



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Análise de Falhas em Caixa Multiplicadora de
Aerogeradores usando Transformada Wavelet
Contínua**

ALEXANDRE AUGUSTO SOUZA MEDEIROS
NATAL- RN, 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise de Falhas em Caixa Multiplicadora de Aerogeradores usando Transformada Wavelet Contínua

ALEXANDRE AUGUSTO SOUZA MEDEIROS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**, orientado pelo Prof. Dr. José Josemar de Oliveira Júnior.

NATAL - RN

2019

Análise de Falhas em Caixa Multiplicadora de Aerogeradores usando Transformada Wavelet Contínua

ALEXANDRE AUGUSTO SOUZA MEDEIROS

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Banca Examinadora da Dissertação

Prof. Dr. José Josemar de Oliveira Júnior _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dra. Salete Alves Martins _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Avaliadora Interna

Prof. Dr. Wallace Moreira Bessa _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dra. Suzete Elida Nobrega Correia _____

Instituto Federal da Paraíba - Avaliadora Externa

NATAL, 20 de dezembro de 2019.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Medeiros, Alexandre Augusto Souza.

Análise de falhas em caixa multiplicadora de aerogeradores usando transformada wavelet contínua / Alexandre Augusto Souza Medeiros. - 2020.

101f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, 2020.

Orientador: Dr. José Josemar de Oliveira Júnior.

1. Aerogeradores - Dissertação. 2. Manutenção Preditiva - Dissertação. 3. Análise de Vibração - Dissertação. 4. Wavelet - Dissertação. I. Oliveira Júnior, José Josemar de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621

Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, em poder me direcionar pelo caminho do sucesso. Aos meus pais, Maria Alzerina e Márcio Augusto por me proporcionar este momento. A minha esposa Saszla, ao meu filho Luiz Miguel. E aos amigos pelo incentivo e pela assistência de contribuir para o meu desenvolvimento acadêmico.

Agradecimentos

Faço, primeiramente, um agradecimento a Deus por ter dado saúde e força para superar as dificuldades encontradas neste caminho e por todos os momentos que concedeu em minha vida.

Agradeço ao meu orientador José Josemar de Oliveira Júnior pelo apoio, paciência, confiança e dedicação na elaboração deste trabalho. À minha Coorientadora Salete Martins Alves que apesar de suas atribuições disponibilizou parte do seu tempo para correções e incentivos ao meu trabalho.

Agradeço a todos os professores por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas, por terem me feito apreender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados, aos quais sem nominar, terão os meus eternos agradecimentos.

Agradeço aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. À minha mãe Maria Alzerina, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Ao meu pai, Marcio Bezerra que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e que para mim foi muito importante. À minha esposa Saszla, que nos momentos de minha ausência, dedicados ao estudo, sempre entendeu que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Meus agradecimentos, aos amigos Antônio Paulino, Adalberto Moreira, Daniel Mousinho, Gustavo Fernandes, Erijânio, Francisco Maia e Lenine e aos demais companheiros de trabalho do Laboratório de Tribologia da UFRN, que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presente em minha vida com certeza.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Medeiros, A.A.S. **Análise de Falhas em Caixa Multiplicadora de Aerogeradores usando Transformada Wavelet Contínua**. 2019. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

Resumo

A energia eólica é uma das principais fontes de energia limpa da atualidade, se destacando na área de energias renováveis. Para tornar a energia eólica mais competitiva com outras fontes, características como disponibilidade, confiabilidade e vida útil das turbinas precisam ser melhoradas, portanto, a redução dos custos de inspeção e manutenção é vital para manter a competitividade desta indústria. A manutenção aplicada às turbinas eólicas implica custos elevados e longos períodos sem produção de energia. Um dos principais elementos sujeito a falhas é a caixa multiplicadora, que por falta de lubrificação ou contaminação, fazem com que o atrito do contato direto entre os dentes na transmissão de energia e velocidade, resulte em desgaste e cause perda de material. A análise dos sinais de vibração e do óleo são frequentemente utilizadas na manutenção preditiva para o diagnóstico de falhas em componentes mecânicos, pois contêm informações das condições de seus elementos. Os sinais de vibração de uma caixa multiplicadora geralmente têm muito ruído tornando difícil a extração de informações dos componentes do sinal, especialmente em situações práticas. Uma das soluções para este problema é a aplicação de técnicas de processamento de sinais para facilitar a obtenção de informações. A presente dissertação objetivou aplicar a Transformada Wavelet Contínua (do inglês Continuous Wavelet Transform - CWT), para a extração de características e posterior diagnóstico do desgaste em engrenagens, através de sinais obtidos em uma bancada experimental desenvolvida, a qual consiste em um motor acoplado aos pares de engrenagem. A análise do óleo e a microscopia óptica foram usadas para monitoramento da temperatura e composição do óleo, bem como o tipo de desgaste ocorrido no flanco do dente. A CWT se mostrou eficaz na análise do sinal de vibração indicando a presença de desgastes por fadiga de contato (*scuffing e pitting*), o que foi corroborado pela análise de óleo e microscopia.

Palavras-chave: Aerogeradores, Manutenção Preditiva, Análise de Vibração, Wavelet.

Medeiros, A.A.S. **Fault Analysis in Gear Box of Wind Turbines Using Wavelet Transform**. 2019. Master's Dissertation in Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande of Norte, Natal-RN, 2019.

Abstract

Wind power is one of the oldest-exploited energy sources by humans and today is the most seasoned and efficient energy of all renewable energies. To make wind power more competitive with other sources, characteristics as availability, reliability and the life of turbines will all need to be improved. Therefore, reducing inspection and maintenance costs is vital to maintaining the competitiveness of this industry. The maintenance applied to wind turbines implies high costs and long periods without energy production. Vibration and oil signal analysis are frequently used in predictive maintenance for diagnosing mechanical component failures as they contain information about the condition of their components. Vibration signals from a gearbox are often noisy, making it difficult to extract information from signal components, especially in practical situations. One of the solutions to this problem is the application of signal processing techniques to make getting information easier. The present thesis aimed to apply the Continuous Wavelet Transform – CWT, in the extraction of characteristics and subsequent diagnosis of wear on gears. In this way, signals obtained in a developed experimental bench, which consists of a motor coupled in pairs of gear. Oil analysis and optical microscopy were used to monitor oil temperature and its composition, as well as the type of wear that occurred on the tooth flank. The CWT proved to be effective in the analysis of the vibration signal indicating the presence of wear due to contact fatigue (*scuffing* and *pitting*), which was corroborated by the analysis of oil and microscopy.

Keywords: Wind Turbines, Predictive Maintenance, Vibration Analysis, Wavelet.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Velocidade média anual dos ventos a 50m de altura.....	19
Figura 2 - Taxa da ocorrência de falhas nos principais componentes dos aerogeradores.....	20
Figura 3 - Frequência de falhas <i>versus</i> Tempo de parada por falha.....	21
Figura 4 - Esquema de uma turbina eólica moderna.....	25
Figura 5 - Nomenclatura básica para engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	28
Figura 6 - Desgaste Adesivo.....	30
Figura 7 - Desgaste Abrasivo.....	31
Figura 8 - Desgaste Químico.....	32
Figura 9 - Desgaste por Fadiga.....	33
Figura 10 - Desgaste do tipo <i>scuffing</i>	34
Figura 11 - <i>Micropitting</i>	36
Figura 12 - Fenômeno de <i>Pitting</i> na face do dente da engrenagem.....	38
Figura 13 - Ilustração esquemática dos fenômenos <i>pitting</i> e <i>spalling</i>	40
Figura 14 - <i>Spalling</i> nos dentes da engrenagem.....	41
Figura 15 - Fluxograma geral da manutenção.....	42
Figura 16 - Representação da Transformada de Fourier.....	47
Figura 17 - Representação da STFT.....	48
Figura 18 -Tipos de “Wavelet Mãe” (Ψ).....	50
Figura 19 -Representação da Transformada Wavelet.....	51
Figura 20 - Processo de obtenção dos coeficientes da Transformada Wavelet Discreta.....	55

Figura 21 -Esquema da bancada.	58
Figura 22 - Bancada de ensaio utilizada nos experimentos.	59
Figura 23 - Caixa multiplicadora com o par engrenado.	60
Figura 24 - Placa de aquisição NI 9207 com os módulos 9234 e 9211.	62
Figura 25 - Acelerômetro triaxial da Brüel Kjaer 4520.	62
Figura 26 - Microscopia Óptica dos processos de desgaste do perfil do dente.	64
Figura 27 - Esquema do posicionamento do Acelerômetro.	65
Figura 28 - Microscopia Óptica da Engrenagem Boa.	68
Figura 29 - Microscopia Óptica da Engrenagem Defeituosa.	69
Figura 30 - Temperatura do óleo nas diferentes condições.	71
Figura 31 - Espectros das vibrações por FTIR do lubrificante para a engrenagem boa.	74
Figura 32 - Espectros das vibrações por FTIR do lubrificante para a engrenagem defeituosa.	75
Figura 33 - Espectros das vibrações por FTIR do lubrificante para a engrenagem quebrada.	76
Figura 34 - Posicionamento dos eixos em relação ao sensor.	77
Figura 35 - Sinais de vibração da engrenagem boa.	78
Figura 36 - Sinais de vibração da engrenagem defeituosa.	79
Figura 37 - Sinais de vibração da engrenagem quebrada.	80
Figura 38 - Espectro de Frequência do Sinal.	81
Figura 39 - Espectro da CWT para Engrenagem Boa de 1h a 40h.	82
Figura 40 - Espectro da CWT para Engrenagem Defeituosa de 1h a 40h.	84

Figura 41 - Espectro da CWT da Engrenagem Quebrada de 01h a 08h.....86

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do par engrenado.....	60
Tabela 2 – Propriedades Físico-químicas do Renolin Unisyn CLP 320.	61
Tabela 3 – Composições encontradas no óleo sintético por tempo de ensaio.....	73

Lista de abreviaturas e siglas

GWEC - Conselho Global de Energia Eólica

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

O&M – Operação e Manutenção

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas

RTF – Run to Failure

CSM – Sistemas de Monitoramento das Condições

FT – Transformada de Fourier

FFT – Transformada Rápida de Fourier

STFT – Transformada de Fourier de Curta Duração

WT – Transformada Wavelet

CWT – Transformada Wavelet Continua

SHM - Monitoramento da Saúde Estrutural

DWT – Transformada Wavelet Discreta

HWT - Transformada Wavelet Harmonic

EWT - Transformada Wavelet Empírica

NTI – Núcleo de Tecnologia Industrial

PAO - Poli-Alfa-Olefina

NI – National Instruments

PET - PoliTereftalato de Etila

XRF - Fluorescência de Raio-X

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

LAMMEN - Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação
Numérica

ECT – Escola de Ciências e Tecnologia

GMF – Frequencia de Engrenamento

Sumário

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	18
1.1 Considerações Iniciais	18
1.2 Objetivo Geral	23
1.2.1 Objetivos Específicos	23
1.3 Organização da Dissertação	23
CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 Funcionamento dos Aerogeradores	25
2.2 Engrenagens	27
2.2.1 Frequência de Engrenamento	29
2.3 Mecanismos de Desgaste	29
2.3.1 Desgaste Adesivo	30
2.3.2 Desgaste Abrasivo	31
2.3.3 Desgaste Químico	31
2.3.4 Desgaste por Fadiga	32
2.4 Desgastes específicos em dentes de engrenagens	33
2.4.1 Scuffing	33
2.4.2 Micropitting	35
2.4.3 Pitting	37
2.4.4 Spalling	39
2.5 Manutenção dos Aerogeradores	41
2.5.1 Teoria da Manutenção	41
2.5.1.1 Manutenção corretiva	42
2.5.1.2 Manutenção preventiva	42
2.5.1.3 Manutenção preditiva	43
CAPÍTULO 3: ANÁLISE DE SINAIS COMO FERRAMENTA PARA A MANUTENÇÃO PREDITIVA	45

3.1	Introdução.....	45
3.2	Técnicas de Processamento de Sinais.....	46
3.2.1	Transformada de Fourier.....	46
3.2.2	Transformada Wavelet Contínua.....	49
3.2.3	Transformada Wavelet Discreta.....	54
	CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1	Bancada Experimental.....	58
4.1.1	Medição de Vibração, Temperatura e Pressão Sonora.....	61
4.2	Procedimento Experimental.....	63
4.2.1	Processamento de Sinais.....	65
4.2.2	Análise do Óleo Lubrificante.....	66
4.2.2.1	Fluorescência de Raio-X (XRF).....	66
4.2.2.2	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - (FTIR).....	67
	CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1	Microscopia Óptica.....	68
5.2	Análise do Óleo Lubrificante.....	71
5.2.1	Temperatura do Óleo.....	71
5.2.2	Fluorescência de Raios - (XRF).....	72
5.2.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - (FTIR).....	73
5.3	Análise de Vibração.....	76
5.3.1	Domínio do Tempo.....	76
5.3.2	Domínio da Frequência.....	80
5.3.2.1	Frequência de Engrenamento.....	80
5.3.3	Análise Wavelet: Condição 1.....	81
5.3.4	Análise Wavelet: Condição 2.....	84

5.3.5 Análise Wavelet: Condição 3.....	86
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES.....	88
6.1 Trabalhos Futuros.....	90
CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS.....	91

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

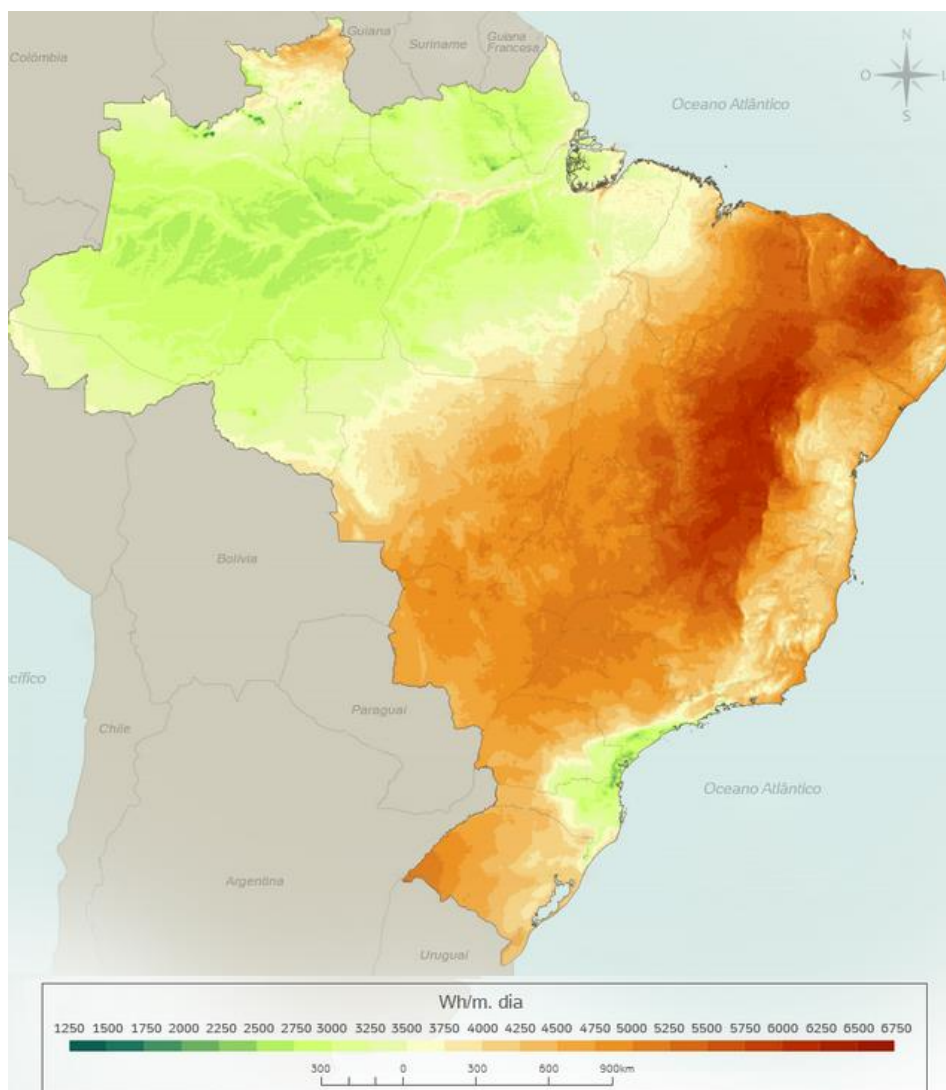
1.1 Considerações Iniciais

A questão energética é um dos grandes temas de debate mundial, seja pelo consumo dos recursos naturais, pelas mudanças climáticas, ou principalmente, devido a segurança energética dos países mais ricos. Esses impactos fizeram com que governos, indústrias e demais setores da sociedade voltassem suas atenções e investimentos para fontes de energia alternativas. Dessa forma, o uso de fontes de energia renováveis está sendo bastante explorado, em especial o proveniente de energia hidráulica, solar e eólica. A energia eólica tem sido amplamente utilizada no mundo por representar uma tecnologia de geração de energia elétrica renovável, competitiva e confiável. A causa disto é sua relação custo-benefício e sua tecnologia avançada, tornando sua expansão um extrato da diversificação da matriz de energia elétrica mundial, a fim de torná-la mais limpa, diminuindo os problemas ambientais e mais segura (RAMPINELLI & ROSA JUNIOR, 2013).

Segundo o *Global Wind Energy Council* (GWEC) em 2018 foram instalados cerca de 51,3 GW - uma queda de 4,0% em relação ao ano de 2017 (52,5 GW), porém totalizando 591 GW de capacidade instalada total (um crescimento de 9% em relação a 2017). As novas instalações no mercado eólico na terra (*onshore*) alcançaram 46,8 GW e o mercado no mar (*offshore*) instalou 4,5 GW, elevando a participação no mercado global para 8%. A China domina o mercado *onshore* instalando 21,2 GW em 2018 e é o mercado líder desde 2008, com 206 GW de instalações totais. O segundo maior mercado em 2018 foram os EUA, com 7,6 GW de novas instalações em terra e total de 96 GW. Além da China e dos EUA, os cinco principais mercados eólicos em 2018 foram concluídos pela Alemanha (2,4 GW), Índia (2,2 GW) e Brasil (1,9 GW).

A energia eólica despertou significativa atenção, principalmente na costa nordestina brasileira. Conforme Alves (2010) a região Nordeste é considerada uma das áreas com melhor potencial para a energia eólica no Brasil, pois apresentam excelentes condições climáticas, como: velocidade do vento alta e constante em alturas até 50 m durante os dias do ano, como pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Velocidade média anual dos ventos a 50m de altura.



Fonte: IBGE 2014.

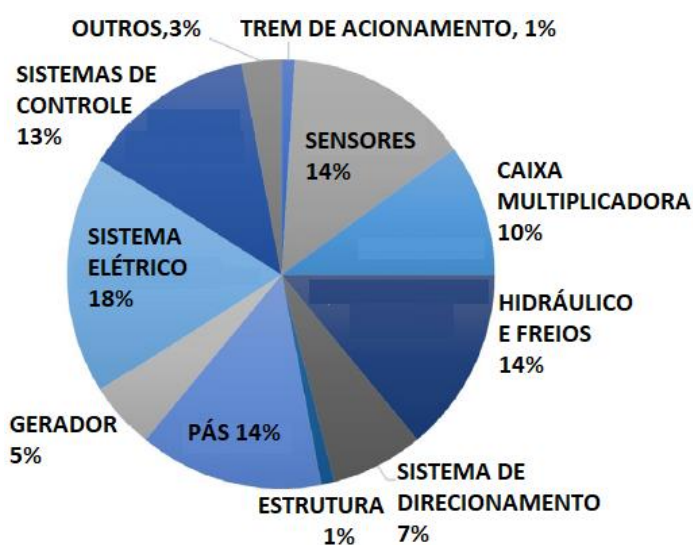
O segmento eólico é dividido em três grandes categorias. A primeira categoria se refere ao desenvolvimento tecnológico, incluem P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) e fabricação de equipamentos. A segunda categoria trata da instalação e concessão de usinas, e incluem planejamento, gestão de projetos, transporte e construção de usinas. A terceira categoria é a de operação e manutenção (O&M), e inclui, além dos próprios serviços de O&M da usina, a geração e distribuição de energia. O mercado global de O&M para energia eólica deverá crescer de US\$ 12 bilhões em 2016 para mais de US\$ 27 bilhões até 2026 (MAKE CONSULTING, 2017c). Esses custos estão relacionados às dificuldades de alcançar a turbina

dependendo da localização, o custo de peças de reposição e manutenção, entre outros fatores.

Com um papel tão grande, surgem desafios importantes em relação à confiabilidade, relação custo-benefício e segurança energética. Para enfrentar os desafios gerados pela energia das turbinas eólicas, pesquisadores voltaram sua atenção para as condições de monitoramento e a manutenção preditiva, a fim de reduzir os custos operacionais e o tempo de inatividade das turbinas eólicas (SALAMEH et al. 2018). As falhas das turbinas eólicas durante a última década diminuiriam gradualmente, considerando o objetivo de reduzir os custos de operação e manutenção.

As turbinas eólicas são formadas por uma combinação de vários sistemas complexos totalmente conectados (cubo, eixo de acionamento, caixa de engrenagens, gerador, sistema de guinada, acionamento elétrico, etc.). Além disso, esses sistemas suportam mudanças aleatórias nas condições climáticas, temperatura, cisalhamento, velocidade e carga do vento, na terra e ainda mais no mar. Com a diversidade de peças, bem como quantidade, presentes nos sistemas das turbinas eólicas, as falhas podem ocorrer em qualquer um dos componentes, causando o fim da operação ou danos a outros componentes. As taxas de falha relatadas de diferentes componentes do sistema são mostradas na Figura 2 (HAHN, DURSTEWITZ, ROHRIG, 2007).

Figura 2 - Taxa da ocorrência de falhas nos principais componentes dos aerogeradores.

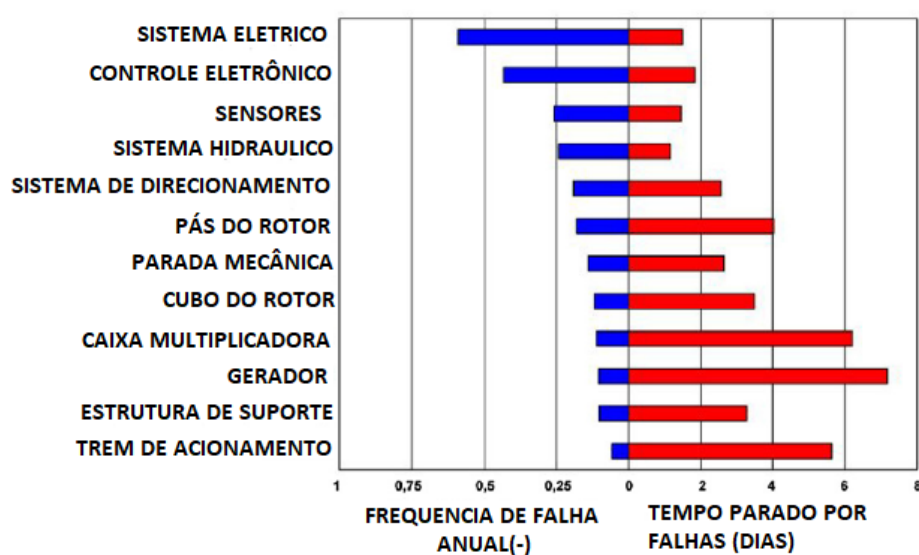


Fonte: (SALAMEH et al. 2018) (Adaptada).

Os diversos sistemas presentes nos aerogeradores estão propensos a falhas. No entanto, o foco dos fabricantes está voltado para os componentes que causam o maior custo de reparo, bem como maior tempo de inatividade para manutenção. A Figura 3, mostra o tempo de inatividade causado pela falha do componente. As caixas multiplicadoras de velocidade ficam em segundo lugar no tempo de inatividade por falha, devido seu grande porte e vínculo com outros componentes, dificultando o acesso, o reparo ou até mesmo a substituição (SPINATO et al. 2009). A caixa de engrenagens é um dos componentes decisivos no sistema de transmissão, pois apresenta o maior tempo de inatividade e falhas inesperadas (VAMSI, SABAREESH E PENUMAKALA, 2019). Por essas razões, o monitoramento da condição de funcionamento da caixa é importante para reduzir falhas e assegurar a continuidade das operações, garantindo tempos maiores de geração de energia e menores prejuízos.

As caixas multiplicadoras operam sob condições ambientais adversas, suportando todas as vibrações causadas pelos componentes do lado da turbina e pelo vento, além de todas as flutuações impostas pela carga através do gerador (SALAMEH et al. 2018). As principais falhas que podem ocorrer na caixa de engrenagens são: rachaduras nos dentes, no eixo interno, mancais, anel de engrenagem, engrenagem de dentes retos e helicoidal e baixa lubrificação.

Figura 3 - Frequência de falhas *versus* Tempo de parada por falha.



Fonte: (SALAMEH et al. 2018) (Adaptada).

A manutenção moderna busca o diagnóstico preventivo e correto da falha, definindo a condição do sistema, a localização, forma e motivo da formação do dano. No campo do diagnóstico de falhas mecânicas, a análise de sinais é utilizada para caracterizar falhas nas engrenagens e rolamentos, que são os principais componentes da caixa multiplicadora. Os sinais de vibração são usualmente utilizados para identificar falhas em qualquer componente. Entretanto, a análise no tempo, normalmente, esconde informações relevantes sobre o sinal, geralmente devido a ruídos externos. Desse modo, a informação útil está mascarada de tal forma que é difícil estabelecer a condição para que uma conclusão possa ser tomada.

Como uma forma de extrair características de um sistema dinâmico temporal, de modo não invasivo, os sensores e as ferramentas computacionais estão sendo amplamente aplicados, por meio da aquisição e processamento de dados, tornando possível à identificação de falhas, antes da ocorrência, caracterizando assim uma manutenção preditiva. Os sinais de vibração, emissão acústica, força e temperatura que atuam nos contatos são utilizados como fonte de dados para o monitoramento das condições de operação de máquinas e de equipamentos de fabricação mecânica. Saruhan *et al.* (2014) e Boudiaf *et al.* (2016) concluíram que num sistema dinâmico, os sinais de vibração são amplamente utilizados, pois contém muitas informações que podem refletir em características e comportamentos do sistema.

