



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Felipe dos Santos

Monitoramento de vibração mecânica de gerador síncrono: avaliação experimental de métricas globais e de conteúdo harmônico

Florianópolis
2024

Guilherme Felipe dos Santos

Monitoramento de vibração mecânica de gerador síncrono: avaliação experimental de métricas globais e de conteúdo harmônico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Coorientador: Prof. Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

dos Santos, Guilherme Felipe

Monitoramento de vibração mecânica de gerador síncrono :
avaliação experimental de métricas globais e de conteúdo
harmônico / Guilherme Felipe dos Santos ; orientador,
Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Carlos Alexandre
Corrêa Wengerkievicz, 2024.

181 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. gerador síncrono. 3. faltas
incipientes. 4. monitoramento de vibração. 5. métricas
estatísticas. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Wengerkievicz,
Carlos Alexandre Corrêa. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. IV. Título.

Guilherme Felipe dos Santos

Monitoramento de vibração mecânica de gerador síncrono: avaliação experimental de métricas globais e de conteúdo harmônico

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Sebastião Lauro Nau, Dr.
WEG Equipamentos Elétricos S.A.

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa
Catarina – UFSC

Prof. Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz,
Dr.
Coorientador
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, Paulo e Solenir, que me acompanharam e apoiaram até aqui; e aos meus avós, Eduardo, Francisca, Altino e Leontina (*in memorium*), que deram origem à família que eu conheço e à que ainda virá. Sem a mesma oportunidade que puderam dar aos seus descendentes, espero que levem este trabalho como um presente e um agradecimento por todo o esforço para que façamos deste um mundo melhor.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não se limita à minha formação em um curso de pós-graduação *stricto sensu*, pois também fez parte de diferentes etapas da minha vida ao longo de quase 3 anos de dedicação, com aprendizados teóricos, de ferramentas e, principalmente, de gestão de tempo e atividades. Separo essa jornada em dois períodos: o primeiro marcado pelo balanço entre as disciplinas do curso e um projeto em andamento no laboratório e o segundo pela divisão de atenção entre o mestrado e meu emprego.

A vivência no laboratório propiciou liberdade para investigações e criatividade, além de o projeto gerar trabalhos preliminares que formaram a base de conhecimento e o direcionamento para a dissertação. Entre essa etapa e o início da minha atuação no mercado de trabalho, houve o planejamento e execução de testes, ensaios, estudo e pesquisa, essenciais para a formar a base de dados utilizada e a ideia para o tema da dissertação. O período de execução do mestrado à distância, em outra cidade, também foi marcado por grande liberdade para os desenvolvimentos em processamento dos dados de ensaio e por longas horas de estudo, escrita e análise de resultados. Esse período se mostrou valioso para a minha formação, pois o contato com o mercado de trabalho favoreceu maior maturidade do tema, embora também tenha sido o maior desafio para a execução do presente trabalho devido ao tempo demandado.

Nesse contexto, agradeço primeiramente à minha noiva Bruna Benita Weber Sanchez Lopez, pelo incentivo constante, suporte e compreensão nas incontáveis noites e finais de semana de minha ausência, para possibilitar concretização do objetivo de concluir o mestrado.

Agradeço também aos meus pais, Paulo Sérgio dos Santos e Solenir Wosniak dos Santos, que sempre fizeram tudo aos seus alcances para dar oportunidades de desenvolvimento para mim e minhas irmãs. Deixo registrado aqui, esperante que para a eternidade, meu muito obrigado pelo exemplo de união e responsabilidade que, reconhecidamente, contribuiu para a formação de meu caráter.

Agradeço ao meu orientar, Nelson Jhoe Batistela, pela parceria ao longo de toda a graduação na orientação de variadas Iniciações Científicas e pela compreensão nas diversas trocas que tivemos ao longo desses anos.

Agradeço ao meu coorientador, Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, que me acompanhou, principalmente, nos últimos anos da graduação, durante o projeto que durou até o início do mestrado. Exemplo de solidariedade, nunca mediu esforços para incluir todos ao seu redor e compartilhar suas descobertas. Obrigado pelas revisões dessa dissertação e de artigos, com observações sempre ricas e bem colocadas, o que contribuiu fortemente para melhorar a qualidade dos trabalhos.

Agradeço pelo companheirismo dos colegas que passaram pelo GRUCAD entre 2016 e 2022, alunos e professores. Primeiramente, àqueles que contribuíram para minha formação inicial como profissional: Ricardo de Araújo Elias, Benjamin Mailhé, Helton Fernando dos Santos e, novamente, ao Carlos. Aos professores, que mesmo através de contatos breves, impactaram

minha vivência na universidade de forma positiva: Nelson Sadowski, Walter Pereira Carpes Júnior, Jean Viane Leite, Patrick Kuo Peng e João Pedro Assumpção Bastos. Agradeço também aos outros colegas que se fizeram presentes nesse período: André, Indiara, Marjorie e Grillo e a todos que não estou citando diretamente. Em especial, agradeço àqueles que me acompanharam durante o período inicial de realização do mestrado:

- Danilo Gartner Aurich pela amizade, personalidade única e compartilhamento infundável de suas ferramentas e interesses;
- Luciano Bortoloto Antunes pela parceria e seriedade durante nossos trabalhos compartilhados;
- Alexandre Brescovitt pela empolgação e visão sobre a vida;
- Aos alunos voluntários que se disponibilizaram para a participação nos ensaios desse trabalho, juntamente com os demais citados.

Agradeço à banca pela disponibilidade, dedicação e paciência para apreciar o trabalho. Seus diferentes pontos de vista e sugestões contribuem, doravante, para a minha formação como indivíduo e profissional e para a melhoria deste trabalho em sua versão final.

Agradeço a Deus, que poderia ter encerrado essa jornada em inúmeras situações sem aviso prévio.

Paraphrasing a colleague from the laboratory, who will remain anonymous and did not dare to make this affirmation in his dissertation: I thank myself for the effort. Although comic, this affirmation is cited as a form of self-recognition for the dedication unjustifiable to the realization of this work and for all the sacrifices and abdications to reach its conclusion. I refer to the numerous situations in which, given the execution of the work in intermittent blocks, I had gratitude for the developments previously made by me that facilitated and contributed to the efficient resumption of the stages of the activities. And, if this work did not reach extraordinary results, at least they were obtained with much dedication and resilience, within the possibilities of each period.

Agradeço à Engie Brasil Energia e Itá Energética S.A. pela motivação e custeio parcial desse trabalho, desenvolvido em seus programas de P&D através dos projetos regulados pela ANEEL PD-0403-0033/2012 e PD-00403-0048/2019, ambos intitulados "Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo". Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela motivação e custeio parcial desse trabalho.

"This is the real secret of life – to be completely engaged with what you are doing in the here and now. And instead of calling it work, realize it is play."
Alan Watts

RESUMO

A confiabilidade do gerador síncrono no setor de hidrogeração é de grande importância no Brasil, sendo o monitoramento de condição uma alternativa importante às manutenções tradicionais para evitar interrupções inesperadas de operação. A análise de vibração é uma ferramenta proeminente nesse contexto, estando estabelecida industrial e cientificamente. Este trabalho visa contribuir para esse contexto ao explorar métricas globais complementares àquelas tipicamente utilizadas e uma banda maior de frequência do que o usual em aplicações práticas. As métricas globais complementares escolhidas foram a curtose e a assimetria, que são indicadores estatísticos da distribuição dos valores amostrados. Realizaram-se ensaios experimentais aplicando de maneira controlada diversos tipos e intensidades de faltas incipientes em uma bancada, sob múltiplos pontos de operação. Os dados coletados foram processados através de técnicas desenvolvidas durante a realização do trabalho. Avaliou-se a variação das métricas sob diferentes combinações de sequência de operação, para diferentes condições de ensaio e posicionamento de sensores. Verificou-se que a excitação da máquina tem influência na intensidade da variação dos sinais de vibração proporcionadas pelas faltas. Utilizou-se também uma técnica baseada na norma ISO 20816 para a determinação da sensibilidade das métricas às faltas, indicando as vantagens de cada tipo de métrica e quais posicionamentos de sensores foram mais afetados por cada tipo de falta. Por fim, avaliou-se a variação do conteúdo harmônico do sinal com as faltas e sua variabilidade entre os pontos de operação testados. Mostra-se que outras harmônicas além das conhecidas na literatura são alteradas pelas faltas conhecidas.

Palavras-chave: Gerador síncrono. Faltas incipientes. Monitoramento de vibração. Norma ISO. Métricas estatísticas. Harmônicas. Bancada experimental.

ABSTRACT

The reliability of synchronous generators of hydrogeneration applications is of great importance in Brazil, as the condition monitoring presents itself as an important alternative to traditional maintenance methodologies to avoid unexpected interruptions on operation. The vibration analysis is a prominent tool in this context, as it is already established industrially and scientifically. This work aims to contribute for this context in exploring global metrics complementary to those typically used and a larger frequency bandwidth than usual application. The chosen complementary global metrics were kurtosis and skewness, which are statistical indicators of the distribution of the sampled values. Experimental tests were performed applying several types and intensities of incipient faults in a controlled manner at a test bench, under multiples operating conditions. The data collected was processed through techniques developed during the work execution. The variation of the metrics were evaluated under different combinations of operation sequences, for different test conditions and sensor positions. It was verified that the excitation of the machine has influence on the intensity of the vibration variation due to faults. Another technique, based on the ISO 20816 standard, was used to determine the sensitivity of the metrics to the faults, where the advantages of each type of metric were indicated as well as the most sensitive sensor positions for each case. Finally, the variation of the vibration signals harmonic content with faults and its variability between operating conditions was evaluated, showing that frequencies other than the known ones are altered by the known faults.

Keywords: Synchronous generator. Incipient faults. Vibration monitoring. ISO Standard. Statistical metrics. Harmonics. Test bench.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes de um gerador síncrono.	27
Figura 2 – Ilustração de um segmento de chapa do estator.	30
Figura 3 – Ilustração da forma de onda de tensão em um gerador devido aos enrolamentos do estator.	30
Figura 4 – Distorção da indução magnética no entreferro ao longo de uma ranhura devido à sua abertura.	31
Figura 5 – Efeito de dutos de ventilação na indução no entreferro da máquina ao longo de seu eixo axial.	32
Figura 6 – Chapa de estator produzida com ferramenta de estampo completo com chanfro visível em seu diâmetro externo para prensa com outras chapas. . .	33
Figura 7 – Caminho do fluxo magnético através dos polos do rotor gerado pela corrente dos enrolamentos de campo.	33
Figura 8 – Ilustração do efeito da saturação em um gerador síncrono através da curva característica de circuito aberto.	34
Figura 9 – Circuito equivalente de um gerador síncrono.	35
Figura 10 – Diagrama fasorial de um gerador síncrono.	37
Figura 11 – Variação da corrente de excitação para manter a tensão interna constante. . .	38
Figura 12 – Curva de capacidade com destaque nos determinantes de seus limites. . .	39
Figura 13 – Característica torque-ângulo.	39
Figura 14 – Tipos de excentricidade.	41
Figura 15 – Tipos de excentricidade paralela.	42
Figura 16 – Variáveis para consideração do entreferro em estudos de excentricidade paralela.	43
Figura 17 – Sistema de coordenadas para estudo da excentricidade inclinada.	43
Figura 18 – Componentes de força de vibração devido ao desbalanceamento.	44
Figura 19 – Ilustração dos tipos de desbalanceamento. Vista lateral à esquerda e frontal à direita.	45
Figura 20 – Simulação de densidade de fluxo magnético durante passagem dos 12 polos da máquina por um ponto fixo do estator, sob diferentes níveis de curto-circuito entre espiras do enrolamento de campo.	47
Figura 21 – Fluxograma de custos com manutenção, mostrando o impacto de falhas não previstas. CS = Custo de Substituição, CO = Custo Operacional, CHH = Custo Homem-Hora, CM = Custo de Materiais.	50
Figura 22 – Geração de vibração eletromagnética em uma máquina elétrica rotativa. . .	51
Figura 23 – Modos de vibração teóricos.	52

Figura 24 – Deformação da coroa do estator relativa ao modo de vibração zero em função da relação entre a altura da coroa e seu raio médio para diferentes modos de vibração.	53
Figura 25 – Modos de vibração simulados ou medidos. Em 25a a 25e mostram-se simulações MEF 2D para uma mesma máquina. Em 25f e 25g mostra-se uma simulação MEF 2D para o fluxo magnético na máquina e uma simulação MEF 3D para o modo de vibração. Em 25h a 25k mostram-se resultados medidos em máquinas diferentes	54
Figura 26 – Áreas relacionadas com o monitoramento de condição para a evolução de sua adoção.	55
Figura 27 – Etapas essenciais para o monitoramento de condição.	56
Figura 28 – Relação entre os sinais de vibração de deslocamento, velocidade e aceleração.	57
Figura 29 – Curva típica de calibração de proximetros.	58
Figura 30 – Representação da estrutura interna de um acelerômetro através de elementos básicos de vibração.	60
Figura 31 – Estrutura interna de um acelerômetro do tipo ICP [®]	61
Figura 32 – Efeito do tipo de fixação de acelerômetros na resposta em frequência.	62
Figura 33 – Representação em detalhe dos tipos de fixação de acelerômetros.	63
Figura 34 – Tipos de instalação de proximetros conforme a difusão de seus campos magnéticos. Da esquerda para a direita: faceada, não-faceada e quase-faceada.	63
Figura 35 – Posicionamento de sensores de vibração na máquina.	64
Figura 36 – Critérios gerais para classificação da zona de diagnóstico para sinais de velocidade de vibração de acordo com a faixa de frequência dos sensores.	65
Figura 37 – Métricas e métodos de processamento de sinais.	69
Figura 38 – Representação de espectros de <i>wavelets</i> se tocando a partir da translação da <i>wavelet</i> mãe no domínio do tempo por um fator de 2.	72
Figura 39 – Porcentagem de métodos usados para análise de vibração.	73
Figura 40 – Arranjo entre geradores e máquina primária da bancada experimental com representação dos acelerômetros instalados no gerador de 8 polos.	74
Figura 41 – Destaque para os painéis de controle e do banco de transformadores da bancada experimental.	75
Figura 42 – Característica de curto-circuito e a vazio do gerador síncrono de 8 polos da bancada.	75
Figura 43 – Esquema de bobinagem do estator do gerador de 8 polos da bancada experimental com disponibilização dos <i>taps</i> para retirada de espiras.	76
Figura 44 – Esquema de bobinagem do rotor do gerador de 8 polos da bancada experimental com disponibilização dos <i>taps</i> para retirada de espiras.	77
Figura 45 – Esquema para simulação de curto-circuito entre chapas do núcleo do estator do gerador de 8 polos da bancada experimental.	78

Figura 46 – Destaque para o gerador de 8 polos e o sistema de imposição automática de faltas elétricas e de núcleo logo abaixo.	78
Figura 47 – Destaque para o mancal do lado não acoplado do gerador mostrando as estruturas para deslocamento de eixo com o transdutor e o disco para fixação de peças para simulação de desbalanceamento.	79
Figura 48 – Disposição dos acelerômetros no gerador de 8 polos.	80
Figura 49 – Etapas para aquisição dos sinais de vibração.	80
Figura 50 – Sistema alternativo para aquisição dos sinais de vibração.	81
Figura 51 – Etapas de pré-processamento dos sinais adquiridos.	82
Figura 52 – Sinais de vibração mecânica.	83
Figura 53 – Visualização do espectro harmônico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração.	84
Figura 54 – Visualização do espectro harmônico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração, com amplitude logarítmicas.	84
Figura 55 – Pontos de operação ensaiados mostrados na curva de capacidade do gerador de 8 polos da bancada experimental.	87
Figura 56 – Etapas para análise dos valores globais.	89
Figura 57 – Comparação entre métricas globais RMS, curtose e assimetria para os sinais de aceleração e velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.	90
Figura 58 – Tendência das métricas globais RMS, curtose e assimetria para os sinais de velocidade de vibração durante os ensaios de imposição das demais faltas sob ponto de operação P8.	91
Figura 59 – Variação do ponto de operação P8 da máquina com a imposição de falta elétrica de retirada de espiras do rotor e falta mecânica de desbalanceamento.	92
Figura 60 – Variação das métricas globais RMS, curtose e assimetria dos sinais de velocidade de vibração conforme as sequências de ponto de operação para o gerador em estado sadio. Enfoque nas sequências de operação com (a-c) variação de potência ativa para fator de potência unitário, (d-f) variação de potência reativa para potência ativa constante e (g-i) variação de fator de potência para potência aparente constante.	93
Figura 61 – Comparação entre histórico original de métricas globais RMS, curtose e assimetria e histórico com influência removida para os sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.	94
Figura 62 – Histórico normalizado de métricas globais RMS, curtose e assimetria para os sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor e falta mecânica de excentricidade para o ponto de operação P8.	95

Figura 63 – Históricos normalizado e suavizado da métrica global RMS para o sinais de velocidade de vibração: falta mecânica de excentricidade para o ponto de operação P8.	96
Figura 64 – Tendência da diferença de amostras ao longo do histórico global RMS para o sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8, média entre os sensores.	97
Figura 65 – Mapa de cores dos limiares de alarme e <i>trip</i> sobre os conjuntos de dados das métricas globais normalizadas para todos os pontos de operação, tipos de falta e sensores testados.	99
Figura 66 – Limiares determinados para as métricas globais RMS, curtose e assimetria visíveis no histórico normalizado para o sinal de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.	99
Figura 67 – Variação dos valores globais de vibração com variação da potência ativa sem fornecimento de potência reativa (sequência zero).	101
Figura 68 – Variação da métrica global RMS de vibração com variação do fator de potência mantendo a potência aparente constante (sequências 4, 5 e 6).	103
Figura 69 – Variação da métrica global curtose de vibração com variação do fator de potência mantendo a potência aparente constante (sequências 4, 5 e 6).	104
Figura 70 – Variação da métrica global assimetria de vibração com variação do fator de potência mantendo a potência aparente constante (sequências 4, 5 e 6).	105
Figura 71 – Variação da métrica global RMS de vibração com variação da potência reativa mantendo a potência ativa constante (sequências 1, 2 e 3).	107
Figura 72 – Variação da métrica global curtose de vibração com variação da potência reativa mantendo a potência ativa constante (sequências 1, 2 e 3).	108
Figura 73 – Variação da métrica global assimetria de vibração com variação da potência reativa mantendo a potência ativa constante (sequências 1, 2 e 3).	109
Figura 74 – Simplificação da variação das métricas globais com relação ao ponto de operação, considerando média entre condições de cada tipo de falta e normalização.	110
Figura 75 – Ilustração da sensibilização das métricas globais por faltas elétricas com relação ao ponto de operação: potência reativa nula com variação da potência ativa (Sequência Zero).	112
Figura 76 – Ilustração da sensibilização das métricas globais por faltas elétricas com relação ao ponto de operação: potência ativa constante com variação da potência reativa (Sequência 3).	113
Figura 77 – Simplificação da sensibilização das métricas globais às faltas com relação aos sensores.	114
Figura 78 – Etapas para análise do histórico de harmônicas.	116

Figura 79 – Comparação das harmônicas teóricas com as rastreadas no espectro harmônico do sinal de velocidade de vibração.	118
Figura 80 – Mapa de cores da porcentagem da energia do sinal representada pelas harmônicas monitoradas para todos os pontos de operação, tipos de falta e sensores testados.	119
Figura 81 – Visualização do histórico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração do sensor CX no domínio da frequência durante ensaio de falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.	120
Figura 82 – Visualização do histórico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração do sensor CX no domínio da frequência durante ensaio de falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8 com processamento de suavização.	121
Figura 83 – Tendência das harmônicas dos sinais de velocidade de vibração durante o ensaio de retirada de espiras do rotor sob ponto de operação P8 para os demais sensores.	122
Figura 84 – Tendência das harmônicas dos sinais de velocidade de vibração durante os ensaios de imposição das demais faltas sob ponto de operação P8 para o sensor CX.	123
Figura 85 – Histórico normalizado de harmônicas para os sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor e falta mecânica de excentricidade para o ponto de operação P8.	123
Figura 86 – Variação das amplitudes normalizadas das harmônicas considerando diferentes opções de média entre os sensores. Nível intermediário de potência: 4,5 kVA com fator de potência de 0,8 subexcitado (P2).	124
Figura 87 – Variação das amplitudes normalizadas das harmônicas considerando o valor absoluto das variações positivas e negativas simultaneamente e realizando a média entre os sensores. Nível intermediário de potência: 4,5 kVA.	126
Figura 88 – Porcentagem de harmônicas sensibilizadas conforme limiar arbitrário para cada tipo de falta.	127
Figura 89 – Exemplo de um ciclo de orbital com início e final não coincidentes devido à diferença de fase das harmônicas dos sinais.	147
Figura 90 – Espectro temporal de um sinal de vibração para o ensaio de falta de rotor (5 condições), enfoque na décima harmônica de rotação.	148
Figura 91 – Resultado do Autograma para sinais de vibração de motor sob diferentes condições de diagnóstico.	150
Figura 92 – Exemplo de visualização de características aprendidas por máquina (à direita) a partir de um dos conjuntos de dados bruto (à esquerda).	152
Figura 93 – Espectrograma de STFT do sinal de vibração transiente de um motor diesel.	154
Figura 94 – Ilustração da relação entre o valor de curtose espectral e relação sinal-ruído.	155

Figura 95 – Etapas para aquisição dos sinais de vibração.	157
Figura 96 – Resposta em frequência de um filtro de 1ª ordem.	158
Figura 97 – Circuito básico para remoção de nível CC de sinal.	158
Figura 98 – Representação de um sinal, de sua amostragem e dos respectivos espectros em frequência.	159
Figura 99 – Representação das bandas de um sinal discreto com amostragem $f_s = 2B$ e $f_s > 2B$. Em pontilhado, a resposta em frequência necessária para os filtros de anti-recobrimento.	160
Figura 100 – Representação da função de transferência de um conversor analógico-digital (A/D) ideal de 3 bits.	161
Figura 101 – Tipos de conversores A/D conforme banda de interesse.	162
Figura 102 – Etapas de pré-processamento dos sinais adquiridos.	163
Figura 103 – Características de interesse para o projeto de filtros, como banda de passagem, rejeição e transição nos filtros de tipo (de cima para baixo) passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa.	164
Figura 104 – Janelas Kaiser para diferentes valores de β	165
Figura 105 – Transformadas de Fourier da janela Kaiser para diferentes valores de β e M , demonstrando o compromisso entre largura do lóbulo principal e amplitude das bandas laterais.	166
Figura 106 – <i>Taps</i> obtidos para o filtro FIR projetado pelo método de janelamento com a função Kaiser.	167
Figura 107 – Resposta em frequência do filtro FIR projetado pelo método de janelamento com a função Kaiser, com destaque para frequências em torno da frequência de corte desejada.	167
Figura 108 – Ilustração do efeito de filtragem com respectivos atrasos, destacados em verde, resultando na perda de amostras posteriormente.	168
Figura 109 – Efeito da integração digital em sinais com pequenos níveis CC residuais. Vê-se que a informação de interesse está presente no sinal integrado, apesar da presença da rampa.	168

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais métricas globais utilizadas no trabalho.	70
Quadro 2 – Ensaio de imposição de faltas realizados.	85
Quadro 3 – Sequências de condições de faltas ensaiadas.	85
Quadro 4 – Resumo da tendência de variação das amplitudes das métricas globais para cada falta. Classificação em tendência crescente (C), decrescente (D), neutra (N) e indefinida (I) com relação ao aumento da excitação do gerador. O sufixo FP indica que a variação indicada é com relação ao aumento do fator de potência, em vez da excitação. A sinalização por "*" indica que há uma tendência observável que não se encaixa nas classificações escolhidas.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de operação considerados para a realização de cada ensaio de imposição de faltas.	86
Tabela 2 – Sequências de pontos de operação para potência ativa constante, com variação de potência reativa.	87
Tabela 3 – Sequências de pontos de operação para potência aparente constante, com variação de fator de potência.	87
Tabela 4 – Proporção de pontos de operação para os quais houve sensibilização das métricas. Média entre os sensores e entre as condições de falta para cada tipo de falta.	115
Tabela 5 – Porcentagem de representação dos sinais de vibração pelas harmônicas rastreadas com relação aos sensores e tipos de falta, entre os pontos de operação.	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	bidimensional
3D	tridimensional
A/D	analógico-digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C	carcaça
CAPES	Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	corrente contínua
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DFT	<i>discrete Fourier transform</i> - transformada discreta de Fourier
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> - transformada rápida de Fourier
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FMD	força magnética desbalanceada
GCL	<i>geometric centerline</i> - linha central geométrica
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
GS	gerador síncrono
ICP	<i>Integrated Circuit-Piezoelectric</i> - Circuito-piezoelétrico integrado
IEPE	<i>Integrated Electronics Piezo-Electric</i> - Eletrônica Integrada Piezoelétrica
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
KE	Kurtograma Espectral
LA	lado acoplado
LABMAQ	Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos
LO	lado oposto ao acoplado
MEF	método de elementos finitos
MST	médio sincronizado no tempo
MV	modo de vibração
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIA	<i>principal inertia axis</i> - eixo principal de inércia
PO	ponto de operação
RMS	<i>root mean square</i> - raiz da média dos quadrados
rpm	rotações por minuto
RPM	jargão da área de vibração, relativo à frequência de composição do sinal correspondente a um múltiplo da velocidade de rotação da máquina
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier Janelada
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UHE	usina hidrelétrica
WT	<i>wavelet transform</i> - transformada de wavelet

LISTA DE SÍMBOLOS

f_e	frequência elétrica
N	velocidade mecânica de rotação [rpm]
p	número de pares de polos
f_m	frequência mecânica do campo magnético
E_A	tensão de armadura
I_A	corrente de armadura
X_S	reatância síncrona
V_Φ	tensão de fase
R_A	resistência de armadura
f_{mm}	força magnetomotriz
P	potência ativa
X_d	reatância síncrona de eixo direto
X_q	reatância síncrona de eixo em quadratura
Q	potência reativa
r	número do modo de vibração
g	aceleração da gravidade
a	aceleração
M	massa
F	força
q	carga
d	constante piezoelétrica
C	capacitância
e	tensão elétrica
ω_0	frequência angular de corte do filtro
$T(s)$	função de transferência
A_{min}	amplitude mínima na banda de passagem do filtro
A_{max}	amplitude máxima na banda de rejeição do filtro
β	parâmetro para definição da forma da janela Kaiser
I_0	função Bessel modificada de ordem zero e de primeiro tipo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVO PRINCIPAL	24
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2	GERADORES SÍNCRONOS	27
2.1	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	28
2.1.1	Rotor	28
2.1.2	Estator	29
2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	32
2.3	CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO	36
2.4	FALTAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS	40
2.4.1	Excentricidade	40
2.4.2	Desbalanceamento	44
2.4.3	Perda de espiras	46
2.4.4	Curto-circuito entre chapas do núcleo do estator	47
2.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	48
3	MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO MECÂNICA	49
3.1	VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES	50
3.1.1	Ondas de forças	51
3.1.2	Modos de vibração	52
3.1.3	Frequências naturais	54
3.2	MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO NA INDÚSTRIA	55
3.2.1	Sensoriamento de vibração	56
3.2.1.1	Tipos de sensores	57
3.2.1.2	Instalação dos sensores	61
3.2.2	Análise de valores globais	64
3.2.3	Análise em frequência	66
3.2.4	Outras análises	68
3.3	TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS	68
3.3.1	Métricas estatísticas e análise de valores globais	70
3.3.2	Processamentos para análise em frequência	71
3.3.3	Utilização de sinais no domínio tempo-frequência	71
3.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	73
4	ENSAIOS NA BANCADA EXPERIMENTAL E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO	74
4.1	APLICAÇÃO DE FALTAS NA BANCADA	75
4.2	MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO NA BANCADA	78

4.2.1	Aquisição dos sinais de vibração	79
4.2.2	Pré-processamento dos sinais adquiridos	81
4.2.3	Sinais pré-processados resultantes	83
4.3	METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	83
4.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	87
5	ANÁLISES E RESULTADOS SOBRE MÉTRICAS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO	89
5.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO HISTÓRICO DE MÉTRICAS GLOBAIS . . .	90
5.2	PROCESSAMENTOS SOBRE AS TENDÊNCIAS DE VALORES GLOBAIS	92
5.3	METODOLOGIAS DE ANÁLISE DAS MÉTRICAS GLOBAIS	96
5.4	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS MÉTRICAS GLOBAIS	99
5.4.1	Variação da potência ativa sem fornecimento de potência reativa	100
5.4.2	Potência aparente constante com fator de potência subexcitado a sobreexcitado	100
5.4.3	Potência ativa constante com variação da potência reativa	102
5.4.4	Resumo das considerações sobre a variação das métricas globais .	106
5.5	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DAS MÉTRICAS GLOBAIS	111
5.6	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	115
6	ANÁLISES E RESULTADOS SOBRE O HISTÓRICO DE HARMÔNICAS	116
6.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E PROCESSAMENTOS SOBRE O HISTÓRICO DE HARMÔNICAS	117
6.2	METODOLOGIAS DE ANÁLISE DO HISTÓRICO DE AMPLITUDES DE HARMÔNICAS	122
6.3	ANÁLISES DA VARIAÇÃO DE AMPLITUDE DAS HARMÔNICAS	124
6.4	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DAS HARMÔNICAS	127
6.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	127
7	CONCLUSÃO	129
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A – ANÁLISES ADICIONAIS EXPLORATÓRIAS SOBRE OS SINAIS DE VIBRAÇÃO	147
	APÊNDICE B – TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÃO	149
B.1	TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISE DE VALORES GLOBAIS	149
B.2	TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISE EM FREQUÊNCIA . . .	151
B.3	TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISES DE TEMPO-FREQUÊNCIA	153
	APÊNDICE C – AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO	157
C.1	AQUISIÇÃO DOS SINAIS	157

C.2	PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS ADQUIRIDOS	161
C.2.1	Filtragem digital	162
C.2.2	Integração digital	165
	ANEXO A – ARTIGOS PRODUZIDOS	169

1 INTRODUÇÃO

O gerador síncrono (GS) possui grande importância no setor elétrico brasileiro por ser o principal dispositivo de conversão eletromecânica de energia em usinas hidrelétricas (UHEs), as quais correspondem a mais da metade da matriz energética nacional (ANEEL, 2022). A confiabilidade sobre ativos de geração é fundamental nesse ramo industrial, pois situações adversas de funcionamento que causem interrupções no fornecimento de energia podem exigir intervenções. Além dos danos causados à sociedade por essas situações, muitas elevadas podem ser aplicadas (ANEEL, 2021), se somando ao custo das manutenções corretivas emergenciais. A necessidade de confiabilidade sobre os ativos de geração ficou ainda mais evidente em 2021, quando a maior crise hídrica do país do último século levou as UHEs a operarem próximas de seus limites operacionais (BRASIL, 2021).

Em contrapartida às manutenções corretivas, que são realizadas após a ocorrência de falhas, as manutenções preventivas possuem a estratégia de realizar paradas programadas dos equipamentos. Assim, esse tipo de manutenção é largamente utilizado no setor elétrico para aumentar a previsibilidade das interrupções dos processos e manter a confiabilidade das UHEs, evitando custos adicionais de emergência e riscos de segurança. Por outro lado, o período de inoperação do ativo e os custos homem-hora ainda são elevados (AHMED *et al.*, 2021). Além disso, os riscos, na prática, não são totalmente sanados, visto que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) pode não permitir a parada do gerador na data prevista, e os critérios estatísticos que balizam a periodicidade das intervenções podem não ser suficientemente abrangentes. Por isso, ainda há uma terceira alternativa: a manutenção preditiva, que vem ganhando espaço especialmente nas últimas décadas na forma de monitoramento de condição. Essa abordagem consiste em avaliar continuamente a saúde do equipamento monitorado (TAVNER *et al.*, 2008), de maneira que, mesmo quando não substitui completamente a manutenção preventiva, ela a complementa ao fornecer informações importantes para o diagnóstico dos ativos.

Nesse contexto, a análise de vibração mecânica se apresenta como uma ferramenta proeminente para o diagnóstico de faltas em máquinas rotativas com monitoramento de condição (HOLLOTER; GORDON, 1994; SHIFAT; HUR, 2020). Busca-se a padronização de medições e análises sobre sinais de vibração desde 1964, com a publicação de documentos que seriam a base para as normas utilizadas atualmente (VDI-2056, 1964; ISO 2372, 1974). A técnica de análise de vibração para o monitoramento de condição na indústria é baseada principalmente nas normas ISO 20816-1 (2016), ISO 13373-1 (2002) e ISO 13381-1 (2015), que delimitam desde as grandezas e métricas de análise até processamentos e diretivas de diagnóstico e prognóstico. Embora as normas sejam frequentemente atualizadas, seus incrementos se concentram sobre a variedade de equipamentos avaliados e se fundamentam, principalmente, na experiência de profissionais da área (UPADHYAY, 2020). Dessa forma, pesquisas recentes que desenvolvem técnicas de análise não são consideradas e a base das diretivas e técnicas

sugeridas nas normas não sofrem mudanças expressivas desde 1995 (ISO 10816-1, 1995). Além das normas, há livros que apresentam procedimentos industriais para avaliar a condição dos equipamentos (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004; CORREA; GUZMAN, 2020; SINHA, 2020; RANDALL, 2021). A fim de se ter diagnósticos mais precisos, o monitoramento de vibração é complementado por sensores de fluxo magnético no entreferro (POWER, 2016), sensores de pressão, temperatura, corrente e outros para avaliar faltas de diferentes naturezas (TIBONI *et al.*, 2022), embora isso aumente a complexidade e os custos de instalação.

Mesmo com sensores complementares aos de vibração e consequentes sistemas complexos existentes atualmente para o diagnóstico de faltas nos ativos, artigos científicos recentes que desenvolvem processamentos para os sinais de vibração para avançar as técnicas de diagnóstico costumam focar sobre faltas de origem mecânica (TIBONI *et al.*, 2022; MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021; SAMUEL; PINES, 2005). Outro aspecto relevante é mostrado por Tiboni *et al.* (2022), que apresenta a distribuição do objeto de estudo de pesquisas sobre diagnóstico utilizando vibração desde o ano 2000, evidenciando que menos do que 5% dos trabalhos realizados no tema têm enfoque em geradores síncronos, conforme categorias apresentadas no artigo, havendo um distanciamento do contexto de geração de energia elétrica no Brasil.

O presente trabalho possui cunho experimental, o que foi possível graças ao projeto PD-0403-0048/2019, intitulado "Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo", realizado pelo Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), em parceria com a empresa *AQTech Power Prognostics*, sob os programas de P&D da Engie Brasil Energia e da Itá Energética S.A., regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Durante o projeto, instalou-se o sistema comercial *VibraOne*, da empresa parceira, para aquisição de sinais de vibração na bancada de ensaios de geradores do Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A bancada foi concebida e montada no projeto PD-0403-0033/2012, com algumas melhorias posteriores, e o novo sistema, instalado na continuação do projeto, foi utilizado como referência para avaliação do MagAnalyzer, equipamento desenvolvido nos projetos. A disponibilidade deste sistema no laboratório possibilitou a realização deste trabalho, com desenvolvimentos dentro da própria área de vibração, providenciando maior confiabilidade para a captação dos sinais de interesse, devido ao padrão de qualidade industrial das instalações. O trabalho também foi financiado parcialmente pela Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo CNPq.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal desta dissertação é contribuir em processos para detecção de faltas de natureza elétrica em geradores síncronos a partir de sinais de vibração mecânica provenientes de acelerômetros. O estudo foi desenvolvido experimentalmente em um gerador sincronizado à rede elétrica, passível de alteração do ponto de operação e de inserção controlada de faltas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Realizar levantamento bibliográfico sobre técnicas de monitoramento de vibração mecânica a partir de normas, livros e artigos científicos;
- Selecionar e aplicar técnicas de processamento de sinais de vibração para detectar as faltas impostas em ensaios;
- Coletar dados experimentais em ensaios em uma bancada de testes com um gerador síncrono de polos salientes, com diferentes tipos de faltas e em diferentes pontos de operação;
- Avaliar a detectabilidade das faltas testadas através de sinais de vibração, considerando as técnicas testadas e a máquina avaliada;
- Investigar a influência da condição operativa do gerador, i.e. seu nível de potência ativa e reativa, sobre os resultados de detecção de faltas;
- Documentar o trabalho desenvolvido.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está organizada da seguinte forma:

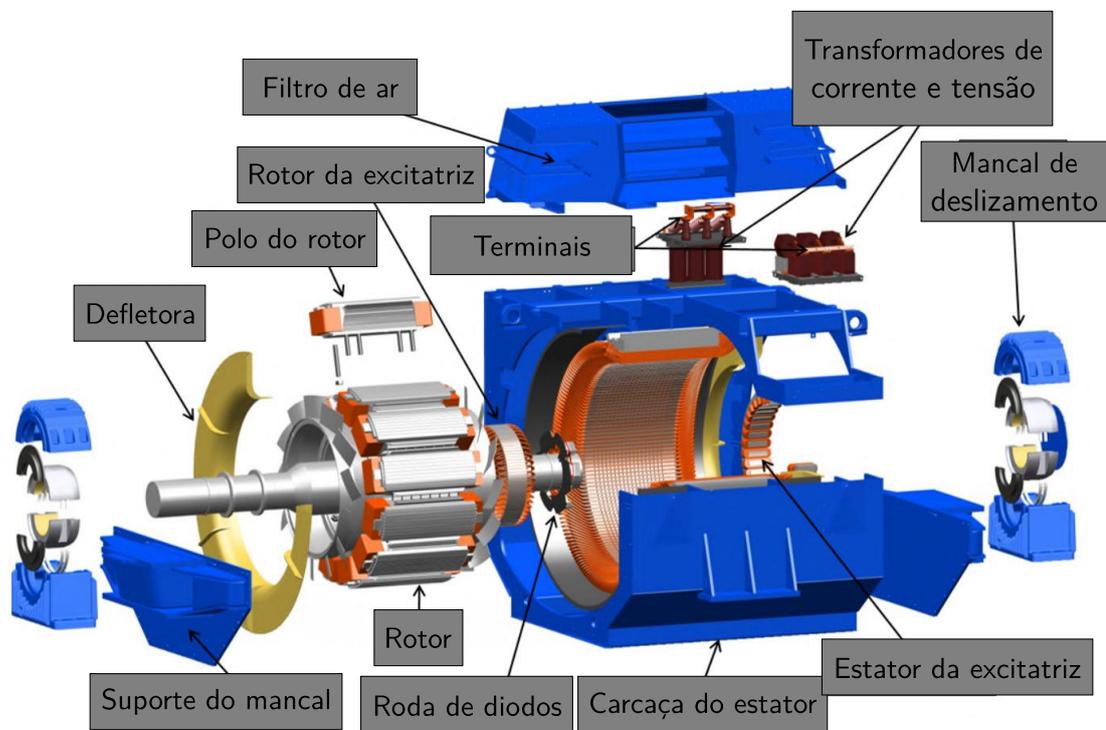
- O Capítulo 2 aborda a teoria de geradores síncronos (com enfoque em aspectos que podem influenciar os sinais de vibração mecânica) e faltas que podem ocorrer durante a operação dessas máquinas (com enfoque naquelas que são passíveis de simulação na bancada experimental do laboratório);
- O Capítulo 3 aborda conceitos fundamentais sobre vibração e sobre o monitoramento de condição com essa grandeza, abordando técnicas usuais e modernas para a análise de sinais de vibração;
- O Capítulo 4 apresenta a bancada experimental disponível para a realização do trabalho, indicando alguns sistemas para simulação de faltas e o sistema para captação dos sinais de vibração, assim como a metodologia utilizada para execução dos ensaios;
- O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com as métricas globais de vibração testadas;
- O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos por meio de análises no domínio de frequência dos sinais;

- O Capítulo 7 revisa sumariamente o contexto e os resultados atingidos no desenvolvimento do trabalho, acrescentando as conclusões pertinentes aos objetivos propostos e às metas atingidas, assim como sugestões para trabalhos de continuidade desta investigação.

2 GERADORES SÍNCRONOS

Geradores síncronos possuem a função de transformar energia mecânica em elétrica (TEDESCO, 2019). A Figura 1 mostra algumas partes de um gerador. Conforme Chapman (2013), sua estrutura é dividida, basicamente, em estator (parte estática) e rotor (parte rotativa). Nesse tipo de máquina, um campo magnético é produzido no rotor através de ímãs permanentes ou eletroímãs. Neste último caso, o campo é obtido pela aplicação de uma corrente contínua (CC) em seu enrolamento de campo. O acionamento por uma máquina motriz primária do rotor excitado magneticamente produz um campo girante, o qual induz tensões trifásicas nos enrolamentos de armadura do estator.

Figura 1 – Partes de um gerador síncrono.



Fonte: Adaptado de Rajamäki (2019).

Mais especificamente, ainda na Figura 1, vê-se a excitatriz principal da máquina, responsável por alimentar o enrolamento do rotor juntamente com uma ponte retificadora de diodos (TEDESCO, 2019), que converte a corrente alternada gerada na armadura da excitatriz, a parte girante acoplada ao eixo da máquina, em corrente contínua. A excitação do rotor também pode ser estática, com uma corrente contínua transmitida diretamente ao rotor da máquina através de escovas, usualmente de carbono, e anéis deslizantes ou coletores (PYRHONEN *et al.*, 2013).

A Figura 1 também evidencia alguns componentes mecânicos, que são essenciais para que a função da máquina possa ser desempenhada adequadamente e dentro de características

de operação estabelecidas em norma (RÜNCOS, 2020a; IEC 60034-1, 2022; NEMA MG-1, 2022). Entre esses componentes, destaca-se o mancal, o único ponto de contato entre o eixo da máquina (montado no interior do rotor) e a carcaça ou sua base. Sua função é garantir que o rotor fique posicionado adequadamente no interior do estator. Isso é feito através de mecanismos que reduzem a fricção, havendo a distinção entre mancais de rolamento ou deslizamento, os quais são escolhidos em decorrência de esforços radiais e axiais aos quais a máquina está sujeita. Esse componente pode ser montado na tampa da carcaça, conforme na Figura 1, ou em forma de pedestal, com diversas possibilidades de arranjo com outros mancais do sistema, a depender da necessidade da aplicação. Outro componente importante é a defletora, responsável por direcionar o ar no interior da máquina e, assim, distribuir o calor de maneira homogênea e resfriar as partes necessárias adequadamente. Ela é projetada e posicionada de acordo com o tipo de refrigeração da máquina, especificação que impacta fortemente o projeto do equipamento como um todo, pois o fluxo de ar em seu interior depende de classificações como as da norma IEC 60034-6 (1991). A máquina também pode ser projetada e montada para ter diferentes graus de proteção contra fatores externos (IEC-60529, 2013). Um componente que atua nesse aspecto é o filtro de ar, que também pode ser visto na Figura 1 e evita que partículas indesejadas entrem na máquina.

2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Essa seção apresenta os principais aspectos da construção de máquinas síncronas que podem influenciar os sinais relativos à vibração mecânica gerados e que são de interesse desse trabalho.

2.1.1 Rotor

O rotor de máquinas síncronas é classificado em dois tipos: polos lisos ou salientes, conforme será descrito a seguir com base em Rüncos (2020a).

O rotor de polos lisos apresenta relutância magnética aproximadamente constante ao redor da circunferência do rotor. Esse tipo de rotor tem seu enrolamento de campo distribuído e pode ter uma gaiola de amortecimento simetricamente disposta na periferia do entreferro. A região entre os polos é denominada interpolar e fornece a direção do fluxo de eixo em quadratura. Para máquinas de polos lisos, o valor desse fluxo é, aproximadamente, o mesmo para o eixo direto, que é o fluxo correspondente à região onde o enrolamento de campo está presente. No caso de máquinas com ímãs permanentes, a reatância é maior para o eixo em quadratura e os ímãs podem ser dispostos superficialmente ou internamente ao núcleo magnético do rotor, em diferentes configurações.

As máquinas de polos salientes podem ter um rotor laminado ou maciço. O caso maciço é menos comum e é utilizado em geradores que devem alimentar cargas de conteúdo harmônico elevado ou motores que precisam acelerar cargas de alta inércia, visto sua alta capacidade

térmica. Em rotores salientes, a direção do eixo em quadratura apresenta relutância muito maior se comparada à parte saliente, a qual fornece a direção do fluxo de eixo direto da máquina. Para esse tipo de máquina, a saliência do polo facilita a identificação visual do eixo direto, que fica mais evidente do que no caso de polos lisos.

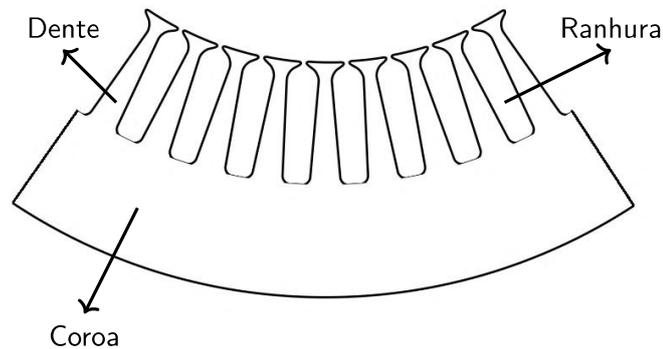
Diferenciam-se três partes em rotores de polos salientes de geradores síncronos. O núcleo magnético, também chamado de roda polar, é constituído por chapas finas ou, para o caso saliente maciço, é uma peça sólida usinada juntamente com o eixo. O núcleo pode ser descrito em duas partes: a coroa do rotor e os polos, que por sua vez podem ser divididos em corpo do polo e sapata polar. O enrolamento de campo ou excitação pode ser formado por fios circulares, retangulares ou barras, dependendo da necessidade do projeto ou conceito de fixação das bobinas e dos polos. Por fim, o circuito amortecedor ou gaiola de amortecimento, tipicamente composta por barras de cobre, pode ser curto-circuitado ou não através de anéis de curto-circuito, dependendo da aplicação. A gaiola deve ser dimensionada para suportar correntes desbalanceadas na máquina, presentes em condições de falta, de sincronismo ou de partida. Para máquinas síncronas durante operação em regime permanente, idealmente não há diferença de velocidade entre o campo girante do estator e do rotor, então não são induzidas correntes de Foucault elevadas nas chapas do núcleo do rotor. A ausência de correntes induzidas, ou menor intensidade delas, permite a utilização de chapas mais espessas e de menor resistividade se comparadas às chapas do estator, no qual normalmente o uso de chapas de aço silício se faz necessário, conforme será visto a seguir.

2.1.2 Estator

O estator é constituído por um núcleo de material magnético, com chapas finas de baixas perdas específicas e alta permeabilidade para formar o pacote da máquina, como é chamado o conjunto de chapas empilhadas. O pacote pode ser formado por chapas inteiriças ou segmentadas, dependendo do porte da máquina (RÜNCOS, 2020a). Na chapa do estator, podem ser diferenciadas três partes, conforme a Figura 2: a coroa, os dentes e as ranhuras.

As ranhuras abrigam as bobinas do enrolamento de armadura, que magnetizam uma mesma parte do circuito magnético da máquina. Os enrolamentos da armadura do gerador são dispostos de tal forma que um campo girante no entreferro entre rotor e estator induza tensões aproximadamente senoidais em seus terminais (PYRHONEN *et al.*, 2013), conforme ilustrado na Figura 3. As bobinas são compostas por espiras, que podem ser formadas por condutores em paralelo para reduzir a corrente no condutor ou para adequar o estresse elétrico e magnético na máquina, devido a outras restrições construtivas. As ranhuras podem ser fechadas ou semiabertas, dependendo do tipo de bobina, para que seja possível inseri-la na ranhura do estator. A abertura das ranhuras altera a relutância magnética ao longo da circunferência do entreferro, distorcendo a indução magnética nessa região, conforme ilustrado na Figura 4. Ainda, dependendo da especificação da máquina, as ranhuras podem ter camada simples, quando apenas um bobina passa por seu interior, ou dupla, quando cada ranhura comporta

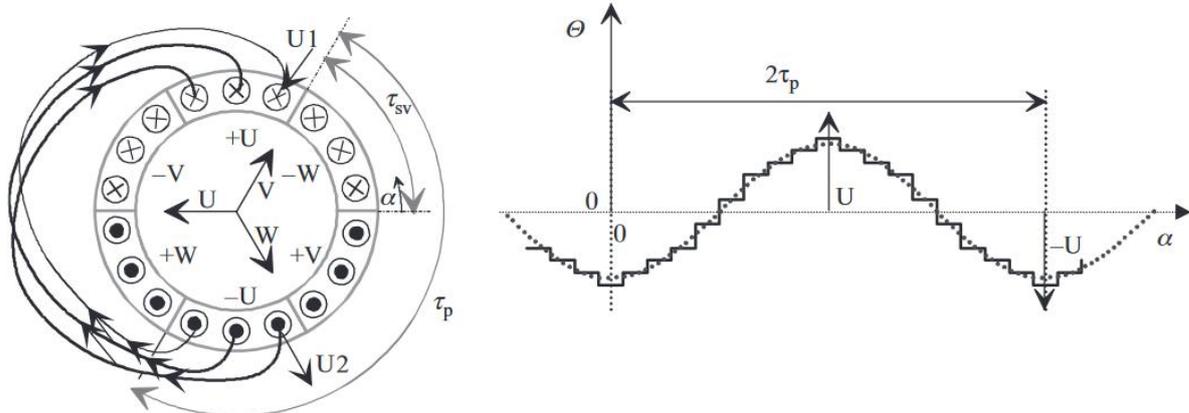
Figura 2 – Ilustração de um segmento de chapa do estator.



Fonte: Próprio autor.

duas bobinas (TEDESCO, 2019; PYRHONEN *et al.*, 2013).

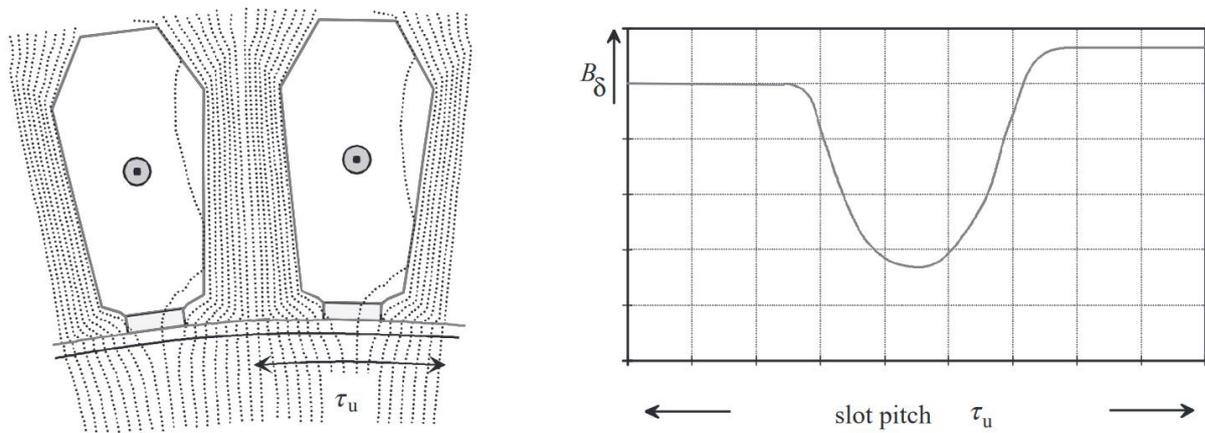
Figura 3 – Ilustração da forma de onda de tensão em um gerador devido aos enrolamentos do estator.



Fonte: Pyrhonen *et al.* (2013).

O núcleo tem a função de conduzir o fluxo magnético para onde sua presença é necessária, criando campos de alta intensidade na região de entreferro, o que é especialmente interessante para máquinas girantes, pois as forças de origem magnética dependem do campo por uma relação quadrática (BASTOS, 2008). Idealmente, a densidade de fluxo no entreferro se mantém constante ao longo do comprimento axial da máquina. Porém, nas extremidades dos pacotes existem as cabeças de bobina, região em que o fluxo decai e é distorcido devido à necessidade física de curvatura das bobinas por fora do núcleo para o alojamento das bobinas nas ranhuras. Essa região varia de acordo com o enrolamento, que pode ter suas bobinas dispostas nas ranhuras do estator de maneira concêntrica ou imbricada. No primeiro caso, as bobinas estão em um mesmo plano, porém diferem em comprimento. Já no segundo, todas as bobinas têm o mesmo comprimento, entretanto aumentam a complexidade da máquina ao

Figura 4 – Distorção da indução magnética no entreferro ao longo de uma ranhura devido à sua abertura.



Fonte: Pyrhonen *et al.* (2013).

