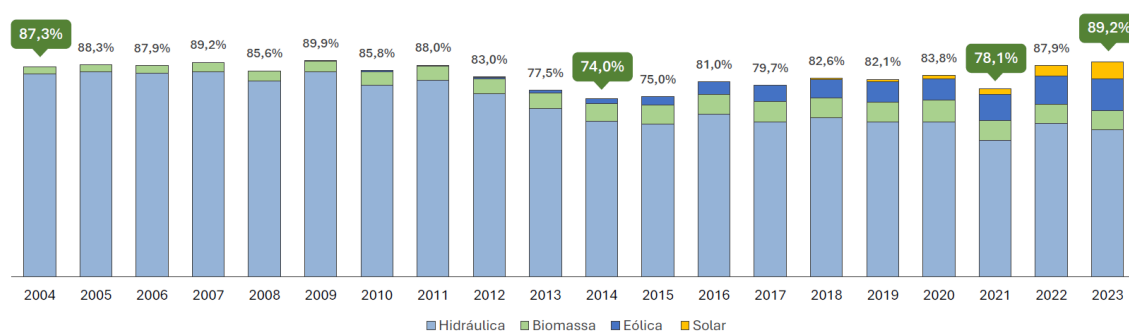
1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica no mundo está intimamente ligada ao avanço tecnológico e ao aumento populacional, fatores que têm impulsionado o consumo energético, especialmente em países em desenvolvimento (IEA, 2023). O desenvolvimento industrial, junto com o aumento do número de consumidores ao longo do último século, impôs grandes exigências à matriz energética, exigindo maior capacidade, flexibilidade e sustentabilidade (EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2023). Essa matriz passou por várias mudanças significativas. Durante a Revolução Industrial, o carvão mineral se tornou o principal combustível para o funcionamento das máquinas, já na Segunda Revolução Industrial, com a invenção do motor de combustão interna, o petróleo se tornou o combustível predominante, sendo ambos utilizados até os dias atuais (TOLMASQUIM *et al.*, 2007).

No entanto, o uso excessivo de combustíveis fósseis começou a gerar sérios impactos ambientais, o que estimulou a busca por alternativas energéticas mais limpas. A energia nuclear, desenvolvida no período pós-Segunda Guerra Mundial, surgiu como uma opção promissora devido à sua capacidade de gerar grandes quantidades de energia. No entanto, a geração de resíduos radioativos, que precisam ser tratados adequadamente, e o risco de acidentes, como o ocorrido em Chernobil (1986), limitam seu uso. Além disso, a energia nuclear não é renovável, pois depende da mineração de urânio.

Por outro lado, as fontes de energia limpa e renovável têm ganhado cada vez mais espaço. Na Figura 1, são apresentados os percentuais de fontes renováveis no Brasil, onde observa-se que a principal fonte de energia é a hidrelétrica, que se destaca devido às condições geográficas favoráveis, como rios caudalosos e com desníveis adequados.

Figura 1: Percentual das fontes renováveis brasileiras

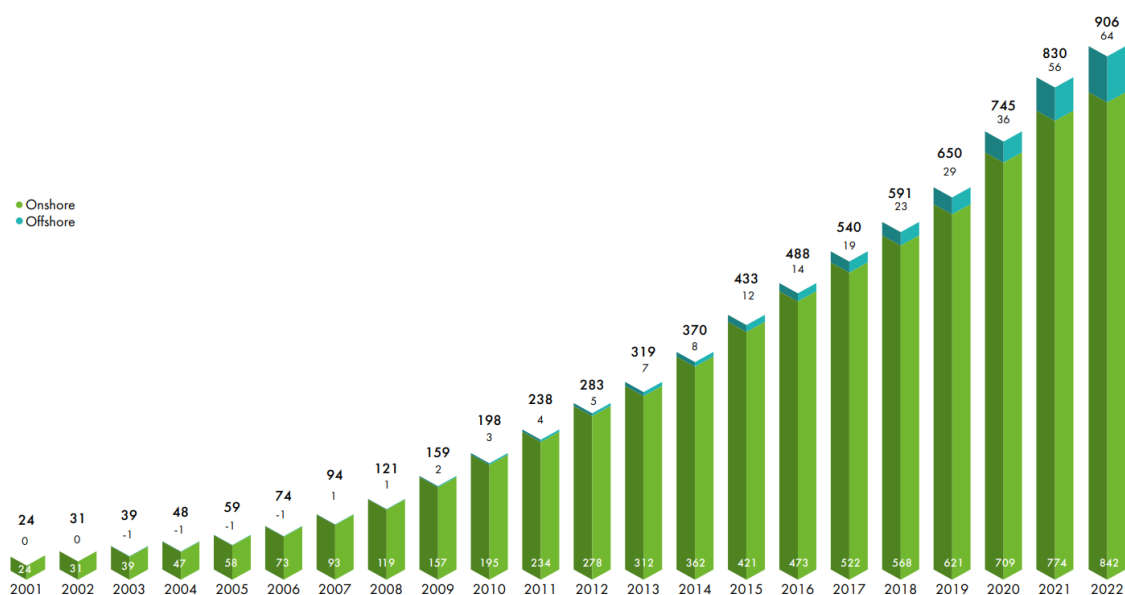


Fonte: (EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2024)

Entretanto, outros países nem sempre dispõem da mesma capacidade de geração hidrelétrica como o Brasil, o que tem feito eles impulsionarem o desenvolvimento de outras fontes renováveis, como a energia eólica. O gráfico da figura 2 apresenta o crescimento da energia eólica no mundo, de acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC - Global Wind Energy Council, 2023), a capacidade instalada de energia eólica no mundo atingiu 906 GW em 2022, evidenciando um crescimento expressivo.

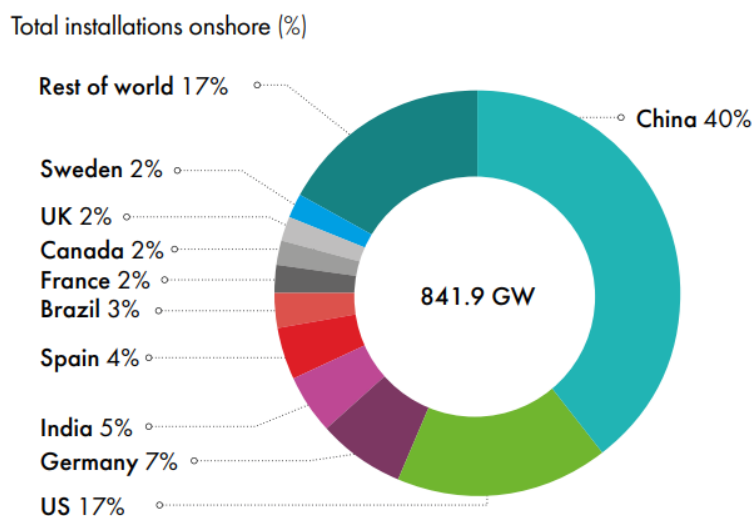
Figura 2: Evolução da potência eólica mundial instalada

Historic development of total installations (GW)



Fonte: (GWEC - Global Wind Energy Council, 2023).

A geração eólica no Brasil, embora recente, também tem apresentado um crescimento notável, a Figura 3 mostra que em 2022 ela foi responsável por 3% da capacidade mundial, posicionando o país entre os seis maiores geradores de energia eólica *onshore*.

Figura 3: Principais países na potência *onshore* instalada em 2022

Fonte: (GWEC - Global Wind Energy Council, 2023).

Esses dados refletem os esforços e investimentos realizados nos últimos anos para expandir o uso dessa fonte de energia no Brasil, que ainda possui grande potencial de desenvolvimento. No entanto, como é uma tecnologia relativamente nova, o país enfrenta desafios em relação à falta de experiência com problemas de longo prazo, os quais podem ser apenas previstos. A literatura não é clara em relação aos impactos relacionados a problemas de manutenção em geral de aerogeradores. Diante disso, este trabalho busca fazer um levantamento de falhas, especialmente aquelas ligadas a desgaste e atrito, e seus impactos. Isso será feito através da análise de relatórios de manutenção, com o objetivo de identificar problemas recorrentes e propor soluções que possam aumentar o intervalo entre manutenções, melhorar a eficiência e, consequentemente, gerar benefícios econômicos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise do impacto econômico associado a manutenções e falhas em aerogeradores, com foco em problemas tribológicos.

Para atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Levantar dados de produção e evolução da geração de energia eólica no Brasil;
- Obter e analisar dados de manutenção e falhas de uma planta eólica em operação;
- Avaliar as principais causas de falhas e procedimentos de manutenção em aerogeradores do parque eólico estudado;
- Analisar o impacto econômico das falhas e manutenções em aerogeradores do parque eólico estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aerogeradores

Os aerogeradores são máquinas responsáveis por converter a energia cinética do vento em energia elétrica. Historicamente, a energia eólica teve papel relevante, como nos moinhos de vento usados para a moagem de grãos. Atualmente, essa energia é convertida em eletricidade, tornando-se uma alternativa sustentável às fontes de energia convencionais, por ser limpa e renovável.

O funcionamento básico de um aerogerador envolve a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica, que é transformada em energia elétrica. O vento exerce força de arraste sobre as pás da turbina, que estão conectadas a um rotor. A rotação gerada é convertida de baixa para alta velocidade por meio de engrenagens na caixa de transmissão, e essa energia mecânica é então transformada em eletricidade pelo gerador.

A eficiência desse sistema depende de diversos fatores, como o design das pás, a velocidade do vento e a altura da torre. As pás são projetadas para captar o máximo de energia do vento, com máxima eficiência, e é importante que, quando o vento for muito forte, sejam ajustadas para evitar danos (BURTON *et al.*, 2001).

A nacelle, parte central do aerogerador, abriga a caixa de engrenagens (*gearbox*), o gerador e outros componentes essenciais. A torre, por sua vez, sustenta a nacelle e garante altura suficiente para que o rotor capte ventos mais intensos, otimizando a geração de energia. O sistema de controle do aerogerador inclui sensores que monitoram as condições externas e otimizam a orientação das pás (*pitch control*) e do rotor (*yaw control*), além de detectar possíveis falhas mecânicas.

Nos últimos anos, a energia eólica apresentou crescimento expressivo em todo o mundo, conforme descrito por Manwell *et al.* (2009). Os mesmos autores destacam o desenvolvimento de materiais mais leves e resistentes, além de sistemas de controle avançados. No entanto, desafios como a intermitência do vento e os impactos ambientais e sociais das instalações eólicas ainda precisam ser abordados. Além disso, como a energia eólica começou a ser implementada em larga escala no Brasil há apenas uma década, os efeitos de longo prazo ainda não estão totalmente mapeados.

2.2 Caixa de engrenagens

A caixa de engrenagens de um aerogerador desempenha um papel crucial na transmissão da energia do rotor para o gerador. Existem dois tipos principais de transmissões: a transmissão direta (*direct drive*) e a caixa de engrenagens (*gearbox*). A

transmissão direta, embora mais eficiente, é economicamente inviável para turbinas com potência acima de 3 MW, devido ao alto custo e complexidade (HENRIKSEN & JENSEN, 2011).

Por outro lado, a caixa de engrenagens, mais comum em parques eólicos, apresenta um custo mais baixo e uma manutenção menos complexa, mas que é responsável por 60% das falhas em turbinas eólicas. Dentre as falhas na caixa de engrenagens, 67% ocorrem nos mancais, devido a vibrações, desalinhamentos e problemas de lubrificação (NIVEDH, 2014). As engrenagens também sofrem desgaste significativo, especialmente nos dentes, que sofrem 30% das falhas que ocorrem em caixas de engrenagens.

Estudos como os dos autores Oyague (2009) Nivedh (2014) mostram que a vida útil das turbinas eólicas, projetada para 20 anos, acaba sendo reduzida para 8 a 10 anos, ou até menos em casos severos. Isso ocorre devido à fadiga dos materiais, e o elevado custo de manutenção e substituição de componentes, além da perda de geração durante as paradas.

A transmissão de potência mecânica é a transferência de energia do rotor para o gerador por meio de movimento rotacional, transmissão que em caixa de engrenagens é feita utilizando engrenagens, mas pode ser feita de outras maneiras, como correntes e correias por exemplo (JELASKA, 2012). A principal vantagem desse sistema é permitir diferentes relações de transmissão e operar com torques e rotações adequados ao projeto. Além disso, apresenta um custo e manutenção mais baixos em comparação com aerogeradores de transmissão direta, especialmente em parques eólicos com muitas unidades.

No caso de turbinas eólicas, a caixa de engrenagens conecta o rotor ao gerador elétrico. Segundo Errichello (1994), é fundamental que a caixa de engrenagens seja projetada levando em consideração a acessibilidade e a facilidade de manutenção, além de incluir transdutores para monitoramento da temperatura, vibração e escoamento de óleo lubrificante.

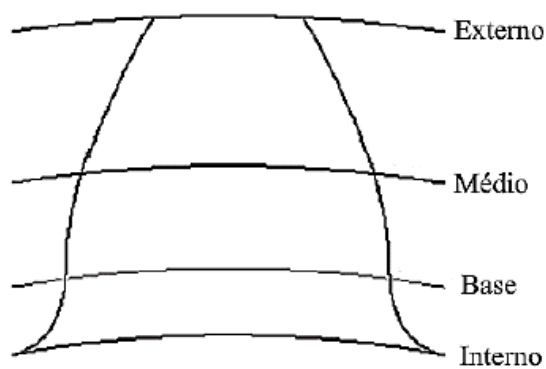
2.2.1 Efeitos da carga sobre os dentes de engrenagens

Quando se deseja apenas determinar a relação de transmissão e as velocidades das engrenagens, é possível simplificá-las como rodas de atrito, assumindo uma linha de contato constante entre elas. No entanto, essa abordagem tem suas limitações. Ela não é adequada para casos de alta carga e que exigem alta precisão, pois, na prática, as

engrenagens engatam e não deslizam, além de sofrerem deformação elástica, o que aumenta a área de contato (SLOGÉN, 2013). Embora essas simplificações sejam úteis, as falhas abordadas neste trabalho são causadas pelo desgaste nos dentes das engrenagens. Portanto, não podem ser desconsideradas. É mais apropriado analisar os esforços diretamente nos dentes, já que as engrenagens entram em contato por meio deles.

A geometria dos dentes é definida por quatro diâmetros principais: interno (ou raiz), de base, médio (ou primitivo) e externo, conforme mostrado na Figura 4. Cada diâmetro possui uma função específica no projeto.

Figura 4: Perfil de dente de engrenagem



Fonte: Adaptado de Slogén (2013).

Uma medida eficaz para melhorar a distribuição de cargas e evitar a concentração de tensões é definir um raio de concordância adequado. Esse raio deve ser projetado para evitar cantos vivos, proporcionando uma transição suave e contínua, o que distribuirá melhor as tensões. Esse engrenamento pode ser representado por uma linha de ação, que é uma linha que interliga os diâmetros internos das engrenagens (SLOGÉN, 2013). Na prática, a rotação das engrenagens engrenadas faz com que os dentes sofram variações na tensão superficial deles. Na Figura 5 é representado a rotação dos dentes em contato, nela é caracterizado a forma como a linha de contato se desloca ao longo do perfil do dente, respeitando uma linha chamada de linha de ação definida pela geometria do dente (LI, 2018). Observa-se também na Figura 5 a superfície de contato entre os dentes por onde é distribuída carga de contato.

Figura 5: Tensões na superfície da engrenagem

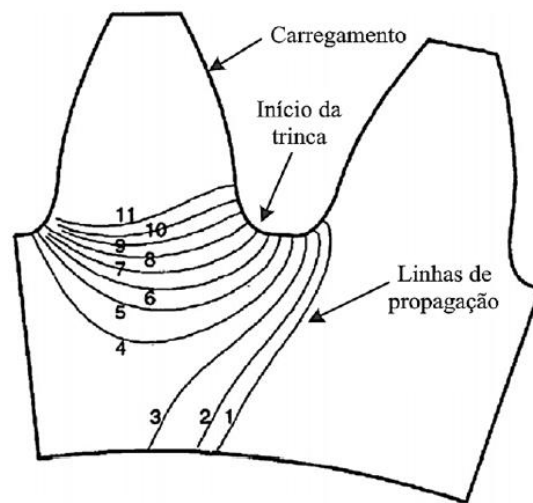


Fonte: (Li, 2018)

O par de engrenagens se comporta como um sistema massa-mola com dois graus de liberdade o que gera vibrações torcionais. Essas vibrações afetam o movimento rotacional do sistema, provocando oscilações na velocidade angular ao longo do tempo e, em alguns casos, desviando-se da lei de engrenamento ideal (GIRSANG *et al.*, 2014; HAN *et al.*, 2017). Quando essas vibrações se tornam excessivas, podem submeter os componentes a uma falha prematura por fadiga.

Os principais tipos de falhas por fadiga são: fadiga de flexão dos dentes e fadiga de contato (DONG *et al.*, 2013). A fadiga de flexão ocorre quando tensões cíclicas causadas pelos momentos fletores ultrapassam o limite de resistência à fadiga, especialmente perto do diâmetro da raiz do dente. Nessas condições, a fratura geralmente inicia-se na superfície do dente e propaga-se perpendicularmente a superfície em que se originou a trinca (ERRICHELLO, 2013). Utilizando o método dos elementos finitos, Liang *et al.* (2017) demonstraram que a propagação da fratura, que pode resultar na quebra do dente, é influenciada pela intensidade do carregamento, pela frequência de operação e pela geometria do dente. Quanto mais próximo o ponto de nucleação da trinca estiver do diâmetro de base, maiores são as chances de ocorrer a quebra por flexão (Figura 6).