Para contribuir na melhoria do conhecimento acerca da análise de vibrações em caixas multiplicadoras, será aplicada a transformada Wavelet Contínua, para caracterização de vibrações em engrenagens pertencentes a uma caixa multiplicadora em diferentes estados de funcionamento, de modo a identificar as falhas e assim indicar o melhor momento para a sua manutenção.

Esta tese está estruturada na sua Introdução, objetivos a serem alcançados, revisão da literatura, materiais e métodos aplicados, resultados e discussão e conclusões.

1.2 Objetivo Geral

Analisar e detectar defeitos nos dentes da engrenagem da caixa multiplicadora de um aerogerador, através de protótipo elaborado em laboratório, com a introdução de defeitos característicos, focando na manutenção preditiva, por meio da análise dos sinais de vibração utilizando a transformada wavelet contínua.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Produzir uma bancada que simule parte da caixa multiplicadora de um aerogerador.
- Analisar os sinais de vibração do sistema, com a rotação de funcionamento próxima a de uma turbina eólica, verificando se os resultados são satisfatórios.
- Identificar o problema e os danos de uma engrenagem através dos sinais obtidos.
- Realizar um monitoramento da frequência de engrenamento para antecipar as falhas no sistema de transmissão.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação contempla assuntos que relacionam a aplicação da técnica de processamento de sinais associada aos sinais de vibração na identificação de desgaste.

Durante o trabalho, serão apresentadas as diferentes ferramentas e algumas novas possibilidades de interpretação dos dados gerados. Ou seja, além da transformada de Fourier e Wavelet, serão apresentados outros índices e informações que podem ser utilizadas na investigação dos sinais.

O trabalho se subdividirá em 6 capítulos como segue abaixo:

No primeiro capítulo, será feita a introdução à necessidade do estudo sobre a energia eólica, seu avanço mundial, custos e manutenção, como motivação.

No capítulo dois, será a revisão sobre o funcionamento dos aerogeradores, suas partes mecânicas e desgastes envolvidos na caixa multiplicadora, bem como a manutenção aplicada.

No terceiro capítulo, será feita uma revisão das técnicas de processamento de sinais, como funcionam e como podem ser aplicadas. Serão apresentados trabalhos importantes tidos como referência no estudo e aplicação da técnica de wavelets.

No capítulo quatro serão abordadas as decisões tomadas para a montagem da bancada, o método de coleta de dados de vibração e amostras de óleo, as técnicas de análise de óleo, os procedimentos computacionais de tratamentos de sinais, entre outros.

No quinto capítulo, serão apresentados os resultados das simulações feitas com as engrenagens em duas etapas: a primeira, uma engrenagem em bom estado e a segunda, uma engrenagem defeituosa, gerando assim a microscopia óptica do flanco dos dentes, a temperatura do óleo e a análise espectral a partir da CWT. E a discussão para identificar as características para a avaliação do comportamento de desgaste do sistema.

No capítulo seis, será feito o fechamento e conclusão do trabalho, onde serão sintetizados os resultados e discussões para possíveis trabalhos futuros.

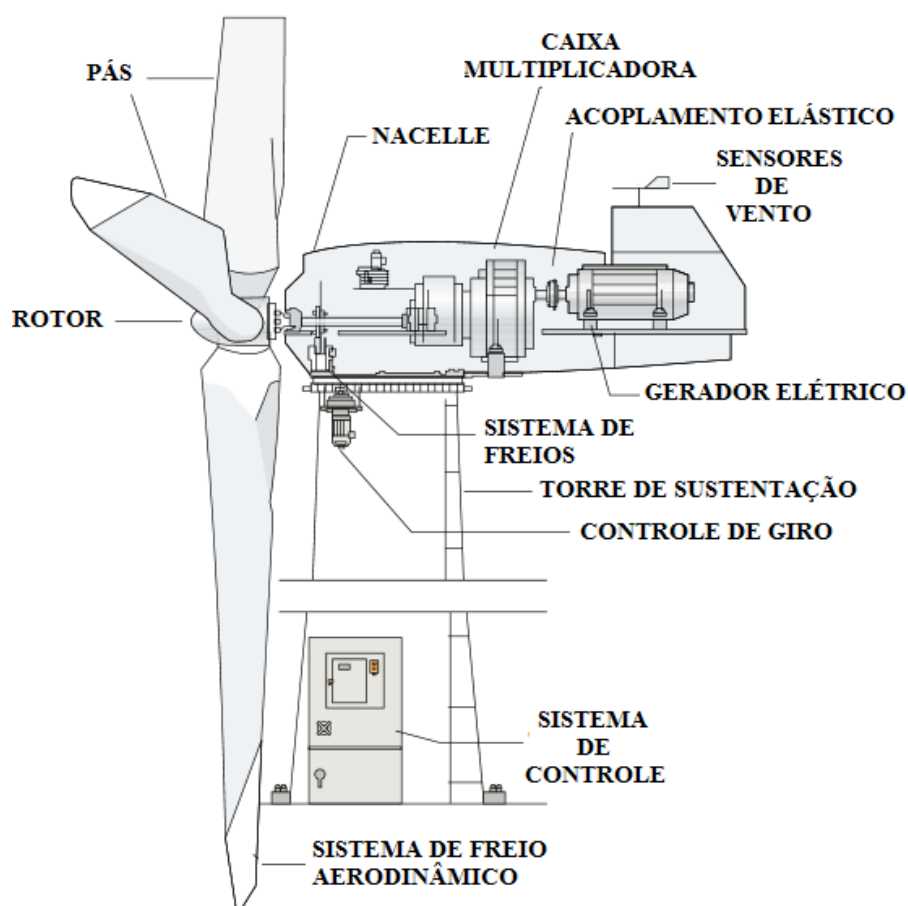
E no último capítulo são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Funcionamento dos Aerogeradores

Uma turbina eólica, também chamada de aerogerador (Figura 4) é um equipamento que converte a energia cinética do vento em energia elétrica pela rotação de suas pás. Quanto a energia cinética dos ventos, pode-se afirmar que vem sendo utilizada desde a antiguidade para a moagem de grãos. Contudo, foi após a crise dos combustíveis fósseis que se começou a buscar alternativas limpas para a geração de energia (VITORINO, 2012).

Figura 4 - Esquema de uma turbina eólica moderna.



Fonte: (CBEE/UFPE, 2000).

“As pás são os perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte da sua energia cinética em trabalho mecânico e transmitindo-a ao

cubo. Inicialmente eram fabricadas em alumínio, sendo atualmente fabricadas em poliéster e fibra de vidro reforçadas com resinas epóxi” (MAIA, 2012). Na Figura 4, observa-se o cubo ou rotor, que é uma estrutura metálica que fica à frente do aerogerador, onde é fixado as pás do rotor, constituído em aço ou liga de alta resistência. Outro item da turbina eólica é o eixo principal, que se conecta ao rotor e transfere a energia mecânica até a caixa multiplicadora de velocidades. O rotor e o eixo principal rotacionam em uma baixa velocidade, entre 15 e 60 rpm, porém com elevado torque.

A caixa multiplicadora é formada por um conjunto de engrenagens que tem a função de multiplicar a rotação de entrada, introduzida pelo eixo primário, resultando numa rotação elevadíssima em um eixo menor, o eixo secundário. O segundo eixo do rotor rotaciona entre 1000 e 3000 rpm, com um baixo torque e está acoplado ao gerador. As engrenagens de dentes retos e as helicoidais são usadas em caixas de engrenagem de aerogeradores para compor estágios de engrenagens paralelas ou estágios de engrenagens planetárias (PEETERS, 2006).

Segundo Musial *et al.* (2007) a indústria eólica tem sido continuamente alertada sobre as altas taxas de falhas que ocorrem nas caixas multiplicadoras. Devido ao alto custo para substituir uma caixa de velocidades, faz-se necessário melhorar a confiabilidade do sistema de transmissão da turbina eólica, pois as engrenagens podem estar sujeitas a condições adversas de operação, tais como: alto carregamento, operação instável/interrompido, sistema de vibração, sistema de desalinhamento e exposição a condições ambientais extremas. Estas condições não são comuns com outros tipos de máquinas e são os fatores determinantes para que ocorram as falhas (TAVNER *et al.*, 2007).

De acordo com Sequeira (2012) os rolamentos e as engrenagens das caixas multiplicadoras tendem a apresentar problemas mais prematuramente devidos a erros de projeto, manutenção ineficaz e condições climáticas. Entre outros fatores, existe a falta de conhecimentos acerca de como estes componentes se comportam no decorrer de tempestades e ventos fortes.

2.2 Engrenagens

Engrenagens são elementos rígidos utilizados na transmissão de movimentos rotativos entre eixos. Consistem basicamente em dois cilindros nos quais são fabricados os dentes e no qual a transmissão se dá através do contato entre esses dentes. Como são elementos rígidos, a transmissão deve atender a algumas características especiais, sendo que a principal é que não haja qualquer diferença de velocidade entre pontos em contato quando ocorrer a transmissão do movimento. Eventuais diferenças fariam com que houvesse perda do contato ou o travamento, quando um dente da engrenagem motora tenta transmitir velocidade além da que outro dente da mesma engrenagem em contato transmite.

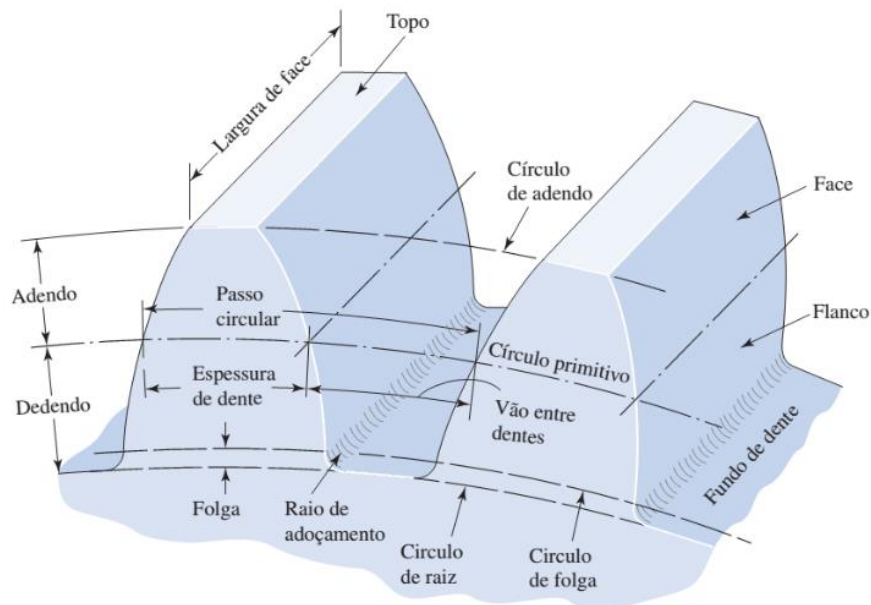
Segundo Niemann (1971) as engrenagens de dentes retos são as mais frequentemente usadas, tanto para eixos paralelos como para eixos reversos ou concorrentes, servindo para potências, rotações e relações de multiplicação, que variam desde valores mínimos até máximos. Distinguem-se pela transmissão de forças sem deslizamento (relação de multiplicação constante e independente do carregamento), pela segurança de funcionamento e pela vida útil, pela resistência às sobrecargas e pequena manutenção, pelas suas dimensões reduzidas e devido ao seu alto rendimento. Por outro lado, deve-se levar em conta o seu maior custo bem como os maiores ruídos durante o funcionamento e a transmissão relativamente rígida (eventualmente deve ser previsto um acoplamento elástico para amortecer os choques).

As engrenagens permitem aumento e diminuição de torque e velocidades, com mínimas perdas de energia. A mudança de velocidade e torção é feita na razão dos diâmetros primitivos. Aumentando a rotação, o momento torçor diminui e vice-versa. Assim, num par de engrenagens, a maior delas terá sempre rotação menor e transmitirá maior torque. O movimento dos dentes entre si processa-se de tal modo que no diâmetro primitivo não há deslizamento, havendo apenas rolamento. Nas demais partes do flanco, existem ação de deslizamento e rolamento (KODA, 2009).

A Figura 5 mostra o tipo mais comum de engrenagem, chamada de engrenagem cilíndrica de dentes retos, em inglês "*spur gear*". Também são apresentados nessa figura a nomenclatura e partes deste tipo de engrenagem. O

termo engrenagem, embora possa ser empregado para designar apenas um dos elementos, normalmente é empregado para designar a transmissão.

Figura 5 - Nomenclatura básica para engrenagens cilíndricas de dentes retos



Fonte: Elementos de Maquinas de Shigley (2016).

Uma transmissão por engrenagens é composta de dois elementos ou mais. Quando duas engrenagens estão em contato, a menor delas é chamada de pinhão e a maior é chamada de coroa. A denominação não tem relação com o fato de que um elemento é o motor e outro é o movido, mas somente com as dimensões. A relação de transmissão é um parâmetro de extrema importância em uma transmissão por engrenagens, pois representa se a transmissão será do tipo redutora ou multiplicadora. A relação de transmissão é dada pela Equação 1:

$$i = \frac{Dp_2}{Dp_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Mt_2}{Mt_1} \quad (1)$$

em que:

Dp_1 = diâmetro ou círculo primitivo da roda motora.

Dp_2 = diâmetro ou círculo primitivo da roda movida.

Z_1 = número de dentes da roda motora.

Z_2 = número de dentes da roda movida.

n_1 = rotação da engrenagem 1.

n_2 = rotação da engrenagem 2.

Mt_1 = torque do pinhão 1.

Mt_2 = torque da coroa 2.

2.2.1 Frequência de Engrenamento

Segundo Houser (1991), nos sistemas de transmissão de potência por engrenagens o nível de ruído tem sido uma preocupação constante, uma vez que o ruído característico de engrenagens é muito próximo do tom puro e possui um alto nível de pressão sonora, onde as frequências predominantes são próximas da região sensitiva do ouvido humano. Isto se justifica pelo fato da engrenagem ser um elemento rotativo onde cada par de dentes engrenado executa um movimento periódico numa dada frequência de engrenamento, a qual é definida pela Equação 2:

$$Fm = \frac{n}{60} \cdot N \quad (2)$$

Onde: Fm = Frequência de Engrenamento.

N = Número de dentes da Engrenagem.

n = rotações por minuto da Engrenagem.

Na maioria dos casos a excitação é gerada por imperfeições no contato entre os dentes do par engrenado. Estas imperfeições no contato das engrenagens resultam em forças dinâmicas nos dentes, as quais excitam vibrações nos corpos das engrenagens e nos eixos em que as engrenagens estão apoiadas.

2.3 Mecanismos de Desgaste

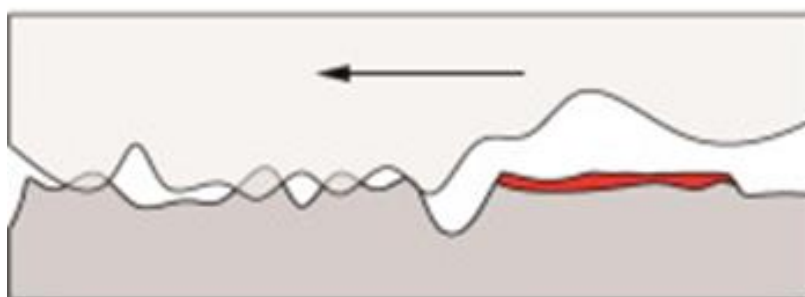
De acordo com Cunha (2005), o comportamento de desgaste dos materiais se dá pelos mecanismos atuantes de desgaste, os quais dependem da estrutura

tribológica do sistema (materiais, meio e etc.), da ação dos elementos tribológicos (rolar, deslizar, escoar, etc.) e dos parâmetros operacionais (carga, velocidade, temperatura, tempo, etc.). O desgaste dos dentes de engrenagens ocorre por atrito, devido um contato direto entre os dentes na transmissão de potência e velocidade, ocorrendo desgaste nos dentes, gerando perda de material para o meio onde se está atuando. Inicialmente, no contato ocorre o *running-in* (amaciamento) o qual consiste no desgaste das asperezas para proporcionar uma melhor adaptação das superfícies em contato, ou seja, um aumento da área de contato real, devido à remoção e conformação dos picos. Os mecanismos de desgaste que ocorrem em engrenagens, segundo Koda (2009) e Rodrigues (2008) são classificados em: adesão, abrasão, corrosão, fadiga de contato, deformação plástica e quebras ou trincas.

2.3.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo ocorre com a formação e posterior rompimento de ligações adesivas interfaciais. Segundo Burakowski e Wierzchon (1999), o desgaste adesivo acontece como resultado do desprendimento de pontos fundidos de um dos materiais e o transporte de partículas daquele material na forma de fragmentos para a superfície de deslizamento do outro metal, como observado na Figura 6. Quando essas partículas de desgaste se soltam, formam os *debris*, atuando como um abrasivo, fazendo com que os dois mecanismos atuem, o adesivo e o abrasivo.

Figura 6 - Desgaste Adesivo



Fonte: HONG *et al.* (2018).

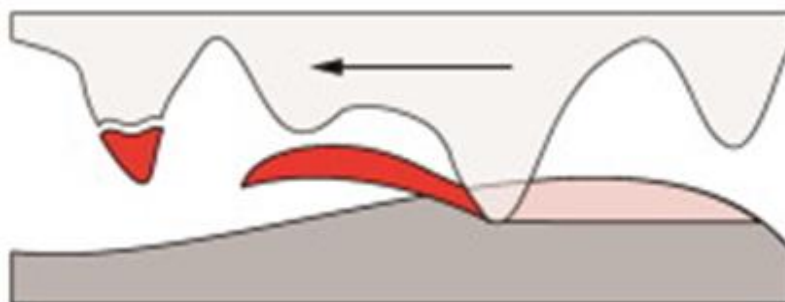
A adesão acontece em toda a vida útil de uma engrenagem, através do amaciamento da superfície, que segundo Rodrigues (2008), é o processo que ocorre

com o contato de metal com metal, ele decorre durante a operação normal das engrenagens e sua principal característica é uma superfície do dente muito lisa, resultante do atrito entre os dentes quando estão operando.

2.3.2 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é aquele no qual a remoção de material decorre do efeito de sulcamento, corte, de uma superfície dura deslizando contra outra de menor dureza (abrasão de dois corpos) ou quando partículas duras oriundas do desgaste, chamadas de terceiro corpo, voltam a região de contato e deslizam entre as duas superfícies (abrasão de três corpos), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Desgaste Abrasivo



Fonte: HONG *et al.* (2018).

Nas engrenagens, o desgaste por abrasão, ocorre pela presença de resíduos que se formam a partir do desgaste dos dentes. Esses resíduos ficam entre os dentes aumentando o desgaste dos dentes em trabalho. De acordo com Rodrigues (2008) e Seidel (2013), o desgaste provocado pela abrasão pode ser classificado em moderado e acentuado, sendo o desgaste moderado, o deslizamento entre dentes provocado por sobrecarga, dureza insuficiente e má lubrificação, já o desgaste acentuado tem uma remoção de material mais rápida, reduzindo assim a vida útil do componente.

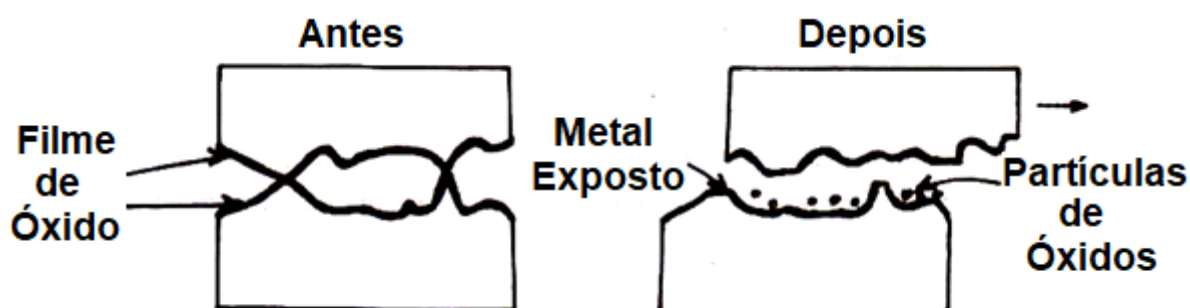
2.3.3 Desgaste Químico

Como o próprio nome sugere, o desgaste químico ocorre pela reação triboquímica, ou seja, formação de produtos de reações químicas resultantes da interação entre os elementos de um tribosistema, iniciada por ação de desgaste.

Muitas vezes ocorre apenas por oxidação, devido à ação dos lubrificantes ou por estarem expostos ao ar livre. Segundo Koda (2009), a corrosão é a perda de material devido a reações químicas ou eletrolíticas na superfície, podendo ser geradas de diversas formas, desde aditivos do próprio óleo lubrificante até o próprio ar do meio de trabalho da engrenagem.

Esse desgaste ocorre geralmente com rápidas reações iniciais, e com diminuição de ação corrosiva após um tempo, já que existe a formação de um filme protetor na superfície, separando elementos reativos. No entanto, há processos em que a remoção e a nova reação são contínuas, levando o material a ter uma vida útil curta. Neste tipo de desgaste, predomina partículas pequenas e manchas de ataque químico, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Desgaste Químico



Fonte: Awan (2018).

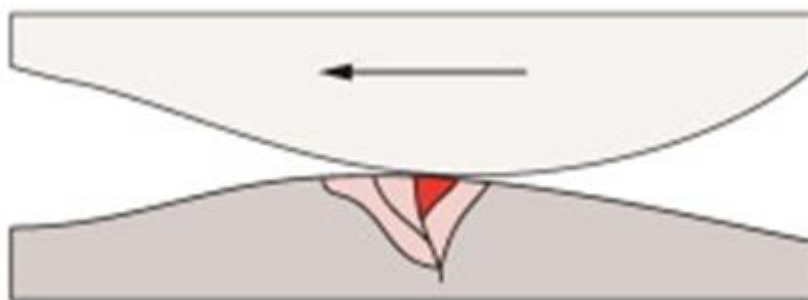
2.3.4 Desgaste por Fadiga

A fadiga pode ser definida como um fenômeno de ruptura progressiva do material, sujeito a ciclos de tensão/deformação. O mecanismo de fadiga compreende as seguintes fases: nucleação ou iniciação da fissura de fadiga; seguida da propagação da fissura de fadiga e; por fim a ruptura, dando origem à formação de uma partícula de desgaste e, portanto, ao aparecimento de um defeito superficial cuja evolução conduz ao colapso do contato (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

A Figura 9 ilustra a iniciação de fissuras de fadiga verificadas normalmente na superfície do corpo, onde a concentração de tensões é máxima. Quando ocorre uma

concentração de tensões e aparece uma trinca, a falha ocorreu por fadiga, já quando ocorrem sobrecargas no sistema geradas por impactos, gripamento de dentes, a quebra gerada se classifica como quebra por sobrecarga (RODRIGUES, 2008; KODA, 2009).

Figura 9 - Desgaste por Fadiga



Fonte: HONG *et al.* (2018).

2.4 Desgastes específicos em dentes de engrenagens

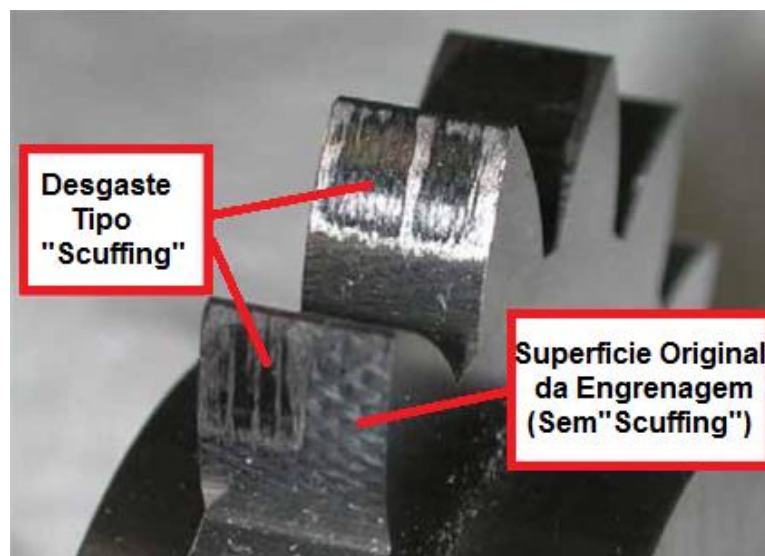
As falhas no contato dos dentes de engrenagens, encontradas nas caixas multiplicadoras, geralmente, sofrem desgaste por *Scuffing*, *Micropitting*, *Pitting* e *Spalling* (GRECO *et al.* 2011).

2.4.1 *Scuffing*

O desgaste por *Scuffing* acontece quando a espessura do filme de óleo entre as superfícies de contato do dente é insuficiente para evitar o contato metal-metal, que por sua vez causa a soldagem local, devido sua alta temperatura no contato, resultando na ruptura e em acabamentos ásperos das superfícies de contato dos dentes da engrenagem. Esse tipo de dano geralmente ocorre na zona de contato onde a pressão e a velocidade de deslizamento são altas (WOJCIECHOWSKI; WIECZOROWSKI; MATHIA, 2017). Não há um consenso na literatura sobre esta forma de desgaste, mas em geral, está relacionada a falha de lubrificação elastohidrodinâmica (HÖHN; MICHAELIS, 2004).

Pode ser visto na Figura 10, exemplos do desgaste adesivo severo do tipo *scuffing*, que é conhecido por deixar faixas ásperas na direção da rotação da engrenagem.

Figura 10 - Desgaste do tipo *scuffing*



Fonte: (Wink, 2012) (Adaptada).

Esse processo, apesar de longo e contínuo, com o tempo gera um decaimento na vida útil da engrenagem, ficando limitada pela fadiga da superfície, até que com a fratura do flanco do dente, acarretará perda ou até mesmo a parada na transmissão do sistema.