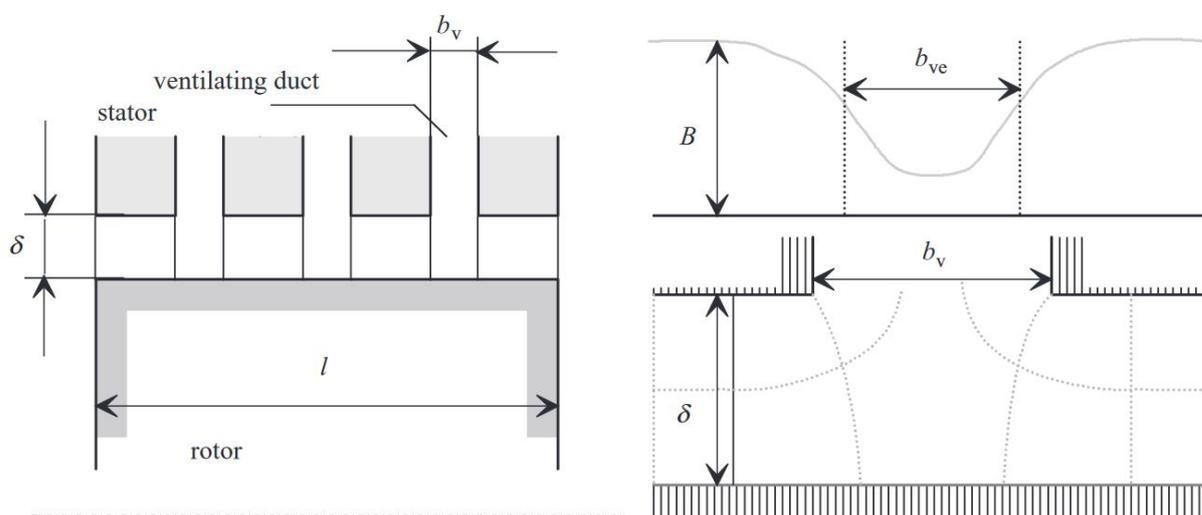
originar múltiplos planos de bobinagem (PYRHONEN *et al.*, 2013). Outro fator de influência na região das cabeças de bobina é o tipo das bobinas, que podem ser pré-formadas, com fios retangulares de disposição e geometria bem definida, ou randômicas, com fios circulares esmaltados agrupados e distribuídos aleatoriamente (RÜNCOS, 2020a).

Como mencionado, o sistema de refrigeração é um fator crítico para o projeto de máquinas. O circuito de ventilação de máquinas envolve canais de ventilação radiais no pacote do estator e do rotor, que também pode conter canais axiais ou não possuir nenhum canal. A existência de canais causa um efeito semelhante ao mencionado para as aberturas das ranhuras, distorcendo a indução magnética na região do canal, porém sobre o comprimento axial nesse caso (PYRHONEN *et al.*, 2013), conforme ilustrado na Figura 5.

O projeto de máquinas também envolve a definição de parâmetros como o passo polar, que é a distância angular entre dois polos adjacentes, e o passo de bobinagem, que é a fração do passo polar englobada por uma bobina (CHAPMAN, 2013). Além disso, o projetista pode determinar uma inclinação (*skewing*) entre condutores do rotor e do estator para mitigar ondulações de torque. Como será visto adiante, o projeto do enrolamento tem influência direta sobre a vibração da máquina.

Por fim, o processo de fabricação impacta a qualidade final da máquina, inserindo imprecisão com relação aos cálculos de projeto, i.e., causando desvios com relação aos dados teóricos (PYRHONEN *et al.*, 2013). Uma diversidade de ferramentas pode ser utilizada para fabricar as chapas do núcleo da máquina, cortando diâmetros, ranhuras e, para máquinas de carcaças maiores, segmentos. Alguns métodos geram mais rebarbas e pontos quentes durante a operação da máquina, exigindo etapas adicionais de acabamento para reduzir esses efeitos. O aquecimento superior dessas regiões, quando não mitigado suficientemente, pode influenciar o desempenho eletromagnético da máquina, tanto suas grandezas, quanto suas perdas (MAILHÉ,

Figura 5 – Efeito de dutos de ventilação na indução no entreferro da máquina ao longo de seu eixo axial.



Fonte: Pyrhonen *et al.* (2013).

2018).

As chapas que constituem o pacote da máquina são empilhadas com o uso de guias nas ranhuras ou em chanfros no diâmetro externo do estator, como o da Figura 6. Os chanfros podem influenciar o fluxo magnético na região da coroa, porém têm efeito desprezível se posicionados em frente aos polos, onde ocorre a divisão do caminho do fluxo, com redução de sua intensidade na extremidade da coroa. O pacote, então, é prensado e soldado diretamente ou com uma chapa de auxílio ao longo do eixo axial, de forma a grampear as chapas nas extremidades do pacote, na altura de seu diâmetro externo, para formar uma estrutura rígida. Naturalmente, isso pode danificar a isolamento entre as chapas e gerar caminhos para circulação de corrente, mas as perdas percentuais originadas desses processos são consideradas desprezíveis (PYRHONEN *et al.*, 2013).

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Para a conversão de energia mecânica em elétrica, uma fonte de potência mecânica, seja turbina ou máquina primária, é acoplada ao eixo do gerador, com o enrolamento do rotor sendo alimentado por uma corrente contínua, chamada de corrente de campo ou excitação (TEDESCO, 2019). Pela Lei de Ampère, uma corrente elétrica gera um campo magnético rotacional a ela. Então, dispondo o enrolamento ao redor do polo do rotor, gera-se um campo magnético normal ao plano das bobinas (PYRHONEN *et al.*, 2013; BASTOS, 2008), conforme ilustrado pelas linhas de fluxo magnético pontilhadas na Figura 7. Com a rotação do eixo, fixado ao rotor, o campo magnético do rotor se reflete como uma variação de fluxo magnético do ponto de vista do estator, ao passar por seus polos. A variação do fluxo, pela Lei de Faraday,

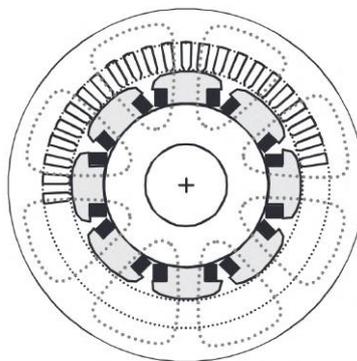
Figura 6 – Chapa de estator produzida com ferramenta de estampo completo com chanfro visível em seu diâmetro externo para prensa com outras chapas.



Fonte: Próprio autor. Cortesia WEG.

gera uma diferença de potencial nos enrolamentos do estator.

Figura 7 – Caminho do fluxo magnético através dos polos do rotor gerado pela corrente dos enrolamentos de campo.



Fonte: Pyrhonen *et al.* (2013).

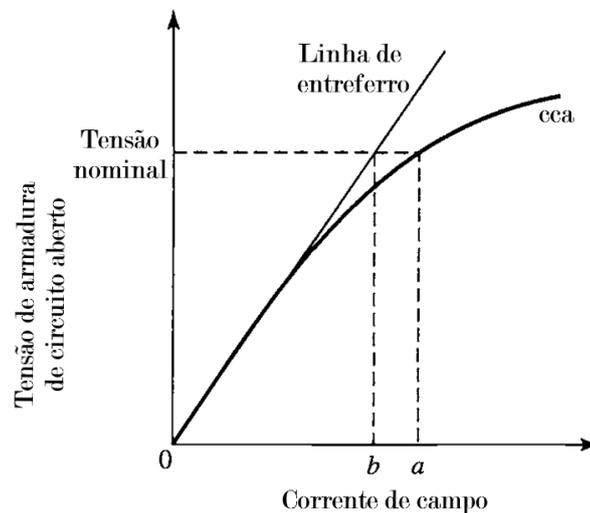
Para que a tensão induzida no estator pelo campo girante do entreferro tenha formato aproximadamente senoidal, é necessário que o campo magnético seja distribuído adequadamente no espaço e no tempo (RÜNCOS, 2020b). No caso de uma máquina trifásica, deve-se ter três fases separadas por 120° elétricos e os enrolamentos de cada fase devem estar dispostos espacialmente também 120° entre si. A coincidência entre a velocidade do campo girante, chamada de velocidade síncrona, e do eixo da máquina é usada para classificar as máquinas elétricas em síncronas e assíncronas. No caso das máquinas síncronas, a frequência elétrica f_e produzida está relacionada com a velocidade mecânica de rotação N por (2.1), em que p é o número de pares de polos e f_m é a frequência mecânica de rotação, calculada como

$N/60$ (CHAPMAN, 2013).

$$f_e = f_m p = \frac{N}{60} p \quad (2.1)$$

Além das características construtivas da máquina, um aspecto de funcionamento que pode afetar os sinais gerados é o nível de saturação de seu núcleo magnético, assim como a distribuição da indução magnética no material. Como a tensão nos terminais da máquina depende do fluxo magnético imposto pela corrente de campo, pode-se traçar uma curva de magnetização como a da Figura 8, na qual se vê que a relação entre a corrente de campo e a tensão de armadura deixa de ser linear para valores elevados de corrente (CHAPMAN, 2013).

Figura 8 – Ilustração do efeito da saturação em um gerador síncrono através da curva característica de circuito aberto.



Fonte: Adaptado de Umans (2014).

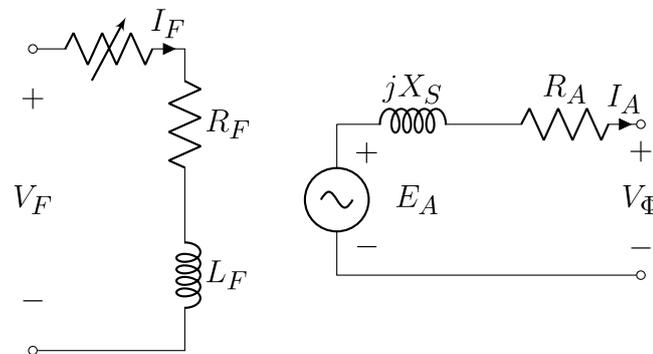
A Figura 8 mostra o efeito da saturação magnética, que aumenta a relutância dos caminhos magnéticos e reduz a eficiência da corrente de campo em produzir fluxo magnético. Essa dinâmica distorce a forma de onda do fluxo magnético na máquina e sinais de vibração consequentes dele, como será mostrado adiante (UMANS, 2014).

A diferença de potencial induzida nos enrolamentos do estator pela variação do campo magnético do rotor é chamada de tensão interna. Com uma carga conectada nos terminais da máquina, flui uma corrente defasada pelos enrolamentos do estator, que produz um campo magnético oposto ao que a gerou, pelo princípio da Lei de Lenz. Esse campo interage com o campo original do rotor e o distorce, afetando também a tensão terminal em cada fase do gerador, efeito chamado de reação de armadura. O ângulo que aparece entre a tensão interna e a terminal, ou entre o campo magnético original do rotor e o campo resultante, é denominado de ângulo de conjugado δ , ou ângulo de carga (CHAPMAN, 2013).

A defasagem entre a tensão interna E_A e a corrente de armadura I_A pode ser representada por uma indutância equivalente em série com uma fonte de tensão. Os parâmetros elétricos dos enrolamentos são descritos por resistências e indutâncias próprias em série. A reatância síncrona X_S , então, é obtida pela combinação das indutâncias da armadura. A título de ilustração, a tensão terminal de um gerador de polos lisos em regime é dada por (2.2) e seu circuito equivalente por fase é ilustrado na Figura 9, na qual uma resistência variável é utilizada para emular o controle da corrente de campo no ramo do circuito correspondente ao rotor (CHAPMAN, 2013).

$$V_{\Phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (2.2)$$

Figura 9 – Circuito equivalente de um gerador síncrono.



Fonte: Próprio autor.

Para análises de regime permanente, o circuito da Figura 9 pode ser utilizado, desde que a carga conectada ao gerador esteja balanceada (CHAPMAN, 2013). Na prática, entretanto, por imperfeições de manufatura, sempre haverá diferenças entre as fases, o que é previsto na IEC 60034-1 (2022), que delimita níveis de corrente de fase negativa que podem circular nos enrolamentos, conforme características da máquina. Portanto, o circuito equivalente apresentado é útil para relacionar aspectos físicos da máquina com seu funcionamento, mas análises de desempenho reais requerem o uso da Teoria de Componentes Simétricos para elaborar os circuitos de sequência de fase positiva, negativa e zero (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Há diferença entre máquinas síncronas de polos lisos e salientes, sendo necessário considerar dois eixos, direto e em quadratura, cada um com sua reatância síncrona correspondente. Os eixos tem relação com a posição do rotor em relação ao eixo de magnetização: o direto é aquele cujo efeito magnético está alinhado com o eixo dos polos de campo, com a força magnetomotriz f_{mm} produzindo fluxo ao longo desse eixo, já o eixo em quadratura é definido por estar centrado no espaço interpolar (UMANS, 2014). A reatância em ambos os eixos é igual para o caso de polos lisos, devido a ausência de diferença de relutância do caminho magnético entre a região interpolar e polar, porém a diferenciação dos eixos é necessária para se ter fidelidade de cálculo no caso saliente (CHAPMAN, 2013).

Em análises de regime transitório, relativo a correntes induzidas no rotor quando uma corrente de armadura é aplicada repentinamente, é necessário definir outras reatâncias além das síncronas. Elas são chamadas de transiente e subtransiente, relativas ao fluxo magnético circulante entre a sapata polar e o estator e entre as sapatas polares de polos adjacentes, respectivamente (PRENTICE, 1937).

Por fim, inclui-se a reatância de dispersão da armadura X_l , a qual se relaciona com o fluxo da máquina que circula fora do circuito magnético principal. Abordaram-se alguns dos aspectos que podem causar dispersão de fluxo, como as ranhuras, canais de ventilação, cabeças de bobina, entre outros. A dispersão do fluxo na máquina também pode ocorrer por forças magnetomotrizes harmônicas que rotacionam a velocidades diferentes do rotor, as quais interagem com a permeância do entreferro e produzem harmônicas de várias ordens no fluxo do entreferro (PRENTICE, 1937; PARK; ROBERTSON, 1928).

A visualização da máquina na forma de circuitos equivalentes é uma maneira alternativa para estudar sua operação e, indiretamente, as interações de campo magnético na máquina que podem influenciar sinais de vibração emitidos por ela em diferentes circunstâncias de carga e regime, como será abordado no Capítulo 3.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO

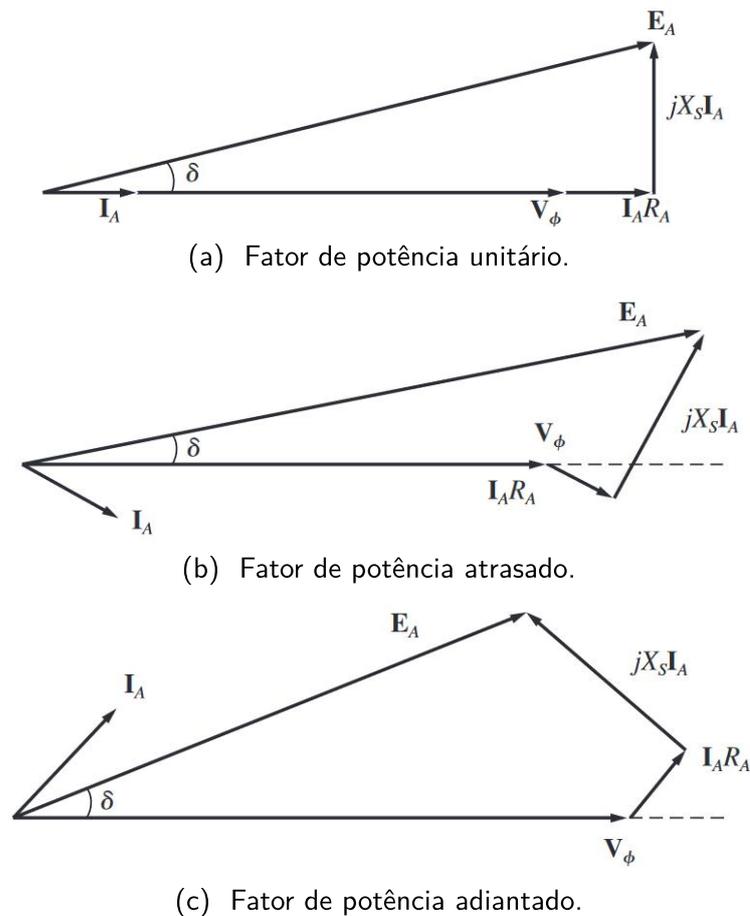
O diagrama fasorial é um recurso visual para caracterizar a operação da máquina com relação à sua tensão interna, corrente de armadura, tensão terminal e quedas de tensão internas para cada fase. A Figura 10 apresenta o diagrama fasorial para três configurações de fator de potência, indicando que o fator de potência atrasado, com carga indutiva, corresponde a uma tensão interna maior do que a tensão terminal da máquina, de forma que o gerador é dito sobreexcitado. O caso inverso é análogo: com uma carga capacitiva, o fator de potência fica adiantado e o gerador absorve potência reativa, portanto fica subexcitado (CHAPMAN, 2013).

Outra relação da operação com a carga do gerador pode ser vista na Figura 11, que ilustra a variação necessária da corrente de excitação para manter a tensão interna constante em cada caso. Vê-se que, com o gerador sobreexcitado, é necessário um aumento maior da corrente de excitação se comparado ao caso com carga puramente resistiva. Já no caso subexcitado, é necessário reduzir a corrente de campo (WEG, 2020).

Dependendo da aplicação do gerador síncrono, ele pode operar conectado à rede elétrica ou em paralelo com outros geradores. Quando em sincronismo com a rede, sua tensão terminal e frequência de operação são consideradas fixas, pois qualquer gerador individual representa apenas uma pequena parcela do total da geração do sistema. Por isso, ao estudar o gerador nessa configuração, é útil se referir ao restante do sistema como um barramento infinito, i.e., uma fonte de tensão e frequência constantes (UMANS, 2014). Na prática, para sincronizar um gerador com a rede, é necessário que (CHAPMAN, 2013):

- A diferença entre a tensão eficaz de linha do gerador e a da rede seja mínima, para evitar

Figura 10 – Diagrama fasorial de um gerador síncrono.



Fonte: Chapman (2013).

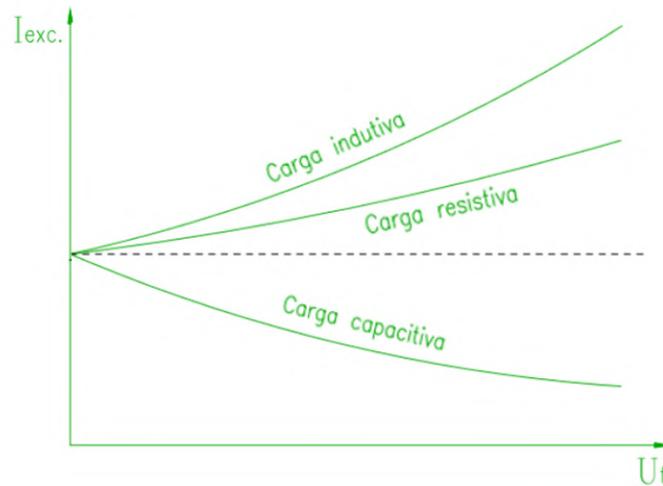
sobretensões e sobrecorrentes no momento da conexão;

- Ambos estejam conectados com a mesma sequência de fases, evitando o caso crítico de erro de sincronismo de 120° e danos à máquina;
- O ângulo de fase de ambos seja o mais próximo possível, para evitar sobretensões e sobrecorrentes;
- A frequência do gerador seja ligeiramente superior à do sistema, reduzindo transitórios de potência, de modo que o ângulo de fase da máquina mude lentamente e possibilite o fechamento de chave para conclusão do sincronismo.

O limite de operação segura de um gerador síncrono conectado à rede, com tensão e frequência fixas, pode ser apresentado através da relação entre sua potência ativa e reativa, pela curva de capacidade. A partir das equações de potência do gerador síncrono (2.3) e (2.4), a Figura 12 indica os limites que compõem a curva (C37.102, 2007; ZLATANOVICI *et al.*, 2004):

- **AB**: Limite térmico do enrolamento de campo;

Figura 11 – Variação da corrente de excitação para manter a tensão interna constante.



Fonte: Adaptado de WEG (2020).

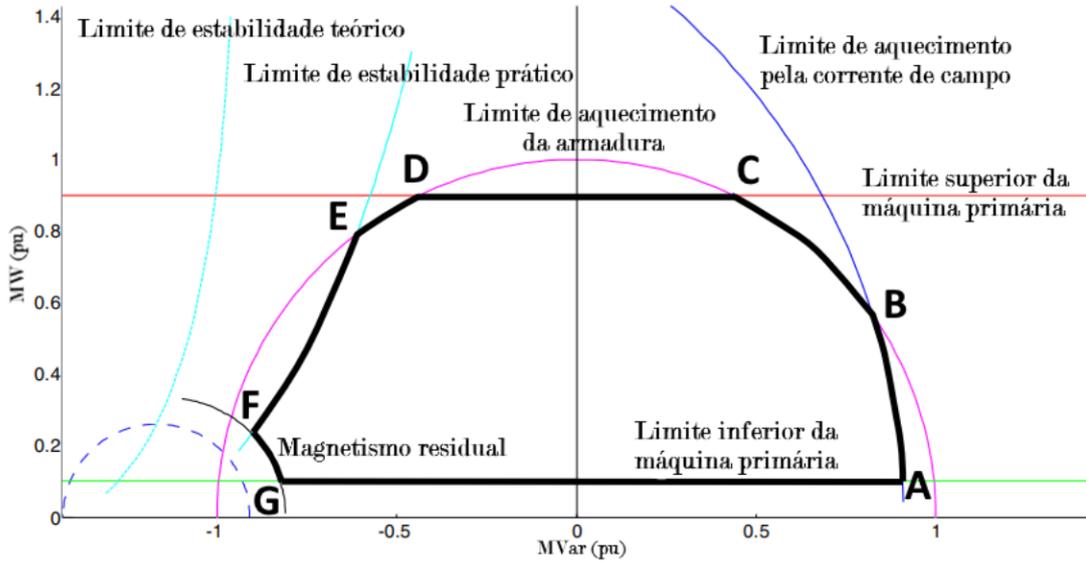
- **BC**: Limite térmico do enrolamento de armadura;
- **CD**: Limite de potência mecânica da máquina primária;
- **DE**: Limite térmico do enrolamento de armadura: assim como o segmento **BC**, porém esta parte da curva costuma estar relacionada à temperatura na extremidade do núcleo do estator (C50.13, 2006);
- **EF**: Limite de estabilidade prático: obtido aplicando uma margem de segurança arbitrária, tipicamente de 10% da potência nominal, sobre o limite de estabilidade teórico. Esse limite determina a capacidade do gerador de permanecer em sincronismo sob pequenas variações de potência ativa (MORAIS *et al.*, 2009);
- **FG**: Limite de excitação mínima: em condição de absorção de potência reativa, a corrente de campo pode diminuir até um valor crítico, pois torques pulsantes podem causar danos ao núcleo do estator (WILLIS; REIMERT, 2017; MORAIS *et al.*, 2009).

$$P = \frac{V_{\Phi} E_A}{X_d} \text{sen}(\theta) + \frac{V_{\Phi}^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(2\theta) \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{V_{\Phi} E_A}{X_d} \text{cos}(\theta) + V_{\Phi}^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos}^2(2\theta) - \frac{V_{\Phi}^2}{X_d} \quad (2.4)$$

Observa-se que, na Figura 12, a potência reativa positiva é dita como indutiva por considerar a convenção de carga, e não do gerador. No contexto deste trabalho, do ponto de vista do gerador, um Q positivo implica em operação sobreexcitada, com fator de potência capacitivo.

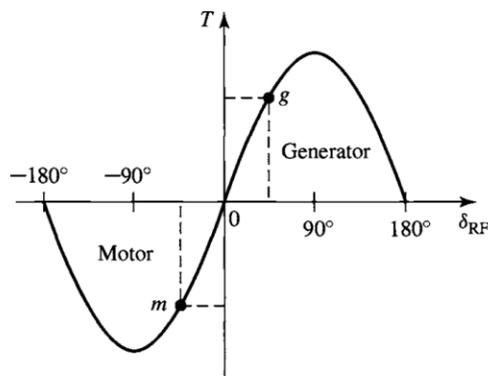
Figura 12 – Curva de capacidade com destaque nos determinantes de seus limites.



Fonte: Adaptado de da Costa *et al.* (2013).

Por fim, o comportamento do gerador conectado à rede também pode ser explicado pela Figura 13. O torque eletromecânico entra em equilíbrio com o torque no eixo, pois a onda de fmm do rotor, estando à frente do fluxo resultante no entreferro, faz com que o torque eletromecânico se oponha à rotação. Como variações no torque correspondem a variações no ângulo de carga, valores positivos de torque representam uma ação de gerador (UMANS, 2014).

Figura 13 – Característica torque-ângulo.



Fonte: Umans (2014).

2.4 FALTAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Embora a maioria das faltas que ocorrem em máquinas elétricas ainda seja relacionada aos rolamentos, estima-se que até 40% das falhas de máquinas elétricas sejam em decorrência de faltas elétricas, principalmente na isolação do estator, o que ressalta a importância de investigar faltas elétricas para viabilizar um monitoramento preciso (NANDI; TOLIYAT, 1999; AMANUEL *et al.*, 2021). Observa-se que essa porcentagem se manteve aproximadamente a mesma entre 1999 e 2021 e que ela diz respeito a máquinas de indução. Porém, como esse tipo de máquina representa a grande maioria das máquinas produzidas, entende-se que esse dado sofreria pouca variação se levado em conta todo o espectro de máquinas manufaturadas. Apesar da proporção significativa de ocorrência de faltas elétricas, o enfoque das análises de vibração sugeridas em norma e utilizadas na indústria é sobre faltas de origem mecânica, como será mencionado na Seção 3.2.3, seguindo a mesma natureza do sinal monitorado. Essa preferência por faltas mecânicas é vista também no âmbito acadêmico (TRUTT *et al.*, 2001), como será evidenciado na Seção 3.3. Por isso, este trabalho busca explorar faltas elétricas, contribuindo principalmente nesse aspecto, porém sem desconsiderar as faltas mecânicas, sobre as quais busca-se validar experimentalmente os conhecimentos teóricos disponíveis.

Na busca por técnicas capazes de detectar as faltas incipientes, é razoável compreender como algumas das faltas são definidas para fortalecer a interpretação dos resultados. São diversas as faltas que podem ocorrer em geradores síncronos, entre elas as faltas mecânicas de rolamento, mancais, folgas, eixo, ressonância, desalinhamento, excentricidade e desbalanceamento, entre outras (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004); e faltas elétricas de anéis, barras de amortecimento, de curto-circuito entre espiras do estator ou rotor, de núcleo, entre outras (AZEEM *et al.*, 2019).

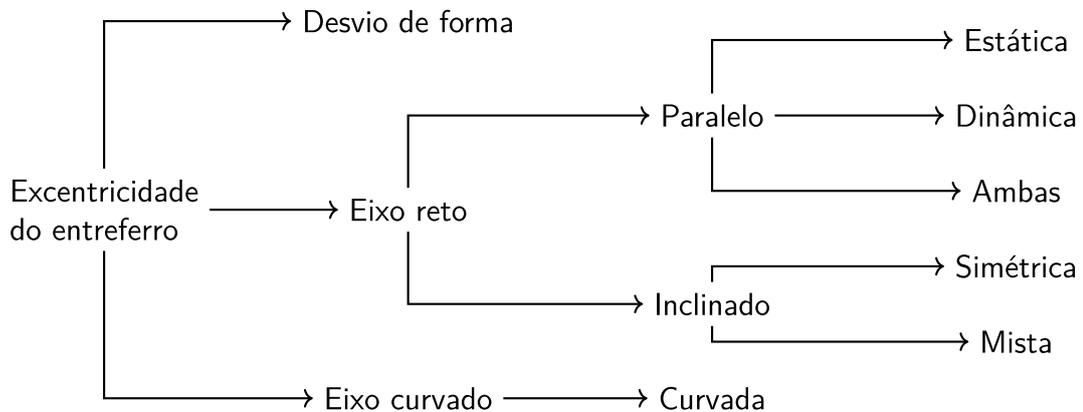
Destaca-se algumas das faltas, que foram testadas nesse trabalho, conforme será detalhado no Capítulo 4. As faltas de excentricidade e desbalanceamento sempre estarão presentes em algum nível. Porém, com uma maior intensidade, podem comprometer a operação da máquina. Já as faltas elétricas de curto-circuito entre espiras ou entre chapas do núcleo podem ocorrer devido a estresses transientes ou térmicos e pelo envelhecimento do dielétrico, efeitos aos quais a máquina está constantemente submetida (AZEEM *et al.*, 2019).

2.4.1 Excentricidade

Os tipos de excentricidade do entreferro podem ser resumidos pelos casos apresentados Figura 14. Há três possíveis causas para a excentricidade, como desvio na forma das partes da máquina, eixo reto deslocado paralela ou inclinadamente e eixo curvado. Com isso, para um deslocamento paralelo do eixo, a excentricidade pode ser estática ou dinâmica ou com ambas simultaneamente; para um deslocamento inclinado, a excentricidade pode ser simétrica ou mista; e, para um eixo curvado, a excentricidade é dita curvada (XU, X. *et al.*, 2018).

Os tipos de excentricidade mencionados correspondem a irregularidades no entreferro,

Figura 14 – Tipos de excentricidade.



Fonte: Adaptado de Xueping Xu *et al.* (2018).

o que gera forças radiais na circunferência do rotor denominadas forças magnéticas desbalanceadas (FMDs). FMD afeta a vibração eletromagnética, o ruído, o desgaste nos rolamentos, a estabilidade do rotor e até eventual fricção entre estator e rotor (XU, X. *et al.*, 2018). O projeto de máquinas normalmente leva em consideração que haverá um nível de FMD, de modo que são tomadas medidas para prevenir problemas decorrentes desse fenômeno. Essas medidas podem incluir o aumento da rigidez do eixo ou o ajuste do tamanho do entreferro, havendo recomendações em normas e na literatura para isso (PYRHONEN *et al.*, 2013).

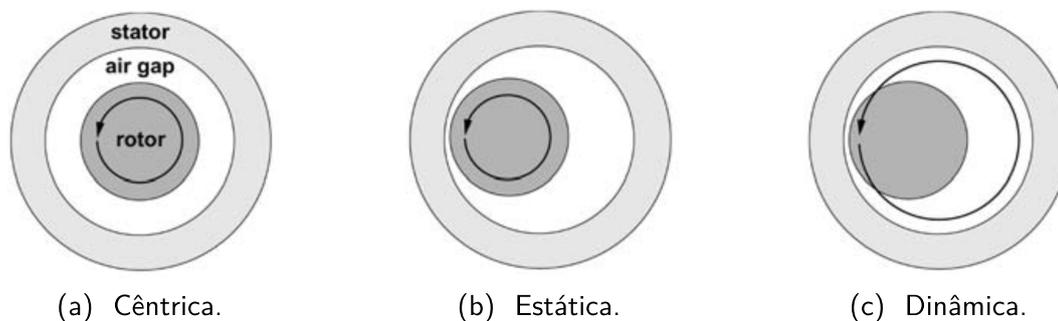
Imperfeições na usinagem do eixo da máquina que alterem sua forma almejada causam a excentricidade chamada de desvio de forma. O efeito dessa excentricidade tem relação com um desbalanceamento de massa, como será comentado na Seção 2.4.2. Isso produz movimentos do centro de massa do rotor, excitando diversas frequências além da relacionada à velocidade de rotação, devido a movimentos giratórios abruptos do rotor. Em manutenções preventivas, sobre as quais será mencionado no Capítulo 3, frequentemente são realizadas medições de forma do estator e rotor, o que possibilita investigar os efeitos desse tipo de excentricidade (LUNDSTRÖM; AIDANPÄÄ, 2008).

Para explorar as outras formas de excentricidade, define-se a linha central de rotação (PIA - *principal inertia axis* - eixo principal de inércia), a linha sobre a qual o rotor giraria caso não fosse segurado pelos mancais; e a linha central geométrica (GCL - *geometric centerline*), a própria linha central física do rotor (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004). O caso sem excentricidade, também chamado de excentricidade cêntrica, ocorre quando ambos os eixos mencionados estão centralizados entre si e com o estator da máquina, resultando em um entreferro uniforme.

Os tipos de excentricidade paralela são ilustrados na Figura 15, com um corte transversal da máquina, mostrando o rotor, entreferro e estator. Considera-se, para essa classificação, que o eixo do rotor e estator estão paralelos. Em resumo, vê-se que o caso estático é resultante do rotor descentralizado em relação ao estator e girando em torno de si mesmo, com a PIA e

GCL centralizadas. Para o caso dinâmico, o rotor não gira em torno do próprio eixo, então a PIA não coincide com a GCL (XU, X. *et al.*, 2018).

Figura 15 – Tipos de excentricidade paralela.



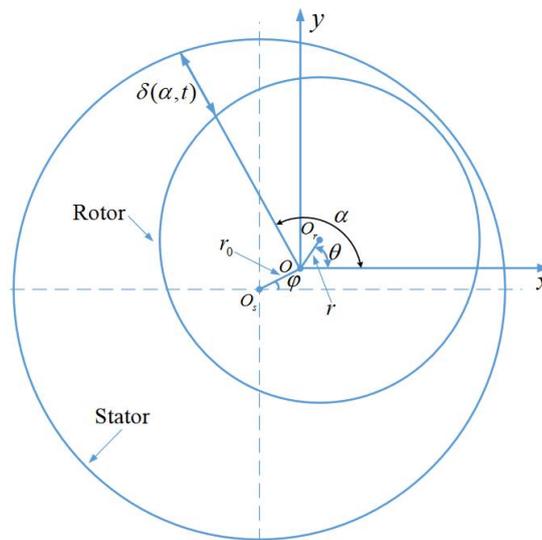
Fonte: Schlensock e Henneberger (2004).

A excentricidade estática depende de aspectos de manufatura, os quais invariavelmente apresentarão algum tipo de desvio, mesmo que mínimo. Portanto, já existindo previamente à operação, é um tipo de falta característico, em baixa proporção, de qualquer máquina girante. Para esse tipo de excentricidade paralela, o rotor gira em torno de sua própria GCL (LI, X. *et al.*, 2007; LI, S. *et al.*, 2016; XU, X. *et al.*, 2018). A excentricidade dinâmica, por outro lado, deve ocorrer apenas após certo tempo de operação da máquina, em decorrência, por exemplo, do aparecimento de desgastes e/ou folgas nos mancais, de forma que o rotor passe a girar em torno da GCL do estator (BABAEI *et al.*, 2011; ZHOU *et al.*, 2016; XU, X. *et al.*, 2018). O entreferro ao longo da circunferência da máquina é uma variável importante para o estudo de excentricidades. Sua definição matemática pode ser determinada a partir de relações geométricas obtidas pela Figura 16. Porém, esta abordagem foge do escopo desse trabalho.

Embora também não esteja no escopo do trabalho, é interessante mencionar que a excentricidade inclinada também pode ser tratada de maneira matemática, incluindo uma terceira dimensão ao problema. A excentricidade inclinada é caracterizada pela diferença de altura entre os mancais, no caso de máquinas horizontais, de forma que o entreferro possui tamanhos diferentes ao longo do eixo axial da máquina. Ela é simétrica quando o desvio entre estator e rotor é apenas angular, e mista quando ocorre um deslocamento radial simultâneo, podendo ser interpretada como uma combinação entre excentricidade inclinada simétrica e paralela (XU, X. *et al.*, 2018). A Figura 17 mostra um sistema de coordenadas que permite o estudo desse tipo de falta, separando dois planos paralelos, um relativo ao estator e outro ao rotor.

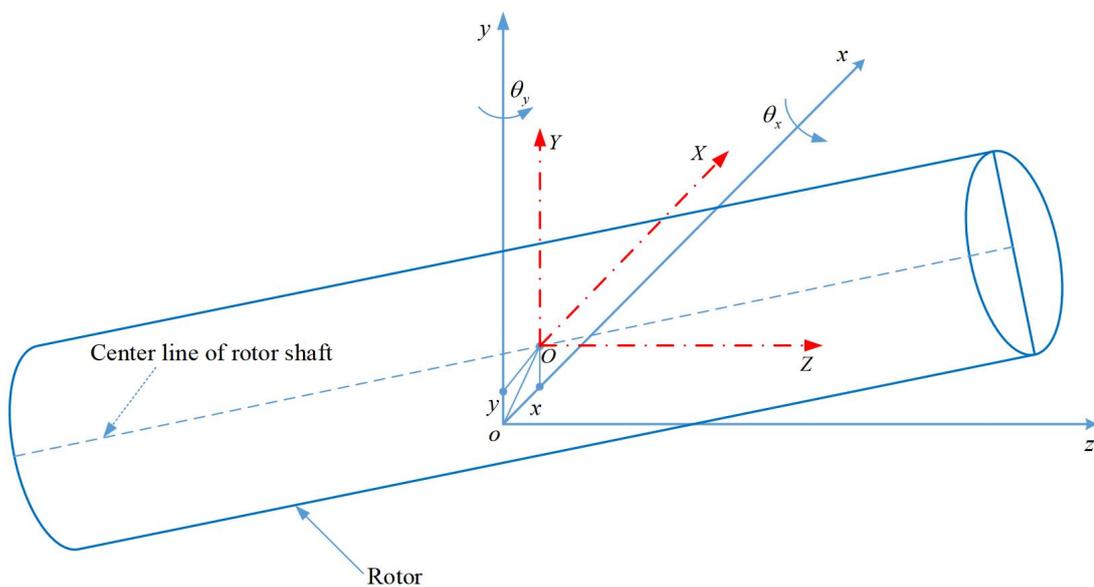
Por fim, a excentricidade curvada é típica de aplicações de motores de grande porte, nos quais se fazem presentes deflexões significativas no eixo em decorrência de uma insuficiência de rigidez mecânica da estrutura. Embora este tipo de excentricidade não seja diretamente relacionado com este trabalho, visto a impossibilidade de testá-lo na bancada de testes utilizada e o porte do gerador disponível, ela pode ser estudada de maneira similar à excentricidade inclinada mista, separando o rotor em diversas seções transversais (XU, X. *et al.*, 2018).

Figura 16 – Variáveis para consideração do entreferro em estudos de excentricidade paralela.



Fonte: Xueping Xu *et al.* (2018).

Figura 17 – Sistema de coordenadas para estudo da excentricidade inclinada.



Fonte: Xueping Xu *et al.* (2018).

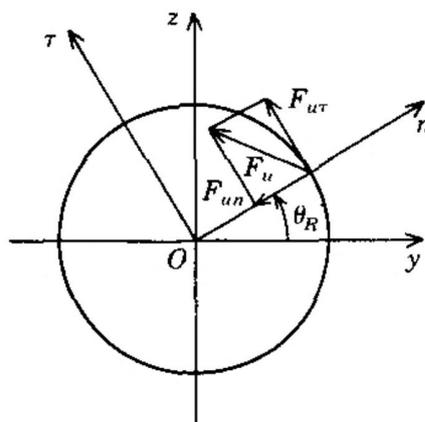
Observa-se que as excentricidades também podem ser estudadas através da modelagem com elementos básicos de vibração, que serão introduzidos na Seção 3.1. Essa abordagem foi utilizada por Behrend (1990), que aprofundou o modelo simplificado de Covo (1954), obtendo resultados importantes para a época ao demonstrar a aplicabilidade prática dessa abordagem, quando recursos computacionais eram limitados (XU, X. *et al.*, 2018).

2.4.2 Desbalanceamento

O desbalanceamento pode ser definido como uma distribuição de massa desigual ao redor do rotor, o que causa a incoincidência entre a GCL e a PIA do rotor (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004). A força de vibração devida ao desbalanceamento depende do quadrado da velocidade angular dos pontos de massa e de suas distâncias para o centro do rotor, sendo o produto entre os dois chamado de quantidade de desbalanceamento (SALEEM *et al.*, 2012).

Na prática, forças de desbalanceamento de mesma amplitude e diametralmente opostas se anulam, de forma que modelos de vibração que exploram o problema de maneira teórica levam em consideração apenas a massa que contribui para o deslocamento da PIA, i.e., a diferença de massa ao longo do raio e da circunferência do rotor entre posições diametralmente opostas (XUL *et al.*, 2017). Por isso, o termo desbalanceamento, no contexto de faltas em máquinas girantes, costuma se referir apenas ao efeito resultante dessa diferença, e não às parcelas de força geradas correspondentes a cada ponto da máquina. Também é interessante separar a força em suas componentes normal e tangencial, conforme ilustrado na Figura 18, podendo-se abordar a força em sua forma complexa (XU, M.; MARANGONI, 1994).

Figura 18 – Componentes de força de vibração devido ao desbalanceamento.

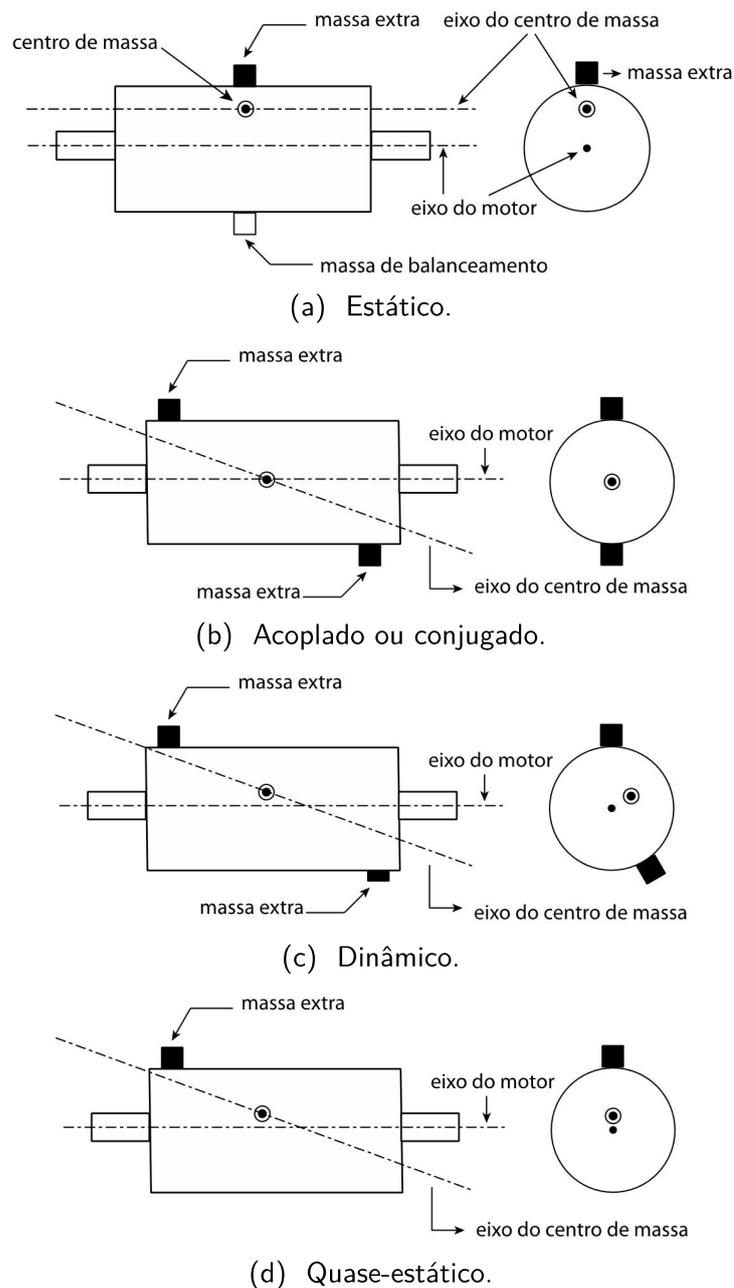


Fonte: M. Xu e Marangoni (1994).

O desbalanceamento pode ser classificado de quatro formas (FERRAZ, 2013), conforme ilustrado na Figura 19 e comentado adiante:

- Estático;
- Acoplado;
- Quase-estático;
- Dinâmico.

Figura 19 – Ilustração dos tipos de desbalanceamento. Vista lateral à esquerda e frontal à direita.



Fonte: Adaptado de Ferraz (2013).

O desbalanceamento estático tem o PIA deslocado paralelamente à GCL. Esse caso pode ser corrigido com a adição de uma massa diametralmente oposta à GCL em um plano perpendicular ao eixo de rotação.

O desbalanceamento acoplado, também chamado de conjugado, tem a PIA inclinada, interceptando a GCL em seu centro. Para corrigir essa falta, é necessário definir tanto as massas equivalentes de desbalanceamento, quanto a distância entre elas, considerando dois planos.

O desbalanceamento dinâmico, por sua vez, é caracterizado por uma PIA que não é

paralela e não intercepta a GCL em seu centro, sendo uma combinação entre os tipos estático e acoplado. A correção do efeito pode ser realizada com a adição de massas equivalentes em dois planos perpendiculares ao eixo de rotação. Um caso especial desse tipo de desbalanceamento é o chamado de quase-estático, cujo efeito poderia ser representado por apenas uma massa equivalente, mas o efeito sobre a PIA tem as mesmas características mencionadas para o caso mais geral do desbalanceamento dinâmico.

2.4.3 Perda de espiras

Curtos-circuitos em máquinas elétricas são bastante comuns, podendo ocorrer devido às condições da aplicação, como sobrecarga, surtos atmosféricos, transitórios de rede, erro de sincronização, entre outros. O próprio projeto das máquinas leva em consideração essas ocorrências, seguindo padrões de normas como a IEC 60034-1 (2022) e C50.13 (2006) ou conforme certificadoras para aplicações específicas. A capacidade das máquinas de sustentar curtos-circuitos, entre outros fatores, depende fortemente das suas reatâncias transientes, mencionadas na Seção 2.2.

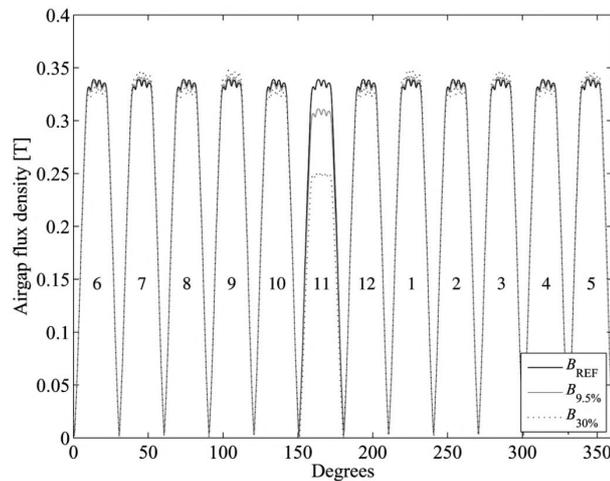
Os curtos-circuitos também podem ter origem em falhas, como folga na cabeça de bobina, deformação do enrolamento, problemas de manufatura ou presença de corpos estranhos. Mais de um tipo de curto-circuito pode ocorrer, como espira-espira, bobina-bobina, fase-fase e fase-terra (XU, X. *et al.*, 2018). Essa seção dará enfoque ao curto-circuito entre espiras, visto a possibilidade de simulá-la experimentalmente no laboratório.

Para fins de estudo, o curto-circuito entre espiras será abordado experimentalmente, nesse trabalho, como a retirada de espiras, como será apresentado no Capítulo 4. A título de exemplo, a retirada de espiras também pode ocorrer na prática, na forma de quebra de anéis de ligação do estator e, para máquinas assíncronas, de quebra de barras do rotor (XU, X. *et al.*, 2018).

O principal efeito de curtos-circuitos é a distribuição irregular de fluxo no entreferro da máquina, devido à redução do potencial magnético do polo e assimetria do campo magnético. Essa irregularidade gera, assim como para a excentricidade, as FMDs, além de vibração radial (HE, Y.-L. *et al.*, 2016, 2017; XU, X. *et al.*, 2018). Outro efeito é a heterogeneidade de magnetização na superfície do rotor, o que contribui para forças eletromagnéticas adicionais na máquina e assimetria em seu circuito magnético (XU, X. *et al.*, 2018). Mais especificamente, o curto-circuito entre espiras do enrolamento de campo gera um desbalanço magnético, conforme demonstrado em Wallin e Lundin (2013) e Rigoni (2014) através de simulações numéricas e testes experimentais, conforme a Figura 20.

As forças eletromagnéticas decorrentes de faltas de curto-circuito também podem ser estudadas matematicamente, podendo ser calculadas de diferentes maneiras, citadas aqui apenas como informação adicional: análise de subdomínio exato, circuito magnético equivalente, tensor de Maxwell, função de enrolamento, mapeamento conformal, energia e elementos finitos (XU, X. *et al.*, 2018).

Figura 20 – Simulação de densidade de fluxo magnético durante passagem dos 12 polos da máquina por um ponto fixo do estator, sob diferentes níveis de curto-circuito entre espiras do enrolamento de campo.



Fonte: Wallin e Lundin (2013).

2.4.4 Curto-circuito entre chapas do núcleo do estator

O curto-circuito entre chapas do núcleo do estator pode ocorrer por causa do envelhecimento natural do equipamento ou devido a ambientes severos que causem a degradação da isolamento entre as chapas. Como comentado na Seção 2.1, a separação do núcleo da máquina em chapas de espessura reduzida serve para reduzir a circulação de correntes induzidas. Assim, a perda dessa isolamento causa um aumento de perdas Joule na região afetada, podendo levar à queima do pacote em casos graves.

O curto-circuito entre chapas do núcleo do estator pode ser estudado como uma irregularidade de magnetização na máquina. Nessa situação, a força magnética por unidade de área na superfície do rotor é variável, o que gera uma magnetização heterogênea em máquinas de ímãs permanentes ou que possuem materiais magnéticos moles em sua composição (XU, X. *et al.*, 2018). Como o gerador testado nesse trabalho é bobinado, tem-se subsídios para prever efeitos pouco perceptíveis com esse tipo de falha. Entretanto, o efeito do curto-circuito nas lâminas do estator pode aumentar as correntes de Foucault e alterar o fluxo magnético localmente, com conseqüente magnetização heterogênea nessa região da máquina.

Em Tenhunen *et al.* (2004), verificou-se experimentalmente que existe uma relação entre a FMD e a magnetização da máquina, conforme inicialmente analisado por Covo (1954) para máquinas de indução. Perers *et al.* (2007) também demonstrou que a saturação apresentou influência significativa na FMD de hidrogeradores sob alta tensão e carga.

Na prática, um efeito similar de irregularidade de magnetização poderia ser devido a: envelhecimento do material, repulsão mútua entre campos magnéticos, magnetização assimétrica durante manufatura, efeito de borda no anel magnético, assimetria dos enrolamentos

fabricados ou topologia assimétrica dos enrolamentos (XU, X. *et al.*, 2018).

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Esse capítulo apresentou conceitos sobre o gerador síncrono, incluindo alguns aspectos construtivos relevantes que podem afetar os sinais de vibração estudados nesse trabalho, além de seu funcionamento e características de operação. Apresentou-se também algumas faltas que podem ocorrer nesse tipo de máquina, abordando possíveis causas práticas, fenômenos com características semelhantes e seus impactos em sinais do gerador que podem afetar a vibração da máquina, além de abordagens possíveis para o estudo de seus efeitos no gerador. De maneira geral, o capítulo buscou mostrar a complexidade envolvida no diagnóstico dessas máquinas através de medições indiretas, visto os diversos fatores de influência do projeto, manufatura e operação.

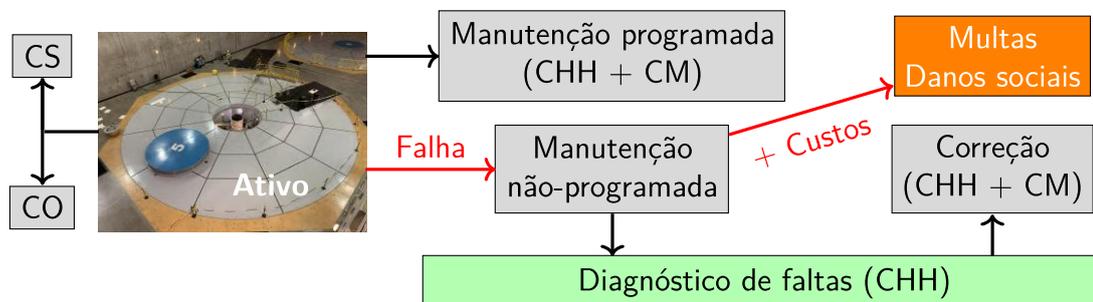
3 MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO MECÂNICA

A manutenção preventiva é a ferramenta mais comumente utilizada para controlar riscos relacionados à operação de plantas de geração de energia. Ela consiste em realizar paradas programadas dos ativos, para averiguação de suas condições e realização das manutenções necessárias. Observa-se que técnicas de manutenção preventiva se contrapõem aos dispositivos de proteção, os quais têm a função de atuar apenas após a ocorrência de uma falta para proteger o equipamento em si, não evitando as disrupturas consequentes de uma interrupção de operação. Os custos operacionais elevados da manutenção preventiva se justificam quando comparados ao custo alternativo da interrupção de uma usina por completo decorrente de uma falha inesperada (TAVNER *et al.*, 2008). Além disso, equipamentos de infraestrutura crítica requerem altos níveis de confiabilidade para que possam operar adequadamente por vários anos sem perdas significativas em desempenho e sem falhas inesperadas, o que contribui para essa justificativa (AHMED *et al.*, 2021).

