

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PREDITIVAS POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DE REDUTORES PLANETÁRIOS

Luciano Figueiredo Oliveira ⁽¹⁾ (eng.lucianofo@gmail.com), Lucas Costa Brito ⁽²⁾ (lucas.brito@dynamicsservices.com.br), Caio do Carmo Dantas ⁽³⁾ (dantas.caio22@hotmail.com), Hermes Dias Godinho ⁽⁴⁾ (hermes@iesae.com.br), Jorge Nei Brito ⁽⁵⁾ (brito@ufs.edu.br)

⁽¹⁾ Instituto de Ensino Superior Albert Einstein (IESAE)

⁽²⁾ DYNAMIC Services Consultoria Ltda.

⁽²⁾ Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção (DEMPEP)

RESUMO: A Manutenção baseada na Condição assume um importante papel no planejamento de paradas por manutenção. Busca-se, neste estudo, desenvolver uma ferramenta específica para detecção de falhas em redutores planetários. Os sinais vibracionais de dois redutores planetários, ET 3520 e SL 4003, foram avaliados sob diferentes técnicas de análise de vibração: Forma de Onda; Espectro de Vibração (FFT - Transformada Rápida de Fourier); Cepstrum de Vibração; Espectro de Envelope e Cepstrum de Envelope. O redutor ET 3520 apresentou maior nível de ruído nos espectros dos dados coletados, tornando mais difícil a identificação de assinaturas. Nesse contexto, o Cepstrum cumpriu papel fundamental ao tornar mais evidente a família de bandas laterais decorrente da assinatura das engrenagens planetárias. O redutor SL 4003 apresentou espectros mais limpos e de mais fácil análise. De forma semelhante, seus "Cepstrums" confirmaram as assinaturas previamente identificadas de forma a validar a análise prévia, com assinaturas evidentes. A análise do Cepstrum confirmou ser uma importante ferramenta no monitoramento da condição de redutores planetários. As assinaturas da análise do Cepstrum foram mais claras do que outras não tão perceptíveis.

PALAVRAS-CHAVE: ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, CEPSTRUM, ESPECTRO DE ENVELOPE, REDUTORES PLANETÁRIOS.

EVALUATION OF PREDICTIVE TECHNIQUES USING VIBRATION ANALYSIS FOR MONITORING THE CONDITION OF PLANETARY GEARBOXES

ABSTRACT: Condition-based Maintenance plays an important role in maintenance shutdown planning. This study aims to develop a specific tool for detecting faults in planetary gearboxes. The vibration signals of two planetary gearboxes, ET 3520 and SL 4003, were evaluated using different vibration analysis techniques: Waveform; Vibration Spectrum (FFT - Fast Fourier Transform); Vibration Cepstrum; Envelope Spectrum; and Envelope Cepstrum. The ET 3520 gearbox exhibited higher noise levels in the collected data spectra, making signature identification more difficult. In this context, the Cepstrum played a crucial role by making the sideband family resulting from the planetary gear signatures more evident. The SL 4003 gearbox showed cleaner and easier-to-analyze spectra. Similarly, its Cepstra confirmed previously identified signatures, validating the preliminary analysis with evident signatures. The Cepstrum analysis proved to be an important tool in the condition monitoring of planetary gearboxes. The signatures from the Cepstrum analysis were clearer than others that were not as perceptible.

KEYWORDS: VIBRATION ANALYSIS, CEPSTRUM, ENVELOPE SPECTRUM, PLANETARY GEARBOXES.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a NBR 5462 (1994), "Manutenção" é o conjunto de ações técnicas e administrativas destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

Kardec e Nascif (2019) acrescentam que a "Manutenção" assume função estratégica na organização e deve seguir direcionada ao apoio do gerenciamento e à solução de problemas de produção, agregando competitividade e produtividade às empresas.

O estudo do monitoramento da condição de equipamentos rotativos ganha espaço com o intuito de desenvolvimento de métodos de detecção de falhas em estágios iniciais, evitando quebras e economizando recursos. A "Análise de Vibração" é tida como a principal "Técnica Preditiva" utilizada (BALDISSARELLI e FABRO, 2019).

Dentre as técnicas de "Manutenção Preditiva", a "Análise de Vibração" é a mais eficaz usado para verificar a saúde das máquinas de plantas e diagnosticar as causas. A saúde da máquina é verificada por monitoramento de rotinas de coleta de dados ou monitoramento contínuo, com instrumentos sofisticados, dando uma indicação precoce de uma possível falha e oferecendo contramedidas para evitar um possível evento catastrófico (POPESCU, AIORDACHIOAIE e FLORESCU, 2020).

Dentre as máquinas rotativas mais empregadas nas indústrias, os redutores planetários de velocidade assumem papel importante uma vez que unem as qualidades de maior capacidade de redução de velocidade aliada a uma estrutura mais compacta. Porém, de acordo com Miao e Zhou (2015), o monitoramento da condição e o diagnóstico de falhas desses equipamentos são complexos devido as suas características construtivas e operacionais.

Redutores planetários têm sido amplamente utilizados em helicópteros, turbinas eólicas, máquinas de mineração dentre outros. A confiabilidade desses sistemas de alto desempenho é uma questão crítica em aplicações práticas, A ocorrência de falha nos redutores planetários pode levar a acidentes catastróficos e causar graves prejuízos ou perdas. O monitoramento de suas condições e diagnóstico de falhas são importantes para reduzir custo e risco operacional (MIAO e ZHOU, 2015).

Feng e Zuo (2012) acrescentam que uma falha em um redutor planetário pode causar o desligamento de todo um sistema de transmissão de potência, resultando em grandes perdas econômicas. Portanto, o diagnóstico das condições de redutores planetários é um importante tópico de pesquisa.

Neste estudo os sinais vibracionais de dois redutores planetários são avaliados sob diferentes técnicas de análise de vibração: Forma de Onda; Espectro de Vibração (FFT - Transformada Rápida de Fourier); Cepstrum de Vibração; Espectro de Envelope e Cepstrum de Envelope.

2. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

2.1. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Segundo Baldissarelli e Fabro (2019) *apud* Almeida (1990) o método comumente usado no processamento de sinal e para análise de frequências no espectro é a Transformada Rápida de Fourier, em inglês, *Fast Fourier Transform* (FFT), desenvolvido pelo matemático Jean Baptiste Fourier (1768-1830), calculado pela Equação 1, onde n é o número de amostras, m é a banda de frequência, $N_a = am$ e $a = 2,56$.

$$X(m) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a-1} x(n) \cdot e^{-2\pi i \cdot \left(\frac{mn}{N_a}\right)} \quad (1)$$

O resultado da FFT é um espectro na banda de frequência da amostra. Ou seja, o sinal do formato de onda (conjunto de dados de vibração) que era visto plotado no domínio do tempo, passa a observado agora no domínio da frequência.