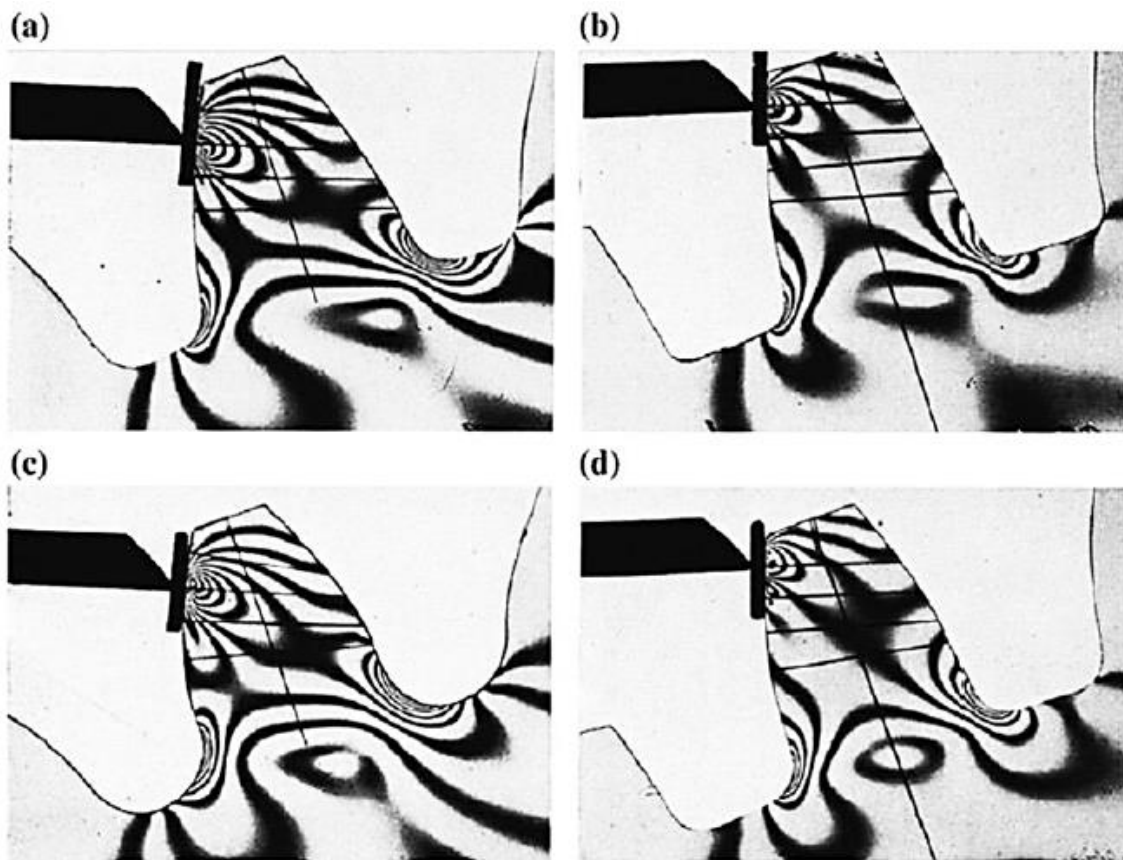
Figura 6: Linhas de propagação da trinca do dente



Fonte: (Liang et al., 2017), modificado

Dois fatores são fundamentais para a geração de flexão nos dentes de uma engrenagem: a geometria do dente e a posição do carregamento. O perfil do dente varia conforme a aplicação da engrenagem, e as concentrações de tensão manifestam-se principalmente em dois pontos: no ponto de contato e nos flancos da raiz do dente (VULLO, 2020). A Figura 7 ilustra o espectrograma das tensões internas para quatro tipos de perfis de dentes. O mesmo carregamento foi aplicado próximo à ponta dos quatro dentes, o que assegura maior intensidade das tensões internas durante a flexão, permitindo uma comparação justa entre os perfis.

Figura 7: Espectrograma de tensões de quatro perfis de dente. (a) curvado suave (b) reto (c) curvado acentuado (d) reto com variação

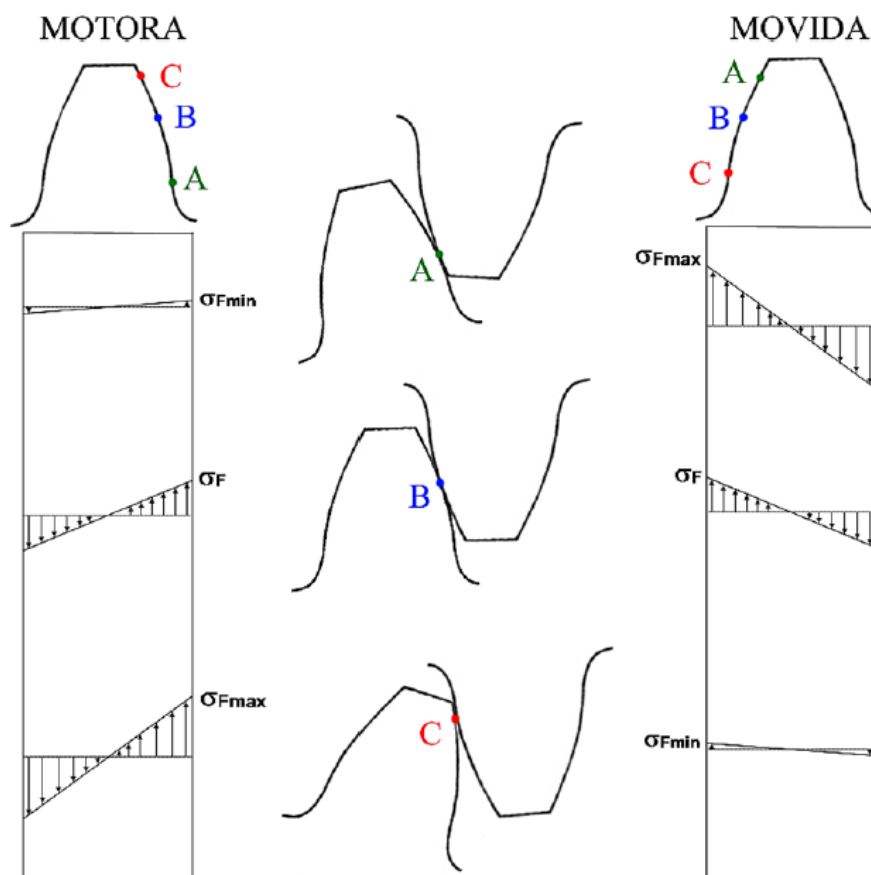


Fonte: (Vullo, 2020)

Na Figura 7.a é possível observar que as tensões internas estão distribuídas uniformemente, o que sugere que a forma do dente, provavelmente curvada, ajuda a propagar as tensões de maneira mais equilibrada sem concentrações. Como resultado, o risco de formação de trincas é menor. Na Figura 7.b é notável uma alta concentração de tensões, onde elas se concentram mais na área de contato, o que aumenta a chance de surgirem trincas. Na Figura 7.c, similar ao perfil (a), também há uma baixa concentração de tensões por conta de uma distribuição mais equilibrada, mas com pequenas concentrações em alguns pontos. Na Figura 7.d assim como no perfil (b), aqui as tensões se concentram mais nas superfícies de contato, aumentando o risco de trincas. Podendo ser concluído que o perfil curvado, é mais eficiente em espalhar as tensões, enquanto o perfil mais reto sofre com a concentração de tensões em áreas específicas. Isso sugere que, para aumentar a vida útil contra fadiga de flexão, é vantajoso adotar superfícies arredondadas, evitando concentradores de tensões.

Para estimar as tensões a que os dentes estão submetidos, Oyague (2009) utilizou uma aproximação linear. Na Figura 8, observa-se que, no início do engrenamento (A), a tensão de flexão na engrenagem motora é mínima, enquanto na engrenagem movida, é máxima. À medida que o engrenamento avança (B), as tensões de flexão invertem-se gradualmente, atingindo o oposto ao final do processo (C). O autor Oyague (2009) utilizou um método linear para representar essas variações de forma visual. No entanto, um método simplificado comumente empregado na literatura é calcular tensões médias e iguais em ambas as engrenagens na posição B.

Figura 8: Variação das tensões de flexão dos dentes durante o engrenamento pelo método linear



Fonte: (Oyague, 2009), modificado.

2.2.2 Efeitos tribológicos sobre os dentes de engrenagens

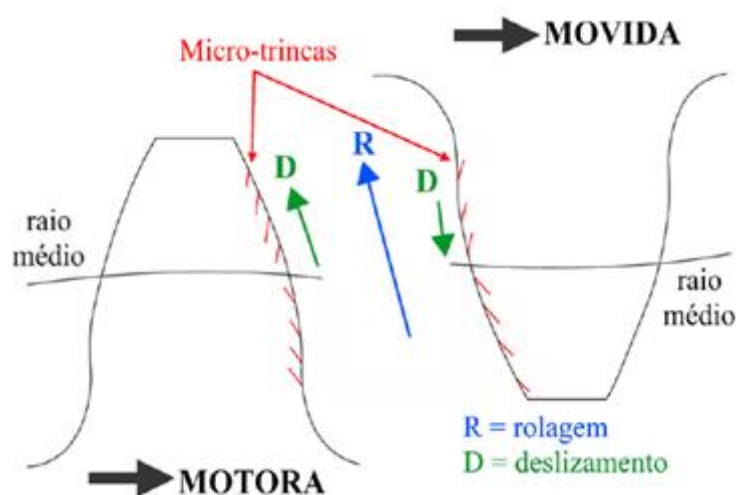
Quando se trata de engrenagens, um efeito tribológico relevante a ser observado é a fadiga de contato, também conhecida como fadiga hertziana. Ela ocorre quando tensões cíclicas se desenvolvem nas superfícies que estão em contato, levando à formação

de trincas na superfície ou subsuperfície. Esse processo, muito observado nos dentes de engrenagens, resulta na perda de material quando a trinca se propaga (ERRICHELLO, 2013). De acordo com Slogén (2013), tanto a geometria das engrenagens como a forma que se movem em relação uma à outra geram tensões de cisalhamento na superfície dos dentes. Essas tensões provocam deformações que podem ser elásticas (reversíveis) ou plásticas (parcialmente irreversíveis).

Em escala microscópica, a composição e a orientação dos grãos do material contribuem para a formação de concentrações de tensão interna, o que favorece o surgimento de trincas. Além disso, tensões de cisalhamento ocorrem em áreas próximas à superfície do dente, particularmente em regiões de contato reduzido.

Na tribologia, o atrito é definido como a resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contato e pode ser determinado com uso de coeficientes adimensionais, como no caso de atrito estático e dinâmico, ou por variáveis de engenharia, como força, torque e energia dissipada (BLAU, 2013). Quando analisamos as engrenagens sob uma perspectiva tribológica, o atrito ocorre nas superfícies dos dentes, onde há movimentos combinados de rolagem e deslizamento. Compreender esses fenômenos é essencial para analisar falhas como *scuffing* e *pitting*, além de perdas energéticas e vibrações ao longo da linha de ação (KAHRAMAN & LI, 2013). A Figura 9 ilustra as direções de rolagem e deslizamento.

Figura 9: Dinâmica de contato dos dentes



Fonte: (Errichello, 2013) modificado

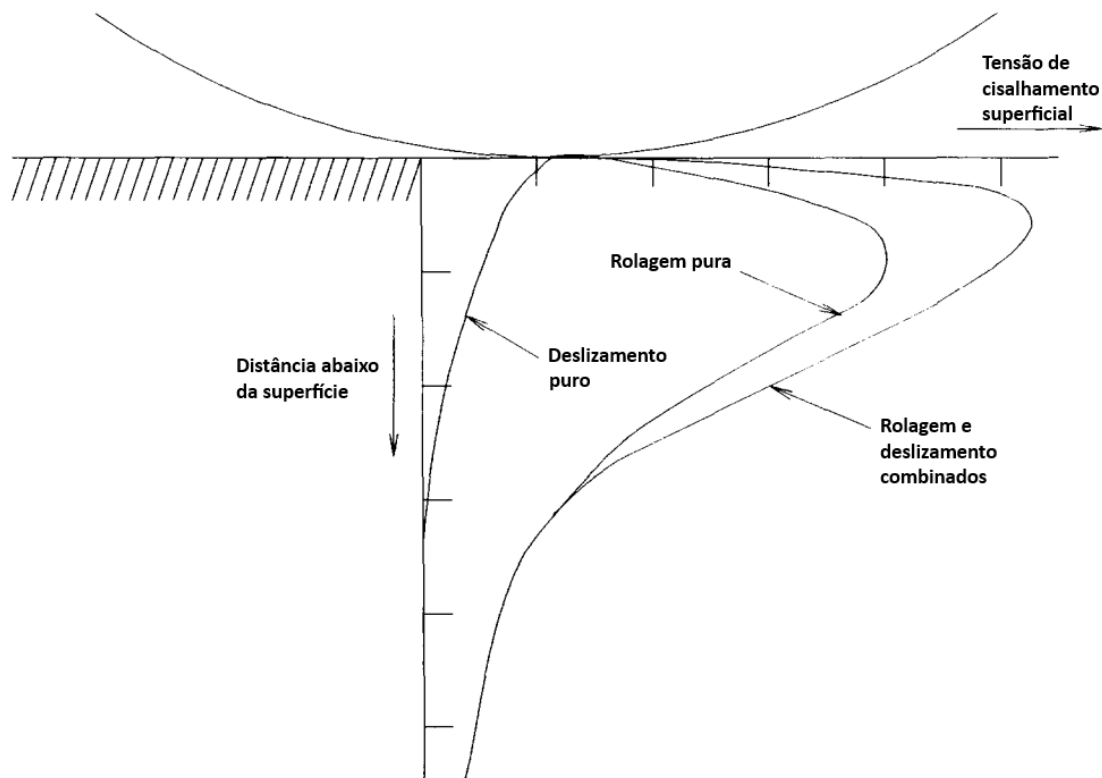
Na Figura 9, é mostrado o movimento de rolagem, que ocorre a partir de um ponto de contato entre dois dentes de engrenagens. Ambos os dentes giram em torno de seus próprios raios, o que resulta no afastamento gradual de um dente em relação ao outro. Por essa razão, um dente desliza sobre o outro, e o ponto de contato entre as engrenagens se desloca conforme a direção indicada pela rolagem. Na engrenagem motora, a rolagem começa no diâmetro de base do dente e termina na extremidade; já na engrenagem movida, o movimento inicia-se na ponta do dente e finaliza próximo à base. O deslizamento na engrenagem motora afasta-se do diâmetro médio, enquanto, na engrenagem movida, aproxima-se desse diâmetro.

Falhas superficiais, como o *pitting*, podem gerar trincas que começam na superfície ou subsuperfície do dente e se propagam na direção oposta ao movimento de deslizamento. Na Figura 9, as trincas convergem em direção ao diâmetro médio da engrenagem motora e divergem na engrenagem movida (BLAU, 2013).

Durante a rolagem pura, a tensão máxima de cisalhamento ocorre entre 0,18 e 0,3 mm abaixo da superfície e cerca de 0,4 mm à frente da linha de contato. A fratura inicia-se no ponto de maior tensão e propaga-se paralelamente à superfície, podendo eventualmente emergir e causar a remoção de material, fenômeno conhecido como Fadiga de Contato por Rolagem (Rolling Contact Fatigue, RCF). As curvas de tensão de cisalhamento subsuperficial para rolagem e deslizamento, apresentadas na Figura 10, explicam por que o ponto de maior tensão ocorre um pouco abaixo da superfície (FERNANDES & MCDULING, 1997).

As direções de deslizamento e rolagem têm grande influência na formação de trincas. Geralmente, deslizamentos negativos, quando as velocidades de rolagem e deslizamento ocorrem em sentidos opostos, resultam em tensões de cisalhamento mais elevadas próximas à superfície do dente, o que aumenta o risco de falhas por fadiga de contato (FERNANDES & MCDULING, 1997).

Figura 10: Representação das curvas de tensão e cisalhamento subsuperficiais do dente da engrenagem em contato.



Fonte: (Fernandes e McDuling, 1997), modificado.

2.3 Tipos de Falhas das Engrenagens

Submetidas a condições severas de fadiga, sobrecarga e atrito, as engrenagens são propensas a falhas. A fadiga de contato, caracterizada por *pitting*, *scuffing*, desgaste normal e deformação plástica superficial, é a falha mais comum. A fadiga de flexão, por sua vez, pode levar à quebra dos dentes (BECKHAM, 2019).

Embora essas sejam as principais causas de falha, determinar a origem exata de um problema pode ser desafiador. Errichello (2002) ressalta que a inspeção de peças defeituosas e dados de inspeção nem sempre fornecem informações suficientes. Nesse contexto, cálculos de projeto e testes em laboratório são essenciais para confirmar a hipótese da causa raiz.