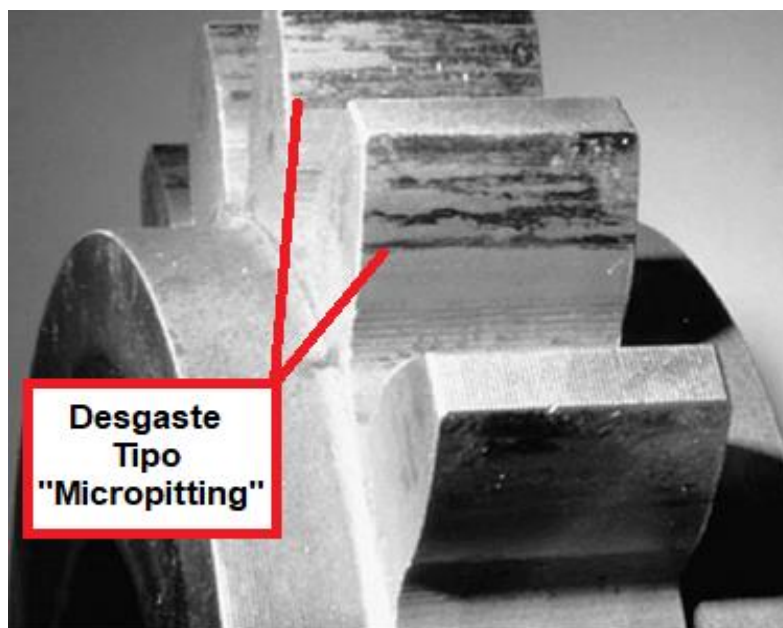
Onishchenko (2015) investigou o desgaste por *scuffing* nos dentes de engrenagens de dentes retos de máquinas pesadas. Esse desgaste progressivo ocorre não apenas devido à rugosidade das superfícies de trabalho, mas também devido ao desgaste excessivo causado por uma deterioração nas condições de contato. Isso leva a uma distorção no perfil dos dentes, que, por sua vez, causa uma distorção na forma dos dentes e uma deterioração adicional nas condições de contato. Fazendo com que o processo de desgaste (*scuffing*) cresça exponencialmente.

Ingram, Hamer e Spikes (2015) desenvolveram um novo método de teste para o fenômeno de *scuffing* que consiste em fazer rolar e deslizar duas superfícies metálicas, mas em sentidos opostos. Este método possibilita desacoplar a velocidade de escorregamento da velocidade de arrastamento para que as propriedades de *scuffing* de um lubrificante possam ser determinadas numa lubrificação limítrofe através de várias velocidades diferentes.

Raadnui (2019) analisou o desgaste de engrenagens de dentes retos aplicada a diagnósticos de manutenção preditiva. Foram realizados experimentos com carga, velocidade e distância de corrida semelhantes para realizar análises de superfície desgastada e de detritos, para estudar o efeito de diferentes modos de corrosão e desgaste, relacionados à geração de perda de peso, superfície desgastada e detritos de desgaste associados ao desgaste normal, adesivo, ataque ácido, desgaste abrasivo induzido por contaminantes e desgaste por corrosão e por umidade. Foi visto que a superfície desgastada da engrenagem exibia modos de desgaste com falha, como *scuffing* e *scoring*, oriundas do desgaste adesivo. A condição a seco apresentou maiores desprendimentos de partículas, como também maiores tamanho de partículas, do que a condição lubrificada. A análise morfológica dos *debris* de desgaste foi visualmente confirmado o tipo de desgaste e seu mecanismo iminente, comprovando a capacidade de avaliação e diagnóstico de um sistema de monitoramento de detritos de desgaste, minimizando as possibilidades de paradas não programadas de máquinas lubrificadas com engrenagens.

2.4.2 Micropitting

O *micropitting* é um dano superficial que ocorre em sistemas de alta rotação devido ao contato cíclico, a fadiga, e ao fluxo plástico das asperezas (BRANDÃO et al., 2014). Primeiro, aparece na zona de rotação próxima à raiz da engrenagem, dando lugar à perda do perfil do dente ou à ruptura do mesmo, o que se traduz em ruído e vibrações. Al- Tubi e Long (2010) efetuaram testes em engrenagens que consistiam na análise da iniciação e propagação do *micropitting*, que consistiram na quantificação do desenvolvimento desse desgaste, discutindo a sua taxa de progressão após um determinado número de ciclos de operação. Os testes mostraram que o *micropitting* tem início na zona de altura de pé do dente, mas se propaga para a zona superior. Na Figura 11, pode ser visto um exemplo de uma engrenagem com *micropitting* no flanco do dente.

Figura 11 - Micropitting.

Fonte: (Mousinho, 2017) (Adaptada).

Este fenômeno provoca alterações na microestrutura do perfil da engrenagem, modificando desta forma a distribuição de tensões de contato na superfície lateral da engrenagem, introduzindo regiões com altas concentrações de tensões. É provocada, deste modo, uma rotação da engrenagem menos eficiente, aumentando assim a possibilidade da ocorrência de falha na peça (MOUSINHO, 2017).

Os autores Al-Tubi *et al.* (2010) realizaram ensaios em engrenagens para a análise do início e propagação do *micropitting*, que consistiram na quantificação do desenvolvimento de micropicos e a sua taxa de progressão após um determinado número de ciclos de operação. Os ensaios mostraram que o *micropitting*, tem início na zona de altura de pé do dente (Figura 11), mas propaga-se para a zona superior. Os resultados analíticos obtidos, baseados na medição da variação da rugosidade da superfície das engrenagens testadas, confirmam que o desgaste ocorre com a espessura mínima de lubrificante nestas regiões. A variação da espessura da camada de lubrificante, deve-se às mudanças de rugosidade da superfície, depois das engrenagens serem sujeitas a vários ciclos de carga.

Touret *et al.* (2019) investigaram experimentalmente o efeito de *micropitting* no atrito e viram que o micropitting tem impacto sobre o atrito de duas maneiras: em um dente de engrenagem, poderia afetar a distribuição da pressão de contato e gerar sobrepressões (BIBOULET, LUBRECHT E HOUPERT, 2008) que afetariam o atrito; e também pode alterar diretamente o perfil do filme lubrificante devido ao seu grande tamanho (tipicamente 100 μm de largura, 40 μm de comprimento e 20 μm de profundidade) em comparação com a espessura do filme (0,8 μm). Fazendo com que parte do lubrificante penetre na microfissura e ocorra o contato direto metal-metal. Essa hipótese pode ser sustentada pela observação direta de um *micropitting* que passa por um contato lubrificado (OLVER *et al.*, 2019).

2.4.3 *Pitting*

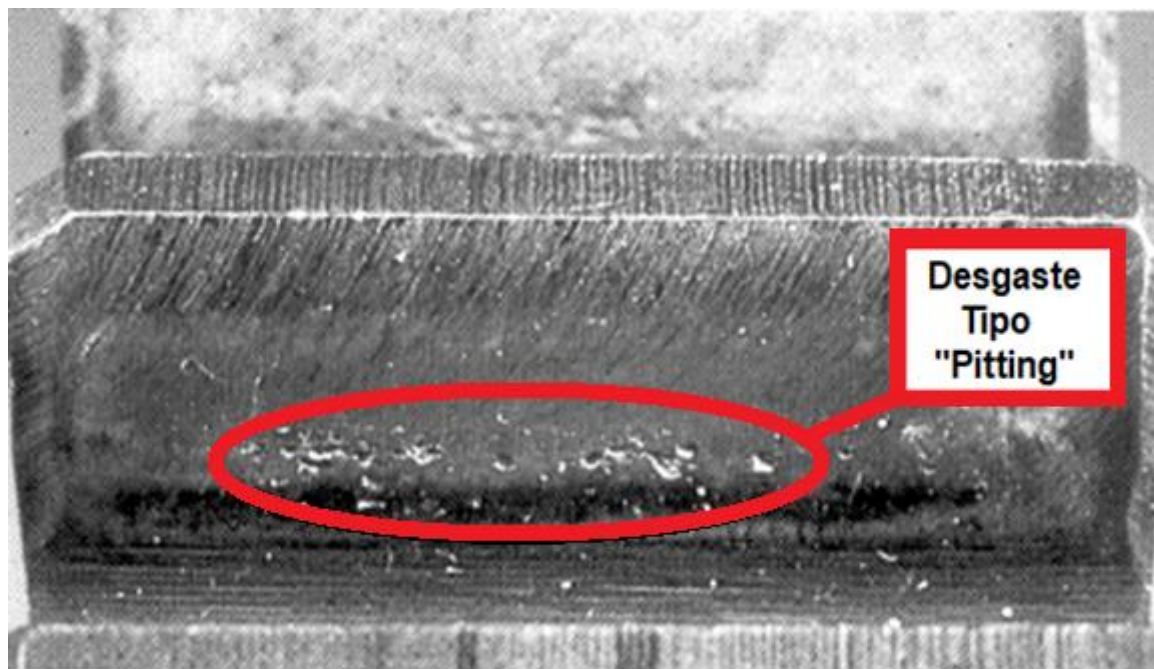
O *pitting* é um dano caracterizado no flanco dos dentes das engrenagens com a formação de crateras devido à tensão superficial próxima ao limite da resistência superficial. Este fenômeno é reportado como sendo a maior causa de falhas em transmissões. As fissuras são originadas na superfície e propagam-se, a uma pequena profundidade, causando um desprendimento de detritos de material, dos quais resulta a formação de crateras. Isto acarreta a ocorrência de vibração, barulho, perda de eficiência e eventualmente causa a inutilidade da engrenagem (MENEHETTI, TERRIN, 2016).

O processo completo de fadiga pode ser dividido no período necessário para a iniciação da trinca por fadiga e o período necessário para a propagação da trinca por fadiga desde o início até o comprimento crítico da trinca, quando se espera que parte da camada superficial se quebre. O vazio resultante é um *pitting* superficial. O desgaste inicia-se por adesão microscópica, que com o movimento ocasiona à remoção de material formando covas ou *pits* (KATTELUS; MIETTINEN; LEHTOVAARA, 2018).

Este fenômeno sucede por efeito da evolução o *micropitting*. Como suas crateras são formadas de forma semelhante, distinguem-se dessa última por apresentarem tamanhos e profundidades nitidamente superiores, diâmetros entre 0,3 e 2 mm e profundidades geralmente superiores a 0,1 mm (GONÇALVES, 2006). Apesar de ser considerada uma condição leve de desgaste, este fenômeno, é agravado devido o número de ciclos de alta tensão, ou seja, uma alta rotação nos

dentes, agindo como um acelerador do desgaste por fadiga (SPANGENBERG; FRÖHLING; ELS, 2018), como pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 - Fenômeno de *Pitting* na face do dente da engrenagem.



Fonte: (Understanding Spur Gear Life, 2011) (Adaptada).

Tan *et al.* (2007) mediu experimentalmente o crescimento das crateras sob diferentes condições de velocidade e carga usando um óleo lubrificante (SAE 20W-50) que não possuía propriedades antidesgaste, acelerando a propagação de fissuras nos dentes. Os ensaios experimentais de propagação do *pitting* nos dentes da engrenagem sob as condições de trabalho de 73 Nm e 745 rpm. A área marcada pelo desgaste nos dentes é de 6,3%, 27,8% e 41,7% após 48,5 horas, 240,5 horas e 402,5 horas de operação, respectivamente.

Kattelus, Miettinen e Lehtovaara (2018) estudaram a detecção da progressão de falha por *pitting* em uma engrenagem com monitoramento de partículas *on-line*. Essa progressão da falha de *pitting* indicada pelo número de partículas metálicas no óleo obtido com o monitoramento de partículas *on-line* correlacionou-se bem com a área do flanco da engrenagem danificada, tendo em vista que a cada ensaio imagens microscópicas do flanco do dente foram feitas para comparação. O monitoramento de

partículas *on-line* forneceu visão detalhada da formação do *pitting* inicialmente, através de dados como: quantidade de partículas e o tempo para ocorrência de partículas únicas, bem como a classificação de tamanho das partículas aparentes. Isso mostrou que o monitoramento de partículas *on-line* é uma maneira promissora de acompanhar a progressão dos danos causados por *pitting*.

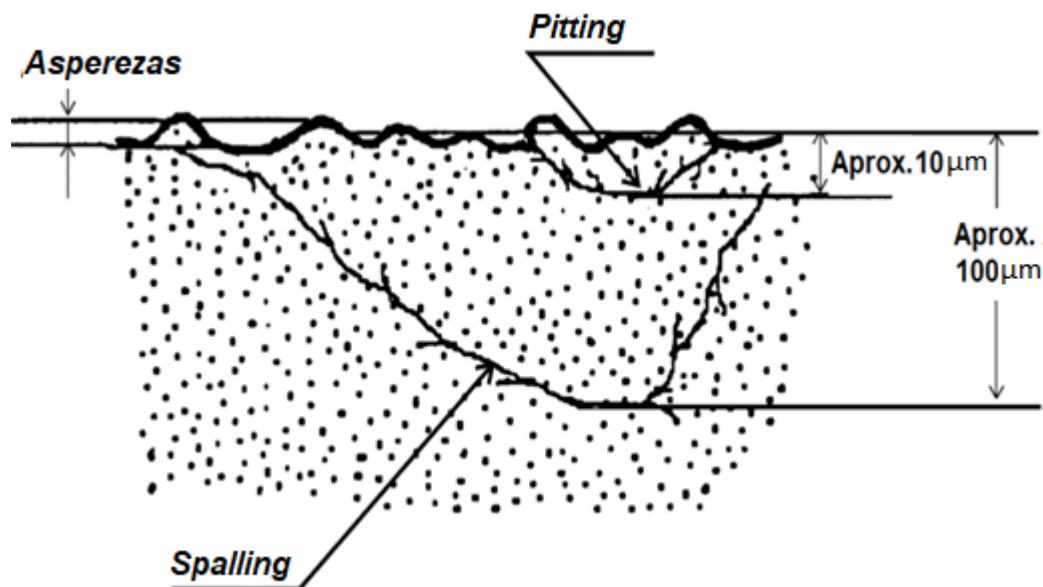
Weibring, Gondecki e Tenberge (2019) simularam a falha por fadiga no flanco dos dentes de engrenagem, considerando o início e crescimento do *pitting*. Na simulação apresentada foi reproduzido pela primeira vez uma interdependência entre *micropitting* e *pitting*, por meio de um processo matemático que levou a resultados estatísticos consistentes com os resultados dos ensaios testados anteriormente em uma plataforma. Em uma primeira etapa, esse modelo de simulação de *pitting* foi validado para rolamentos e verificado por uma comparação com a capacidade de carga estática, que expressa a carga que sobrevive a pelo menos 90% de uma população de rolamentos de teste apropriada para um milhão de ciclos de carga. A simulação de *pitting* em rolamentos mostrou uma alta correlação com os resultados da plataforma de teste e outras ferramentas de cálculo. Em uma segunda etapa foram realizados testes do contato do dente da engrenagem, os quais mostraram eficiência próxima a anterior. Ou seja, essa simulação fornece resultados confiáveis para ser usada para calcular o desgaste e fadiga em futuras engrenagens em uma aplicação específica e assim mensurar a vida útil restante dessa engrenagem nessa aplicação. Outro domínio dessa ferramenta de simulação poderia ser a otimização inicial da geometria do dente da engrenagem, dependendo das condições operacionais esperadas.

2.4.4 Spalling

Segundo Tallian (1992), “*Spalling*” é uma fadiga de contato em escala macro causada pela propagação de trinca por fadiga e pelo “*pitting*”, caracterizada como dano superficial ou subsuperficial. Geralmente, ocorre uma mistura nas definições de *pitting* e *spalling* pelo fato das causas físicas desses fenômenos ainda não serem estabelecidas de maneira convincente. O *spalling* aparece como cavidades mais profundas (normalmente de 20 a 100 μm) nas superfícies de contato com uma profundidade de 0,25 a 0,35 da largura do contato, já o *pitting* aparece como crateras

rasas nas superfícies de contato cuja profundidade máxima é $10\mu\text{m}$. A Figura 13 ilustra a diferenciação dos fenômenos de *pitting* e *spalling*.

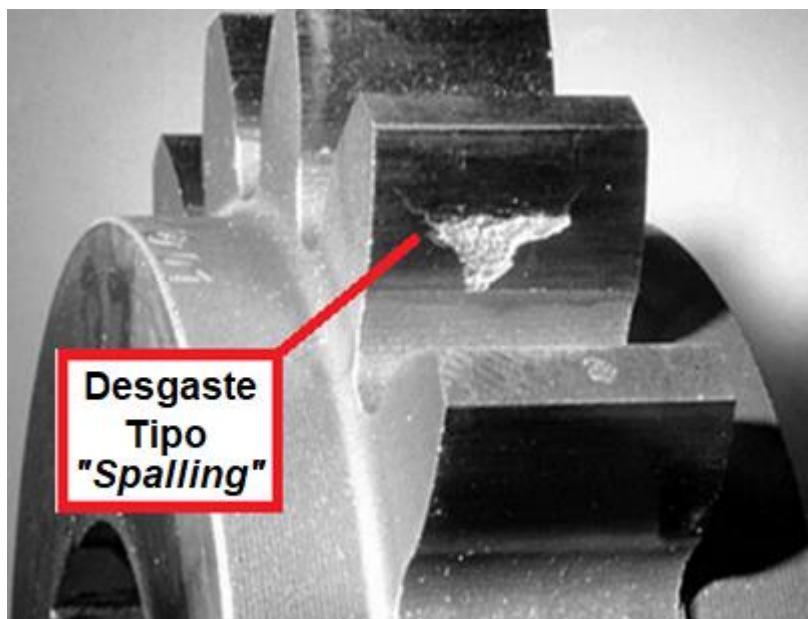
Figura 13 - Ilustração esquemática dos fenômenos *pitting* e *spalling*.



Fonte: (DING e RIEGER, 2013) (Adaptada).

Embora ambos sejam formas comuns de fadiga de contato com a superfície, o *spalling* resulta em uma deterioração mais rápida da durabilidade da superfície e muitas vezes induz falhas precoces por danos graves. É frequentemente relatado como o modo de falha de superfície mais destrutivo de uma engrenagem (Mistry *et al.* 2006). A Figura 14 mostra o dano do tipo *spalling* na face de um dente de engrenagem.

Figura 14 - *Spalling* nos dentes da engrenagem.



Fonte: (Mousinho, 2017) (Adaptada).

2.5 Manutenção dos Aerogeradores

2.5.1 Teoria da Manutenção

De acordo com a NBR 5462 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, 1994); a definição de manutenção é a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”. A manutenção é fundamental para garantir que os componentes continuem a executar as funções para as quais foram projetados. Os objetivos básicos da atividade de manutenção são proporcionar os recursos necessários para garantir que os componentes executem adequadamente as funções pretendidas, gerando confiabilidade do sistema (KNEZEVIC, 1993). De forma geral, a teoria da manutenção é dividida em três práticas: a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva que serão discutidas neste capítulo e estão organizadas na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma geral da manutenção.



Fonte: Próprio Autor.

2.5.1.1 Manutenção corretiva

A teoria da manutenção considera esse método em uma situação não planejada para a execução da manutenção. A intervenção somente irá ocorrer quando o equipamento perder a sua função. A manutenção corretiva também é conhecida como *“Run To Failure”* (RTF), do inglês, que significa "operar até quebrar".

O entendimento da manutenção corretiva planejada é, aquela realizada quando a correção é feita a partir de um acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a quebra. Contudo, a manutenção corretiva não planejada ocorre quando se percebe que o equipamento não está produzindo conforme sua função esperada, em geral, isto ocasiona altos custos para a empresa (PINTO E XAVIER, 2001). A consequência de uma manutenção corretiva aplicada sem necessidade gera perda de produção, excesso de peças em estoque, baixa disponibilidade dos equipamentos, riscos de segurança e queda da qualidade.

2.5.1.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva visa à realização da manutenção em máquinas e equipamentos antes mesmo que falhas aconteçam, através de um planejamento. Isso evita prejuízos e riscos de interrupção da produção, reduzindo falhas e custos e queda

no desempenho. O objetivo por trás da manutenção preventiva é reparar ou substituir componentes antes que eles falhem, levando em conta o seu tempo de utilização, vida útil (BEN-DAYA, DUFFUAA, 2009).

Entre as ações estão: inspeção, ajustes, limpeza, lubrificação, troca de peças, calibração e reparo de componentes e equipamentos, podendo reduzir os níveis de falhas em emergência e melhorar a disponibilidade dos equipamentos. Porém, o método pode não ser tão eficiente devido ao fato de que grande parte dos equipamentos apresentam falhas aleatórias, implicando em paradas inoportunas e excessivas além de gastos demasiados com componentes.

2.5.1.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva ou também conhecida como manutenção baseada na condição monitorada, identifica as falhas iniciais, antes delas se tornarem críticas, o que possibilita um planejamento mais objetivo. A atividade dessa manutenção, primeiramente detecta fenômenos, bem como suas evoluções, que podem caracterizar o seu processo de falha (GARCIA, SANZ-BOBI, DEL PICO 2006); para depois, realizar o diagnóstico e finalmente atuar no momento mais adequado.

Os principais fatores que determinam a falha dos componentes são: alteração do nível de vibração, calor, alteração de espessura, trinca e desgaste. Como técnicas para avaliação dos equipamentos, temos: Análise de Vibração, Emissão Acústica, Análise do Óleo, Termografia, Ensaio Não Destrutivos, Medidas de Fluxo, Análise de Motores Elétricos, Detecção de Vazamento, Monitoramento da Corrosão e de Ruído (MOBLEY, 2002).

Entre os benefícios de uma manutenção preditiva aplicada de forma correta, temos o planejamento efetivo da mão de obra, a disponibilidade máxima das máquinas, reposição de peças do estoque e segurança de operação. Aumentar a porcentagem de atividades de manutenção preditiva (ABRAMAN, 2013), tem um impacto positivo direto sobre os fatores de segurança e rentabilidade dos ativos de manutenção. Contudo, uma manutenção preditiva mal estruturada, gera falta de peças de reposição e paradas indesejadas, conseqüentemente, perda na produção.

Essa técnica de manutenção é amplamente utilizada em manutenção de aerogeradores por se tratar de equipamentos altamente automatizados e com grande número de sensores que permitem o monitoramento dos parâmetros. Essa ideia é colocada por Nilsson e Bertling (2007) ao afirmarem que os CSM (Condições dos Sistemas de Monitoramento) podem ser a resposta para uma melhora no gerenciamento da indústria de energia eólica e o aumento de sua confiabilidade.

CAPÍTULO 3: ANÁLISE DE SINAIS COMO FERRAMENTA PARA A MANUTENÇÃO PREDITIVA

3.1 Introdução

A detecção de falhas é uma das principais funções do sistema de monitoramento e o primeiro passo no processo de diagnóstico, prognóstico e análise de condição de uma máquina. As máquinas apresentam, em funcionamento, vibrações oriundas dos processos internos de suas partes móveis, dessa forma, cada tipo de máquina possuirá uma assinatura espectral original (WIGGELINKHUIZEN et. al 2007). Uma mudança na assinatura, devido a uma alteração no estado da máquina, pode ser usada para detectar defeitos ainda no início, antes de se tornarem críticos. As técnicas aplicadas na detecção de falhas envolvem sistemas de monitoramento que necessitam de um processamento inicial dos sinais provenientes dos sensores instalados. Esses sensores e equipamentos de processamento de sinais fornecem indicações contínuas de condição de cada componente da máquina através de técnicas que incluem análise de vibração, acústica, medição de tensão e termografia (MÁRQUEZ, et al 2012).

Para monitoramento de vibrações mecânicas e obtenção do espectro de frequência do sinal, as medições mais importantes são relativas ao deslocamento, velocidade e aceleração de partes da máquina. Contudo, parâmetros estatísticos simples que avaliam o sinal ao longo do domínio do tempo podem fornecer informações interessantes sobre defeitos potenciais. Por exemplo, o valor quadrático médio, mais conhecido como RMS, se refere ao nível geral de vibração. Estes parâmetros estatísticos são simples de serem obtidos, no entanto, são ferramentas bastante insensíveis para a detecção de defeitos (SILVA, 2001). A análise no domínio do tempo fornece de forma direta, informações úteis sobre o sistema, contudo, normalmente esconde informações relevantes sobre o sinal. Essas informações podem ser melhor interpretadas no domínio da frequência (GOYAL e PABLA, 2015). As técnicas de processamento de sinais (Transformada de Fourier, Transformada de Hilbert, Transformada Wavelet e outras) são aplicadas na caracterização dos sinais obtidos em ensaios tribológicos para que se tenha um monitoramento do sistema.

3.2 Técnicas de Processamento de Sinais

Em geral, as técnicas de processamento constituem transformações de funções entre dois espaços de definição. Por exemplo, a transformada de Fourier, transforma uma função no espaço temporal para um espaço cujas bases são funções seno e cosseno. Assim, o sinal é descrito no domínio da frequência através da sua composição em relação às funções que formam a base do espaço (Silva, 2013).

A Transformada de Fourier se tornou a ferramenta mais importante no processamento de sinais devido ao uso, amplo e consolidado, dos espectros de frequências para análise de um sinal.

3.2.1 Transformada de Fourier

A análise espectral de sinais, trazida por Joseph Fourier, em 1807 (PROAKIS E MANOLAKIS, 1996), possibilitou a extração de informações relacionadas às frequências inseridas no sinal, ou seja, um método alternativo para a análise de sinal, apresentando informações no domínio da frequência.

Para sinais estacionários, a abordagem clássica é a conhecida Transformada de Fourier, definida pela Equação 3:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

em que $x(t)$ é o sinal no domínio de tempo e $X(\omega)$ é o sinal no domínio da frequência.

A Transformada de Fourier (do inglês Fourier Transform - FT) decompõem uma função temporal em uma representação no domínio da frequência, que estima as diferentes componentes espectrais, chamado espectro de frequência, como ilustrado na Figura 16. Dessa forma, qualquer função aperiódica, por mais complicada que seja, tem sua representação equivalente como uma soma de componentes senoidais de frequências distintas.

Figura 16 - Representação da Transformada de Fourier.



Fonte: K. Najarian and R. Splinter, 2006 (Adaptada).

Com o desenvolvimento de algoritmos para o cálculo da FT, surgiu a Transformada Rápida de Fourier (do inglês Fast Fourier Transform - FFT), como uma alternativa computacional para calcular a FT, de forma mais rápida e com menor custo computacional. Essa ferramenta é utilizada, por exemplo, no diagnóstico de máquinas e serve para analisar suas condições durante a operação, em que a frequência pode indicar a origem do defeito, enquanto a amplitude da frequência mostra a indicação da gravidade do problema (PENG E KESSISSOGLU, 2003).