A Figura 21 ilustra o fluxo de custos em manutenções de infraestruturas críticas e o impacto de erros não previstos, mostrando que essa abordagem é mais econômica do que aguardar a ocorrência de falhas para a realização de manutenções corretivas, estas normalmente utilizadas apenas em casos circunstanciais. O fluxograma da Figura 21 mostra que o ativo naturalmente possui custos atrelados de operação e substituição, seja de componentes ou do equipamento por completo, e a manutenção preventiva soma custos homem-hora e da própria manutenção. Com as manutenções preventivas realizadas adequadamente, a não ser em situações adversas, a operação é interrompida em um período previamente planejado, retornando à operação em seguida. Caso ocorra uma falha não prevista, é necessário a realização de manutenções corretivas não previstas e o fluxo de custos se torna mais extenso. Além dos danos decorrentes, que podem ser amplificados com uma falha inesperada ao sobrecarregar outros componentes, ainda é necessário obter o diagnóstico das faltas que causaram a interrupção, gerando mais custos de homem-hora. Simultaneamente, há danos sociais intangíveis e podem ser atribuídas multas à concessionária, somando-se ao custo total de manutenção (AHMED *et al.*, 2021).

Com o aumento da competitividade no ramo, cada vez mais busca-se otimizar as manutenções nas usinas, com as técnicas clássicas sendo complementadas, ou até substituídas, por técnicas de manutenção preditiva. A base delas é o monitoramento de condição, que consiste na avaliação contínua da saúde de uma planta ou equipamento ao longo de toda sua vida útil (TAVNER *et al.*, 2008). Com essa proposta, tem-se mais controle e segurança sobre o momento de realização das paradas preventivas e sobre a necessidade delas ou possibilidade de adiamento, quando necessário. Obtém-se, também, um aumento de produtividade na execução dos serviços, visto que o diagnóstico pode ser adiantado em relação à parada, fornecendo indícios da origem de anomalias previamente à realização das atividades de manutenção. Este tópico será aprofundado na Seção 3.2.

Figura 21 – Fluxograma de custos com manutenção, mostrando o impacto de falhas não previstas. CS = Custo de Substituição, CO = Custo Operacional, CHH = Custo Homem-Hora, CM = Custo de Materiais.



Fonte: Próprio autor, baseado em Ahmed *et al.* (2021).

Nesse contexto, aplicado a máquinas girantes, a análise de sinais de vibração mecânica é a principal forma de monitoramento de condição, representando mais de 80% das técnicas de diagnóstico de falta (SAUCEDO-DORANTES *et al.*, 2016). Um dos motivos dessa predominância é o fato de a vibração refletir qualquer perturbação em partes móveis de maneira direta, através dos acoplamentos mecânicos do sistema, e ainda custando menos do que outras técnicas consideradas indiretas (MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021). A Seção 3.1 a seguir aprofunda a teoria de vibração no contexto de máquinas elétricas girantes em preparação às demais seções do capítulo.

3.1 VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

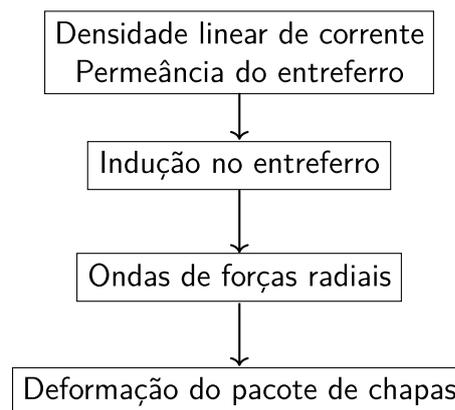
Chama-se de vibração qualquer movimento oscilatório, i.e., que se repita depois de um intervalo de tempo. De maneira prática, um sistema de vibração envolve a transferência de energia potencial para cinética e vice-versa alternadamente, de forma que qualquer sistema vibratório pode ser representado por um sistema equivalente com três elementos básicos (RAO, 2017):

- Mola, que armazena energia potencial;
- Massa, que armazena energia cinética;
- Amortecedor, o qual dissipa energia.

O número de graus de liberdade define a quantidade mínima necessária de coordenadas independentes para determinar a posição de todas as partes do sistema em qualquer instante de tempo. A maioria dos sistemas reais envolvendo máquinas são sistemas contínuos, com infinitos graus de liberdade. Na prática, esses sistemas são aproximados por sistemas discretos, com um número limitado de elementos, que pode ser ajustado para um compromisso entre complexidade e precisão (RAO, 2017).

A vibração em máquinas elétricas rotativas pode ter origem eletromagnética e mecânica. A Figura 22 ilustra a sequência de eventos que geram vibração eletromagnética na máquina. A densidade linear de corrente da máquina gera ondas de indução no entreferro. As ondas sofrem influência da variação da permeância no entreferro. As harmônicas de indução originadas dessas interações, combinadas de acordo com o tensor de Maxwell, deformam a coroa do estator, o que caracteriza uma vibração na máquina (NAU, 2000).

Figura 22 – Geração de vibração eletromagnética em uma máquina elétrica rotativa.



Fonte: Adaptado de Nau (2000).

Do ponto de vista mecânico, o posicionamento do rotor no interior do estator, ou excentricidade, resulta em um entreferro não uniforme ao longo da circunferência do rotor, o que altera as permeâncias da máquina e, conseqüentemente, a interação entre as ondas de indução no entreferro (NAU, 2000). Conforme comentado na Seção 2.4, a excentricidade e o desbalanceamento do rotor sempre estão presentes em algum grau, mas os próprios componentes físicos da máquina em operação também podem causar vibrações naturais. Os mancais possuem estruturas internas complexas, propensas a imperfeições e irregularidades de lubrificação, além de fadiga, deformação, folga, desgaste, corrosão, bloqueios no sistema de refrigeração e problemas de manufatura (TRUTT *et al.*, 2001; COLLACOTT, 1977). Ainda, a própria interação dos componentes mencionados com as demais estruturas do gerador e seu entorno, como carcaça, base, entre outros, compõem o sistema vibratório da máquina. Esses componentes, por serem excitados na frequência de rotação da máquina, costumam corresponder a frequências baixas de vibração e atenuáveis com dispositivos externos, enquanto a vibração eletromagnética pode atingir frequências mais elevadas, na ordem de kHz.

3.1.1 Ondas de forças

As forças de origem eletromagnética que se refletem na máquina, na forma de vibração, ocorrem na superfície entre estator e entreferro, regiões com permeabilidades diferentes (NAU, 2000). Essas forças são proporcionais ao quadrado da indução magnética no entreferro, de

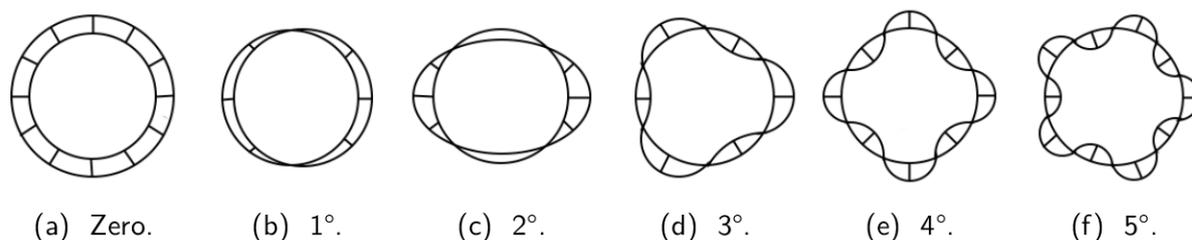
forma que, na ausência de pulsações em um fluxo senoidal, haveriam dois polos de força para cada polo magnético (NEVES, 1999). Isso contribui para justificar a excitação da frequência correspondente ao dobro da frequência da rede elétrica quando o gerador é submetido a faltas de estator, fenômeno conhecido na literatura e que será abordado no Capítulo 6.

A indução magnética no entreferro é composta por todas as harmônicas devidas à distribuição do enrolamento e às ranhuras do estator e rotor sujeitas a efeitos de saturação e excentricidade na máquina, aspectos abordados no Capítulo 2. Dessa forma, pode-se considerar independentemente a pressão magnética¹ devida a cada componente, porém apenas algumas combinações de harmônicas conseguem fornecer um nível de potência suficiente para gerar uma vibração significativa (NAU, 2000).

3.1.2 Modos de vibração

Forças radiais em conjunto com forças tangenciais deformam os pacotes de chapas do estator e do rotor. Considerando os pacotes como anéis homogêneos livres, capazes de vibrar com a mesma forma e frequência das ondas de força para fins de análise, a Figura 23 ilustra alguns modos de vibração para a chapa do estator. Dentre os modos de vibração mostrados, o zero é o único que corresponde a uma onda pulsante e estacionária, distribuída uniformemente na circunferência do entreferro. Os demais modos são provocados por ondas girantes. O 1º modo é considerado como uma flexão do rotor por este ser mais flexível e o 2º é uma deformação que se aproxima de uma elipse, modo que apresenta a menor rigidez mecânica, sendo mais fácil de ocorrer em uma situação real. A partir do modo 1, a força muda de sentido a cada intervalo de π/r radianos, em que r é o número do modo de vibração (NAU, 2000).

Figura 23 – Modos de vibração teóricos.



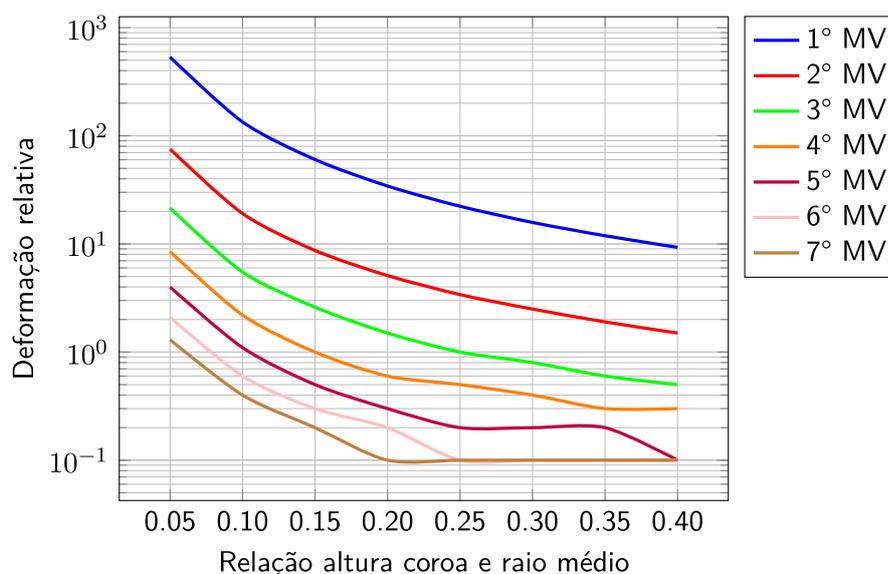
Fonte: Adaptado de Nau (2000).

Quanto maior o número do modo de vibração, menor é a força relacionada, logo menor é a vibração correspondente. Por outro lado, quando há ressonância, i.e., quando a onda de força coincide com uma frequência natural do estator, mesmo uma pequena excitação pode causar vibração elevada. Além disso, características construtivas da máquina podem influenciar tanto sua vibração quanto a deformação física decorrente (NAU, 2000; NEVES, 1999). A Figura 24 mostra a variação da deformação da coroa do estator relativa ao modo de vibração

¹ Densidade de força associada a um campo magnético.

zero em função da relação entre a altura da coroa e seu raio médio para diferentes modos de vibração. Na figura, é possível observar o decaimento da deformação conforme aumenta o número do MV, devido à menor vibração mencionada.

Figura 24 – Deformação da coroa do estator relativa ao modo de vibração zero em função da relação entre a altura da coroa e seu raio médio para diferentes modos de vibração.

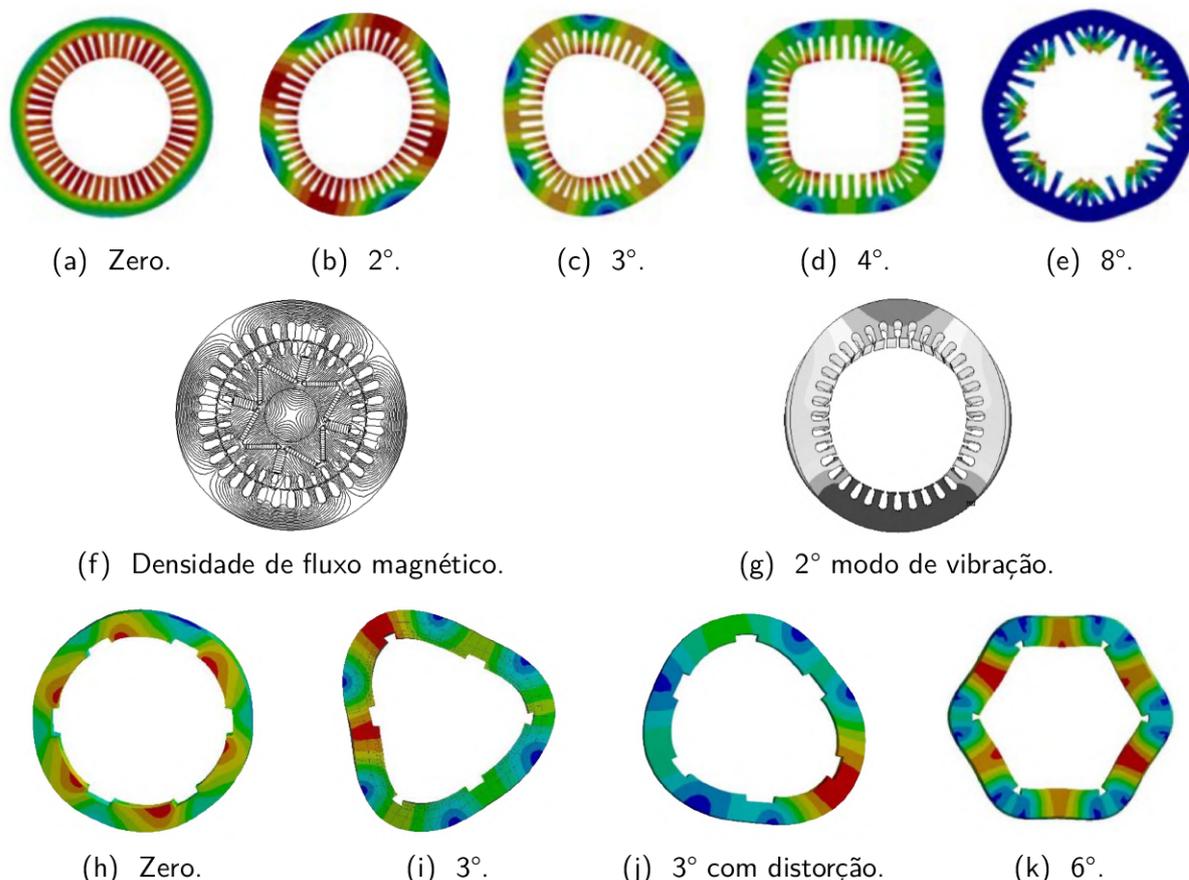


Fonte: Próprio autor. Dados de Nau (2000).

Além das forças magnéticas mencionadas até o momento, resultantes da interação entre ondas de indução no entreferro, há outros dois tipos de forças eletromagnéticas que se relacionam com os modos de vibração de máquinas elétricas girantes (NEVES, 1999): as forças de Laplace, que atuam sobre um condutor percorrido por corrente elétrica imerso em um campo magnético; e as magnetostritivas, que são caracterizadas por uma deformação espontânea do material ao ser submetido a um campo magnético e estão presentes em qualquer material magnético compressível (MAILHÉ, 2018).

Na prática, é possível realizar análises modais para avaliar os modos de vibração de componentes mecânicos e suas frequências naturais correspondentes. A Figura 25 mostra os MVs do estator de máquinas síncronas de ímãs permanentes obtidos em alguns trabalhos: Liao *et al.* (2019) simularam os MVs de uma única máquina, Yu e Tang (2006) simularam o fluxo magnético de uma máquina e apenas um modo de vibração e Shanming Wang *et al.* (2018) mediram os MVs para algumas máquinas diferentes. A Figura 25 mostra que as formas dos MVs não são totalmente uniformes e pode haver variações entre modos de vibração iguais em ambientes reais.

Figura 25 – Modos de vibração simulados ou medidos. Em 25a a 25e mostram-se simulações MEF 2D para uma mesma máquina. Em 25f e 25g mostra-se uma simulação MEF 2D para o fluxo magnético na máquina e uma simulação MEF 3D para o modo de vibração. Em 25h a 25k mostram-se resultados medidos em máquinas diferentes



Fonte: Adaptado de Liao *et al.* (2019), Yu e Tang (2006) e Shanming Wang *et al.* (2018).

3.1.3 Frequências naturais

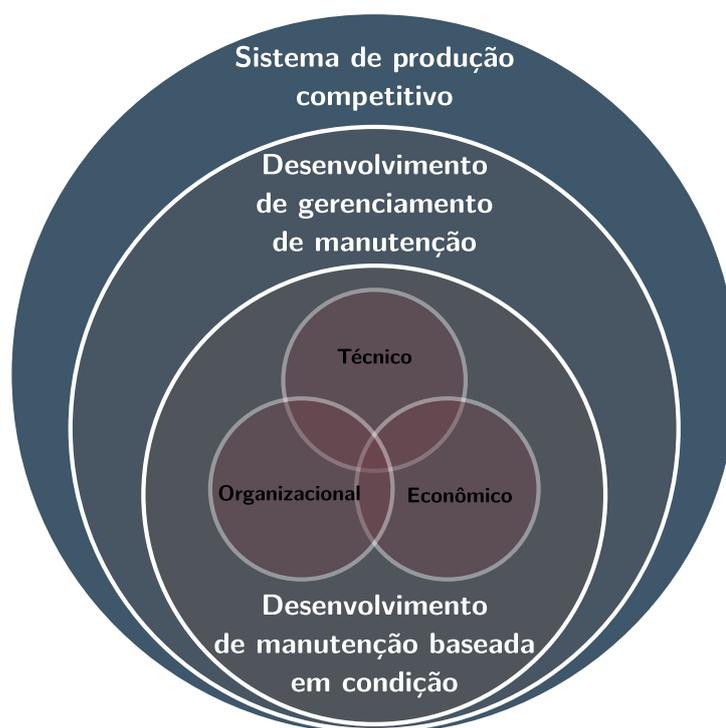
Sistemas vibratórios, de acordo com seus graus de liberdade, podem ser descritos por equações diferenciais. As soluções das equações podem ser dadas em função de senos e cossenos, por exemplo, com uma série de Fourier, fornecendo diretamente as frequências naturais do sistema. Em máquinas gigantes, pode-se ter frequências naturais de flexão e torção (NAU, 2000). Como já mencionado, a maior parte da vibração eletromagnética no gerador síncrono é devida ao estator. Assim, as considerações a seguir serão referentes a essa parte da máquina.

Pode-se calcular a frequência natural de flexão dos modos de vibração a partir da frequência natural do modo de vibração zero, da frequência natural de flexão e dados dependentes da coroa do estator da máquina, do seu tamanho e de sua massa, além de outros fatores. Já a frequência natural de torção depende também dos dentes e enrolamentos da máquina e de alguns dados relacionados à sua inércia. Maiores detalhes sobre os cálculos podem ser vistos em Nau (2000).

3.2 MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO NA INDÚSTRIA

O aumento da competitividade global fomenta o sucesso desse tipo de manutenção, visto a necessidade crescente do aumento de eficiência dos processos produtivos. A disponibilidade dos equipamentos de produção e suas manutenções têm grande impacto na produtividade das indústrias e concessionárias de energia, de forma que metodologias tradicionais de manutenção estão cada vez menos satisfatórias para atender as necessidades industriais de redução de falhas e degradações. Manutenções baseadas em condição evoluíram para sustentar esse resultado ideal, com ações que avaliam os equipamentos em tempo real ou periodicamente através de sensores ou testes externos que não requerem a interrupção da operação (RASTEGARI, 2015). Com isso, o monitoramento de condição está alterando a forma como se dá a manutenção em indústrias, se envolvendo com diferentes áreas, conforme ilustrado na Figura 26, que apresenta a evolução do contexto industrial para adoção progressiva da manutenção preditiva como principal forma de manutenção.

Figura 26 – Áreas relacionadas com o monitoramento de condição para a evolução de sua adoção.



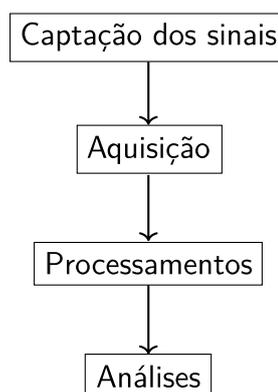
Fonte: Adaptado de Rastegari (2015).

No contexto de monitoramento de condição de máquinas elétricas, pode-se dizer que as peças que sofrem excitação podem oscilar e essas oscilações são transmitidas através das articulações aos demais elementos acoplados. Por isso, a vibração se destaca como ferramenta para esse tipo de manutenção. As interações entre os elementos do sistema e suas transmissões

resultam em um espectro de frequência característico do sistema, já que cada elemento tem sua frequência natural. A alteração de características mecânicas altera frequências específicas do espectro para patamares acima ou abaixo de seus valores normais de operação, o que pode contribuir para identificar o componente defeituoso ou o tipo de falha (SHIFAT; HUR, 2020; MARCAL, 2000).

Técnicas de análise de vibração são fortemente dependentes de processamento de sinais, o que permite a extração das informações de interesse do sinal. É comum que a captação de sinais de vibração seja feita com múltiplos sensores para melhorar a confiabilidade do sistema de monitoramento, utilizando de redundância para maior assertividade em diagnósticos. A Figura 27 mostra um fluxograma das etapas essenciais para o monitoramento de condição: a captação e a aquisição dos sinais a serem monitorados, os processamentos sobre eles e, por fim, as análises (MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021).

Figura 27 – Etapas essenciais para o monitoramento de condição.



Fonte: Próprio autor.

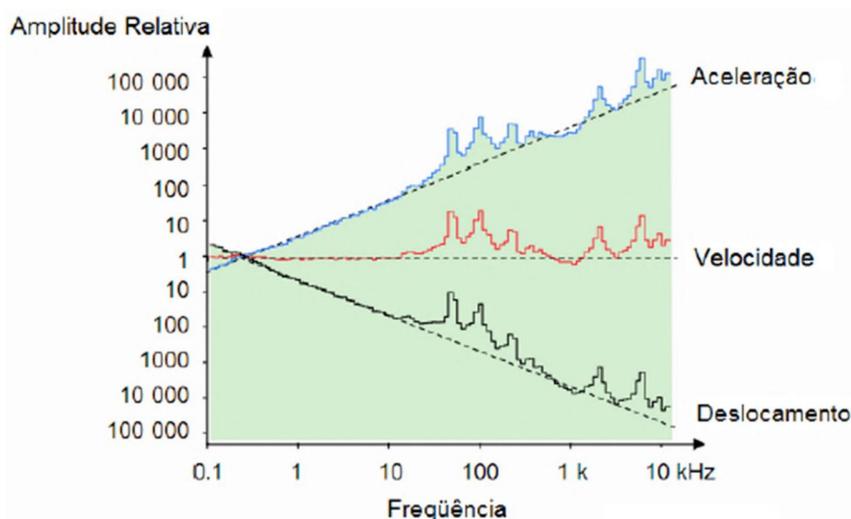
3.2.1 Sensoriamento de vibração

A primeira etapa do monitoramento de condição é a captação dos sinais através de sensores, que são transdutores capazes de converter um movimento, energia mecânica, em um sinal elétrico. A escolha do sensor é baseada em sua faixa de frequência, sensibilidade, topologia e limitações operacionais (DEB MAJUMDER *et al.*, 2019; MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021).

Os sinais de vibração utilizados para o monitoramento de condição podem ser de deslocamento, velocidade ou aceleração, tipicamente medidos, respectivamente, em micrômetros, milímetros por segundo e g (aceleração da gravidade). Esses sinais podem ser obtidos diretamente através de sensores capazes de medir essas grandezas ou a partir de operações matemáticas sobre o sinal de um desses tipos, embora nesse caso haja influência da resposta em frequência individual do sensor utilizado, como será mostrado a seguir. A Figura 28 ilustra

como a resposta de frequência entre esses tipos de sinal se relacionam, evidenciando que através de operações de integração e derivada é possível obter os outros sinais.

Figura 28 – Relação entre os sinais de vibração de deslocamento, velocidade e aceleração.



Fonte: Broch e Courrech (1984).

3.2.1.1 Tipos de sensores

A faixa de frequência de resposta dos sensores é o principal fator para sua escolha. Sensores de deslocamento, ou proxímetros, têm atuação em baixas frequências, tendo principal aplicação para detecção de desbalanceamento e defeitos em partes móveis. Já os sensores de aceleração, ou acelerômetros, respondem melhor a altas frequências, podendo detectar mais facilmente os primeiros sinais de desgastes e fadiga na máquina. Sensores de velocidade, atuam no meio termo entre os dois anteriores, apresentando desempenho razoável em ambas as faixas de frequência (MARCAL, 2000). Por esse motivo, o sinal de velocidade é o mais indicado para o monitoramento de vibração, embora não obrigatoriamente captado por sensores de velocidade.

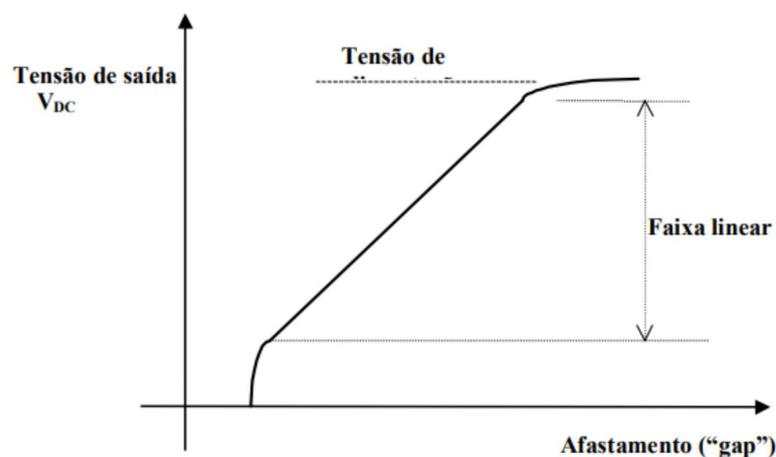
Os proxímetros modernos são em sua maioria indutivos, sendo compostos por um oscilador conectado a uma bobina, gerando campos magnéticos que induzem correntes de Foucault no material de que se aproximam. Essas correntes, ao gerarem um campo contrário, alteram a amplitude do campo resultante, sensibilizando o sensor sobre a distância ao objeto. Com essa configuração, a vibração representa o sinal modulante, o qual é demodulado para que haja uma saída de tensão contínua e proporcional à distância nos terminais do sensor (MARCAL, 2000). Para a conversão em sinal de tensão, os sensores podem ter eletrônica integrada, com uma instalação mais simples e custos menores. Entretanto, algumas aplicações requerem sensores menores e mais robustos, seja para áreas classificadas com exigências especiais de vedação ou para resistência a altas temperaturas. Nesses casos, o sistema acaba sendo

mais complexo, exigindo condicionamento externo dos sinais e casamento de impedâncias, ou também cabos específicos a depender da distância entre o sensor e os equipamentos externos complementares (AQTECH POWER PROGNOSTICS, 2020).

O sistema envolvido na captação de sinais de vibração a partir de proximímetros, incluindo transdutor de deslocamento, cabo de extensão, oscilador e demodulador constituem um circuito ressonante em harmonia (MARCAL, 2000). Por isso, é necessário calibrar os sensores conforme as suas especificações sobre: extremidades de medição, diâmetro do corpo, tipo de rosca, comprimento de bobina e cabos de extensão, entre outros. Atualmente, a norma ISO 16063-21 (2003) estabelece normativas para a calibração desse tipo de sensor, indicando, além de métodos de calibração, a compatibilidade com o tipo de metal da estrutura que se deseja analisar (AQTECH POWER PROGNOSTICS, 2020). A Figura 29 mostra uma curva típica de calibração de proximímetros, da qual é possível inferir que (MARCAL, 2000):

- A sensibilidade do sensor relaciona a variação de tensão em sua saída com o afastamento do objeto analisado;
- Um sensor muito próximo da superfície do objeto não produz sinal de tensão na saída do demodulador;
- Há uma região linear na qual o deslocamento é proporcional à tensão de saída. Desvios residuais na constante de proporcionalidade entre tensão de saída e deslocamento caracterizam o erro de linearidade mencionado anteriormente;
- Deslocamentos fora da região linear fazem com que o sistema perca a constante de proporcionalidade e a tensão se aproxime da tensão de alimentação do conjunto.

Figura 29 – Curva típica de calibração de proximímetros.



Fonte: Marcal (2000).

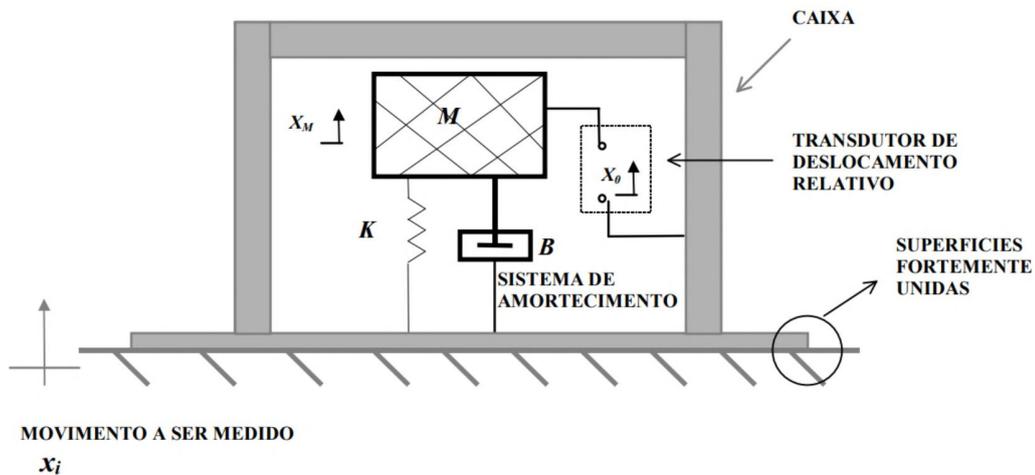
Para referência do leitor, os proximetros disponíveis atualmente no mercado podem ter faixa de operação de até 8 mm, com resoluções de 0,005 mm e erro de linearidade na ordem de micrômetros (AQTECH POWER PROGNOSTICS, 2020).

Com as observações acima mencionadas, fica evidente que também há cuidados necessários com relação ao uso dos sensores de deslocamento, somando-se à própria complexidade de construção e instalação desse tipo de sensor, que requer o projeto de suportes adaptados a cada situação. Além disso, mencionou-se a dependência sobre fatores externos ao sensor, principalmente o material de composição do objeto a ser monitorado e seu acabamento, mas também com relação a características do ambiente. Em suma, esse tipo de sensor é preferível em aplicações que requerem maior robustez do sensor e se beneficiam de análises de baixa frequência, como o monitoramento direto de partes móveis, mas, como será apresentado a seguir, existem alternativas mais vantajosas do ponto de vista prático e comercial.

Sensores de velocidade são compostos por uma bobina envolta em um ímã suspenso por molas projetadas para uma frequência natural baixa, tipicamente menor do que 10 Hz. Esse tipo de sensor deve ser fixado na superfície do objeto de interesse, respondendo diretamente às suas movimentações. Entretanto, esses sensores eletromecânicos possuem limitações, principalmente com relação a manutenções, visto que as partes internas do sensor podem apresentar desgaste, sofrendo falhas ou comprometendo sua precisão e reduzindo a sua confiabilidade. Além disso, esses sensores costumam ser projetados para operação em planos específicos, horizontal ou vertical, o que pode ser um fator de imprecisão em suas instalações. Como já mencionado, o sinal de velocidade poderia ser obtido através da integração de um sinal de aceleração. Para isso, existem sensores de velocidade piezoelétricos, que são basicamente acelerômetros com circuitos internos para realizar essa operação. Essa estratégia aproveita as vantagens dos acelerômetros, como estabilidade de fase ao longo da faixa de operação e resposta em frequência mais ampla, assim como ausência de partes móveis com aumento de confiabilidade e vida útil, enquanto fornece diretamente o sinal de velocidade sem aumentar significativamente a complexidade do sistema. Por isso, o uso desse tipo de sensor se intensifica à medida que a banda passante da resposta em frequência dos acelerômetros evolui (MARCAL, 2000).

Acelerômetros, sensores de aceleração de vibração, são usualmente piezoelétricos, podendo ser compostos por elementos naturais, como cristais de quartzo, ou artificiais, como polímeros piezoelétricos. Sensores que utilizam cristais são mais duráveis e caros se comparados a estruturas cerâmicas (artificiais), que apresentam a vantagem de maior sensibilidade. O princípio de funcionamento desse tipo de sensor pode ser compreendido pela Figura 30, que apresenta um sistema de vibração formado pelos elementos básicos de massa, mola e amortecedor para representar a estrutura interna do sensor. A massa do sistema de vibração do sensor não está conectada à caixa, então qualquer força que cause movimento da caixa é exercida pela mola, cuja deflexão é proporcional à força. Dessa forma, a medição da aceleração é relacionada à medição da força necessária para acelerar uma massa conhecida (MARCAL, 2000; AQTECH POWER PROGNOSTICS, 2020).

Figura 30 – Representação da estrutura interna de um acelerômetro através de elementos básicos de vibração.



Fonte: Marcal (2000).

A sensibilidade, nos acelerômetros, é a principal característica de escolha do sensor em conjunto com sua resposta em frequência. A sensibilidade é definida como a relação da tensão de saída com a energia mecânica aplicada, tipicamente expressa em volts por g ou pico Coulomb por g . No caso de acelerômetros piezoelétricos, uma aceleração a faz o elemento piezoelétrico de massa M experimentar uma força F , que causa um acúmulo de cargas q relacionado por uma constante piezoelétrica d própria do elemento. A capacitância C do cristal faz com que uma tensão e se desenvolva entre seus eletrodos, conforme (3.1). O amortecedor ilustrado na Figura 30 não é utilizado intencionalmente nesse tipo de sensor, pois provém de perdas histeréticas no material, tipicamente não sendo informado por fabricantes, mas podendo ser desprezado para diversos usos práticos (MARCAL, 2000).

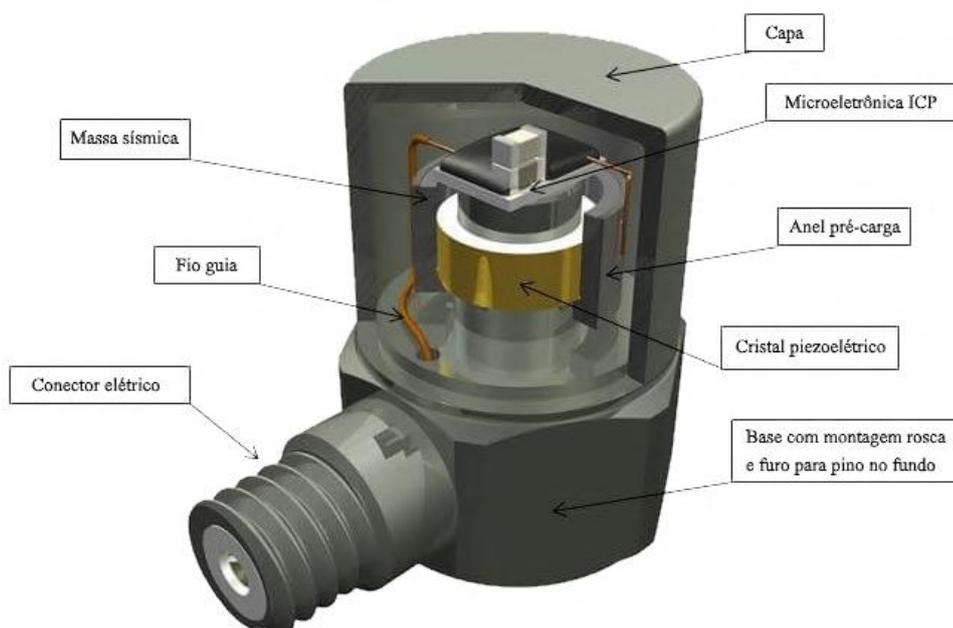
$$e = \frac{q}{C} = \frac{dMa}{C} \quad (3.1)$$

Há mais de uma configuração possível para a fabricação de acelerômetros piezoelétricos, sendo a mais simples delas a de compressão. Nessa montagem, um material condutor é utilizado para cementar a massa ao elemento piezoelétrico, que por sua vez é cementado à base. Estando os três componentes firmemente ligados, a construção é mais robusta, mas como o sensor atua como parte integral do sistema nesse bloco, ele é mais sensível a interferências, como temperatura, ruído acústico, deformação da base e campos magnéticos (MARCAL, 2000).

Acelerômetros com saída em carga possuem alta impedância de saída e são sensíveis à capacitância dos cabos, o que deve ser levado em consideração em suas instalações, além de apresentarem a necessidade de circuitos externos para o condicionamento dos sinais. Já os sensores com saída em tensão e eletrônica integrada podem ter dois padrões: *Integrated Electronics Piezo-Electric* - Eletrônica Integrada Piezoelétrica (IEPE) ou *Integrated Circuit-*

Piezoelectric - Circuito-piezoelétrico integrado (ICP[®]), que é uma marca registrada para uma implementação de IEPE (AQTECH POWER PROGNOSTICS, 2020). A Figura 31 ilustra a estrutura interna de um acelerômetro ICP[®]. Esses padrões com eletrônica integrada possuem baixa impedância de saída e já realizam internamente as conversões de impedância necessárias para compatibilidade com os cabos, tornando a instalação mais simples (MARCAL, 2000). Assim como para os outros sensores, também é necessário uma calibração, existindo normas como a ISO 16063-11 (1999) para isso.

Figura 31 – Estrutura interna de um acelerômetro do tipo ICP[®].

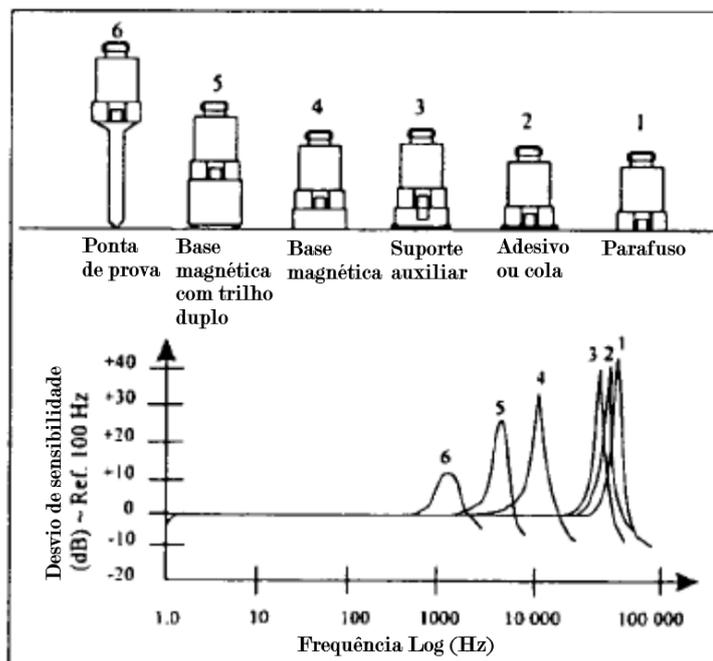


Fonte: PCP Piezotronics (2023).

3.2.1.2 Instalação dos sensores

A transmissão da energia mecânica através dos componentes da máquina também é relevante para os sensores: um suporte mais rígido facilita a propagação do sinal e melhora a faixa de frequência de atuação, assim como a precisão de leitura (SANDERS, 2023; MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021). Assim como mencionado sobre a ressonância das frequências naturais da máquina com seus componentes, também pode ocorrer esse fenômeno entre a máquina e o suporte do sensor, devendo-se atentar a isso durante a instalação do sensor (MARCAL, 2000). A Figura 32 ilustra o efeito do tipo de fixação de um sensor na faixa de frequência captada. Normalmente os sensores são instalados permanentemente em uma posição específica na máquina, principalmente com montagem parafusada, adesiva, com base magnética ou suporte auxiliar. A Figura 33 apresenta alguns dos métodos de fixação em maior detalhe.

Figura 32 – Efeito do tipo de fixação de acelerômetros na resposta em frequência.



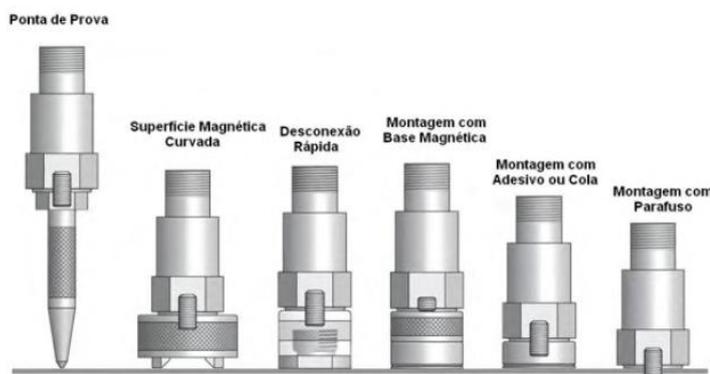
Fonte: Adaptado de PCB Piezotronics (2021).

Como mencionado, um suporte mais rígido é melhor para a propagação dos sinais de vibração, por isso o método parafusado é preferível, tendo uma resposta em frequência plana por uma faixa maior, além de possuir maior confiabilidade e segurança (MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021).

A base magnética pode ter fixação direta, possível apenas em superfícies planas, ou com trilho duplo, necessário para superfícies curvadas. Conforme a Figura 32, a fixação direta é preferível, visto sua maior faixa de frequência plana. A base auxiliar tem a função, principalmente, de possibilitar a desconexão rápida do sensor, podendo ser utilizado um único sensor para medições em diferentes posições da máquina, ainda com boa resposta em frequência. Para comparação, a Figura 32 mostra também a resposta em frequência de uma ponta de prova, um método de montagem que não considera nenhum tipo de fixação, sendo manipulado diretamente pelo operador. Ela apresenta a pior resposta em frequência dentre as demais, porém tem maior grau de flexibilidade e custos menores do que o suporte auxiliar, que compete no quesito de flexibilidade.

Apesar dos fatores de influência apresentados para os acelerômetros, suas instalações ainda são mais simples se comparadas aos proximetros. Para proximetros, além do suporte externo, a própria superfície para a qual o sensor aponta pode alterar fatores de escala da curva de calibração, que também é influenciada por outros fatores externos, como comprimento dos cabos. Deve-se atentar também para a irradiação de campos magnéticos entre sensores, que pode causar interferências e erros de medição (MARCAL, 2000). Para isso, a montagem

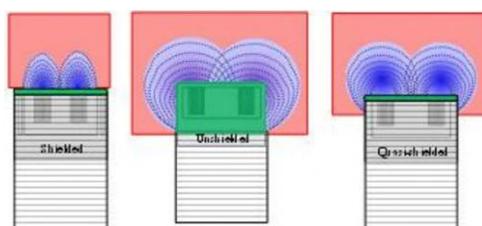
Figura 33 – Representação em detalhe dos tipos de fixação de acelerômetros.



Fonte: Mathias (2024).

dos sensores é realizada, essencialmente, de duas formas: faceada (*flush*) ou não-faceada (*non-flush*), podendo também ser realizada uma combinação entre ambas, chamada de quase-faceada (*quasi-flush*), conforme Figura 34. A montagem faceada deixa a ponta do sensor no mesmo nível do suporte, utilizada em sensores cujo campo gerado seja concentrado em apenas uma direção, de maneira que partes laterais do suporte não interfiram com o campo do sensor. No caso de sensores menos focais, sua ponta deve ficar afastada da estrutura de suportes para evitar influências no sinal captado, sendo adequada a montagem não-faceada (AQTECH POWER PROGNOSTICS, 2020). O método *quasi-flush* é similar ao *flush*, com a diferença de que ao redor do sensor há uma zona livre de metal, apesar de sua ponta estar no mesmo nível do suporte.

Figura 34 – Tipos de instalação de proximetros conforme a difusão de seus campos magnéticos. Da esquerda para a direita: faceada, não-faceada e quase-faceada.

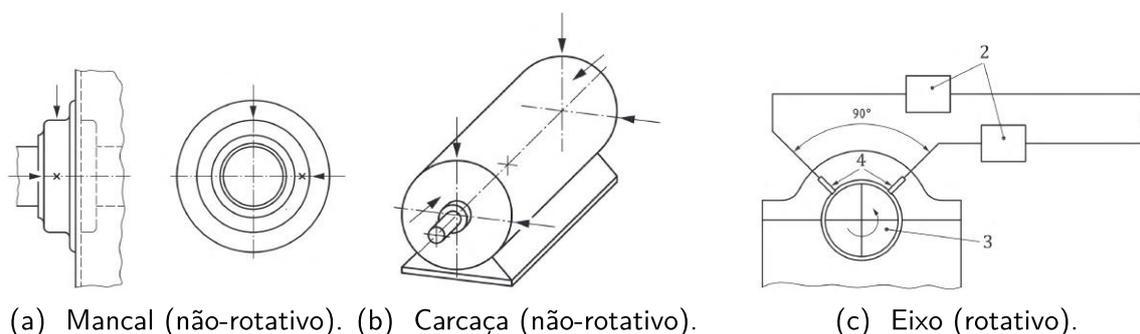


Fonte: AQTech Power Prognostics (2020).

A escolha de um método de instalação, assim como sua execução correta, é um fator importante na coleta de sinais de vibração (MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021), o que é reconhecido internacionalmente com a existência de normas que orientam a seu respeito, como a BS EN IEC 60947-5-2 (2020), trazendo referências de dimensões a serem respeitadas e relações entre distâncias laterais.

De maneira mais geral, a própria norma atualmente referência para o monitoramento de vibração também especifica o posicionamento dos sensores ao redor da máquina, conforme Figura 35. Para partes não-rotativas, o posicionamento deve ser feito em partes em que haja transmissão significativa das forças dinâmicas, como rolamentos, mancais ou, para máquinas menores, carcaça, com cada ponto de medição possuindo três sensores ortogonais entre si (ISO 20816-1, 2016). Já para a medição de vibração em partes rotativas, sugere-se posicionar os sensores radialmente e no mesmo plano transversal ao eixo da máquina, separados por 90° entre si (ISO 20816-1, 2016).

Figura 35 – Posicionamento de sensores de vibração na máquina.



Fonte: ISO 20816-1 (2016).

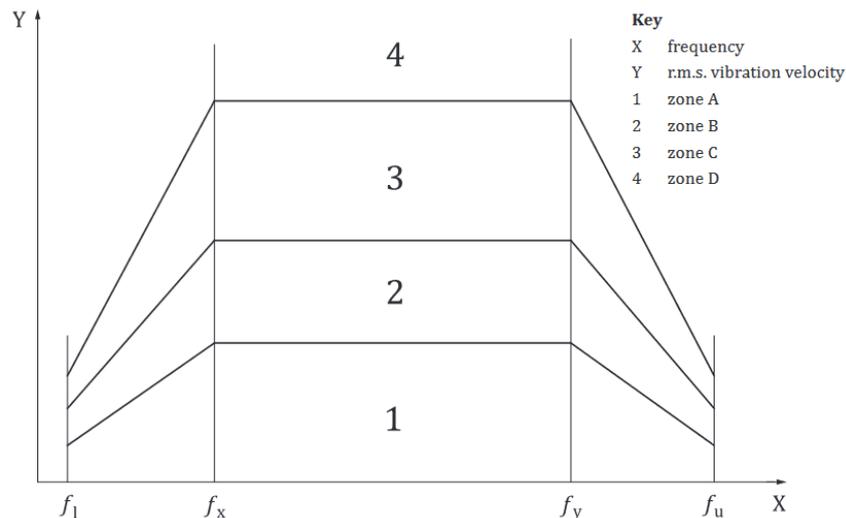
3.2.2 Análise de valores globais

Na indústria, a detecção de anomalias em máquinas elétricas é feita através de valores globais. Metodologias de diagnóstico que utilizam esse tipo de processamento têm origem ainda em 1964, quando surgiram as primeiras normas de referência sobre o assunto, como a VDI-2056 (1964) e, posteriormente, a ISO 2372 (1974). Nas metodologias iniciais, o principal indicativo de falha dependia dos valores absolutos de vibração da máquina, conforme grupos especificados e faixas de potência dos ativos. As normas evoluíram para a metodologia sugerida atualmente pela ISO 20816-1 (2016), que, além de fornecer referências mais genéricas para valores absolutos, também leva em consideração a adoção de níveis de vibração de referência dependentes de cada máquina individualmente, realizando diagnósticos a partir de alterações relativas sobre esses valores. Reforça-se que, mesmo as análises de vibração já sendo estabelecidas industrial e cientificamente, os diagnósticos práticos e as diretivas da própria norma ainda são baseadas, principalmente, na experiência de analistas da área, que por sua vez é dependente de históricos limitados de operação dos ativos.

Como mencionado na Seção 3.2.1, cada sinal de vibração, dependendo do sensor que o capta e outros fatores, tem sua resposta em frequência alterada. A (ISO 20816-1) leva em consideração a faixa de frequência do sinal de velocidade em regime permanente conforme a Figura 36. A figura distingue alguns intervalos de frequência no eixo X , com a característica passa-faixa esperada para esse tipo de sinal de vibração, e os limiares que separam algumas

zonas para a escala de amplitude Y do valor global RMS (*root mean square* - raiz da média dos quadrados) do sinal. Naturalmente, a faixa de frequência de maior resposta do sensor terá mais impacto no valor global. A norma indica que o sensor deve ser escolhido adequadamente neste aspecto.

Figura 36 – Critérios gerais para classificação da zona de diagnóstico para sinais de velocidade de vibração de acordo com a faixa de frequência dos sensores.



Fonte: Adaptado de ISO 20816-1 (2016).

Para a análise dos valores globais, a ISO 20816-1 (2016) define dois tipos de limiar, alarme e *trip*, que quando ultrapassados indicam, respectivamente, uma alteração significativa na máquina e uma alteração severa, possivelmente prejudicial e que requer a interrupção imediata da operação. Na prática, como sistemas de análise vibração são tipicamente instalados em usinas durante uma parada para manutenção, é recomendado defini-los a partir de uma referência após a manutenção, a qual idealmente representa a máquina sem nenhum defeito. Limiares previamente estabelecidos também podem ser ajustados após novas manutenções. Existem recomendações em partes específicas da norma para a definição dos limiares a partir da referência de acordo com a aplicação, como a ISO 20816-5 (2018). Caso não exista um histórico prévio, é possível basear avaliações iniciais nas sugestões de norma para os limiares absolutos a partir das características da máquina, conforme comentado anteriormente, até que existam dados suficientes para formar um histórico adequado. Uma vez definidos os limiares, tem-se quatro zonas de classificação:

- Zona A: condição normal ou excelente, típico para máquinas recém comissionadas;
- Zona B: aceitável, as máquinas nessa zona não apresentam restrições de operação;
- Zona C: insatisfatório, a operação deve ocorrer apenas por tempo limitado e a origem da anomalia deve ser investigada;

- Zona D: severo, a operação nessa zona pode causar danos à máquina e a interrupção da operação é recomendada.

3.2.3 Análise em frequência

A análise em frequência complementa e aprofunda o estudo sobre as anomalias detectadas pelos valores globais. Existem faltas com efeitos conhecidos em sinais de vibração de máquinas rotativas. A alteração do espectro harmônico dos sinais permite identificar a causa dessas anomalias.