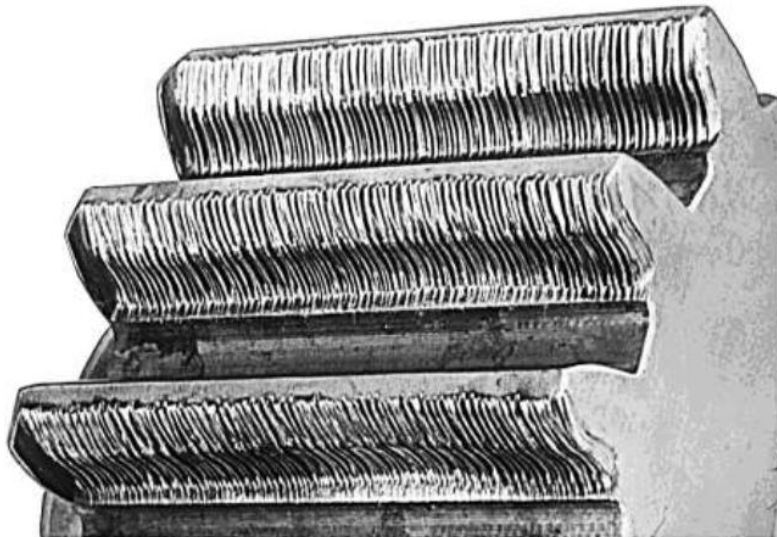
O design do perfil do dente exerce um papel fundamental na distribuição de tensões e, consequentemente, na forma como as falhas se manifestam. A complexidade aumenta quando diferentes modos de falha ocorrem simultaneamente, dificultando a identificação da falha inicial. Slogén (2013) enfatiza que a análise detalhada do perfil do dente é crucial para uma investigação precisa

2.3.1 Desgaste abrasivo

O desgaste em engrenagens consiste na perda gradual de material em suas superfícies de contato. Dentre as causas mais comuns, destacam-se o contato metal-metal, ocasionado por lubrificação inadequada, a presença de partículas abrasivas e o desgaste químico. Este último é resultado da interação entre o material da engrenagem e a composição do lubrificante, podendo levar à formação de ácidos e oxidação.

Segundo Beckham (2019), o desgaste abrasivo mostrado na Figura 11, por exemplo, ocorre quando partículas duras, como contaminantes, material desgastado ou partículas provenientes da própria engrenagem, são pressionadas entre as superfícies em contato durante o engrenamento, causando ranhuras e remoção de material.

Figura 11: Efeito do desgaste abrasivo na superfície dos dentes das engrenagens



Fonte: (Errichello, 2002)

2.3.2 Pitting e Spalling

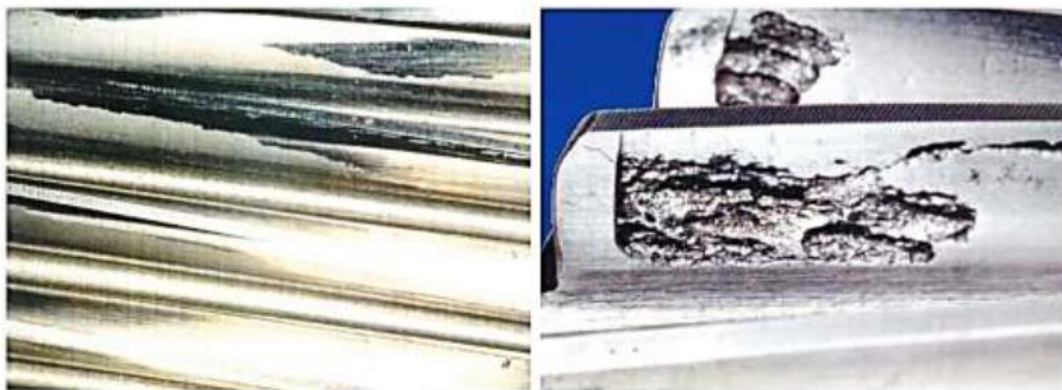
O *pitting*, a falha mais comum em engrenagens, é resultado da fadiga de contato superficial causada por tensões cíclicas que excedem o limite de resistência do material. Esse fenômeno se caracteriza pela formação de pequenas crateras na superfície dos dentes, iniciando-se em regiões de alta concentração de tensão.

O *pitting* pode ser dividido em duas fases: inicial e progressivo. O *pitting* inicial, que ocorre nas primeiras horas de operação, resulta em crateras pequenas e dispersas, geralmente com menos de 1 mm de diâmetro. Já o *pitting* progressivo, que se inicia após um número significativo de ciclos, leva à formação de crateras maiores e mais profundas,

podendo comprometer a integridade do dente da engrenagem. A Figura 12 ilustra a evolução dessas duas fases (BECKHAM, 2019).

É importante ressaltar que a taxa de propagação do *pitting* é influenciada por diversos fatores, como carga aplicada, velocidade de rotação, tipo de lubrificante e propriedades do material. As consequências do *pitting* incluem aumento do ruído, vibração, desgaste acelerado e, em casos extremos, a ruptura da engrenagem.

Figura 12: Comparação de superfícies afetadas pelo *pitting* inicial (esquerda) e pelo *pitting* progressivo (direita)



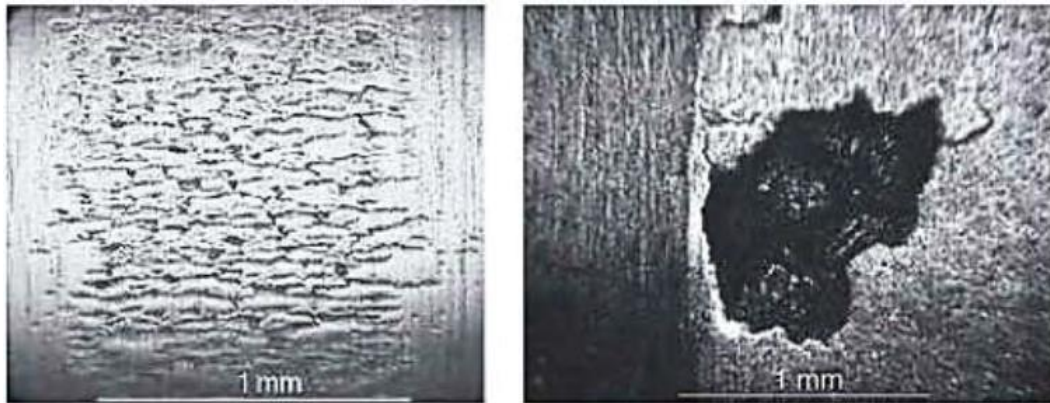
Fonte: (Beckham, 2019).

O *pitting* pode ser classificado em *micropitting* e *macropitting*. O *micropitting*, caracterizado por pequenas crateras com diâmetro inferior a 20 μm , é resultado da combinação de tensões de rolagem e deslizamento relativo entre os dentes das engrenagens. Esse tipo de falha é comum em superfícies endurecidas e em transmissões de alta velocidade, como as encontradas em turbinas eólicas. O *micropitting* pode se iniciar tanto na superfície quanto na subsuperfície do dente, dificultando sua detecção precoce (JELASKA, 2012).

Se não controlado, o *micropitting* pode evoluir para o *macropitting*, caracterizado por crateras maiores que 1 mm, que são formadas pela perda de grandes fragmentos de material, fenômeno conhecido como *spalling* (ERRICHELLO, 2002). O *macropitting* compromete significativamente a resistência da engrenagem e pode levar à falha catastrófica da transmissão. A

Figura 13 ilustra a diferença entre as superfícies afetadas por *micropitting* e *macropitting*.

Figura 13: Comparação de superfícies afetadas por *micropitting* (esquerda) e *macropitting* (direita)



Fonte: (Jelaska, 2012).

2.3.3 *Scuffing*

Scuffing é a falha de desgaste adesivo severo que ocorre em superfícies de dentes de engrenagens submetidas a altas rotações e/ou temperaturas elevadas, o que leva à ruptura do filme lubrificante, causando arranhões e fissuras ao longo da direção do deslizamento. Esse tipo de falha geralmente se origina de um *pitting* inicial na superfície do dente. A temperatura de contato é o principal fator influente, mas também é importante considerar as propriedades do óleo lubrificante e seus aditivos, que podem impactar a eficiência da lubrificação (ERRICHELO, 2013). As superfícies afetadas apresentam uma textura áspera ou fosca que, sob ampliação, parecem rasgadas e deformadas plasticamente (Figura 14).

Figura 14: Danos causados por *scuffing* na superfície do dente



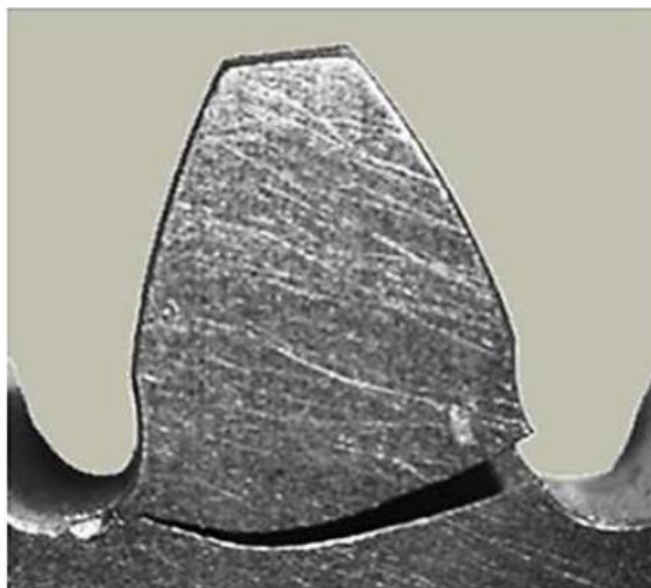
Fonte: (Errichello, 2013).

2.3.4 Quebra dos Dentes (*Tooth Breakage*)

A quebra dos dentes ocorre devido à variação de tensões causadas pelo momento de flexão gerado por uma força normal atuando na superfície do dente durante o contato. Após essa carga, o dente fica sem carga durante uma revolução até encontrar outro dente. No caso de sistemas planetários, a distribuição de tensões depende do arranjo das engrenagens e de seu espaçamento. Vibrações torcionais submetem o dente a tensões normais cíclicas, que variam de zero até um valor máximo determinado (JELASKA, 2012). A vida útil da engrenagem finaliza quando a ocorrência de fraturas impede o funcionamento correto.

A trinca costuma surgir perto da raiz do dente, onde há maior concentração de tensões. A partir daí, a fratura se propaga, deixando uma superfície convexa no dente quebrado e uma superfície côncava no corpo da engrenagem (Figura 15).

Figura 15: Trajetória da fratura na região da raiz do dente



Fonte: (Boiadjiev et al., 2015).

A Figura 16 exemplifica o caso de um dente em que a trinca evoluiu até a fratura do dente.

Figura 16: Dente de engrenagem fraturada



Fonte: (Shandro, Patte e Vadnal, 2014)

2.4 Processos de Manutenções

Em manutenção, diversos desafios e decisões precisam ser antecipados, além de conhecimentos técnicos específicos para minimizar os impactos do inevitável desgaste e falhas dos equipamentos (IRANI, 2011). A manutenção corretiva é realizada quando o equipamento ou ativo já apresenta uma falha ou defeito. É considerada uma abordagem mais reativa e menos eficiente, pois pode levar a grandes perdas na produção, aumento dos riscos de danos e maiores custos de reparo. No entanto, em algumas situações, pode ser vantajoso adotar a manutenção preventiva, especialmente em um formato planejado, onde se espera por um momento adequado para realizar os reparos sem comprometer tanto a operação (FRACTTAL, 2024). Nos aerogeradores, a manutenção corretiva visa substituir ou reparar componentes após falhas ou desgastes. Essa manutenção pode ser emergencial, caso a produção seja interrompida, ou planejada, em conjunto com manutenções preventivas ou preditivas (SILVA, 2017). Após uma falha, a manutenção corretiva não planejada requer intervenção rápida para retomar a produção o mais breve possível, pois quanto maior o tempo de inatividade, menor a disponibilidade do equipamento. Candiottto (2016) e Silva (2017) identificam três formas de manutenção corretiva em turbinas eólicas: reparo perfeito, que restaura o equipamento ao estado

original; mínimo reparo, que apenas restabelece a operação sem retornar à qualidade original; e reparo normal, que visa apenas consertar o problema sem aumentar a vida útil.

A manutenção preventiva é feita seguindo um cronograma previamente definido, que pode ser baseado no tempo ou no número de ciclos de uso do equipamento. Diferente da manutenção corretiva, essa abordagem é mais proativa, pois busca evitar falhas antes que aconteçam. No entanto, ela pode resultar em manutenções desnecessárias ou insuficientes, já que não considera o estado real do equipamento no momento. Assim, as intervenções são realizadas conforme o cronograma, independentemente de o ativo realmente precisar ou não de manutenção naquele instante (FRACCTAL, 2024). No caso de aerogeradores, a manutenção preventiva busca prevenir falhas, realizando a substituição periódica de peças conforme um plano baseado no tempo ou condição de operação.

A manutenção preditiva é feita com base em sinais ou indicadores, como dados históricos, que ajudam a prever possíveis falhas ou desgaste no equipamento. Essa abordagem é ainda mais proativa e eficiente do que a manutenção preventiva, pois permite agir antes que o problema aconteça, com base no estado real do ativo. No entanto, ela exige um investimento maior em tecnologia e uma equipe qualificada para interpretar esses dados com precisão (FRACCTAL, 2024).

2.5 Tribologia

Jost (1966), apresentou ao governo britânico em relatório o conceito da aplicação da tribologia. Esse estudo que consistia em buscar entender as interações entre superfícies em movimento, englobando atrito, lubrificação e desgaste. Jost calculou que a aplicação de boas práticas de tribologia poderiam gerar uma economia significativa para o Reino Unido, cerca de 4% do PIB, equivalente a 515 milhões de libras.

Estudos subsequentes, como os de Pinkus e Wilcock (1977) nos Estados Unidos, corroboraram a importância da tribologia para a eficiência energética. Eles estimaram que nos Estados Unidos, os setores de transporte, geração de energia, turbomáquinas e processos industriais consumiam 80% de toda a energia do país. E que até 11% do consumo de energia norte-americano poderia ser economizado com melhorias tribológicas (PINKUS & WILCOCK, 1977). Entre 1980 e 1983, o Ministério do Comércio e Indústria do Japão também investiu em pesquisas nessa área, reconhecendo seu potencial para aumentar a durabilidade e eficiência de máquinas. (KUBOTA, 1982).

Holmberg, Andersson e Erdemir quantificaram o impacto global do atrito, demonstrando que cerca de 20% da energia mundial é dissipada por ele (HOLMBERG *et al.*, 2012; HOLMBERG & ERDEMIR, 2017). Essa perda energética não só impacta a economia, mas também o meio ambiente, contribuindo para as emissões de gases do efeito estufa, principalmente no setor de transportes.

A prática mais comum de reduzir atrito e desgaste é via lubrificação fluida, utilizando óleos e graxas. Entretanto, os aditivos presentes nesses lubrificantes, embora melhorem o desempenho, podem causar danos ao meio ambiente e à saúde humana. Muitos desses aditivos possuem formulação contendo fósforo (P) e enxofre (S) (WONG & TUNG, 2016), o que é danoso ao meio ambiente e à saúde humana. Por essa razão eles estão sendo evitados e tem sido impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis.

Basicamente, a lubrificação consiste na adição de um elemento interfacial entre superfícies em movimento relativo, visando reduzir o atrito e o desgaste. O objetivo é baixar a tensão de cisalhamento no sistema. Óleos lubrificantes normalmente são derivados do refino de petróleo bruto (MORTIER & ORSZULIK, 2012). Uma alternativa a esses óleos minerais são os lubrificantes sintéticos, como os ésteres orgânicos, com maior faixa de temperatura de operação, mas com custos mais elevados. A viscosidade, propriedade fundamental dos lubrificantes, determina a espessura do filme lubrificante e, conseqüentemente, o regime de lubrificação. A viscosidade é definida como a resistência ao escoamento de um fluido quando deformado por forças cisalhantes (TIPEI, 1962; BASSANI & PICCIGALLO, 1992; MORTIER & ORSZULIK, 2012; TORBACKE *et al.*, 2014).

Além dos aditivos antidesgaste e de extrema pressão, outros aditivos modificadores de atrito são frequentemente incluídos nos lubrificantes para formar tribocamadas ou tribofilmes protetores com baixa tensão de cisalhamento nas áreas de contato (STUDT, 1989). Isso é especialmente importante em sistemas tribológicos que operam em regimes de lubrificação limite e mista, onde não é possível formar um filme de óleo que separe completamente as superfícies (ERDEMIR, 2005).