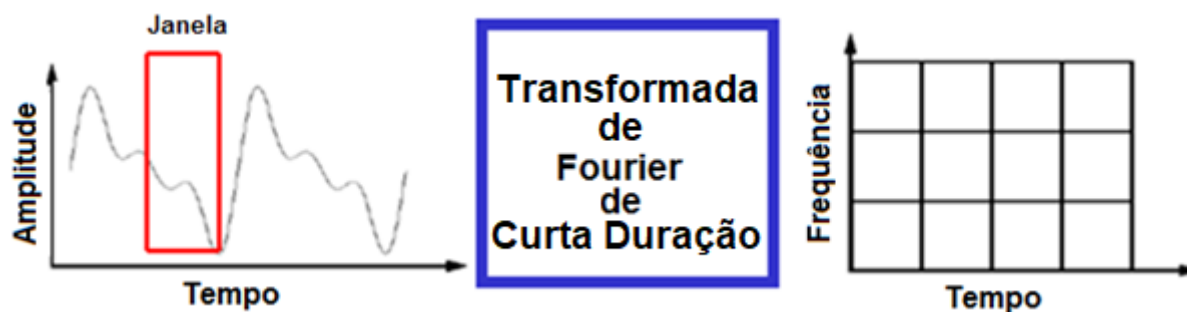
Segundo Wang e Gao (2006), a análise de frequência do sinal de vibração é amplamente utilizada para diagnosticar as falhas de máquinas. Contudo, esse tipo de abordagem possui limitações para aplicações em sinais não estacionários, ou seja, que não têm o mesmo comportamento durante todo o tempo. Tais sinais ocorrem num ambiente real, por exemplo, sinais transientes resultantes de choques, batidas, impactos, etc. De forma prática, as máquinas geram vibrações, que apresentam diferentes frequências em cada instante de tempo (SHIN E JEON, 1993). A FT descreve as diferentes frequências contidas em um sinal, mas não sua localização temporal. Para contornar esse problema, técnicas conjuntas de representação bidimensional (tempo *versus* frequência) surgiram para caracterizar um sinal simultaneamente nos dois domínios, surgindo assim a Transformada de Fourier de Curta Duração (do inglês Short Time Fourier Transform – STFT).

A STFT foi proposta inicialmente por Gabor (1946) para definir uma representação de tempo-frequência bidimensional. Fixando o sinal $x(t)$ em uma janela limitada $(t - \tau)$ que é centrada em um determinado ponto no tempo t , com isso a transformada de Fourier de curta duração é definida pela Equação 4:

$$X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

Comparando-se a Equação 4 com a Equação 3, pode-se verificar a diferença entre a STFT e a FT. A diferença está na adição da função janela $w(t)$ que permite fracionar o sinal em pequenas porções de tamanho fixo e se obter uma leitura em frequência dessa pequena porção. A STFT, como sendo um aprimoramento da FT, representa a variação no conteúdo da frequência do sinal ao longo do tempo em janelas, como representado na Figura 17.

Figura 17 - Representação da STFT



Fonte: K. Najarian and R. Splinter, 2006 (Adaptada).

Esta técnica fornece uma análise constante da largura de banda para identificar componentes harmônicos e oferece resolução constante em representação bidimensional, independentemente da frequência real, de modo que o tamanho da janela determina a precisão do uso (GADE E GRAM-HANSEN,1996). Assim, a limitação da STFT está no tamanho de sua janela, tomando uma janela pequena, sua resolução em frequência é minimizada, o que não permitirá uma análise dinâmica completa. Na direção contrária, uma janela muito grande aumenta o erro na consideração de que o sinal é estacionário, além de requerer um grande esforço de

processamento (WOLFF, 2014). Sendo impossível aumentar o detalhamento em um dos domínios sem diminuí-lo no outro, chama-se esta relação entre os domínios da frequência e do tempo de relação de incerteza ou princípio da incerteza de Heisenberg. O desenvolvimento contínuo de técnicas de processamento de sinais, tanto no domínio do tempo, quanto no da frequência proporcionaram novas ferramentas para a análise de sinais, uma delas a chamada Transformada Wavelet.

Cheraghi, Zou e Taheri (2005); Lee J, Kim S (2007); Amezquita-Sanchez et al. (2012) utilizaram em seus estudos a FFT como ferramenta para detectar danos estruturais em tubulações, pontes de aço submetidas a teste de impacto, estruturas do tipo treliça 3D sujeita a terremotos e excitação forçada. Ou seja, estruturas que produzem sinais estacionários, ou seja, as frequências não se alteram no tempo. Em um ambiente dinâmico, a maioria dos sinais é não estacionário, isto é, os espectros variam com o tempo.

Segundo Amezquita-Sanchez et al. (2012), a FFT possui limitações por não representar a alteração dos sinais de frequência ao longo do tempo e não deve ser usada para monitorar estruturas reais sujeitas a excitações dinâmicas. Portanto, a técnica de análise de tempo-frequência conjunta é a mais recomendada para ser usada para caracterizar um sinal dinâmico. A principal diferença entre cada método tempo-frequência é lidar com o problema da incerteza o qual afirma que “não é possível ter simultaneamente boa resolução de frequência e boa resolução de tempo” (COHEN, 1995).

3.2.2 Transformada Wavelet Contínua

A Transformada Wavelet Contínua, doravante do inglês Continuous Wavelet Transform (CWT), é uma transformada integral linear (Equações 5 e 6) que pode ser utilizada na exploração de características de sinais não estacionários para extrair informações de variações em certas bandas de frequências e/ou detectarem estruturas locais presentes (ANTOINE *et al.* 2008). Proposta inicialmente por Gabor e posteriormente aperfeiçoada por Morlet, consiste numa função matemática baseada na decomposição de sinais em diversos componentes com frequência e tempo variável. Diferentemente de Fourier, a transformada Wavelet (WT), utiliza diferentes

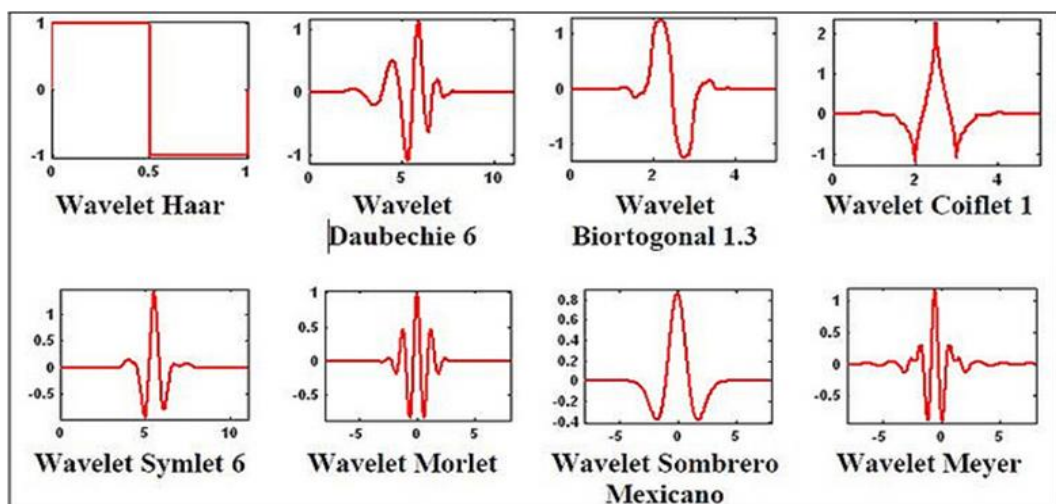
funções bases na decomposição do sinal (GRAPS, 1995), dado um sinal $x(t)$, sua transformada integral é definida na Equação 5, como:

$$W_{(a,b)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi_{(a,b)}(t) dt \quad (5)$$

$$\psi_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (6)$$

Em que $W(a,b)$ é o sinal no domínio da frequência, em função de $\psi(a,b)(t)$ chamadas de "Wavelets filhas". Para o cálculo da Equação 5, é necessário, primeiro a resolução da Equação 6, a qual define ψ chamada de "Wavelet mãe". Esta é caracterizada por diferentes tipos de forma de onda, conforme mostra a Figura 18. A partir dos parâmetros "a" e "b" que permitem a modulação da Equação 6, em termos de dilatações e translações, sendo o parâmetro "b" relacionado às translações no tempo e o parâmetro "a" relacionado com a dilatação da função base, também chamado de fator de escala. Dessa forma, as "Wavelets filhas", $\psi(a,b)$, constituem uma família de curvas com forma idêntica à da "wavelet mãe", ψ , mas deslocadas no tempo e escaladas em amplitude.

Figura 18 -Tipos de "Wavelet Mãe" (Ψ).

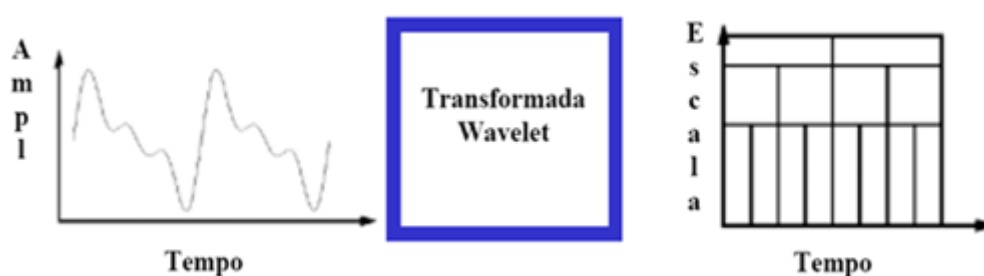


Fonte: K. Najarian and R. Splinter, 2006.

A WT pode ser dilatada e deslocada de forma independente, gerando as "Wavelets Filhas" que analisam o sinal em diferentes frequências e resoluções. E as resoluções definem quais as faixas de escala correspondentes a serem analisadas, (LIN E QU, 2000). A CWT pode representar funções que apresentam descontinuidades, bem como desconstruir e reconstruir com precisão sinais finitos, não periódicos e/ou não estacionários. Por apresentar janelas de tamanho variável é possível delimitar intervalos maiores quando se quer informações mais precisas sobre baixas frequências, bem como intervalos menores quando se quer informações mais precisas sobre altas frequências.

A WT é definida no domínio da Escala-Deslocamento ou Escala-Tempo (Figura 19), levando-se em consideração que todos os sinais existem apenas para o tempo $t > 0$. Ao aplicar a Transformada Wavelet em determinada escala sobre um sinal, não se está obtendo valores correspondentes à frequência do sinal, mas sim uma medida de quanto o sinal se assemelha, naquele instante, a função wavelet utilizada naquela determinada escala. Observa-se que escala e frequência estão intimamente relacionadas, pois assim como em uma escala alta, as baixas frequências oferecem informação acerca do comportamento global do sinal. Em contrapartida, escalas baixas permitem visualizar informações detalhadas do sinal assim como as componentes de alta frequência (ZOU E CHEN, 2004).

Figura 19 -Representação da Transformada Wavelet



Fonte: K. Najarian and R. Splinter, 2006.

A WT também fornece uma análise de multirresolução com janelas variáveis. A análise das frequências altas é feita usando janelas estreitas, enquanto a análise

das frequências baixas é feita usando janelas largas. Yan, Gao e Chen (2013) afirmam que a CWT é uma importante ferramenta no diagnóstico de falhas das máquinas rotativas, com ênfase em seus componentes principais, como rolamentos, caixa de engrenagens e rotores. Amezquita-Sanchez e Adeli (2014) também discutem diversas aplicações da CWT, nas engenharias de energia, robótica e na mecânica, no monitoramento da saúde estrutural, do inglês (Structure Health Maintenance - SHM) aplicadas a sistemas similares aos aerogeradores.

Yang e Ren (2004) otimizaram os parâmetros da wavelet de Morlet e aplicaram a análise de envelope baseada em CWT para detectar características impulsivas em sinais mecânicos. Tse, Yang e Tam (2004) aplicaram a análise exata wavelet, projetada para minimizar o efeito de sobreposição e melhorar a precisão da detecção de falhas, sendo essa nova transformação wavelet usada no diagnóstico de falhas de máquinas com base em vibrações. Os resultados mostraram que esta ferramenta pode ajudar a evitar avarias fatais das máquinas. Fazendo uso da característica de filtragem passa-banda da CWT, Yang et al. (2010) desenvolveram um filtro adaptativo baseado em CWT para rastrear energia nas faixas de frequência relacionadas a falhas no tempo, a partir do sinal de potência, para monitorar as condições das turbinas eólicas. A técnica proposta foi validada experimentalmente em um equipamento de teste de trem de força. Como resultado, tanto as perturbações mecânicas quanto elétricas foram detectadas com sucesso quando aplicadas na plataforma de teste.

Utilizando os coeficientes da transformada wavelet como entrada, Rafiee e Tse (2009) aproximaram a função de autocorrelação dos coeficientes wavelet como função sinusoidal simples para extração de características no diagnóstico de falhas na caixa de câmbio. Três tipos de defeitos de engrenagem foram selecionados e testados, os quais consistiam em engrenagem com desgaste leve, engrenagem com desgaste moderado e engrenagem com dente quebrado. Como resultado foi visto que o algoritmo proposto pode ser a base da extração de características no monitoramento das condições da máquina, de modo que os coeficientes de aproximação significativos de tamanho pequeno possam ser estudados. Em outro estudo de monitoramento de falha, as informações do ângulo de fase foram adicionadas a um gráfico CWT 3D para melhorar a detectabilidade de trincas do rotor (NAGARAJU, RAO e RAOO, 2009).

Tang, Liu e Son (2010) estudaram o diagnóstico de falhas de turbinas eólicas em que ofereceram um método de diagnóstico baseado na transformada wavelet, empregando a wavelet de Morlet com a Distribuição Wigner-Ville (WVD), que usa o método de termos cruzados para otimizar o fator de escala de wavelets. O novo método mantém a alta energia próxima a todas as frequências instantâneas e também apresenta alta resolução na frequência e no tempo. Os resultados indicaram que o indicador de falha da caixa de engrenagens da turbina eólica é muito mais claro do que o sinal original. Os termos cruzados no WVD podem ser removidos claramente e as boas características do WVD podem ser mostradas.

Vernekar, Kumar e Gangadharan (2014) usaram a análise de vibração para detectar falhas em engrenagens a partir da ignição de um motor de 2 tempos, utilizando a CWT. Segundo o autor, a CWT é uma ferramenta eficiente para o diagnóstico de falhas e que o método poderia ser aplicado a outros sistemas mecânicos com diversos tipos de falhas diferentes.

ŁukaszJedliński e JózefJonak (2015) avaliaram a condição de uma caixa de velocidades usando duas redes: *Fault Detection Support Vector Machines* (SVMs) e *Multilayer Perceptron Network* (MPN). Esta última rede foi usada apenas por razões comparativas, pois sua eficácia foi relatada por muitos estudos com sucesso. No estudo a CWT decompõe o sinal de vibração em coeficientes de onda. Essa transformação permite extrair características de sinal que são invisíveis no tempo. Em seguida, os coeficientes selecionados foram utilizados como dados de entrada para a análise em Rede Neural Artificial (RNA). A transformada wavelet provou melhorar significativamente a precisão da avaliação da condição. Os resultados para o sinal de vibração "bruto" atingiram 60%, os quais não foram satisfatórios para os autores. Para a rede SVM, a melhoria é de quase 90%, enquanto para a MLP é 92%. A classificação da condição da caixa de velocidades pode ser aprimorada otimizando a transformação wavelet e/ou usando outras ferramentas de processamento de sinais.

Kong *et al.* (2017) propuseram um método de extração de recursos para monitorar falhas de caixa de engrenagens com base na curtose espectral e no espectro de energia da wavelet. Além disso, um defeito localizado foi induzido no dente da engrenagem e os resultados indicaram que a extração do recurso foi eficaz para diagnosticar falhas nas engrenagens helicoidais.

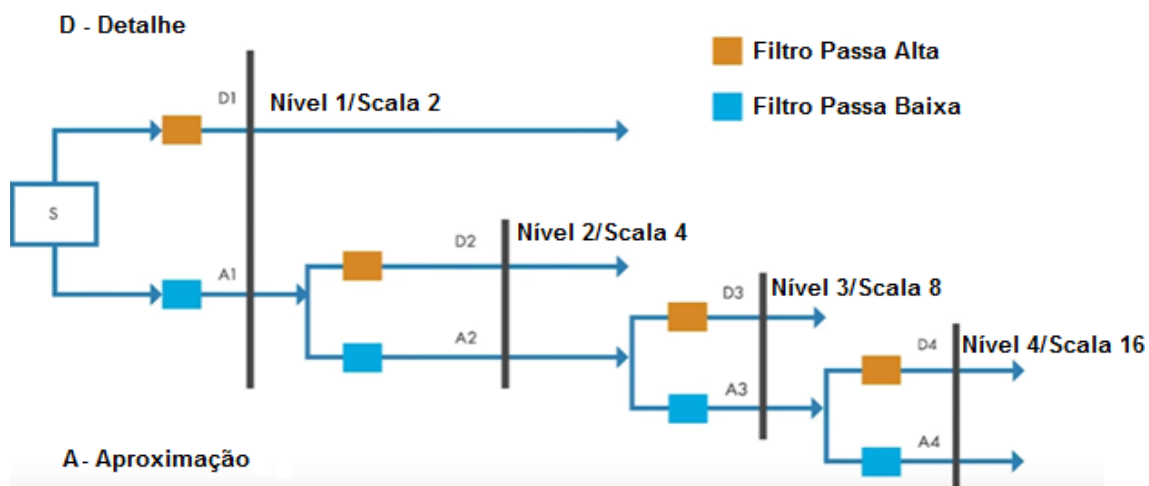
Qin *et al.* (2019) apresentam um novo método de diagnóstico de falhas para detectar falhas nos sistemas de transmissão de engrenagens planetárias, desenvolvido com base na transformada wavelet e na negentropia espectral (ANTONI, 2016). Os resultados experimentais do diagnóstico de falhas na transmissão planetária validam a superioridade do método desenvolvido em relação a outras abordagens convencionais, incluindo transformada wavelet analítica, infograma de envelope quadrado e infograma de espectro.

3.2.3 Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet Discreta (DWT) pode ser obtida, dentro do conceito de análise multirresolução (MALLAT, 1989), por um banco de filtros formados pelos filtros de escala e wavelet, aplicando-se sucessivas filtragens ao sinal analisado.

Dado um sinal $x[n]$ com N amostras, sendo $N = 2^k$ com $k \in \mathbb{Z}$, o procedimento para se obter os coeficientes da Transformada Wavelet Discreta se inicia com a definição da função de escala e os filtros de escala e de wavelet associados. Cada filtragem define um nível da transformada. Para um sinal com 2^k amostras, existirão k níveis e em cada nível obtém-se uma determinada quantidade de coeficientes. Desta forma, os filtros apresentam escalas de dilatação como uma potência de dois ($a=2^j$), e passos de translação ($b_k=2^j k$), sendo “ k ” e “ j ” $\in \mathbb{Z}$, com esses valores sendo aplicados nas Equações 1.5 e 1.6, têm-se analiticamente a equação para a DWT. A Figura 20 ilustra o processo citado, em que cada filtragem define um nível da DWT, o fator de escala é escolhido como uma potência de dois e frequentemente é processada através de um par de filtros *Wavelet* de passagem baixa e alta.

Figura 20 - Processo de obtenção dos coeficientes da Transformada Wavelet Discreta



Fonte: Documentação Matlab, Mathworks®

A partir do sinal original “S”, dois conjuntos de coeficientes podem ser produzidos a partir da DWT: coeficientes de aproximação *A1* e coeficientes de detalhe *D1*, (Figura 20). Esses conjuntos são obtidos através da convolução de *S* com o filtro passa-baixa, para aproximação, e com o filtro passa-alta, para detalhe, seguido por uma decimação diádica: a cada duas saídas do filtro, descarta-se uma delas. Esse estágio, conhecido como decomposição (ou análise), determina o conjunto de coeficientes “A” e “D” (REIS e SILVA, 2004).

Mcfadden e Wang (1992) usaram a transformada wavelet discreta para detectar transientes anormais gerados pelo dano precoce da engrenagem. Um dos seus principais resultados é que a DWT fornece uma boa representação, sem redundâncias, no entanto, o mapa de escala no tempo obtido a partir da DWT tem detalhes limitados e, portanto, não mostra tanta informação.

Mohanty et al. (2006) analisaram a assinatura do monitoramento da condição da caixa de engrenagens de vários estágios enquanto um dente ou dois dentes eram removidos, usando uma Transformada de Wavelet Discreta. A análise FFT mostrou que as baixas frequências das assinaturas de vibração têm faixas laterais em todo o espectro. Visto que as altas frequências eram indetectáveis, aplicou-se a DWT para decompor o sinal seguido pela FFT que em alguns dos resultados conseguiu rastrear as bandas laterais das altas frequências de vibração.

A transformada wavelet discreta também foi estudada por Saravanan e Ramachandran (2010), que examinaram a detecção de falhas na caixa de engrenagens retas usando wavelet discreta para extração de características e rede neural artificial usada como classificador. Eles concluíram que uma seleção adequada de características discretas tem maior potencial para descrever as condições da caixa de velocidades. A TWD também apresenta um grande potencial para verificar mudanças inesperadas em um sinal ou localizar alterações repentinas no decorrer do tempo, sendo obtida uma precisão de 95%.

Souza (2011) analisou a vibração emitida por dois motores novos e dois defeituosos usando a técnica Wavelet. Segundo sua análise, os motores com defeitos emitiram uma frequência de vibração diferente da emitida pelos motores novos. Isto lhe permitiu definir uma assinatura mecânica padrão na identificação de defeitos funcionais dos motores. Zhan et al. (2007) fizeram a aplicação desta mesma técnica para analisar as vibrações e para verificar a ocorrência e categorizar os tipos de defeitos em motores marítimos.

Diehl e Tang (2016) usaram um modelo de caixa multiplicadora dinâmica e uma Transformada Wavelet Harmonic (HWT) para detectar uma falha no pinhão de uma caixa de engrenagens de dois estágios. Acelerômetros foram utilizados para extrair os dados analisados pelo HWT. Os resultados mostram potencial da ferramenta em imitar o comportamento não-estacionário da caixa de velocidades sob mudanças de velocidade. Uma vantagem no método usado é destacada pelos Modelos de Caixas de Velocidade Dinâmicas usado, que reflete a dinâmica da caixa de velocidades em um nível superior.

Uma abordagem de reconhecimento de padrões baseada na TW e FFT para detecção e diagnóstico de falhas foi usada por González-Carrato (2017) para monitorar as peças mecânicas. O método destina-se a detectar falhas em partes inacessíveis da turbina eólica. A energia sonora é capturada usando sensores estrategicamente posicionados. Em seguida, o primeiro e o segundo harmônicos são estudados usando WT e FFT. Com base em um agrupamento usando o RMS, é feita uma relação entre a energia sonora e os picos de vibração; então, por uma classificação, é possível encontrar o padrão incomum que indica a presença de um defeito.

Para Teng *et al.* (2019) o processo de monitoramento de condições inclui três etapas: aquisição, processamento e interpretação de dados. Eles afirmam que a análise de vibração é uma ferramenta poderosa e popular, permitindo a detecção precoce de falhas em equipamentos de rotação, como rolamentos e engrenagens. E o sucesso do monitoramento de vibrações está relacionado ao avanço das medições e às tecnologias de processamento de sinais, como, por exemplo, a Transformada Wavelet. A resposta para sua ampla utilização se deve a sua alta sensibilidade a defeitos incipientes, além de uma capacidade superior na localização de falhas. Em seu trabalho, foi aplicada a Transformada Wavelet Empírica (EWT), que é mais utilizada para encontrar falhas em engrenagem planetária. Eles verificaram que esta ferramenta pode diagnosticar o desequilíbrio ou excentricidade inicial do eixo solar.

Esses estudos corroboram para mostrar a possibilidade de identificar e monitorar falhas com o uso de técnicas de processamento de sinais. Dessa maneira, a melhor justificativa para este trabalho é desenvolver uma análise mais refinada dos sinais de falha da caixa multiplicadora de um aerogerador aplicando uma técnica de processamento de sinais, como CWT, afim que se tenha maior observância do dano as engrenagens pertencentes a caixa de velocidade das turbinas eólicas, por meio de um monitoramento contínuo.

CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

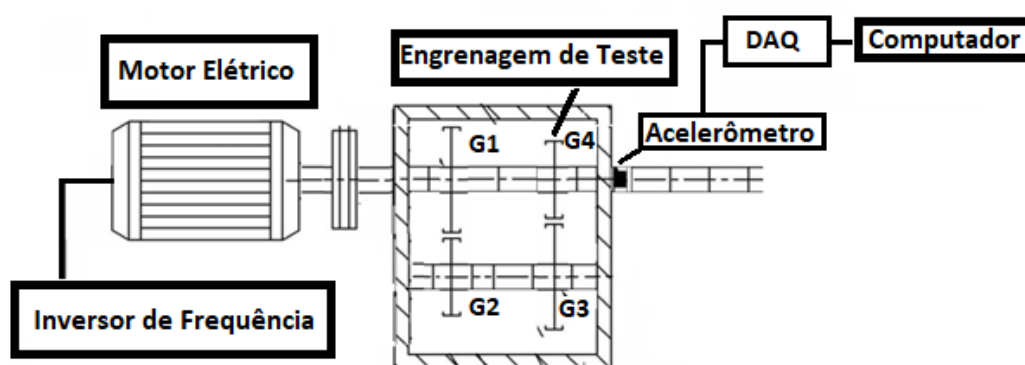
O experimento desenvolvido nesta pesquisa focou em avaliar o comportamento dinâmico de um par de engrenagens do tipo dentes retos, simulando o processo de perda do dente, sob vários níveis de desgaste. A análise deste comportamento se dará através da condição de monitoramento aplicando técnicas de análise de vibrações, lubrificantes e microscopia óptica dos dentes das engrenagens.

Para realizar a simulação de um aerogerador foi necessário o desenvolvimento de uma bancada que apresentasse características semelhantes, construindo assim um protótipo para a análise de falhas das engrenagens pertencentes a caixa multiplicadora da turbina eólica. Esta bancada experimental foi construída no Laboratório de Tribologia, localizado no Núcleo de Tecnologia Industrial – NTI da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, onde foram utilizados instrumentos para obter os dados de vibração, bem como para a coleta de amostras de óleo e imagens do flanco dos dentes.