Para executar a análise em frequência dos sinais de vibração, o processamento básico necessário é a transformada de Fourier, normalmente implementada computacionalmente através do algoritmo de *Fast Fourier Transform* - transformada rápida de Fourier (FFT). Em resumo, um sinal pode ser representado pela série de Fourier, dada pela soma de senoides e cossenoides de frequências específicas, cada uma acompanhada por um coeficiente multiplicativo. A aplicação da transformada sobre um sinal permite obter informações sobre as frequências que o compõem ao calcular os coeficientes da série de Fourier do sinal.

Literaturas tradicionais afirmam que é possível identificar uma variedade de falhas a partir de alterações no espectro em frequência dos sinais de vibração, como desbalanceamento, excentricidade, desalinhamento, folgas mecânicas, rolamentos danificados, eixo trincado, ressonância e, de maneira genérica, faltas elétricas. Mais de um tipo de falha pode ocorrer simultaneamente, gerando espectros que são uma composição das características apontadas por cada um (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Para melhor compreensão das análises que serão apresentadas no Capítulo 6, é importante definir um jargão da área: as componentes de frequência do sinal são referenciadas em termos da velocidade de rotação da máquina em rotações por minuto (rpm), doravante denominada 1xRPM (lê-se "uma vez rpm"). Nesse trabalho, estende-se o jargão para denominar as frequências múltiplas da frequência da rede elétrica como 1xELET, e a frequência de ranhura como 1xSLOT.

Como este trabalho busca investigar os problemas que podem ser testados na bancada do laboratório, assim como realizado na Seção 2.4, essa seção dará enfoque sobre a detecção tradicional de faltas de desbalanceamento, excentricidade e elétricas.

O desbalanceamento é detectado por uma alteração predominante da componente de 1xRPM, cuja amplitude varia quadraticamente com a velocidade, podendo-se confirmar a falta se for possível realizar testes variando a velocidade da máquina. Com sensores posicionados em diferentes partes da máquina, pode-se esperar que um desbalanceamento estático cause vibrações com fases concordantes em sensores de uma mesma direção (com tolerância de 20°) e com diferença de fase de 90° para sensores ortogonais (com tolerância de até 30°). Já o desbalanceamento dinâmico gera uma coincidência de fase nos sensores posicionados axialmente e uma fase instável em sensores radiais (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Para a excentricidade, a maior amplitude de vibração também ocorre em 1xRPM,

mas outros componentes acoplados na máquina, como ventiladores, pás de turbinas, polias, engrenagens, entre outros, podem causar excitações múltiplas da frequência de rotação. A diferenciação entre desbalanceamento e excentricidade pode ser feita comparando sensores em diferentes posições radiais, visto que, para a excentricidade, a defasagem valeria 0 ou 180° (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

O desalinhamento ocorre no acoplamento entre máquinas. Este tipo de falta não faz parte dos objetivos de estudo do presente trabalho. Na bancada de testes utilizada, o desalinhamento e a excentricidade só podem ser impostos simultaneamente, mas, devido ao acoplamento flexível entre as máquinas, os efeitos do desalinhamento são absorvidos, ressaltando a excentricidade. De qualquer forma, o efeito que deve ser observado em um desalinhamento angular é o aumento de 1xRPM e suas primeiras harmônicas, 2xRPM e 3xRPM, ou, em casos severos, ainda mais harmônicas são perceptíveis em análises visuais, usualmente até 8xRPM. Essa falta pode ser diferenciada de outras ao monitorar ambas as máquinas acopladas, cujas defasagens entre sensores equivalentes seria de 180°. No caso de um desalinhamento paralelo, ocorrem 2 golpes por ciclo, pois a cada rotação da máquina, a parte desalinhada atinge o distanciamento máximo do eixo de referência duas vezes. Nessa configuração, a vibração da máquina é mais intensa, i.e., o desalinhamento também pode ter 2xRPM como a principal frequência alterada (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Como normalmente o foco das análises de vibração é a detecção de faltas de origem mecânica, problemas elétricos são tratados com maior superficialidade pelas normas e literaturas. Alguns defeitos elétricos que a vibração pode detectar são: curtos-circuitos ou circuitos abertos no rotor e estator, fases desbalanceadas e entreferro desigual ao longo do diâmetro da máquina. Uma forma de detectar os problemas elétricos em máquinas girantes com vibração é buscar por frequências relacionadas à construção da máquina, por exemplo, detectando bobinas frouxas ao observar a frequência de passagem de um ponto do rotor por elas, a qual poderia ser acompanhada por bandas laterais. Outro caso típico para a detecção de faltas elétricas é o aumento da frequência correspondente a duas vezes a frequência de alimentação da máquina, visto que a assimetria no entreferro causada por uma falta de estator gera forças resultantes durante a passagem de cada polo magnético pela posição defeituosa, com isso gerando uma vibração que possui o dobro da frequência da força magnetomotriz do estator (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Pelo exposto, percebe-se que a identificação de faltas, principalmente de origem elétrica, através de técnicas tradicionais, é bastante limitada e dependente de especialistas da área. As avaliações são realizadas caso a caso, enquanto que as anomalias, quando combinadas, podem não ser totalmente claras quanto às suas origens. Nota-se que há grande semelhança nas harmônicas afetadas por diferentes faltas, sendo alguns casos distinguíveis apenas quando observada a fase dos sensores. A análise da fase dos sinais de vibração é prejudicada com o uso de acelerômetros, como será discutido no Capítulo 4. Esta metodologia de análise afeta a eficiência dos diagnósticos e dificulta a disseminação do monitoramento de vibração, visto o

maior investimento individual e corporativo necessários para uma implementação satisfatória do sistema.

3.2.4 Outras análises

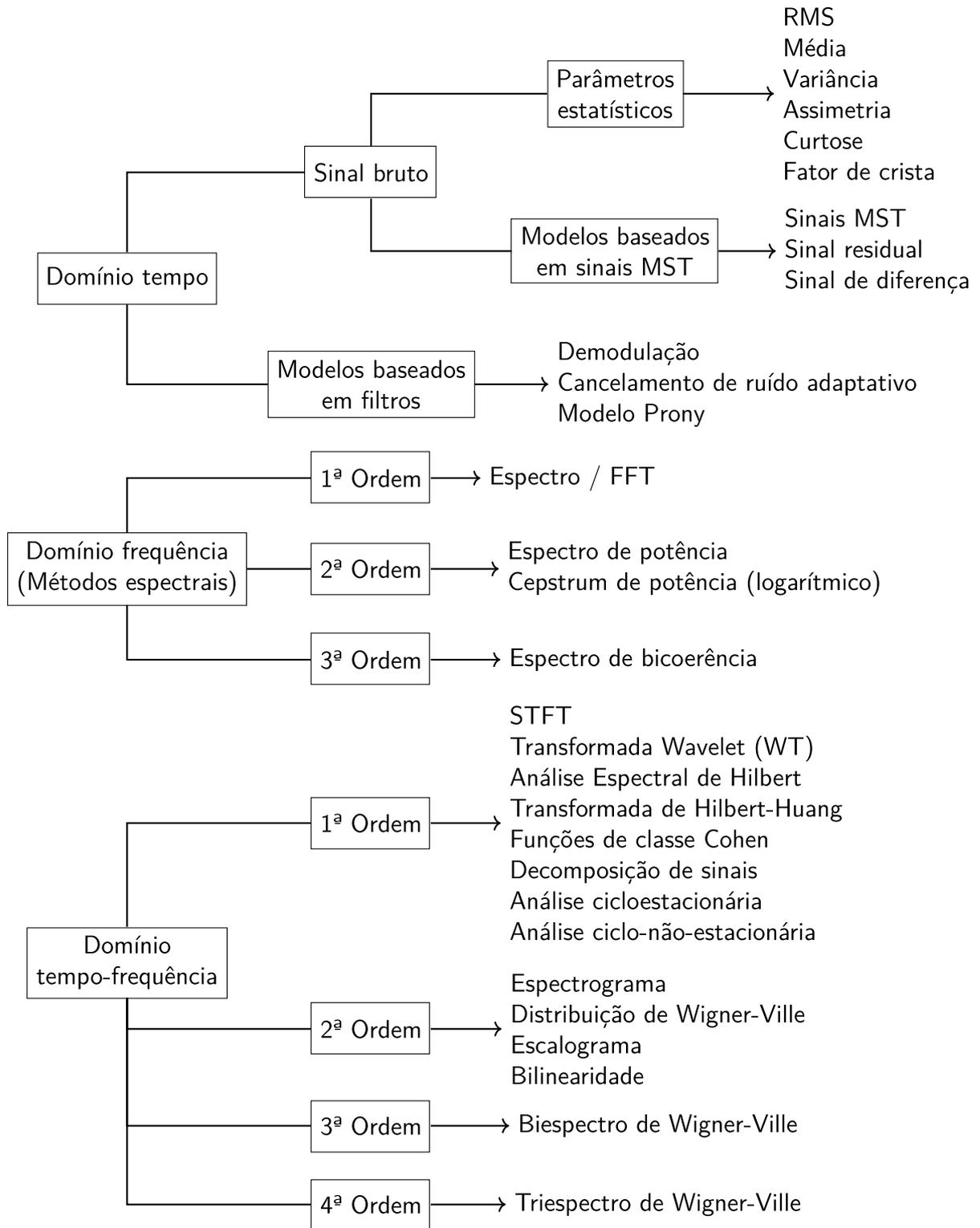
Uma técnica de processamento para análise bastante utilizada na indústria é a órbita. De maneira simplificada, ela permite traçar graficamente a posição do eixo da máquina, auxiliando fortemente a detecção de desalinhamentos e excentricidades, mas não se restringe a esses tipos de falta. A técnica consiste em gerar um gráfico do valor, usualmente de deslocamento, de um sensor com relação ao outro, idealmente posicionados ortogonais entre si. Dessa forma, dependendo da forma do orbital, que pode ser elipsoidal, deslocada do centro e outros, é possível detectar rapidamente a característica de vibração de interesse. A característica pode ser, inclusive, um alerta para estresse excessivo nas peças monitoradas, que poderia gerar um orbital em forma de oito. Nesse caso, a parte se move no sentido contrário ao próprio eixo e pode causar danos graves na máquina, principalmente em rolamentos e eixo, ou até na própria estrutura do mancal (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004). Alguns aspectos sobre análises de orbitais, nesse trabalho, são apresentados no Apêndice A.

3.3 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

Além das metodologias clássicas de análise de vibração apresentadas, trabalhos acadêmicos aumentam as opções disponíveis para estudo de sinais de vibração. A Figura 37 apresenta um diagrama com as principais métricas e métodos de processamento de sinais utilizados nesse âmbito. Divide-se a análise dos sinais em domínio do tempo, frequência e tempo-frequência. Com relação aos valores globais explorados no trabalho, serão utilizados parâmetros estatísticos do sinal bruto de vibração no domínio do tempo. Sobre o estudo de harmônicas, os resultados se enquadram, principalmente, no processamento de 1ª ordem no domínio da frequência, embora também poderia ser considerado de 1ª ordem no domínio de tempo-frequência, dependendo da forma de observação dos dados. Visto a definição específica de cada processamento ser de conhecimento geral da área de matemática, essa seção partirá do pressuposto de que a definição de cada uma pode ser encontrada pelo leitor em literaturas mais adequadas.

Esta seção se concentrará nas métricas e processamentos utilizados no trabalho, abordando casos alternativos quando relevante. Um levantamento bibliográfico sobre novas metodologias de processamento e análises utilizadas na academia sobre os três domínios do sinal pode ser encontrado no Apêndice B. Embora os desenvolvimentos estudados não tenham sido usados diretamente no trabalho, em questão de aplicar técnicas já desenvolvidas, eles contribuíram para gerar a ideia deste trabalho. Em resumo, alguns desses conteúdos são comentados no apêndice para demonstrar como diversas técnicas de processamento e análise podem ser utilizadas e combinadas.

Figura 37 – Métricas e métodos de processamento de sinais.



Fonte: Adaptado de Tiboni *et al.* (2022).

3.3.1 Métricas estatísticas e análise de valores globais

Conforme mencionado na Seção 3.2.2, as normas da área exploram valores globais como RMS, pico, pico a pico, média, desvio padrão, entre outros. Pesquisas na área, por outro lado, exploram ainda mais alternativas, como curtose, assimetria, fator de crista, fator de forma, fator de impulso, operador de energia, entre outras (TIBONI *et al.*, 2022; MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021; WANG, T. *et al.*, 2019). Também existem métricas desenvolvidas para aplicações específicas, como mostrado em Tianyang Wang *et al.* (2019), para caixas de engrenagem planetárias de turbinas eólicas.

Dentre as métricas citadas, o Quadro 1 apresenta as métricas utilizadas nesse trabalho, destacando seus cálculos e principais características. Utilizou-se o valor RMS como referência para as outras métricas testadas e para explorar a sua própria capacidade na detecção das faltas testados no trabalho. Essa métrica se relaciona com a potência do sinal sobre o qual ela é calculada, sofrendo maior impacto de valores elevados de amplitude, porém sendo insensível a picos isolados. A métrica curtose é definida como a cumulante de quarta ordem da transformada de Fourier. Ela também pode ser interpretada como uma estatística adimensional do número de *outliers* em uma distribuição, o que pode corresponder ao número de picos transientes em um sinal de vibração. Ela é conhecida por apresentar alta performance na detecção de impulsos periódicos, como choques, independente da amplitude do sinal, baseando-se na densidade do sinal medido. Já o valor de assimetria, como o nome diz, quantifica a assimetria do sinal sobre o qual o cálculo é aplicado, apresentando melhor resposta a sinais assimétricos em relação a uma média (MOHD GHAZALI; RAHIMAN, 2021; NOWAKOWSKI; KOMORSKI, 2022).

Quadro 1 – Principais métricas globais utilizadas no trabalho.

Métrica	Cálculo	Característica
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} a_i^2}$	Proporcional à potência do processo. Insensível a picos isolados.
Curtose	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (a_i - \bar{a})^4}{(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (a_i - \bar{a})^2)^2}$	Baseado na densidade do sinal. Sensível a impulsos. Independente de variação de velocidade e amplitude.
Assimetria	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (a_i - \bar{a})^3}{\sigma^3}$	Medida de assimetria.

Fonte: Adaptado de Tiboni *et al.* (2022), Mohd Ghazali e Rahiman (2021), Tianyang Wang *et al.* (2019) e Nowakowski e Komorski (2022).

As demais métricas exploradas na academia são variações dos tipos mais básicos já mencionados. O fator de crista é definido como o maior pico positivo do sinal dividido por seu valor RMS. O operador de energia consiste em calcular a curtose normalizada sobre um sinal que corresponde à sua energia. O fator de forma é a relação entre o RMS e a média de valores absolutos do sinal. O fator de impulso é também o valor máximo do sinal, dessa vez dividido

pela média de valores absolutos (SAMUEL; PINES, 2005; WANG, T. *et al.*, 2019).

Considerou-se também a possibilidade de utilizar o fator de crista para esse trabalho, porém seu desempenho tende a ser melhor em dois tipos de sinal: com frequência variável ou com impulsos abruptos. O primeiro caso não ocorre em grande intensidade para geradores conectados à rede elétrica, enfoque do trabalho. Além disso, não há indícios de que as faltas exploradas nesse trabalho causem efeitos impulsivos nos sinais de vibração, então essa métrica teria pouca eficiência. Por outro lado, sinais de aceleração de vibração apresentam picos de alta frequência, então a métrica poderia contribuir com a detecção de alterações nesse tipo de sinal, mas, como será discutido no Capítulo 5, este trabalho focou nos sinais de velocidade. Ainda, o Capítulo 6 contém uma discussão sobre a energia do sinal representada pelas harmônicas selecionadas. Investigações preliminares indicaram que faltas de desbalanceamento geram níveis maiores de variação da rotação do gerador ao longo de uma aquisição e do ensaio, o que dá subsídios para vantagens dessa métrica nesse contexto. De qualquer forma, essa característica foi observada apenas após o processamentos dos dados e análise dos resultados.

3.3.2 Processamentos para análise em frequência

A Seção 3.2.3 abordou a representação de um sinal em função de senoides e cossenoides acompanhadas de coeficientes multiplicativos com a aplicação da transformada de Fourier. Para sinais amostrados, o uso dessa transformada envolve um compromisso largura de banda e resolução, devendo-se controlar a taxa de amostragem e o tempo de aquisição de acordo com a necessidade da aplicação. Uma escolha inadequada da taxa de amostragem pode resultar no fenômeno conhecido como vazamento espectral, em que os picos correspondentes às frequências de interesse são menos expressivos e há um espalhamento no domínio da frequência, dificultando a identificação correta das frequências que o compõem (LATHI, 1998). O tempo limitado de aquisição caracteriza os sinais adquiridos como limitados no tempo. Com a aplicação da FFT, distorções nos extremos entre cada período de aquisição afetam a resposta em frequência obtida. Para mitigar esse efeito, é possível utilizar funções de janelamento que atenuam o sinal nas extremidades do período de aquisição para tornar os degraus entre um período e outro menos evidentes (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011), da mesma forma como é feito no Apêndice C para filtros digitais.

3.3.3 Utilização de sinais no domínio tempo-frequência

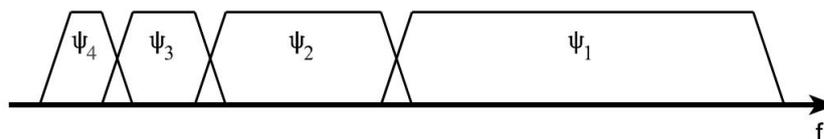
Para sanar a limitação das técnicas de análise em frequência sobre condições não-estacionárias, que comumente se encontram em condições de falta, é possível descrever os sinais nos domínios de tempo e frequência simultaneamente (TIBONI *et al.*, 2022). Uma forma básica de representação do sinal nesse domínio é a STFT (*Short Time Fourier Transform* - Transformada de Fourier Janelada): calcula-se a FFT sobre o sinal em partes de durações menores, obtendo-se uma sequência de espectros em frequência com menos resolução, porém com sensibilidade superior a variações no sinal (MANHERTZ; BERECZKY, 2021). Essa foi a

principal abordagem utilizada neste trabalho, chamada de histórico de FFT, pois os tempos de aquisição utilizados foram suficientemente longos para manter um bom nível de detalhamento do sinal no domínio da frequência.

Técnicas mais modernas de processamento para análises em tempo-frequência consideram o uso de transformadas de *wavelet* (WTs). Essas transformadas, já utilizadas largamente na academia, são capazes de obter o conteúdo de frequência do sinal a ser analisado sem perda vital das informações no domínio da frequência. Isso é conseguido ao convoluir um sinal com funções base complexas não-estacionárias, denominadas *wavelets*. Essas funções possuem característica passa-faixa e são formadas a partir da chamada *wavelet* mãe. Aplicando a transformada, o sinal é representado como uma combinação de *wavelets*. Essa representação do sinal é obtida sem violar o princípio da incerteza de Heisenberg, sobre conhecer simultaneamente a frequência e seu instante de tempo correspondente, pois as *wavelets* oferecem um compromisso de perda de densidade de energia tanto no tempo quanto na frequência, para que essas propriedades do sinal possam ser avaliadas simultaneamente. Mais precisamente, no contexto de *wavelets*, fala-se em escala em vez de frequência, que seria seu oposto, pois o termo frequência se restringe à transformada de Fourier. Ressalta-se que, ao contrário da conhecida transformada de Fourier, as WTs não especificam funções base, apenas uma estrutura, sobre a qual qualquer *wavelet* pode ser utilizada (SAMUEL; PINES, 2005; VALENS, 1999).

As WTs também determinam coeficientes, porém como funções do tempo e escala. Para cada dilatação, tem-se os coeficientes de translação, correspondendo a um novo sinal no tempo limitado pelas frequências presentes na *wavelet*. Para viabilização computacional do cálculo dessas transformadas com perda mínima de precisão, aplica-se a transformada discreta escolhendo-se potências de dois para os passos de tempo e escala (SAMUEL; PINES, 2005). Como a compressão no tempo é equivalente ao alargamento na frequência, essa abordagem possibilita a cobertura de todo o espectro finito de um sinal com *wavelets* dilatadas e todo o sinal no domínio do tempo com *wavelets* transladadas (VALENS, 1999), conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Representação de espectros de *wavelets* se tocando a partir da translação da *wavelet* mãe no domínio do tempo por um fator de 2.



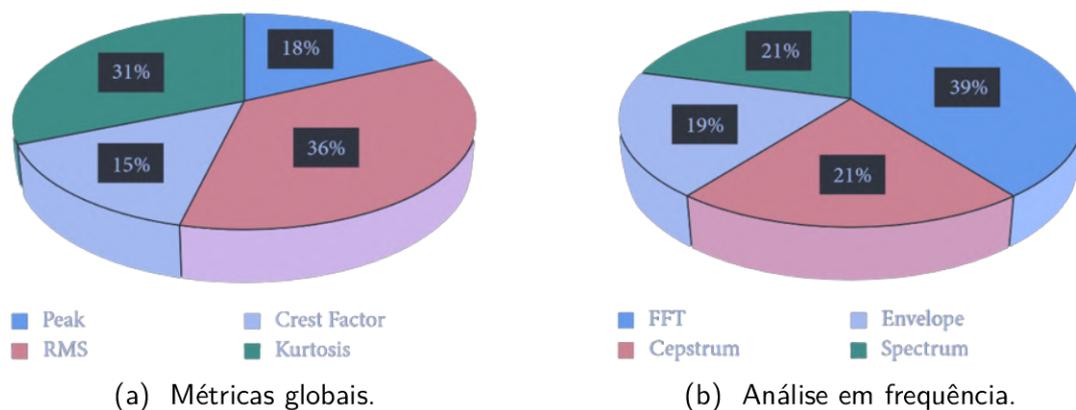
Fonte: Valens (1999).

3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Esse capítulo introduziu o tema de monitoramento de condição, apresentando o contexto de manutenção em que ele pode ser inserido e apontando a predominância das técnicas de análise de vibração para realizá-lo. Abordou-se também a teoria de vibração, para possibilitar uma compreensão mais aprofundada dos sinais explorados nesse trabalho, bem como da origem deles em máquinas elétricas rotativas. Abordou-se aspectos do monitoramento de vibração, desde a captação dos sinais até suas análises no contexto empresarial. Demonstrou-se a complexidade envolvida para análises de sinais de vibração de máquinas elétricas girantes, tanto pelos fatores devidos ao funcionamento e construção desses equipamentos, quanto pela influência de diversos aspectos da medição e da análise dos sinais.

Por fim, para viabilizar análises complementares àquelas sugeridas em norma, apresentou-se alguns aspectos sobre técnicas de processamento aplicadas a sinais de vibração, separadas entre domínio de tempo, frequência e tempo-frequência, a partir de pesquisas acadêmicas na área. Para fim de referência, a Figura 39 apresenta como as técnicas de processamento utilizadas nesse trabalho se posicionam em relação a pesquisas na área. Vê-se que o uso de RMS e da curtose totalizam 67% das análises de valor global, embora a assimetria não tenha sido considerada nesse levantamento. Com relação aos processamentos para o domínio de frequência, análises diretas de FFT contabilizam 39% dos casos.

Figura 39 – Porcentagem de métodos usados para análise de vibração.



Fonte: Mohd Ghazali e Rahiman (2021).

4 ENSAIOS NA BANCADA EXPERIMENTAL E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO

A bancada experimental disponível no laboratório permite a imposição controlada de faltas incipientes em 2 geradores síncronos de 10 kVA, em 380 V/60 Hz, um de 2 polos lisos e outro de 8 polos salientes, o qual foi utilizado nesse trabalho. Ambos possuem um motor CC de 10 kW como máquina primária. A Figura 40 mostra o arranjo dos equipamentos e a localização dos acelerômetros instalados no gerador de 8 polos, bem como a nomenclatura empregada para designar cada sensor.

Figura 40 – Arranjo entre geradores e máquina primária da bancada experimental com representação dos acelerômetros instalados no gerador de 8 polos.



Fonte: Adaptado de Equacional Elétrica e Mecânica (2013).

No painel de acionamento da bancada, controla-se manualmente a rotação da máquina primária e a excitação do enrolamento do rotor do gerador para regular, respectivamente, a frequência e amplitude da tensão gerada. Há um sistema de proteção para evitar que as máquinas da bancada operem fora de condições seguras. Mantendo a tensão gerada próxima dos níveis da rede elétrica, a sincronização é realizada por meio de um equipamento *Grameyer GSIC-2*. Pode-se utilizar um banco de transformadores em ΔY para a filtragem de componentes harmônicas de 3ª ordem da rede. Com o gerador sincronizado, controla-se a potência ativa fornecida pela máquina primária e a potência reativa do gerador. O painel do banco de transformadores possui um multimedidor *IMS Power Quality Powernet M-200* para o monitoramento do ponto de operação (PO) do gerador. A comunicação com um computador para registro dos dados do multimedidor se deu através do sistema de vibração comercial instalado na bancada, sobre o qual será comentado adiante. Os ensaios efetuados durante o desenvolvimento do trabalho consideraram a operação do gerador sincronizado à rede elétrica com o uso do banco de transformadores. Os painéis de controle e do banco de transformadores são apresentados na Figura 41.

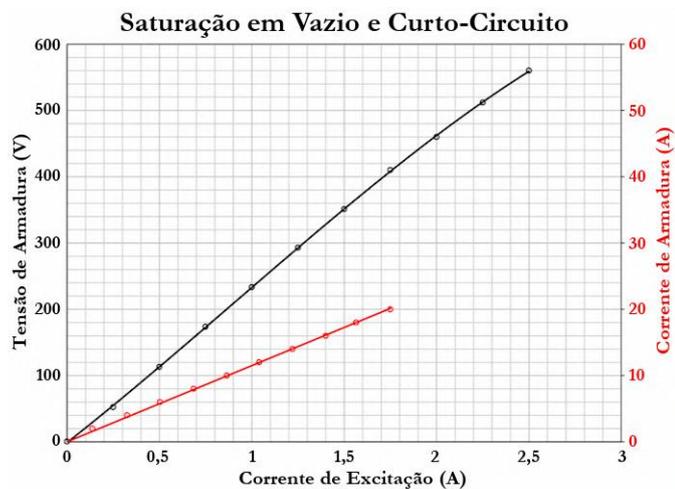
Como comentado na Seção 2.2, a saturação do gerador poderiam influenciar o sinais gerados por ele, inclusive de vibração. A Figura 42 mostra curva semelhante à da Figura 8 para o gerador de 8 polos da bancada experimental. Pela curva em vazio, observa-se que há pouca saturação do gerador, portanto esse efeito é desprezível para as análises.

Figura 41 – Destaque para os painéis de controle e do banco de transformadores da bancada experimental.



Fonte: Próprio autor.

Figura 42 – Característica de curto-circuito e a vazio do gerador síncrono de 8 polos da bancada.



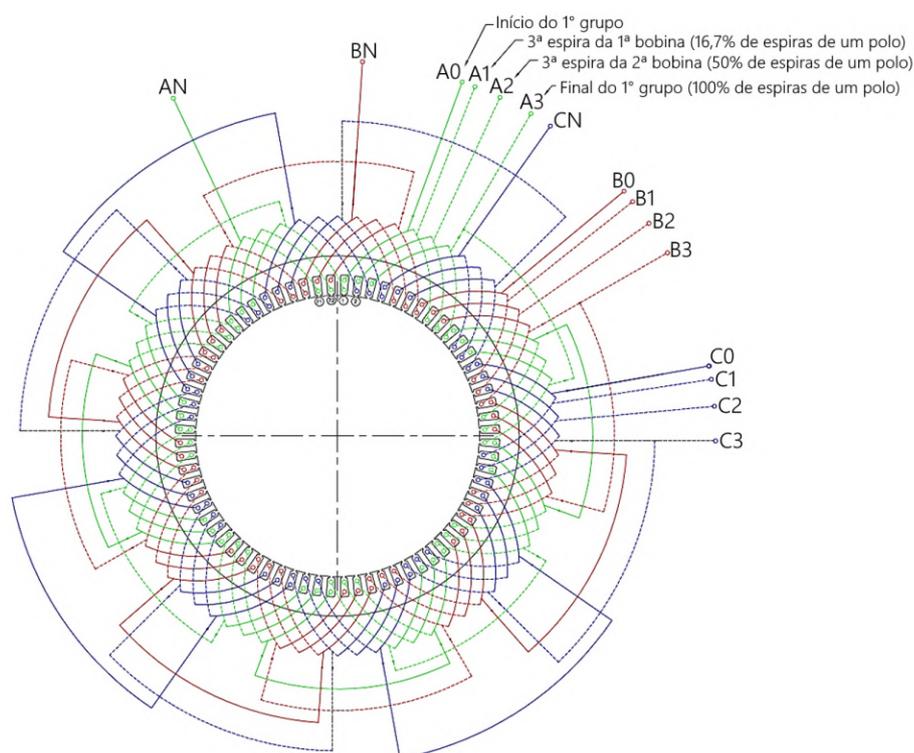
Fonte: Adaptado de Equacional Elétrica e Mecânica (2013).

4.1 APLICAÇÃO DE FALTAS NA BANCADA

Os enrolamentos dos geradores possuem *taps* que possibilitam curto-circuitar algumas partes para propiciar faltas elétricas, tanto no estator quanto no rotor. A Figura 43 mostra o esquema de bobinagem do estator do gerador de 8 polos com a disponibilização dos *taps* para retirada de espiras. Há 24 grupos de bobina no estator, sendo 8 por fase e 3 por grupo, cada uma com 6 espiras, sendo possível remover 3, 9, 18 ou 144 espiras. A Figura 44 apresenta o esquema para simulação de falta no rotor. Cada polo possui 470 espiras, sendo possível

remover 94 espiras (20%), 235 espiras (50%) ou todas as espiras de um polo. Ressalta-se que essas faltas impostas, mais precisamente, são de retirada de espiras. Essa é uma forma menos agressiva de simular um curto-circuito entre espiras, evitando estresses e gradientes térmicos danosos nas espiras que seriam curto-circuitadas, enquanto eletromagneticamente o efeito é similar. Além disso, a imposição das faltas dessa forma é um procedimento mais ágil, visto a disponibilidade direta de *taps*.

Figura 43 – Esquema de bobinagem do estator do gerador de 8 polos da bancada experimental com disponibilização dos *taps* para retirada de espiras.

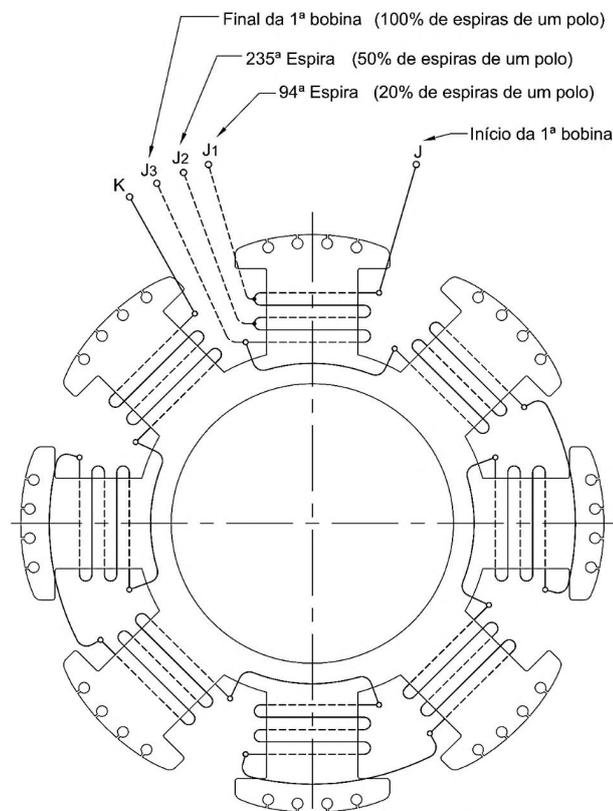


Fonte: Adaptado de Equacional Elétrica e Mecânica (2013).

Outra falta de natureza eletromagnética que pode ser imposta na bancada é o curto-circuito entre chapas do núcleo do estator. Essa falta não será referida como falta elétrica neste trabalho, sendo esse termo usado especificamente para faltas nos enrolamentos. A Figura 45 apresenta o esquema para a simulação da falta de núcleo. A chapa da extremidade de um canal de ventilação do pacote do estator é curto-circuitada entre três pontos, localizados no fundo de três ranhuras distintas, e a coroa do estator. Os cabos de saída passam por 30 mm do último pacote do núcleo, havendo um *tap* para fechar ou abrir o circuito.

As faltas supracitadas podem ser impostas de maneira *online* na bancada, i.e., sem a necessidade de retirar o gerador de operação, através de um dispositivo que seleciona os *taps* internamente à caixa de ligação do gerador com o uso de relés, sem a necessidade de intervenção manual (HESSMANN, 2018). Esse dispositivo pode ser visto ao lado do gerador na Figura 46.

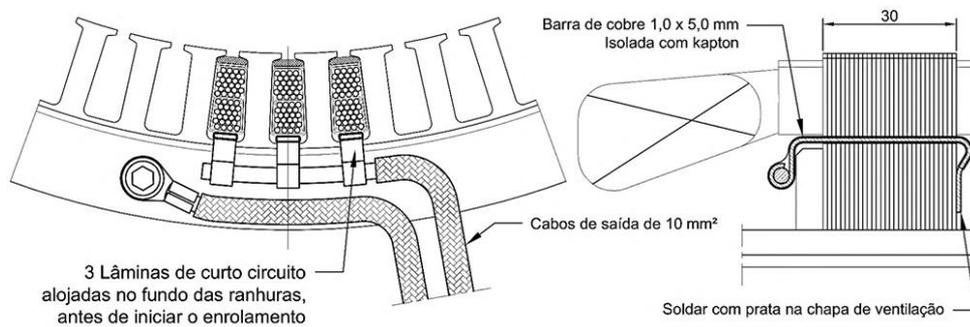
Figura 44 – Esquema de bobinagem do rotor do gerador de 8 polos da bancada experimental com disponibilização dos *taps* para retirada de espiras.



Fonte: Adaptado de Equacional Elétrica e Mecânica (2013).

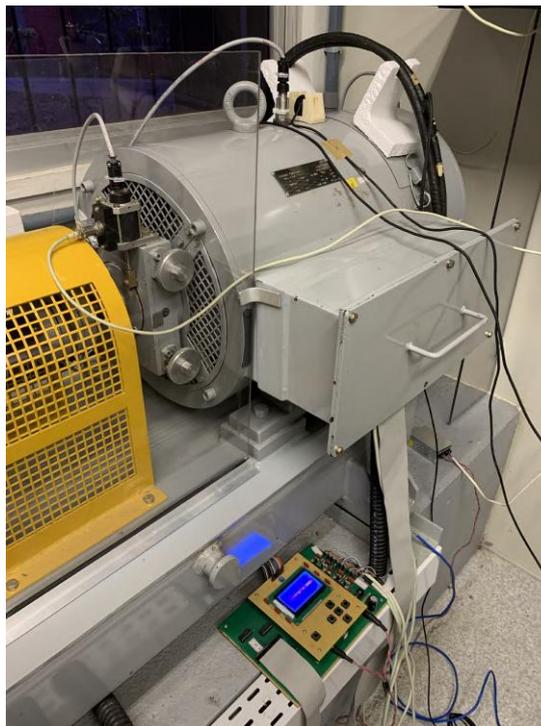
A bancada também permite a imposição de duas faltas mecânicas. Para inserir uma excentricidade do rotor, é possível deslocar o eixo da máquina movimentando verticalmente cada um dos mancais, ajustáveis com um esquema de roscas para pressionar a estrutura que comporta os rolamentos em suas partes superior e inferior. Um deslocamento de até 2 mm é possível para cada mancal em ambos os sentidos, controlando-se o nível de ajuste com transdutores próprios. Observa-se que os efeitos do desalinhamento entre o gerador e a máquina primária devem ser atenuados pelo acoplamento flexível entre as estruturas. Por isso, essa falta será tratada no trabalho, principalmente, como excentricidade, mas o termo mais adequado permanece a própria ação que é realizada nos ensaios, de deslocamento do eixo. Nos dois lados da máquina, também há uma estrutura de disco acoplada ao eixo que permite a fixação de massas, em uma mesma circunferência, para simulação de desbalanceamento. No total são 16 posições em cada estrutura e cada massa tem, aproximadamente, 31 gramas, sendo fixados por parafusos de, aproximadamente, 5,9 gramas. As peças utilizadas nos ensaios foram fixadas sempre nas mesmas posições, e em pares com os mesmos parafusos, com as devidas identificações. O conjunto 1 foi composto por uma peça de 31,23 g com um parafuso de 5,90 g, totalizando 37,12 g, e o conjunto 2 foi formado por uma peça de 30,73 g e um

Figura 45 – Esquema para simulação de curto-circuito entre chapas do núcleo do estator do gerador de 8 polos da bancada experimental.



Fonte: Adaptado de Equacional Elétrica e Mecânica (2013).

Figura 46 – Destaque para o gerador de 8 polos e o sistema de imposição automática de faltas elétricas e de núcleo logo abaixo.



Fonte: Próprio autor.

parafuso de 5,86 g, totalizando 30,73 g. A Figura 47 mostra as estruturas mencionadas.

4.2 MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO NA BANCADA

O sistema de monitoramento de vibração utilizado é composto por 8 acelerômetros *IMI Sensors* 622B01, de nível industrial e padrão ICP[®]. Esses acelerômetros devem ser alimentados

Figura 47 – Destaque para o mancal do lado não acoplado do gerador mostrando as estruturas para deslocamento de eixo com o transdutor e o disco para fixação de peças para simulação de desbalanceamento.



(a) Em etapa de fabricação, enfoque na estrutura completa.



(b) Enfoque na estrutura para simulação de desbalanceamento. Exemplo com uma única peça fixada.

Fonte: Adaptado de Equacional Elétrica e Mecânica (2013).

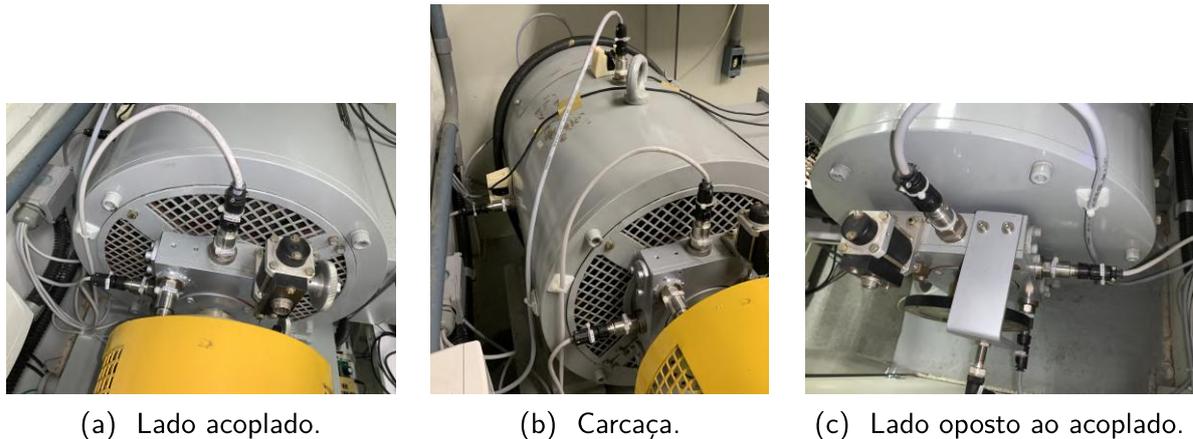
por uma fonte de corrente constante, tipicamente uma fonte de tensão CC entre 18 V e 30 V, com regulação de corrente entre 2 mA e 20 mA. Esse tipo de sensor dispensa a necessidade de cabos especiais de baixo ruído e amplificadores externos para frequências de até 1000 Hz, devido à sua característica de alta tensão de saída e baixa impedância (PCB PIEZOTRONICS, 2021). O sinal de saída é carregado sobreposto com uma tensão CC de referência, de forma que o sinal dinâmico varia entre a tensão de alimentação do sensor e o terra. Visto isso, é necessário remover o nível CC da tensão de saída para a leitura do sinal correspondente de vibração.

Os acelerômetros utilizados também estão representados na Figura 40: são três sensores ortogonais, nas direções chamadas de X, Y e Z, em cada mancal, um no lado acoplado (LA) e outro no lado oposto (LO), além de mais dois instalados na carcaça (C), também em posições ortogonais X e Y. Os sensores foram instalados na bancada pela *AQTech Power Prognostics*, considerando montagem em pino (vide Figura 32), juntamente com seu sistema comercial *VibraOne Hydro*. A Figura 48 mostra os sensores instalados no gerador de 8 polos da bancada.

4.2.1 Aquisição dos sinais de vibração

Para a aplicação dos ensaios e execução desse trabalho, devido à maior necessidade de flexibilidade e controle sobre as variáveis de aquisição, com otimização dos recursos computaci-

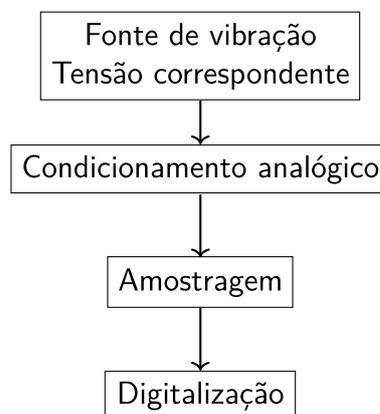
Figura 48 – Disposição dos acelerômetros no gerador de 8 polos.



Fonte: Próprio autor.

onais para cada caso, considerou-se uma aquisição paralela dos dados à do sistema comercial. Dessa forma, aproveitou-se a instalação robusta dos acelerômetros e sua estrutura de alimentação, assim como o recurso de registro do ponto de operação do gerador, em combinação com recursos disponíveis do laboratório para aquisição detalhada dos dados dos acelerômetros. A Figura 49 ilustra as etapas necessárias para a aquisição de sinais.

Figura 49 – Etapas para aquisição dos sinais de vibração.

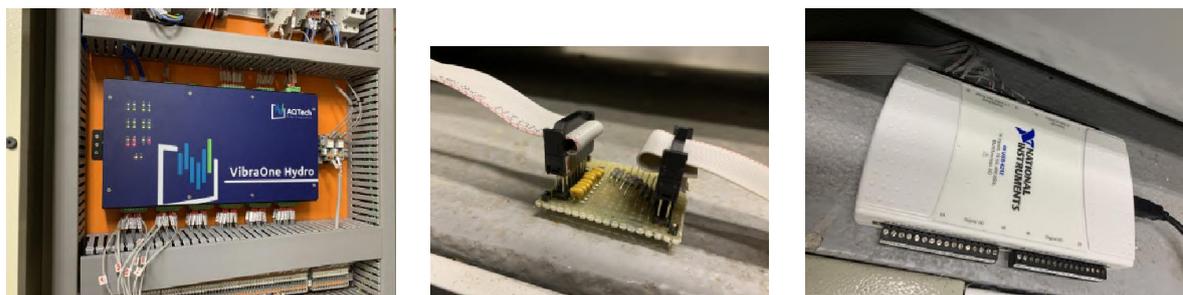


Fonte: Próprio autor.

A aquisição dos dados de vibração foi realizada com uma placa de aquisição *National Instruments* USB-6212 acoplada a um filtro analógico para remoção do nível CC inerente dos sensores e um programa desenvolvido em *Python* para controlá-la com a biblioteca *nidaqmx* e salvar os dados. As conexões do sistema alternativo de aquisição são mostradas, ilustrativamente, na Figura 50. Maiores detalhes sobre a aquisição dos sinais podem ser vistos no Apêndice C.

A placa de aquisição utilizada possui resolução de 16 bits e taxa de aquisição agregada de 400 kS/s (INSTRUMENTS, 2023). Então, adquirindo o sinal com 8 entradas simultaneamente,

Figura 50 – Sistema alternativo para aquisição dos sinais de vibração.



- (a) Sinal de saída dos acelerômetros obtido a partir do sistema comercial de vibração.
- (b) Filtro analógico passa-alta para remoção de nível CC inerente da alimentação dos sensores.
- (c) Placa de aquisição com conexões de entrada analógica (ilustrativo, foto de estágio inicial dos testes).

Fonte: Próprio autor.

o limite para esse trabalho é de 50 kS/s. Com um conversor de 16 bits e alimentação positiva de 12 V, a configuração utilizada tem resolução de 0,18 mV, como é detalhado no Apêndice C, conforme (C.3). Como a sensibilidade dos acelerômetros utilizados é de 100 mV/g, não seria possível, na configuração do sistema da bancada, ler sinais de aceleração menores do que 0,0018 g.

Escolheu-se a taxa de aquisição de 25 kS/s para garantir bom detalhamento do sinal no tempo sem utilizar o recurso máximo da placa de aquisição, evitando a perda de amostras. Além disso, será mostrado adiante que a maior frequência de interesse do sinal observada nesse trabalho é em torno de 1 kHz. Então, pela frequência de Nyquist, aproximadamente 2 kS/s já seriam o suficiente para retirar as informações dessa faixa de frequência. Entretanto, por boa prática, considera-se alguns múltiplos desse valor. Usar uma taxa de aquisição menor também limitaria análises adicionais sobre frequência mais elevadas, caso desejado. Por fim, considerou-se um tempo de aquisição de 11 segundos. Esse tempo é efetivamente reduzido com a aplicação de filtros digitais, como será comentado adiante, para a transformação do sinal de aceleração medido no sinal de velocidade a ser utilizado nas análises, resultando em menor resolução espectral.

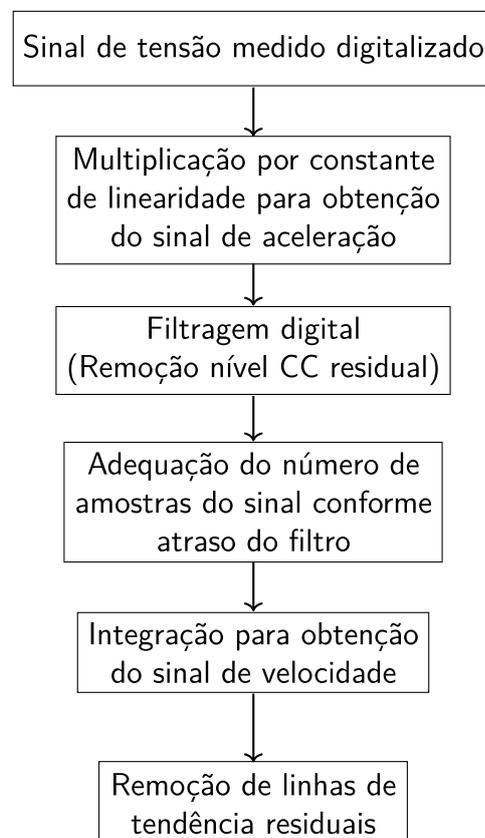
4.2.2 Pré-processamento dos sinais adquiridos

Como mencionado na Seção 3.2.1.1, é de maior interesse o uso de sinais de velocidade de vibração para análises e diagnóstico, sendo mais vantajoso prática e economicamente a obtenção desses sinais através do uso de acelerômetros, e posteriormente tratando os sinais medidos adequadamente.

O sinal de aceleração de vibração é obtido aplicando-se a constante de linearidade do acelerômetro sobre seu sinal de tensão de saída. Em seguida, pode-se integrá-lo para obter o sinal de velocidade de vibração. Porém, na prática, existem alguns obstáculos: a não idealidade do filtro analógico, as interferências do próprio sistema de aquisição e o processo de digitalização

podem inserir níveis CC residuais, o que resulta em distorções em forma de rampa sobre o sinal integrado. Para mitigar esse problema, a Figura 51 ilustra as etapas de pré-processamento adotadas para a obtenção do sinal de velocidade de vibração nesse trabalho, desde a obtenção do sinal de tensão correspondente à aceleração, passando pela filtragem digital de remoção do nível CC residual, adequando o número de amostras do sinal devido ao atraso do filtro, para, então, aplicar a integração e remover linhas de tendência residuais desse processo. Devido à perda de amostras com o atraso do filtro, o período de aquisição foi ajustado para os sinais de velocidade e de aceleração de vibração. Maior aprofundamento teórico e sobre as aplicações específicas no presente trabalho são disponibilizadas no Apêndice C.

Figura 51 – Etapas de pré-processamento dos sinais adquiridos.



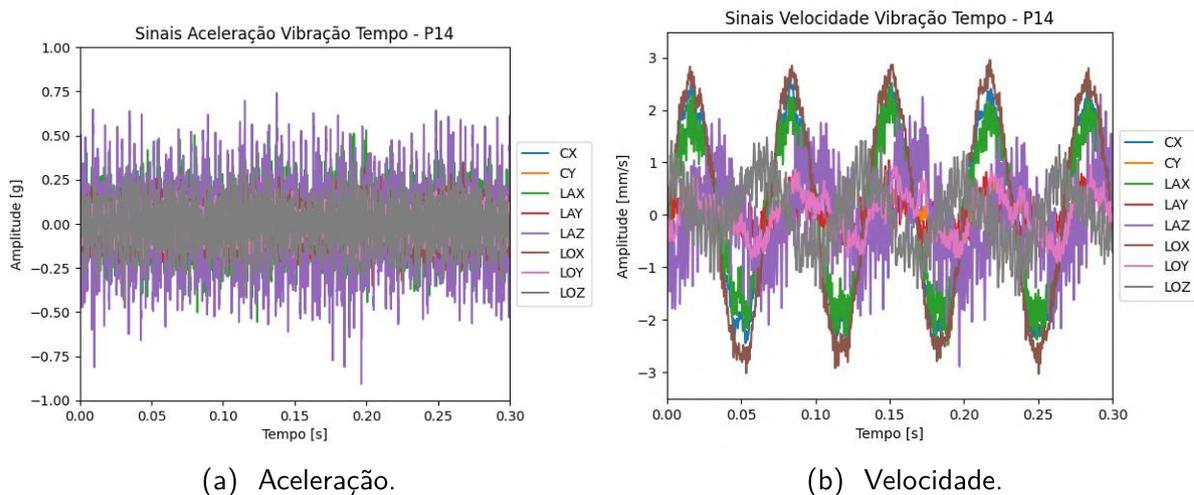
Fonte: Próprio autor.

Ressalta-se que os filtros utilizados alteram as fases das harmônicas dos sinais. Assim, os procedimentos são adequados apenas para análises de amplitude, como é o caso desse trabalho. Análises no tempo ou dependentes de precisão sobre a fase dos sinais não podem ser aplicadas sem a prévia compensação desses efeitos. Um exemplo do impacto desses processamentos é apresentado para orbitais, no Apêndice A.

4.2.3 Sinais pré-processados resultantes

Após os processamentos analógicos e digitais descritos nas seções anteriores, então, tem-se os sinais de velocidade de vibração. A Figura 52 mostra os sinais de aceleração de vibração medidos, após os pré-processamentos, ao lado do sinal de velocidade de vibração final obtido.

Figura 52 – Sinais de vibração mecânica.



Fonte: Próprio autor.

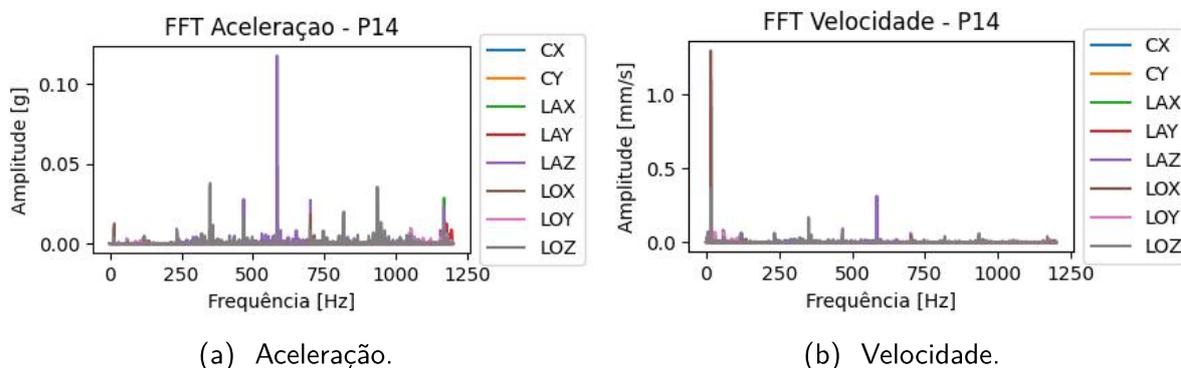
Aplicando o cálculo da FFT, com janelamento Hanning, sobre todo o período final de aquisição dos sinais temporais de vibração pré-processados, como os da Figura 52, as composições harmônicas são visualizadas na Figura 53, com resolução de 0,11 Hz. Embora o espectro harmônico possa ser visualizado até a frequência máxima de 12,5 kHz (frequência de Nyquist do sistema de aquisição empregado), mostra-se o sinal no domínio da frequência com ampliação de escala, apenas até a proximidade da máxima frequência monitorada, a frequência de ranhura de 1080 Hz, como será mostrado na Seção 6.1. Essa figura expõe a amplificação de frequências de ordem elevada no sinal de aceleração, dada a relação de derivada sobre o sinal de velocidade.