Segundo FERREIRA (2012), o sinal de onda tem características de difícil interpretação. Já o espectro resultante da FFT destaca a predominância de uma/algumas frequência(s) em relação as demais. Isso pode ser utilizado para identificar comportamentos isolados dos componentes rotativos.

2.2. Análise do Envelope

Segundo Coronado e Frischer (2015), a técnica de Análise do Envelope (ou Envelopamento) é o processo de demodulação da vibração de componentes mecânicos com pequena amplitude em uma banda de frequência definida, que normalmente é encoberta pela vibração com amplitudes maiores (engrenamentos por exemplo). A técnica de Envelope é confiável e é muito aplicada na detecção de falhas em caixas de engrenagens e rolamentos.

De acordo com Mesquita *et al.* a Transformada de Hilbert no sinal filtrado no domínio do tempo permite a obtenção do contorno (ou envoltório) do sinal, permitindo a leitura de impactos. Na Figura 1 tem-se as etapas do método de envelopamento do sinal.

FIGURA 1. Etapas da técnica de envelope.



Fonte: Mesquita *et al.* (2002).

A técnica consiste na aplicação de filtro passa-banda para uma janela de frequência definida. Depois disso, a transformada de Hilbert é aplicada no sinal e os resultados são analisados no domínio da frequência (CORONADO e FRISCHER, 2015).

A estratégia de diagnóstico de falhas baseada em demodulação fornece um caminho alternativo uma vez que a frequência característica da falha pode ser destacada no Espectro do Envelope com menos interrupção espectral (WANG, 2019).

2.3. Análise do Cepstrum

A técnica de análise do Cepstrum foi desenvolvida na mesma época da FFT e foi apresentada como "o espectro do logaritmo do espectro". Os primeiros estudos tiveram foco na análise de sinais sísmicos. Pouco depois, o uso do Cepstrum começou a ser também implementado em estudos de sinais sonoros, passando a ser analisado por organizações voltadas ao desenvolvimento de equipamentos telefônicos (RANDALL, 2017).

Através da Equação 2 calcula-se o Cepstrum de potência $\tilde{s}$ onde $S(v)$ é a Transformada de Fourier FT para um sinal $s(t)$ (EL BADAoui *et al.*, 2001).

$$\tilde{s} = (FT^{-1}[\ln |S(v)|])^2 \quad (2)$$

O Cepstrum imaginário é definido pela Equação 3, $Inc(S)$ pela Equação 4, sendo $\arg(S)$ a versão aberta da fase de $S(v)$. Já o Cepstrum real é definido pela Equação 5.

$$\hat{s} = FT^{-1}[Inc(S(v))] \quad (3)$$

$$Inc = \ln|S| + i \cdot \arg(S) \quad (4)$$

$$\tilde{s} = FT^{-1}[Inc(|S(v)|)] \quad (5)$$

Por conta da lógica da inversão de um espectro, é normal que os autores utilizem uma nomenclatura com as primeiras sílabas invertidas no Cepstrum. De fato, a própria palavra "Cepstrum" é vista como a palavra "Spectrum" com as primeiras sílabas invertidas. Da mesma forma temos "Rahmonic", "Lifter" e "Gamnitude" para os termos "Harmônica", "Filtro" e "Magnitude", respectivamente (RANDALL, 2017).

A determinação da frequência de um pico no ponto τ do Cepstrum pode ser obtida a partir do eco no sinal, traduzido por RANDALL (2021) como sendo dado pela Equação 6.

$$\Delta f = 1/\tau \quad (6)$$

No contexto de máquinas rotativas, o Cepstrum é usado para detectar a periodicidade no domínio da frequência. A técnica do espectro de frequência não conterá informações se as alterações ocorrerem na fonte ou no caminho de transmissão. Harmônicas e bandas laterais no Cepstrum representam a concentração de energia de excitação produzida pela rotação componente e são geralmente usados para identificar qualquer anormalidade na operação do sistema. A vantagem de utilizar o Cepstrum é identificar o dano da engrenagem na situação de os efeitos combinados, aparecendo no Cepstrum como um pequeno número de picos (harmônicas), tornando assim fica mais fácil identificar mudanças no sistema (NACIB; SAAD; SAKHARA, 2014).

Para Randall (2021), o Cepstrum é uma técnica recomendada para monitoramento de danos em engrenagens por ter capacidade de reunir todos os membros de cada família de bandas laterais em um conjunto mais facilmente interpretável, pois diz o quanto média de cada família de banda está se projetando acima do nível de ruído espectral.

3. REDUTORES PLANETÁRIOS

Athayde Junior (2021), *apud* JELASKA (2012), define os redutores planetários como sistemas de transmissão de potência onde pelo menos uma das engrenagens, quando conectada as outras, gira em torno de uma engrenagem adjacente. O conjunto é composto por uma engrenagem solar (ao centro), circuladas por engrenagens planetárias que giram sobre eixos montados no porta-planetas. No entorno das engrenagens planetas está a engrenagem anelar (ou engrenagem anel), com dentes internos. Vitorino (2012) complementa essa definição ao citar que pelo menos uma das engrenagens é estática.

LEI *et al.* (2014) define o conjunto de transmissão planetário como um sistema de engrenagens que contém uma engrenagem anelar, uma engrenagem solar, que gira em torno de seu próprio centro, e várias engrenagens planetárias que não apenas giram em torno de seus próprios centros, mas também giram em torno do centro da engrenagem solar.

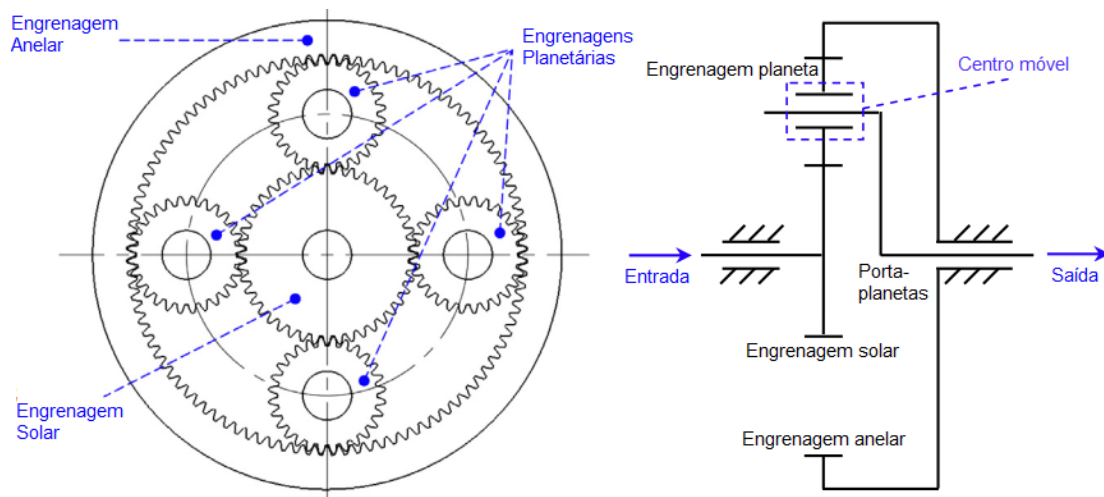
Segundo Esteves (2018), redutores planetários são reconhecidos pela sua maior capacidade de redução de velocidade e aumento de torque em uma estrutura mais compacta. Porém, a complexidade em termos de engrenagens dá-lhes a desvantagem de possuir um maior número de rolamentos. Wang (2019) acrescenta que o diagnóstico de falhas em redutores planetários de múltiplos estágios é mais desafiador devido a resposta vibracional das diferentes frequências de engrenamento simultâneas, aos efeitos de modulação somados e aos diferentes circuitos da transmissão da potência.