4.1 Bancada Experimental

Todo o conjunto foi fixado em bases instaladas em uma mesa metálica rígida, feita de ferro fundido, sob uma base plana para alinhamento. Na Figura 21, pode ser observado um esquema gráfico da bancada, composta por um inversor de frequência (Delta – VFD-Series) que controla a rotação de entrada de um motor elétrico, o qual aciona a caixa multiplicadora de velocidade.

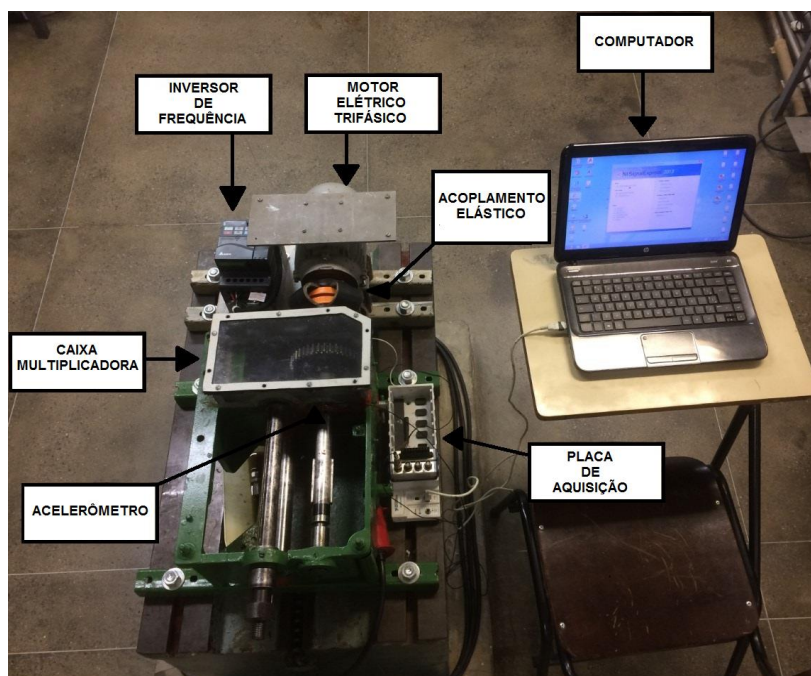
Figura 21 -Esquema da bancada.



Fonte: Próprio Autor.

O motor de indução trifásico utilizado na bancada é um Motor W22 Ir2 Trifásico 220/380V-WEG-11385077, que possui uma potência de 0,5 CV (0,37 kW) na sua velocidade nominal de 1710 RPM. A Figura 22 mostra a bancada real em que este motor está ligado a caixa multiplicadora por meio de um acoplamento. O acoplamento utilizado foi o de Correia Flexível Elástica (AC Co 130), os quais são empregados em situações de trabalho desfavoráveis e que possuem grandes desalinhamentos, dessa forma não propagariam a vibração entre os demais componentes, favorecendo que vibrações indesejadas provenientes da rede elétrica, motor elétrico, gerador elétrico e demais fontes externas chegassem amortecidas aos pontos de medição.

Figura 22 - Bancada de ensaio utilizada nos experimentos.



Fonte: Próprio Autor.

Inicialmente, o inversor mantém a rotação do motor elétrico trifásico em 420 RPM na entrada, com o motor conectado ao eixo da caixa multiplicadora, por meio de um acoplamento de correia flexível, os pares engrenados se movem multiplicando em 2x a rotação por cada contato, ou seja, dois contatos multiplicando por 4x a rotação de entrada (1680 RPM). Dessa forma, garante as condições na entrada (baixa velocidade e alto torque) e na saída (alta velocidade e baixo torque). Essas revoluções dos eixos foram medidas por meio do tacômetro, tanto no eixo de entrada, quanto no de saída, para monitoramento e verificação no início, meio e antes do término de cada

ensaio. A caixa multiplicadora utilizada nesse experimento é feita de ferro fundido (20 cm x 15 cm x 15 cm). Os eixos são feitos de aço AISI 1045, com 28 mm, tanto para o diâmetro do eixo principal, quanto, para o eixo secundário. E os pares engrenados (Figura 23) utilizados como multiplicadores, são engrenagens de dentes retos, feitas de aço AISI 1020, com seus parâmetros mostrados na Tabela 1.

Figura 23 - Caixa multiplicadora com o par engrenado.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 1 – Parâmetros do par engrenado.

Parâmetro	Pinhão	Coroa
Diâmetro Nominal	66 mm	126 mm
Número de Dentes	20	40
Módulo	3	3
Largura da Face	10 mm	10 mm
Dureza	68 HB	68 HB
Ângulo de Pressão	20°	20°

Fonte: Próprio Autor.

O tacômetro Minipa MDT-2238 foi utilizado no trabalho para as medições da velocidade de rotação dos eixos de entrada e saída, sendo possível a análise através

do contato mecânico ou sem contato, pelo método ótico. O tacômetro apresenta uma precisão de 0,05%, e tem sua faixa de medição de 0,5 a 19999 rpm.

Neste trabalho, o óleo lubrificante utilizado foi o óleo Renolin Unisyn CLP 320, cedido pela empresa FUCHS LUBRIFICANTES DO BRASIL LTDA, um óleo sintético, a base de PAO (Poli-Alfa-Olefina) e voltado para engrenagens da indústria eólica. Os quais apresentam excelente proteção contra desgaste, boa estabilidade de envelhecimento, alto índice de viscosidade (IV) e um ponto de fluidez muito baixo. Eles fornecem excelentes propriedades de liberação de ar, muito boa demulsibilidade e proteção confiável contra microfissuras e rachaduras. De acordo com Fernandes et al. (2016), Burkhart et al. (2017), Coronado e Wenske (2018), os óleos mais comuns usados em caixas de engrenagens de turbinas eólicas são a base de PAO. A partir das dimensões da caixa, usou-se 1L, mantendo a posição do contato das engrenagens imersa em óleo. As características físico-químicas do óleo estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades Físico-químicas do Renolin Unisyn CLP 320.

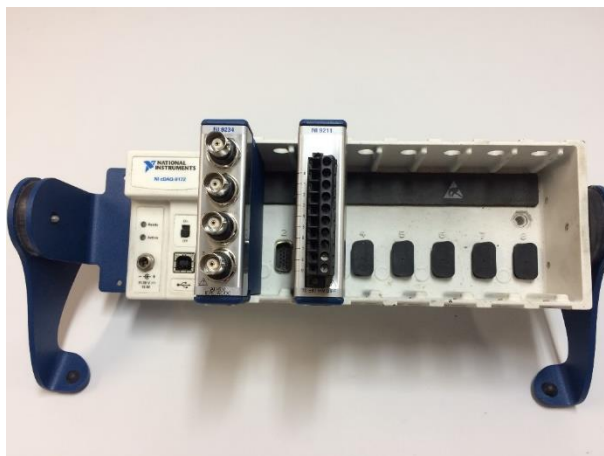
Parâmetro	Valor
Densidade até 15 °C [kg/m ³]	860
Temperatura do Fluido Pressurizado [°C]	260
Viscosidade Cinética até 40°C [mm ² /s]	320
Viscosidade Cinética até 100°C [mm ² /s]	35
Índice de Viscosidade (IV)	155
Ponto de Fluidez [°C]	-42

Fonte: Próprio Autor.

4.1.1 Medição de Vibração, Temperatura e Pressão Sonora

As medições da vibração e temperatura foram realizadas com um sistema de aquisição de dados da *National Instruments (NI)*. O chassi usado foi o NI cDaq-9132, o módulo condicionador dos sinais de vibração foi o NI 9234 com conversor analógico digital de 24 bits, apresentados na Figura 24. Bem como, o módulo NI 9211, para os sinais de temperatura.

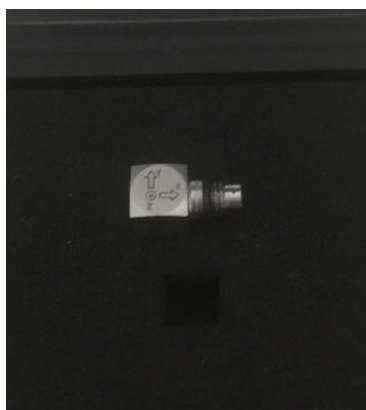
Figura 24 - Placa de aquisição NI 9207 com os módulos 9234 e 9211.



Fonte: Próprio Autor.

O acelerômetro utilizado foi o piezoelétrico triaxial da Brüel Kjaer 4520, ilustrado na Figura 25, com sensibilidades de 10,29; 10,11 e 10,35 mV/g para os eixos x, y e z, respectivamente. O termopar de contato do tipo K (Junção Chromel - Alumel), com faixa de medida $-40^{\circ}\text{C} \sim 204^{\circ}\text{C}$ ($-40^{\circ}\text{F} \sim 400^{\circ}\text{F}$) e precisão de $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ feito de alumínio foi inserido dentro da caixa, posicionado na parte inferior, o mais próximo possível do contato. Por fim, para obter os dados de vibração e temperatura utilizou-se o software Labview Signal Express 2013, no qual foi feita a definição dos parâmetros adotados pelos sensores, como: Alcance (Range), unidade de medida (G ou m/s^2), bem como sua sensibilidade, taxa de aquisição, entre outros.

Figura 25 - Acelerômetro triaxial da Brüel Kjaer 4520.



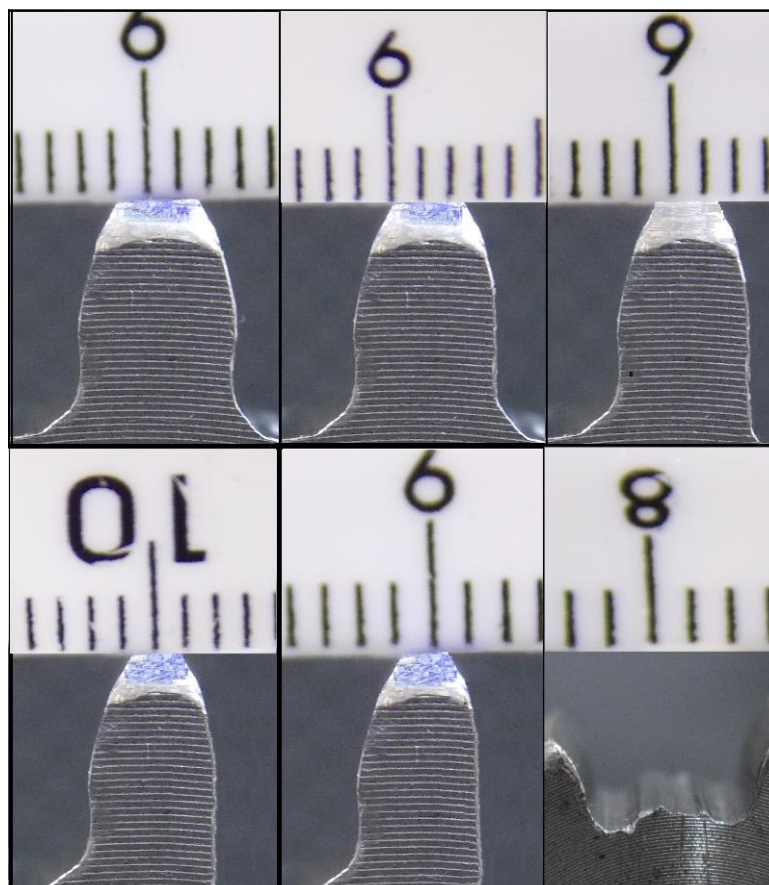
Fonte: Próprio Autor.

4.2 Procedimento Experimental

Para não haver interferências externas do ambiente no ensaio, o local foi fechado, evitando interferências e possíveis alterações no sensor de vibração e pressão sonora. A temperatura ambiente foi controlada por meio de um ar condicionado e mantida em 24°C. Os ensaios realizados foram divididos em duas etapas, alterando a engrenagem de teste. Primeiramente foi feito o monitoramento dos danos em uma engrenagem boa, condição 1, em perfeito estado, sem desgaste com o objetivo de avaliar a evolução do desgaste do pinhão para comparar os resultados com o próximo ensaio. A escolha de análise do pinhão foi feita em razão, tanto do pinhão ser o elemento crítico de maior desgaste num sistema de transmissão, quanto por questões de proximidade com o sensor. Os dados de vibração e de análise de óleo sob as diversas técnicas de processamento foram avaliados e comparados. Após os ensaios, as engrenagens foram inspecionadas, onde foi marcado um dente aleatório visando identificar o desgaste ou falha visível, utilizando a Câmera Digital Nikon Coolpix L830 Preta.

Posteriormente, foram realizados outros ensaios com uma engrenagem que apresentava um dente desgastado e um dente quebrado, respectivamente, as condições 2 e 3, como pode ser visualizado pela microscopia da Figura 26, esse desgaste foi feito com uma remoção controlada da largura do flanco do dente, durante 5 ensaios e a cada ensaio foi removido 0,5 mm da espessura do dente, através do processo de fresamento na lateral do dente, deslocando angularmente a engrenagem até que no fim todo o dente da engrenagem fosse removido.

Figura 26 - Microscopia Óptica dos processos de desgaste do perfil do dente.

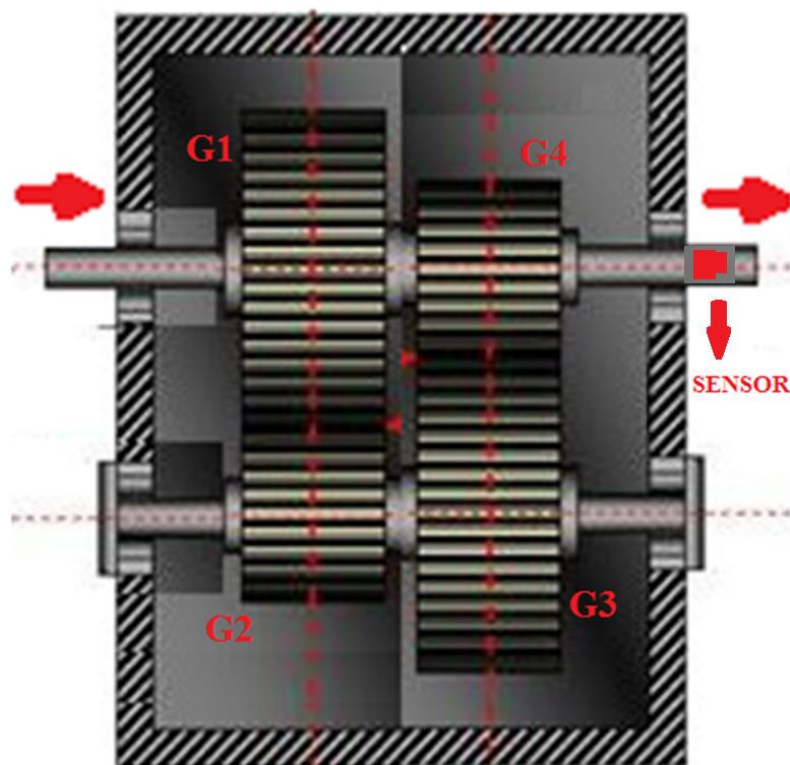


Fonte: Próprio Autor

O acelerômetro (Figura 27) foi posicionado na base do mancal do eixo de saída e os sinais eram processados pelo sistema de aquisição, o qual era conectado ao computador. A montagem com adesivo ou cola é bastante versátil já que existem vários tipos de adesivos para diferentes tipos de máquinas e superfícies. Esse tipo de fixação é um dos mais utilizados juntamente com a fixação por parafuso, pois pode ser utilizado para medições até 10000 ou 15000 Hz dependendo do acelerômetro e do tipo do adesivo, e a ressonância devido à montagem ocorre em frequências extremamente altas (Mathias, Medeiros, & Coelho, 2012), (Wilcoxon Research, 2015), (Dytran Instruments, 2015). O termopar foi instalado dentro da caixa, posicionado na parte inferior, o mais próximo possível do contato. O monitoramento da engrenagem mais próxima do sensor (G4) foi realizado durante o experimento de 40h para cada

engrenagem de teste usada, os sinais de vibração (m/s^2) foram adquiridos a cada 1h, de maneira contínua, com uma taxa de aquisição de 5000 amostras por segundo.

Figura 27 - Esquema do posicionamento do Acelerômetro.



Fonte: Próprio Autor

Os sinais de vibração adquiridos pelo Signal Express LabView eram exportados para o Matlab, onde foram processados. No *software* foram feitas as implementações dos códigos, na linguagem C e Java, da Transformada Wavelet. Após cada intervalo dos ensaios, imagens microscópicas foram retiradas do flanco dos dentes das engrenagens, mostrando a condição antes e depois, para que a evolução do dano pudesse ser observada. Como também foram coletadas amostras do óleo lubrificante após o final de cada intervalo.

4.2.1 Processamento de Sinais

Inicialmente, o Signal Express LabView fornece um arquivo no formato ASC onde estão os dados de vibração. O arquivo contém algumas informações

indesejadas referentes a coleta do sinal nas primeiras linhas, e, nas linhas seguintes, apresenta todos os dados separando em ponto e vírgula cada canal. Um pré-processamento foi utilizado para eliminar essas informações. Consequente, os dados foram exportados ao Matlab, onde foram separados os sinais em variáveis distintas para a análise de resultados.

A wavelet mãe utilizada neste trabalho é a de Morlet, devido sua grande utilização para o diagnóstico de falhas em engrenagem. Em seguida, a CWT foi aplicada ao sinal de vibração radial deste experimento, separando o sinal em frequência, tempo e magnitude. Em um estudo comparativo de várias funções wavelets, Zheng, Li e Chen, (2002) mostraram que a wavelet de Morlet é superior as outras funções para análise de sinais com características impulsivas periódicas, principalmente nos sinais das caixas de engrenagens devido a dentes defeituosos. Nesta situação, o sinal de vibração é dividido em versões deslocadas e em escala das wavelets originais (ou mãe). Lin e Qu (2000) chegaram a mesma conclusão, que os impulsos anômalos são sempre os sintomas de falhas e a wavelet de Morlet é muito semelhante a esses impulsos.

4.2.2 Análise do Óleo Lubrificante

Para a análise do óleo lubrificante, primeiramente foi monitorada a temperatura da caixa multiplicadora durante os ensaios de maneira contínua e periódica. A cada 8h (final do ensaio), foram coletadas amostras de óleo por uma seringa industrial de 20 ml e armazenada em *ependorfs*, feitos de PET (PoliTereftalato de Etila). Após isso, a mesma quantidade de óleo removida da caixa multiplicadora era adicionada com óleo novo. Por fim as amostras foram levadas para a realização dos ensaios de XRF (Fluorescência de Raio-X) e FTIR (Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier).

4.2.2.1 Fluorescência de Raio-X (XRF)

A espectrometria de fluorescência de raios X, do inglês *X-Ray Fluorescence (XRF)*, é uma técnica não destrutiva que tem como objetivo identificar os elementos químicos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra.

A técnica se baseia na incidência de radiação eletromagnética de alta frequência, que tem comprimento de onda na faixa de 0,003 a 3 nm, produzidos pelo fenômeno fotoelétrico, provocando a absorção de energia e assim remoção de elétrons no material, que por sua vez se rearranja e emite uma radiação secundária através de fótons denominada fluorescência. Essa radiação é emitida pelos elementos constituintes da amostra. É uma técnica versátil, podendo ser aplicada em amostras do estado sólido e líquido, sem necessitar de tratamento exaustivo para a preparação destas matrizes, oferecendo também a grande vantagem de ser uma técnica analítica não destrutiva (SKOOG et al., 2009 *apud* SANTOS et al., 2013). A análise foi feita com 2 mL de cada amostra no equipamento EDX-720/800HS Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer da Shimadzu no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da UFRN.

4.2.2.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - (FTIR)

A espectroscopia de Infravermelhos, do inglês Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), quando aplicada em óleos lubrificantes, tem como objetivo identificar qualitativamente a composição do mesmo, e detectar mudanças nas estruturas químicas durante o uso ou estocagem.

As análises foram realizadas no LAMMEN - Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica da ECT-UFRN em um espectrômetro BRUKER, modelo: FT-IR VERTEX 70. Os espectros foram obtidos sob as seguintes condições: faixa ($400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$); resolução (4 cm^{-1}) e número de scans (16).

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias utilizadas para a consecução dos resultados a partir do monitoramento das condições utilizando a técnica de análise de vibrações e análise de lubrificantes dos três ensaios propostos. As discussões e resultados serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Microscopia Óptica

As microscopias ópticas das engrenagens boa e defeituosa, em função do tempo de ensaio: 8h (a), 16h (b), 24h (c), 32h (d) e 40h (e), são apresentadas nas Figuras 28 e 29, respectivamente.

Figura 28 - Microscopia Óptica da Engrenagem Boa.

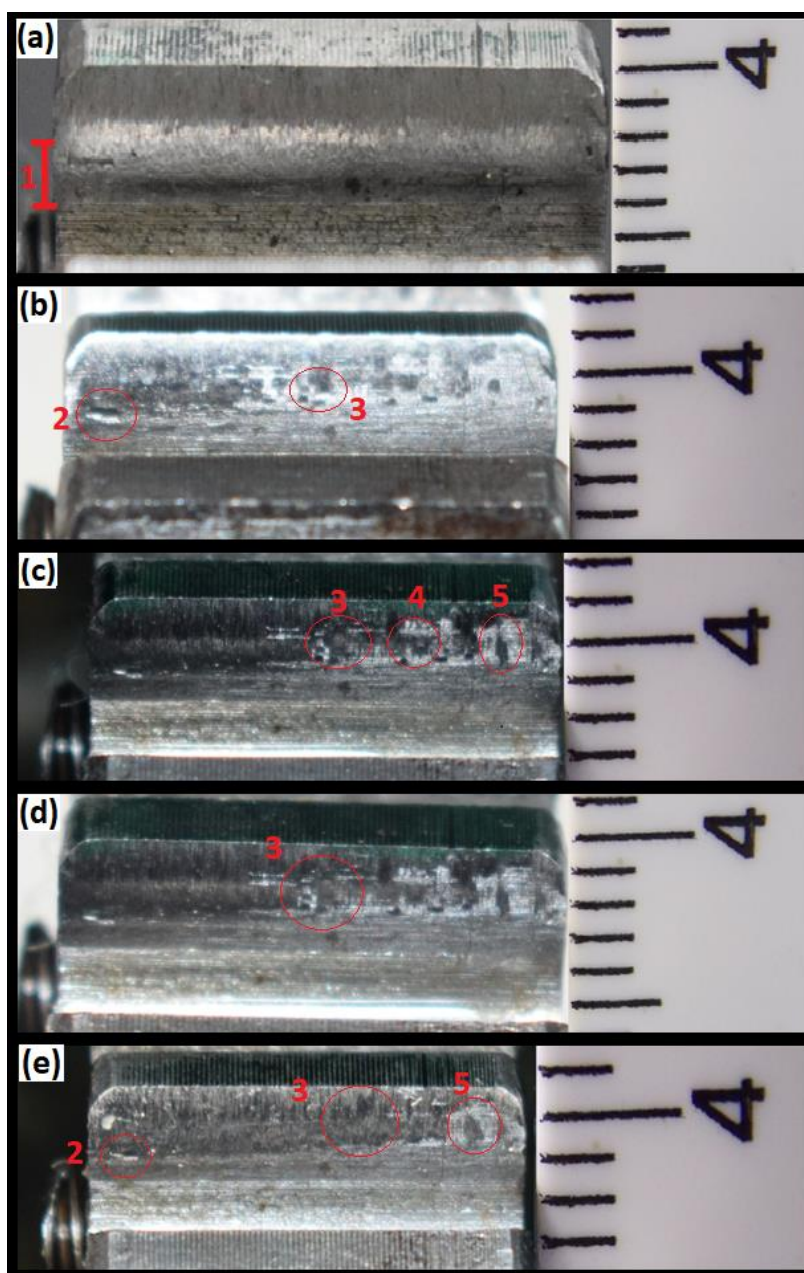
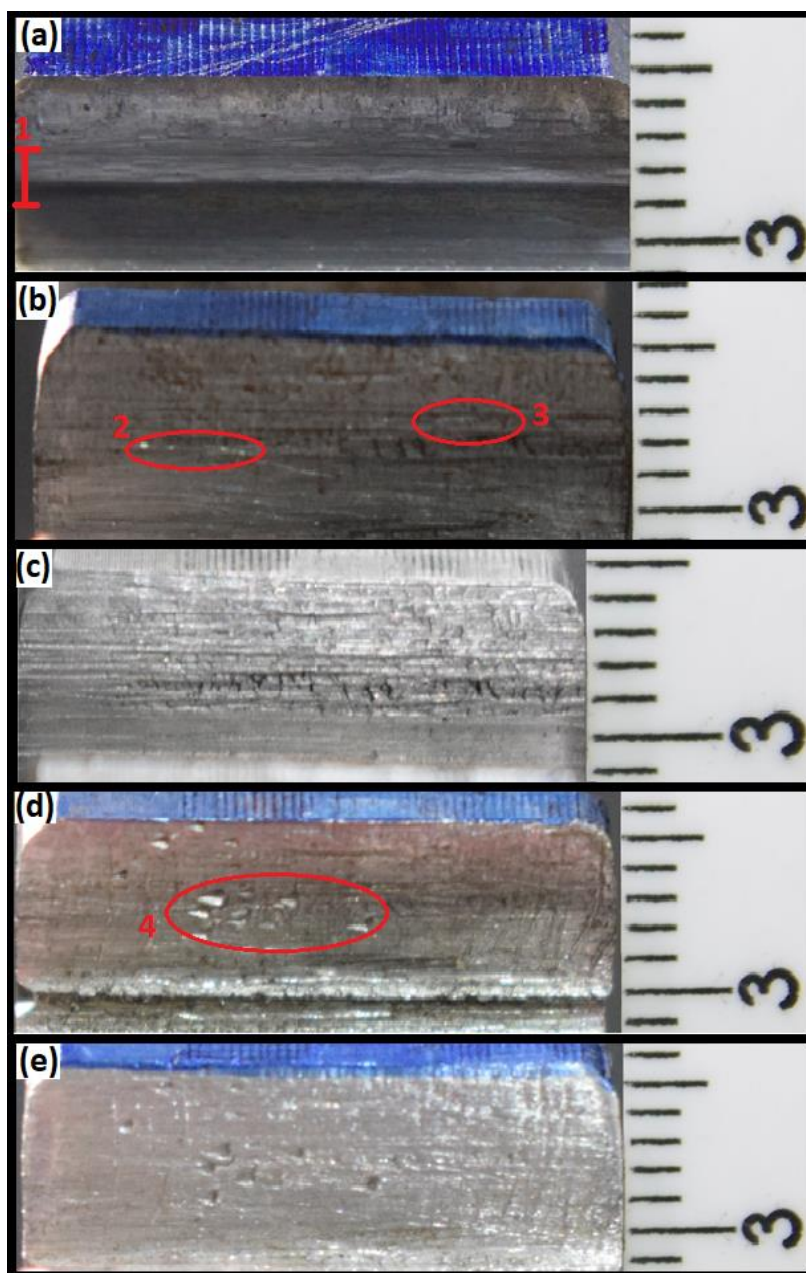


Figura 29 - Microscopia Óptica da Engrenagem Defeituosa.