Outra possibilidade para visualizar os sinais no domínio da frequência é em forma de valores logarítmicos, conforme a Figura 54. Essa disposição reduz a diferença de escala de amplitude entre harmônicas, permitindo a visualização em um maior nível de detalhe do espectro, facilitando comparações visuais.

4.3 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

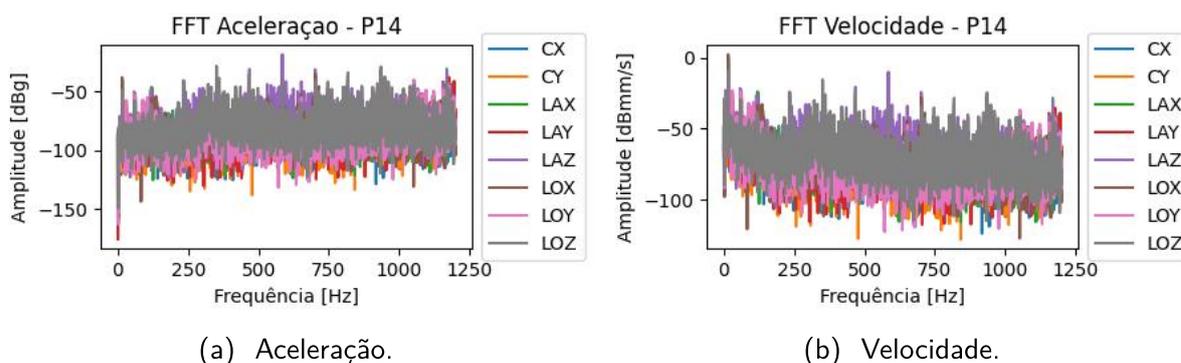
Considerando as faltas apresentadas na Seção 4.1, o Quadro 2 mostra os ensaios realizados na bancada experimental do laboratório. Como é necessário interromper a operação do gerador para a remoção e imposição de faltas mecânicas, nesses casos cada condição de falta foi considerada como um único ensaio, assim como as condições sadias no início e final de

Figura 53 – Visualização do espectro harmônico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração.



Fonte: Próprio autor.

Figura 54 – Visualização do espectro harmônico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração, com amplitude logarítmicas.



Fonte: Próprio autor.

tipo de falta mecânica imposta. Portanto, o Quadro 3 especifica melhor cada ensaio realizado e a sequência das condições de ensaio para cada tipo de falta testada. Destaca-se a realização de ensaios com a máquina em condição sadia no início e ao final dos ensaios de cada tipo de falta, para fim de referência sobre o regime de operação do gerador. Para reduzir a influência do regime de operação da máquina sobre os ensaios de um mesmo grupo de faltas, elétricas ou mecânicas, os ensaios foram planejados de forma a possibilitar a execução de cada grupo sem intervalos. Cada grupo de ensaios teve duração de, aproximadamente, 4 horas.

Cada ensaio do Quadro 2, considerado dentro das sequências do Quadro 3, foi realizado para os pontos de operação do gerador da Tabela 1. Os ensaios foram realizados para um ponto de operação por vez, para garantir a maior semelhança possível no regime térmico da máquina entre as condições testadas de um mesmo tipo de falta. Além disso, aguardou-se aproximadamente 45 minutos com o gerador operando no ponto de operação desejado antes do início de cada ensaio, para reduzir os efeitos de alteração do regime térmico da máquina. Um grande volume de dados foi gerado, totalizando, aproximadamente, 1,5 TB de dados brutos em formato .csv para os sinais adquiridos de vibração.

Quadro 2 – Ensaios de imposição de faltas realizados.

Ensaio	Descrição
E1	Retirada gradual de espiras de um polo do rotor
E2	Retirada gradual de espiras de um polo do estator (fase A)
E3	Retirada gradual de espiras de um polo do estator (fase B)
E4	Retirada gradual de espiras de um polo do estator (fase C)
E5	Curto-circuito entre chapas do núcleo do estator
E5.5	Máquina sadia prévia a deslocamento de eixo
E6	Eixo deslocado verticalmente para cima paralelo ao plano horizontal
E7	Eixo deslocado verticalmente para baixo paralelo ao plano horizontal
E8	Eixo inclinado centralizado verticalmente
E9	Eixo inclinado deslocado verticalmente para baixo
E9.5	Máquina sadia após deslocamento de eixo e prévia a desbalanceamento
E10	Desbalanceamento dinâmico leve no LO
E11	Desbalanceamento dinâmico leve no LA
E12	Desbalanceamento dinâmico moderado no LO
E12.5	Máquina sadia após desbalanceamento

Fonte: Próprio autor.

Quadro 3 – Sequências de condições de faltas ensaiadas.

Tipo de falta	Sequência
Rotor	Sadia → 20% → 50% → 100% → Sadia
Estator A	Sadia → 16% → 50% → Sadia
Estator B	Sadia → 16% → 50% → Sadia
Estator C	Sadia → 16% → 50% → Sadia
Núcleo	Sadia → Curto-circuito entre chapas → Sadia
Deslocamento	Sadia → +0,5mm no LA e +0,5mm no LO → -0,5mm no LA e -0,5mm no LO → -0,5mm no LA e +0,5mm no LO → -1mm no LA e 0mm no LO → Sadia
Desbalanceamento	Sadia → Massa 1 no LO → Massa 1 no LA → Massa 1 e Massa 2 no LO separados por 90° → Sadia

Fonte: Próprio autor.

Os pontos de operação da Tabela 1 foram planejados para possibilitar a avaliação da influência do ponto de operação na detecção de faltas no gerador sob duas tendências: com diferentes níveis de potência aparente constante, variando o fator de potência, e com diferentes níveis de potência ativa constante, variando a potência reativa. A Figura 55 mostra os pontos da Tabela 1 no diagrama de capacidade do gerador de 8 polos da bancada. Pela figura, as duas tendências observáveis de variação do ponto de operação ficam evidentes: é possível traçar três semicírculos sobre os níveis de potência aparente constante, passando por diversos fatores de potência, e três linhas horizontais, de potência ativa aproximadamente constante, passando

Tabela 1 – Pontos de operação considerados para a realização de cada ensaio de imposição de faltas.

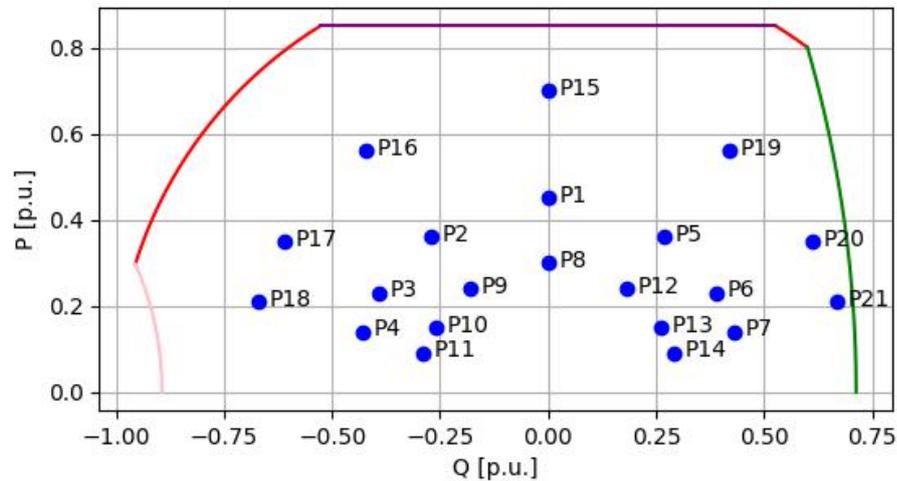
Ponto Operação (kVA)	Potência Aparente	Fator de potência		Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
P1	4,5	1	-	4,5	0
P2	4,5	0,8	subexcitado	3,6	-2,7
P3	4,5	0,5	subexcitado	2,3	-3,9
P4	4,5	0,3	subexcitado	1,4	-4,3
P5	4,5	0,8	sobreexcitado	3,6	2,7
P6	4,5	0,5	sobreexcitado	2,3	3,9
P7	4,5	0,3	sobreexcitado	1,4	4,3
P8	3,0	1	-	3,0	0,0
P9	3,0	0,8	subexcitado	2,4	-1,8
P10	3,0	0,5	subexcitado	1,5	-2,6
P11	3,0	0,3	subexcitado	0,9	-2,9
P12	3,0	0,8	sobreexcitado	2,4	1,8
P13	3,0	0,5	sobreexcitado	1,5	2,6
P14	3,0	0,3	sobreexcitado	0,9	2,9
P15	7,0	1	-	7,0	0,0
P16	7,0	0,8	subexcitado	5,6	-4,2
P17	7,0	0,5	subexcitado	3,5	-6,1
P18	7,0	0,3	subexcitado	2,1	-6,7
P19	7,0	0,8	sobreexcitado	5,6	4,2
P20	7,0	0,5	sobreexcitado	3,5	6,1
P21	7,0	0,3	sobreexcitado	2,1	6,7

Fonte: Próprio autor.

por, pelo menos, quatro valores de potência reativa. Com relação à curva de capacidade, os limites detalhados na Figura 12 são representados para o gerador da bancada, na Figura 55, com cores diferentes para cada tipo de limite. Observa-se que a limitação superior da curva, normalmente devida à máquina primária, no caso da bancada depende do sistema de proteção, que limita a mínima corrente de campo do motor CC da bancada com uma margem para evitar seu disparo.

As sequências de ponto de operação comentadas podem ser executadas reordenando os dados da Tabela 1, conforme as Tabelas 2 e 3. Também seria possível considerar a sequência de POs da Tabela 3 para cada fator de potência, aumentando a potência aparente, porém essas sequências não foram consideradas para os resultados. Na academia, mas principalmente no âmbito industrial, costuma-se dar atenção apenas a variações de potência ativa, ou potência mecânica no eixo das máquinas girantes, quando este ponto é mencionado. Por ser uma avaliação mais típica, a sequência de ensaio que considera a variação (crescente) da potência ativa fornecida pelo gerador, com fator de potência unitário, será chamada de Sequência Zero. As demais sequências de ensaio são vistas nas tabelas.

Figura 55 – Pontos de operação ensaiados mostrados na curva de capacidade do gerador de 8 polos da bancada experimental.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Sequências de pontos de operação para potência ativa constante, com variação de potência reativa.

Sequência	P (kW)	Q (kVAr)					
		Subexcitado			Sobreexcitado		
1	1,5		-4,3	-2,6	2,6	4,3	
2	2,5	-6,7	-3,9	-1,8	1,8	3,9	6,7
3	3,5		-2,8	-1,8	1,8	2,8	

Fonte: Próprio autor.

4.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a bancada experimental utilizada no trabalho para o levantamento de dados de vibração do gerador de 8 polos estudado. Abordaram-se alguns aspectos teóricos e relacionados à aplicação prática para possibilitar a obtenção dos dados necessários.

Tabela 3 – Sequências de pontos de operação para potência aparente constante, com variação de fator de potência.

Sequência	S (kVA)	Fator Potência						
		Subexcitado				Sobreexcitado		
4	3,0	0,3	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,3
5	4,5	0,3	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,3
6	7,0	0,3	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,3

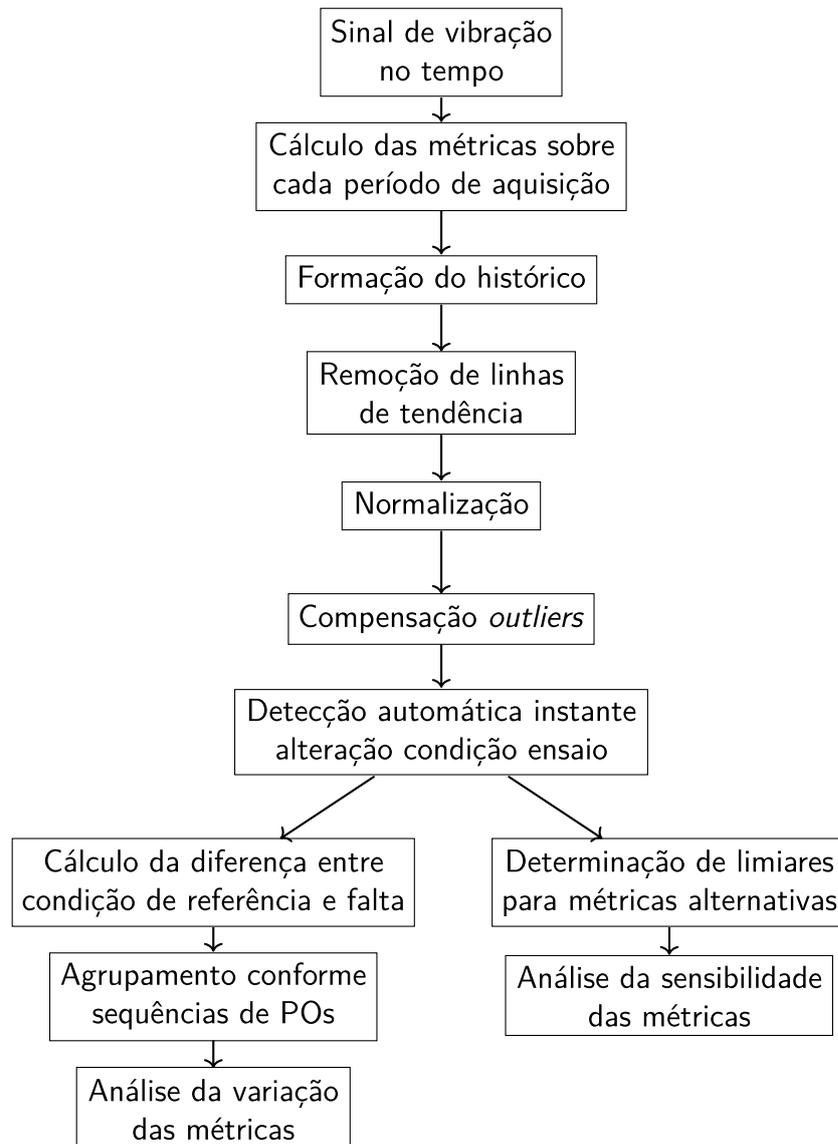
Fonte: Próprio autor.

Mostrou-se desde a bancada e seus periféricos, até os aspectos do sistema comercial de vibração utilizado, bem como as adaptações feitas para atender as necessidades da investigação proposta. A capacidade da bancada em relação à imposição de faltas e capacidade também foi detalhada, abordando-se aspectos práticos da execução dos ensaios. Por fim, apresentou-se as condições para as quais o gerador foi testado, com relação às faltas e aos pontos de operação.

5 ANÁLISES E RESULTADOS SOBRE MÉTRICAS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO

Este capítulo aborda as análises realizadas sobre as métricas globais dos sinais de vibração mecânica medidos no gerador síncrono de 8 polos salientes da bancada experimental apresentada no Capítulo 4. Para isso, apresenta-se a metodologia de processamento dos dados e a tendência das métricas em diferentes condições, bem como agrupamentos realizados sobre os dados para condensar os resultados e permitir conclusões em um contexto geral de operação da máquina, visando a comparação das métricas testadas de maneira mais direta para a detecção de faltas. A Figura 56 mostra um diagrama relacionando os processamentos e as análises realizadas a partir dos sinais temporais de vibração para obter os resultados sobre as métricas globais.

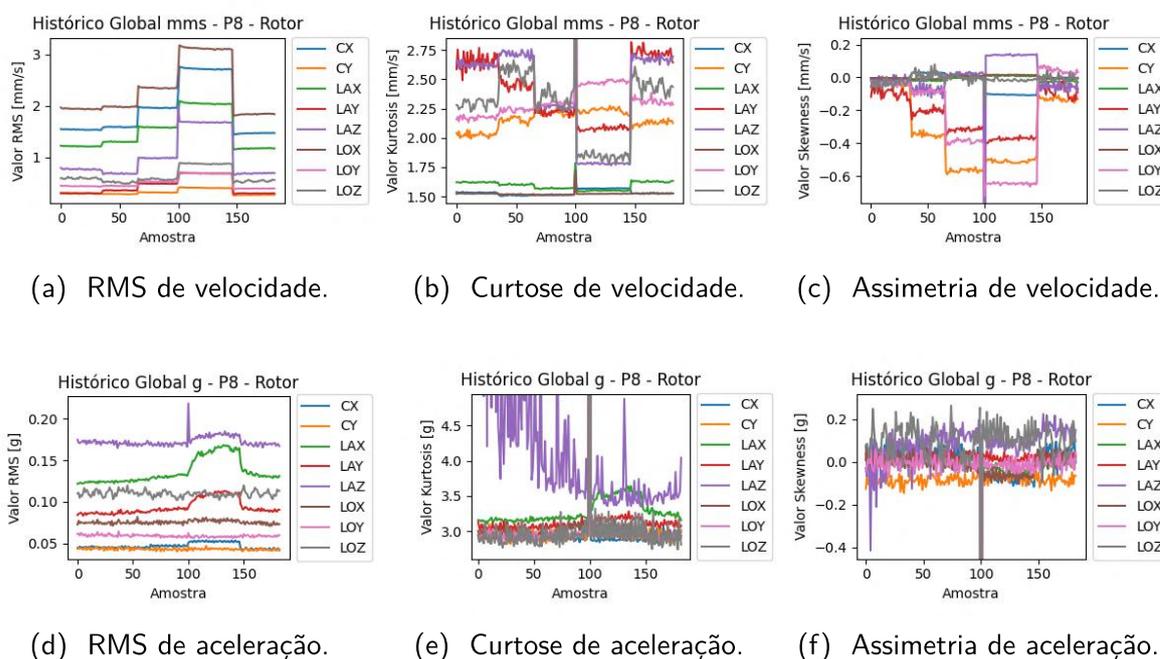
Figura 56 – Etapas para análise dos valores globais.



5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO HISTÓRICO DE MÉTRICAS GLOBAIS

Aplicou-se o cálculo das métricas do Quadro 1 sobre os sinais de aceleração e de velocidade de vibração pré-processados de cada sensor apresentados na Seção 4.2.3. O cálculo da métrica sobre cada período de aquisição ajustado resulta em um ponto na curva de tendência, ou histórico, do valor global. A Figura 57 mostra o comportamento das tendências dos valores das métricas globais para os sinais de aceleração e velocidade de vibração de todos os sensores, possibilitando comparar as diferenças entre os tipos de sinal de vibração, para o ensaio de falta de rotor sob o ponto de operação P8 (vide Quadro 3 e Tabela 1). Nota-se que o histórico de valores globais do sinal de aceleração é mais ruidoso, inclusive apresentando desvios que poderiam inviabilizar análises diretas, como no caso da Figura 57e. Vê-se também que, no caso dos sensores em que há variação mais evidente com a imposição de diferentes níveis de falta, os degraus de variação são visíveis para ambos os sinais de vibração, mas se ressaltam mais no sinal de velocidade. Por isso, o restante do capítulo abordará apenas sinais de velocidade.

Figura 57 – Comparação entre métricas globais RMS, curtose e assimetria para os sinais de aceleração e velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.

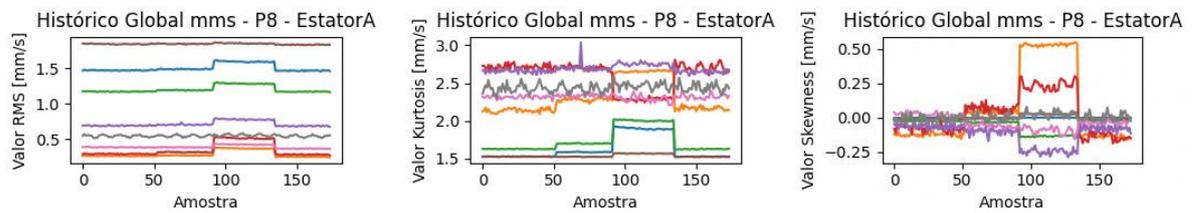


Fonte: Próprio autor.

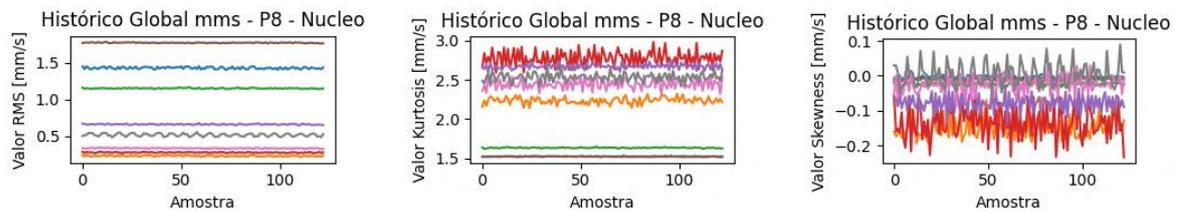
Para não deixar de mencionar, os históricos das métricas globais para os demais tipos de falta testados são mostrados na Figura 58 para o mesmo ponto de operação P8. Evidencia-se a variabilidade do comportamento dos valores globais entre as faltas e entre os sensores.

Outro aspecto observável durante a imposição das faltas na bancada é a variação do ponto de operação. Como comentado na Seção 4.1, a imposição das faltas elétricas é feita de maneira *online* e a excitação do gerador não é corrigida. Já com a inserção das faltas

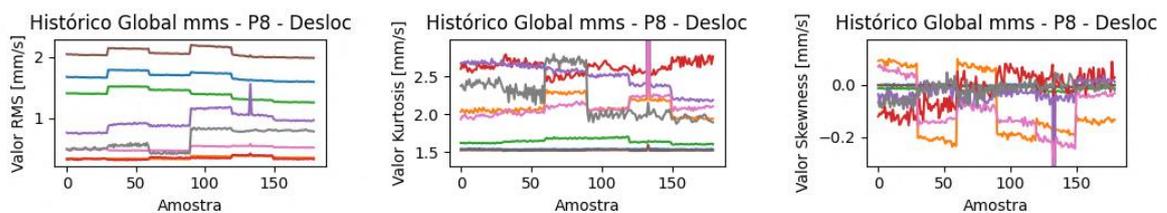
Figura 58 – Tendência das métricas globais RMS, curtose e assimetria para os sinais de velocidade de vibração durante os ensaios de imposição das demais faltas sob ponto de operação P8.



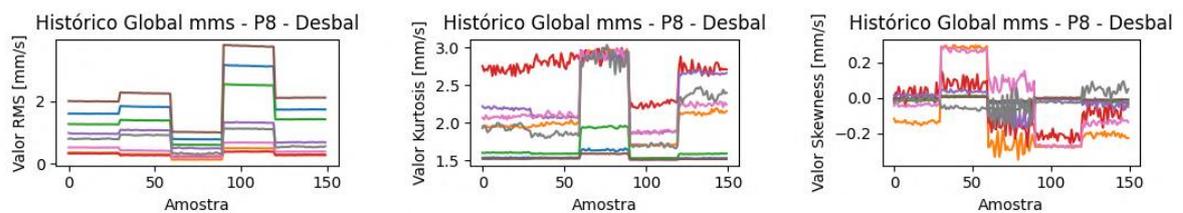
(a) RMS com falta no estator. (b) Curtose com falta no estator. (c) Assimetria com falta no estator.



(d) RMS com falta no núcleo. (e) Curtose com falta no núcleo. (f) Assimetria com falta no núcleo.



(g) RMS com excentricidade. (h) Curtose com excentricidade. (i) Assimetria com excentricidade.

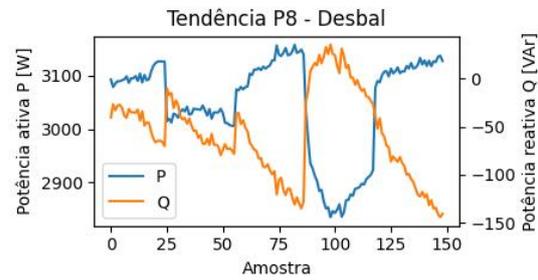
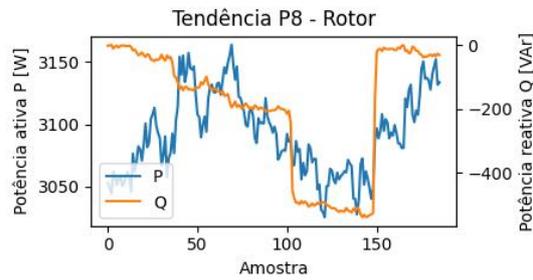


(j) RMS com desbalanceamento. (k) Curtose com desbalanceamento. (l) Assimetria com desbalanceamento.

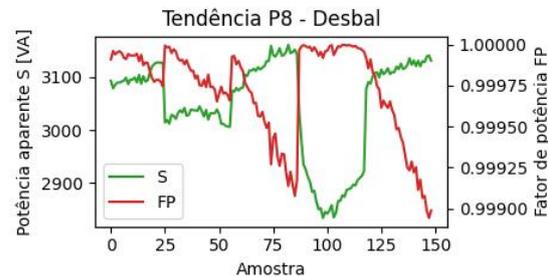
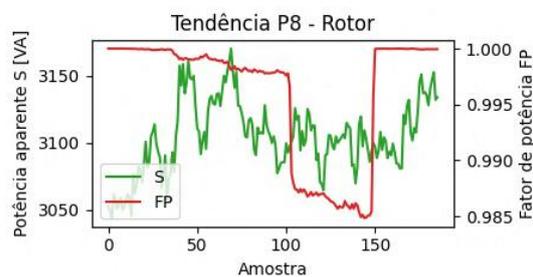
Fonte: Próprio autor.

mecânicas, como é necessário interromper a operação do gerador para realizar a alteração, o PO é reajustado às condições desejadas. A Figura 59 mostra a variação do ponto de operação P8, caso com potência reativa nula, durante os ensaios para um caso de falta elétrica e outro de falta mecânica. Observa-se variação significativa da condição operativa da máquina, para o caso de falta de rotor, entre os diferentes níveis de falta. Vê-se também que, durante cada condição de falta mecânica, há um gradiente maior de potência se comparado às faltas elétricas, o que se deve, em parte, ao resfriamento da máquina durante o tempo de parada, alterando seu regime térmico.

Figura 59 – Variação do ponto de operação P8 da máquina com a imposição de falta elétrica de retirada de espiras do rotor e falta mecânica de desbalanceamento.



(a) Potência ativa e reativa com falta de rotor. (b) Potência ativa e reativa com falta de desbalanceamento.



(c) Potência aparente e fator de potência com falta de rotor. (d) Potência aparente e fator de potência com falta de desbalanceamento.

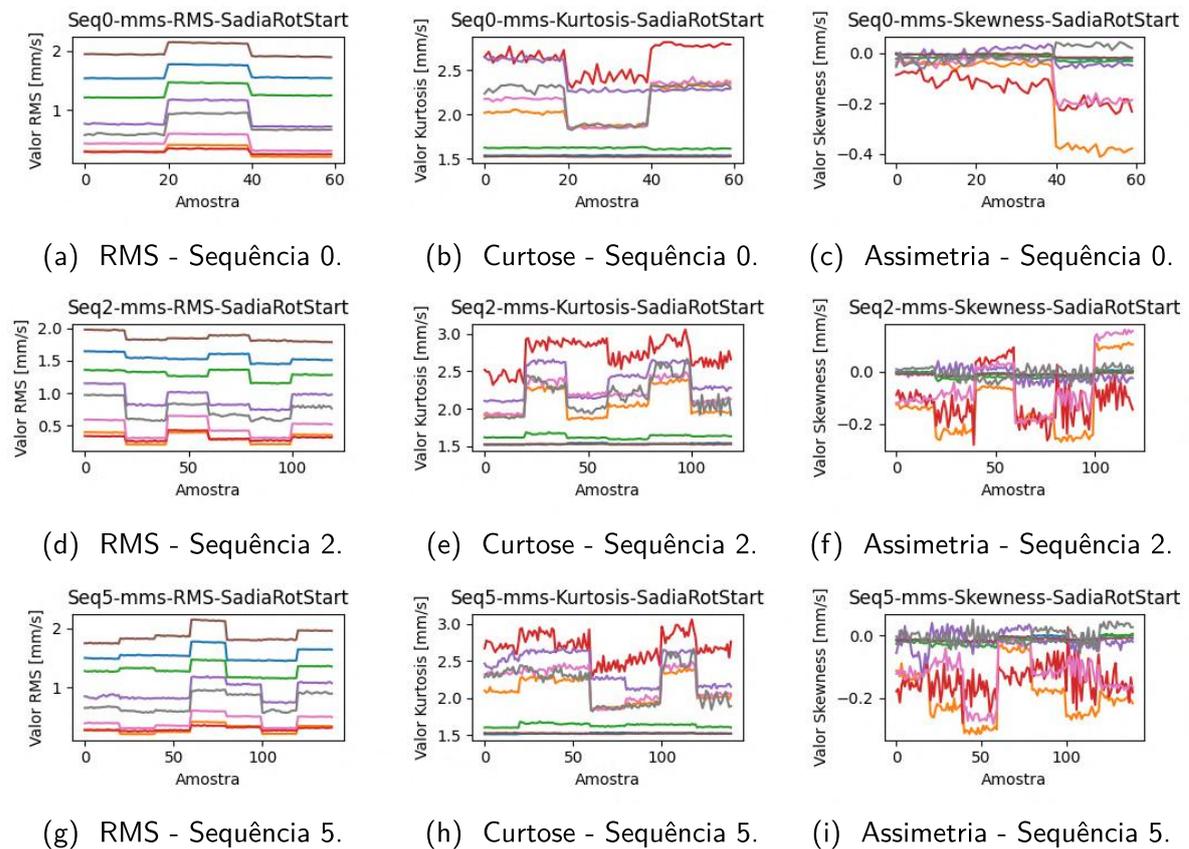
Fonte: Próprio autor.

Também é possível observar o histórico de valores globais de vibração ao longo das sequências de POs mencionadas na Seção 4.3. A Figura 60 destaca alguns casos, para as três métricas globais, com o gerador em condição sadia. Nota-se que há variação significativa do valor das métricas ao manter a condição de ensaio e variar apenas o ponto de operação. Entretanto, não há uma lógica de variação das métricas evidente e comum a todos os sensores com relação ao aumento de potência ativa, para a Sequência Zero, ou variação da potência reativa, para as demais sequências mostradas.

5.2 PROCESSAMENTOS SOBRE AS TENDÊNCIAS DE VALORES GLOBAIS

A metodologia de realização dos ensaios descrita na Seção 4.3 inclui um período de operação do gerador em seu PO desejado e em condição sadia para estabilização de seu regime térmico. Entretanto, permanece uma tendência natural e suave de variação do ponto de operação enquanto o regime térmico continua a se estabilizar durante a realização dos ensaios, além de a própria imposição das faltas impactar o regime térmico do gerador, conforme visível na Figura 59 da seção anterior. A tendência residual dos POs afeta os sinais de vibração, como pode ser visto nas Figuras 57 e 58 da seção anterior, nas quais também são observadas tendências suaves de variação ao longo de cada ensaio, o que é mais notável quando observados os níveis inicial e final do histórico das métricas, para cada sensor. Para reduzir o efeito da

Figura 60 – Variação das métricas globais RMS, curtose e assimetria dos sinais de velocidade de vibração conforme as sequências de ponto de operação para o gerador em estado sadio. Enfoque nas sequências de operação com (a-c) variação de potência ativa para fator de potência unitário, (d-f) variação de potência reativa para potência ativa constante e (g-i) variação de fator de potência para potência aparente constante.

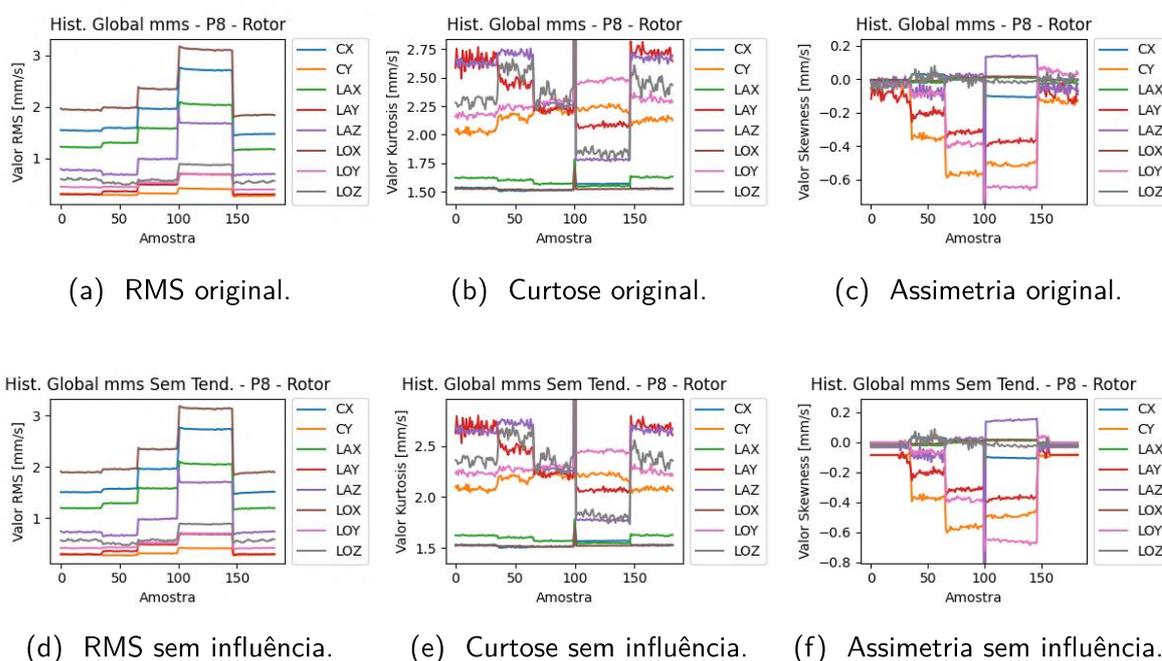


Fonte: Próprio autor.

variação do ponto de operação da máquina durante os ensaios sobre os históricos obtidos das métricas, buscou-se remover a tendência entre as condições sadias inicial e final de cada ensaio, para cada sensor. Para isso, tomaram-se as primeiras e últimas 25 amostras de cada ensaio, visto que cada condição de ensaio possui entre 30 e 50 amostras. Utilizou-se um fator de remoção de *outliers*, descartando amostras de amplitude superior a 10 vezes o valor da média das primeiras com as últimas amostras, de maneira automática, e substituindo esses *outliers* pelo valor da média. Concatenando as amostras iniciais e finais selecionadas, determinou-se a linha de tendência correspondente, interpolando-a para toda a duração do ensaio, em relação ao número total de amostras de cada ensaio. Por fim, a linha de tendência obtida é subtraída do histórico para o qual foi calculada, obtendo-se o histórico sem tendência. Entretanto, dependendo do comportamento do histórico, esse procedimento pode causar uma hipercorreção, então ele foi realizado iterativamente para reduzir a diferença entre a média das condições inicial e final dos ensaios a um nível adequado. Para referência, o histórico de

valores globais obtido a partir desse processamento será chamado de histórico sem influência. A Figura 61 mostra um exemplo do efeito desse processamento, para cada métrica e sensor, para o ensaio de falta no rotor no ponto de operação P8, comparando o histórico original com o processado. Comparando-se as condições sadias inicial e final dos históricos, vê-se que seus níveis ficam mais próximos, aproximadamente os mesmos, após os processamentos descritos para remoção da influência do histórico.

Figura 61 – Comparação entre histórico original de métricas globais RMS, curtose e assimetria e histórico com influência removida para os sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.

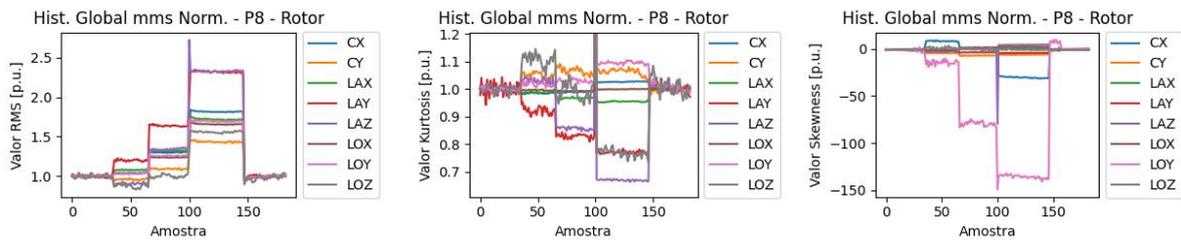


Fonte: Próprio autor.

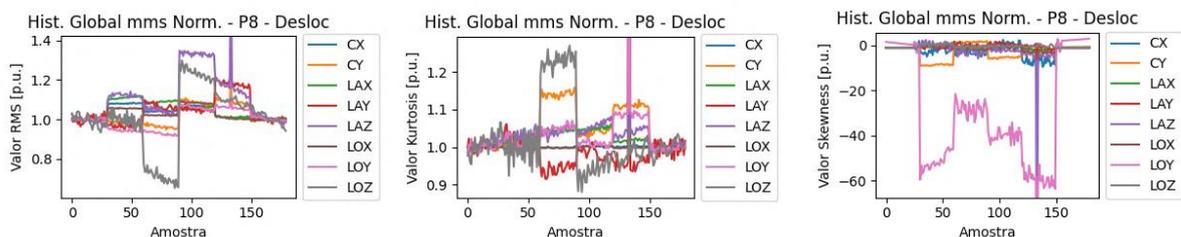
O fato de a amplitude dos sinais de vibração ser diferente para cada sensor é outro fator que dificulta uma análise generalista sobre todos os dados obtidos nos ensaios, ou até mesmo a definição e visualização de limiares para detecção de anomalias. Para superar esta questão, utilizou-se a abordagem de normalização dos sinais de cada sensor com relação ao seu valor em condição sadia. Dessa forma, todos os sensores em condição sadia terão valor unitário para a condição de referência da máquina. Quando alguma falta é inserida no gerador, é possível ver diretamente o efeito proporcional distinto de alteração sobre a amplitude do sinal de vibração medido por cada sensor. A Figura 62 mostra o resultado do processamento de normalização realizado para um exemplo de falta elétrica e outro de falta mecânica para as três métricas no ponto de operação P8.

Nas figuras apresentadas até o momento, nesse capítulo, vê-se a presença de *outliers* em alguns casos, como nas Figuras 57b e 57c, na transição entre condições de ensaio, ou nas Figuras 58b, 58g, 58h e 58i, durante as condições. A maior parte dessas ocorrências é devido a

Figura 62 – Histórico normalizado de métricas globais RMS, curtose e assimetria para os sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor e falta mecânica de excentricidade para o ponto de operação P8.



(a) RMS com falta elétrica. (b) Curtose com falta elétrica. (c) Assimetria com falta elétrica.



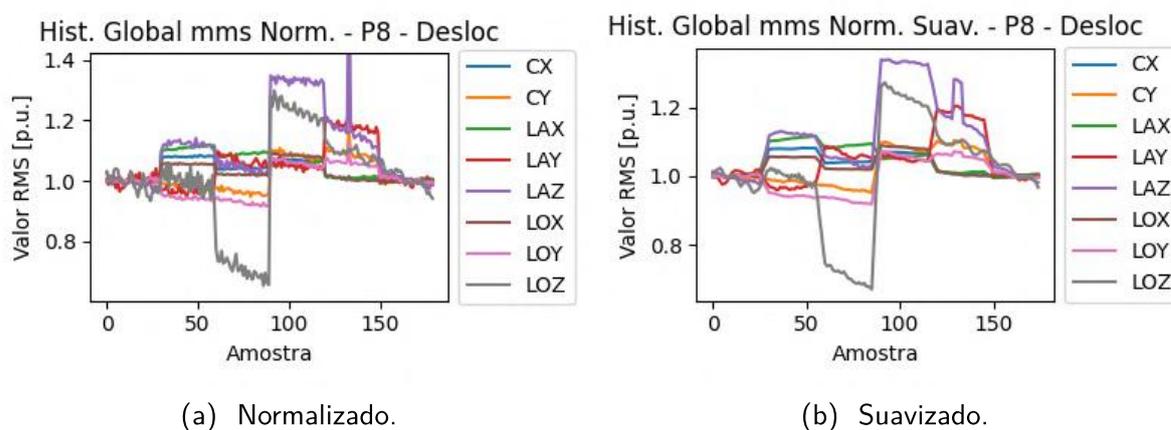
(d) RMS com falta mecânica. (e) Curtose com falta mecânica. (f) Assimetria com falta mecânica.

Fonte: Próprio autor.

aquisições realizadas durante a transição entre uma condição de ensaio em outra. A mudança abrupta do sinal durante a aquisição é vista como uma distorção da forma de onda do sinal. Então, o cálculo das métricas não é realista nesses casos. Outros *outliers* observados podem ser devidos a oscilações naturais do sinal. Como nessa última situação, a alteração não ocorre para todos os sensores, esses *outliers* podem ser devidos a interferências nos próprios sensores ou nas conexões com o sistema de aquisição. Em todos os casos, foram alterações momentâneas e abruptas, o que indica que não houve comprometimento dos ensaios, porém poderia afetar a análise dos resultados. Além da estratégia mencionada de substituição do *outlier* pelo valor da média das amostras quando há uma anomalia durante a condição de ensaio, outra estratégia testada para atenuar ainda mais os *outliers* foi a média móvel, conforme ilustrado na Figura 63. Porém, o efeito obtido não compensou a perda de amostras e a distorção causada aos históricos, pois o histórico perdeu sua forma original e não atenuou os *outliers* efetivamente. Para abordar o problema de outra maneira, os dados normalizados, sem influência, foram utilizados sem processamentos adicionais. Porém, para as análises, foram salvos valores mínimo, médio e máximo para cada estado da máquina. Regiões com *outliers* têm seus valores mínimo ou máximo muito diferentes do valor médio, o que possibilita identificar esses casos. Como as regiões próximas das transições entre estados apresentam maior ocorrência de *outliers*, reduziu-se essa quantidade a um nível mínimo ao não considerar amostras próximas dessas regiões para

os cálculos sobre as condições de ensaio. Ainda, quando presentes em outras regiões, os *outliers* representam um único ponto em um conjunto de pelo menos 30 pontos. Então, considerou-se que seu impacto seria pouco significativo. Por isso, esses valores não foram retirados para os cálculos das médias.

Figura 63 – Históricos normalizado e suavizado da métrica global RMS para o sinais de velocidade de vibração: falta mecânica de excentricidade para o ponto de operação P8.



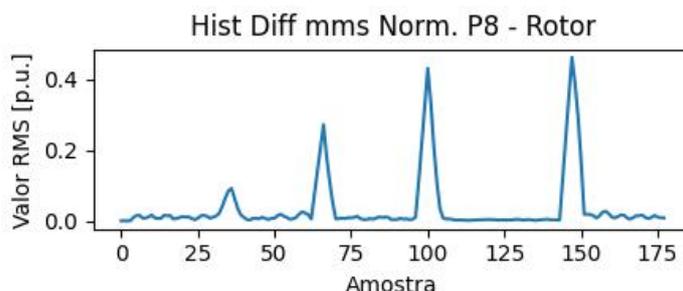
Fonte: Próprio autor.

5.3 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DAS MÉTRICAS GLOBAIS

Para prosseguir com a análise final dos resultados globais, foi necessário um algoritmo capaz de identificar os momentos de alteração da condição de ensaio de maneira automática. O algoritmo desenvolvido acompanha a diferença entre uma amostra do histórico global e as próximas amostras. Pelo método de tentativa e erro, considerou-se a comparação da amostra do histórico com a média das próximas 4 amostras. Naturalmente, nos instantes de transição entre condições de ensaio, a diferença entre as amostras aumenta, gerando valores mais altos nessas regiões do histórico, o que possibilita a identificação desses instantes. A Figura 64 mostra o gráfico do valor de diferença entre as amostras ao longo do histórico de RMS, evidenciando os picos nas regiões de transição da condição de ensaio. Para o gráfico, realiza-se a raiz da média dos quadrados da amplitude da métrica entre os sensores. Em resumo, o algoritmo busca o valor máximo ao redor das regiões conhecidas de transição, visto a padronização dos ensaios, com pouca variação do número de amostras entre as condições de ensaio. O histórico da diferença entre as amostras se mostrou mais estável para a métrica RMS. Então, as mesmas regiões delimitadas pelo algoritmo no histórico através dessa métrica foram utilizadas para as métricas curtose e assimetria. Outro motivo para a utilização da mesma região entre as métricas, é a comparação delas durante o mesmo intervalo de amostras adquiridas. Com a identificação dos instantes de transição entre condições de ensaio, foi possível separar as regiões do histórico

relativas a cada condição. Calculou-se o valor médio de cada métrica, para cada sensor e ponto de operação, nessas regiões para realizar comparações mais diretas nas análises realizadas.

Figura 64 – Tendência da diferença de amostras ao longo do histórico global RMS para o sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8, média entre os sensores.



Fonte: Próprio autor.

Com base na metodologia padrão da norma, como descrito na Seção 3.2.2, considerou-se o estado inicial saudável de cada ensaio como o valor de referência. Para hidrogenação, a ISO 20816-5 (2018) sugere o valor relativo de 1,2 vezes o valor de referência para o limiar de alarme e 1,25 vezes o valor de alarme para o limiar de *trip*. Embora a bancada de ensaios do laboratório não reproduza exatamente a dinâmica de um gerador em uma usina hidrelétrica, estas definições da norma são relevantes para o contexto deste trabalho, visto a proposta de análise de resultados que será apresentada na Seção 5.4. Além disso, as definições de limiares da forma apresentada são as mais genéricas encontradas em normas e na literatura de análise de vibração, servindo como ponto de partida. Ressalta-se que a norma contempla a mesma relação para valores superiores e inferiores à referência.

A aplicação dessas relações de alarme e *trip* é direta para os históricos normalizados, pois os limiares estão na mesma escala para todos os sensores. Entretanto, a partir das figuras da Seção 5.1 que mostram a diferença entre as métricas testadas, nota-se que o padrão de variação é diferente entre elas. Então, utilizou-se a definição dos limiares conforme norma apenas para o valor RMS dos sinais de vibração. Os valores relativos para os limiares foram mantidos conforme indicado, pois, durante a análise exploratória dos dados, observou-se uma resposta adequada entre a ultrapassagem dos limiares e o nível das faltas inseridas na máquina. A resposta da métrica RMS servirá como referência para avaliação da curtose e da assimetria, comparativamente.

A partir dos conjuntos de dados contendo valores relativos mínimo, médio e máximo de cada sensor para cada condição de falta (em relação à referência) e ponto de operação, buscou-se definir limiares de curtose e assimetria atrelados aos limiares definidos para o RMS. Para isso, realizou-se um procedimento para obter um valor representativo de todo o conjunto de dados normalizados de cada métrica. Esses valores foram utilizados juntamente com recursos

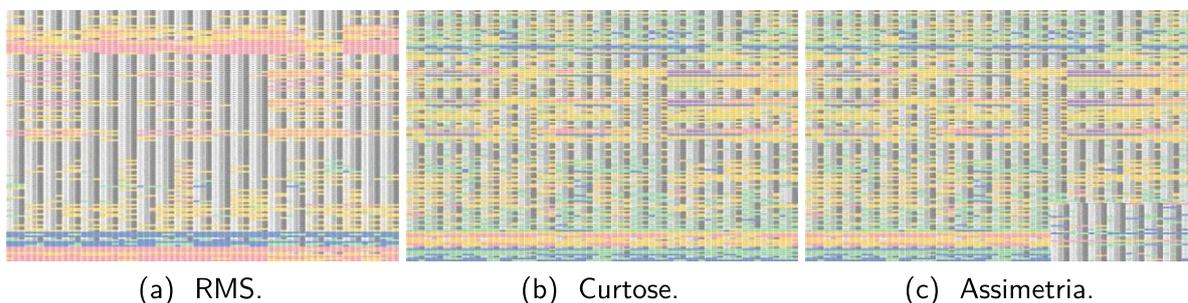
visuais sobre a variação das métricas e sobre a distribuição de detecção das anomalias no conjunto de dados, para fim de validação. A metodologia consistiu em calcular a média dos valores entre todos os sensores e todas as condições de falta para cada ponto de operação e para cada tipo de valor (mínimo, médio e máximo). Em seguida, calculou-se a mediana dessas médias. O valor obtido para o conjunto de dados de RMS foi 1,170, para a curtose o valor foi 0,864 e para a assimetria foi 3,363.

Tomando o RMS como referência, aplicou-se a relação de proporcionalidade para as outras métricas sobre os limiares de alarme, resultando em 1,037 para a curtose e 4,036 para a assimetria. Como é visível nas figuras apresentadas até o momento nesse capítulo, a métrica curtose se comporta de maneira similar ao valor RMS, já a assimetria varia entre valores positivos e negativos. Então, a abordagem de limiarização da assimetria diferiu das outras duas: considerou-se o mesmo nível de alarme para valores positivos e negativos. O limiar de *trip* não terá impacto direto nas análises desse capítulo, pois será avaliada somente a sensibilização das métricas pelas faltas, o que já é suficiente com o nível de alarme. Entretanto, valores relativos ao valor de alarme foram definidos para os níveis de *trip* conforme avaliação visual da Figura 65, que mostra um mapa de cores das definições descritas para cada métrica. Na figura, as linhas são relativas às 17 condições de falta, cada uma com 8 sensores, e as colunas se referem aos 21 pontos de operação, cada um com valor mínimo, médio e máximo da métrica normalizada do sinal de vibração na região correspondente a cada estado de falta da máquina. As cores amarela e vermelha indicam a ultrapassagem dos limiares superiores, respectivamente, de alarme e *trip*. As cores verde e azul indicam a ultrapassagem dos limiares inferiores, respectivamente, de alarme e *trip*. A ausência de cores, com células brancas ou cinzas, indica a ausência da ultrapassagem de qualquer limiar. Definiu-se então, os limiares de *trip* como 1,2 vezes para curtose e 2 vezes para assimetria em relação aos valores relativos de alarme. Pelo mapa de cores, percebe-se que a curtose é mais expressiva na detecção de faltas, no contexto geral, seguida por RMS e assimetria. Entretanto, nota-se que embora a distribuição de detecção da assimetria seja menos densa, ela se distribui mais uniformemente do que a métrica RMS, a qual possui alguns espaços extensos sem detecção. A Figura 66 mostra o histórico normalizado das métricas para um ensaio de imposição de faltas de rotor, juntamente com limiares definidos. A ultrapassagem de limiares de alarme, por alguns sensores, para faltas leves e a de limiares de *trip* para faltas severas, sem sensibilização excessiva de nenhuma das métricas, demonstra a compatibilidade entre os valores definidos para os limiares de cada métrica.

Com os dados tratados dessa forma, aplicaram-se duas formas de analisar os resultados, conforme será apresentado nas próximas seções:

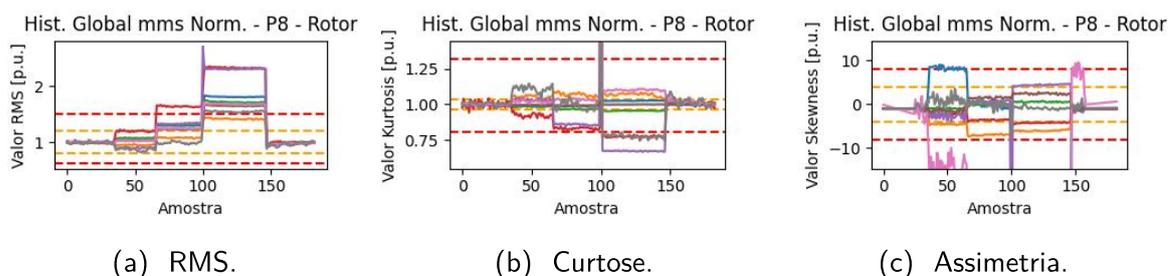
- Observação da variação do valor das métricas com relação às condições de falta e aos pontos de operação;
- Avaliação da sensibilidade das métricas a partir dos limiares definidos, realizando a

Figura 65 – Mapa de cores dos limiares de alarme e *trip* sobre os conjuntos de dados das métricas globais normalizadas para todos os pontos de operação, tipos de falta e sensores testados.



Fonte: Próprio autor.

Figura 66 – Limiares determinados para as métricas globais RMS, curtose e assimetria visíveis no histórico normalizado para o sinal de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.



Fonte: Próprio autor.

contagem dos pontos de operação ou dos sensores para os quais houve a detecção de faltas.