Nas aplicações, as falhas de engrenagem geralmente resultam de danos locais na superfície dos dentes (lascamento, fragmentação e trincas). Os sinais de vibração induzidos por tais danos exibirão características espectrais diferentes daquelas causados por erros de fabricação. Assim, a

análise espectral é muito popular no campo do diagnóstico de falhas de máquinas. Uma compreensão completa do espectro e da estrutura dos sinais de vibração do redutor planetário bem como dos sintomas de falha de cada tipo de engrenagem (sol, planeta e anel) permite um diagnóstico de falhas mais eficaz (FENG e ZUO, 2012).

Na Figura 2 tem-se um modelo e o diagrama de transmissão de sistema de transmissão planetário com quatro planetas e engrenagem anelar (anel) estática.

FIGURA 2. Redutor planetário de quatro planetas com engrenagem anel estática.



Fonte: Autor (2024), adaptador da LEI *et al.* (2014).

3.1. Frequências Determinísticas de Redutores Planetários

Os sinais de vibração da caixa de engrenagens planetárias têm componentes espectrais mais complicados do que os sistemas de engrenagens de eixo fixo. As engrenagens planetárias engrenam simultaneamente com a engrenagem solar e a coroa. Devido a esses movimentos de engrenagem, os sinais de vibração gerados por redutores planetários são mais complexos do que aqueles por eixo fixo. Além disso, a relação de fase do planeta (que depende do número de planetas, posição do planeta ângulos e o número de dentes de cada engrenagem) também adiciona complexidade aos sinais (FENG e ZUO, 2012). As metodologias para determinação das frequências determinísticas dos redutores planetários foram reunidas por Feng e Zuo (2012) bem como Lei *et al.* (2014).

Na Tabela 1 tem-se as equações para determinação das frequências de interesse no caso em que se tem a entrada de velocidade do redutor no pinhão solar conhecida e uma engrenagem anel estática, considerando f_{eng} a frequência de engrenamento do conjunto, n o número de planetas, N como referência à rotação, Z como referência ao número de dentes, F como a frequência de falha e os subíndices 1,2,3 e 4 como o pinhão solar, os planetas, a engrenagem anel e o porta-planetas.

TABELA 1. Frequências características dos redutores planetários.

FREQUÊNCIA	EQUAÇÃO
Frequência de Engrenamento	$f_{eng} = N_4 Z_3$
Rotação dos planetas	$N_2 = -\frac{N_1 Z_1}{Z_1 - Z_3}$
Rotação do porta-planetas	$N_4 = \frac{N_1 Z_1}{Z_1 + Z_3}$
Danos na engrenagem solar	$F_1 = \frac{n \cdot f_{eng}}{Z_1}$
Danos nas engrenagens planeta (um ou dois lados do dente)	$F_{2-1} = \frac{f_{eng}}{Z^2}; F_{2-2} = 2 \cdot \frac{f_{eng}}{Z^2}$
Danos na engrenagem anelar	$F_3 = \frac{n \cdot f_{eng}}{Z_3}$

Fonte: Autor (2024), adaptado de FENG e ZUO (2012).

Os rolamentos dos planetas também são componentes facilmente danificados em redutores planetários (WANG *et al.*, 2019). As frequências de falhas desses componentes variam em função da sua geometria, característica construtiva e rotação.

3.2. Dados dos Redutores Planetários BREVINI 1 e 2

Nas Tabela 2 e 3 tem-se, respectivamente, as características dos redutores planetários BREVINI ET 3520 e BREVINI SL 4003.

Ambos os redutores são acoplados a motores elétricos com rolamentos 6212 e 6312, lado oposto ao acoplamento (LOA) e para lado do acoplamento (LA), respectivamente. A rotação de entrada nos redutores durante as medições foi de 1180 rpm (19,667 Hz).

TABELA 2. Características do redutor BREVINI ET 3520.

COMPONENTE	1º ESTÁGIO	2º ESTÁGIO	3º ESTÁGIO
Número de planetas	3	3	3
Número de dentes na engrenagem solar	18	14	23
Número de dentes nas engrenagens planetárias	28	21	26
Número de dentes na engrenagem anelar	75	58	97
Rolamentos dos eixos planetários	16012	NU 1030	24030

Fonte: Autor (2024).

TABELA 3. Características do redutor BREVINI SL 4003.

COMPONENTE	1º ESTÁGIO	2º ESTÁGIO	3º ESTÁGIO
Número de planetas	3	3	3
Número de dentes na engrenagem solar	12	19	22
Número de dentes nas engrenagens planetárias	23	22	23
Número de dentes na engrenagem anelar	60	65	70
Rolamentos dos eixos planetários	16012	16010 SL 182932	23030

Fonte: Autor (2024).

3.3. Parâmetros e Frequências Características dos Redutores

Nas Tabela 4 e 5 tem-se, respectivamente, as frequências determinísticas das engrenagens dos redutores planetários BREVINI ET 3520 e BREVINI SL 4003.

TABELA 4. Frequências determinísticas das engrenagens do redutor BREVINI ET 3520.

COMPONENTE	1º ESTÁGIO	2º ESTÁGIO	3º ESTÁGIO
Frequência de Engrenamento (f_{eng})	285,48 Hz	42,93 Hz	13,76 Hz
Rotação do sol (N_1)	19,67 Hz	3,81 Hz	0,74 Hz
Rotação dos planetas (N_2)	6,21 Hz	1,21 Hz	0,23 Hz
Rotação do porta-planetas (N_4)	3,81 Hz	0,74 Hz	0,14 Hz
Danos na engrenagem solar (F_1)	47,58 Hz	9,20 Hz	1,79 Hz
Danos nas engrenagens planetárias (F_2) (o dobro para dois lados do dente)	10,20 Hz	2,04 Hz	0,53 Hz
Falha na engrenagem anelar (F_3)	11,42 Hz	2,22 Hz	0,43 Hz

Fonte: Autor (2024).