Analisando a Figura 28 (a), vê-se a presença de desgaste por *scuffing* localizado na região do contato (Ponto 1), bem como um primeiro foco de desprendimento de material. Na Figura 28 (b) é observado os danos causados por *micropitting* (Pontos 2 e 3), sendo o ponto 2 mais severo e posteriormente o aparecimento de mais pontos, como o 3, 4 e 5 na Figura 28 (c) formando sulcos ao longo das linhas de contato, onde efetivamente ocorre o contato durante o engrenamento. Possivelmente a falta de lubrificação permitiu o contato metal com

metal, causando a aderência das asperezas da superfície. Para Höhn e Michaelis (2004) *apud* Lohmann (2016) os processos de desgaste nas engrenagens são iniciados por uma determinada entrada de energia, que surge do atrito, dentro do espaço não ocupado por lubrificação, durante o contato. O desgaste começa pelo *scuffing* na raiz do dente do pinhão, porque a ponta do dente da engrenagem acionada se choca com a outra e arranca o material. Aparentemente, os pontos 3 e 4 se unem formando uma região ainda maior de desgaste. Errichello (2012) observou que as fissuras microscópicas (*scuffing*) são iniciadas em asperezas locais, crescem e se ligam entre si, o que leva à quebra de poros microscópicos. Esse fenômeno evolui sendo chamado de *micropitting* e as áreas afetadas do flanco do dente mostram a aparência cinza mate típica. Chegando ao final, na Figura 28 (e), o ponto 2 mostra uma condição clara de *pitting*, enquanto que 3 e 5 estão em condições avançadas de desgaste. Para Lohmann (2016) especialmente na fronteira entre a área de *micropitting* e não *micropitting*, o material é estressado e as tensões de acordo com a teoria de Hertz são intensificadas no ponto, porque essa transição da área do flanco mais desgastada para a menos desgastada é frequentemente afiada, o que deteriora significativamente as condições de contato. De acordo com Batista e Dias (2003) e Raadnui (2019), os danos de *pitting* e *scuffing* estão localizados nas regiões do diâmetro primitivo, o que coincidiu com os danos encontrados nas análises de imagem das engrenagens deste trabalho.

A Figura 29 (a) mostra novamente a linha de contato (1), com os desgastes por *scuffing* e *micropitting* visivelmente mais acentuados e que esses sulcos apresentam uma deterioração ainda maior nas Figuras 29 (b) e 29 (d), com a presença de *pitting*, como mostra os pontos 2 e 3. Os danos causados por *pitting* observados no ponto 4 foram mais severos e com maior intensidade na engrenagem defeituosa em relação a engrenagem boa, o que também pode ser visto nos respectivos espectros de frequência. Weibring, Gondecki e Tenberge (2019) concluíram que com um número crescente de rotações sob carga contínua, a forma do perfil do desgaste aumentava e o *scuffing* era mostrado no flanco do dente próximo à raiz. Também foi visto pelos autores que uma trinca surgiu causada pelo desgaste contínuo nessa área pelo fenômeno do *pitting* e que foi inicialmente derivado de uma área típica de *micropitting* na raiz do dente. De acordo com os resultados observados por Liu *et al.* (2019), as superfícies escuras estão associadas ao fenômeno do desgaste

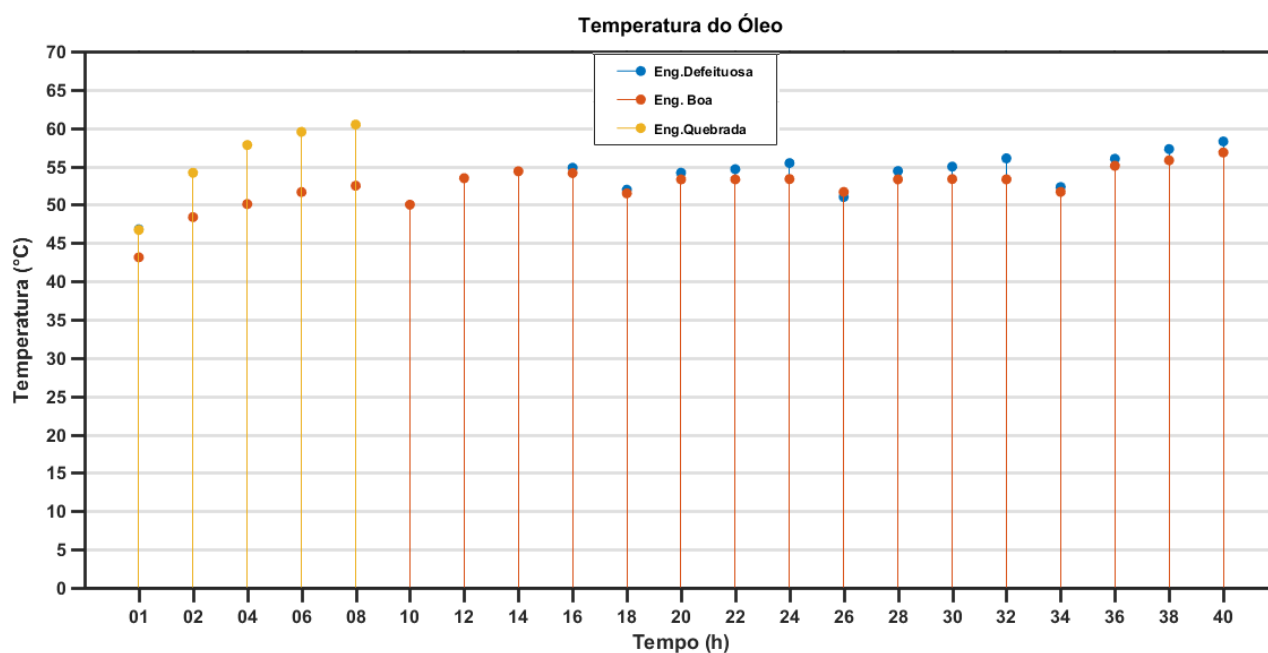
tribooxidativo protetor, intensificado pela temperatura na região de contato e atribuído à geração de compostos inorgânicos de Fe_3O_4 e Fe_2O_3 .

5.2 Análise do Óleo Lubrificante

5.2.1 Temperatura do Óleo

Outra abordagem da análise de falhas aplicada a manutenção preditiva consiste em explorar a análise da temperatura do óleo para detectar condições operacionais anormais da caixa de engrenagens. Todos os sistemas mecânicos em funcionamento geram perdas de energia que acabam induzindo o aumento de temperatura no sistema. Dessa forma, um sistema que apresenta desgaste na superfície de contato gera mais perdas de energia e, em seguida, um comportamento térmico se torna diferente (HÖHN; MICHAELIS, 2004). As temperaturas foram monitoradas e a Figura 30 ilustra a temperatura média do óleo durante os ensaios das condições 1, 2 e 3, descritas no procedimento experimental.

Figura 30 - Temperatura do óleo nas diferentes condições.



De maneira geral, é possível observar o aumento da temperatura com o passar do tempo para as condições 1, 2 e 3. A condição do dente quebrado apresentou temperatura de óleo (61°C) superior a engrenagem do dente desgastado (condição 2), como também a engrenagem boa (condição 1). Este comportamento, segundo Touret et al. (2018), pode ser atribuído as interações que ocorrem no contato das partes móveis. As engrenagens e os rolamentos geram perdas de energia, com isso, parte do material despreendido pelo contato interage com o lubrificante durante a operação, aumentando ainda mais o desgaste, tornando-o abrasivo, e consequentemente ocorre o aumento da temperatura

É possível visualizar também que os períodos de 01h, 10h, 18h, 26h e 34h são os períodos de “*running-in*”, em que ocorrem as deformações nas asperezas das superfícies em contato com o movimento relativo entre si. Estas regiões são mais sensíveis nos gráficos. Analisando as engrenagens, boa e defeituosa verifica-se um comportamento semelhante na temperatura até o intervalo de 16h, a partir disso a temperatura da condição 2 vai se tornando maior ao passar do tempo. Coincidentemente, essa diferenciação na temperatura ocorreu no mesmo intervalo em que foi possível visualizar os pontos de *pitting* na condição 2, (Figura 29 b). Höhn e Michaelis (2004) estudaram a influência da temperatura do óleo sobre as falhas em engrenagens. Eles afirmam que o aumento da temperatura do óleo usado no contato entre engrenagens, diminui a viscosidade do óleo, ocorrendo uma redução da espessura do filme de óleo e, portanto, um agravamento das condições de lubrificação, ou seja, o aumento da temperatura sempre leva a um filme mais fino, o que consequentemente aumenta os choques.

5.2.2 Fluorescência de Raios - (XRF)

Os analisadores de Fluorescência de Raios X (XRF) são capazes de quantificar ou qualificar praticamente qualquer elemento químico, menos os elementos com número atômico baixo, pois, apresentam baixa sensibilidade analítica e baixo valor de energia de emissão, como por exemplo: oxigênio e hidrogênio. Portanto são mais difíceis de serem determinados por FRX (SKOOG et al., 2009). Na Tabela 3, podem-se verificar as composições encontradas no óleo sintético Renolin Unisyn CLP 320 durante os ensaios.

Tabela 3 – Composições encontradas no óleo sintético por tempo de ensaio.

Renolin Unisyn CLP 320	Eng. Boa	Eng. Defeituosa	Eng. Quebrada
Referência	S – 96.807 % Fe – 1.902 % Br – 1,291 %	S – 96.807 % Fe – 1.902 % Br – 1,291 %	S – 96.807 % Fe – 1.902 % Br – 1,291 %
8h	S – 97.690 % Fe – 2.310 %	S – 98.046 % Fe – 1.954 %	S – 69.324 % Fe 21.577 % Cu – 5.791 % Zn – 3.308 %
16h	S – 98.474 % Fe – 1.526 %	S – 95.426 % Fe – 2.423 % Cu – 2.151 %	
24h	S – 92.651 % Fe – 7.349 %	S – 95.232 % Fe – 2.903 % Cu – 1.865 %	
32h	S – 96.18 4% Fe – 2.185 % Br – 1.631 %	S – 95.604 % Fe – 2.542 % Cu – 1.853 %	
40h	S – 90.039 % Fe – 8.479 % Br – 1.482 %	S – 95.604 % Fe 3.170 % Zn – 1.213 %	

Pela Tabela 3, a análise de elementos químicos mostra que a maioria dos elementos analisados pouco se alteram ao longo do ensaio. Contudo, segundo Lago (2007) a presença de metais como ferro, cobre e zinco que aparecem no óleo são originados do desgaste das ligas metálicas que compõem o material das engrenagens. Dessa forma, as concentrações desses metais tendem a aumentar com o uso do óleo. Pode-se observar que todas as amostras apresentaram Ferro (Fe) em suas composições proveniente tanto do óleo por ser sintético, como também indicando a presença do desgaste ocorrido no flanco dos dentes.

5.2.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - (FTIR)

Na perspectiva de verificar algumas mudanças nas vibrações dos grupos funcionais orgânicos e se existe mudanças significativas no óleo lubrificante com a adição de nanopartículas após ensaios tribológicos, os óleos lubrificantes foram

analisados pelo FTIR. As Figura 31, 32 e 33 apresentam os espectros das vibrações dos lubrificantes para as condições 1 (Engrenagem boa), 2 (Engrenagem defeituosa) e 3 (Engrenagem quebrada), respectivamente.

Figura 31 - Espectros das vibrações por FTIR do lubrificante para a engrenagem boa.

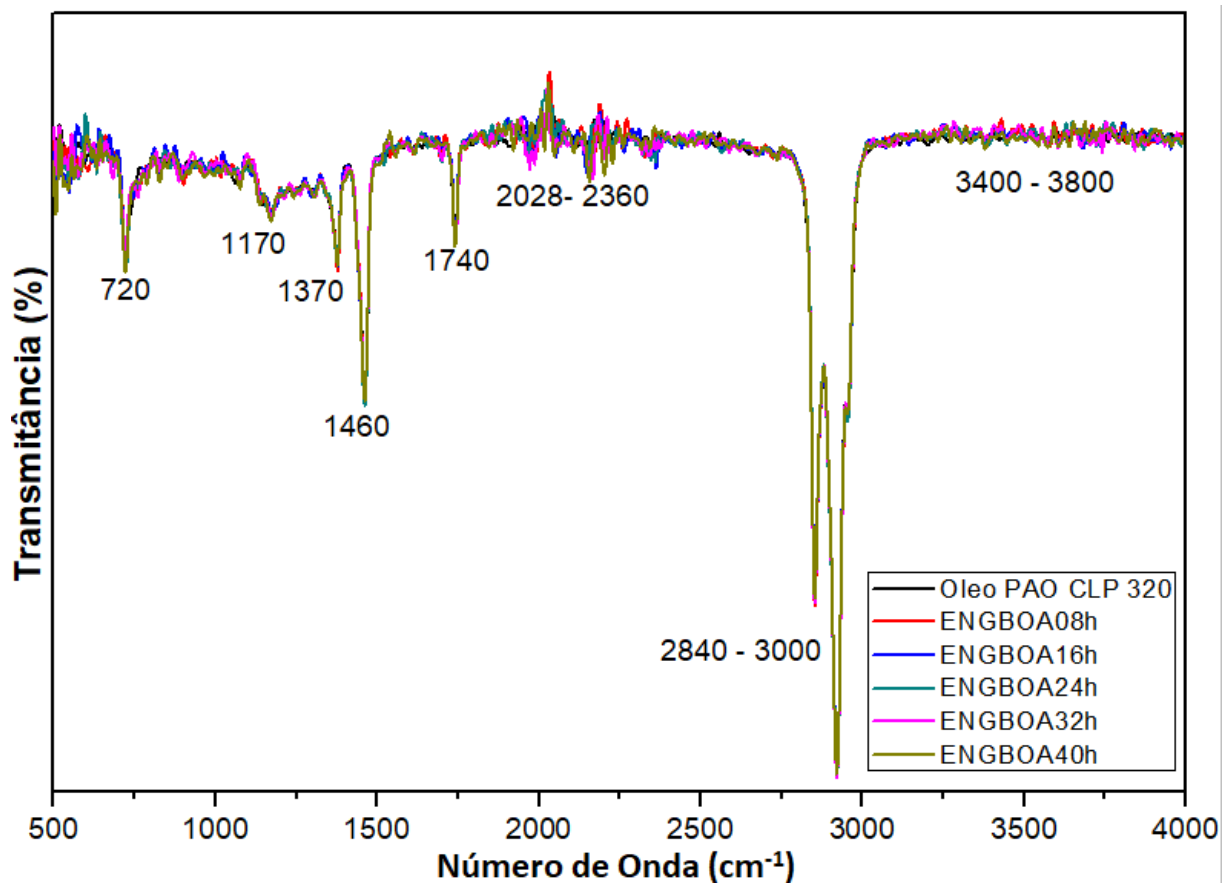
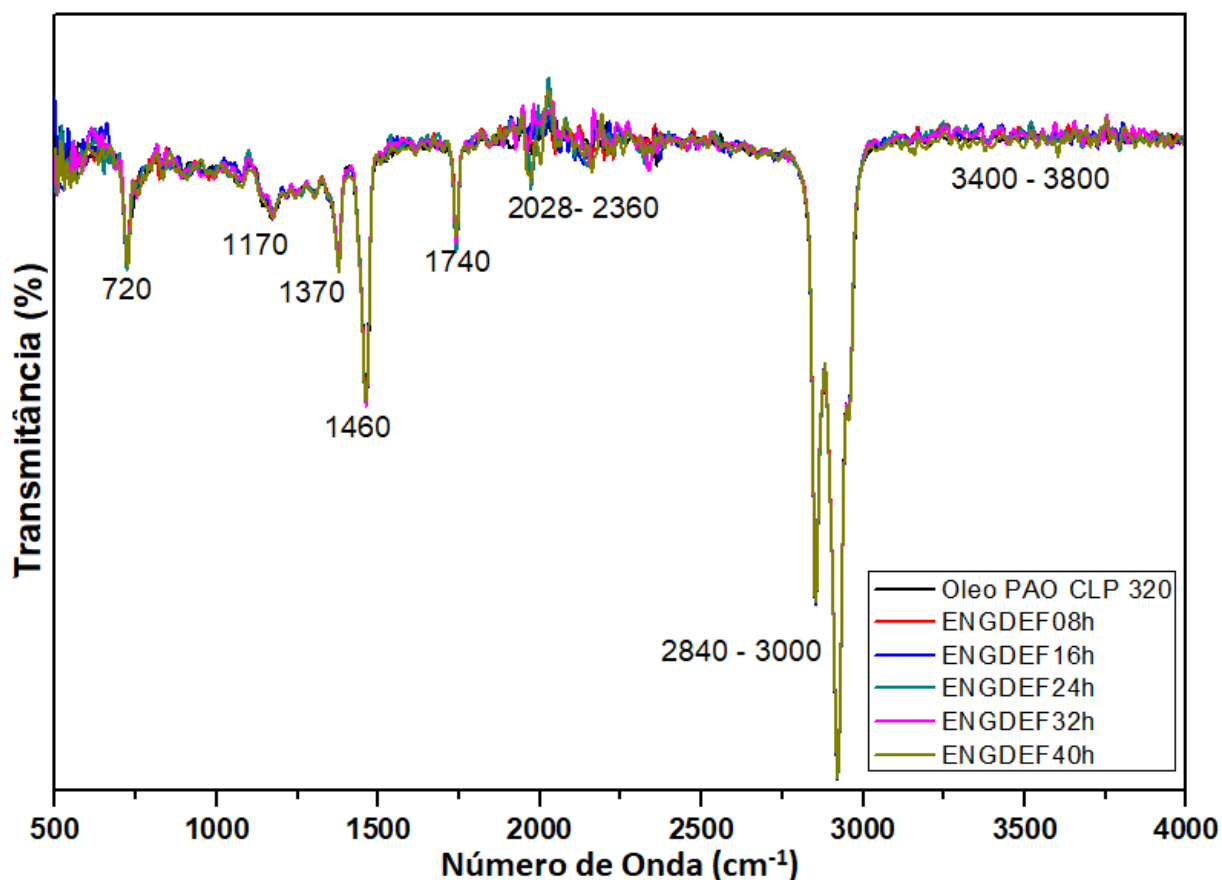
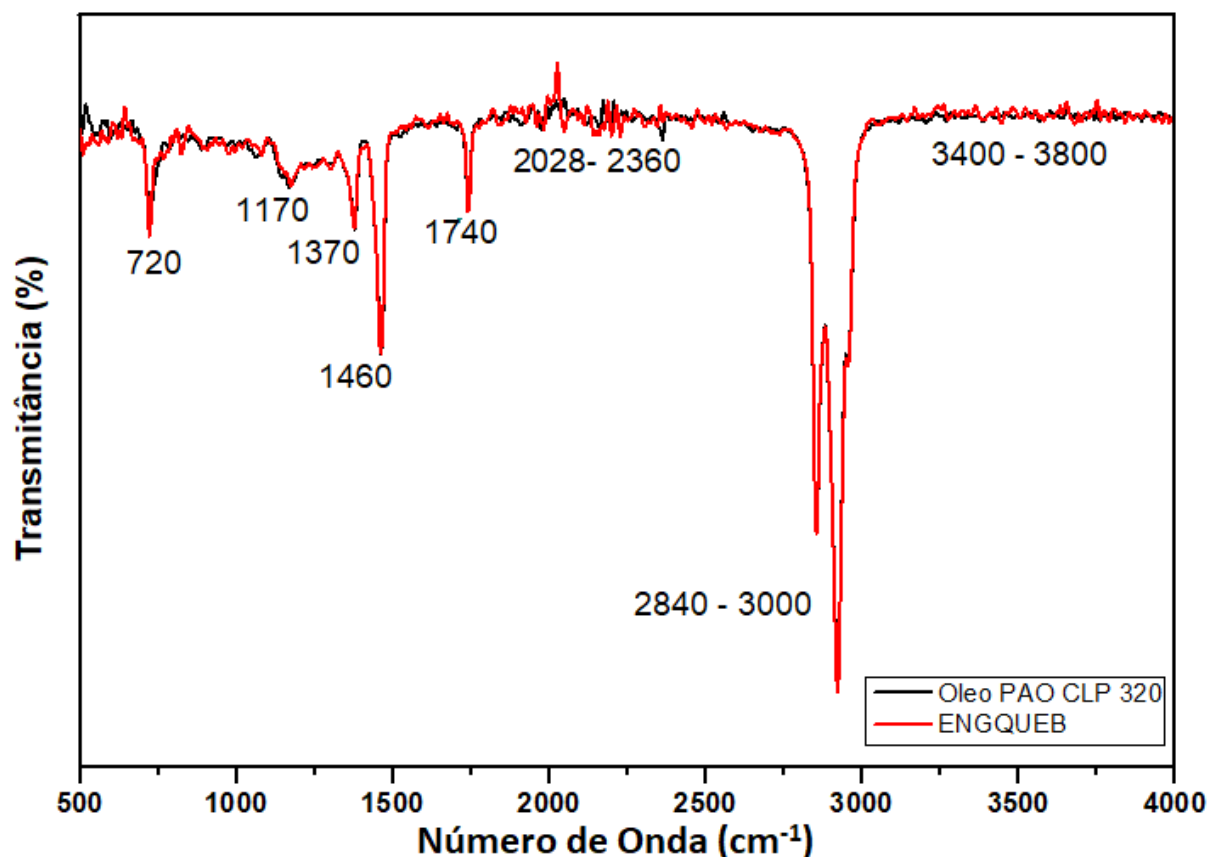


Figura 32 - Espectros das vibrações por FTIR do lubrificante para a engrenagem defeituosa.



Os espectros de infravermelho dos lubrificantes nas Figuras 31, 32 e 33, para as condições 1 (Engrenagem boa), 2 (Engrenagem defeituosa) e 3 (Engrenagem quebrada), respectivamente, demonstraram ser bastante semelhantes, provavelmente pelo fato do percentual de contaminação ser muito baixo. De acordo com Lutz, Jungk e Lauer (2012) que fizeram um estudo sobre o comportamento de fluidos lubrificantes durante toda a vida útil da caixa multiplicadora de um aerogerador é observado que os espectros de FTIR dos óleos de PAO “antes” e “depois” são muito semelhantes e não mostram qualquer variação que possa estar ligada ao desgaste ocorrido na caixa.

Figura 33 - Espectros das vibrações por FTIR do lubrificante para a engrenagem quebrada.



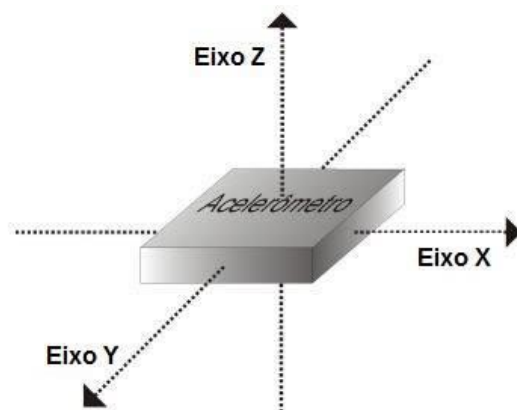
5.3 Análise de Vibração

5.3.1 Domínio do Tempo

A análise das características do sistema físico pode ser inferida da representação temporal da vibração (m/s^2). Mudanças nas amplitudes de vibração indicam que o sistema sob atrito é não linear, ou seja, há mudanças na condição do contato. De acordo com Dautzenberg e Kals (1986), a forma do sinal teórico de aceleração da vibração é diferente do sinal obtido experimentalmente, o que pode ser atribuído às alturas e larguras de distribuição dos obstáculos presentes nas superfícies sob contato. Como um sensor triaxial foi utilizado, adotou-se o Eixo Z para ser objeto de pesquisa, pois é o eixo na mesma linha de ação do contato engrenado (Figura 34), como também pelo motivo do eixo Z apresentar a maior variação em sua amplitude. Vamsi, Sabareesh e Penumakala (2019) observaram que a componente Z

do acelerômetro tri-axial apresentou variação significativa com uma tendência crescente em comparação com outros componentes da aceleração.

Figura 34 - Posicionamento dos eixos em relação ao sensor.