5.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS MÉTRICAS GLOBAIS

Para avaliar a variação das métricas, as figuras dessa seção, em seus eixos verticais, consideram apenas o valor absoluto da ultrapassagem do valor médio na região de falta com relação ao valor de referência em estado sadio. Calculou-se a média desses valores entre os sensores para cada ponto de operação, para se ter uma análise mais abrangente e compacta.

Os dados foram compilados conforme as sequências de pontos de operação das Tabelas 2 e 3, correspondendo ao eixo horizontal de todas as figuras dessa seção, para apresentar a variação das métricas em forma de tendências com sentido físico. A tendência de variação das métricas nas figuras apresentadas podem ser observadas de duas formas: entre os pontos de operação para cada condição de falta ou entre as condições de falta para um único PO. Dar-se-á enfoque ao primeiro caso, cuja demonstração é mais direta a partir das figuras que serão apresentadas, porém as conclusões apresentadas se dão no contexto geral, levando em consideração as diferentes condições de falta para cada tipo.

5.4.1 Variação da potência ativa sem fornecimento de potência reativa

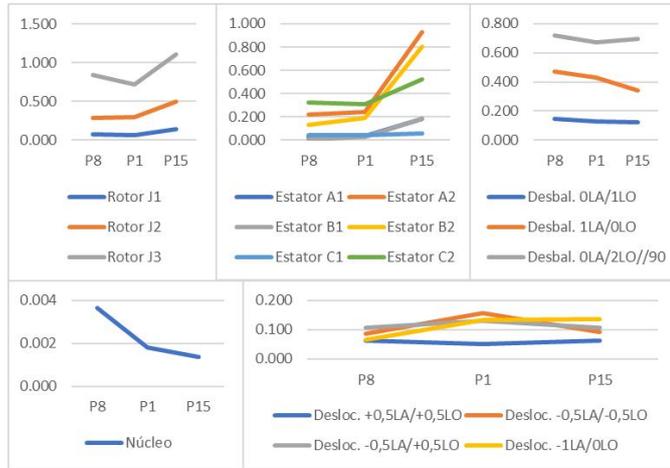
Primeiramente, com o gerador fornecendo apenas potência ativa, correspondente à Sequência 0 de ensaio, a Figura 67 evidencia um aumento das variações da métrica RMS em faltas elétricas com o aumento de potência, exceto pela falta de núcleo, que apresentou comportamento contrário. Já para as faltas mecânicas, não há impacto da potência ativa. Pela figura, não se vê tendências claras crescentes ou decrescentes para esses tipos de falta, a variação da métrica é aproximadamente a mesma para os três níveis de potência ativa. No caso da curtose, não é evidente uma tendência de variação para faltas de rotor e núcleo, já para faltas de estator o comportamento é crescente. Dentre as faltas mecânicas, o desbalanceamento novamente parece não ser sensível ao ponto de operação, porém duas faltas de deslocamento, ambas com o rotor inclinado no mesmo ângulo, apenas transladado verticalmente, causaram variação significativa da curtose: no caso com rotor centralizado, há um crescimento da variação com a falta, e para o caso deslocado verticalmente, observa-se uma redução. Por fim, a assimetria apresenta uma variação decrescente com o ponto de operação somente para a falta de rotor, para as demais faltas elétricas não há influência. Dentre as faltas mecânicas, apenas o desbalanceamento sofreu impacto do PO, aumentando a amplitude de sua variação juntamente com a potência ativa. Na Figura 67, especialmente para a condição de maior potência ativa, o sinal se tornou muito assimétrico, com valores elevados para essa métrica.

5.4.2 Potência aparente constante com fator de potência subexcitado a sobreexcitado

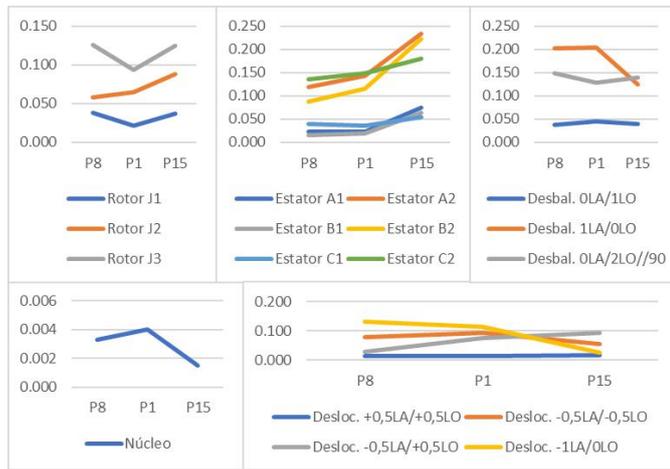
A próxima análise considera as Sequências 4, 5 e 6 para a variação das métricas com a potência aparente da máquina constante, variando o fator de potência do gerador em operação subexcitada até sobreexcitada.

A Figura 68 mostra os valores RMS para todos os tipos de falta, conforme legendas. Essa métrica apresenta tendência de redução da variação para as faltas de estator conforme o aumento da excitação do gerador, independentemente do nível de potência da máquina. Vê-se o comportamento contrário para as faltas de rotor, com maior variação conforme o aumento da excitação, exceto na condição de maior potência, na qual a variação da métrica é reduzida com o aumento da excitação do rotor em condição subexcitada, chegando ao seu valor mínimo com fator de potência unitário. Para a máquina sobreexcitada não há alteração da variação. Para a falta de núcleo do estator, em um nível reduzido de potência, a variação da métrica se manteve constante independentemente de fator de potência. Para a condição de maior potência, há uma tendência de aumento da variação proporcionalmente à excitação da máquina. Entretanto, em um nível intermediário de potência, a variação da métrica aumenta com a excitação da máquina, porém em níveis diferentes para as condições de subexcitação e sobreexcitação, com a condição de fator de potência unitário apresentando a menor variação. A falta mecânica de desbalanceamento não sofreu influência da excitação do rotor, independentemente do

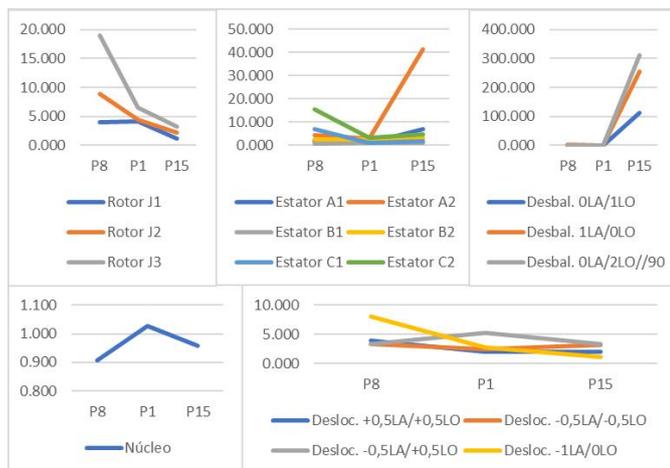
Figura 67 – Variação dos valores globais de vibração com variação da potência ativa sem fornecimento de potência reativa (sequência zero).



(a) RMS.



(b) Curtose.



(c) Assimetria.

Fonte: Próprio autor.

nível de potência. A variação da métrica para a falta de deslocamento de eixo apresentou

comportamento irregular. Para as duas potências inferiores o comportamento geral foi similar, com menor variação para o fator de potência unitário e maior variação conforme o fator de potência é reduzida, independentemente de subexcitação ou sobreexcitação. Entretanto, na condição de maior potência fornecida, efeito contrário é observado, embora com menos intensidade, de forma que também seria possível afirmar que, na média, a variação do valor RMS não sofreu influência da excitação do gerador.

Com relação à métrica curtose, a partir da Figura 69, as faltas de estator apresentaram comportamento similar ao RMS. Com as faltas de rotor, o comportamento também foi similar ao RMS, à exceção do caso de menor potência fornecida, em que as variações foram pouco perceptíveis. Para a falta de núcleo, houve maior variação em pontos de fator de potência baixo, tanto sub quanto sobreexcitado, para as menores potências, entretanto o comportamento foi contrário para o caso de maior potência fornecida. No caso das faltas mecânicas, não há nenhuma tendência observável da curtose com o ponto de operação.

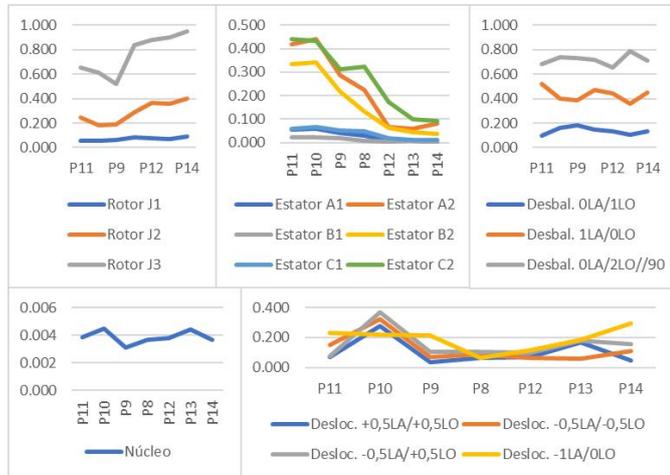
Por fim, a Figura 70 mostra os dados para a assimetria. Com as faltas de rotor, a assimetria aumentou consideravelmente com o aumento da excitação do gerador para as condições de potência superiores. No caso de menor potência fornecida, não é observada uma tendência da variação da métrica, porém ela apresenta valores maiores para o gerador subexcitado e com fator de potência unitário. Para as faltas de estator, nas condições de menor potência fornecida, o comportamento é similar: não há tendência observável entre os pontos de operação, porém um ponto subexcitado se destaca dentre os demais para os dois casos, sendo diferentes em cada condição. No caso de maior potência, os menores fatores de potência causam um aumento na variação da assimetria. Para a falta de núcleo, somente é observada uma tendência crescente de variação da métrica conforme o aumento da excitação do gerador para o caso de maior potência fornecida, nos demais não há impacto. O desbalanceamento não apresentou tendências bem definidas para a variação da assimetria entre os pontos de operação, houve alguns picos no valor da métrica para diferentes POs. O deslocamento do eixo, por outro lado, na condição de menor potência, apresentou uma tendência crescente na variação da métrica conforme o aumento da excitação do rotor. Entretanto, aumentando a potência para o nível intermediário, o resultado foi invertido: a tendência de variação se tornou decrescente. No nível máximo de potência testado, a variação da assimetria se tornou irregular, sem uma tendência bem definida.

5.4.3 Potência ativa constante com variação da potência reativa

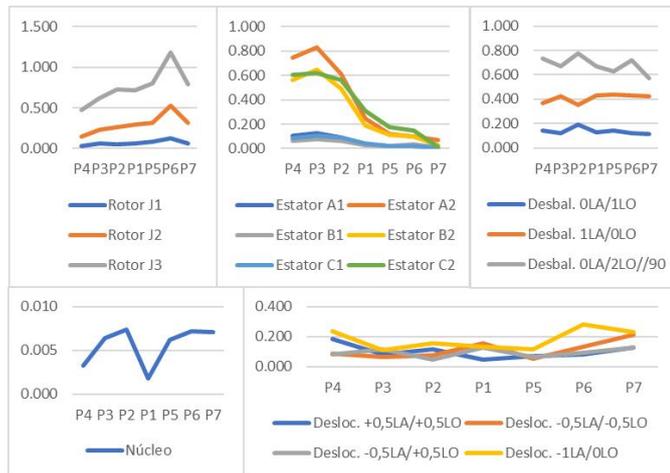
Por fim, analisa-se a variação dos valores globais mantendo a potência ativa constante e varia-se apenas a potência reativa, conforme as Sequências 1, 2 e 3, novamente para operação subexcitada à sobreexcitada. Busca-se excluir o efeito da variação de potência ativa juntamente com a potência reativa, isolando melhor possíveis causas para tendências observadas.

A resposta da variação da métrica RMS é nítida nesta configuração de POs, conforme a Figura 71. Novamente, há um crescimento da variação para faltas de rotor e um decréscimo

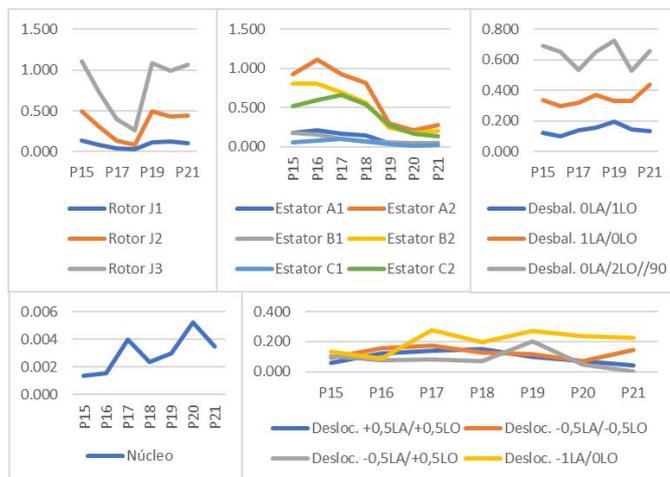
Figura 68 – Variação da métrica global RMS de vibração com variação do fator de potência mantendo a potência aparente constante (seqüências 4, 5 e 6).



(a) 3 kVA.



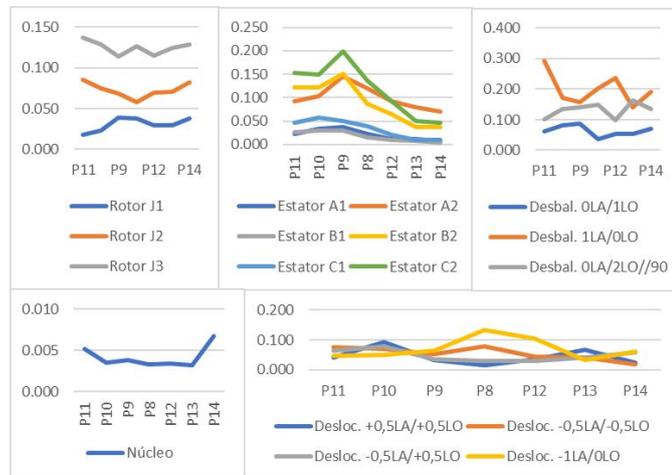
(b) 4,5 kVA.



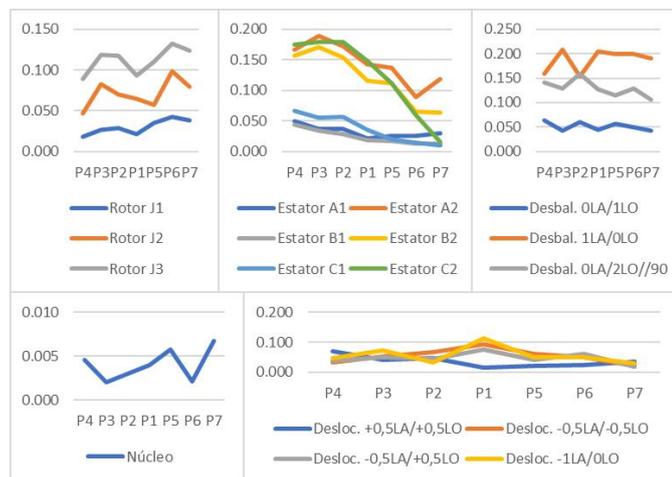
(c) 7 kVA.

Fonte: Próprio autor.

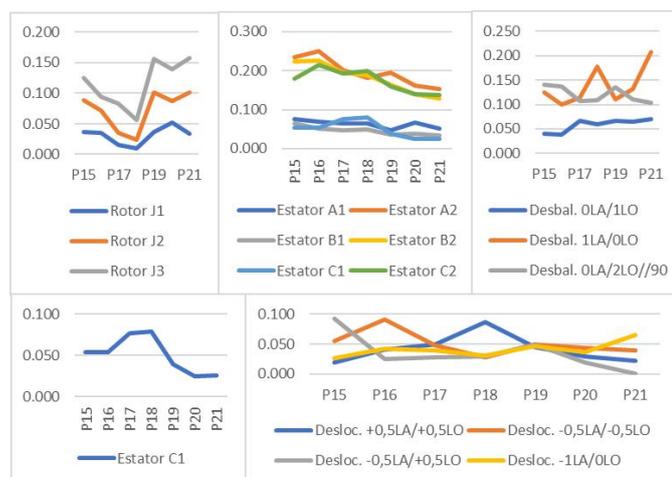
Figura 69 – Variação da métrica global curtose de vibração com variação do fator de potência mantendo a potência aparente constante (sequências 4, 5 e 6).



(a) 3 kVA.



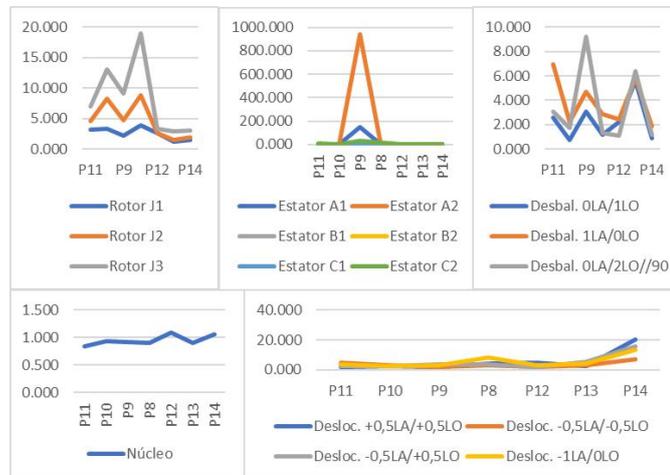
(b) 4,5 kVA.



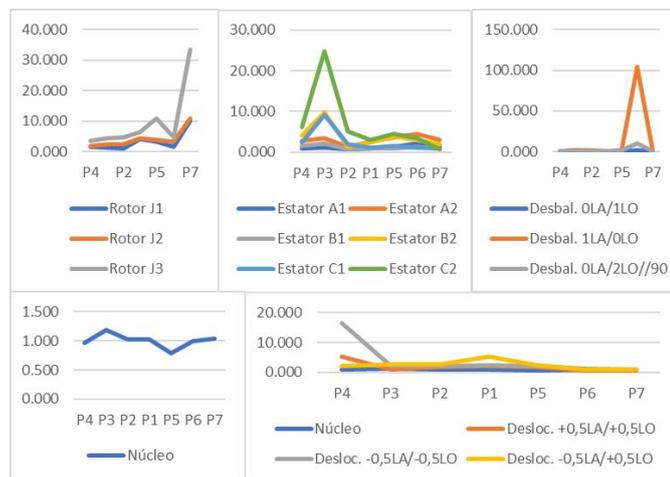
(c) 7 kVA.

Fonte: Próprio autor.

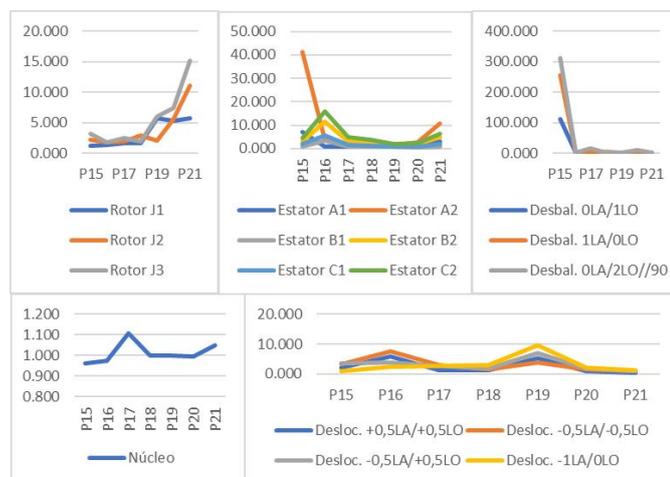
Figura 70 – Variação da métrica global assimetria de vibração com variação do fator de potência mantendo a potência aparente constante (seqüências 4, 5 e 6).



(a) 3 kVA.



(b) 4,5 kVA.



(c) 7 kVA.

Fonte: Próprio autor.

para faltas de estator conforme a excitação da máquina aumenta. A resposta da falta de núcleo é menos uniforme, porém vê-se também uma tendência geral de aumento. Para a falta de desbalanceamento, mais uma vez não há impacto do ponto de operação. A falta de deslocamento de eixo para baixa potência ativa não apresenta característica clara de tendência da variação da métrica. Para uma potência intermediária, nota-se uma tendência média crescente e outra decrescente, respectivamente, para o eixo inclinado e deslocado verticalmente e para o eixo paralelo deslocado para cima. As outras condições de falta também apresentam comportamentos contrários entre si: o deslocamento vertical do eixo para baixo causa maior variação da métrica em níveis maiores de potência reativa, enquanto a inclinação do eixo combinada com deslocamento vertical reduz a diferença para o valor de referência nessas condições, independentemente de sub ou sobreexcitação.

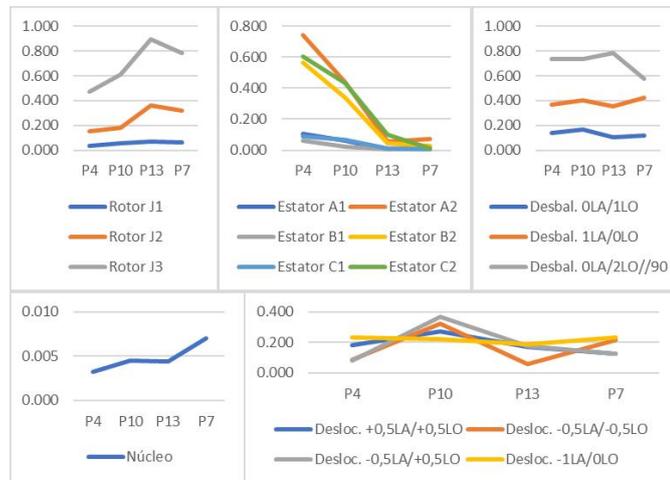
Vê-se uma variação similar da métrica curtose para faltas elétricas se comparada ao RMS, conforme Figura 72. A variação para faltas de rotor aumenta conforme o aumento da excitação da máquina, já para faltas de estator o comportamento é contrário. As tendências da variação dessa métrica não são conclusivas para a falta de núcleo do estator e de desbalanceamento e deslocamento de eixo entre diferentes pontos de operação.

Por fim, pela Figura 73, há uma característica de aumento da variação dos valores globais de assimetria para maior excitação do gerador com a falta de rotor, embora, novamente, de maneira mais irregular para essa métrica. Com a falta de estator, também há irregularidade notável, impedindo a determinação de alguma tendência para a assimetria. A falta de núcleo não apresentou influência no valor da métrica. Com relação às outras métricas, a assimetria apresentou a variação mais notável para a falta de desbalanceamento, embora haja variabilidade entre os níveis de potência ativa. Para a maior condição de potência ativa, o aumento do fator de potência gerou também redução da amplitude de assimetria. Para a potência intermediária, não há uma tendência definida. Já para o menor nível de potência ativa, vê-se aumento da métrica com o aumento do fator de potência. A excentricidade causa uma tendência de decaimento da assimetria com o aumento da excitação do gerador, no caso de menor potência ativa. Para o caso intermediário de potência, a resposta é irregular entre as condições de falta: enquanto para alguns a assimetria decai com o aumento da excitação da máquina, para outros ela aumenta para valores maiores de fator de potência.

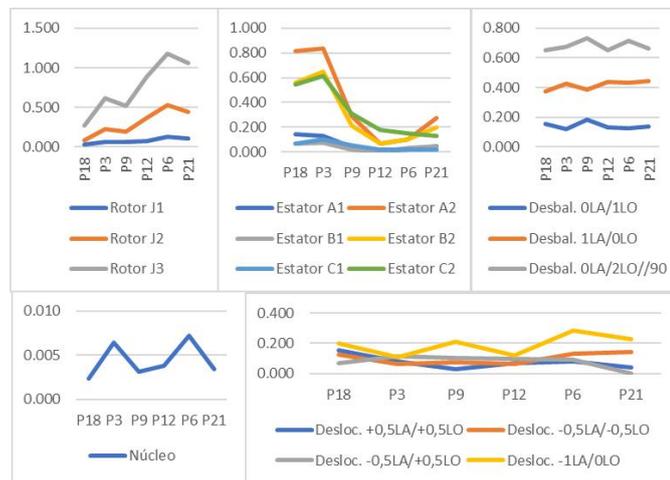
5.4.4 Resumo das considerações sobre a variação das métricas globais

De maneira geral, demonstrou-se a variação da amplitude das três métricas globais dos sinais de vibração calculadas para diferentes condições de faltas entre conjuntos de pontos de operação ordenados conforme a excitação da máquina. Observaram-se características pontuais de variação entre diferentes condições de uma mesma falta e entre tipos de falta diferentes, para demonstrar a complexidade do comportamento dos sinais estudados. Como parte das considerações foi dada em afirmações gerais, a Figura 74 mostra outra forma de visualização para condensar os resultados e simplificar as conclusões. Essa visualização oculta alguns

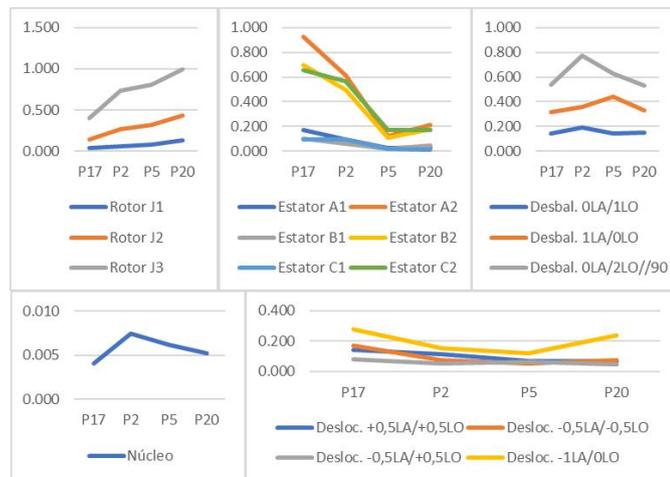
Figura 71 – Variação da métrica global RMS de vibração com variação da potência reativa mantendo a potência ativa constante (sequências 1, 2 e 3).



(a) 1,5 kW.



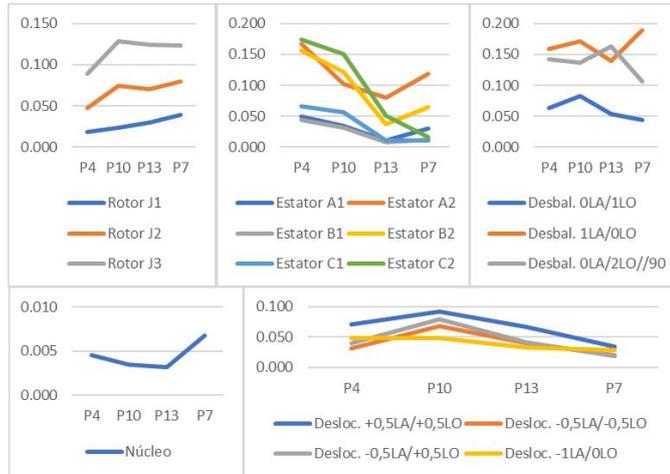
(b) 2,5 kW.



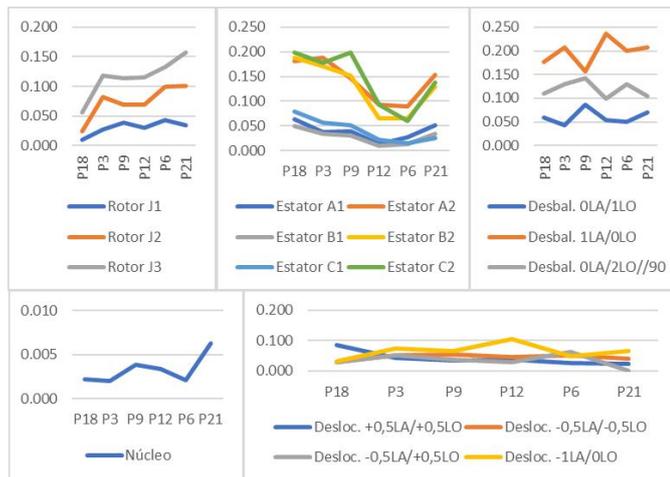
(c) 3,5 kW.

Fonte: Próprio autor.

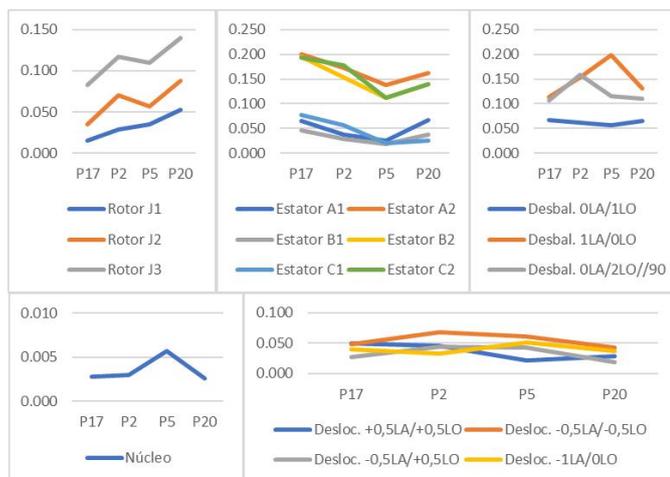
Figura 72 – Variação da métrica global curtose de vibração com variação da potência reativa mantendo a potência ativa constante (sequências 1, 2 e 3).



(a) 1,5 kW.



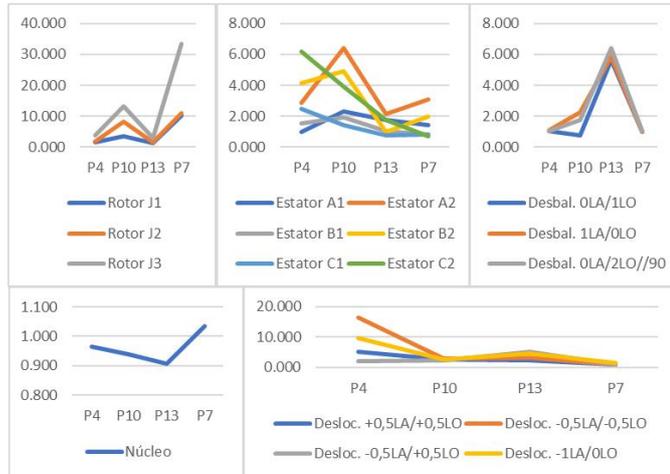
(b) 2,5 kW.



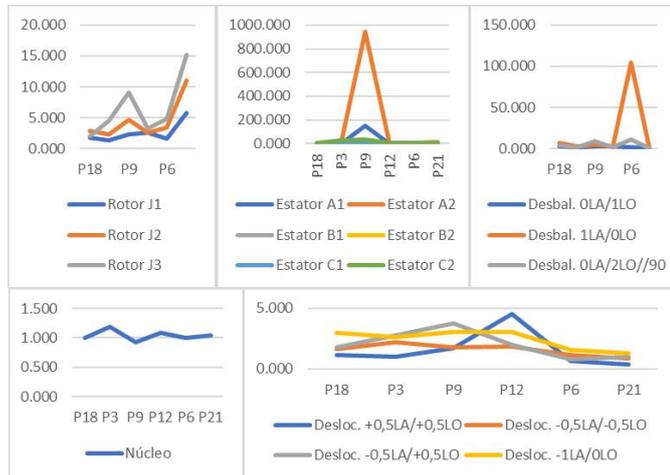
(c) 3,5 kW.

Fonte: Próprio autor.

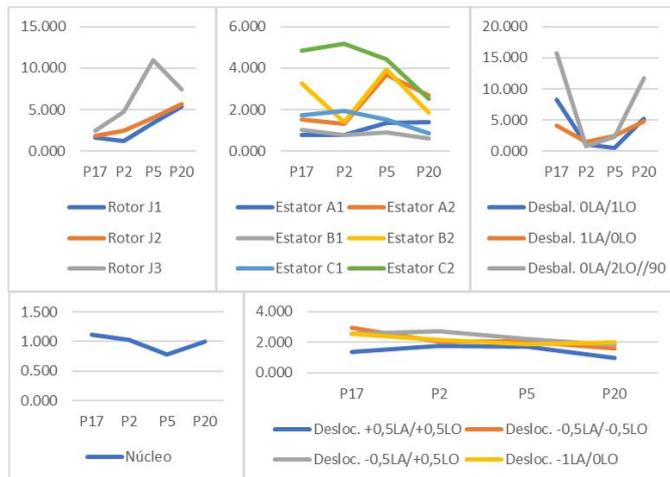
Figura 73 – Variação da métrica global assimetria de vibração com variação da potência reativa mantendo a potência ativa constante (sequências 1, 2 e 3).



(a) 1,5 kW.



(b) 2,5 kW.

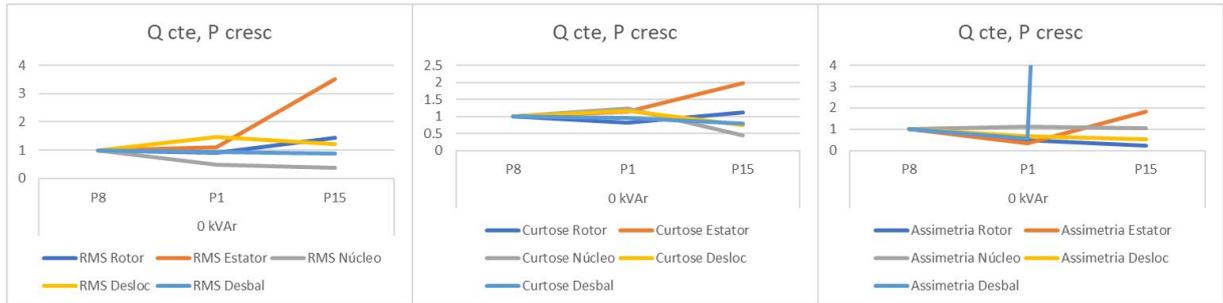


(c) 3,5 kW.

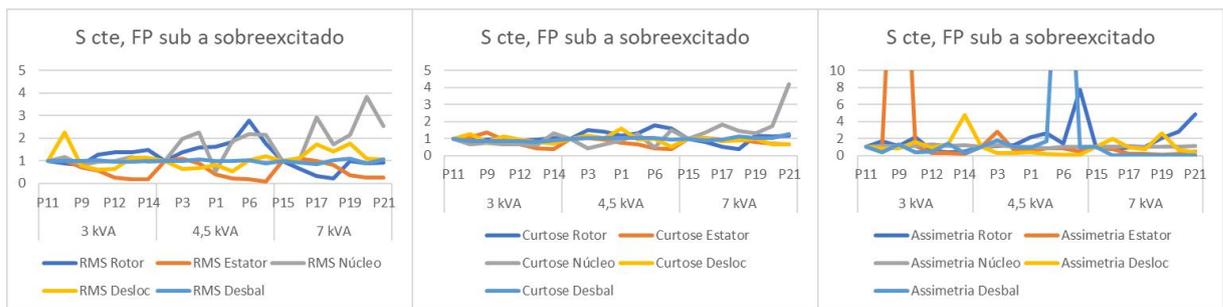
Fonte: Próprio autor.

detalhes, os quais podem ser consultados nas seções anteriores. Para gerar a Figura 74, os dados foram condensados em mais um nível, calculando-se a média para cada tipo de falta, entre as condições de falta. Por fim, para evidenciar melhor a tendência da variação para cada falta, normalizaram-se as curvas com relação ao valor para o ponto de operação inicial. As conclusões no contexto geral de cada falta coincidem com as já apresentadas anteriormente.

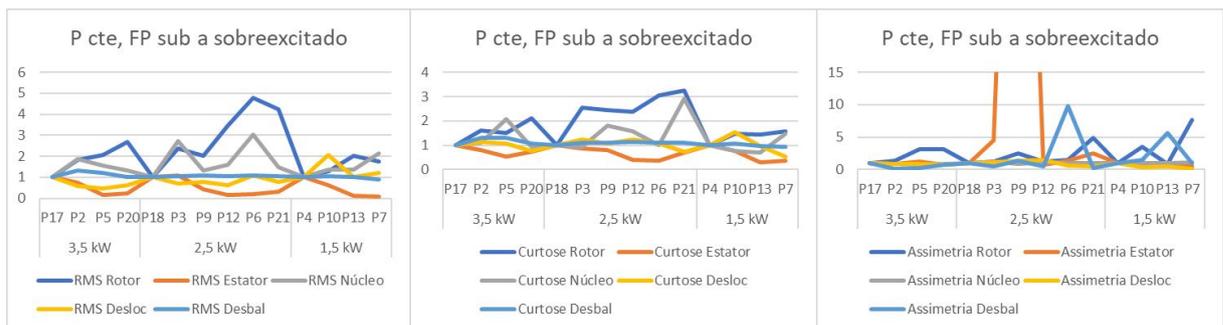
Figura 74 – Simplificação da variação das métricas globais com relação ao ponto de operação, considerando média entre condições de cada tipo de falta e normalização.



(a) Potência reativa nula com variação da potência ativa.



(b) Potência aparente constante com variação do fator de potência.



(c) Potência ativa constante com variação da potência reativa.

Fonte: Próprio autor.

O Quadro 4 apresenta um resumo das conclusões. Classificaram-se as tendências de variação com relação ao aumento da excitação do gerador entre crescente, decrescente, neutra, no caso de pouca variação, e indefinida, quando as variações observadas são significativas sem se encaixar nos casos anteriores. Adicionalmente, considerou-se um caso especial para as tendências crescente e decrescente, adicionando-se o sufixo ".FP" para indicar que a variação mencionada é com relação ao aumento do fator de potência, em vez da excitação da máquina.

Indicou-se também com "*" os casos apontados como indefinidos, porém que possuem lógicas observáveis, como por exemplo, característica crescente da métrica com o aumento do fator de potência subexcitado, mas decrescente com o aumento do fator de potência sobreexcitado. Novamente, as características das variações foram apresentadas conforme as sequências de ensaio apresentadas na Seção 4.3.

Quadro 4 – Resumo da tendência de variação das amplitudes das métricas globais para cada falta. Classificação em tendência crescente (C), decrescente (D), neutra (N) e indefinida (I) com relação ao aumento da excitação do gerador. O sufixo FP indica que a variação indicada é com relação ao aumento do fator de potência, em vez da excitação. A sinalização por "*" indica que há uma tendência observável que não se encaixa nas classificações escolhidas.

Falta	Métrica	Sequência de ensaio						
		0	1	2	3	4	5	6
Rotor	RMS	C	C	C	C	C	C	I
	Curt.	I	C	C	C	N	C	I
	Assim.	D	I	I	C	C.FP	C	C
Estator	RMS	C	D	D.FP	D.FP	D	D	D
	Curt.	C	D	D.FP	D.FP	D	D	D
	Assim.	I	N	I*	N	I	N	D
Núcleo	RMS	D	C	I	I	N	I	C
	Curt.	I	D.FP	I	C.FP	N	N	C
	Assim.	N	N	N	N	N	N	N
Deslocamento	RMS	I	I	I	D.FP	I	I	C.FP
	Curt.	I	C.FP	I	C.FP	D	C.FP	D
	Assim.	D	D	C.FP	N	C	N	I
Desbalanceamento	RMS	N	N	N	I	N	N	N
	Curt.	D	N	N	C.FP	D	N	C
	Assim.	D	C.FP	I	D.FP	N	I	N

Fonte: Próprio autor.

5.5 ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DAS MÉTRICAS GLOBAIS

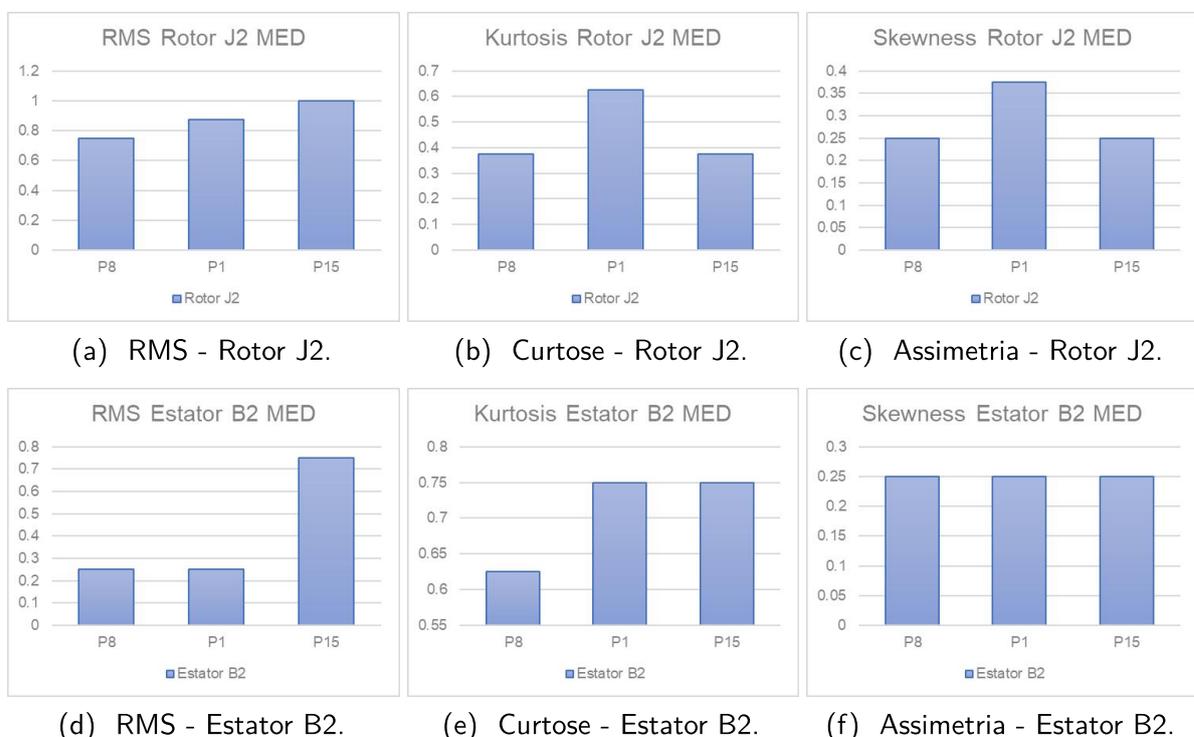
Esta seção compila os dados de vibração dos ensaios de outra forma, para avaliar a sensibilidade das métricas globais. A avaliação da detecção através dos limiares foi realizada comparando diretamente os valores normalizados das métricas com os limiares. Como visto na Figura 65, qualquer cor presente é indício de sensibilização à falta, seja por alarme ou *trip* para aumento ou redução dos valores, enquanto a presença de células brancas ou cinzas indica que não houve sensibilização.

Para quantificar a sensibilidade às faltas, aplicou-se a contagem de ultrapassagem dos limiares definidos de duas formas: com relação aos sensores, para cada PO, e sobre os POs, para cada sensor. No primeiro caso, podem ser feitas as mesmas progressões de condição operativa da Seção 5.4. Para o segundo, é possível comparar a resposta dos sensores, ou seguir

com mais uma sintetização dos dados para fornecer uma visão geral da sensibilidade de cada métrica, como será mostrado adiante.

Para fim de simplificação, serão mostrados apenas os casos de progressão do ponto de operação com potência reativa nula, variando a potência ativa fornecida, e com potência ativa constante, variando a potência reativa fornecida, respectivamente, nas Figuras 75 e 76. Pela Figura 75, de maneira similar ao comportamento da variação das métricas comentado na Seção 5.4, evidencia-se que o aumento da potência ativa fornecida pelo gerador favorece a sensibilidade da métrica RMS para as faltas de rotor e estator. Além disso, pela Figura 76, repete-se também a conclusão de que o aumento da excitação do rotor aumenta a sensibilidade dessa métrica para a falta de rotor e a reduz para a falta de estator. Para a curtose e assimetria, a tendência da sensibilidade é indefinida com o aumento da potência ativa. Já com a variação da potência reativa, o comportamento das métricas curtose e assimetria para a falta de rotor é similar ao caso RMS. Assim como para a métrica RMS, a curtose apresenta tendência decrescente de sensibilização pela falta de estator com o aumento da excitação da máquina. Porém, para a assimetria, o comportamento é indefinido. Há grande variabilidade entre as diferentes condições de ensaio e pontos de operação, principalmente com relação às faltas mecânicas. Por isso, a análise da sensibilidade das métricas às faltas mecânicas será omitida.

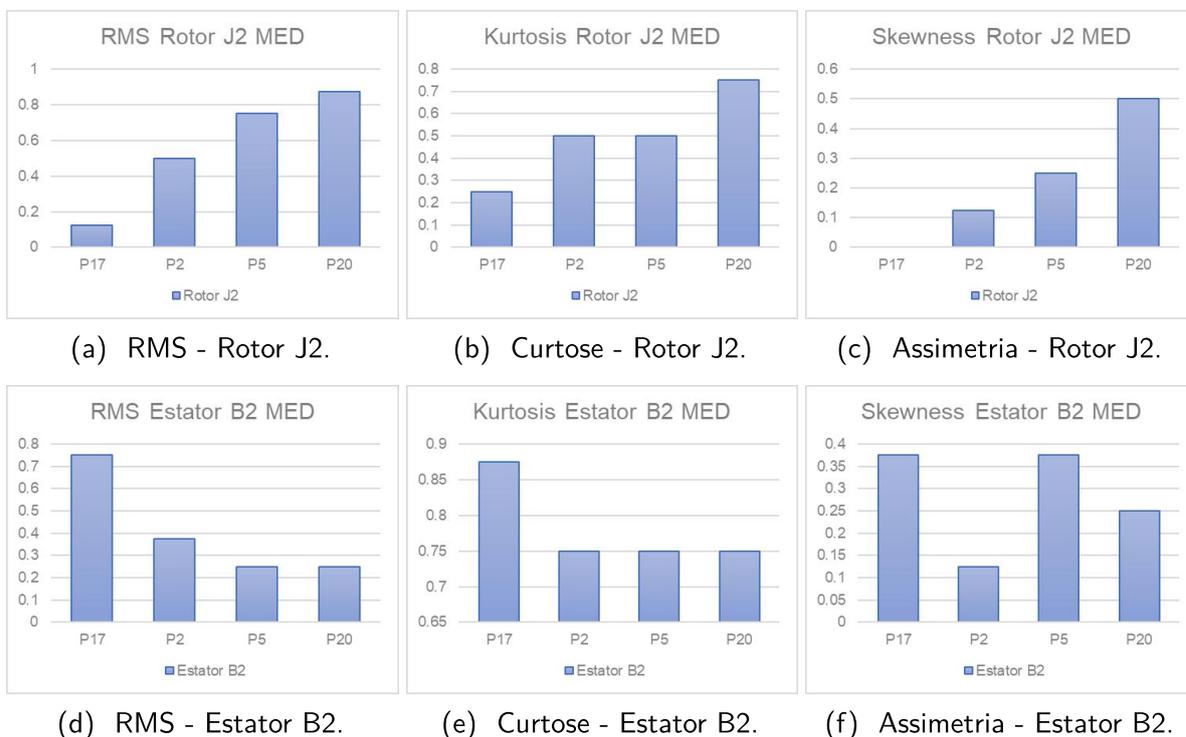
Figura 75 – Ilustração da sensibilização das métricas globais por faltas elétricas com relação ao ponto de operação: potência reativa nula com variação da potência ativa (Sequência Zero).



Fonte: Próprio autor.

Com relação à segunda análise proposta para avaliar a sensibilidade das métricas globais

Figura 76 – Ilustração da sensibilização das métricas globais por faltas elétricas com relação ao ponto de operação: potência ativa constante com variação da potência reativa (Sequência 3).



Fonte: Próprio autor.

às faltas, a Figura 77 apresenta a distribuição de POs sensibilizados para cada sensor em cada condição de falta e para cada métrica. A visualização da Figura 77 dá indícios sobre as posições mais sensíveis para os sensores em cada situação. As faltas de rotor e estator sensibilizaram mais os sensores verticais com a métrica RMS. Já com a curtose, o destaque foi para os sensores posicionados no mancal do lado acoplado do gerador. Para a assimetria, a resposta diferiu mais entre as faltas de rotor e estator: para falta de rotor, destacou-se o sensor horizontal na carcaça, seguido pelo axial no lado acoplado e pelo vertical no lado não acoplado; já para falta de estator, o sensor axial do lado acoplado foi o mais sensibilizado, mas também se ressaltou o sensor horizontal, no mesmo lado do gerador. Para o deslocamento de eixo, a sensibilidade da métrica RMS não desviou muito do comportamento já observado para as faltas elétricas. No caso da curtose, a situação se inverteu e os sensores do lado não acoplado demonstraram maior sensibilização, embora todas as posições se mostraram sensíveis para essa métrica, exceto pelo sensor horizontal do lado não acoplado. A assimetria, nesse caso, teve forte destaque para os sensores do lado não acoplado e para os dois sensores axiais, mas novamente o sensor horizontal do lado não acoplado foi uma exceção. Por fim, para a falta de desbalanceamento, os sensores axiais demonstraram maior generalização na sensibilização às intensidades de desbalanceamento testadas, para as métricas RMS e curtose. Para a assimetria, o destaque foi novamente para o sensor axial do lado não acoplado, mas todos os sensores se

ressaltaram também, exceto pelos horizontais.

Figura 77 – Simplificação da sensibilização das métricas globais às faltas com relação aos sensores.



(a) RMS.



(b) Curtose.



(c) Assimetria.

Fonte: Próprio autor.

Para fornecer uma visão geral mais direta sobre a detecção das faltas pelas métricas, a Tabela 4 considera mais um nível de sintetização dos dados. Realiza-se a média da porcentagem de POs sensibilizados entre os sensores e condições de falta para cada tipo de falta. Os resultados mostram que a métrica curtose apresentou um melhor desempenho de sensibilização no contexto geral, seguida pelo RMS e assimetria, considerando a equivalência dos limiares determinados para as métricas. Para as faltas de rotor, a curtose foi semelhante à métrica RMS. Para as faltas de estator, a curtose apresentou o maior destaque. A métrica também apresentou um desempenho bastante superior para as faltas de núcleo do estator. Embora ainda seja uma proporção relativamente baixa de detecção, esse tipo de falta se mostrou muito sutil em todos os contextos considerados. Nota-se que a assimetria também foi capaz de detectar alguns casos de falta de núcleo, fenômeno que passou completamente despercebido pelo valor clássico de RMS. A detecção de falta de deslocamento de eixo foi outro destaque para a métrica curtose, com desempenho bastante superior. Por fim, o desbalanceamento foi detectado em proporções semelhantes entre a curtose e o RMS.

Tabela 4 – Proporção de pontos de operação para os quais houve sensibilização das métricas. Média entre os sensores e entre as condições de falta para cada tipo de falta.

	RMS	Curtose	Assimetria
Rotor	57.34%	52.31%	25.13%
Estator	21.83%	57.54%	18.02%
Núcleo	0.00%	11.31%	3.77%
Deslocamento	24.36%	43.70%	16.22%
Desbalanceamento	69.71%	71.30%	13.10%
Geral	35.85%	53.07%	17.15%

Fonte: Próprio autor.