TABELA 5. Frequências determinísticas das engrenagens do redutor BREVINI SL 4003.

COMPONENTE	1º ESTÁGIO	2º ESTÁGIO	3º ESTÁGIO
Frequência de Engrenamento (f_{eng})	196,67 Hz	48,19 Hz	12,41 Hz
Rotação do sol (N_1)	19,67 Hz	3,28 Hz	0,74 Hz
Rotação dos planetas (N_2)	4,92 Hz	1,35 Hz	0,34 Hz
Rotação do porta-planetas (N_4)	3,28 Hz	0,74 Hz	0,18 Hz
Danos na engrenagem solar (F_1)	49,17 Hz	7,61 Hz	1,69 Hz
Danos nas engrenagens planetárias (F_2) (o dobro para dois lados do dente)	8,55 Hz	2,19 Hz	0,54 Hz
Falha na engrenagem anelar (F_3)	9,83 Hz	2,22 Hz	0,53 Hz

Fonte: Autor (2024).

Nas Tabelas 6 e 7 tem-se, respectivamente, as frequências determinísticas dos rolamentos dos redutores planetários BREVINI ET 3520 e BREVINI SL 4003.

Na Tabela 8 tem-se as frequências determinísticas dos rolamentos do motor elétrico, LA e LOA, dos redutores planetários BREVINI ET 3520 e BREVINI SL 4003, respectivamente.

TABELA 6. Frequências determinísticas dos rolamentos do redutor BREVINI ET 3520.

COMPONENTE	1º ESTÁGIO	2º ESTÁGIO	3º ESTÁGIO
Descrição dos rolamentos planetários	16012	NU 1030	24030
Danos na pista interna (F_{ri})	58,09 Hz	15,78 Hz	3,10 Hz
Danos na pista externa (F_{re})	47,24 Hz	13,02 Hz	2,54 Hz
Danos nos elementos rolantes ($2 \cdot F_{rr}$)	59,89 Hz	12,38 Hz	2,11 Hz
Rotação da gaiola (F_{rg})	2,73 Hz	0,54 Hz	0,10 Hz

Fonte: Autor (2024).

TABELA 7. Frequências determinísticas dos rolamentos do redutor BREVINI SL 4003.

COMPONENTE	1º ESTÁGIO	2º ESTÁGIO	3º ESTÁGIO
Descrição dos rolamentos planetários	16012	16010	23030
Danos na pista interna (F_{ri})	46,07 Hz	11,97 Hz	5,6 Hz
Danos na pista externa (F_{re})	37,47 Hz	9,61 Hz	4,73 Hz
Danos nos elementos rolantes ($2 \cdot F_{rr}$)	47,5 Hz	12,12 Hz	3,91 Hz
Rotação da gaiola (F_{rg})	2,16 Hz	0,59 Hz	0,15 Hz

Fonte: Autor (2024).

TABELA 8. Freq. Determinísticas | Rolamentos motores elétricos, BREVINI ET 3520 e SL 4003.

COMPONENTE	LA 6212	LOA 6312
Danos na pista interna (F_{ri})	115,84 Hz	97,15 Hz
Danos na pista externa (F_{re})	80,83 Hz	60,18 Hz
Danos nos elementos rolantes ($2 \cdot F_{rr}$)	106,59 Hz	79,45 Hz
Rotação da gaiola (F_{rg})	8,06 Hz	7,47 Hz

Fonte: Autor (2024).

3.4. Coleta e Processamento de Dados

As coletas de dados dos redutores foram realizadas com o SKF® Microlog GX 75. A frequência de amostragem e o tempo de coleta foram selecionados de tal forma que os conjuntos de dados pudessem reproduzir as faixas de frequências para os diferentes estágios dos redutores.

Todos dados foram coletados com os motores elétricos trabalhando a 1180 rpm (19,67 Hz). As coletas foram agrupadas do grupo A a F em função das semelhanças nas condições de coleta.

Na Tabela 9 tem-se as leituras dos forma de onda e dos espectros redutores BREVINI ET 3520 e BREVINI SL 4003, onde F_a e F_{max} são a frequência de amostragem e a frequência máxima do espectro, respectivamente.

TABELA 9. Leituras forma de onda e espectros redutores BREVINI ET 3520 e BREVINI SL 4003.

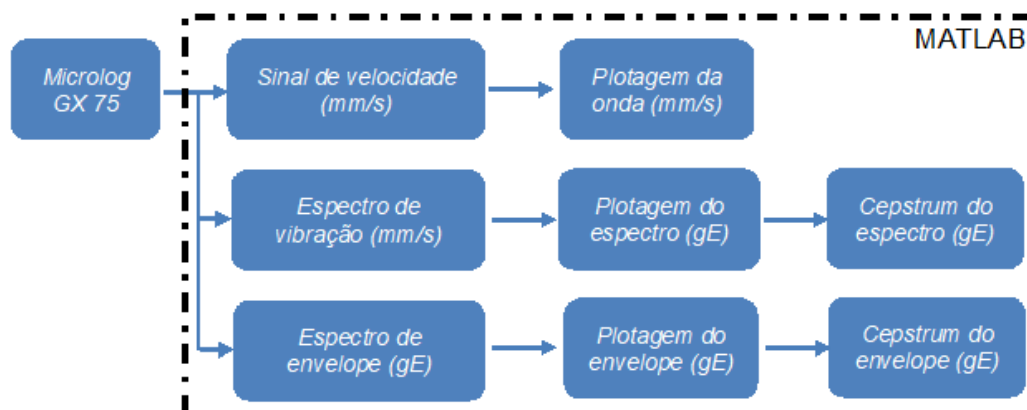
GRUPO	LEITURAS	DETECÇÃO	UNIDADE	TEMPO	F_a	F_{max}
A	4	RMS	mm/s	3,2 s	2560 Hz	1000 Hz
B	2	RMS	mm/s	21,3 s	384 Hz	150 Hz
C	4	RMS	mm/s	2,1 s	3841 Hz	1500 Hz
D	2	RMS	mm/s	64 s	128 Hz	50 Hz
E	4	RMS	mm/s	320 s	26 Hz	10 Hz
F	4	RMS	mm/s	6,4 s	1280 Hz	500 Hz

Fonte: Autor (2024).

Outros doze espectros de Envelopes de vibração com dados em aceleração (gE) e $F_{max} = 1000 \text{ Hz}$ também foram gerados pelo SKF® Microlog GX 75.

Todos os dados foram importados e tratados no MATLAB® de forma a apresentar a plotagem dos formatos de onda, dos espectros e dos envelopes. Também foram desenvolvidos scripts baseados nas equações mencionadas seção 2.3 para obtenção dos Cepstrums dos redutores. Na Figura 3 tem-se o esquema para processamento dos dados no MATLAB®.

FIGURA 3. Procedimento para processamento dos dados.



Fonte: Autor (2024).