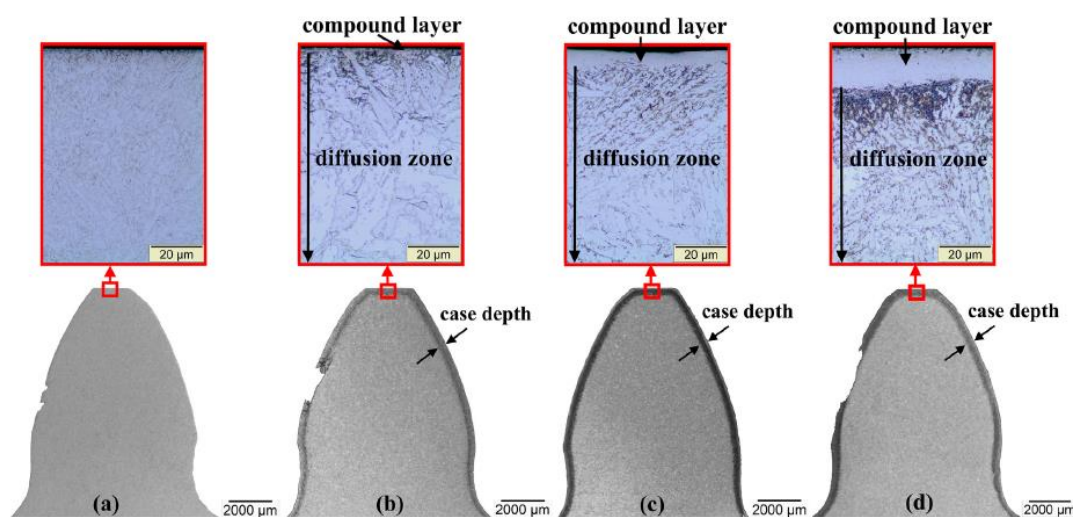
2.5.1 Soluções tribológicas para danos em engrenagens

Analisando os danos causados a engrenagens observa-se que a tribologia está bastante envolvida na causa dos danos, por esse motivo buscou-se soluções nesse campo para observar como elas podem melhorar o desempenho desses componentes.

O doutor Rafael Luciano Dalcin publicou um artigo interessante para redução de danos causados por *pitting* em engrenagens (DALCIN *et al.*, 2022). Nesse trabalho foi desenvolvida uma pesquisa para melhorar a resistência ao desgaste por *pitting* em engrenagens forjadas, utilizando aço bainítico de baixo carbono e tratamentos de nitretação a plasma. Foram testadas diferentes formas de nitretação com intuito de verificar como a microestrutura, dureza, tenacidade à fratura e tensões residuais das engrenagens foram afetadas.

Como resultados, foram obtidas engrenagens nitretadas que apresentaram um aumento significativo na dureza superficial. Também foram testadas camadas mais espessas de nitretação. Percebeu-se que as mais espessas se formaram em atmosferas compostas por 76% de N_2 e apresentavam alta dureza, mas também menor tenacidade à fratura, por consequência, falhavam com maior facilidade em testes de fadiga. Já analisando do ponto de vista de reduzir o desgaste, engrenagens formadas em atmosferas compostas por 24% de N_2 apresentaram a melhor resistência ao desgaste por *pitting*, suportando até 10 vezes mais ciclos de carga em comparação com engrenagens não nitretadas (DALCIN *et al.*, 2022).

Figura 17: Metalografia realizada em dentes de engrenagens após teste FZG. (a) Não nitretada, (b) camada com 5% de N_2 , (c) camada com 24% de N_2 e (d) camada com 76% de N_2 .



Fonte: (Dalcin *et al.*, 2022).

Na Figura 17, é possível verificar a comprovação dos resultados obtidos por Dalcin *et al.* (2022). Foram realizados testes FZG, um ensaio padronizado utilizado para

avaliar a resistência ao desgaste por *pitting* em engrenagens. E nesses ensaios o material que melhor se comportou foi a camada gerada em atmosfera de 24% de N₂, enquanto as camadas geradas em atmosferas de 5%, 76% de N₂ e sem nenhuma nitretação apresentaram *pitting* (DALCIN *et al.*, 2022). Dessa forma, o estudo pode ser considerado como uma solução para reduzir o desgaste por *pitting*. É necessário a realização de estudos para verificar se esse tipo de revestimento trará os mesmos resultados positivos em engrenagens presentes em aerogeradores pelo seu tamanho e cargas suportadas.

3 METODOLOGIA

3.1 Obtenção de dados reais de aerogeradores em operação

O trabalho foi desenvolvido em paralelo a um estágio desenvolvido na empresa ENGIE Brasil Energia, uma empresa multinacional que trabalha na geração e transmissão de energia. Por motivos contratuais com empresas fornecedoras, algumas informações tiveram que ser omitidas por questões de sigilo. O estágio possibilitou a realização de uma entrevista com o Supervisor de Manutenção Mecânica de um parque em operação no Nordeste. Além da entrevista, também foram solicitados relatórios de manutenções realizadas.

Buscando obter uma visão mais ampla, foram colhidas informações do cenário brasileiro a partir de informações de órgãos brasileiros reguladores de energia como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Também foram usadas como fonte instituições que trabalham na análise e divulgação de relatórios a partir dos dados publicados pelos órgãos reguladores, como a empresa EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

3.1.1 Questionário aplicado ao responsável pela manutenção

Foram elaboradas algumas perguntas para se fazer em formato de entrevista ao engenheiro responsável, visando obter informações necessárias para quantificação de tempo de parada e custo de realização de manutenções, e dos tipos de falhas comuns nas máquinas desse projeto. As perguntas foram:

1. Qual o intervalo de realização das manutenções periódicas na caixa de engrenagens dos aerogeradores?
2. Existe alguma frequência de paradas para manutenções não periódicas? No caso de paradas por algum problema específico, algum comportamento estranho e não por observação de rotina.
3. Quanto tempo a máquina precisa ficar parada para realização das manutenções? Caso dependa do tipo de manutenção, pode especificar ou dar uma estimativa de máximo e mínimo?
4. Qual tempo médio para que uma caixa de engrenagens comece a apresentar problemas recorrentes?
5. Quais tipos de problemas que os aerogeradores começam a apresentar ao longo do tempo?

6. Quais tipos de falhas são considerados críticas para que seja necessário a troca da caixa de engrenagens
7. Quais são os principais problemas causadores do desgaste dos componentes?
8. Identificado o defeito, qual tempo médio para a realização da instalação de uma nova caixa de engrenagens?
9. Existe um procedimento padrão estabelecido para a realização das manutenções? Se sim, poderia descrever?
10. Reforçando, quais os principais problemas relacionados à desgaste de componentes?
11. Qual a periodicidade de troca de lubrificantes? A reposição é feita manualmente ou de forma automatizada?
12. Qual o volume de lubrificante necessário para manter o funcionamento de uma caixa de engrenagens?

As perguntas acima têm como objetivo obter informações chave que serão utilizadas para calcular e fazer uma estimativa do custo associado as manutenções e falhas, que são importantes quantificar para realização da análise nesse trabalho. As informações que se deseja obter são:

- Tempo médio da máquina funcionando e parada no período de um ano. Considerando vida útil com paradas até a falha e posteriormente a troca.
- Buscar entender se as manutenções estão sendo feitas antes do esperado.
- Principais falhas mapeadas, que geram manutenções precoces e quais inviabilizam a operação.
- Qual o volume de lubrificante necessário para operar a máquina. Visando estimar qual o custo da troca de óleo e qual necessidade de consumo de um aerogerador.

Considerando as limitações do estudo, sem a possibilidade de atuar ativamente na manutenção da caixa de engrenagens, a entrevista realizada com o engenheiro é a melhor forma de se aproximar da vivência necessária para o estudo. Para garantia dos dados, seria necessário um estudo aprofundado, com acesso as máquinas e participação do cronograma de manutenção delas.

3.1.2 Relatórios fornecidos pelo responsável da manutenção

Além da entrevista realizada com o engenheiro responsável, o mesmo forneceu dados técnicos da máquina estudada. Os documentos fornecidos foram o manual técnico

da transmissão planetária e dados de manutenções realizadas nos anos de 2022, 2023 e 2024. Os dados das manutenções são majoritariamente relatórios de inspeção com boroscópio.

3.2 Pesquisa de dados de energia eólica nacionais

O mercado de energia é bem transparente em relação às suas transações. Tendo em vista a necessidade de quantificar os valores perdidos pelas paradas de manutenção nos aerogeradores, foi realizada uma pesquisa em relatórios públicos. Outro dado importante pesquisado é a atual produção de energia brasileira via matriz eólica e outras fontes energéticas. Muitos órgãos nacionais fazem o registro de valores de comercialização e de carga produzida para se ter noção histórica da flutuação do preço da energia e da capacidade de produção.

A busca foi realizada nos relatórios divulgados nos seguintes sítios eletrônicos:

- CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica), para obtenção de valores de PLD (Preço da Liquidação das Diferenças). O CCEE, segundo o seu próprio portal, é uma associação civil sem fins lucrativos que integra geradores, distribuidores, comercializadores e consumidores de energia elétrica no Brasil, acompanha as movimentações do setor e promove o seu desenvolvimento contínuo;
- ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica), para dados gerais como evolução da capacidade instalada, porcentagem das matrizes brasileiras quanto a capacidade instalada, quanto foi gerado, quantos parques eólicos estão em operação no Brasil e outras. A ABEEólica, segundo seu próprio portal, é uma instituição sem fins lucrativos, que congrega e representa a indústria de energia eólica no País, incluindo empresas de toda a cadeia produtiva. Ela contribui, de forma efetiva para o desenvolvimento e reconhecimento da energia eólica como uma fonte limpa, renovável, de baixo impacto ambiental, competitiva e estratégica para a composição da matriz energética nacional;
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), em busca de informações como geração diária das plantas energéticas do Brasil, sendo possível conseguir dados de todas as matrizes, específicos da matriz eólica e específicos da usina de interesse. A ONS, segundo seu próprio portal, é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da

operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel);

- EPE (Empresa de Pesquisa Energética), que publica relatórios bastante informativos com periodicidade anual. Informações encontradas desde quanto foi gerado a valores médios negociados em leilões para parques eólicos. A EPE, segundo seu próprio site, é uma instituição pública federal que presta serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME), desenvolvendo estudos e pesquisas que fornecem os insumos necessários para o planejamento do setor energético, cobrindo energia elétrica, petróleo, gás natural, carvão mineral, fontes renováveis de energia, energia nuclear e eficiência energética, dentre outras.
- Caderno Setorial ETENE, é uma revista publicada pelo Banco do Nordeste do Brasil S.A. O objetivo dessa instituição é o desenvolvimento regional, englobando as regiões Norte e Nordeste, assim como norte de MG e ES. Essa revista é publicada com o objetivo de prover informações sobre o crescimento econômico na região em que se engloba. Desse material foram retiradas diversas informações acerca do crescimento da energia eólica no mundo e no Brasil, com foco na Bahia (estado que mais investiu na área).

4 DADOS OBTIDOS

4.1 Dados obtidos dos aerogeradores

Os dados obtidos da caixa de engrenagens (*gearbox*) que foram fornecidos pelo engenheiro responsável pela manutenção do parque em estudo incluem o manual do fabricante, relatórios de manutenção e uma entrevista técnica. Considerando a limitação de acesso à máquina, foi muito enriquecedor o contato com um profissional com experiência e acesso à operação. A partir da análise das informações obtidas, foi possível levantar informações cruciais, identificar padrões e anomalias que possam influenciar sua performance e contribuir para a validação ou refutação das hipóteses levantadas na revisão da literatura, e assim fazer a comparação com os dados de mercado e entender o impacto que essas manutenções têm em um cenário nacional.

4.1.1 Perguntas para o responsável pela manutenção dos aerogeradores

A seguir estão apresentadas as respostas fornecidas a partir do questionário apresentado na Seção 3.1.1, da entrevista realizada com o engenheiro responsável pela manutenção do parque:

a) Tópico: Tempo de máquina parada.

- **Pergunta:** Qual o intervalo de realização das manutenções periódicas?
Resposta: As manutenções ocorrem a cada seis meses. Temos uma manutenção anual mais criteriosa que é feita a cada ano, e outra mais rotineira realizada semestralmente no meio do intervalo entre as manutenções anuais.
Análise: No decorrer de um ano são feitas duas manutenções, uma manutenção “anual” e uma “semestral”. Nessas, cada uma possui tempos de parada diferentes, definidos por critérios de inspeção.
- **Pergunta:** Existe alguma frequência observada em paradas para manutenções não planejadas ou não periódicas?
Resposta: Não, as paradas não periódicas são feitas a depender das condições, não é possível prever. Normalmente utilizamos modelos de caixa de engrenagens com monitoramento de vibração. A depender da anomalia indicada no espectro, pode disparar uma solicitação de boroscopia. Não existe um padrão ou tempo médio para disparar a solicitação, só sabemos quando o comportamento é observado pelos sensores.
Análise: As paradas não periódicas são aleatórias, não é possível estimar um padrão ou prever.
- **Pergunta:** Quanto tempo a máquina precisa ficar parada para realização das manutenções? Caso dependa do tipo de manutenção, pode especificar ou dar uma estimativa de máximo e mínimo?

Resposta: As manutenções periódicas “semestrais” duram em média 8 horas. As anuais 16 horas. Isso considerando que sejam manutenções preventivas de toda a turbina. Quando são paradas por alguma condição específica, duram de 2 a 4 horas.

Análise: Sabendo que são feitas pelo menos uma semestral e uma anual em um ano, sabe-se que pelo menos 24 horas anuais serão de paradas para manutenções. E caso seja necessário, mais paradas por condição podendo levar de 2 a 4 horas.

- **Pergunta:** Qual tempo médio para que uma caixa de engrenagens comece a apresentar problemas recorrentes que necessitem substituição?

Resposta: Depende da plataforma. Tivemos alguns poucos casos de caixas de engrenagens que falharam no primeiro ano de operação por algumas condições específicas. A maioria já está operando há 5 anos e ainda não falharam. Mas muitas falharam em torno de 3 a 4 anos.

Análise: Também foi difícil estimar o tempo médio para parada, outro dado que pode ser considerado aleatório. Poucas falharam muito cedo, a maioria opera mais de 5 anos. Muitas falharam com 3 a 4 anos.

- **Pergunta:** Identificado um defeito que inviabilize a máquina, qual tempo médio para a realização da instalação de uma nova caixa de engrenagens?

Resposta: Considerando tempo de mobilização de guindaste e do novo equipamento, pode durar de 1 a 2 meses.

Análise: A partir da solicitação de troca da caixa de engrenagens, leva em torno de 1 a 2 meses para voltar a operar.

b) Tópico: Danos observados nas caixas de engrenagens.

- **Pergunta:** Quais tipos de problemas que os aerogeradores começam a apresentar ao longo do tempo?

Resposta: Desgaste por abrasão, *pitting* e trincas na engrenagem. Danos por desgaste nos rolamentos (gaiola e pista externa)

Análise: São observados danos tribológicos (abrasão e *pitting*) e as trincas que podem ter sido originadas dos problemas tribológicos ou de fabricação. E os danos nos rolamentos que estão relacionados ao desgaste tribológico.

- **Pergunta:** Quais tipos de falhas são considerados críticas para que seja necessário a troca da *gearbox* (caixa de engrenagens)?

Resposta: A parada das *gearboxes* (caixas de engrenagens) é ditada pelo comportamento observado nos sensores de vibração. Normalmente a parada acontece quando os danos nas engrenagens e nos rolamentos dos estágios planetários estão muito severos. É difícil observar os danos por boroscopia antes que sejam captadas vibrações anômalas, pois quando iniciada a trinca ela se propaga muito rápido, quando abrimos a máquina para fazer a manutenção o dano já comprometeu a máquina.

Análise: É inviável, na situação atual de controle detectar sinais que indicam a ocorrência do dano. Quando iniciado logo a máquina virá a falhar. A forma de identificação é por meio de sensores de vibração.

- **Pergunta:** Quais são os principais problemas causadores do desgaste dos componentes?

Resposta: Processo de fabricação das engrenagens, deterioração do lubrificante e cargas mecânicas excessivas devido ao desalinhamento na rotação horizontal da nacele e na rotação das pás.

Análise: As principais causas dos danos tribológicos são as altas cargas mecânicas. Falhas em processos de fabricação explicam falhas críticas mais ocasionais. A não ser que a linha de produção tenha um problema crônico, não se espera que todas as peças sejam afetadas por ela. Quanto ao alinhamento, o controle da rotação horizontal (*yaw*) tem como objetivo deixar o aerogerador alinhado com a direção do vento, para uma melhor captura. Já a rotação da pá (*pitch*) visa o controle da captura do vento pelas pás. Quando o controle dessas rotações não funciona bem, o aerogerador pode ser submetido a esforços que não foram planejados. Ambos os problemas podem ocasionar cargas superiores às suportadas pela caixa de engrenagens, gerando danos.

c) Tópico: Procedimentos de manutenção.

- **Pergunta:** Existe um procedimento padrão estabelecido para a realização das manutenções? Se sim, poderia descrever?

Resposta: Para as periódicas são a verificação do nível e coloração do óleo, e caso haja anomalia, completar ou substituir; Substituição do filtro de óleo; Substituição do filtro de umidade; E inspeção visual nos demais subsistemas (bomba de óleo, trocador de calor, *fan...*). Para as não periódicas, depende da falha observada. Mas normalmente é um alerta emitido causado por algum dano crítico, em que será necessário trocar a caixa de engrenagens.

Análise: Em todas as periódicas é avaliado o óleo, substitui-se os filtros. O resto passa por uma inspeção visual apenas. Uma investigação mais profunda ocorre quando um alerta é emitido por conta de alguma anomalia identificada.