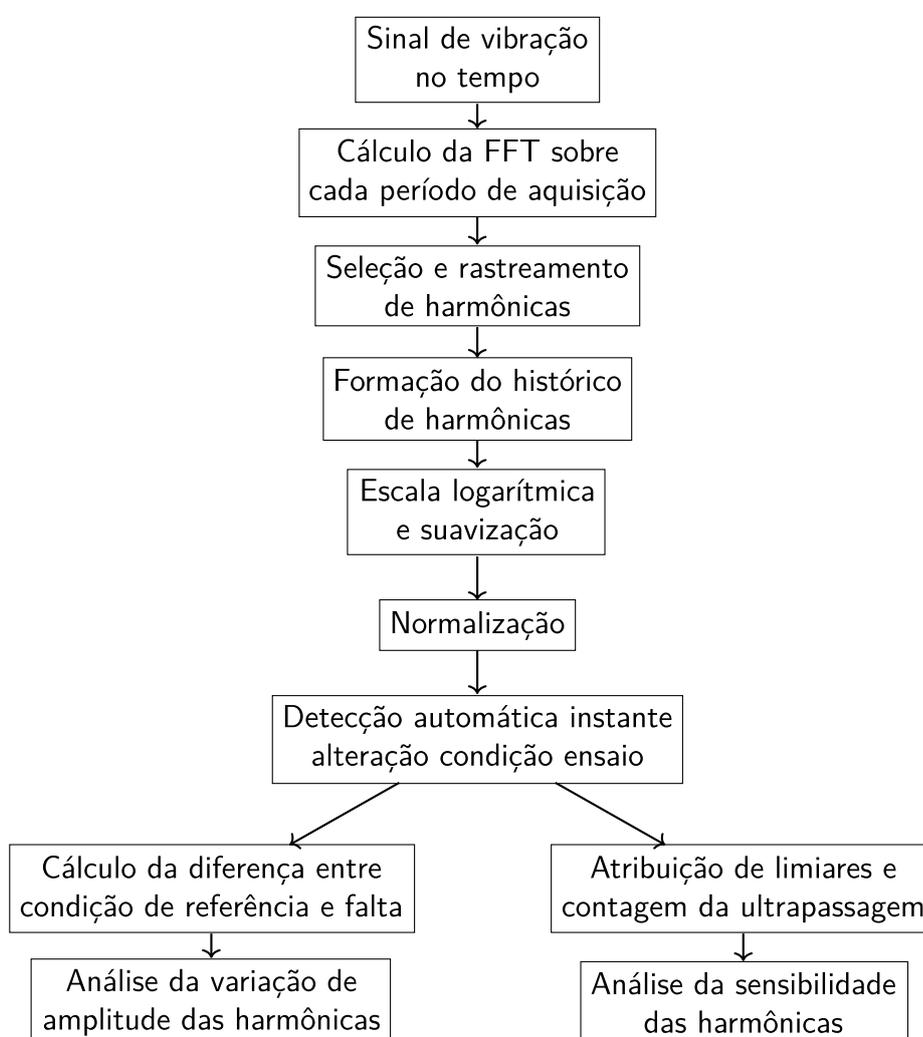
5.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou as análises realizadas sobre os históricos de valores globais de vibração obtidos a partir de ensaios experimentais. Tratou-se dos processamentos sobre os sinais de vibração para a obtenção dos históricos das métricas RMS, curtose e assimetria ajustados para possibilitar comparações diretas entre as métricas, com algumas automatizações para a formação do banco de dados. Apresentou-se o comportamento de variação das métricas entre as faltas testadas com relação aos pontos de operação testados e realizou-se uma análise de sensibilização com limiares determinados para as métricas alternativas ao RMS através de uma relação de similaridade, cuja metodologia de obtenção também foi apresentada. Com relação ao comportamento das métricas, nota-se que há uma complexidade envolvida nos padrões de variação das métricas com relação aos pontos de operação. Assim, a utilização de técnicas modernas de processamento e análise de dados, como aprendizado de máquina, pode ser uma metodologia adequada para a análise dos dados. O presente trabalho visa apenas uma investigação inicial da questão. Ainda assim, realizaram-se algumas considerações sobre o comportamento das métricas, principalmente com relação às faltas de origem elétrica. No contexto da análise de sensibilidade das métricas, os dados dos ensaios foram sintetizados para a observação de taxas de sensibilização sobre cada tipo de falta, considerando os pontos de operação para os quais os limiares estipulados foram ultrapassados. Essa abordagem mostrou que a métrica curtose apresentou um maior nível sensibilização do que as demais, além de outras considerações que incentivam o uso das três métricas em conjunto para a detecção de faltas. Demonstrou-se que as métricas testadas têm potencial para a detecção de anomalias com maior assertividade, principalmente considerando a combinação delas, se comparado a técnicas tradicionais de observação apenas do valor RMS dos sinais de vibração.

6 ANÁLISES E RESULTADOS SOBRE O HISTÓRICO DE HARMÔNICAS

Este capítulo apresenta as análises realizadas sobre o conteúdo harmônico dos mesmos sinais de vibração do capítulo de resultados anterior. Abordam-se os processamentos realizados sobre o histórico e a metodologia utilizada para possibilitar a análise do comportamento das harmônicas com relação às faltas e aos pontos de operação testados. Apresenta-se também uma estratégia para a detecção de faltas diretamente a partir do histórico de harmônicas, alternativamente ao uso de valores globais para a detecção de anomalias em ativos. A Figura 78 mostra um diagrama relacionando os processamentos e as análises realizadas a partir dos sinais temporais de vibração para obter os resultados sobre os históricos de amplitudes das harmônicas.

Figura 78 – Etapas para análise do histórico de harmônicas.



Fonte: Próprio autor.

6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROCESSAMENTOS SOBRE O HISTÓRICO DE HARMÔNICAS

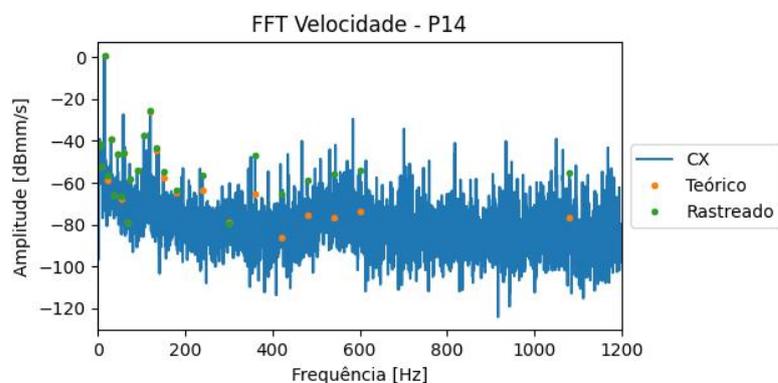
Cada ponto do histórico de harmônicas equivale a um espectro de frequência medido, como os mostrados na Seção 4.2.3. Embora existam metodologias de análise que consideram todo o espectro para análises de tempo-frequência, como é apresentado no Apêndice A, essas abordagens exigem esforços computacionais elevados. Então, para o presente trabalho, selecionaram-se algumas harmônicas com base em literaturas da área e em boas práticas da indústria:

- Sub-harmônicas de um terço, dois quintos e metade da frequência fundamental mecânica;
- Inter-harmônicas de 1,5, 2,5, 3,5 e 4,5 vezes a frequência fundamental mecânica, relativas a passos de metade dessa frequência localizadas entre as fundamentais mecânica e elétrica até ultrapassar a frequência fundamental elétrica.
- Dez primeiras harmônicas mecânicas;
- Dez primeiras harmônicas elétricas;
- Frequência de ranhura, correspondente ao número de ranhuras vezes a frequência de rotação.

Para formar os históricos com as harmônicas selecionadas, utilizou-se o algoritmo aprimorado por Wengerkievicz (2021) para rastrear-las no espectro de frequência. Esse processamento se faz necessário devido à variação da frequência da rede elétrica, comum a qualquer sistema de potência. No local de realização dos ensaios desse trabalho, a frequência da rede pode variar entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (CELESC, 2023). Na frequência de ranhura de 1080 Hz, a maior monitorada nesse trabalho, isso equivaleria a uma harmônica entre 1078,2 Hz e 1081,8 Hz. Nesse caso, seria incorrido em erro ao considerar a harmônica exata teórica, conforme ilustrado na Figura 79 com dados reais de ensaio. Nesta figura, mostra-se o espectro de frequência do sensor CX em azul para o gerador operando em condição sadia sob o ponto de operação P14, bem como a amplitude das harmônicas teóricas em laranja e das harmônicas rastreadas em verde. Outro problema possível é observado em harmônicas de ordem ainda maior. Considerando a harmônica de 12480 Hz, de ordem 832, a mais próxima da frequência de Nyquist para esse trabalho, ela poderia variar entre 12459,2 Hz e 12500,8 Hz. Essa faixa de valores compreende as harmônicas de ordem 831 e 833, o que poderia gerar má interpretação dos dados.

Ao selecionar apenas algumas harmônicas, obviamente, deixa-se de considerar parte do sinal para as análises. Uma forma de contabilizar a perda de informações do sinal é através do cálculo da energia. Para isso, a partir do histórico, tendo-se o valor médio das amplitudes absolutas das harmônicas nas regiões correspondentes a cada condição de ensaio, para cada

Figura 79 – Comparação das harmônicas teóricas com as rastreadas no espectro harmônico do sinal de velocidade de vibração.

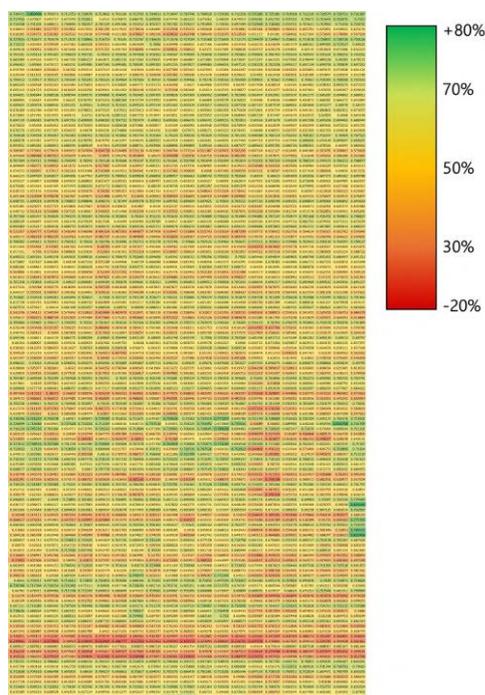


Fonte: Próprio autor.

sensor e ponto de operação, calculou-se a energia dada pela raiz da soma dos quadrados das amplitudes das harmônicas. Para relacionar com a energia total do sinal em cada condição, dividiu-se esse valor pelo valor RMS, que representa a energia média do sinal. A Figura 80 mostra um mapa de cores da porcentagem de energia do sinal representada pelas harmônicas monitoradas. As linhas são relativas às 17 condições de falta, cada uma com 8 sensores, e as colunas se referem aos 21 pontos de operação. A maior representação obtida foi de 82,4% e a menor foi de 15,3%.

A variabilidade da representação dos sinais se mostrou baixa entre os POs, conforme pode ser visto na Tabela 5. Nesta tabela, compara-se a média da porcentagem de representação dos sinais de vibração pelas harmônicas rastreadas entre os sensores e entre as faltas testadas, considerando todos os sensores, faltas e pontos de operação para os casos aplicáveis. Pela tabela de energia média, vê-se que há uma pior representação dos sinais pelos sensores axiais, porém o sensor vertical do lado acoplado também apresentou uma característica ruim. A média geral foi de 62,8%, com pouca variabilidade entre os tipos de falta. Porém, o pior caso de representação do sinal pelas harmônicas escolhidas foi para a falta de desbalanceamento. Mais especificamente, o caso de uma massa aplicada ao lado acoplado do gerador teve a pior média, de 49,2% de representação (visível apenas no mapa de cores). Os sensores vertical e axial dos dois mancais apresentaram a pior representação para falta de desbalanceamento. Como a máquina do laboratório é horizontal, espera-se que uma alteração do centro de massa do gerador cause mais esforços e impacte mais os mancais na direção vertical. Supõe-se a hipótese de que esse tipo de falta cause uma alteração maior na rotação da máquina do que as demais. Isso reduziria a precisão do rastreamento das harmônicas, visto que a frequência fundamental seria variável durante o período de aquisição. Assim, ao realizar a FFT sobre o sinal no tempo com frequência variável, o espectro em frequência obtido é afetado. Realizou-se uma investigação específica para o ponto de operação P14. Verificou-se que a rotação para a

Figura 80 – Mapa de cores da porcentagem da energia do sinal representada pelas harmônicas monitoradas para todos os pontos de operação, tipos de falta e sensores testados.



Fonte: Próprio autor.

condição de desbalanceamento *Desbal. 1LA/0LO* variou 1,49 rpm, enquanto para a condição sadia a variação se limitou a 0,92 rpm e, para a pior condição de falta elétrica de rotor, o valor foi de 1,09 rpm. Isso reforça a hipótese assumida, pois, embora exista variação da rotação do gerador em todos os casos, a maior diferença na rotação foi para a falta de desbalanceamento. Esse resultado não é utilizado diretamente no trabalho, mas é importante constatá-lo, visto que as harmônicas rastreadas podem ser insuficientes para conclusões assertivas sobre conteúdo harmônico dos sinais de vibração quando eles não são suficientemente representados pelas harmônicas avaliadas, reduzindo a confiabilidade sobre as análises.

O histórico das harmônicas rastreadas para o sensor CX, a título de exemplo, é mostrado na Figura 81 para o ensaio de retirada de espiras do rotor no ponto de operação P8. Nota-se que harmônicas não sensibilizadas possuem fundamentos de amplitude similares a um ruído de fundo, o que prejudica a visualização. Para melhorar a interpretação dos históricos, realizou-se um procedimento de suavização através de média móvel, similar ao que foi descartado na Seção 5.2 para a remoção de *outliers*, pois no caso do histórico de harmônicas essa etapa se mostra necessária. O resultado obtido realizando a média móvel com 4 amostras é apresentado na Figura 82.

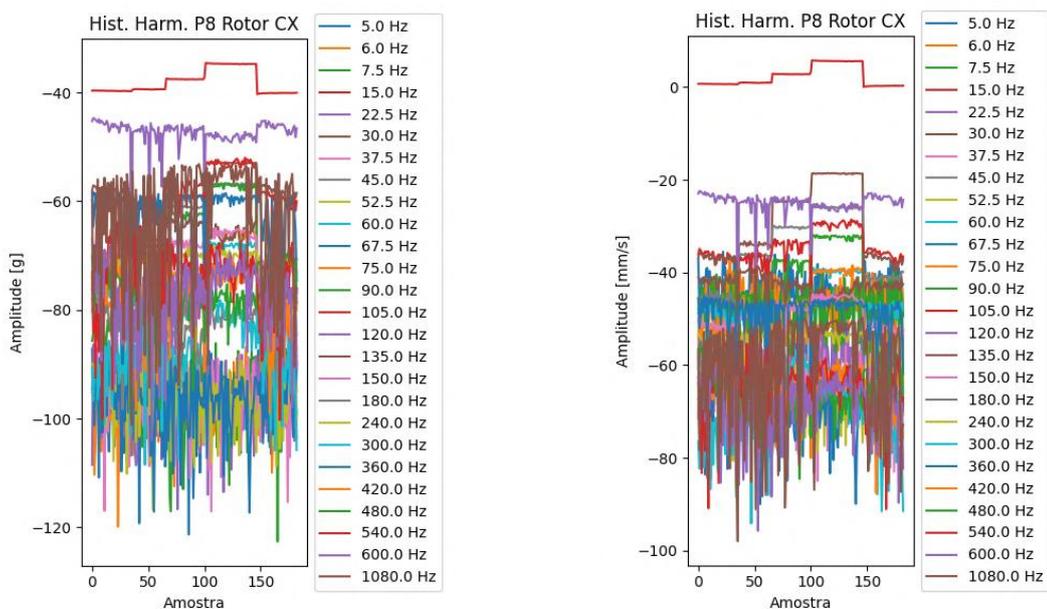
Para o caso do histórico de amplitudes de harmônicas, não existe uma razão obrigatória para a consideração de um tipo de sinal com relação ao outro. Entretanto, como as frequências monitoradas se limitam a valores relativamente baixos e as análises globais do Capítulo 5

Tabela 5 – Porcentagem de representação dos sinais de vibração pelas harmônicas rastreadas com relação aos sensores e tipos de falta, entre os pontos de operação.

	Falta	Sensor								Média
		CX	CY	LAX	LAY	LAZ	LOX	LOY	LOZ	
Representação Mínima	Rotor	68.9%	64.3%	67.6%	51.8%	43.0%	68.9%	58.0%	51.0%	43.0%
	Estator	65.9%	57.1%	58.9%	42.3%	44.5%	68.8%	41.5%	49.8%	41.5%
	Núcleo	70.0%	53.9%	67.3%	37.0%	44.3%	69.9%	35.7%	50.7%	35.7%
	Desloc.	63.4%	50.1%	61.1%	35.9%	25.9%	64.1%	34.5%	29.0%	25.9%
	Desbal.	66.5%	44.0%	58.4%	34.1%	15.3%	65.8%	27.4%	21.8%	15.3%
	Média		63.4%	44.0%	58.4%	34.1%	15.3%	64.1%	27.4%	21.8%
Representação Máxima	Rotor	80.9%	72.5%	72.5%	68.3%	68.5%	73.4%	71.8%	67.6%	80.9%
	Estator	70.9%	69.4%	69.8%	67.0%	62.9%	71.1%	67.1%	65.7%	71.1%
	Núcleo	70.5%	67.4%	69.5%	51.1%	60.2%	70.5%	63.5%	63.5%	70.5%
	Desloc.	77.7%	82.4%	78.0%	63.3%	77.2%	77.1%	78.9%	82.2%	82.4%
	Desbal.	72.3%	74.0%	71.8%	62.1%	68.8%	73.2%	71.9%	72.5%	74.0%
	Média		80.9%	82.4%	78.0%	68.3%	77.2%	77.1%	78.9%	82.2%
Representação Média	Rotor	70.8%	67.6%	69.8%	63.3%	62.0%	70.7%	66.1%	63.3%	66.7%
	Estator	69.8%	65.8%	67.5%	57.5%	55.4%	70.1%	60.2%	58.8%	63.1%
	Núcleo	70.3%	63.5%	68.8%	45.9%	52.6%	70.2%	55.4%	57.5%	60.5%
	Desloc.	70.4%	65.8%	69.0%	52.0%	51.0%	70.3%	62.5%	58.9%	62.5%
	Desbal.	69.9%	62.6%	67.1%	47.6%	49.9%	69.8%	56.0%	54.6%	59.7%
	Média		70.2%	65.4%	68.3%	54.8%	54.4%	70.2%	60.8%	58.8%

Fonte: Próprio autor.

Figura 81 – Visualização do histórico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração do sensor CX no domínio da frequência durante ensaio de falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8.

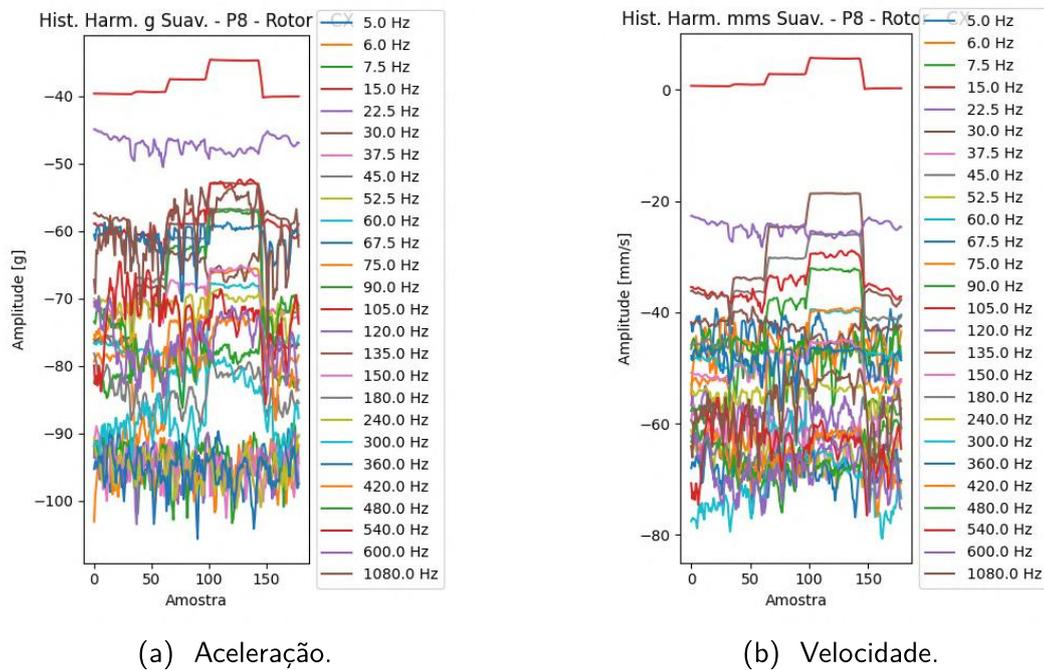


(a) Aceleração.

(b) Velocidade.

Fonte: Próprio autor.

Figura 82 – Visualização do histórico dos sinais de aceleração e velocidade de vibração do sensor CX no domínio da frequência durante ensaio de falta elétrica de retirada de espiras do rotor para o ponto de operação P8 com processamento de suavização.

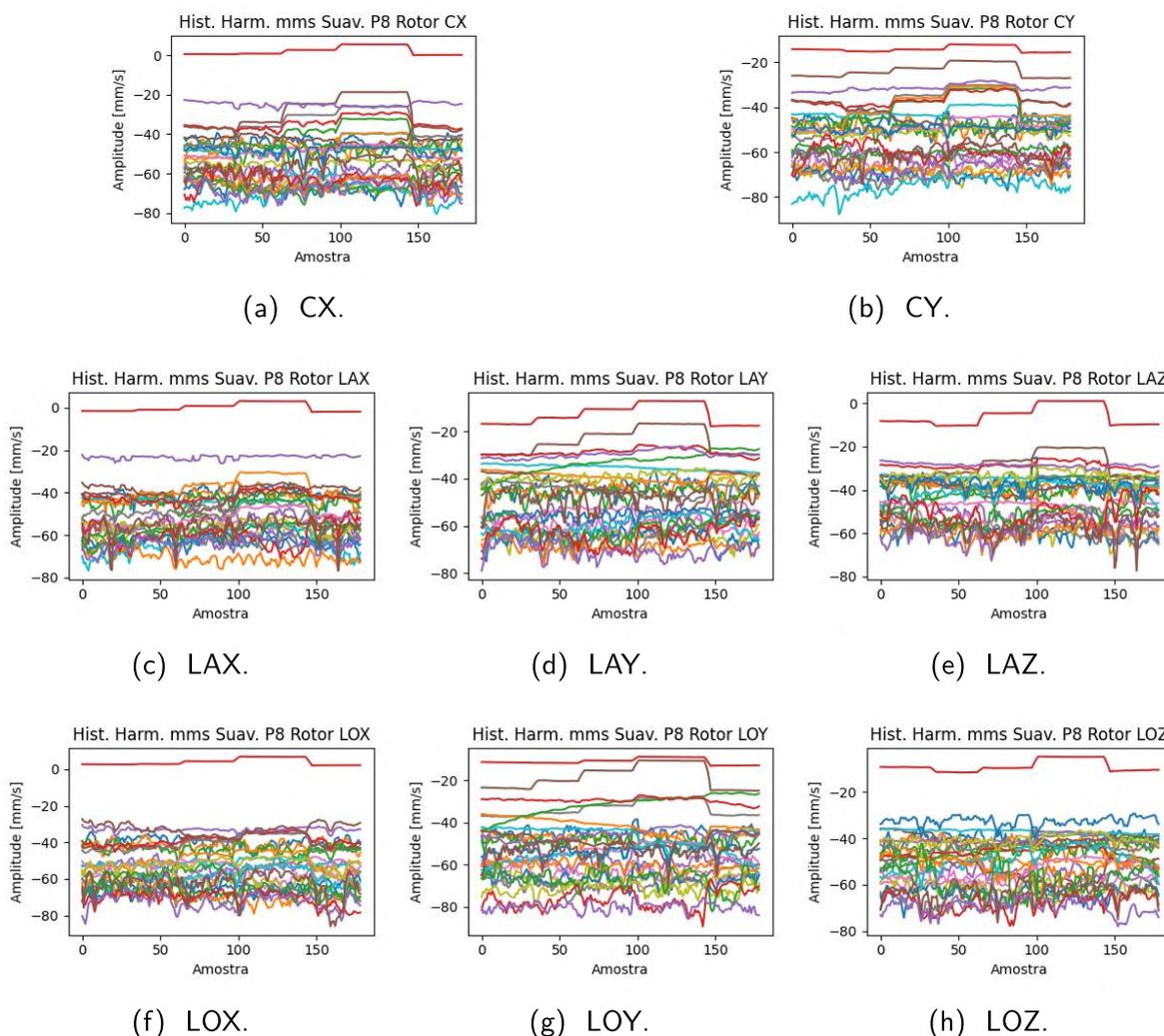


Fonte: Próprio autor.

consideraram os sinais de velocidade, o presente capítulo utilizará a mesma abordagem na continuidade do trabalho. Para fim de ilustração, as Figuras 83 e 84 mostram a variabilidade do espectro harmônico suavizado, respectivamente, entre os demais sensores para o mesmo tipo de falta e entre os outros tipos de falta para o mesmo sensor.

Por fim, consideraram-se as harmônicas normalizadas com relação aos seus valores de referência em condição sadia, da mesma forma como foi feito para os valores globais. A Figura 85 mostra o resultado do processamento de normalização realizado para um exemplo de falta elétrica e outro de falta mecânica no ponto de operação P8.

Figura 83 – Tendência das harmônicas dos sinais de velocidade de vibração durante o ensaio de retirada de espiras do rotor sob ponto de operação P8 para os demais sensores.



Fonte: Próprio autor.

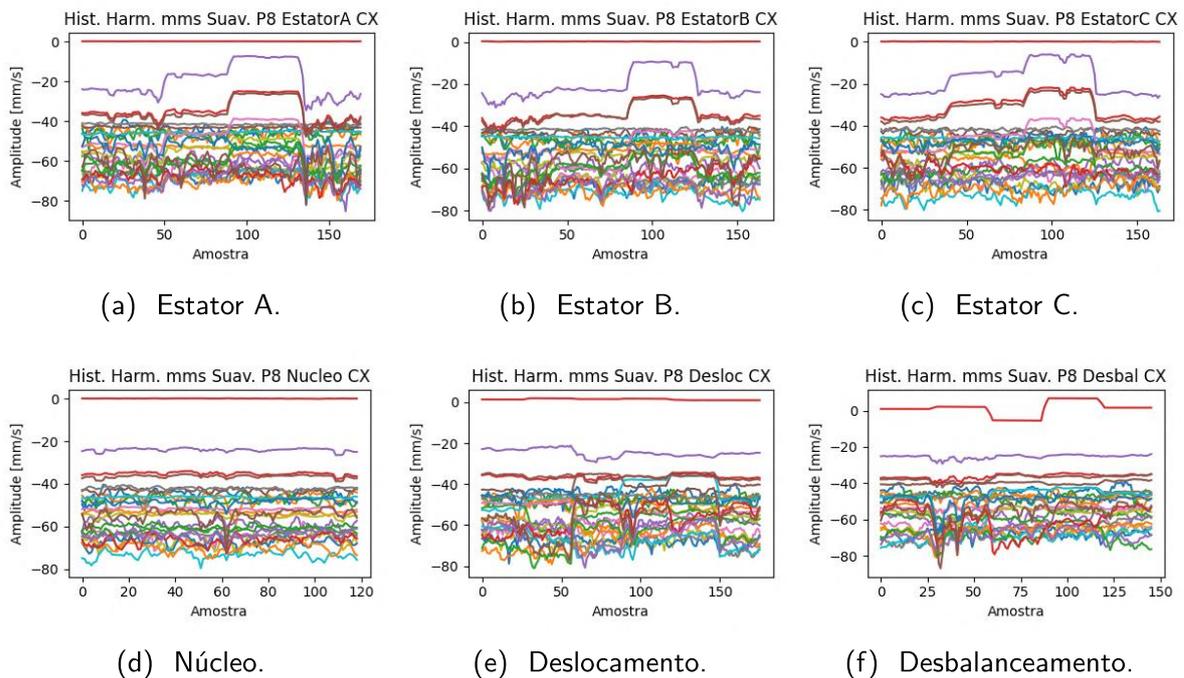
6.2 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DO HISTÓRICO DE AMPLITUDES DE HARMÔNICAS

Para selecionar os períodos corretos de cada condição de ensaio, utilizou-se o mesmo procedimento para identificar automaticamente os instantes de alteração no histórico global, apresentado na Seção 5.3. Dessa forma, calculou-se a média de amplitude de cada harmônica nos intervalos desejados.

Para explorar a variação do espectro dos sinais de maneira global, para cada sensor, condição de falta e ponto de operação, calculou-se a diferença entre a amplitude da harmônica e seu valor de referência. Então, realizou-se a média entre a evolução de todos os sensores para essa condição e PO.

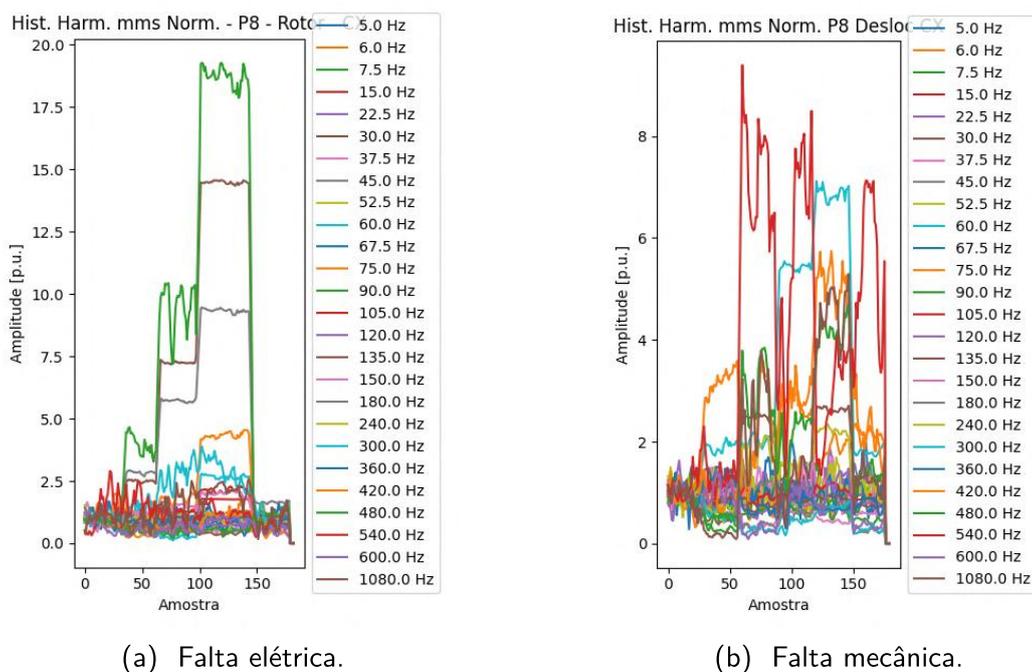
Outra estratégia de observação consistiu em atribuir limiares arbitrários e avaliar a porcentagem de harmônicas que tiveram sua amplitude ultrapassando esses níveis.

Figura 84 – Tendência das harmônicas dos sinais de velocidade de vibração durante os ensaios de imposição das demais faltas sob ponto de operação P8 para o sensor CX.



Fonte: Próprio autor.

Figura 85 – Histórico normalizado de harmônicas para os sinais de velocidade de vibração: falta elétrica de retirada de espiras do rotor e falta mecânica de excentricidade para o ponto de operação P8.

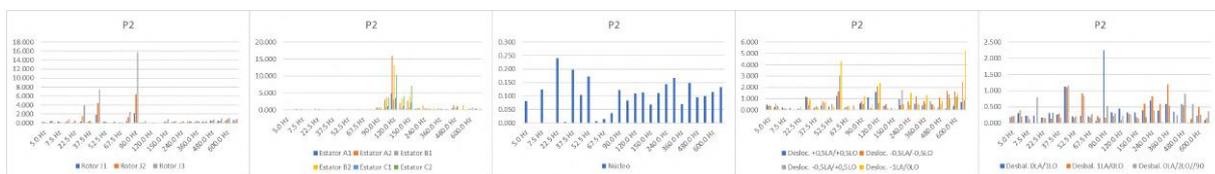


Fonte: Próprio autor.

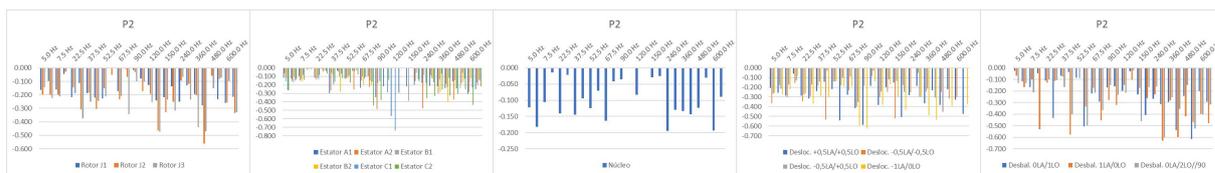
6.3 ANÁLISES DA VARIAÇÃO DE AMPLITUDE DAS HARMÔNICAS

A Figura 86 mostra o resultado da variação de amplitude das harmônicas para a falta de rotor no ponto de operação P2, para fim de ilustração. Calcula-se a média entre os sensores, considerando quatro opções de análise: somente aumentos de amplitude, somente reduções, ambos simultaneamente e o valor absoluto da variação para o caso simultâneo. Os resultados apresentados na figura evidenciam que a variação positiva da amplitude de harmônicas é semelhante ao valor absoluto da variação para o conjunto de variação de amplitude positiva com negativa. Porém, as harmônicas de destaque ficam mais evidentes no caso conjunto. As variações negativas têm menor diferença entre as harmônicas e a amplitude desse tipo de variação também é reduzida. O resultado é mostrado para apenas um caso de falta e ponto de operação, porém o comportamento é semelhante para as demais faltas e POs. Portanto, para fim de simplificação das análises, as conclusões dessa seção serão baseadas apenas na observação do valor absoluto da variação conjunta das harmônicas, contemplando variações positivas e negativas simultaneamente.

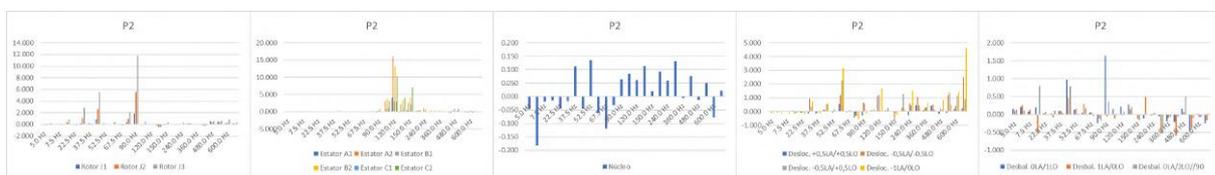
Figura 86 – Variação das amplitudes normalizadas das harmônicas considerando diferentes opções de média entre os sensores. Nível intermediário de potência: 4,5 kVA com fator de potência de 0,8 subexcitado (P2).



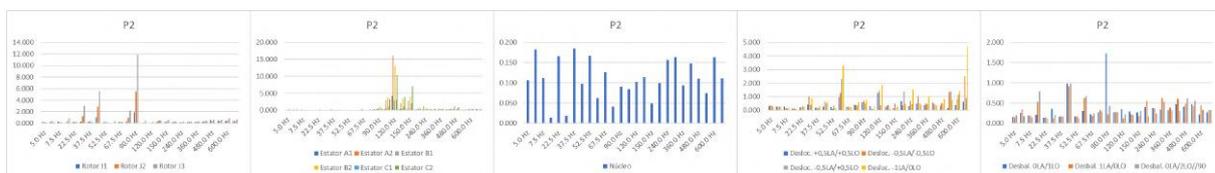
(a) Variações positivas.



(b) Variações negativas.



(c) Variações positivas e negativas.



(d) Valor absoluto das variações positivas e negativas.

Fonte: Próprio autor.

As análises de variação dessa seção consistem em identificar regiões do espectro que se diferenciam entre as diferentes condições de falta e de operação testadas. A Figura 87 mostra um conjunto de imagens, para um nível de potência intermediária fornecida pelo gerador, dentre aquelas que foram observadas para as análises dessa seção. Nota-se que há grande variabilidade entre os pontos de operação, principalmente para as faltas mecânicas.

Pela análise sobre o valor absoluto das variações, pode-se afirmar que:

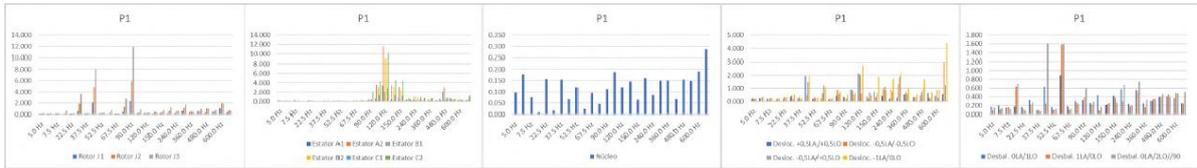
- As faltas de rotor causam variações significativas, principalmente, nas frequências de 2xRPM, 3xRPM e 6xRPM, e com menor intensidades nas harmônicas de 20xRPM e 40xRPM;
- As faltas de estator excitam as frequências de 2xELET e suas bandas laterais, até, aproximadamente, 2xRPM abaixo e acima, ou seja, há destaque na variação do espectro, principalmente, entre 6xRPM e 10xRPM. Há variação da faixa de frequência com a alteração da condição operativa: dependendo do caso, observam-se variações nas frequências de 4xELET, 5xELET e 8xELET. Observa-se também que, para maiores valores de potência ativa e fator de potência, a variação de harmônicas acima de 4xELET aumenta;
- A falta de núcleo do estator não demonstra uma sensibilização evidente de faixas específicas de frequência, nem consistência entre os diferentes pontos de operação. Entretanto, observa-se que condições de fator de potência mais baixo aumentam a variação do espectro, de maneira geral, especialmente de frequências acima de 8xELET.

Para as faltas de origem mecânica, a variabilidade entre os espectros de frequência dos sinais de vibração é ainda maior. Enquanto a variação do espectro de frequência para a falta de excentricidade não apresentou nenhum padrão, para o caso de desbalanceamento é possível realizar as observações abaixo:

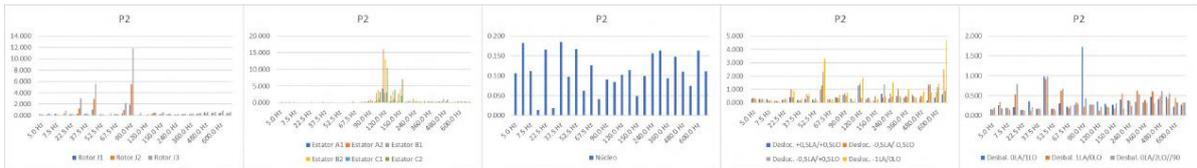
- As harmônicas de 1xRPM e 3xRPM variaram na maior parte dos casos, embora não na totalidade;
- As frequências de 6xRPM e 5xELET apresentaram variação significativa para alguns POs e, em menor proporção, harmônicas de ordem mais elevada, como 7xELET, também se destacaram.
- A variação de amplitudes das harmônicas diminuiu juntamente com o fator de potência.

Vê-se que o comportamento das variações de amplitude das harmônicas não possui um mesmo padrão para casos semelhantes em relação ao tipo de falta imposta ou ao ponto de operação. Isso reforça a importância de abordagens modernas para a questão estudada nesse trabalho, como o uso de técnicas de aprendizado de máquina, para possibilitar o processamento de um número maior de dados e a definição de comportamentos complexos, como os apresentados na Figura 87.

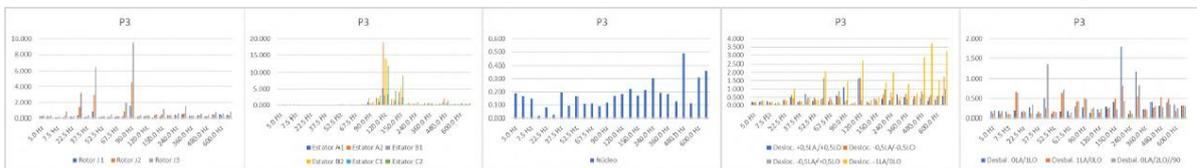
Figura 87 – Variação das amplitudes normalizadas das harmônicas considerando o valor absoluto das variações positivas e negativas simultaneamente e realizando a média entre os sensores. Nível intermediário de potência: 4,5 kVA.



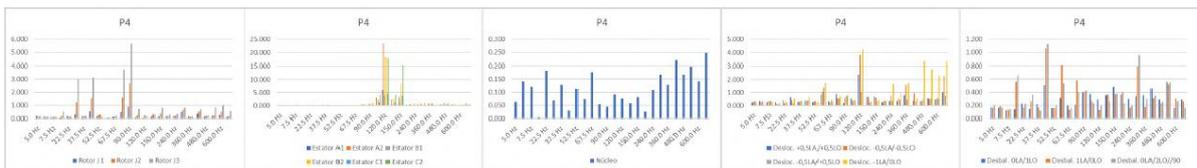
(a) P1.



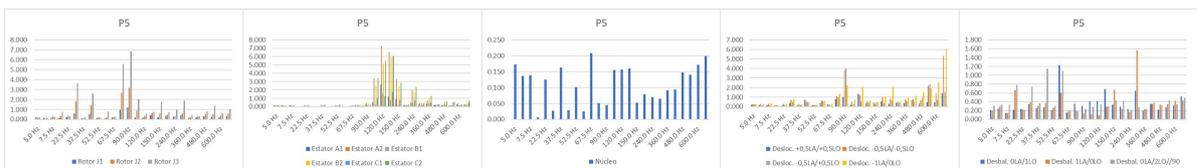
(b) P2.



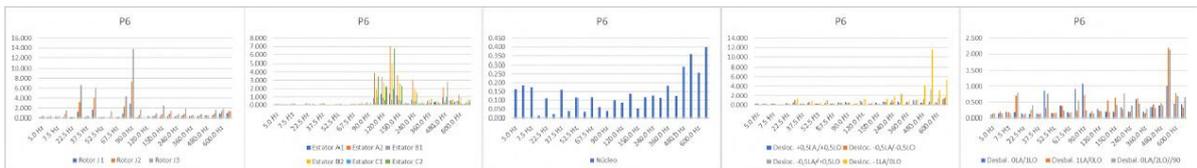
(c) P3.



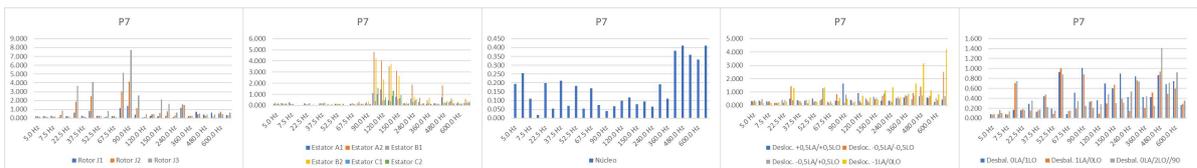
(d) P4.



(e) P5.



(f) P6.



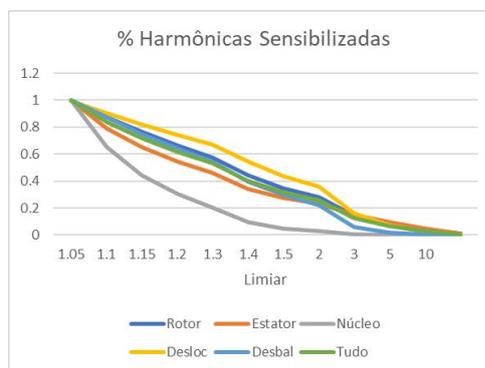
(g) P7.

Fonte: Próprio autor.

6.4 ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DAS HARMÔNICAS

Adicionalmente à análise da variação da amplitude das harmônicas, notou-se que a determinação de limiares sobre a variação delas possibilitaria detectar anomalias no sinal. Para isso, realizou-se uma análise rápida para demonstrar como o valor do limiar impacta a sensibilidade do método, realizando a média entre as harmônicas, os sensores e as condições operativas para indicar a porcentagem de harmônicas sensibilizadas por cada falta. A Figura 88 mostra o resultado, o qual poderia ser utilizado como referência para, durante o acompanhamento do histórico de harmônicas em uma aplicação real, determinar a probabilidade da existência de anomalias na máquina. O método indica que, a partir da porcentagem de harmônicas com variação de amplitude significativa, de acordo com o limiar cujo valor definitivo deve ser estudado, seria possível detectar a anomalia. Proporção semelhante à da figura poderia ser utilizada como referência, visto que as faltas estão presentes nesse caso estudado para o gerador do laboratório, então as proporções deveriam seguir proporção semelhante no caso de anomalias, ao menos para geradores de porte ou especificação semelhantes.

Figura 88 – Porcentagem de harmônicas sensibilizadas conforme limiar arbitrário para cada tipo de falta.



Fonte: Próprio autor.

6.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentou-se as análises realizadas sobre os dados experimentais dos sinais de vibração no domínio da frequência. Abordou-se a metodologia utilizada para obtenção dos históricos de amplitude de harmônicas, com o rastreamento de harmônicas específicas e as considerações em relação à representatividade do sinal, e a automatização da separação dos intervalos correspondentes a cada condição de falta. Com a separação das condições de ensaio, assim como foi feito para as análises de valores globais do Capítulo 5, avaliou-se o comportamento de variação de amplitude das harmônicas dos sinais com a imposição de faltas. Nesta etapa, as análises foram realizadas de maneira orgânica, observando-se, visualmente, as

regiões de frequência que tiveram maiores alterações para cada caso. Foi possível identificar a variação de harmônicas diferentes das típicas mencionadas em norma e nas literaturas para faltas já conhecidas elétricas, de excentricidade e de desbalanceamento. Por fim, mostrou-se que a contabilização do número de harmônicas alteradas a partir de seus valores de referência pode contribuir para a detecção de faltas, a partir de limiares correspondentes à severidade das faltas.

7 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido se insere no estudo e aplicação de técnicas de análise de vibração mecânica para monitoramento de condição de geradores síncronos. Neste contexto, buscou-se encontrar e aplicar ferramentas aptas para a detecção de faltas incipientes a partir de dados experimentais coletados em uma bancada de laboratório. Apresentou-se a teoria de geradores síncronos associada, na medida do possível, às fontes de sinais de vibração mecânica. Assim, abordaram-se alguns aspectos teóricos e construtivos, bem como faltas que podem ocorrer em geradores síncronos, que podem alterar os comportamentos dos sinais de interesse medidos por sensores. Realizou-se uma contextualização sobre monitoramento de condição de máquina, abordando a teoria de vibração mecânica em máquinas elétricas girantes e técnicas já empregadas na indústria, associando aspectos de normas técnicas. Fez-se uma revisão breve também de trabalhos recentes publicados pela academia.

A bancada utilizada nos ensaios com os seus sensores foi apresentada, abordando-se alguns aspectos práticos do desenvolvimento do trabalho e a metodologia de execução dos ensaios para a obtenção dos dados a serem analisados. Os resultados dos ensaios geraram conjuntos de dados que, após alguns tratamentos e/ou processamentos, foram analisados sob duas modalidades. Uma delas empregando valores globais correspondentes a três métricas - RMS, curtose e assimetria - sendo duas delas complementares àquelas consideradas em norma. A outra modalidade considerou análises no domínio da frequência, contemplando harmônicas específicas obtidas após um processo de rastreamento. As análises realizadas são válidas para o gerador ensaiado nesta bancada em específico, com os sensores empregados e seus posicionamentos. As conclusões obtidas podem servir para balizamento de estudos de outros geradores síncronos em outras instalações.

Com relação às análises de valores globais, foram apresentados os processamentos desenvolvidos e executados para a obtenção dos históricos das métricas ao longo dos ensaios da maneira adequada às automatizações necessárias à obtenção dos resultados de comportamento dos valores em vista à detecção de faltas. Notou-se a existência de variação do comportamento dos valores das métricas globais em função da alteração do ponto de operação da máquina (despacho de potência). Assim, aplicou-se a média de variação relativa entre os dados provindos das medições pelos sensores para sintetizar os dados. Com esta abordagem, demonstraram-se tendências de variação entre os pontos de operação, principalmente para faltas de origem elétrica. Por exemplo, ocorreu um aumento da variação do valor RMS sob falta de rotor, com relação à condição sadia, com o aumento da excitação do gerador. Contrariamente a este comportamento, para faltas de estator houve uma diminuição da variação dos valores RMS com o aumento da excitação. Observou-se que a métrica curtose, em uma visão geral, possui comportamento similar à métrica RMS, onde a densidade do sinal sofre influência do ponto de operação de maneira similar à sua potência quando a máquina está sujeita às faltas de origem elétrica. Com relação aos demais tipos de faltas, os comportamentos foram irregulares em

função da variação dos pontos de operação. A métrica assimetria apresentou comportamento aleatório também para as faltas elétricas. O comportamento das métricas com a alteração do fator de potência do gerador apresentou similaridades, na maioria dos casos, quando analisados sob potência aparente constante ou potência ativa constante. Entretanto, as tendências de variação das métricas, quando presentes, ficaram mais evidentes para o caso com potência ativa constante. Essa observação é razoável, pois quando há variação da potência ativa e observada separadamente, verificou-se forte influência no comportamento dos valores das três métricas. Complementa-se que a maior variação das métricas para pontos de operação específicos indica que a condição operativa do gerador pode favorecer a detecção de faltas nesses casos. Como a metodologia de detecção de anomalias sugerida em norma depende da ultrapassagem de limiares, uma variação maior da métrica sob falta acarreta maior probabilidade de atingir os níveis estipulados.

Uma abordagem com análises realizadas sobre a sensibilidade das métricas globais às faltas considerou cada condição de falta e os dados provenientes dos posicionamentos dos sensores. Avaliou-se a porcentagem de POs para os quais houve sensibilização, i.e., para os quais o nível de alarme foi ultrapassado. Isto serviu para comparar as eficiências de cada métrica na detecção das faltas testadas. Observou-se que a métrica curtose apresenta a melhor sensibilidade em geral, seguida pelas métricas RMS e assimetria. Nota-se que as métricas curtose e assimetria demonstraram sensibilidade para a falta de núcleo de estator. Este tipo de falta não foi detectado através da métrica RMS. Além disso, a métrica assimetria se destacou para alguns casos de baixa intensidade de faltas elétricas, quando comparada à métrica RMS. Para o processo de detecção de faltas com o emprego das métricas estudadas, indicaram-se os posicionamentos dos sensores que obtiveram maior sensibilização.

Sobre a abordagem com análise em frequência, apresentaram-se os processamentos realizados e como foi realizada a seleção de harmônicas para análise. Os resultados obtidos servem mais como uma contribuição de nível exploratório do que aqueles obtidos através de análises das métricas globais. Observaram-se as regiões do espectro de frequência que sofreram maior variação com a imposição de faltas sob cada ponto de operação individualmente. Mostrou-se que harmônicas diferentes das previstas na literatura também são excitadas pelas faltas. A variabilidade das variações de amplitude na composição dos espectros harmônicos foi de menor intensidade para as faltas elétricas do que para as de origem mecânica. Abordou-se também uma interpretação possível para processos de detecção de faltas com suporte da porcentagem de harmônicas sensibilizadas conforme limiares arbitrários, pois há diferenças entre os tipos de falta. Essa proposta de abordagem pode servir como referência para desenvolvimentos de processos de detecção de cada tipo de falta a partir dos limiares escolhidos e da quantidade de harmônicas sensibilizadas.

O objetivo principal da dissertação foi concluído ao se avaliar métricas adicionais àquelas empregadas atualmente em equipamentos no mercado. As análises realizadas foram efetuadas em um leque experimental englobando quase a totalidade da capacidade do gerador

síncrono utilizado, e sob diferentes combinações de pontos de operação com os tipos de faltas investigados. Com relação ao processamento dos sinais de vibração específicos para a detecção de faltas, foram aplicadas também técnicas desenvolvidas neste trabalho de dissertação, pois os procedimentos empregados atualmente em pesquisas na área diferem destes utilizados no presente trabalho. Ressalta-se que alguns dos processamentos desenvolvidos para separação dos dados de condições de faltas, e as análises associadas, podem favorecer desenvolvimentos futuros que envolvam dados de ensaios de classificações de faltas e sob alterações do ponto de operação, requisito necessário para o uso de técnicas com aprendizado de máquina. As análises realizadas foram sobre dados experimentais coletados com sucesso na bancada experimental do laboratório. A detectabilidade de faltas foi avaliada através da variação dos valores das métricas e pela ultrapassagem de limiares, levando em conta a condição operativa do gerador.

Uma investigação futura pode considerar uma forma de aquisição e pré-processamento dos sinais que compense as interferências nas fases das harmônicas, para evitar as consequências apresentadas no Apêndice A. Outra possibilidade para trabalhos futuros envolve o aprofundamento de análises sobre o banco de dados obtido com a realização desta dissertação, empregando-se o uso de técnicas de aprendizado de máquina para auxílio no processamento e nas conclusões de resultados.

REFERÊNCIAS

AHMED, Umair; ALI, Fakhre; JENNIONS, Ian. A Review of Aircraft Auxiliary Power Unit Faults, Diagnostics and Acoustic Measurements. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 124, p. 100721, jul. 2021. ISSN 0376-0421. DOI: 10.1016/j.paerosci.2021.100721. Acesso em: 4 jul. 2022.

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. [S.l.]: AMGH, mar. 2013. ISBN 978-85-8055-172-3.

AMANUEL, Thomas; GHIRMAY, Amanuel; GHEBREMESKEL, Huruy; GHEBREHIWET, Robel; BAHLIBI, Weldekidan. Design of Vibration Frequency Method with Fine-Tuned Factor for Fault Detection of Three Phase Induction Motor. **Journal of Innovative Image Processing**, v. 3, n. 1, p. 52–65, abr. 2021. ISSN 2582-4252. DOI: 10.36548/jiip.2021.1.005. Acesso em: 12 jul. 2022.