Para o Cepstrum foi considerado e aplicada a Equação 5. A lógica do script realizado no MATLAB® está descrita na Figura 4.

FIGURA 4. Procedimento para elaboração de Cepstrum dos espectros.



Fonte: Autor (2024).

4. CRITÉRIOS DE CRITICIDADE

As normas nacionais e internacionais servem de referência para determinação do grau de severidade da intensidade de vibração de equipamentos.

Nesse estudo as normas ISO 20816 (2016) e NBR 10082 (2021) foram tomadas como referência para criticidade. Os limites operacionais dos redutores 1 e 2 foram consultados no catálogo BREVINI (2019). Na Tabela 10 tem-se os critérios de criticidade considerados nesse estudo.

TABELA 10. Referência para critério de criticidade.

CLASSIFICAÇÃO	PARÂMETRO	ET 3520 (32 - 75 Hp)	SL 4003 (32 - 75 Hp)
Bom	RMS (mm/s)	0,28 - 1,12	0,28 - 1,12
Aceitável	RMS (mm/s)	1,12 - 2,8	1,12 - 2,8
Severo	RMS (mm/s)	2,8 - 7,1	2,8 - 7,1
Crítico	RMS (mm/s)	> 7,1	> 7,1

Fonte: Catálogo BREVINI (2019).

5. RESULTADOS

5.1. Redutor BREVINI ET 3520

5.1.1. Formatos de Onda

Na Tabela 11 tem-se os valores dos RMS mínimos e máximos das leituras de vibração coletadas para o redutor BREVINI ET 3520 e suas classificações.

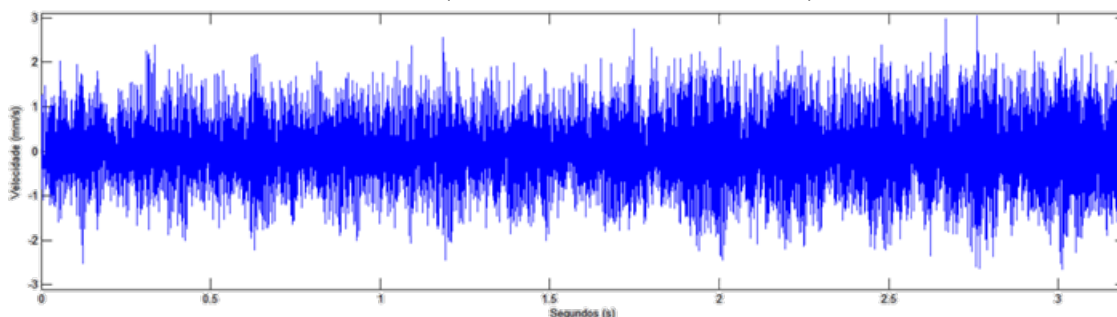
TABELA 11. Referência para critério de criticidade.

Grupo	Leituras	RMS Mínimo	RMS Máximo	Classificação
A	4	0,53 mm/s	1,17 mm/s	Bom
B	2	0,08 mm/s	0,11 mm/s	Bom
C	4	0,67 mm/s	1,36 mm/s	Aceitável
D	2	0,07 mm/s	0,08 mm/s	Bom
E	4	0,01 mm/s	0,02 mm/s	Bom
F	4	0,15 mm/s	0,36 mm/s	Bom

Fonte: Autor (2024).

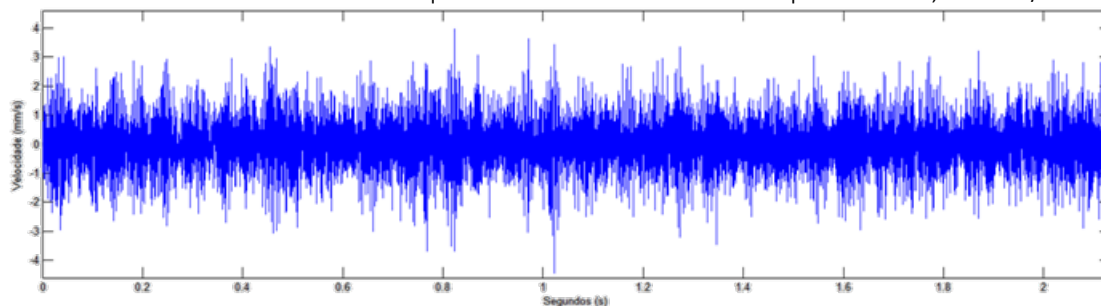
Nas Figuras 5 e 6 tem-se, respectivamente, a "Forma de Onda" para dos Grupos A e C que apresentaram os maiores RMS dos grupos.

FIGURA 5. "Forma de Onda" | Redutor BREVINI ET 3520 | RMS de 1,17 mm/s.



Fonte: Autor (2024).

FIGURA 6. "Forma de Onda" | Redutor BREVINI ET 3520 | RMS de 1,36 mm/s.

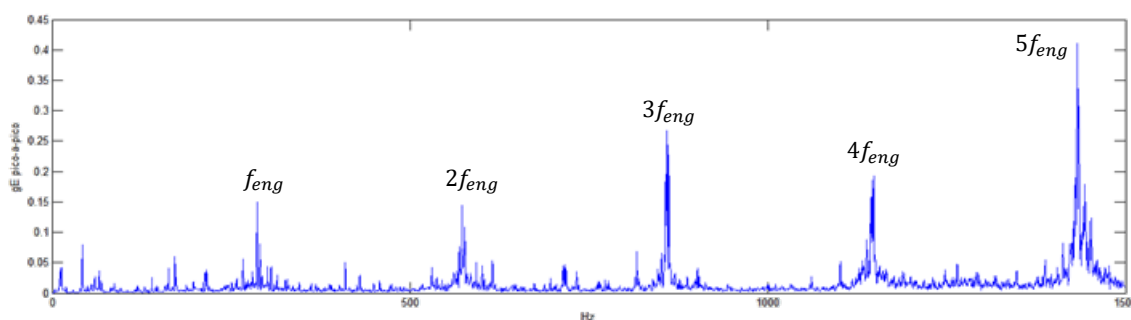


Fonte: Autor (2024).

5.1.2. Espectro FFT

Na Figura 7 tem-se um dos "Espectro FFT" do redutor BREVINI ET 3520. Os resultados não permitiram identificar claramente a presença de uma família de bandas laterais predominante. Através dessa técnica não é possível confirmar a presença de defeitos incipientes nos componentes do redutor.

FIGURA 7. "Espectro FFT" | BREVINI ET 3520 | Sem famílias de bandas laterais predominante.