- **Pergunta:** Qual a periodicidade de troca de lubrificantes? A reposição é feita manualmente ou de forma automatizada?

Resposta: Por condição. Manualmente, utilizando uma bomba.

Análise: Lubrificante só é trocado quando se percebe, pelo sistema de monitoramento, um alto nível de contaminantes no óleo. Procedimento realizado manualmente com auxílio de bomba de óleo.

- **Pergunta:** Qual o volume de lubrificante necessário para manter o funcionamento de uma caixa de engrenagens?

Resposta: Em média, 400 L.

Análise: Volume total da máquina é 400 L.

4.1.2 Material fornecido pelo responsável pela manutenção dos aerogeradores

Além da entrevista, o engenheiro forneceu 15 relatórios de boroscopia, um relatório técnico de uma falha prematura que aconteceu em uma caixa de engrenagens causada por uma inclusão na fabricação, o manual da caixa de engrenagens instalada nos

aerogeradores desse parque e 8 relatórios de manutenções anuais em diferentes aerogeradores.

4.1.2.1 Parâmetros de funcionamento do equipamento

As informações detalhadas sobre a caixa de engrenagens foram limitadas devido à confidencialidade imposta por contrato com a empresa fornecedora. Muitos detalhes técnicos, como as especificações exatas das engrenagens, são considerados segredo industrial. Por isso, apenas estimativas dos diâmetros foram fornecidas.

- As medidas da caixa de engrenagens é de $2675 \times 2750 \times 1830$ mm;
- A massa total da caixa de engrenagens é de 22420 kg;
- O torque nominal de entrada da caixa de engrenagens é de 2200 kNm;
- O torque máximo último nominal de entrada da caixa de engrenagens é de 5000 kNm;
- A rotação ideal de operação das engrenagens é de 13 rpm;
- O diâmetro estimado do pinhão solar é de 1 m;
- O diâmetro estimado das engrenagens planetárias é de 60 cm;
- O diâmetro estimado do pinhão de saída é de 31 cm.

A caixa de engrenagens foi projetada para operar com um torque nominal de entrada de 2200 kNm, que é o valor ideal para garantir que o sistema funcione de maneira eficiente e segura, sem sobrecarregar os componentes. Além disso, ela suporta um torque máximo último de 5000 kNm, que é o limite extremo antes que ocorram falhas graves nos componentes. Esse valor representa o máximo que a caixa de engrenagens pode aguentar em situações excepcionais, mas não deve ser atingido em condições normais de operação. Considerando que o torque é determinado pela fórmula:

$$T = F \times R \times \text{Sen } \alpha$$

Onde:

- T é igual ao torque nominal de entrada da caixa de engrenagens;
- F é igual a força exercida na ponta do dente da engrenagem;
- R é igual ao raio da engrenagem;
- α é igual ao ângulo entre a força e o braço de alavanca.

Considerando o valor de α é igual a 90° . O R é igual a 1 m, dimensões do raio da engrenagem solar maior; A F resultante é de aproximadamente 2.2×10^6 N, força que atua na ponte do dente.

A rotação ideal de operação da caixa de engrenagens gira em torno de 13 rpm, uma velocidade relativamente baixa, típica de grandes equipamentos como turbinas eólicas, que precisam de altos torques para funcionar. Em relação aos componentes, o diâmetro estimado do pinhão solar é de 1 metro, enquanto as engrenagens planetárias possuem diâmetros de 60 cm. Já o pinhão de saída tem um diâmetro menor, em torno de 31 cm. A redução no diâmetro das engrenagens de saída impacta diretamente o torque de saída e a velocidade angular. Por exemplo, a relação de transmissão entre o pinhão solar de 1 metro e o pinhão de saída de 31 cm é de aproximadamente 3,23. Isso resulta em um aumento na velocidade angular de 13 rpm da entrada para aproximadamente 42 rpm na saída.

4.1.2.2 Inspeções por boroscopia

Segundo o engenheiro responsável, são realizadas manutenções em dois casos. As manutenções periódicas e as realizadas conforme identificado a necessidade em inspeções. Os relatórios de manutenções anuais possuem um *checklist* de alguns passos que devem ser realizados, como inspeção visual de várias peças e troca de alguns insumos como filtro e óleo.

Foram fornecidos 15 relatórios de boroscopia realizados a partir de alguma irregularidade identificada pelo sistema de controle por vibração. Anomalias essas que podem ser causadas por falhas nas engrenagens, ou simplesmente por algum fator externo, sendo considerado um falso alarme de falha (quando não identificado nenhum problema que possa vir a causar a inutilização da máquina). A boroscopia é uma inspeção visual auxiliada por uma ferramenta que acessa com facilidade espaços muito pequenos e confinados. Antes da realização da boroscopia é inserido e movimentado um ímã na caixa de óleo das caixa de engrenagens, para verificação de presença de detritos. Quando se forma uma limalha, como a destacada por um círculo na Figura 18, pelo menos uma das engrenagens da caixa de engrenagens sofreu algum desgaste. Todos os casos de engrenagens que apresentaram danos possuíam um aglomerado de limalha atraídos pelos ímãs no teste realizado.

Figura 18: Teste com imã inserido no óleo antes da boroscopia

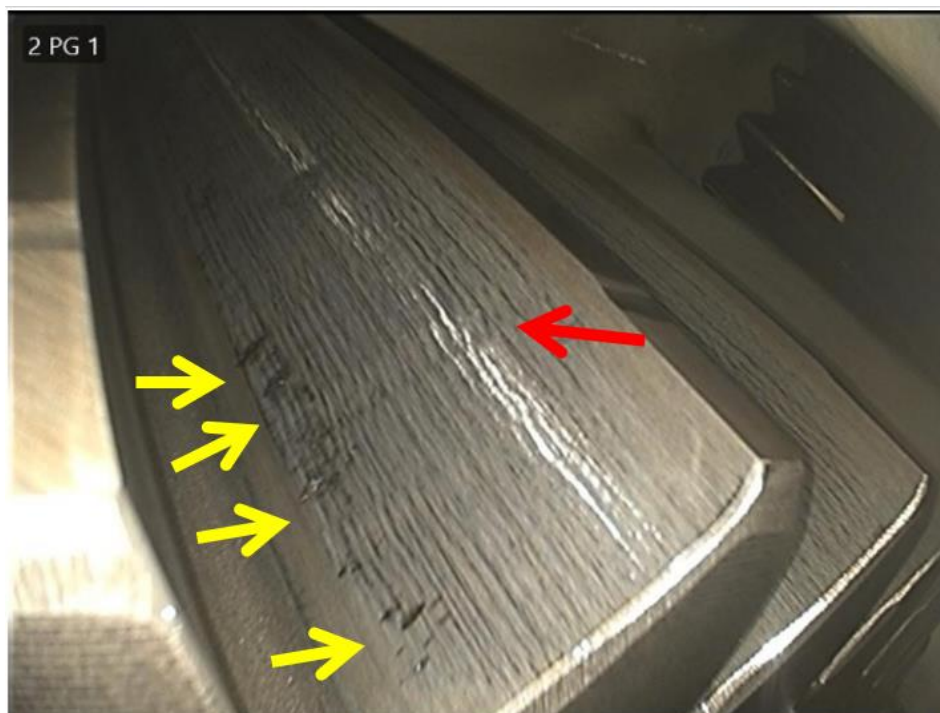


Fonte: Equipe de manutenção Engie.

a) *Micropitting*

Em dois relatórios de boroscopia há imagens de dentes que apresentavam marcas típicas de danos causados por *micropitting*. Na Figura 19, é possível ver essas marcas identificadas pela seta vermelha. Além de danos por *micropitting*, é possível observar na mesma imagem a formação de *pitting*, identificado pelas setas amarelas.

Figura 19: Micropitting com alguns pontos de pitting iniciados



Fonte: Equipe de manutenção Engie.

Na Figura 19 é possível observar um aspecto “ondulado” marcado em vermelho, esse aspecto teoricamente é causado por inícios de trincas na subsuperfície de tamanho micrométrico. Visualmente só se pode estimar que seja o caso, portanto, seria necessária uma análise via preparação metalográfica seguida de microscopia para definição do fenômeno. Caso seja, esse dano tende a se agravar e posteriormente as lascas vão se interligando até formarem crateras maiores, possivelmente formando pontos de *pitting* a crateras maiores por *spalling*.

Figura 20: Engrenagem com características de *Micropitting*



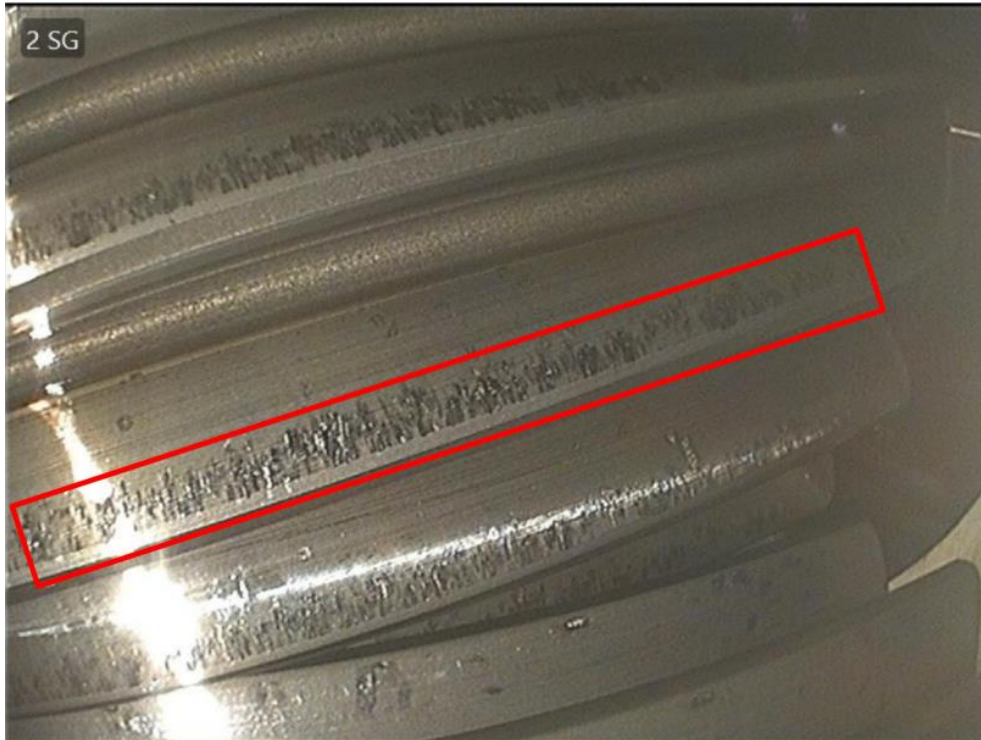
Fonte: Equipe de manutenção Engie.

Na Figura 20 não é possível determinar com certeza que seja um caso de *micropitting*, por conta da falta de aproximação e nitidez da imagem, mas é possível que seja também um exemplo.

b) Pitting

Outras engrenagens apresentaram visualmente indícios de *pitting*. Observa-se o dano característico destacado em vermelho na Figura 21.

Figura 21: Engrenagem com *pitting*

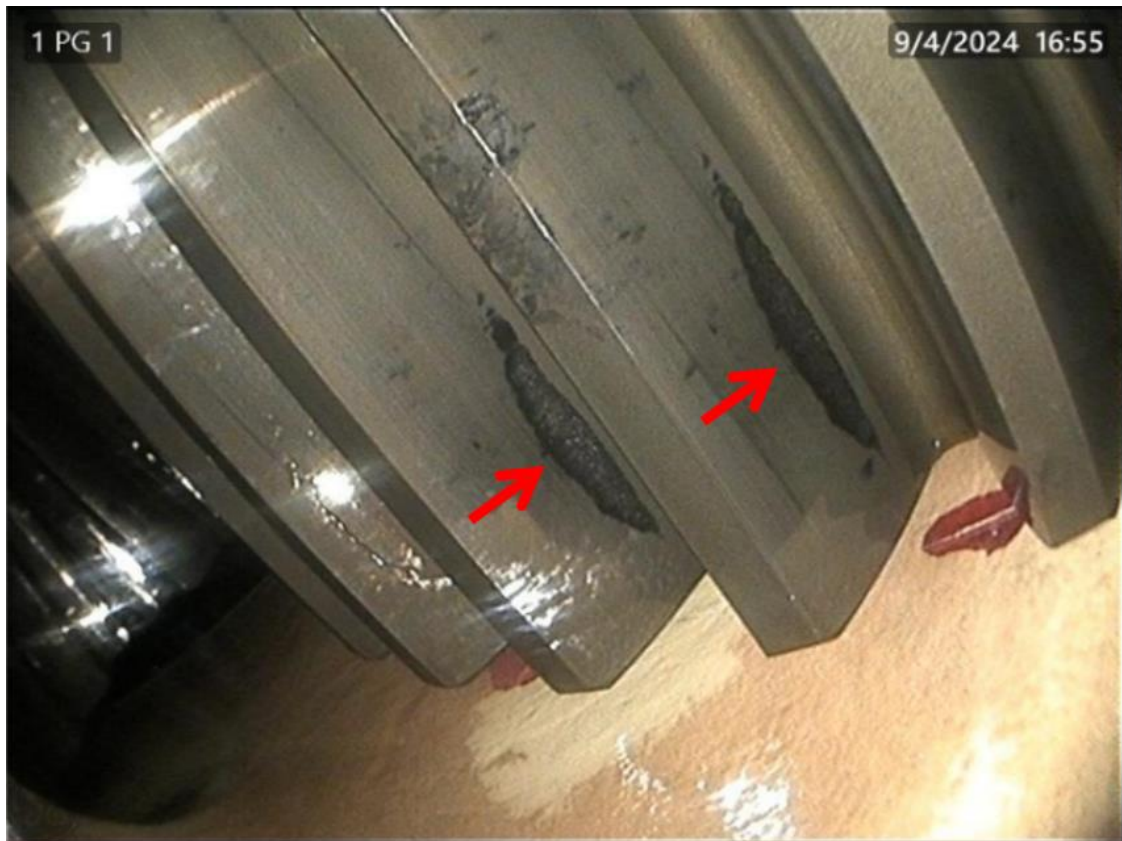


Fonte: Equipe de manutenção Engie.

Na Figura 21, é possível perceber vários pontos de *pittings* formados, apontados em vermelho.

c) Spalling

Quando agravado, os pontos do *pitting* se interligam, sofrendo o processo chamado de *spalling*. Esse dano é caracterizado por grandes crateras na superfície dos dentes, como identificado na Figura 22 pelas setas vermelhas.

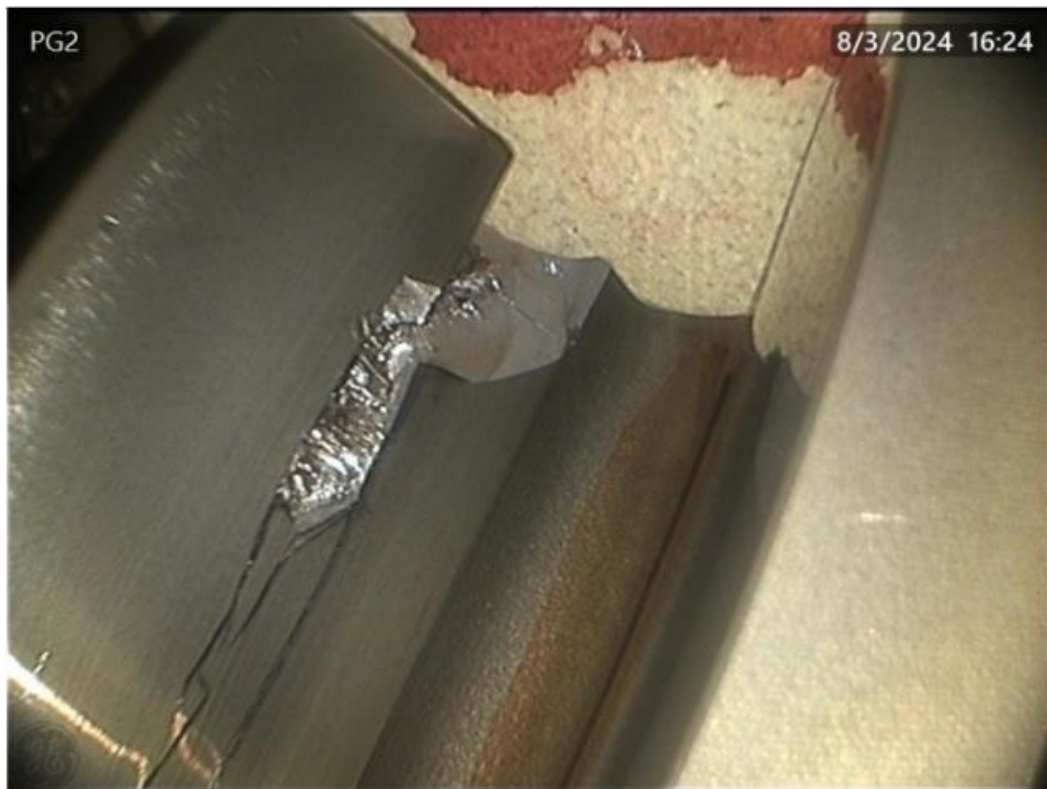
Figura 22: Engrenagem apresentando *Spalling*

Fonte: Equipe de manutenção Engie.

d) Trincas

Foram identificadas também trincas. Na Figura 23 exemplifica casos observados em pelo menos outras 4 engrenagens registradas em um mesmo relatório de boroscopia, com destacamento de fragmentos de dentes. Observa-se que se trata de uma trinca com pouca deformação plástica visível na superfície da fratura do dente, tratando-se de uma fratura frágil. Outras características são o aspecto brilhoso e as “ondas”, formadas perto do ponto de início da trinca, também chamadas de *beach marks*, típicas de fraturas por fadigas. As características citadas indicam uma fratura frágil, que ocorrem em componentes com alta dureza. Essas trincas se originaram por conta de alguma carga superior a projetada para essas engrenagens.