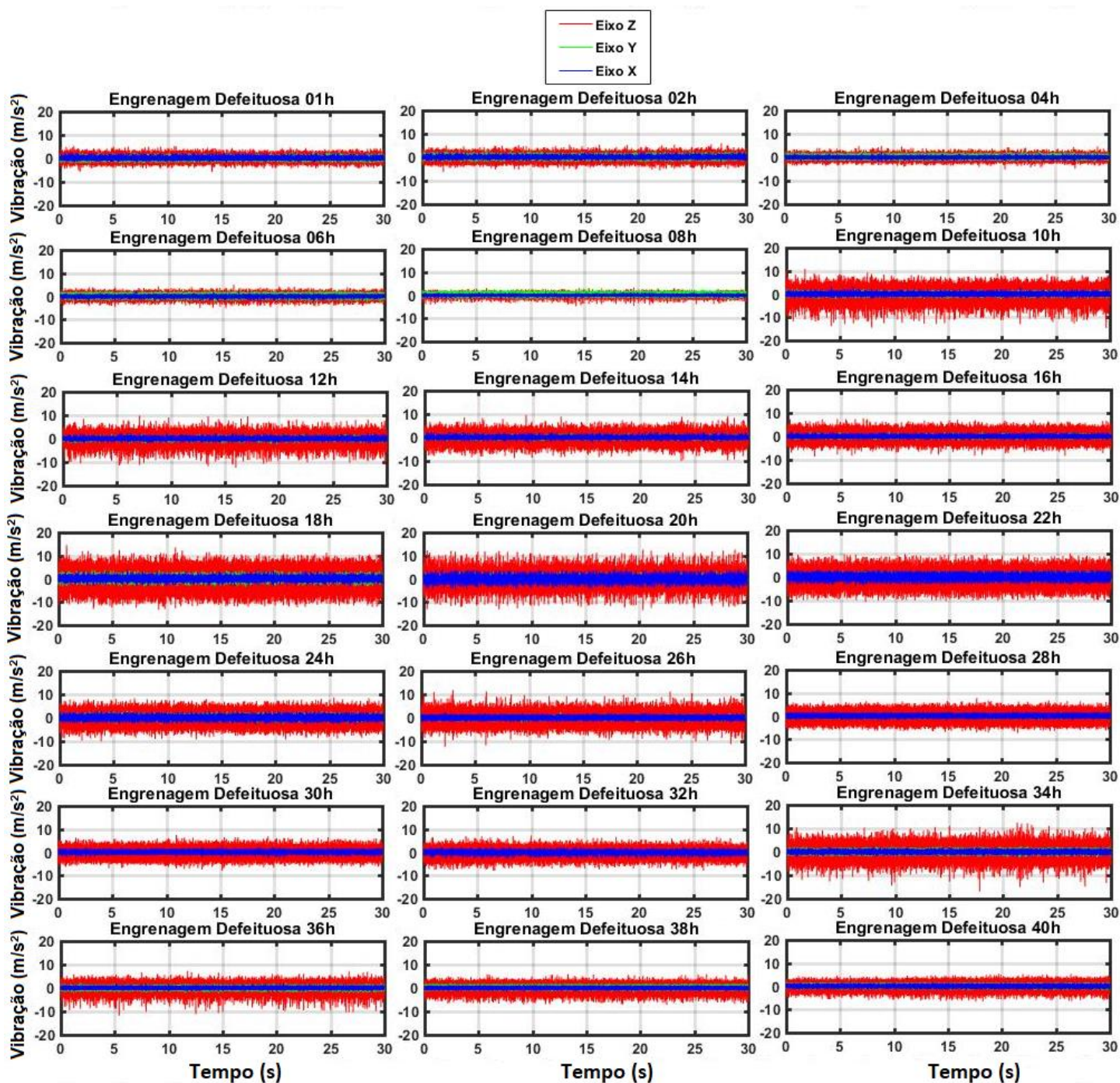
Fonte: (CINEL, 2017)

As assinaturas dos sinais de vibração (m/s^2) obtidas durante o contato do par engrenado foram processados para a geração dos gráficos (Figuras 35, 36 e 37), em função do tempo, para uma janela de 30s, em intervalos de 2/2h, tanto para condição da engrenagem boa (condição 1), quanto defeituosa e quebrada (condições 2 e 3). Inicialmente foi adotado um período de amaciamento de 2h para a estabilização da rotação.

Figura 35 - Sinais de vibração da engrenagem boa.



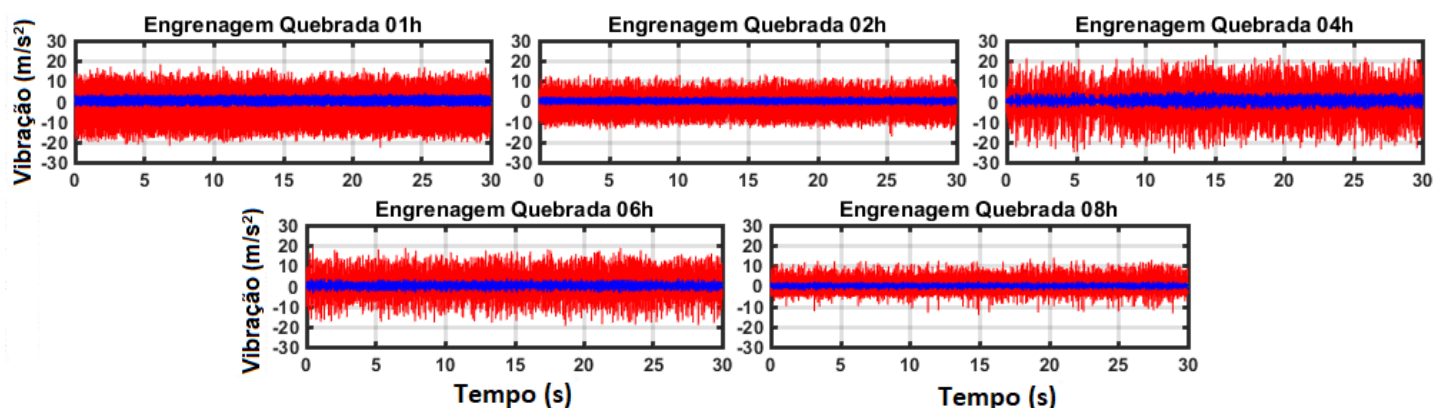
Figura 36 - Sinais de vibração da engrenagem defeituosa.



A análise temporal, nas Figuras 35, 36 e 37 mostrou que após o período de amaciamento “*Running*”, o comportamento para as condições 1 (Engrenagem boa) e 2 (Engrenagem defeituosa) são bem semelhantes, inclusive com um aumento da amplitude a partir das 10h que ocorre tanto para a engrenagem boa, quanto para a

engrenagem defeituosa. A situação crítica da engrenagem quebrada apresentou um padrão bastante irregular, mas que as 8h se estabiliza.

Figura 37 - Sinais de vibração da engrenagem quebrada.

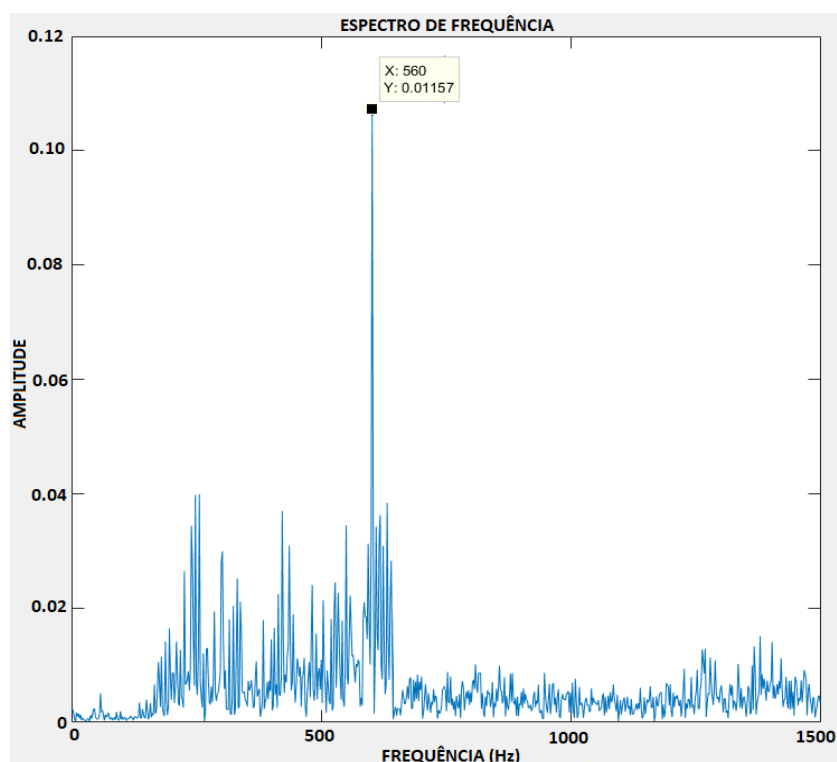


Como visto, a análise do domínio do tempo não forneceu informações úteis sobre o monitoramento e possível manutenção do sistema pois normalmente esconde informações relevantes sobre o sinal. De acordo com Goyal e Pabla (2015) essas informações podem ser melhor interpretadas no domínio da frequência.

5.3.2 Domínio da Frequência

5.3.2.1 Frequência de Engrenamento

A frequência de engrenamento ocorre a cada engrenamento e seu valor é dado pelo produto do número de dentes pela rotação (Equação 1.2). Neste trabalho, a coroa tem 40 dentes e uma rotação de 14 Hz e frequência de engrenamento de 560 Hz. A frequência de engrenamento calculada é mostrada no espectro de frequência do sinal da Figura 38. De acordo com o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima analisada. Para evitar erros de *aliasing*, o teorema de Nyquist é atendido se a frequência de amostragem for maior que 1020 Hz.

Figura 38 - Espectro de Frequência do Sinal.

Como pode ser visto na Figura 38, a frequência de engrenamento calculada 560 Hz foi observada no espectro de frequência de um pulso do sinal. Segundo Kundu, Darpe e Kulkarni (2019), o sinal de vibração gerado por uma engrenagem está associado à frequência de rotação do eixo, a frequência de engrenamento (GMF), os harmônicos da GMF e bandas laterais espaçadas em torno da GMF.

Para analisar as falhas das engrenagens na caixa multiplicadora foi aplicada a Transformada Wavelet Contínua para as duas condições, com uma janela de 30s a cada 2h de ensaio, analisando sua GMF 1 (560 Hz) e seus harmônicos: GMF 2 (1020 Hz), GMF 3 (1580 Hz), GMF 4 (2240 Hz), GMF 5 (2800 Hz), GMF 6 (3360 Hz) e GMF 7 (3920 Hz) .

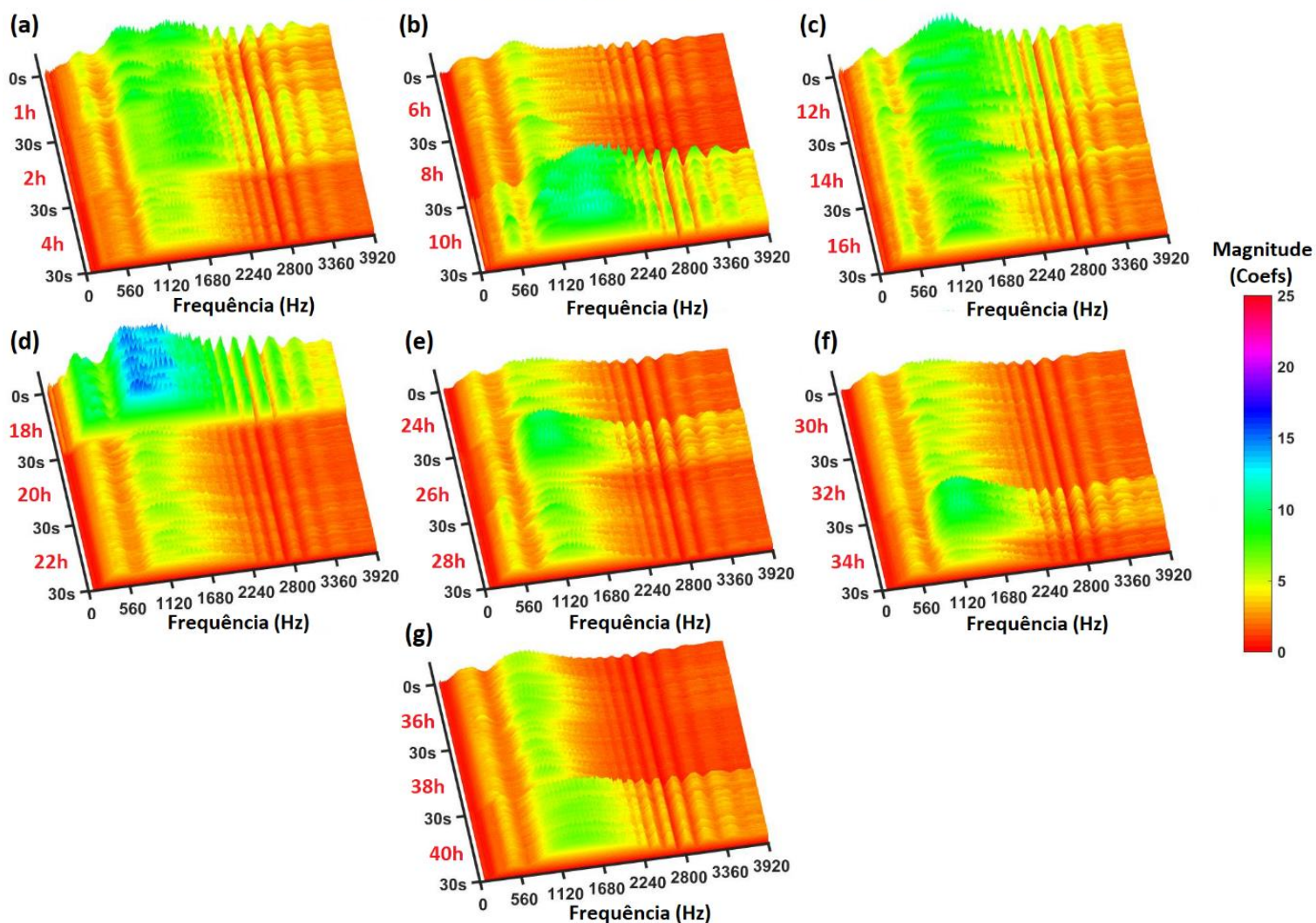
5.3.3 Análise Wavelet: Condição 1

Inicialmente é observado magnitudes distribuídas durante o início da vida útil da engrenagem boa até o amaciamento dos dentes. Na Figura 39 são apresentados

os mapas das frequências dos primeiros sinais de vibração coletados da bancada em que foram aplicadas a Transformada Contínua Wavelet.

Figura 39 - Espectro da CWT para Engrenagem Boa de 1h a 40h.

ENGRENAGEM BOA - EIXO "Z"



No espectro CWT da engrenagem boa (Figura 39) é possível identificar as frequências características do sistema: frequência de engrenamento GMF (560 Hz), harmônicos da frequência de engrenamento (1120 a 3920 Hz) mais bandas laterais. As frequências da rede elétrica, de rotação do eixo, bem como dos mancais de deslizamento não se destacam, o que nos garante que houve boas condições de montagem e concentricidade do par engrenado, como também de aterramento do

sistema. Esta avaliação foi importante pois indica que as variações em torno da GMF se darão basicamente pela evolução do desgaste da engrenagem (pinhão).

Também é possível observar na Figura 39 uma diminuição progressiva da magnitude do sinal durante as horas após o período de amaciamento, em torno da GMF 2 e GMF 3. Essa diminuição é mostrada nos períodos de 2h, 4h, 6h e 8h. Ao chegar às 10h essa magnitude nas frequências aumenta novamente em relação às horas anteriores em todas as GMF's. Esse aumento após às 8h no espectro de frequência pode estar ligado ao agravamento do dano no perfil de desgaste, mostrado na Figura 28 b, com o aparecimento de possíveis danos de *pitting* (pontos 2 e 3) localizado nas região da linha de contato. Esse comportamento é explicado pela ocorrência de contato deslizante e rolante de um dente em outro dente durante o engrenamento, juntamente com a alteração da rigidez efetiva do engrenamento, gerando a vibração. O aumento do desgaste no dente da engrenagem reduz a rigidez e a modificação no perfil do dente que resulta em uma fonte adicional de excitação, levando a um aumento no nível de vibração (KUNDU, DARPE E KULKARNI, 2019). Contudo, esse perfil de alta magnitude continua até às 12h de ensaio e se torna ainda mais evidente nas 18h do ensaio, em todas as frequências de engrenamento, coincidentemente com a microscopia das 24h, mostrada na Figura 28 c, em que foi visualizado o agravamento do dano no ponto 3, 4 e 5, provavelmente pontos de *pitting*. Pereira (2018) aplicou a TW à um par engrenado e observou comportamento similar após o período de amaciamento de uma engrenagem boa, em que havia um aumento na magnitude, referente ao início da vida útil da engrenagem, principalmente em relação a sua frequência de engrenamento.

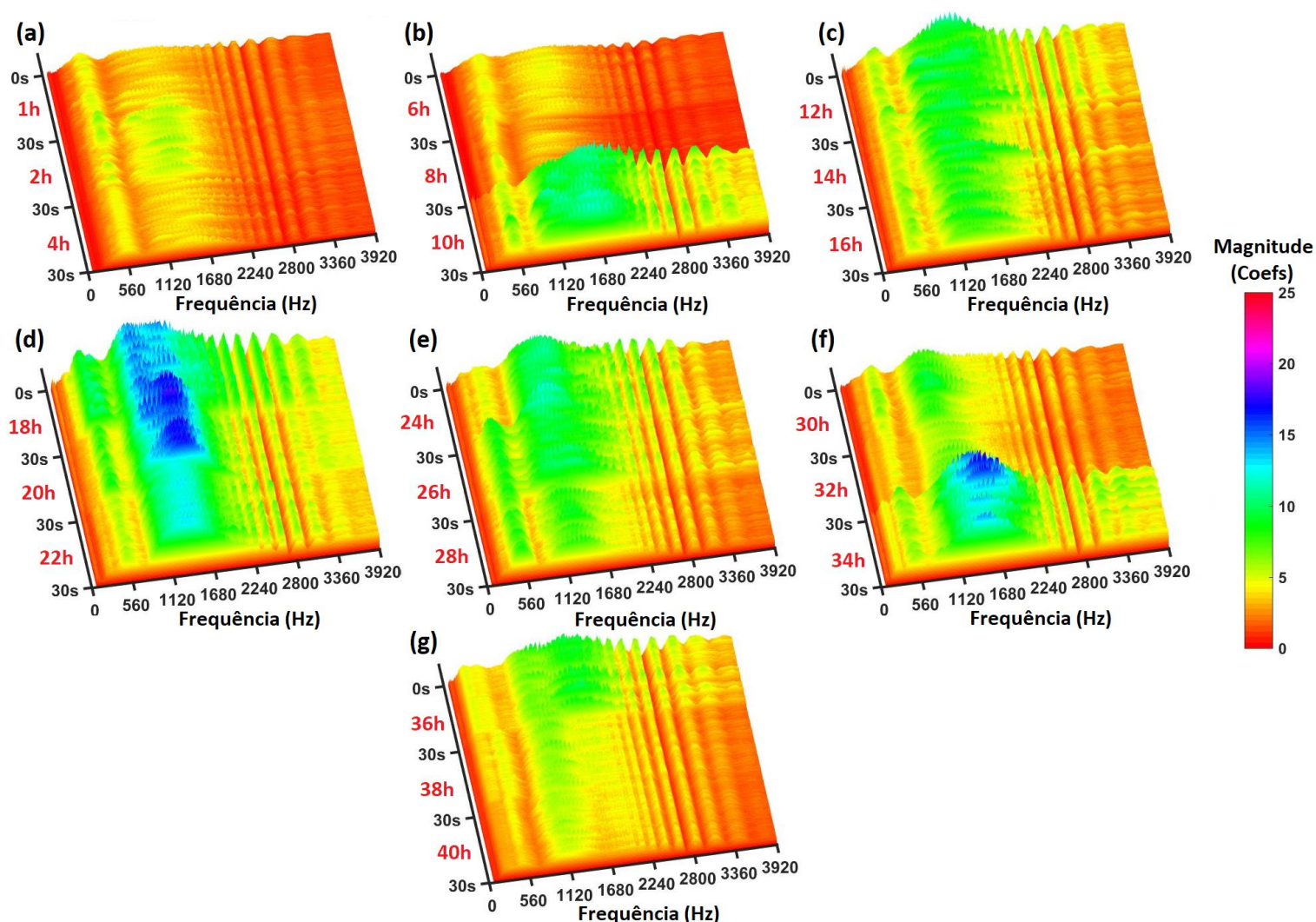
Durante o período de 20h até às 26h foi possível notar a diminuição gradativa da magnitude do sinal. Neste período são observados picos distribuídos principalmente pelas GMF fundamental (560 Hz) e seus harmônicos GMF 2 (1020 Hz) e GMF 3 (1680Hz). Essa diminuição gradativa é mostrada na Figura 28 d e 28 e. Esse comportamento é notadamente repetido no intervalo de 28h a 32h, como também nos intervalos de 34h a 40h, o que pode estar no fato da ação intensificadora dos desgastes simultâneos que estão ocorrendo.

5.3.4 Análise Wavelet: Condição 2

A condição 2 consistiu na remoção de partes do flanco do dente do pinhão para simular o desgaste, como está descrito no Capítulo 4. É possível visualizar o período de amaciamento com magnitudes mais baixas distribuídas durante o início da vida útil da engrenagem e até o amaciamento dos dentes, como visto na Figura 40.

Figura 40 - Espectro da CWT para Engrenagem Defeituosa de 1h a 40h.

ENGRENAGEM DEFEITUOSA - EIXO "Z"



Para Al-Arbi (2012), esse comportamento do sinal de vibração de baixa amplitude no estágio inicial da falha é fortemente mascarado por outras fontes de vibração da caixa de engrenagens e não pode ser usado diretamente na detecção de

falhas. O nível de ruído de fundo no sinal de vibração bruto também é muito alto tornando as informações imprecisas especificamente àquelas relacionadas a danos nos dentes.

O espectro CWT da engrenagem defeituosa é mostrado na Figura 40. É possível novamente observar as frequências características do sistema: frequência de engrenamento GMF (560 Hz) e harmônicos da frequência de engrenamento (1120 a 3920 Hz). Além disso, é notável que após o período de amaciamento “*Running*” em torno de 2h, o comportamento para as condições 1 e 2 são bem semelhantes, até um aumento (3x) da amplitude a partir das 10h que ocorre na GMF e principalmente no 2° e 3° harmônico da GMF, tanto para a engrenagem boa, quanto para a engrenagem defeituosa. Segundo Koda (2009) o comportamento supracitado durante o período de running são as marcas do *scuffing*, o que pode estar atribuído as baixas amplitudes iniciais. Em seus ensaios foi identificado a formação de *pitting* apenas após 8h, uma condição de desgaste mais severa, com mais imperfeições, a qual pode estar atribuída ao aumento dos choques e assim, ao aumento da magnitude no espectro de frequência do sinal. Contudo o comportamento para a engrenagem boa é suavizado após as 18h de ensaio (Figura 39), o que não é observado na engrenagem defeituosa (Figura 40), pelo contrário, no período de 20h foi possível notar a maior magnitude da GMF3 do sinal, o que pode estar ligado tanto com a diferenciação da temperatura a partir das 16h da Figura 30, como com a presença de *pitting*, como mostra a Figura 29 b, nos pontos 2 e 3.

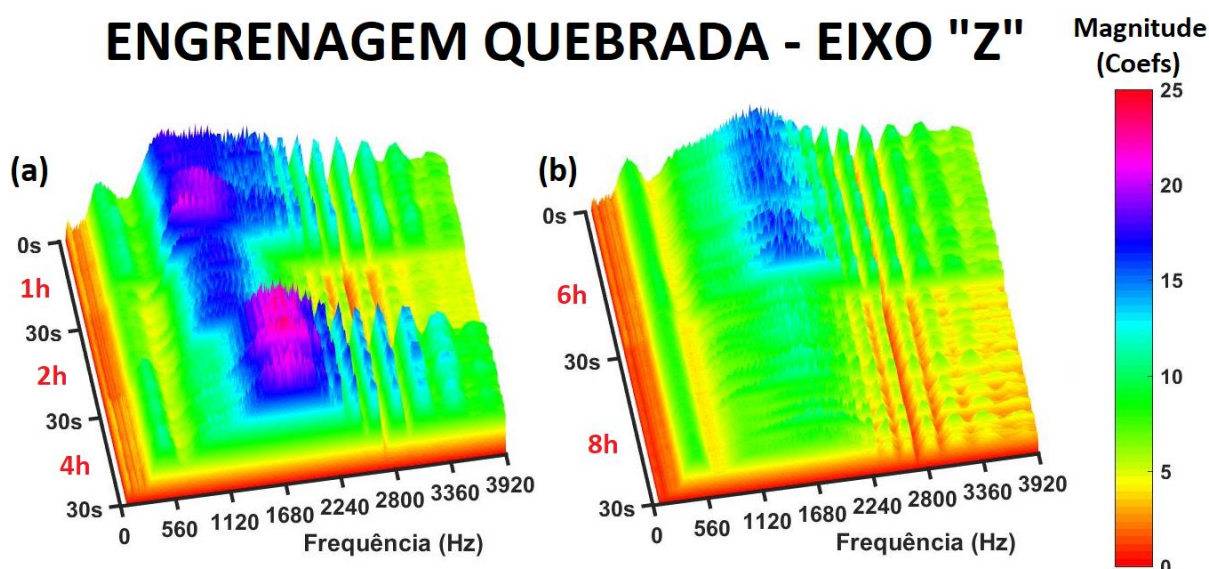
De 22h até às 32h percebe-se um comportamento regular, mas que às 34h tem um novo aumento na GMF3 (1680Hz) que é mostrada na Figura 40 f. Esse novo aumento pode novamente ter ligação com o desgaste por *pitting* ocorrido na Figura 29 d. Chaari *et al.* (2016) estudou os avanços no monitoramento de condições de máquinas não estacionária em operação e atribuiu o aumento da amplitude da GMF ao desgaste dos dentes da engrenagem, pois com o desgaste aparecem folgas entre eles, o que não altera velocidade de rotação, porém passam a surgir choques entre os dentes que se manifestam no sinal com um aumento da amplitude da frequência de engrenamento. Pereira (2018) analisou a trinca por fadiga no dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e em seu monitoramento foi observado um aumento progressivo da magnitude na região do entalhe. Mas a propagação da trinca

não foi observada, ou seja, este aumento provavelmente é devido ao desgaste no dente. Sgotti (2018) observou que a presença de um entalhe no flanco do dente de uma engrenagem de dentes retos modificava o espectro de frequências, em torno da GMF, sendo possível identificar picos ao longo do tempo que indicam a presença de um defeito impulsivo caracterizando a presença do entalhe.

5.3.5 Análise Wavelet: Condição 3

Na Figura 41 são apresentados os mapas em frequência dos primeiros sinais de vibração coletados com 8 horas de experimento. Como é percebido, a análise mostrou uma maior amplitude da vibração na engrenagem quebrada em relação às apresentadas pela engrenagem defeituosa (Figura 40) que por sua vez foi maior do que a engrenagem boa (Figura 39). Durante o *running* esse aumento já é visualizado, principalmente pelo fato das outras duas condições não apresentarem esse comportamento inicial.