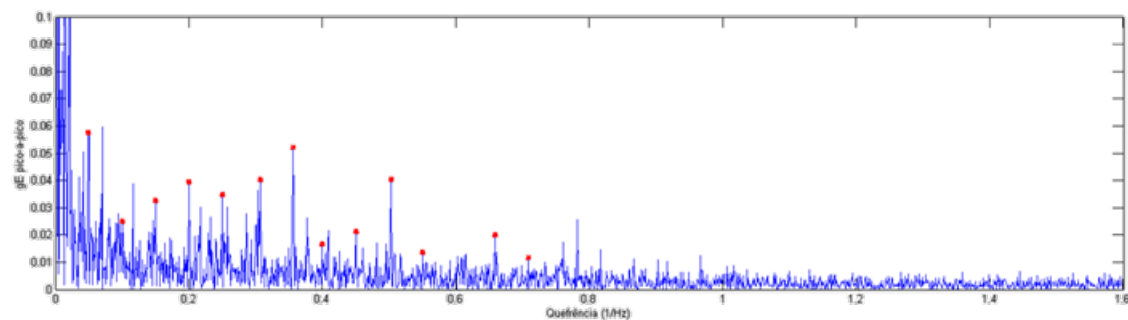
Fonte: Autor (2024).

5.1.3. Cepstrum do Espectro FFT

No "Cepstrum" do "Espectro FFT", Figura 8, tem-se uma sequência de harmônicas múltiplas da quefrência de $0,05\text{ s}$, confirmando a presença de bandas laterais de 20 Hz . Conforme a Tabela 4, esse valor é um "indicativo" de danos nas engrenagens planetárias (F_2), uma vez que é aproximadamente o dobro de $10,2\text{ Hz}$.

De fato, conforme mencionado no item 2.3, o "Cepstrum" torna mais clara a presença das famílias dessas bandas laterais. Através do "Cepstrum" é mais fácil a identificação de possíveis defeitos incipientes.

FIGURA 8. "Cepstrum" do "Espectro FFT" | BREVINI ET 3520 | Harmônicas de $0,05\text{ s}$.

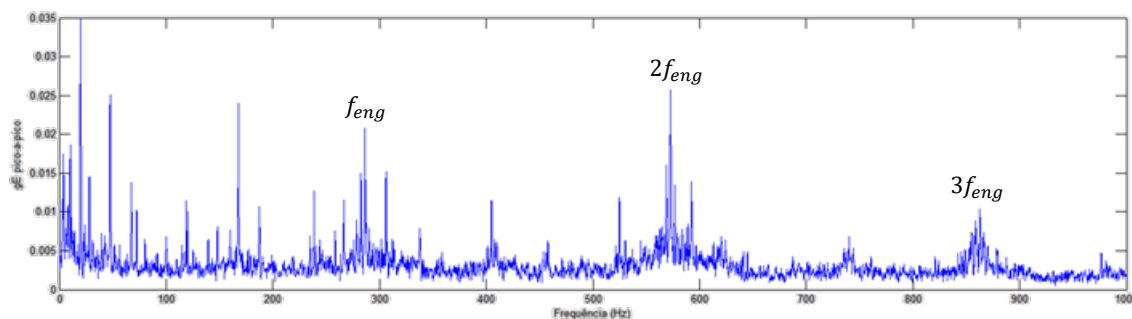


Fonte: Autor (2024).

5.1.4. Espectros do Envelope

No "Espectro de Envelope", Figura 9, não apresentou uma predominância de bandas laterais evidentes. Porém foi observada um maior acumulado de energia na região anterior a f_{eng} .

FIGURA 9. "Espectro de Envelope" | BREVINI ET 3520.



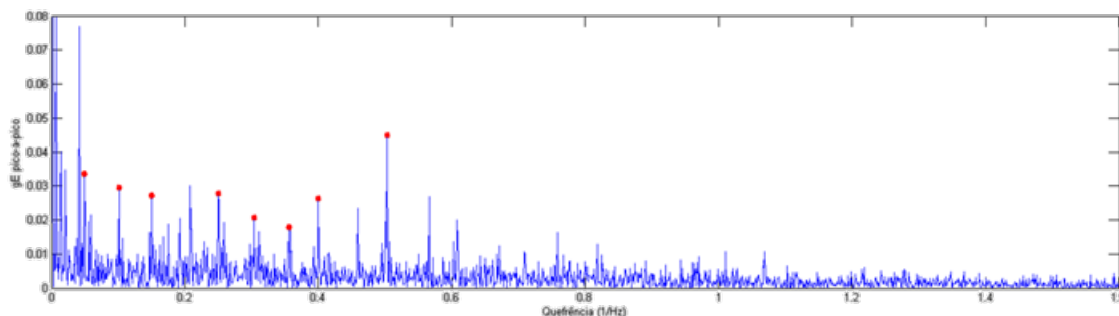
Fonte: Autor (2024).

5.1.5. Cepstrum do Envelope

No "Cepstrum do Envelope", Figura 10, foi observada uma sequência de harmônicas múltiplas da quefrência de $0,05\text{ s}$, confirmando a presença das bandas laterais espaçadas de aproximadamente 20 Hz .

Novamente, o "Cepstrum do Envelope" tornou mais clara a presença das famílias de bandas laterais espaçadas de aproximadamente **20 Hz**.

FIGURA 10. Cepstrum do Envelope" | BREVINI ET 3520 | Harmônicas de 0,05 s.



Fonte: Autor (2024).

5.2. Redutor SL 4003

5.2.1. Forma de Onda

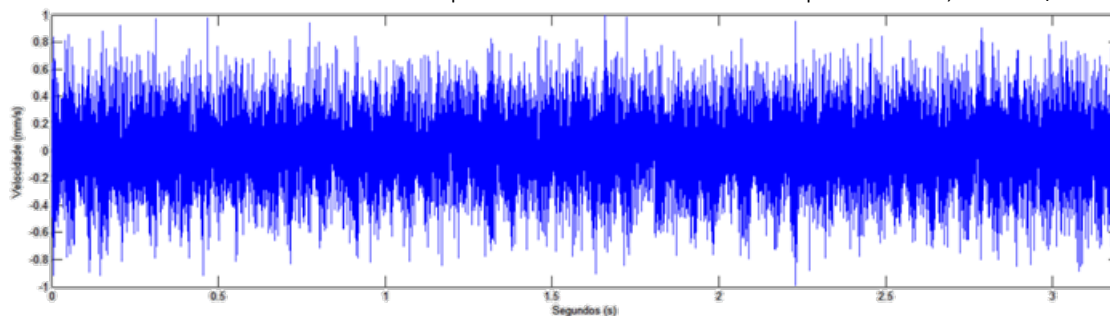
Na Tabela 12 tem-se os valores dos RMS mínimos e máximos das leituras de vibração coletadas para o redutor BREVINI SL 4003 e suas classificações. Nas Figuras 11 e 12 tem-se, respectivamente, a "Forma de Onda", Grupos A e C, que apresentaram os maiores RMS dos grupos.

TABELA 12. Referência para critério de criticidade.