Figura 23: Engrenagem com trincas



Fonte: Equipe de manutenção Engie.

Outra possível causa de trincas poderia ser falhas de fabricação por fundição como inclusões na matriz da engrenagem, essas são falhas que atuam como concentradores de tensão. Eventualmente os dentes vem a falhar e se lascam, perdendo partes dos dentes. Isso se deve ao agravamento das trincas, que vão se propagando até encontrar o outro lado do dente, fraturando parte dele. Há também a possibilidade de um caso de *spalling* continuar se agravando, haja vista que a cratera gerada pelo *spalling* acaba gerando pontos críticos para a geração de trincas.

Quando um dente se lasca e tem sua superfície de contato reduzida que antes estava em contato com outro dente, o que acaba se tornando concentradores de tensão na distribuição de cargas pelas superfícies restantes. Os dentes que estavam sem danos passam a sofrer sobrecargas, e por consequência acabam se desgastado mais rapidamente até vir a falhar também, com o tempo a engrenagem tem todos os seus dentes danificados, como a engrenagem da Figura 24.

Figura 24: Par de engrenagens fraturadas



Fonte: Equipe de manutenção.

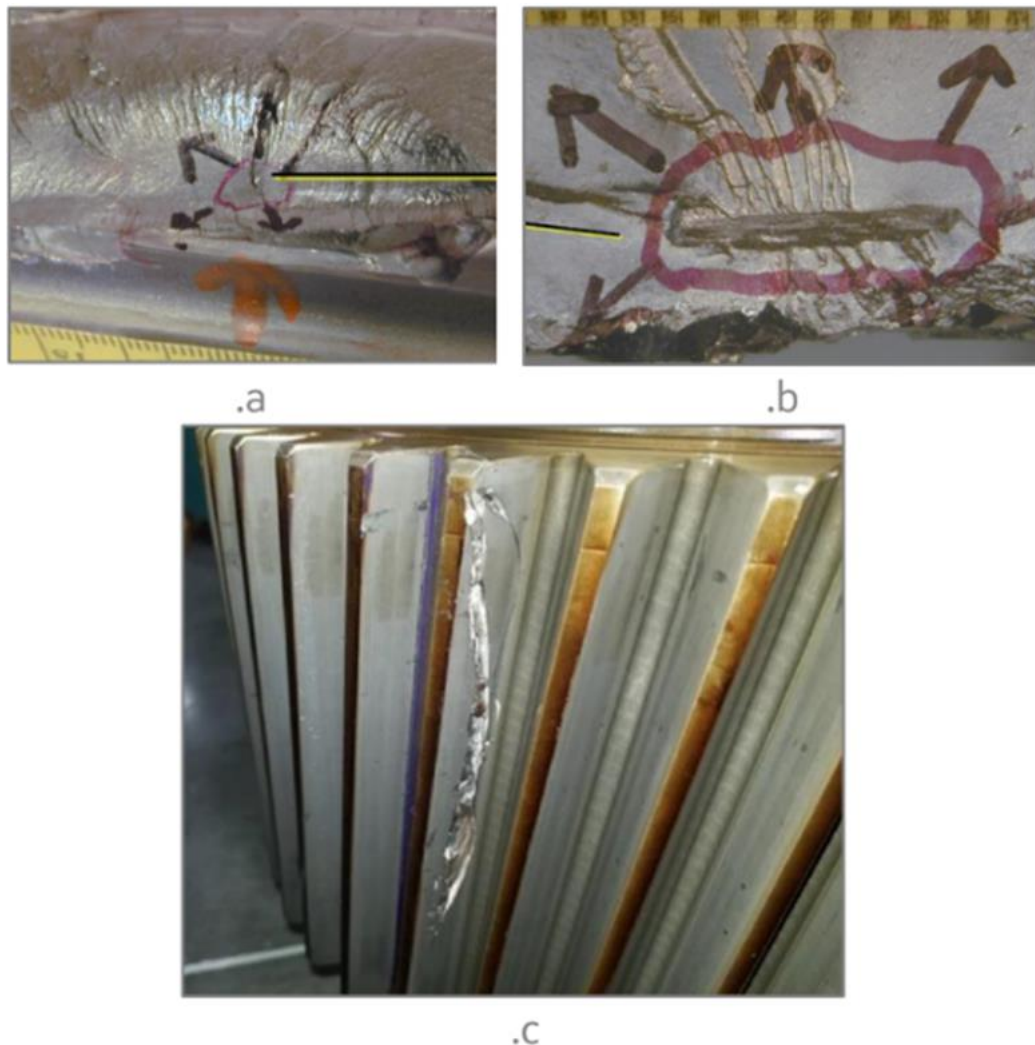
4.1.2.3 Análise dos relatórios de falha

Como informado na entrevista realizada com o engenheiro responsável pela manutenção, a maioria dos aerogeradores (quantidade não informada por ele) não apresentaram as falhas apresentadas no período de 5 anos. Mas foram relatados uma quantidade considerável (quantidade também não informada por ele) de aerogeradores que falharam antes de 5 anos, uma das máquinas falhou com um pouco mais de um ano de funcionamento. O diagnóstico desse caso crítico foi a quebra em um dente de uma engrenagem helicoidal da transmissão por falha no controle de qualidade da fabricação.

O relatório de falha informa que durante a fase operacional das turbinas, a empresa responsável pelo fornecimento e montagem dos aerogeradores identificou um número limitado de incidentes de fratura, causados pelo mesmo motivo, em dentes de engrenagens de caixas de engrenagens da empresa que fornecem as transmissões, tanto em estágios planetários quanto paralelos. Os danos observados iniciam-se com uma trinca na raiz do dente e podem evoluir para a liberação completa do dente. Em geral, fraturas em dentes aumentam os níveis de vibração, que podem ser detectados pelo Sistema de Monitoramento de Condição. Nas Figura 25.a e .b é possível observar o ponto onde

havia inclusões que iniciaram a formação das trincas nos dentes da engrenagem. A Figura 25.c mostra o resultado do fenômeno observado nas duas figuras anteriores.

Figura 25.a.b.c: Exemplos de falhas causadas por inclusões.



Fonte: Relatório de falha da empresa fornecedora dos aerogeradores.

A Figura 26 também é um caso de trinca e a Figura 27 uma evolução de trinca que gerou uma fratura de dente, ambos danos causados por uma falha na fabricação.

Figura 26: Trinca em dente por falha de fabricação



Fonte: Relatório de falha da empresa fornecedora dos aerogeradores.

Figura 27: Dente fraturado por falha de fabricação



Fonte: Relatório de falha da empresa fornecedora dos aerogeradores.

Por meio de análise pós-falha, foi identificado que a causa mais provável dos incidentes é a contaminação do aço e a consequente fragilização devido à presença de inclusões não metálicas (INMs), no processo de fabricação. Inclusões não metálicas são

comuns e estão presentes em algum grau na maioria dos aços de engrenagens, podendo ser produtos de reações químicas ou consequências de contaminação por pedaços de material refratário (material que mantém metal em estado líquido durante a fundição). No entanto, INMs com tamanho considerável podem levar a fraturas nas engrenagens após algum período de operação da caixa de engrenagens. Segundo a empresa fornecedora dos aerogeradores, os casos mais comuns de INM na indústria fornecedora para eles são alumina (Al_2O_3), e podem ocorrer durante o processo de fusão e vazamento do metal fundido no molde.

Embora as INMs sejam comuns na indústria, a empresa fornecedora dos aerogeradores continua a tomar medidas personalizadas com cada fornecedor para melhorar a qualidade do aço e a selecionar fornecedores com a melhor qualidade de material. As melhorias abaixo já foram implementadas pelo fornecedor de caixas de engrenagens e se aplicam às unidades entregues após fevereiro de 2019:

- Padrões rigorosos de qualidade de abastecimento, resultando na desqualificação de fornecedores de aço de segundo nível que não atendem a taxas aceitáveis de INM;
- Melhoria do processo de fabricação para permitir um aço mais “limpo”;
- Qualificação aprimorada de fornecedores de segundo nível com envolvimento de especialistas em Ensaios Não Destrutivos (END) e equipe de Engenharia de Materiais e Processos (EMP) diretamente com os fornecedores de aço;
- Redução do tamanho permitido de inclusão durante o Teste Ultrassônico (UT) - um padrão mais alto equivale a uma taxa de rejeição mais alta no fornecedor;
- Inspeção UT redundante - adição de um segundo nível de inspeções UT para qualquer UT manual em fornecedores de forjamento;
- Implementação de auditorias mais rigorosas para controlar os processos-chave de siderurgia.

Embora as INMs sejam normais e possam ser esperadas em algum grau, é necessário garantir que elas não levem a ocorrência de uma falha. Portanto, uma maneira eficiente de monitorar e detectar INMs potencialmente impactantes é com sistemas de monitoramento de condição (SMC).

A empresa fornecedora dos aerogeradores desenvolveu um algoritmo de detecção antecipada de falha de engrenagens (GFED) que amplifica os padrões de falha associados a engrenagens, aumentando a probabilidade de identificar problemas no início da progressão do dano em todas as engrenagens da caixa de engrenagens, permitindo a

detecção precoce de falhas e reduzindo as chances de danos secundários à caixa de engrenagens (exemplo mostrado na Figura 28), o que permite um melhor planejamento para reparos na torre e redução do tempo de parada da turbina.

Figura 28: Exemplo de dano secundário causado pela falha no estágio planetário



Fonte: Relatório de falha da empresa fornecedora dos aerogeradores.

Em resumo, percebe-se que essa falha prematura foi um caso isolado por falta de controle de qualidade na fabricação das engrenagens da caixa de engrenagens. A causa raiz do problema foi uma inclusão não metálica. A solução implementada foram melhorias no processo de fundição e seleção de materiais. Além de uma inspeção mais rigorosa e a utilização do sistema de prevenção de falhas para evitar que produtos suscetíveis a falhas não sejam identificados.

4.2 Análise de dados de energia eólica nacionais

Serão apresentados os dados obtidos pela pesquisa realizada nas entidades relevantes, relacionadas a geração e transmissão de energia no Brasil.

4.2.1 Geração Nacional

Foi divulgado pela (EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2024) no documento intitulado “Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional” do ano de 2024, dados da geração referente ao ano de 2022 e 2023. No documento citado, são apresentados os dados acerca da contabilização da oferta, transformação e consumo final de produtos energéticos no Brasil, tendo por base o ano de 2023. Nesse caso, a análise foi concentrada nos dados de geração para identificar o impacto da geração da energia eólica no cenário nacional e o quanto ela evoluiu nos últimos anos. A Figura 29 mostra os valores de geração de 2022 e 2023, dados em GWh (giga watt hora).

Figura 29: Geração Elétrica 2022 e 2023

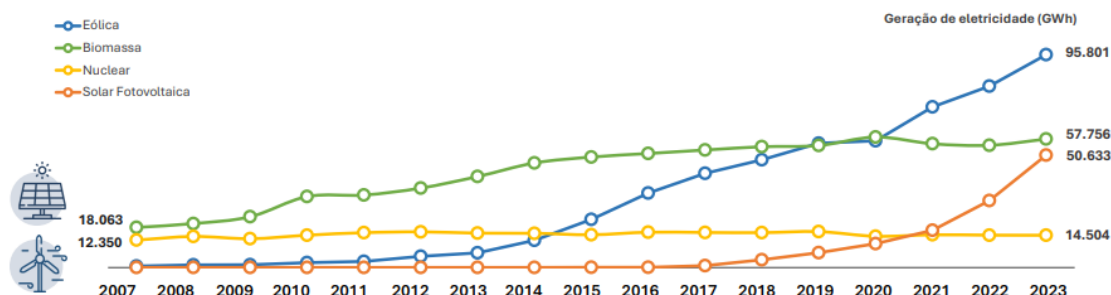
Fonte	2022	2023	Δ% 23/22
Hidrelétrica	427.114	425.996	-0,3%
Gás Natural	41.911	38.589	-7,9%
Eólica	81.632	95.801	17,4%
Biomassa ²	52.212	54.210	3,8%
Nuclear	14.559	14.504	-0,4%
Carvão Vapor	7.988	8.770	9,8%
Derivados do Petróleo ³	7.056	5.686	-19,4%
Solar Fotovoltaica	30.126	50.633	68,1%
Outras ⁴	14.563	13.932	-4,3%
Geração Total	677.162	708.119	4,6%

Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2024)

Segundo o relatório, a geração anual nacional em 2023 foi de 708.119 GWh, enquanto em 2022 foi de 677.162 GWh, um aumento de 4,6%. Já no cenário eólico, a produção em 2023 foi de 95.801 GWh, enquanto em 2022 foi de 81.632 GWh, um aumento de 17,4%, o que representa um crescimento maior do que o crescimento geral. Outro crescimento relevante é o da fonte solar fotovoltaica, que cresceu 68,1%, o maior crescimento das fontes e o único que supera o crescimento eólico. Mas ao se comparar a

quantidade de energia gerada, a energia eólica é a segunda maior fonte, abaixo apenas da hidrelétrica, e mesmo assim conseguiu o segundo maior crescimento.

Figura 30: Geração de Eletricidade de 2007 a 2023



Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2024)

No mesmo documento foi divulgado o gráfico da Figura 30. Nele é possível identificar o crescimento expressivo da energia eólica nos últimos 10 anos.

4.2.2 Precificação de energia gerada

Um dado muito importante quando se pensa em um estudo econômico, é a quantificação em valores do que foi produzido, ou em caso de perda de produção por falhas, o valor do que não foi produzido. Fornecido pelo (Painel de Preços: CCEE, 2024), foi possível extrair tabelas com todos os valores registrados do Preço da Liquidação das Diferenças (PLD) dos últimos anos. A Figura 31 é um histórico da média mensal do período entre 01/01/2019 e 16/07/2024 de valores de PLD para a região nordeste.

Figura 31: Histórico da média mensal do PLD de 2019 a 2024



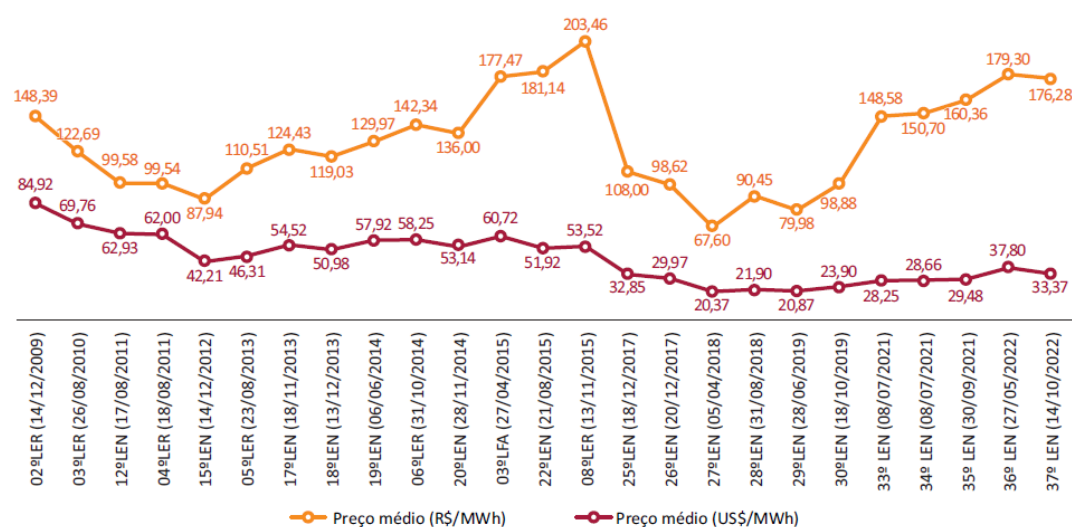
Fonte: (Painel de Preços: CCEE, 2024)

A partir dessa base de dados é possível identificar os intervalos desejados e buscar o valor específico em reais de MWh não produzidos, como desejável calcular

nesse estudo. Sabendo a capacidade de geração da máquina estudada, obtém-se a quantidade de MWh que não foram produzidos, multiplicando esse valor pelo PLD tem-se o valor em reais do prejuízo causado pela parada para manutenção ou por falha.

Uma segunda referência é a postagem no Caderno Setorial ETENE (Bezerra, 2023). Nesse relatório, o autor colheu dados de 2009 a 2022 dos preços negociados em leilões realizados pelo Governo Federal e gerou um gráfico da flutuação desses preços (Figura 32).