Figura 41 - Espectro da CWT da Engrenagem Quebrada de 01h a 08h.



No período de 4h se observa a maior magnitude (ponto vermelho) em torno do 3º harmônico da frequência de engrenamento, o que permanece em foco no período de 6h. Qin et al. (2019) pesquisou sobre a transformada de wavelet flexível de banda M e sua aplicação no diagnóstico de falhas em um sistema de transmissão de engrenagens planetárias e foi observado que uma engrenagem em bom

funcionamento possuía o espectral na frequência característica com menor amplitude em comparação ao da engrenagem com defeito de *micropitting*, adicionada ao sistema planetário. Também se observou que o defeito da quebra do dente, adicionado em um segundo momento, apresentava espectros de maior amplitude na 1° e 2° frequência característica. O mesmo resultado foi observado ao analisar as magnitudes da GMF's 1 e 2, da engrenagem boa (Figura 39) com baixas magnitudes e da engrenagem defeituosa (Figura 40) e quebrada (Figura 41), esta última com magnitudes 5x maior.

Esse resultado também foi observado por Vamsi, Sabareesh e Penumakala (2019) que compararam as técnicas de monitoramento para avaliação da falha de uma caixa de engrenagens de turbinas eólicas. A transformada Wavelet (WT) aplicada a uma distribuição 3D tempo-frequência como resposta da vibração mostrou a condição saudável e com dente da engrenagem quebrado, sendo observado que o número e a amplitude dos picos de vibração aumentaram para a engrenagem defeituosa e o aumento geral nos valores de amplitude foi da ordem de 63%, posteriormente esses dados foram comprovados estatisticamente.

A técnica de processamento de sinais, Transformada Wavelet Continua (CWT), foi capaz de identificar o desgaste do dente nos sinais de vibração monitorados e mostrou informações relevantes sobre a localização de tempo-frequência do desgaste nas engrenagens. Isso está relacionado à análise visual das peças, bem como à temperatura do óleo, podendo ser definidos parâmetros que possibilitem o monitoramento e eventual manutenção da caixa multiplicadora em tempo real.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

A questão da pesquisa consistia em se analisar o comportamento de uma caixa de engrenagens segundo os conceitos aplicados na manutenção preditiva. A partir do estudo dos resultados experimentais, pode-se concluir que:

A técnica de processamento de sinais, Transformada Wavelet Contínua (CWT) se mostrou eficaz para análise do sinal de vibração no plano tempo-frequência. Ao ser aplicada em uma engrenagem, ela indicou a presença de desgaste e de defeitos nos dentes.

A condição 1 representou uma engrenagem em boas condições e a análise do sinal de vibração aplicada a wavelet mapeou as frequências de engrenamento bem como os picos de magnitude diferenciando-os dos demais. Foi visto que o sistema passa primeiro por um estágio de amaciamento, depois para um estágio de operação normal e, depois os parâmetros voltam a aumentar suas magnitudes.

A condição 2 apresentou sucessivas remoções do flanco a fim de levar a engrenagem até uma condição mais severa e a técnica wavelet mostrou-se sensível ao desgaste e a falha indicando durante o experimento a localização e frequência da possível falha.

A condição 3 mostrou o sistema de engrenamento em um estado muito avançado de desgaste, continuamente à condição 2, a técnica wavelet mostrou o alinhamento da falha na mesma frequência que a condição anterior, confirmando assim a localização e frequência de colapso do sistema.

Na microscopia óptica se observou maiores desgastes na condição 2 em relação a condição 1, corroborando com a análise wavelet e mostrando a existência das condições de desgaste nas imagens dos intervalos a cada ensaio.

Em se tratando da análise do óleo lubrificante, a temperatura se mostrou maior para a condição 3, sendo possível notar um comportamento semelhante entre as temperaturas das condições 1 e 2, contudo após a 16h, a condição 2 elevou ainda mais a temperatura, o que correlaciona com o mapeamento da análise wavelet e a microscopia, sendo possível delimitar as características do tipo de desgaste até às 8h

como *scuffing* e que após esse intervalo ocorria a ação do *scuffing* junto a formação de *pitting*. A análise por espectroscopia de fluorescência de raios-x (XRF) mostrou as presenças típicas de compostos oriundos do desgaste.

Com a indicação dos danos e falhas ocorridos no dente da engrenagem, este trabalho confirma que a análise de wavelet é sensível e precisa para analisar danos pontuais em engrenagens. O modelo da bancada experimental simulou satisfatoriamente um aerogerador, considerando as falhas utilizadas no sistema.

Nesse sentido, pode-se perceber que o objetivo foi alcançado, uma vez que, usando a CWT, foi possível estimar a frequência de trabalho do sistema, identificar o avanço no tipo de desgaste e assim prever uma possível falha.

6.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros com a análise do óleo dos pares engrenados, recomenda-se a utilização de uma outra técnica de manutenção preditiva, a Ferrografia, que analisa as partículas encontradas nos lubrificantes para identificar o grau e o motivo do desgaste de máquinas e equipamentos. A identificação é realizada por meio da morfologia (ou seja, a forma do lubrificante), aspecto, coloração, tamanho das partículas, viscosidade, opacidade e outras características.

Para o estudo das falhas de um par engrenado com um defeito inserido, recomenda-se a utilização de técnicas de remoção de material mais precisas e um maior número de repetições para a avaliação. Variações da forma do defeito também são recomendadas.

Em relação a utilização de engrenagens é sugerido utilizar engrenagens com dentes maiores, para estudar a fadiga por flexão, outro modo de falha bastante comum em engrenagens que ocorre devido o surgimento de pontos de concentração de tensão no pé do dente que com o movimento provido por uma carga variável no braço da alavanca resulta na trinca e sua propagação.

Para a análise de vibrações de pares engrenados, recomenda-se a utilização de outras técnicas de processamento de sinais no domínio tempo-frequência tanto do pacote Wavelet (Transformada Wavelet Harmônica, Empírica e outras) como também de fora dele, por exemplo, a distribuição Wigner-Ville (VWD).

CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS

AL-ARBI, Salem, **Condition Monitoring of Gear Systems using Vibration Analysis**. Tese de Doutorado da Universidade de Huddersfield, 2012.

AL-TUBI, I.S., LONG, H.: 'Prediction of wind turbine gear micro-pitting under variable load and speed conditions using ISO/TR 15144–1, **Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 227, 2013, pp. 1898–1914.

ALVES, J. J. A. "Análise regional da energia eólica no Brasil. "Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 6, n°.1, 2010, pp. 165-188.

AMEZQUITA-SANCHEZ J.P., ADELI H. Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 23, 2016, pp. 1-15.

AMEZQUITA-SANCHEZ J.P., OSORNIO-RIOS R.A., ROMERO-TRONCOSO R.J., DOMINGUEZ-GONZALEZ A.A.; Hardware–software system for simulating and analyzing earthquakes applied to civil structures, **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 12, 2012, pp. 61–73.

ANTOINE P., MURENZI R., VANDERGHEYNST P., and ALI S.T., Two-Dimensional Wavelets and Their Relatives Cambridge University, Cambridge, 2008. Disponível em: < <https://pdfs.semanticscholar.org/dbcc/550afcde577db6700c04c1f996593cbe516c.pdf> >. Acesso em 22 de Out. 2019.

ANTONI J., The infogram: Entropic evidence of the signature of repetitive transients. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 74, 2016, pp. 73-94.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO. **DN 2013**: documento nacional 2013: a situação da manutenção no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 28, 2013, Salvador. **Congresso brasileiro de manutenção**, Salvador: [s.n.], 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.

BATISTA, A.C.; DIAS, A.M. Contact fatigue of carbonitrided and shot-peened gears: Effects of residual stresses. **Gear & Transmissions Workshop**, Portugal, 2003.

BEN-DAYA M. S., DUFFUAA A.R., **Handbook of maintenance management and engineering**. Springer Verlag London Limited; 2009.

BIBOULET N., LUBRECHT A.A., HOUPERT L., Contact pressure of indented wide elliptical contacts: dry and lubricated cases, **Journal Tribology**, 2008, pp. 130.

BOUDIAF A., MOUSSAOUI A., DAHANE A., ATOUI I. A comparative study of various methods of bearing faults diagnosis using the case Western Reserve University data. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v.16, 2016, pp.271–284.

BRANDÃO, J. A. *et al.* Calculation of gear tooth flank surface wear during an FZG micropitting test. **Wear**, v. 311, n. 1-2, 2014, pp. 31-39.

BUDYNAS, R. G. e NISBETT, J. K., **Elementos de Máquinas de Shigley**, McGraw-Hill book Company, 2016.

BURAKOWSKI, T.; WIERZCHON, T.; **Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies**, CRC Press LLC, 1999

BURKHART C., JOHANSSON J., UKONSAARI J., PRAKASH B., Performance of lubricating oils for wind turbine gear boxes and bearings. **Sage Journal**, v. 232, n° 1, pp. 62-72.

CHAARI F., ZIMROZ R., BARTELMUS W., HADDAR M., **Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operation**. Proceedings of the Fourth International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, CMMNO'2014, Lyon, France, 2016.

CHERAGHI N., ZOU G.P., TAHERI F., Piezoelectric-based degradation assessment of a pipe using Fourier and wavelet analyses. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v.20, 2005, pp. 369–382.

COHEN L., **Time–frequency analysis**, vol 778. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, 1995.

CORONADO D., WENSKE J., Monitoring the Oil of Wind-Turbine Gearboxes: Main Degradation Indicators and Detection Methods. **Machines**, v.6, n°2, 2018, pp.1-25.

CUNHA, R. C. **Análise do estado de conservação de um redutor de velocidade através da técnica de partículas de desgaste no óleo lubrificante auxiliada pela análise de vibrações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

DAHER A., **Default diagnosis and prognosis for a preventive and predictive maintenance. Application to a distillation column**. Automatic. Normandie University, 2018.

DAUTZENBERG, J. H.; KALS, J. A. G. A model for vibration during dry sliding friction. **Annals of the CIRP**, v. 35, 1986, p. 417-421.

DIEHL E.J., TANG J., Predictive modeling of a two-stage gearbox towards fault detection. **Shock and Vibration**, 2016, n° 17, pp.1 - 13.

DING Y., RIEGER, N., Spalling formation mechanism for gears. **Wear**, v.254, 2003, n°12, 2011, pp. 1307-1317.

DYTRAN INSTRUMENTS. Accelerometer Mounting Considerations. Disponível em :<<http://www.dytran.com/assets/PDF/Accelerometer%20Mounting%20Considerations.pdf>> Acesso em: 23 de Out. 2019)

FERNANDES C.M.C.G., BLAZQUEZ, L., SANESTEBAN, J., MARTINS, R.C., SEABRA, J.H.O., Energy efficiency tests in a full scale wind turbine gearbox. **Tribology International**, v. 101, 2016, pp. 375-382.

GABOR, D. - Theory of communication the analysis of information. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v. 93, n° 26, 1946, pp. 429-441.

GADE S, GRAM-HANSEN K. Non-stationary signal analysis using wavelet transform, short-time Fourier transform and Wigner–Ville distribution. **Technical Review**, n°2, Bruel & Kjaer, 1996.

GARCIA M.C., SANZ-BOBI M.A., DEL PICO J., SIMAP: intelligent system for predictive maintenance application to the health condition monitoring of a Wind turbine gearbox. **Computers in Industry**, v.57, 2006, pp. 552- 568.

Global Wind Energy Outlook 2018. **Global Wind Energy Council (GWEC)**, Abril 2019, pp. 11.

GONÇALVES, S.M.M. - **Modelação do Micropitting nos dentes de engrenagens**, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2006.

GONZÁLEZ-CARRATO R. R. de la H., Sound and vibration-based pattern recognition for wind turbines driving mechanisms. **Renewable Energy**, v.109, 2017, pp. 262-274.

GOYAL, D., PABLA, B.S. "The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review" - **Archives of Computational Methods in Engineering**, 2016.

GRAPS, A. An introduction to wavelets. **IEEE Computational Science and Engineering**, v.33, 1995, pp. 1173-1181.

GRECO, A. K., MISTRY, V. SISTA, O. ERYILMAZ, A. ERDEMIR. Friction and wear behavior of boron-based surface treatment and nano-particle lubricant additives for wind turbine gearbox applications. **Wear**, v.271, 2011, pp. 1754 – 1760.

HAHN, B.; DURSTEWITZ, M., ROHRIG, K., Reliability of wind turbines, **Wind Energy**, 2007, pp. 329–332.

HÖHN, B. R.; MICHAELIS, K. Influence of oil temperature on gear failures. **Tribology international**, Kidlington, v. 37, n° 2, 2004, pp. 103-109.

HONG W., CAI W., WANG S., TOMOVIC M.M, Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review, **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 31, n° 5, 2018, pp. 867-882,

HOUSER D., 1991, **Gear Noise, Dudley's Gear Handbook**, 2° Ed., McGraw Hill.

INGRAM, M., HAMER C., e SPIKES, H., A new scuffing test using contra-rotation, **Wear**, vol. 328–329, pp. 229–240, 2015.

KATTELUS, J.; MIETTINEN, J.; LEHTOVAARA, A. Detection of gear pitting failure progression with on-line particle monitoring. **Tribology International**, v. 118, 2018, pp. 458-464.

KNEZEVIC J. **Reliability, maintainability and supportability engineering: a probabilistic approach**. McGraw Hill; 1993.

KODA, F., **Estudo da fadiga de contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, Brasil, 2009.

KUNDU P., DARPE A.K., KULKARNI M.S., Gear pitting severity level identification using binary segmentation methodology. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.129, 2019, pp. 741–763.

LAGO D.F., **Manutenção de Redutores de Velocidade pela Integração das Técnicas Preditivas De Análise De Vibrações e Análise de Óleo Lubrificante**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2007.

LEE J., KIM S.; Structural damage detection in the frequency domain using neural networks. **Journal of Intelligent Materials Systems and Structures**, v.18, 2007, pp. 785–792.

LIN, J., and QU, L., Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis. **Journal of Sound and Vibration**, v. 234, 2000, pp. 135-148.

LIU H., LIU H., ZHU C. e ZHOU Y., A Review on Micropitting Studies of Steel Gears, **Coatings**, v.9, n°1, 2019, pp. 42.

LOHMANN C. **Zusammenhang von Ermüdung, Rissbildung, Verschleiß und Graufleckentragfähigkeit an Stirnrädern**. Dissertação de Doutorado. Ruhr Bochum Universität, Bochum, Alemanha, 2016.

ŁUKASZ J., JÓZEF J., Early fault detection in gearboxes based on support vector machines and multilayer perceptron with a continuous wavelet transform. **Applied Soft Computing**, v. 30, 2015, pp. 636-641.

LUTZ G. A., JUNGK M. E LAUER B.; **Full life wind turbine gearbox lubricating fluids**, Clipper Wind power Technology, University of Dayton Research Institute, 2012.

MAIA, D. S. N., **Ruído de parques eólicos: análise e caracterização**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

MAKE Consulting. Global Wind Turbine OM, 2017.

MALLAT, Stephane. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v.11, nº7,1989, pp. 674 - 693.

MÁRQUEZ, F. P. G.; TOBIAS, A. M.; PÉREZ, J. M. P; PAPAELIAS, M., Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. **Renewable Energy**, v.46, 2012, pp. 169-178.

MATHIAS, M. H., MEDEIROS, R. J., & COELHO, E. Ferramentas de Diagnóstico de Máquinas. Disponível em: < http://www.acervodigital.unesp.br/handle/123456789/46460?locale=pt_BR > Acesso em: 22 de out. 2019.

MCFADDEN, P. D.; WANG, W. J., **Analysis of gear vibration signatures by the weighted Wigner-Ville distribution**. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, 1992. p. 387-393.

MENEGHETTI, S.G.G., TERRIN, A. - "A twin disc test rig for contact fatigue characterization of gear materials," **Procedia Structural Integrity**, vol. 2, 2016, pp. 3185–3193.

MISTRY K., MORINA A., NEVILLE A. E WEBSTER M., Advanced Tribo-Materials for Gears, **International Conference on Industrial Tribology**, 2006.

MOBLEY, R. K. Benefits of predictive maintenance. **An Introduction to Predictive Maintenance**, 2002, p .60-73.

MOHANTY A., KAR C., Fault detection in a multistage gearbox by demodulation of motor current waveform. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, V.53, n°4, 2006, 1285–1297.

MOUSINHO, M. A. F. **Estudo do comportamento ao desgaste de uma engrenagem helicoidal**, 2017. Dissertação em Engenharia Mecânica. Faculdade Ciências e Tecnologia. Faculdade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2012, pp. 71.

MUSIAL, W., BUTTERFIELD, S., MCNIFF, B. Improving wind turbine gearbox reliability: preprint, **National Renewable Energy Laboratory**. Milão, Italia, 2007, pp. 7–10.

NAGARAJU C., RAO K.N., RAOO K.M., Application of 3D wavelet transforms for crack detection in rotor systems, **Sadhana**, v.34, 2009, pp. 407–419.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. vol. 3, São Paulo: Edgard Blucher, 1971, 207p.

NILSSON, J.; BERTLING, L. **Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems** - Life cycle cost analysis for two case studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 22, n. 1, p. 223–229, 2007.

OLVER A.V., TIEW L.K., MEDINA S., CHOO J.W.; Direct observations of a micropit in an elastohydrodynamic contact, **Wear**, v. 256, 2004, pp. 168-175.

ONISHCHENKO, V.; Investigation of tooth wears from scuffing of heavy-duty machine spur gears, **Mechanism and Machine Theory**, v. 83, 2015, pp. 38-55.

PEETERS, J., 2006, **Simulation of Dynamic Drive Train Loads in a Wind Turbine**, Universidade Católica de Leuven – Bélgica, 2006.

PENG Z, KESSISSOGLU N. An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis. **Wear**, v.255, 2003, pp. 1221-1232.

PEREIRA, ANDRÉ LUIS VINAGRE, **Manutenção preditiva de um par engrenado através da análise de lubrificantes e da análise de vibrações utilizando a transformada de Wavelet**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2018.

PINTO, A. K, XAVIER, J. N. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Quality mark, 2001.

PROAKIS J. G., e MANOLAKIS D. G., **Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications**, 3ª Edição, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996.

QIN Y., MAO Y., TANG B., WANG Y., CHEN H., M-band flexible wavelet transform and its application to the fault diagnosis of planetary gear transmission systems. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 134, 2019.

QIN Y., MAO Y., TANG B., WANG Y., CHEN H., M-band flexible wavelet transform and its application to the fault diagnosis of planetary gear transmission systems. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 134, 2019, 106298.

RAADNUI, S.; Spur gear wear analysis as applied for tribological based predictive maintenance diagnostics, **Wear**, v. 426–427, Part B, 2019, pp. 1748-1760.

RAFIEE J., TSE P.W., Use of autocorrelation of wavelet coefficients for fault diagnosis, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 23, 2009, pp. 1554–1572.

RAMPINELLI, G.A; ROSA JÚNIR, C. G. Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 14, n 2, 2012.

REIS A. J. R., SILVA A P.A., Aplicação da Transformada Wavelet Discreta na previsão de carga a curto prazo via redes neurais. **Sociedade Brasileira de Automática: Controle & Automação**, v.15 n°1, 2004.

RODRIGUES, L. E. M. **Curso de Especialização em Manutenção Produtiva Total**. 2008.

SALAMEH J.P., CAUET S., ETIEN, E., SAKOUT A., RAMBAULT L., “Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review”, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.111, pp 251-264, 2018.

SANTOS, E. S.; Gama, E. M.; FRANÇA, R. S.; SOUZA, A. S.; MATOS, R. P. Espectrometria De Fluorescência De Raios-X Na Determinação De Espécies Químicas. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n.17, 2013, pp. 3413-3432.

SARAVANAN N., RAMACHANDRAN K. I.; Incipient gear box fault diagnosis using discrete wavelet transform (DWT) for feature extraction and classification using artificial neural network (ANN). **Expert Systems with Applications**, v. 37, n°6, 2010 pp. 4168 - 4181.

SARUHAN H., SARIDEMIR S., QICEK A., UYGUR I. Vibration analysis of rolling element bearings defects. **Journal Applied Research and Technology**, v.12, 2014, pp.384–395.

SEIDEL, W.; Falhas em engrenagens (2013). Curso de Engenharia Mecânica da UNERG. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAE5ocAJ/falhas.pdf>>. Acesso em 20 de abril de 2019.

SEQUEIRA, C. D., **A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores**. Dissertação em Engenharia Mecânica. Faculdade Ciências e Tecnologia. Faculdade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2012, pp.183.

SGOTTI, C.E, **Investigação do comportamento de defeitos em engrenagens cilíndricas de dentes retos utilizando monitoramento da condição**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2018.

SHIN, Y. S., JEON, J., “Pseudo Wigner-Ville Time-Frequency Distribution and its Applications to Machinery Condition Monitoring”, **Shock and Vibration**, v. 1, n° 1, 1993, pp.65-76.

SILVA, D. G. da. **Diagnóstico de falha em redutores de velocidade submetidos a variação de potência**. Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, 2001.

SILVA, D. H. DE J. **Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradoras hidrelétricas**, Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R.; **Princípios de Análise Instrumental**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009; 1056p.

SOUZA, G.F. **Análise do funcionamento de motores diesel utilizando Wavelet**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011, 84p.

SPANGENBERG, U.; FRÖHLING, R. D.; ELS, P. S. The effect of rolling contact fatigue mitigation measures on wheel wear and rail fatigue. **Wear**, v. 398-399, 2018, pp. 56-68.

SPINATO, F.; TAVNER, P.J.; VAN BUSSEL, G.; KOUTOULAKOS, E.; Reliability of wind turbine subassemblies, **IET Renewable. Power Generation**, v.3, n°4, 2009, pp. 387–401.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W.; **Engineering Tribology**; Elsevier Inc., 1993.

TALLIAN T.E., **Failure Atlas for Hertz Contact Machine Elements 2°Ed.**, Amer Society of Mechanical, Nova York, 1992, 404 p.

TAN C.K., IRVING P., MBA D., A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears, **Mechanical System and Signal Processing**, v. 21, 2007, pp. 208–233.

TANG B., LIU W., SONG T., Wind turbine fault diagnosis based on Morlet wavelet transformation and Wigner-Ville distribution, **Renewable Energy**, v. 35, v. 12, 2010, pp. 2862-2866.

TAVNER, P.J. XIANG, J., SPINATO, F. Reliability analysis for wind turbines, **Wind Energy**, v.10, 2007, pp.1–18.

TENG W., DING X., CHENG H., HAN C., LIU Y., MU H., Compound faults diagnosis and analysis for a wind turbine gearbox via a novel vibration model and empirical wavelet transform. **Renewable Energy**, v.136, 2019, pp. 393-402.

TOURET T., CHANGENET C., VILLE F., CAVORET J., ABOUSLEIMAN V., Experimental investigations on the effect of micropitting on friction – Part 1, **Tribology International**, 2019.

TSE P. W., YANGB W.X., TAMA H.Y., Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis. **Journal of Sound and Vibration**, v. 277, 2004, 1005–1024.

Understanding Spur Gear Life TRSM0913, disponível em: <<http://www.consolidatedtruck.com/wp-content/uploads/2016/04/Transmission-Gear-Wear-Explained.pdf>> Eaton Powering Business Worldwide, 2011. Acesso em 10 de Dez. 2019.

VAMSI I., SABAREESH G.R., PENUMAKALA P.K., Comparison of condition monitoring techniques in assessing fault severity for a wind turbine gearbox under non-stationary loading, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.124, 2019, pp. 1-20.

VERNEKAR K., KUMAR H., GANGADHARAN K.V., Gear Fault Detection Using Vibration Analysis and Continuous Wavelet Transform. **Procedia Materials Science**, v.5, 2014, pp.1846-1852.

VITORINO, C. R. S., **Modelagem Dinâmica de Caixa Multiplicadora de Velocidades de Aerogeradores**. (2012). Projeto de Graduação Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Brasília. Brasília, Brasil, 2012.

WANG L., GAO R.X. **Condition monitoring and control for intelligent manufacturing**, Springer, Berlin, 2006.

WEIBRING M., GONDECKI L., TENBERGE P., Simulation of fatigue failure on tooth flanks in consideration of pitting initiation and growth, **Tribology International**, v. 131, 2019, pp. 299-307.

WIGGELINKHUIZEN E., VERBRUGGEN T., XIANG J., WATSON S.J., GIEBEL G., NORTON E., Condition monitoring for offshore wind farms. **Proceedings of the 2007 European Wind Energy Conference**, Milão, Itália; 2007, pp. 7-10.

WILCOXON RESEARCH. Accelerometer Mounting Hardware and Installation Techniques. Disponível em: <<http://www.wilcoxon.com/knowdesk/rep6.pdf> > Acesso em: 10 de Out. 2019.

WINK, C. H.; **Predicted scuffing Risk to spur and Helical Gears in Commercial Vehicle Transmissions**, Gear Technology, 2012;

WOJCIECHOWSKI, L.; WIECZOROWSKI, M.; MATHIA, T. G. Transition from the boundary lubrication to scuffing: the role of metallic surfaces morphology. **Wear**, v. 392-393, 2017, pp. 39-49.

WOLFF, J. Heisenberg's observability principle: studies in history and philosophy of science, **Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 45, part b., 2014, pp. 19-26.

YAN R., GAO R.X., and CHEN X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. **Signal Processing**, v. 96, parte A, 2014, pp. 1-15.

YANG W., TAVNER P.J., CRABTREE C.J., WILKINSON M., Cost-effective condition monitoring for wind turbines, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, 2010, pp. 263–271.

YANG W.X., REN X.M., Detecting impulses in mechanical signals by wavelets, EURASIP, **Journal on Applied Signal Processing**, v.8, 2004, pp.1156–1162.

ZHAN, Y.-L.; SHI, Z.-B.; SHWE, T.; WANG, X.-Z. Fault diagnosis of marine main engine cylinder cover based on vibration signal. **Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, Hong Kong, 2007. Proceedings.

ZHENG H., LI Z. AND CHEN X. Gear Fault Diagnosis Based on Continuous Wavelet Transform. **Mechanical System and Signal Processing**, v. 16, n°2-3, 2002, pp. 447-457.

ZOU J., CHEN J. A comparative study on time–frequency feature of cracked rotor by Wigner–Ville distribution and wavelet transform. **Journal of Sound and Vibration**, v. 276, 2004, pp. 1-11.