Grupo	Leituras	RMS Mínimo	RMS Máximo	Classificação
A	4	0,25 mm/s	0,44 mm/s	Bom
B	2	0,06 mm/s	0,07 mm/s	Bom
C	4	0,39 mm/s	0,48 mm/s	Bom
D	2	0,03 mm/s	0,03 mm/s	Bom
E	4	0,01 mm/s	0,01 mm/s	Bom
F	4	0,11 mm/s	0,14 mm/s	Bom

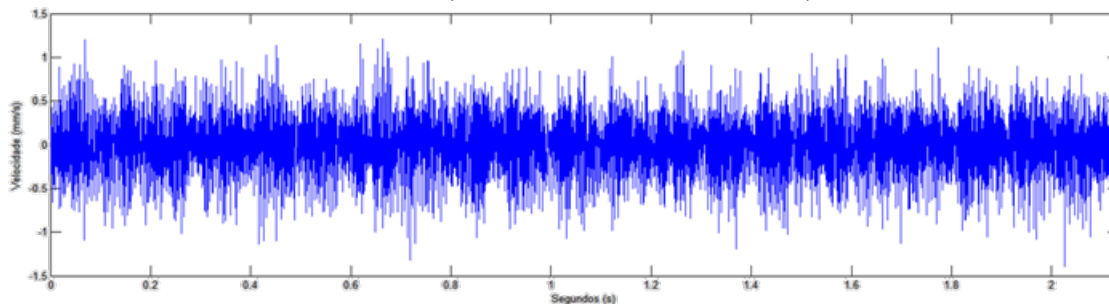
Fonte: Autor (2024).

FIGURA 11. "Forma de Onda" | Redutor BREVINI SL 4003 | RMS de 0,44 mm/s.



Fonte: Autor (2024).

FIGURA 12. "Forma de Onda" | Redutor BREVINI SL 4003 | RMS de 0,48 mm/s.

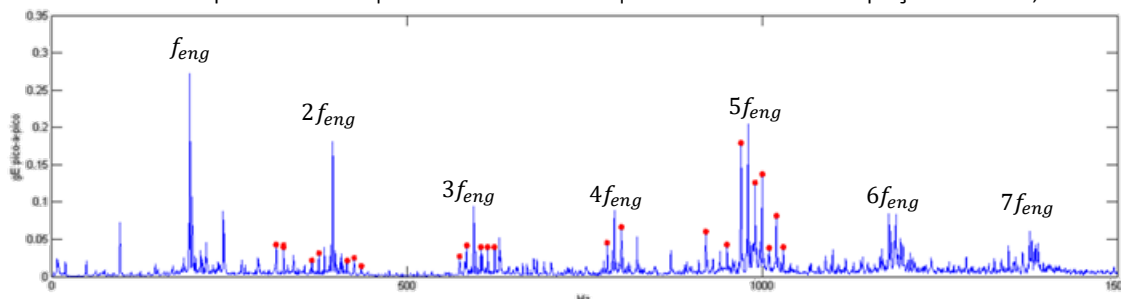


Fonte: Autor (2024).

5.2.2. Espectro FFT

Na Figura 13 tem-se o "Espectro FFT" com bandas laterais espaçadas de $9,89 \text{ Hz}$ que, de acordo com a Tabela 5, próxima da frequência "indicativo" de falha da engrenagem anelar ($9,83 \text{ Hz}$).

FIGURA 13. "Espectro FFT" | BREVINI SL 4033 | Bandas laterais espaçadas de $9,89 \text{ Hz}$.

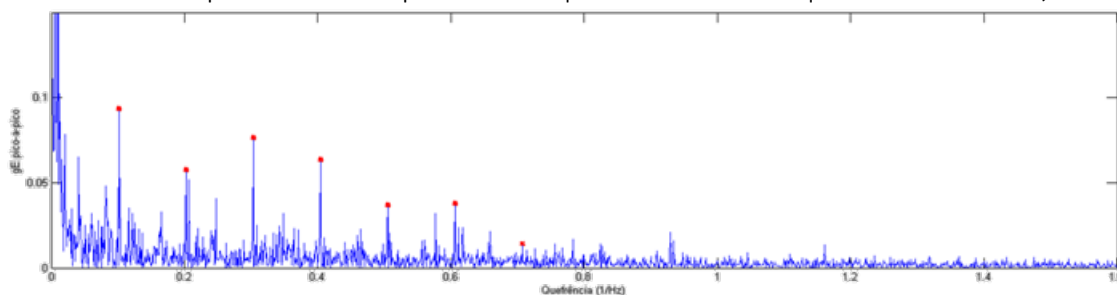


Fonte: Autor (2024).

5.2.3. Cepstrum do Espectro FFT

No "Cepstrum" do "Espectro FFT", Figura 14, tem-se uma sequência de harmônicas múltiplas da quefrência de $0,101 \text{ s}$, confirmando a presença das bandas laterais separadas por $9,9 \text{ Hz}$, que é, aproximadamente a frequência característica de falha da engrenagem anelar, $9,83 \text{ Hz}$.

FIGURA 14. "Cepstrum" do "Espectro FFT" | BREVINI SL 4003 | Harmônicas de $0,101 \text{ s}$.



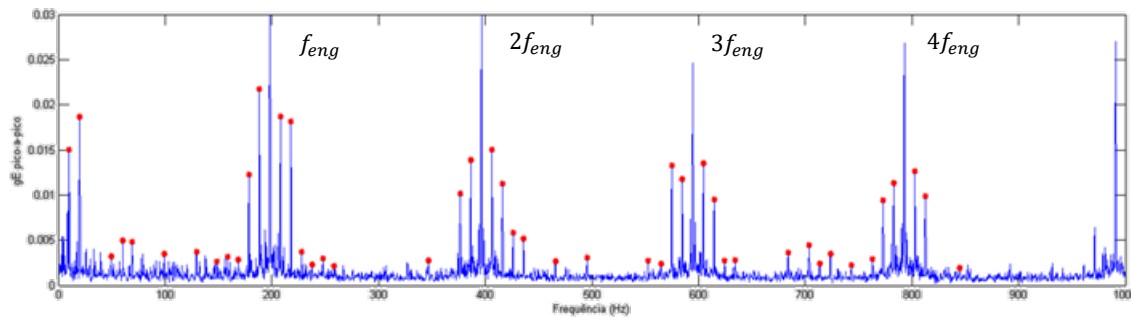
Fonte: Autor (2024).

De fato, conforme mencionado no item 2.3, o "Cepstrum" torna mais clara a presença das famílias de bandas laterais espaçadas de aproximadamente $9,90 \text{ Hz}$. Através do "Cepstrum" é mais fácil a identificação de possíveis defeitos incipientes.

5.2.4. Espectros do Envelope

No "Espectro de Envelope", Figura 15, observa-se a presença de bandas laterais espaçadas aproximadamente na frequência característica de falhas na engrenagem anelar do primeiro estágio (9,83 Hz).