Figura 32: Preços médios dos projetos eólicos aprovados nos leilões realizados pelo Governo Federal



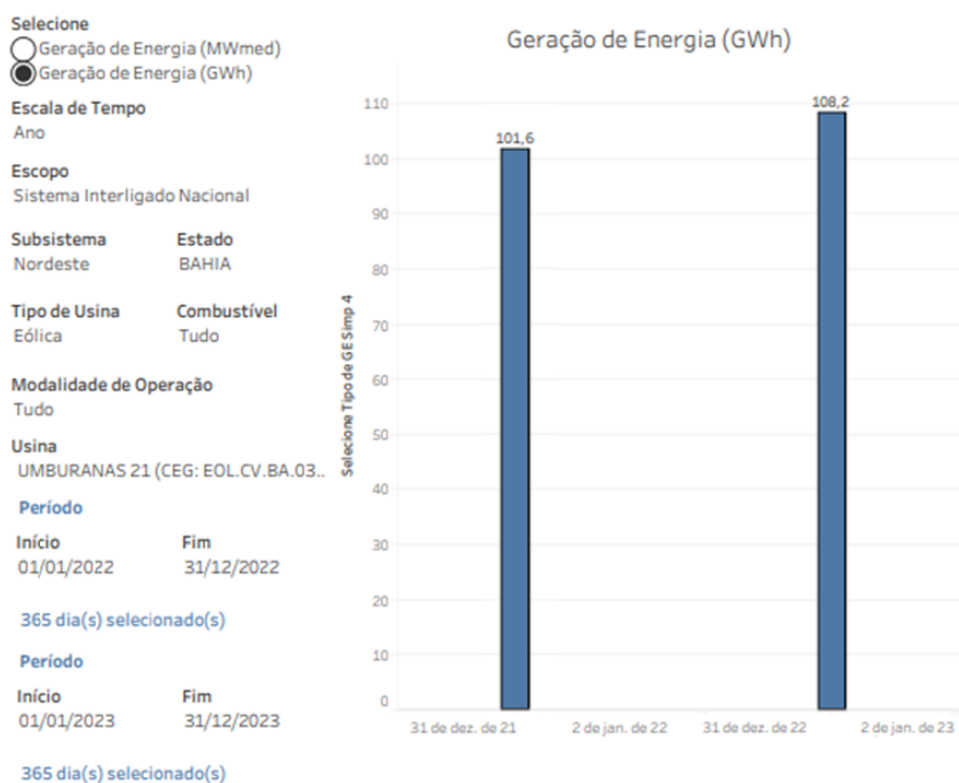
Fonte: CCEE (2023) e Banco Central do Brasil (2023). Elaboração: BNB/Etene.

A vantagem de se utilizar esse dado em detrimento dos valores de PLD da Figura 31, é que é um dado vinculado diretamente à geração eólica, os valores de PLD são de todas as matrizes.

4.2.3 Dados de geração da planta estudada

No site da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) é possível filtrar para identificar dados de geração específico por usinas. Nesse caso, foi utilizado a ferramenta para obter informações do parque eólico Umburanas 21, referente aos dados fornecidos pelo contato. Na Figura 33, a seguir, é possível visualizar a geração dos anos de 2022 e 2023, que são os mesmos anos observados nos estudos de mercado.

Figura 33: Geração de Energia (GWh) do Conjunto Eólico Umburanas 21



Fonte: (ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico). Modificado.

Em paralelo, foram obtidos dados referentes ao mesmo projeto pelo site da Engie Brasil Energia (EBE). Nele são divulgados dados de geração dos projetos. A descrição detalhada do Conjunto eólico Umburanas no site da EBE (ENGIE) é a seguinte:

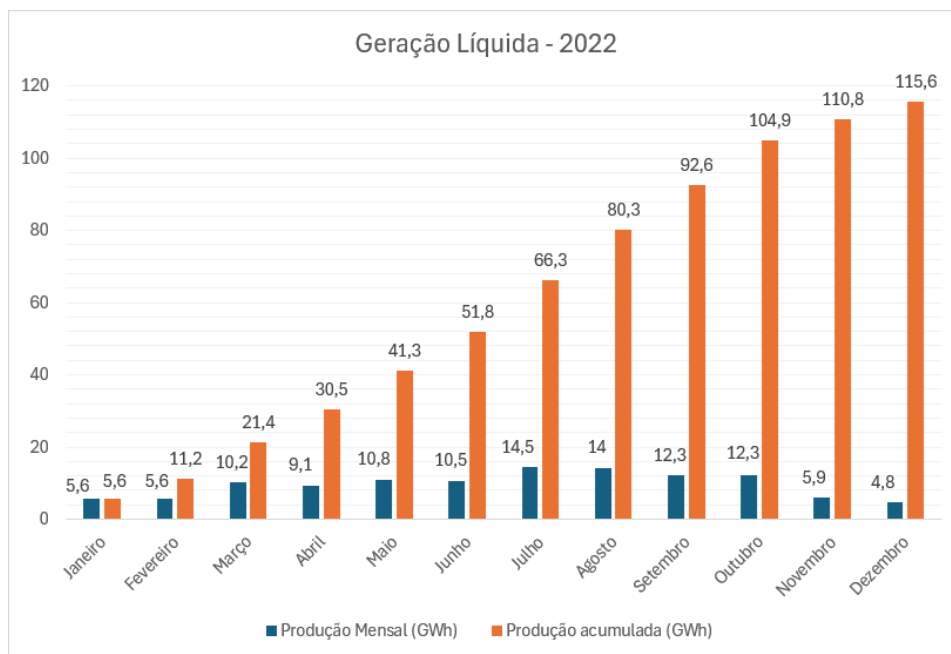
“Conjunto Eólico Umburanas: O Conjunto Eólico Umburanas, localizado no norte da Bahia, nos municípios de Sento Sé e Umburanas, foi a primeira etapa do Projeto Umburanas. Esse Conjunto possui 360 MW de capacidade instalada, dividida entre 144 aerogeradores de 2,5 MW distribuídos em 18 parques eólicos. Para que se tenha uma ideia melhor da sua dimensão, o diâmetro dos rotores dos aerogeradores é de 116 metros, suas torres têm 90 metros de altura e suas pás 56,9 metros de comprimento. A construção teve início em 2017 e foi finalizada com a entrada em operação do último parque, em abril de 2019. A autorização para operação desses parques eólicos é válida até 2050.

Em 2019, o Conjunto Eólico Umburanas iniciou sua operação remotamente a partir do Centro de Operação da Geração (COG), localizado na sede da ENGIE em Florianópolis (SC).”

No site da EBE (ENGIE) também é possível obter os dados de geração líquida, que se referem aos mesmos obtidos pelo site da ONS. Há uma pequena diferença de

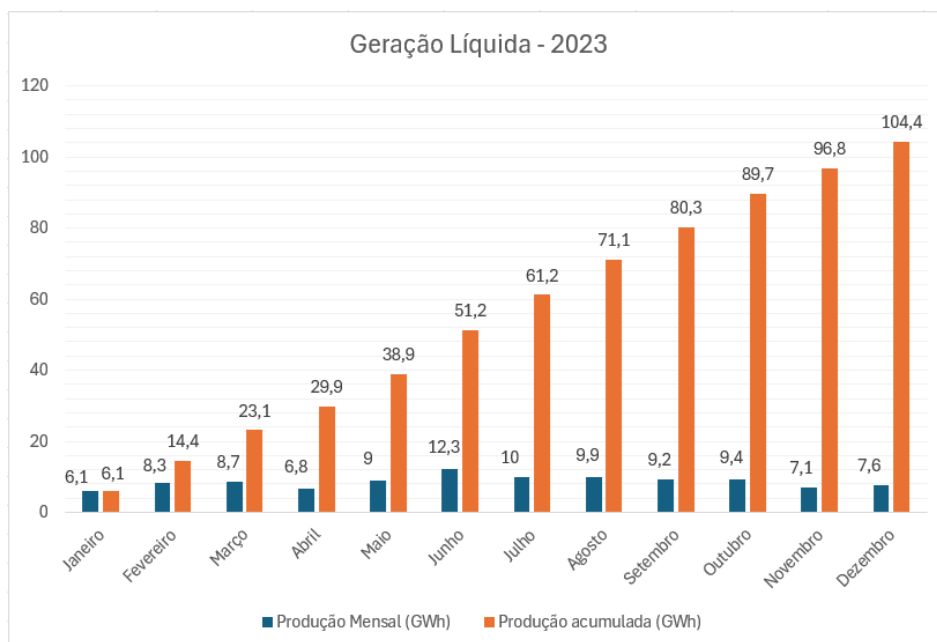
valores, mas na Figura 34 e na Figura 35 é possível observar o quanto foi gerado nos anos de 2022 e 2023, respectivamente.

Figura 34: Geração Líquida do Conjunto Eólico Umburanas em 2022



Fonte: (ENGIE). Elaboração: Próprio.

Figura 35: Geração Líquida do Conjunto Eólico Umburanas em 2023



Fonte: (ENGIE). Elaboração: Próprio.

5 DISCUSSÃO

Apresentados os dados obtidos, o próximo passo é a análise crítica dessas informações, buscando interpretar e contextualizar os dados da pesquisa com a realidade da geração eólica.

5.1 Custo por parada de aerogerador

Baseado no valor do MWh fornecidos nos leilões do relatório postado no Caderno Setorial ETENE pelo autor (Bezerra, 2023) e pela potência instalada por gerador (ENGIE), foi possível fazer uma estimativa de valor gasto, para entender qual deve ser o foco. As horas de paradas consideradas foram obtidas pela entrevista com o Engenheiro responsável pela manutenção dos aerogeradores, assim como uma pesquisa feita no site da Engie (ENGIE) forneceram os seguintes dados utilizados nos cálculos:

- Anualmente são realizadas duas paradas para manutenção, uma de 8h e outra de 16h, totalizando 24h anuais.
- Quando a caixa de engrenagens é inutilizada, os fornecedores levam de 1 a 2 meses para instalar uma nova. Para realizar a estimativa de tempo será considerado o valor de 1,5 meses.
- As caixas de engrenagens duram em torno de 3 a 4 anos, em alguns casos a falha ocorre antes. A maioria está com 5 anos de funcionamento sem falhar.
- A potência instalada de 1 aerogerador é de 2,5 MW.

Utilizando os dados de tempo de parada por manutenção e troca de peças, fornecidos pela entrevista com o engenheiro responsável, foram calculados a quantidade de MWh não produzido pelas paradas de manutenção e por troca de componentes. Para se ter uma noção do valor em reais dos MWh não gerados, foram obtidos os dados de valores do MWh gerado negociados em leilões que foram compilados no Caderno Setorial ETENE (Bezerra, 2023), que usou como base o CCEE (2023) e o Banco Central do Brasil (2023). Segundo a entrevista com o engenheiro, uma quantidade considerável de aerogeradores teve que trocar sua caixa de engrenagens em menos de 5 anos, enquanto a maioria ainda está em funcionamento, não foram especificadas as quantidades. Levando essas informações em conta foi feito um cálculo para comparar quantitativamente o impacto das manutenções quando comparado com o impacto de uma troca de caixa de engrenagens.

A Figura 36 representa esse comparativo, a curva em laranja representa o valor em reais não gerado por uma troca de caixa de engrenagens, enquanto a curva azul representa o valor em reais não gerado pelo somatório de todas as manutenções realizadas

num período de 5 anos, considerando que o gerador só tenha parado para a realização de manutenções planejadas.

Figura 36: Valor não gerado baseado na potência de um aerogerador



Fonte: (Bezerra, 2023). Elaboração: Próprio.

O gráfico da Figura 36 mostra que o custo de uma troca de engrenagens gera um impacto financeiro em torno de 10 vezes maior do que o impacto gerado por manutenções realizadas em um aerogerador que não apresentou falhas num período de 5 anos. Uma possível análise a se fazer em trabalhos futuros é estudar formas de melhorar a eficácia da realização de mais manutenções para prolongar a vida útil dos componentes, investigar se essa medida ajudaria a identificar danos antes que se propagassem e assim tomar decisões que prolonguem a vida útil das engrenagens, já que o impacto financeiro de uma troca de peças é muito maior que as manutenções periódicas.

5.2 Danos nas engrenagens

Baseado na entrevista com o engenheiro responsável pela manutenção dos aerogeradores e nas imagens das boroscopias realizadas nos aerogeradores, foi possível observar quais são os danos que mais impactam as engrenagens do estudo de caso. Ele informou que os danos observados em manutenções e em paradas de emergência foram: desgaste por abrasão, *pitting* e trincas na engrenagem. Danos por desgaste nos rolamentos

(Gaiola e pista externa). Ao estudar as imagens fornecidas por ele, foi observado casos de *pitting*, trincas nos dentes e o agravamento dessas trincas com fraturas nos dentes. Não foram observados grandes danos por abrasão, apenas alguns indícios, portanto abrasão não será considerada como dano crítico.

A inutilização de uma engrenagem ocorre quando os dentes se quebram e o par para de transmitir o torque. A quebra do dente é proveniente da trinca, ela tem como causas uma carga acima do suportado pela peça levando-a à fratura, ou uma cratera por *spalling*. Quando há a ocorrência do *spalling* se formam concentradores de tensão no dano, que promovem a nucleação e propagação de trincas. Outra causa para trincas observada foram as inclusões não metálicas, que são originadas de impurezas no processo de fabricação que também promovem a nucleação e propagação de trincas nas engrenagens.

5.2.1 Mitigação dos danos

O *pitting* é causado pelo somatório das tensões de deslizamento e rotação no contato dos dentes das engrenagens. Com o ponto de máxima tensão localizado na subsuperfície do dente, iniciando uma trinca interna que propaga até a superfície. No estudo realizado pelo autor (Dalcin *et al.*, 2022), foram desenvolvidas soluções muito promissoras para a mitigação de danos por *pitting*. Utilizando nitretação via plasma, foi gerada uma camada com maior dureza superficial que suportava até 10 vezes mais ciclos de cargas em suas engrenagens. Caso essa técnica seja desenvolvida para escala de aerogeradores, que são montados às centenas em parques eólicos, poderia se observar um retorno considerável pelo prolongamento da vida útil da caixa de engrenagens.

O surgimento de trincas nos dentes pode ter diversos motivos. Pelas imagens analisadas percebe-se pela fratura frágil e propagação que a superfície possui alta dureza. A fratura da Figura 23 representa bem casos de estruturas frágeis que se romperam por uma carga superior à sua resistência à flexão. Para chegar a uma solução seria necessário entender a causa dessas fraturas, um objetivo complexo sem um estudo aprofundado. As tensões sobre os dentes ocorrem no momento do contato dos dentes, após isso há o giro da engrenagem até os dentes se encontrarem novamente. Essas repetições acontecem em condições que podem contribuir para o dano, e melhorando essas condições seria possível prolongar a vida útil da engrenagem. A lubrificação poderia ser um ponto de melhoria, com a utilização de lubrificantes que melhorassem a estabilidade do lubrificante sob elevadas temperaturas de operação da máquina e da viscosidade para melhorar a condição

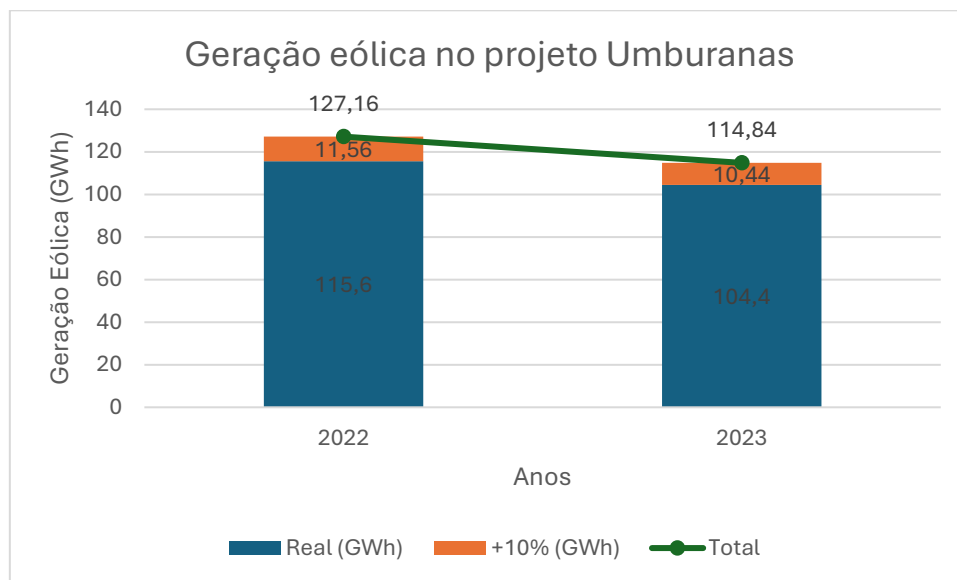
de lubrificação, mesmo sob condições severas, como aquelas em regime de lubrificação mista e limite.

5.3 Geração eólica

Definido as principais causas de danos é importante entender o possível impacto no cenário nacional caso haja algum tipo de melhoria. Inicialmente é importante definir quais dados utilizar. Nesse trabalho foram analisados dados de geração do projeto, de geração eólica nacional, de geração total nacional.

Para os dados de projeto foram fornecidos dados por duas fontes confiáveis (ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico) (ENGIE). Nesse caso, foram utilizados os dados da própria Engie por ser a empresa que administra o empreendimento. A diferença entre as informações também é pequena, não afetando o resultado de comparação de forma considerável. Segundo a empresa, em 2022 foi gerado no Conjunto Eólico de Umburanas 115,6 GWh, e no ano de 2023 foi gerado 104,4 GWh. Dividindo essa geração total entre os 144 aerogeradores do parque, foram gerados 802,78 MWh e 725 MWh por gerador nos anos de 2022 e 2023, respectivamente.

Figura 37: Geração eólica no parque Umburanas e acréscimo de 10%.



Fonte: (ENGIE). Elaboração: Próprio.

No Brasil, foram gerados por energia eólica 81.632 GWh e 95.801 GWh nos anos de 2022 e 2023, respectivamente, o total gerado no país foram 677.162 GWh e 708.119 GWh nos anos de 2022 e 2023, respectivamente. Segundo dados do EPE (Empresa de Pesquisa Energética), a energia eólica no Brasil representou 12,06% e

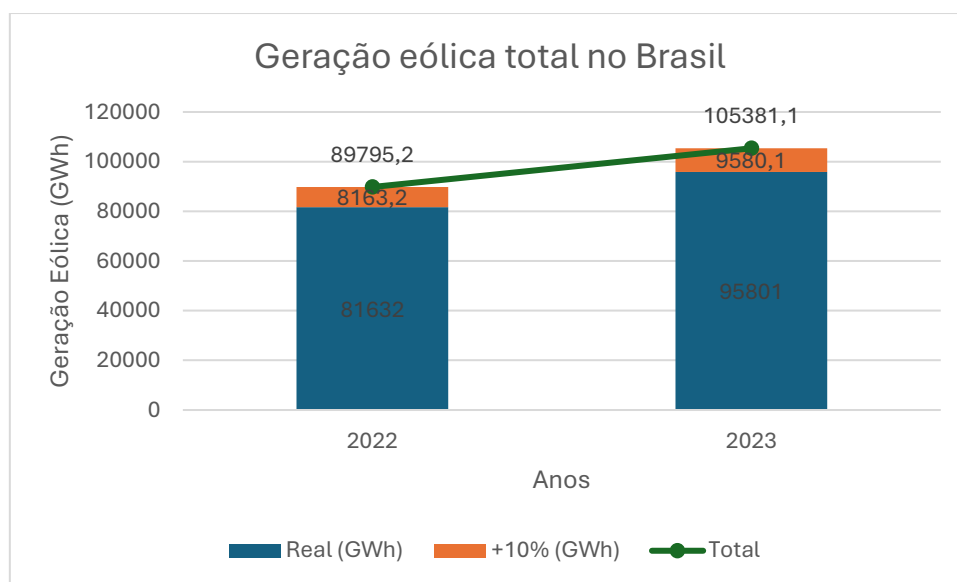
13,53% do total gerado no país nos anos de 2022 e 2023. O Conjunto Eólico de Umburanas representou 0,141% e 0,109% de toda energia eólica gerada no país e 0,017% e 0,015% de toda energia gerada no país, nos anos de 2022 e 2023, respectivamente.

Esses resultados foram atingidos mesmo considerando que durante esses dois anos muitas máquinas sofreram desgaste ao ponto que tiveram que parar. O próximo passo é calcular um cenário que a produção eólica batesse uma meta de melhoria de 10% por meio da aplicação de boas práticas tribológicas nos aerogeradores.

Caso fosse aplicado e melhorado em 10% a geração no Conjunto Eólico de Umburanas, ele teria gerado, nos anos de 2022 e 2023, 127,16 GWh e 114,84 GWh. Representando agora 0,156% e 0,120% de toda a energia eólica gerada do país e 0,019% e 0,016% de toda energia total gerada no país, nos anos de 2022 e 2023, respectivamente.

Caso houvesse um crescimento de 10% de toda energia eólica do país, agora o Brasil produziria 89.795,2 GWh e 105.381,1 GWh, representando 13,10% e 14,68% de toda a energia gerada no país nos anos de 2022 e 2023, respectivamente. Considerando então a média do valor negociado desde 2009 de todo GWh gerado, o ganho em reais seria em torno de R\$ 1,058 bilhões e R\$ 1,242 bilhões nos anos de 2022 e 2023 respectivamente.

Figura 38: Geração eólica total no Brasil e acréscimo de 10%.



Fonte: (ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico). Elaboração: Próprio.

6 CONCLUSÕES

A energia eólica possui um elevado potencial de aumento na sua participação na matriz energética global, sendo atualmente uma das fontes renováveis de maior crescimento. Seu desenvolvimento nas últimas décadas tem ocorrido de forma acelerada, impulsionado por avanços tecnológicos e pela crescente demanda por alternativas sustentáveis, resultando em mudanças significativas em um curto intervalo de tempo.

No entanto, por se tratar de uma realidade dos últimos 20 anos, os impactos desses grandes empreendimentos eólicos a longo prazo ainda não estão plenamente consolidados na literatura técnica. Diante desse contexto, o presente trabalho realizou um estudo de caso com base em relatórios de manutenção de um complexo eólico com mais de cinco anos de operação. O objetivo foi compreender o comportamento operacional de parques eólicos no médio e longo prazo, considerando aspectos de desempenho e manutenção.

O estudo de caso revelou que as manutenções periódicas nas caixas de engrenagens dos aerogeradores do parque estudado ocorrem com periodicidade semestral e anual. As intervenções semestrais demandam aproximadamente 8 horas de parada, enquanto as anuais envolvem cerca de 16 horas, totalizando cerca de 24 horas anuais de indisponibilidade por turbina. Já as paradas não periódicas são imprevisíveis, acionadas por anomalias detectadas pelos sensores de vibração e confirmadas por boroscopia.

Quanto à confiabilidade dos equipamentos, observou-se que a maioria das caixas de engrenagens conseguem durar cerca de cinco anos sem apresentar falhas graves. Contudo, houve casos significativos de falha prematura: várias unidades falharam por volta do 3º ao 4º ano de operação, em alguns casos isoladas ocorreram quebras ainda no primeiro ano. Quando identificada uma falha grave na caixa, a substituição completa do equipamento leva em média de 1 a 2 meses para ser concluída. Esses resultados permitem aos gestores estimar o tempo de reparo e dimensionar estoques de peças sobressalentes, ou, no caso de peças de alto custo, planos de contingência de modo a minimizar os impactos das paradas.

Nos casos de falhas prematuras observados, foi encontrado um padrão tribológico típico: foram identificados desgaste por abrasão, *pitting* e formação de trincas nos dentes das engrenagens, além de danos por desgaste nos rolamentos. Em pelo menos dois casos documentados, as inspeções borescópicas registraram *micropitting* e pontos iniciais de *pitting*. Esses danos, quando agravados, evoluem para *spalling* e fraturas de dente por fadiga. Constatou-se ainda que, sempre que havia dano visível em alguma

engrenagem, o teste de detritos magnéticos no óleo revelou limalhas acumuladas, indicando desgaste ativo.

Como causas principais dos danos destacam-se defeitos no processo de fabricação, como inclusões não metálicas no aço, e condições operacionais adversas: degradação do lubrificante e esforços mecânicos excessivos devido a desalinhamentos de componentes do aerogerador. As inclusões no material, por exemplo, foram diretamente associadas às fraturas de dentes observadas em relatórios de falha. Para mitigar esses problemas, as práticas de manutenção seguem um protocolo rígido: verificam-se periodicamente nível e coloração do óleo e substituem-se filtros de óleo e umidade; realiza-se inspeção visual de componentes críticos como bombas, trocador de calor, ventiladores, entre outros, e, em caso de anomalias detectadas por vibração ou boroscopia, efetua-se a troca da caixa comprometida.

O diagnóstico pós-falha confirmou que os casos mais críticos foram pontuais e decorrentes de falhas de controle de qualidade na fabricação das engrenagens. A análise identificou contaminação do aço por inclusões não metálicas (INM) que fragilizaram os dentes, levando às fissuras e fraturas. Em resposta, o fabricante implementou melhorias de controle de qualidade no processo de fundição e inspeções mais rigorosas, além de reforçar os sistemas de monitoramento de condição para detecção precoce de padrões de falha nas engrenagens.

Em termos de utilidade prática, os resultados obtidos fornecem subsídios diretos às equipes de implantação e manutenção de parques eólicos. Saber que cada manutenção periódica implica em 8–16 horas de parada e que a substituição de caixa pode demandar até dois meses auxilia no planejamento operacional e na previsão de custos. Além disso, a quantificação dos danos por abrasão, *pitting* e trincas, bem como suas causas, orienta melhorias no controle de qualidade dos componentes e na calibragem de sistemas de alinhamento. Finalmente, a estimativa das perdas de geração associadas às paradas oferece um parâmetro financeiro para justificar ações preventivas e otimizar a estratégia de manutenção.

Em uma análise estendida, constata-se que, sob o ponto de vista financeiro, é mais vantajoso direcionar esforços e recursos para estratégias que prolonguem a vida útil dos componentes dos aerogeradores, reduzindo a frequência de substituições e o tempo de indisponibilidade das unidades geradoras. Em suma, o levantamento de dados reais deste estudo reforça a confiabilidade projetada dos aerogeradores ao mesmo tempo em

que aponta pontos críticos a serem controlados, contribuindo de forma prática para a operação eficiente dos parques eólicos.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Cabe aqui a sugestão de alguns possíveis trabalhos futuros a partir dos resultados obtidos por este:

- Desenvolvimento da Nitretação via plasma de engrenagens de aerogeradores, com o objetivo de aumentar a resistência ao desgaste via *pitting*.
- Estudo aprofundado da perda financeira por inutilização de componentes de aerogeradores.
- Estudo de lubrificantes que contribuam para a melhoria das condições que reduzam resistência dos dentes de engrenagens de aerogeradores.
- Desenvolvimento de técnicas de controle de qualidade específicas para a fabricação de componentes de aerogeradores.
- Análise de falhas das engrenagens inutilizadas, para identificar os mecanismos e as causas-raiz, visando estabelecer procedimentos de inspeção e critérios de aceitação no recebimento das engrenagens.

8 REFERÊNCIAS

- BASSANI, R.; PICCIGALLO, B. **Hydrostatic Lubrication**. Elsevier, 1992.
- BECKHAM, M. Gear failure Analysis. **TLT Webinars**, April 2019. 24-32.
- BEZERRA, F. D. Energia Eólica. **Caderno Setorial ETENE**, Maio 2023.
- BLAU, P. Friction (Concepts). In: WANG, Q.; CHUNG, Y. **Encyclopedia of Tribology**. 1º. ed. Springer, 2013. p. 1284–1285.
- BOIADJIEV, I.; WITZIG, J.; TOBIE, T.; STAHL K. **Tooth Flank Fracture – Basic Principles and Calculation Model for a Sub-Surface-Initiated Fatigue Failure Mode of Case-Hardened Gears**. 2015.
- BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook**. John Wiley & Sons, 2001.
- CANDIOTTO, D. F. **Inferência do Desempenho da Manutenção de Aerogeradores Utilizando Dados de Operação**. 2016.
- DALCIN, R.; MENEZES, V.; OLIVEIRA, L.; SILVA, C. Improvement on pitting wear resistance of gears by controlled forging and plasma nitriding. **Journal of Materials Research and Technology**, 1 Maio 2022. 4698-4713.
- DONG, W.; XING, Y.; MOAN, T.; GAO, Z. Time domain-based gear contact fatigue analysis of a wind turbine drivetrain under dynamic conditions. **International Journal of Fatigue**, Março 2013. 133-146.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese 2024**. Balanço Energético Nacional (BEN). p. 71. 2024.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**. 2023.
- ENGIE. Conjunto Eólico Umburanas. **ENGIE**. Disponível em: <<https://www.engie.com.br/usinas/conjunto-eolico-umburanas/>>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- ERDEMIR, A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. **Tribology International**, 2005. 249–256.
- ERRICHELLO, R. **Application Requirements for Wind Turbine Gearboxes**. Albany, California. 1994.
- ERRICHELLO, R. How to analyze gear failures. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, January 2002. 8-16.

ERRICHELLO, R. Gear Bending Fatigue Failure and Bending Life Analysis. In: WANG, Q.; CHUNG, Y.-W. **Encyclopedia of Tribology**. 1ª. ed. Boston: Springer, 2013. p. 1467–1468.

ERRICHELLO, R. Gear Sliding. In: WANG, Q. J.; CHUNG, Y.-W. **Encyclopedia of Tribology**. 1ª. ed. Boston: Springer, 2013. p. 1520–1523.

FERNANDES, P. J. L.; MCDULING, C. Surface contact fatigue failures in gears. **Engineering Failure Analysis**, June 1997. 99-107.

FRACTTAL. O que é a Manutenção Baseada em Condição? **Guia de Manutenção**, 17 Julho 2024. Disponível em: <<https://www.fracttal.com/pt-br/guias-manutencao/o-que-e-manutencao-baseada-em-condicao>>.

GIRSANG, I.; DHUPIA, J.; MULJADI, E.; SINGH, M.; PAO, L. **Gearbox and Drivetrain Models to Study of Dynamic Effects of Modern Wind Turbines**. NREL - National Renewable Energy. EUA, p. 1-11. 2014.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY CONCIL. Global Wind Report 2023, 27 Março 2023. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/03/GWR-2023_interactive.pdf>.

HAN, Q.; WEI, J.; HAN, Q.; ZHANG, H. **Dynamics and Vibration Analyses of Gearbox in Wind Turbine**. 1ª. ed. Springer, 2017.

HENRIKSEN, M.; JENSEN, B. B. Induction generators for direct-drive wind turbines. **IEEE International**, 2011. 1-6.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, 2012. 221–234.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, 2017. 263–284.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity Market Report 2023**. Paris: IEA, 2023. Acesso em: 31 dezembro 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>.

IRANI, B. M. S. A. **Terotecnologia em Manutenção – Aumento da Confiabilidade e Facilitação da Intervenção dos Mantenedores (Manutenibilidade), Para Futuras Máquinas e Equipamentos**. 2011.

JELASKA, D. **Gear and Gear Drives**. John Wiley & Sons Ltd, 2012.

KAHRAMAN, A.; LI, S. Friction in Gears. In: WANG, Q.; CHUNG, Y.-W. **Encyclopedia of Tribology**. 1ª. ed. Boston: Springer, 2013. p. 1315–1322.

KUBOTA, M. **Report by the committee on tribology standardization**. 1982.

LI, H. Gearbox of Wind Turbine. In: HU, W. **Advanced Wind Turbine Technology**. Springer, Cham, 2018. p. 59-118.

LIANG, X.-H.; LIU, Z.-L.; PAN, J.; ZUO, M. Spur Gear Tooth Pitting Propagation Assessment Using Model-based Analysis. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 8 November 2017. 1369–1382.

MANWELL, J.; MCGOWAN, J.; ROGERS, A. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. John Wiley & Sons, 2009.

MORTIER, R. M.; ORSZULIK, S. T. **Chemistry and Technology of Lubricants**. Springer, 2012.

NIVEDH, B. **Major Failures in the Wind Turbine components and the Importance of Periodic Inspection**. Índia. 2014.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Resultado da Operação - Histórico da Operação. **ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acesso em: 20 jun. 2024.

OYAGUE, F. **Gearbox Modeling and Load Simulation of a Baseline 750-kW Wind Turbine Using State-of-the Art Simulation Codes**. NREL - National Renewable Energy Laboratory. EUA, p. 94. 2009.

OYAGUE, F. **Gearbox Modeling and Load Simulation of a Baseline 750-kW Wind Turbine Using State-of-the Art Simulation Codes**. NREL - National Renewable Energy Laboratory. EUA, p. 94. 2009.

PAINEL de Preços: CCEE. **Site da CCEE**, 16 Julho 2024. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/precos/painel-precos>>.

PINKUS, O.; WILCOCK, D. F. **Strategy for energy conservation through tribology**. New York: 1977.

SHANDRO, R.; PATTE, C.; VADNAL, A. From failure analysis to power transmission design. In: VELEX, P. **International Gear Conference 2014: 26th–28th August 2014**. Lyon: 2014. p. 200.

SILVA, A. B. F. D. **Manutenção de turbinas eólicas: levantamento e análise da incidência de falhas nos seus subsistemas**. 2017.

SLOGÉN, M. **Contact Mechanics in Gears: A Computer-Aided Approach for Analyzing Contacts in Spur and Helical Gears**. Master's Thesis in Product Development, Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden, p. 118. 2013.

STUDT, P. Boundary lubrication : adsorption of oil additives on steel and cerami surfaces and its influence on friction and wear. **Tribology International**, 1989. 111-119.

TIPEI, N. **Theory of Lubrication**. London: 1962.

TOLMASQUIM, M.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz energética Brasileira: Uma prospectiva**. Novos Estudos - CEBRAP, 2007.

TORBACKE, M.; RUDOLPHI, Ã. K.; ELISABET, K. **Lubricants: Introduction to Properties and Performance**. John Wiley & Sons, 2014.

VULLO, V. **Gears: Analysis of Load Carrying Capacity and Strength Design**. 1ª. ed. Springer, v. II, 2020.

WONG, V. W.; TUNG, S. C. Overview of automotive engine friction and reduction trends—Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. **Friction**, 2016. 1–28.