FIGURA 15. "Espectro de Envelope" | BREVINI ET 3520.

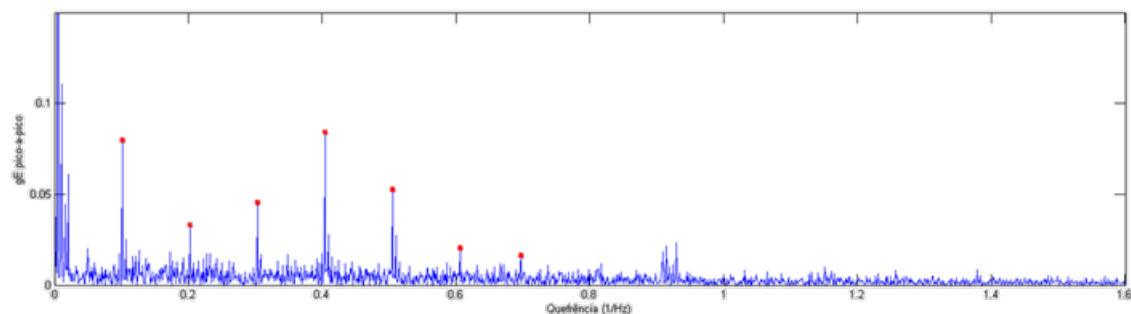


Fonte: Autor (2024).

5.2.5. Cepstrum do Envelope

No "Cepstrum do Envelope", Figura 16, foi observada uma sequência de harmônicas múltiplas da quefrência de 0,101 s, confirmando a presença das bandas laterais espaçadas de aproximadamente 9,90 Hz. Novamente, o "Cepstrum do Envelope" tornou mais clara a presença das famílias de bandas laterais espaçadas de aproximadamente 9,90 Hz.

FIGURA 16. "Cepstrum do Envelope" | BREVINI ET 3520 | Harmônicas de 0,101 s.



Fonte: Autor (2024).

6. CONCLUSÃO

Analisando os resultados foi possível observar que as frequências naturais típicas que se esperavam encontrar nos redutores planetários puderam ser identificadas nos espectros, conferindo validação aos dados.

Baseando-se nos critérios de criticidades apresentados, os redutores mostraram estar com níveis de vibração bons ou aceitáveis. Esse estudo não resultou em indícios suficientes para justificar a parada do equipamento para manutenção imediata.

Frequências características de possíveis desgastes e/ou danos nos componentes dos redutores foram identificadas nos espectros e cepstruns de ambos os redutores. Essas assinaturas confirmam que a análise de vibração através de diferentes técnicas é uma ferramenta de monitoramento da condição.

Dentre as técnicas que aplicadas, o espectro de envelope somado ao Cepstrum do envelope mostraram ser a melhor combinação de técnicas. Ambas os resultados apontaram para a presença das bandas laterais de possíveis desgastes/danos nos redutores.

O redutor ET 3520 apresentou maior nível de ruído nos espectros dos dados coletados, tornando mais difícil a identificação de assinaturas. Nesse contexto, o Cepstrum cumpriu papel fundamental ao tornar mais evidente a família de bandas laterais decorrente da assinatura das engrenagens planetárias.

O redutor SL 4003 apresentou espectros mais limpos e de mais fácil análise. De forma semelhante, seus "Cepstruns" confirmaram as assinaturas previamente identificadas de forma a validar a análise prévia, com assinaturas evidentes.

Ao final do estudo, dentre as técnicas estudadas, o Cepstrum conseguiu se confirmar como melhor análise a ser recomendada como ferramenta para detecção de danos ou monitoramento da condição de redutores planetários.

Apesar de se concluir que uma parada imediata para manutenção não seja necessária, esse estudo não considerou o comportamento dessas assinaturas ao longo do tempo. Assim, não é possível determinar com maior grau de certeza se as assinaturas encontradas estão compatíveis com o histórico operacional dos equipamentos. Para isso, seria recomendável o acompanhamento dos dados através da rotina de inspeções preditivas. Ao sinal de desvios abruptos ou crescimento nos parâmetros de vibração para níveis mais preocupantes, ações de manutenções poderiam ser recomendadas.

Além disso, o cenário de Análise de Vibração conta com diferentes técnicas que vão além das aqui apresentadas. Portanto, sugere-se que possíveis descobertas podem surgir a partir da implementação de técnicas de Análise de Vibração que não foram aqui estudadas.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 5462. Confiabilidade e manutenibilidade. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. pág. 37. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10082. Análise de vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 a 15000 RPM-bases para especificação e padrões de avaliação.. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ATHAYDE JR., P. G. W. Projeto Preliminar de um Redutor Planetário com Múltiplas Entradas. 2021.

BALDISSARELLI, L., FABRO, E. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. Scientia cum industria, v. 7, n. 2, p. 12-22, 2019.

Brevini® Planetary Gearboxes S Series. BREVINI Motion Systems. Product Catalog, 2019.

CORONADO, D., FISCHER, K. Condition Monitoring of Wind Turbines: State of Art, User Experiences and Recommendations. Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy Systems Technology IWES. 2015.

ESTEVES, M. Concepção de um Engrenamento Planetário usando " NASA Gear Bearings". 2018.

FENG, Z., ZUO, M. J. Vibration signal models for fault diagnosis of planetary gearboxes. Journal of Sound and Vibration, v. 331, n. 22, p. 4919-4939, 2012.

FERREIRA, S., J., S. Diagnóstico de máquinas elétricas pela análise de vibração. 2012. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Internacional Organization for Standardization, ISO 20806-1, Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines, ISO, Suíça, 2016.

KARDEC A., NASCIF J. Manutenção: função estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark, 5ª ed. 2019.

LEI, Y.; LIN, J.; ZUO, M.; HE, Z. Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review. Measurement, v. 48, p. 292-305, 2014.

MIAO, Q., ZHOU, Q. Planetary gearbox vibration signal characteristics analysis and fault diagnosis. Shock and Vibration, v. 2015, 2015.

NACIB, L.; SAAD, S.; SAKHARA, S. A comparative study of various methods of gear faults diagnosis. Journal of Failure Analysis and Prevention, v. 14, n. 5, p. 645-656, 2014.

POPESCU, T. D., AIORDACHIOAIE, D., FLORESCU, A. Signal Processing in Vibration Analysis with Application in Predictive Maintenance of Rotating Machines. International Journal on Advances in Systems and Measurements. 2020.

RANDALL, R. B. A history of cepstrum analysis and its application to mechanical problems. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 97, p. 3-19, 2017.

RANDALL, R. Bond. Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications. John Wiley & Sons, 2021.

VITORINO, C. R. S. Modelagem dinâmica de caixa multiplicadora de velocidades de aerogeradores. 2012.

WANG, T.; HAN, Q.; CHU, F.; FENG, Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: A review. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 126, 2019.