ANEEL. **Expansão da potência instalada no Brasil em julho é de 708,78 MW**. [S.l.: s.n.], ago. 2022. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/expansao-da-potencia-instalada-no-brasil-em-julho-e-de-708-78-mw>. Acesso em: 4 jan. 2023.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021**. Agência Nacional de Energia Elétrica, dez. 2021. Acesso em: 6 jul. 2022.

ANTONI, Jérôme. The Spectral Kurtosis: A Useful Tool for Characterising Non-Stationary Signals. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 2, p. 282–307, fev. 2006. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymsp.2004.09.001. Acesso em: 24 ago. 2022.

ANTONIADOU, I.; MANSON, G.; STASZEWSKI, W. J.; BARSZCZ, T.; WORDEN, K. A Time-Frequency Analysis Approach for Condition Monitoring of a Wind Turbine Gearbox under Varying Load Conditions. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 64–65, p. 188–216, dez. 2015. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.03.003. Acesso em: 8 out. 2023.

AQTECH POWER PROGNOSTICS. **Webinar - Sensoriamento Para o Monitoramento de Vibrações Em Hidrogeradores**. [S.l.: s.n.], 2020. Acesso em: 9 fev. 2023.

AZEEM, Babar; ULLAH, Zahid; REHMAN, Faisal; ALI, Sahibzada; ARIF, Bilal; HAIDER, Aun. Synchronous and A-Synchronous Machines (SAASMs): Rotor and Stator

Faults. **Engineering and Applied Science Letters**, 2(2019), p. 1–9, dez. 2019. DOI: 10.30538/psrp-eas12019.0016.

BABAEI, Mojtaba; FAIZ, Jawad; EBRAHIMI, Bashir Mahdi; AMINI, S.; NAZARZADEH, Jalal. A Detailed Analytical Model of a Salient-Pole Synchronous Generator Under Dynamic Eccentricity Fault. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 47, n. 4, p. 764–771, abr. 2011. ISSN 1941-0069. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2105498.

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. [S.l.]: Ed. UFSC, 2008. ISBN 978-85-328-0418-1.

BEHREND, B. On the Mechanical Forces in Dynamos Caused by Magnetic Attraction. **Trans. Am. Inst. Electr. Eng.**, 1990.

BRASIL, Agência. **Brasil em Pauta discute os desafios da crise hídrica no país**. [S.l.: s.n.], set. 2021. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-09/brasil-em-pauta-discute-os-desafios-da-crise-hidrica-no-pais>. Acesso em: 6 jul. 2022.

BROCH, Jens Trampe; COURRECH, Joëlle. **Mechanical Vibration and Shock Measurements**. 2.ed., 3. impression. Nærum, Denmark: Brüel [et] Kjær, 1984. ISBN 978-87-87355-34-6.

BS EN IEC 60947-5-2. **Low-Voltage Switchgear and Controlgear - Control Circuit Devices and Switching Elements. Proximity Switches**. Instituição de Normas Britânicas, Normas Europeias e Comissão Eletrotécnica Internacional, mar. 2020. Acesso em: 9 fev. 2023.

C37.102, IEEE. **IEEE Guide for AC Generator Protection**. Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, fev. 2007.

C50.13, IEEE. **IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above**. Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, fev. 2006.

CELESC. **Conexão de Consumidores e Permissionárias em Alta Tensão. Instrução I-332.0028 -REQUISITOS PARA CONEXÃO DE UNIDADE CONSUMIDORA COM CARGA INDICADA COMO POTENCIALMENTE PERTURBADORA AO SISTEMA ELÉTRICO DA CELESC**. [S.l.], nov. 2023. Acesso em: 24 mar. 2024.

CEMPEL, Czesł. Limit Value in the Practice of Machine Vibration Diagnostics. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 4, n. 6, p. 483–493, nov. 1990. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/0888-3270(90)90047-0. Acesso em: 2 jul. 2022.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed.** [S.l.]: AMGH Editora, jan. 2013. ISBN 978-85-8055-207-2.

COLLACOTT, Ralph Albert. **Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring.** [S.l.]: Chapman and Hall, 1977. ISBN 978-0-470-99095-7.

CORREA, Juan Carlos A. Jauregui; GUZMAN, Alejandro A. Lozano. **Mechanical Vibrations and Condition Monitoring.** [S.l.]: Academic Press, mar. 2020. ISBN 978-0-12-820390-3.

COVO, A. Unbalanced Magnetic Pull in Induction Motors with Eccentric Rotors [Includes Discussion]. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, v. 73, n. 2, p. 1421–1425, jan. 1954. ISSN 2379-6766. DOI: 10.1109/AIEEPAS.1954.4498981.

DA COSTA, P.; DE SOUZA, A. Nunes; DA SILVA, P. S.; DO COGO CASTANHO, J. E. A Visual Tool for Building Synchronous Generator Capability Curves. *In*: 2013 Proceedings of IEEE Southeastcon. [S.l.: s.n.], abr. 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/SECON.2013.6567431.

DAGA, Alessandro Paolo; GARIBALDI, Luigi. Machine Vibration Monitoring for Diagnostics through Hypothesis Testing. **Information**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 6, p. 204, jun. 2019. ISSN 2078-2489. DOI: 10.3390/info10060204. Acesso em: 4 jul. 2022.

DEB MAJUMDER, Bansari; ROY, Joyanta Kumar; PADHEE, Subhansu. Recent Advances in Multifunctional Sensing Technology on a Perspective of Multi-Sensor System: A Review. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 4, p. 1204–1214, fev. 2019. ISSN 1558-1748. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2882239.

DIFFERENCE between IIR and FIR Filters: A Practical Design Guide. [S.l.: s.n.], abr. 2020. Algorithms. Acesso em: 24 abr. 2023.

DYBAŁA, Jacek. Vibrodiagnostics of Gearboxes Using NBV-based Classifier: A Pattern Recognition Approach. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 38, n. 1, p. 5–22, jul. 2013. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.08.021. Acesso em: 8 out. 2023.

EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA. **Manual Geral de Instruções - Grupo Gerador Especial**. São Paulo, 2013.

FÁBRY, Stanislav; ČEŠKOVIČ, Marek. Aircraft Gas Turbine Engine Vibration Diagnostics. **MAD - Magazine of Aviation Development**, v. 5, n. 4, p. 24–28, nov. 2017. ISSN 1805-7578. DOI: 10.14311/MAD.2017.04.04. Acesso em: 30 jun. 2022.

FAIRES, J. Douglas; BURDEN, Richard L. **Numerical Methods**. [S.l.]: Brooks/Cole, nov. 2002. ISBN 978-0-534-40762-9.

FENG, Ke; WANG, Kesheng; NI, Qing; ZUO, Ming J.; WEI, Dongdong. A Phase Angle Based Diagnostic Scheme to Planetary Gear Faults Diagnostics under Non-Stationary Operational Conditions. **Journal of Sound and Vibration**, v. 408, p. 190–209, nov. 2017. ISSN 0022-460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.07.030. Acesso em: 8 out. 2023.

FENG, Zhipeng; LIANG, Ming. Complex Signal Analysis for Wind Turbine Planetary Gearbox Fault Diagnosis via Iterative Atomic Decomposition Thresholding. **Journal of Sound and Vibration**, v. 333, n. 20, p. 5196–5211, set. 2014. ISSN 0022-460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.05.029. Acesso em: 7 out. 2023.

FERRAZ, Úrsula Barbosa. **Simulador de Falhas Mecânicas Para Bancada de Análise de Vibrações**. 2013. Tese (Doutorado). Acesso em: 11 jun. 2023.

FILHO, Sidnei Noceti. **Filtros seletores de sinais**. [S.l.]: Editora da UFSC, 1998. ISBN 978-85-328-0141-8.

GANGSAR, Purushottam; TIWARI, Rajiv. Diagnostics of Mechanical and Electrical Faults in Induction Motors Using Wavelet-Based Features of Vibration and Current through Support Vector Machine Algorithms for Various Operating Conditions. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 2, p. 71, jan. 2019. ISSN 1806-3691. DOI: 10.1007/s40430-019-1574-5. Acesso em: 5 jul. 2022.

HE, Yu-Ling; KE, Meng-Qiang; TANG, Gui-Ji; JIANG, Hong-Chun; YUAN, Xing-Hua. Analysis and Simulation on the Effect of Rotor Interturn Short Circuit on Magnetic Flux Density of Turbo-Generator. **Journal of Electrical Engineering**, v. 67, n. 5, p. 323–333, ago. 2016. DOI: 10.1515/jee-2016-0047. Acesso em: 16 jun. 2023.

HE, Yu-Ling; WANG, Fa-Lin; TANG, Gui-Ji; KE, Meng-Qiang. Analysis on Steady-State Electromagnetic Characteristics and Online Monitoring Method of Stator Inter-Turn Short

Circuit of Turbo-Generator. **Electric Power Components and Systems**, Taylor & Francis, v. 45, n. 2, p. 198–210, jan. 2017. ISSN 1532-5008. DOI: 10.1080/15325008.2016.1247387. Acesso em: 16 jun. 2023.

HE, Xiuzhi; ZHOU, Xiaoqin; YU, Wennian; HOU, Yixuan; MECHEFSKE, Chris K. Adaptive Variational Mode Decomposition and Its Application to Multi-Fault Detection Using Mechanical Vibration Signals. **ISA Transactions**, v. 111, p. 360–375, mai. 2021. ISSN 0019-0578. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.10.060. Acesso em: 14 ago. 2022.

HESSMANN, Gabriel Piazero. **Sistema automatizado para imposição de faltas em uma máquina síncrona modificada**. Trabalho de Conclusão de Curso - TCC. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

HOLLOTER, Quincy G.; GORDON, Colin G. Monitoring of Vibration in Vibration-Sensitive Facilities. *In: VIBRATION Monitoring and Control*. [S.l.]: SPIE, out. 1994. P. 170–177. DOI: 10.1117/12.188871. Acesso em: 8 out. 2023.

HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield. **The Art of Electronics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-0-521-42228-4.

IEC 60034-1. **Rotating Electrical Machines - Part 1: Rating and Performance**. Comissão Eletrotécnica Internacional, fev. 2022. Acesso em: 5 out. 2022.

IEC 60034-6. **Rotating Electrical Machines - Part 6: Methods of Cooling (IC Code)**. International Electrotechnical Commission, set. 1991. Acesso em: 27 jan. 2023.

IEC-60529. **Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)**. International Electrotechnical Commission, 2013. Acesso em: 27 jan. 2023.

INSTRUMENTS, National. **USB-621x User Manual - NI**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-621x-features/resource/371931f.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2023.

ISO 10816-1. **Mechanical Vibration — Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts — Part 1: General Guidelines**. Organização Internacional de Normalização, dez. 1995. Acesso em: 12 jul. 2022.

ISO 13373-1. **Condition Monitoring and Diagnostics of Machines — Vibration Condition Monitoring — Part 1: General Procedures**. Organização Internacional de Normalização, fev. 2002. Acesso em: 8 jul. 2022.

ISO 13381-1. **Condition Monitoring and Diagnostics of Machines — Prognostics — Part 1: General Guidelines**. Organização Internacional de Normalização, set. 2015. Acesso em: 8 jul. 2022.

ISO 16063-11. **Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers — Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry**. Organização Internacional de Normalização, dez. 1999. Acesso em: 12 fev. 2023.

ISO 16063-21. **Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers — Part 21: Vibration Calibration by Comparison to a Reference Transducer**. Organização Internacional de Normalização, ago. 2003. Acesso em: 13 fev. 2023.

ISO 20816-1. **Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration — Part 1: General Guidelines**. Organização Internacional de Normalização, nov. 2016. Acesso em: 8 jul. 2022.

ISO 20816-5. **Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration — Part 5: Machine Sets in Hydraulic Power Generating and Pump-Storage Plants**. Organização Internacional de Normalização, jul. 2018. Acesso em: 1 out. 2022.

ISO 2372. **Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 Rev/s — Basis for Specifying Evaluation Standards**. Organização Internacional de Normalização, nov. 1974. Acesso em: 12 jul. 2022.

LATHI, Bhagawandas Pannalal. **Signal Processing and Linear Systems**. [S.l.]: Oxford University Press, 1998. ISBN 978-0-19-414135-2.

LI, Silong; LI, Yingjie; SARLIOGLU, Bulent. Rotor Unbalanced Magnetic Force in Flux-switching Permanent Magnet Machines Due to Static and Dynamic Eccentricity. **Electric Power Components and Systems**, Taylor & Francis, v. 44, n. 3, p. 336–342, fev. 2016. ISSN 1532-5008. DOI: 10.1080/15325008.2015.1111469. Acesso em: 4 jun. 2023.

LI, Xiaodong; WU, Qing; NANDI, Subhasis. Performance Analysis of a Three-Phase Induction Machine With Inclined Static Eccentricity. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 43, n. 2, p. 531–541, mar. 2007. ISSN 1939-9367. DOI: 10.1109/TIA.2006.889806.

LIAO, Chendong; JIANG, Wenying; ZHANG, Zhuoran. Analysis of Electromagnetic Vibration Characteristics of An Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. *In: 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. [S.l.: s.n.], ago. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8921549.

LIU, Zepeng; ZHANG, Long; CARRASCO, Joaquin. Vibration Analysis for Large-Scale Wind Turbine Blade Bearing Fault Detection with an Empirical Wavelet Thresholding Method. **Renewable Energy**, v. 146, p. 99–110, fev. 2020. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.094. Acesso em: 12 jul. 2022.

LUNDSTRÖM, Niklas L. P.; AIDANPÄÄ, Jan-Olov. Whirling Frequencies and Amplitudes Due to Deviations of Generator Shape. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 43, n. 9, p. 933–940, nov. 2008. ISSN 0020-7462. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2008.07.002. Acesso em: 29 mai. 2023.

MAILHÉ, Benjamin Joseph. **Characterization and modelling of the magnetic behaviour of electrical steel under mechanical stress**. 2018. Tese (Doutorado). Acesso em: 4 fev. 2023.

MANHERTZ, Gabor; BEREZKY, Akos. STFT Spectrogram Based Hybrid Evaluation Method for Rotating Machine Transient Vibration Analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 154, p. 107583, jun. 2021. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107583. Acesso em: 5 jul. 2022.

MARCAL, Rui Francisco Martins. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibração e lógica Fuzzy**. 2000. Tese (Doutorado). Acesso em: 4 jul. 2022.

MATHIAS, Mauro Hugo. **Ferramentas de Diagnóstico de Máquinas**. UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus Guaratingá: [s.n.]. Acesso em: 18 mai. 2024.

MICROCHIP TECHNOLOGY, Inc. **Understanding Analog-to-Digital Converter (ADC) Specifications - Resolution and Accuracy**. [S.l.: s.n.]. <https://microchipdeveloper.com/adc:adc-resolution-accuracy>. Acesso em: 27 mar. 2023.

MOHD GHAZALI, Mohamad Hazwan; RAHIMAN, Wan. Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. **Shock and Vibration**, Hindawi, v. 2021, e9469318, set. 2021. ISSN 1070-9622. DOI: 10.1155/2021/9469318. Acesso em: 22 jul. 2022.

MORAIS, Adriano Peres de; CARDOSO JR, Ghendy; MARIOTTO, Lenois. Avaliação do desempenho dos métodos de proteção contra a perda de excitação em geradores síncronos. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, Sociedade Brasileira de Automática, v. 20, p. 526–545, dez. 2009. ISSN 0103-1759. DOI: 10.1590/S0103-17592009000400007. Acesso em: 5 jan. 2023.

NANDI, S.; TOLIYAT, H.A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines-a Review. *In*: CONFERENCE Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370). [S.l.: s.n.], out. 1999. 197–204 vol.1. DOI: 10.1109/IAS.1999.799956.

NAU, Sebastião Lauro. **Desenvolvimento de um método de cálculo para determinação do ruído acústico de origem magnética gerado por motores de indução trifásicos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000. Acesso em: 4 jul. 2022.

NEMA MG-1. **Motors and Generators**. National Electrical Manufacturers Association, jun. 2022. Acesso em: 27 jan. 2023.

NEVES, Carlos Guilherme da Costa. **Uma metodologia de modelagem e análise das vibrações de origem magnética nas máquinas elétricas rotativas por elementos finitos e procedimentos experimentais**. 1999. Tese (Doutorado). Acesso em: 4 fev. 2023.

NOWAKOWSKI, Tomasz; KOMORSKI, Pawel. Diagnostics of the Drive Shaft Bearing Based on Vibrations in the High-Frequency Range as a Part of the Vehicle's Self-Diagnostic System. **Eksplatacja i Niezawodność**, Vol. 24, no. 1, 2022. ISSN 1507-2711. DOI: 10.17531/ein.2022.1.9. Acesso em: 30 jun. 2022.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Discrete-Time Signal Processing**. [S.l.]: Pearson Education, nov. 2011. ISBN 978-0-13-300228-7.

PARK, R. H.; ROBERTSON, B. L. The Reactances of Synchronous Machines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 47, n. 2, p. 514–535, abr. 1928. ISSN 2330-9431. DOI: 10.1109/T-AIEE.1928.5055010.

PCB PIEZOTRONICS, Inc. **IMI Sensors Model 622B01 Platinum Precision Industrial ICP® Accelerometer Installation and Operating Manual**. Depew, NY, USA, ago. 2021. P. 108070. Acesso em: 31 mai. 2022.

PCB PIEZOTRONICS, Inc. **Introduction to Piezoelectric Accelerometers**. [S.l.: s.n.]. <https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers>. Acesso em: 5 mar. 2023.

PERERS, Richard; LUNDIN, Urban; LEIJON, Mats. Saturation Effects on Unbalanced Magnetic Pull in a Hydroelectric Generator With an Eccentric Rotor. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 43, n. 10, p. 3884–3890, out. 2007. ISSN 1941-0069. DOI: 10.1109/TMAG.2007.903275.

POWER, Iris. **Mechanical Vibration Monitoring**. [S.l.: s.n.], nov. 2016. <https://irispower.com/monitoring/mechanical-vibration-monitoring/>. Acesso em: 28 jun. 2022.

PRENTICE, B. R. Fundamental Concepts of Synchronous Machine Reactances. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 56, n. 12, p. 1–21, dez. 1937. ISSN 0096-3860. DOI: 10.1109/T-AIEE.1937.5057505. Acesso em: 7 jan. 2023.

PYRHONEN, Juha; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVA, Valeria. **Design of Rotating Electrical Machines**. [S.l.]: John Wiley & Sons, dez. 2013. ISBN 978-1-118-58157-5.

QIN, Yi; ZOU, Jingqiang; CAO, Folin. Adaptively Detecting the Transient Feature of Faulty Wind Turbine Planetary Gearboxes by the Improved Kurtosis and Iterative Thresholding Algorithm. **IEEE Access**, v. 6, p. 14602–14612, 2018. ISSN 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2809744. Acesso em: 7 out. 2023.

RAJAMÄKI, Joonas. **Analysis of Loss Components in a Synchronous Generator under Non-ideal Operating Conditions**. Dissertação (Mestrado). Espoo, Finlândia, 2019.

RANDALL, Robert Bond. **Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, jul. 2021. ISBN 978-1-119-47755-6.

RAO, Singiresu S. **Mechanical Vibrations**. [S.l.]: Pearson Education, Incorporated, 2017. ISBN 978-0-13-436130-7.

RASTEGARI, Ali. Strategic Maintenance Development Focusing on Use of Condition Based Maintenance in Manufacturing Industry. Mälardalen University, 2015. Acesso em: 12 fev. 2023.

RIGONI, Mauricio. **Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo**. 2014. Tese (Doutorado). Acesso em: 17 mai. 2024.

RÜNCOS, Fredemar. **Projeto e Análise Da Máquina Elétrica Trifásica: Aspectos Construtivos**. 2. ed. Jaraguá do Sul, SC, Brasil: Oitonovetrês Editora, 2020a. v. 1. ISBN 978-85-67657-07-3. Acesso em: 4 jan. 2023.

RÜNCOS, Fredemar. **Projeto e Análise Da Máquina Elétrica Trifásica: Harmônicas Do Campo Girante e Parâmetros Físicos**. 2. ed. Jaraguá do Sul, SC, Brasil: Oitonovetrês Editora, 2020b. v. 2. ISBN 978-85-67657-07-3. Acesso em: 4 jan. 2023.

SALEEM, Md; GARİKAPATI, Diwakar; RAMA SURYA SATYANARAYANA, Munukurthi. Detection of Unbalance in Rotating Machines Using Shaft Deflection Measurement during Its Operation. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 3, p. 8–20, jan. 2012. DOI: 10.9790/1684-0330820.

SAMUEL, Paul D.; PINES, Darryll J. A Review of Vibration-Based Techniques for Helicopter Transmission Diagnostics. **Journal of Sound and Vibration**, v. 282, n. 1-2, p. 475–508, abr. 2005. ISSN 0022460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2004.02.058. Acesso em: 2 jul. 2022.

SANDERS, Colin. A Maintenance Manager's Guide to...: Vibration Analysis and Associated Techniques in Condition Monitoring. **Asset Management & Maintenance Journal**, Engineering Information Transfer, v. 24, n. 4, p. 42–50. DOI: 10.3316/informit.123656639474425. Acesso em: 8 fev. 2023.

SAUCEDO-DORANTES, Juan Jose; DELGADO-PRIETO, Miguel; ORTEGA-REDONDO, Juan Antonio; OSORNIO-RIOS, Roque Alfredo; ROMERO-TRONCOSO, Rene de Jesus. Multiple-Fault Detection Methodology Based on Vibration and Current Analysis Applied to Bearings in Induction Motors and Gearboxes on the Kinematic Chain. **Shock and Vibration**, Hindawi, v. 2016, e5467643, mar. 2016. ISSN 1070-9622. DOI: 10.1155/2016/5467643. Acesso em: 2 fev. 2023.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**. [S.l.]: Elsevier, jul. 2004. ISBN 978-0-08-048022-0.

SCHLENSOK, Christoph; HENNEBERGER, Gerhard. Comparison of Static, Dynamic, and Static-dynamic Eccentricity in Induction Machines with Squirrel-cage Rotors Using 2D-transient FEM. **COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering**, Emerald Group Publishing Limited, v. 23, n. 4, p. 1070–1079, jan. 2004. ISSN 0332-1649. DOI: 10.1108/03321640410553508. Acesso em: 4 jun. 2023.

SCIPY.SIGNAL.FIRWIN — SciPy v1.10.1 Manual. [S.l.: s.n.]. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.firwin.html>. Acesso em: 2 mai. 2023.

SCIPY.SIGNAL.KAISERORD — SciPy v1.10.1 Manual. [S.l.: s.n.]. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.kaiserord.html>. Acesso em: 7 mai. 2023.

SCIPY.SIGNAL.LFILTER — SciPy v1.10.1 Manual. [S.l.: s.n.]. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.lfilter.html#scipy.signal.lfilter>. Acesso em: 7 mai. 2023.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth Carless. **Microelectronic Circuits**. [S.l.]: Oxford University Press, 2015. ISBN 978-0-19-933913-6.

SHIFAT, Tanvir Alam; HUR, Jang Wook. An Effective Stator Fault Diagnosis Framework of BLDC Motor Based on Vibration and Current Signals. **IEEE Access**, v. 8, p. 106968–106981, 2020. ISSN 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000856.

SINHA, Jyoti Kumar. **Industrial Approaches in Vibration-Based Condition Monitoring**. [S.l.]: CRC Press, jan. 2020. ISBN 978-1-351-37731-7.

STAKHOVA, Anzhelika; KVASNIKOV, Volodymyr. Development of a Device for Measuring and Analyzing Vibrations. **Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska**, T. 11, nr 2, 2021. ISSN 2083-0157. DOI: 10.35784/iapgos.2658. Acesso em: 4 jul. 2022.

TAGHIZADEH-ALISARAEI, Ahmad; MAHDAVIAN, Alireza. Fault Detection of Injectors in Diesel Engines Using Vibration Time-Frequency Analysis. **Applied Acoustics**, v. 143, p. 48–58, jan. 2019. ISSN 0003-682X. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.09.002. Acesso em: 21 ago. 2022.

TAVNER, Peter; RAN, Li; PENMAN, Jim; SEDDING, Howard. **Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines**. [S.l.]: IET, jul. 2008. ISBN 978-0-86341-741-2.

TEDESCO, Duani. **Projeto ótimo de um gerador síncrono de polos salientes**. Dissertação (Mestrado). Florianópolis, SC, Brasil, 2019. Acesso em: 28 jul. 2022.

TENHUNEN, A.; HOLOPAINEN, T.P.; ARKKIO, A. Effects of Saturation on the Forces in Induction Motors with Whirling Cage Rotor. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2, p. 766–769, mar. 2004. ISSN 1941-0069. DOI: 10.1109/TMAG.2004.824549.

TEXAS INSTRUMENTS, Inc. **Choose the Right A/D Converter for Your Application**. [S.l.].

TEXAS INSTRUMENTS, Inc. **Selecting an A/D Converter**. Application Report SBAA004A, 1995.

TIBONI, Monica; REMINO, Carlo; BUSSOLA, Roberto; AMICI, Cinzia. A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 972, jan. 2022. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app12030972. Acesso em: 30 jun. 2022.

TRUTT, F.C.; SOTTILE, J.; KOHLER, J.L. Detection of AC Machine Winding Deterioration Using Electrically Excited Vibrations. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 37, n. 1, p. 10–14, jan. 2001. ISSN 1939-9367. DOI: 10.1109/28.903120.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley - 7.ed.** [S.l.]: AMGH Editora, jun. 2014. ISBN 978-85-8055-374-1.

UPADHYAY, Kameshwar. **Basics of Vibration and Condition Analysis**. [S.l.]: Notion Press, jul. 2020. ISBN 978-1-64899-963-5.

VALENS, C. **A Really Friendly Guide to Wavelets**. [S.l.: s.n.], 1999.

VDI-2056. **Standards of Evaluation for Mechanical Vibrations of Machines**. Associação de Engenheiros Alemães, out. 1964. Acesso em: 12 jul. 2022.

VRABIE, Valeriu; GRANJON, Pierre; SERVIERE, Christine. Spectral Kurtosis: From Definition to Application. *In*: 6TH IEEE International Workshop on Nonlinear Signal and

Image Processing (NSIP 2003). Grado-Trieste, Italy: [s.n.], 2003. P. xx. Acesso em: 8 out. 2023.

WALLIN, Mattias; LUNDIN, Urban. Dynamic Unbalanced Pull from Field Winding Turn Short Circuits in Hydropower Generators. **Electric Power Components and Systems**, Taylor & Francis, v. 41, n. 16, p. 1672–1685, dez. 2013. ISSN 1532-5008. DOI: 10.1080/15325008.2013.835360. Acesso em: 21 jun. 2023.

WANG, Shanming; HONG, Jianfeng; SUN, Yuguang; CAO, Haixiang. Exciting Force and Vibration Analysis of Stator Permanent Magnet Synchronous Motors. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 54, n. 11, p. 1–5, nov. 2018. ISSN 1941-0069. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2841419.

WANG, Tianyang; CHU, Fulei; FENG, Zhipeng. Meshing Frequency Modulation (MFM) Index-Based Kurtogram for Planet Bearing Fault Detection. **Journal of Sound and Vibration**, v. 432, p. 437–453, out. 2018. ISSN 0022-460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.06.051. Acesso em: 7 out. 2023.

WANG, Tianyang; HAN, Qinkai; CHU, Fulei; FENG, Zhipeng. A New SKRgram Based Demodulation Technique for Planet Bearing Fault Detection. **Journal of Sound and Vibration**, v. 385, p. 330–349, dez. 2016. ISSN 0022-460X. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.08.026. Acesso em: 7 out. 2023.

WANG, Tianyang; HAN, Qinkai; CHU, Fulei; FENG, Zhipeng. Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Wind Turbine Planetary Gearbox: A Review. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 126, p. 662–685, jul. 2019. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.02.051. Acesso em: 5 jul. 2022.

WEG. **DT-5 Características e Especificações de Geradores**. [S.l.: s.n.], 2020. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracter-sticas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>.

WENGERKIEVICZ, Carlos Alexandre Corrêa. **Estudo e desenvolvimento de metodologias não-intrusivas para estimação de rendimento de motores de indução trifásicos em operação**. 2021. Tese (Doutorado). Acesso em: 21 mar. 2024.

WILLIS, H. Lee; REIMERT, Donald. **Protective Relaying for Power Generation Systems**. [S.l.]: CRC Press, dez. 2017. ISBN 978-1-315-22081-9. DOI: 10.1201/9781420030488. Acesso em: 5 jan. 2023.

- WINDOW Method for FIR Filter Design. [S.l.: s.n.].
https://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/Window_Method_FIR_Filter.html. Acesso em: 2 mai. 2023.
- XU, M.; MARANGONI, R. D. Vibration Analysis Of A Motor-Flexible Coupling-Rotor System Subject To Misalignment And Unbalance, Part I: Theoretical Model And Analysis. **Journal of Sound and Vibration**, v. 176, n. 5, p. 663–679, out. 1994. ISSN 0022-460X. DOI: 10.1006/jsvi.1994.1405. Acesso em: 11 jun. 2023.
- XU, Xueping; HAN, Qinkai; CHU, Fulei. Review of Electromagnetic Vibration in Electrical Machines. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 7, p. 1779, jul. 2018. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en11071779. Acesso em: 22 jul. 2022.
- XUL, Juan; ZHENG, Xuehui; ZHANG, Jianjun; LIU, Xuan. Vibration Characteristics of Unbalance Response for Motorized Spindle System. **Procedia Engineering**, v. 174, p. 331–340, jan. 2017. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.148. Acesso em: 10 jun. 2023.
- YANG, Bo Suk; PARK, Chul Hyun; KIM, Ho Jong. An Efficient Method of Vibration Diagnostics For Rotating Machinery Using a Decision Tree. **International Journal of Rotating Machinery**, Hindawi, v. 6, n. 1, p. 19–27, 2000. ISSN 1023-621X. DOI: 10.1155/S1023621X00000038. Acesso em: 1 jul. 2022.
- YANG, Dewei; ZHOU, Kefa; QI, Feng; DONG, Kai. Multidomain Feature Fusion Network for Fault Diagnosis of Rolling Machinery. Edição: Chengwei Fei. **Shock and Vibration**, v. 2022, p. 1–12, abr. 2022. ISSN 1875-9203, 1070-9622. DOI: 10.1155/2022/5478274. Acesso em: 28 jun. 2022.
- YANG, Wenxian; LITTLE, Christian; COURT, Richard. S-Transform and Its Contribution to Wind Turbine Condition Monitoring. **Renewable Energy**, v. 62, p. 137–146, fev. 2014. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2013.06.050. Acesso em: 8 out. 2023.
- YU, Shenbo; TANG, Renyuan. Electromagnetic and Mechanical Characterizations of Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Machines. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 42, n. 4, p. 1335–1338, abr. 2006. ISSN 1941-0069. DOI: 10.1109/TMAG.2006.871637.
- ZHOU, Yang; BAO, Xiaohua; DI, Chong; WANG, Lang. Analysis of Dynamic Unbalanced Magnetic Pull in Induction Motor With Dynamic Eccentricity During Starting Period. **IEEE**

Transactions on Magnetics, v. 52, n. 7, p. 1–4, jul. 2016. ISSN 1941-0069. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2520950.

ZIMROZ, Radoslaw; BARTELMUS, Walter; BARSZCZ, Tomasz; URBANEK, Jacek. Diagnostics of Bearings in Presence of Strong Operating Conditions Non-Stationarity—A Procedure of Load-Dependent Features Processing with Application to Wind Turbine Bearings. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 46, n. 1, p. 16–27, mai. 2014. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.09.010. Acesso em: 8 out. 2023.

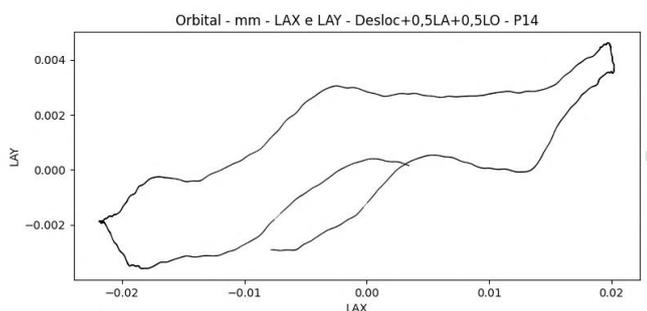
ZLATANOVICI, Dan; BUDULAN, Pompiliu; ZLATANOVICI, Rodica. Determination of the Actual PQ Diagram of the Hydrogenerators, Being in Service, in Order to Establish Their Maximum Operating Domains and Their Capacity to Provide System Services. *In*: acesso em: 16 mar. 2024.

APÊNDICE A – ANÁLISES ADICIONAIS EXPLORATÓRIAS SOBRE OS SINAIS DE VIBRAÇÃO

Esse apêndice apresenta algumas análises realizadas além do apresentado no escopo principal desse trabalho, para demonstrar possibilidades futuras de análise sobre os sinais de vibração obtidos com os ensaios executados na bancada experimental do laboratório.

Relacionado a procedimentos padrão de análise de vibração, os orbitais podem ser utilizados para a observação de deslocamentos radiais do eixo de máquinas girantes através de sensores, tipicamente proximímetros, posicionados a 90 graus entre si. Essa configuração possibilita visualizar graficamente a posição do eixo vertical com relação ao horizontal. Como foram utilizados apenas acelerômetros nesse trabalho, para obter os sinais de deslocamento de vibração, foi necessário filtrar novamente o sinal, dessa vez de velocidade, integrá-lo, e remover novamente tendências residuais dos sinais. Com isso, foi possível obter o gráfico da Figura 89, mostrada como exemplo do impacto da alteração das fases das harmônicas do sinal através de filtragens analógicas e digitais, sem a devida compensação.

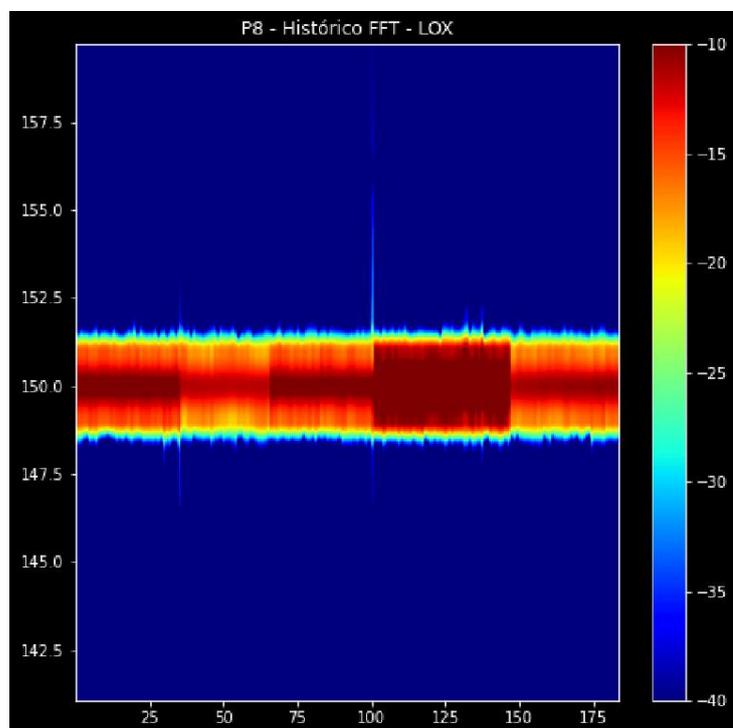
Figura 89 – Exemplo de um ciclo de orbital com início e final não coincidentes devido à diferença de fase das harmônicas dos sinais.



Fonte: Próprio autor.

Uma alternativa ao histórico de harmônicas apresentado no Capítulo 6 é a visualização do espectro temporal dos sinais, com a visualização de um mapa de calor que representa a amplitude das frequências que compõem o sinal ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 90. Esse exemplo demonstra que é possível a detecção, ao menos visual, dos estágios de falta testados. Entretanto, nota-se também que a escala está especificamente ajustada para a décima harmônica de rotação da máquina, pois há uma limitação de escala: como as harmônicas apresentam amplitudes muito diversas, mesmo em escala logarítmica, se comparado ao quanto elas variam em decorrência das faltas, a escala do mapa de calor requer ser ajustado para cada harmônica para possibilitar alguma análise.

Figura 90 – Espectro temporal de um sinal de vibração para o ensaio de falta de rotor (5 condições), enfoque na décima harmônica de rotação.



Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE B – TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÃO

Este apêndice apresenta um levantamento bibliográfico sobre novas metodologias de processamento e análises utilizadas na academia sob três domínios de análise do sinal de vibração. Ressalta-se que os resultados dos artigos são apresentados para fim de motivação e ilustração de possibilidades da área, então a compreensão aprofundada de seus conceitos não é essencial nesse contexto.

B.1 TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISE DE VALORES GLOBAIS

Pioneiro às normas modernas, como a ISO 10816-1 (1995), o estudo de Cempel (1990) apresenta abordagens para a determinação dos níveis de alarme e *trip*, visto, principalmente na época, a dependência de dados obtidos em campo para os estudos de diagnóstico com vibração. O artigo sugere que a abordagem de Pareto apresenta precisão e simplicidade superiores a outras abordagens adotadas até então, como as de Weibull e Chebychev.

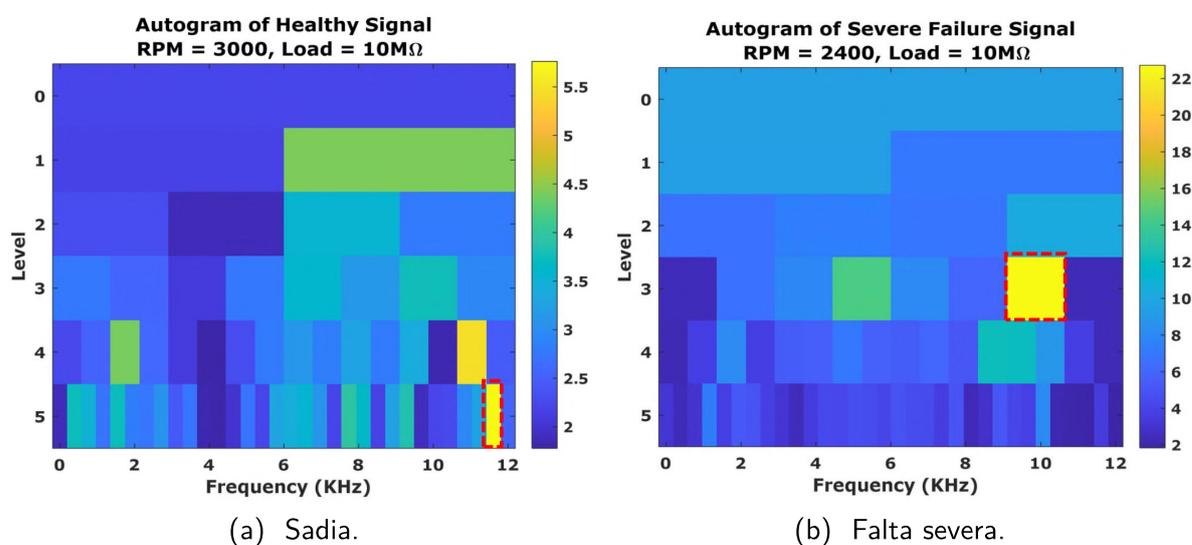
Nowakowski e Komorski (2022) aplica o monitoramento de condição ao contexto de veículos autônomos. No trabalho em questão, foi aplicada uma série de características dos sinais no tempo e em diferentes faixas de frequência, determinando-se limiares superiores e inferiores para elas que caracterizariam anormalidades de operação. Dentre as métricas utilizadas, pode-se citar RMS, curtose e assimetria, com enfoque para a detecção de faltas de rolamento, o que foi posteriormente validado com verificação estatística do modelo utilizado. Vale ressaltar que as características indicadas foram aplicadas a faixas específicas de frequência, visto o objetivo do trabalho de identificar a distribuição de frequência do sinal de aceleração medido.

Na mesma linha de aplicações locomotivas, Samuel e Pines (2005) explorou o estado da arte do diagnóstico com sinais de vibração para componentes de engrenagem e transmissão de helicópteros. Uma série de métricas são apresentadas, inclusive diversas específicas para a aplicação, demonstrando que métricas globais podem ser flexíveis e desenvolvidas de acordo com o objetivo da análise.

Um exemplo importante da possibilidade de combinação de técnicas, que por fim se tornam novas abordagens, é utilizado em Shifat e Hur (2020). Apresenta-se uma combinação de Kurtograma Rápido com Autograma para diagnóstico com vibração e assinatura de corrente para a detecção de faltas no enrolamento do estator de motores CC *brushless* de ímãs permanentes. A abordagem do artigo não caracteriza exatamente uma análise de valores globais, mas estes dão origem aos procedimentos utilizados. Este trabalho também poderia ser apresentado na Seção B.2 ou B.3 devido à combinação marcante entre técnicas. A métrica curtose foi utilizada por possibilitar o manuseio tanto de sinais estacionários como não-estacionários, detectando as frequências de falta para ambos os tipos. A origem das análises desse estudo é o Kurtograma Espectral (KE), que corresponde a uma estatística de ordem superior e pode ser definido como o cumulante de quarta ordem da transformada de Fourier. O Kurtograma

Rápido, por sua vez, é uma ferramenta para visualização do Kurtograma Espectral, estimando o Kurtograma através da computação de uma sequência de cálculos de curtose. Partindo-se do fato de que o KE de um processo estacionário é proporcional à frequência e o KE de um processo estacionário gaussiano vale zero, isso permite a localização de qualquer banda lateral adicional no sinal e, conseqüentemente, a identificação das faltas correspondentes a essas frequências anômalas. Para o Autograma, o sinal é decomposto em bandas de frequência com o método da máxima sobreposição discreta na transformada de *Wavelet Packet*. Em seguida, é utilizada a função de autocovariância para caracterizar a cicloestacionariedade de segunda ordem dos sinais, com um envelope quadrático de espectro sendo computado para cada nó (entre as bandas). Por fim, representam-se esses envelopes em um mapa de cor para, então, extrair as frequências características de faltas e realizar o diagnóstico. O resultado do Autograma é mostrado na Figura 91, o qual, nesse estudo, apresentou maior facilidade dentre os demais métodos para caracterizar diferentes faltas, podendo ser utilizado eficientemente para sinais ruidosos, entretanto não é um método recomendável para avaliação do sinal em condição sadia.

Figura 91 – Resultado do Autograma para sinais de vibração de motor sob diferentes condições de diagnóstico.



Fonte: Shifat e Hur (2020).

Outras variações de parâmetros estatísticos, mais especificamente para diagnóstico, são abordados em Stakhova e Kvasnikov (2021). Utiliza-se da teoria de processos aleatórios para representar o espectro discreto de sinais de vibração, avaliando-se funções de correlação, variância, assimetria e excesso em conjunto com a distribuição de probabilidade de t de Student.

O trabalho de Daga e Garibaldi (2019) utiliza técnicas mais modernas de processamento de dados para diagnóstico de faltas de rolamento, como aprendizado de máquina. Para extração de características dos sinais de vibração, foram aplicadas algumas das métricas estatísticas apresentadas na Seção 3.3.1, como curtose, assimetria e fator de crista, entre outras, aplicando

algoritmos de redução de dimensionalidade, como Análise de Componentes Principais para as detecções.

B.2 TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

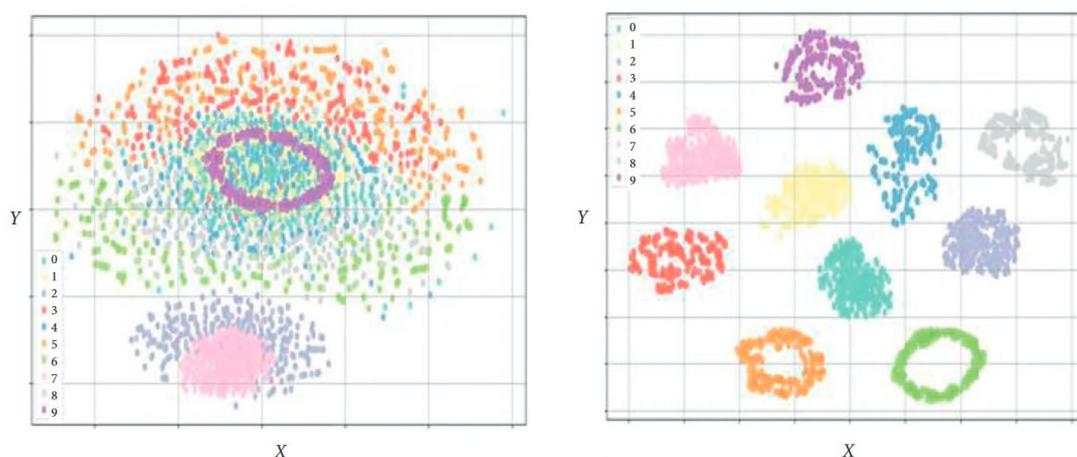
Análises próximas às sugeridas em normas, como a ISO 20816-1 (2016), foram realizadas em Fábry e Českovič (2017) no contexto aeroespacial, demonstrando que análises tradicionais ainda podem agregar valor no campo de vibração. Ressaltou-se a presença de bandas laterais nos sinais, relacionadas a fatores dinâmicos, e correspondendo a energias de vibração mais elevadas em determinadas regiões do espectro, o que pode causar danos à estrutura do motor.

No trabalho de Bo Suk Yang *et al.* (2000), afirma-se que uma das dificuldades práticas do diagnóstico com vibração é a necessidade de conhecimento profundo das dinâmicas das máquinas girantes e de seus princípios de operação. Isso somado à própria complexidade dos sinais dessa natureza e da inter-relação entre as causas de vibração, faz com que, mesmo observando uma quantidade limitada de características do sinal, as avaliações possam ser extenuantes. Por isso, o trabalho buscou resolver esse problema com a automatização do diagnóstico de vibração a partir de critérios conhecidos na literatura e/ou definidos em norma sobre componentes de frequência e orbitais. Através de árvores de decisão, com critérios definidos por abordagem muito semelhante ao que um humano faria ao analisar os sinais, foram testadas diferentes máquinas de outros trabalhos publicados, com resultados satisfatórios de classificação. Outro diferencial do trabalho foi o uso de uma matriz resultado-causa, em vez de causa-resultado, para treino do modelo. Esse trabalho serve para mostrar que, mesmo considerando abordagens tradicionais de diagnóstico com vibração, ainda existe espaço para melhorias de aplicação e melhor aproveitamento do conhecimento disponível.

Em contrapartida, um trabalho mais recente, de Dewei Yang *et al.* (2022), mostra como técnicas modernas e avançadas de aprendizado de máquina podem contribuir para o diagnóstico com vibração. O trabalho utilizou redes neurais profundas com fusão de características multidomínio para obter um desempenho excepcional de classificação para diferentes conjuntos de dados, mostrando relações que um humano, possivelmente, não conseguiria identificar, seja por tempo hábil ou capacidade. Um dos exemplos de características aprendidas pelo modelo é mostrado na Figura 92.

O Kurtograma Espectral foi brevemente mencionado na Seção B.1, quando foi apresentada uma técnica de diagnóstico com Autograma, mas existem trabalhos precedentes que focam especificamente nessa técnica, como o de Antoni (2006). O autor descreve que a falta de uma definição clara e de um procedimento de estimativa bem compreendido foram fatores que limitaram sua utilização. O trabalho formaliza a definição do KE através da decomposição de Wold-Cramèr para processos não estacionários condicionalmente e a relaciona com um estimador baseado em *Short Time Fourier Transform* - Transformada de Fourier Janelada (STFT), quando aplicável, para relacionar conceitos teóricos com aplicações práticas.

Figura 92 – Exemplo de visualização de características aprendidas por máquina (à direita) a partir de um dos conjuntos de dados bruto (à esquerda).



Fonte: Dewei Yang *et al.* (2022).

Abordam-se também as limitações da técnica para identificar transientes na presença de forte ruído, visto a utilização de uma relação de forma fechada dependente da relação sinal-ruído. O artigo introduz também a interpretação física do KE como a medida de dispersão temporal da distribuição de energia tempo-frequência, além de apresentar sua definição matemática e propriedades. Com essa definição, fica evidente que a técnica não substitui, mas sim suplementa a densidade espectral de potência, o que já havia sido afirmado em outros trabalhos, como em Vrabie *et al.* (2003), porém sem abordar a questão tão aprofundadamente.

O trabalho de Tianyang Wang *et al.* (2019) realiza uma revisão bibliográfica geral sobre técnicas utilizadas para o monitoramento de condição com vibração aplicado a caixas de engrenagem planetárias de turbinas eólicas. Apesar da especificidade da aplicação, o artigo cita diversos trabalhos que, além de usar uma série de técnicas diferentes, também as adaptam e as combinam entre si, estimulando a aplicação dessas técnicas e o desenvolvimento de outras em mais contextos. O funcionamento exato de cada técnica não é o enfoque no momento, mas é interessante introduzir algumas combinações possíveis entre técnicas avançadas de processamentos de sinais e algoritmos. A Tabela 4 do trabalho em questão lista muitas outras opções, mas alguns casos são comentados abaixo para destaque:

- Uso de um algoritmo baseado em Kurtograma Espectral para detecção de faltas de rolamento sob forte ruído. Tianyang Wang *et al.* (2016) utilizou a razão entre kurtogramas de vibração sob condição de falta e sadia, construindo um diagrama para localizar a banda de frequência correspondente à ressonância induzida pela falta de rolamento estudada;
- Para dispensar a necessidade de uma referência sadia para a análise, a qual não é sempre disponível, Tianyang Wang *et al.* (2018) construiu um kurtograma baseado em índice

combinado com modulação de frequência em malha;

- Zhipeng Feng e Liang (2014) destaca as frequências de interesse com relação ao ruído de fundo empregando o método de limiarização com decomposição atômica iterativa, no qual o dicionário de Fourier (representação esparsa) é selecionado de acordo para corresponder com as ondas harmônicas do domínio da frequência;
- Algumas das técnicas mencionadas acima foram combinadas de outra forma no trabalho de Qin *et al.* (2018) para resolver um problema de otimização. Utilizou-se uma representação esparsa automática para identificar características transientes com um curtose baseado em índice melhorado para determinar parâmetros esparsos combinado com um algoritmo de limiarização iterativa.

Além dos algoritmos para detecção de faltas, o trabalho de Tianyang Wang *et al.* (2019) também aborda o problema da influência da carga para o processo, assim como ocorre para o tema do presente trabalho. Da mesma forma, para a aplicação explorada no artigo, existem poucos trabalhos que exploram a influência da condição operativa sobre a detecção de faltas. Para enfrentar essa questão, cita-se algumas estratégias, embora algumas estejam fora do escopo apenas de análise em frequência:

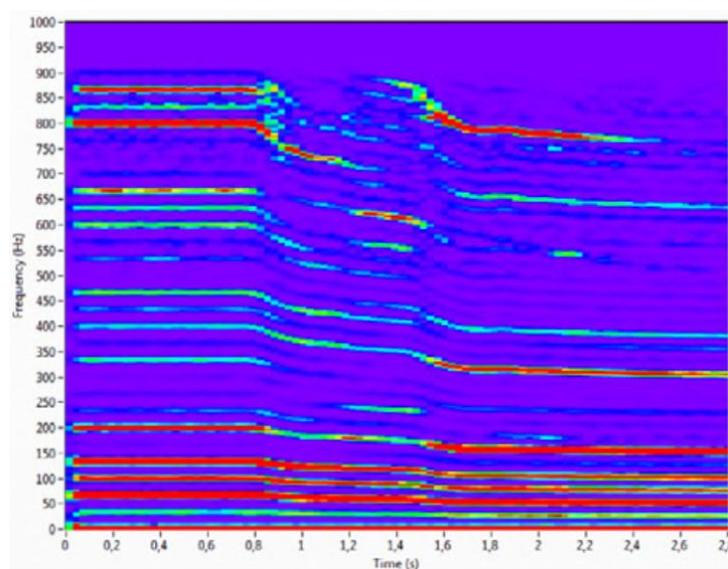
- Uso de distribuições de valores pico-a-pico e RMS em função de valores de potência do gerador (ZIMROZ *et al.*, 2014);
- Extração de características para cada faixa operativa (DYBAŁA, 2013);
- Aplicação de transformação-S para rastrear a energia vibracional, realizando normalização de amplitude para mitigar a influência da variação de carga (YANG, W. *et al.*, 2014);
- Separação da parte do sinal de vibração original relacionada à carga com análise de decomposição de modo empírico, estratégia que não evidenciou relação entre o número de funções de modo intrínseco e danos ou condições operativas, para a aplicação em questão (ANTONIADOU *et al.*, 2015);
- Análise de ângulos de fase para condições não-estacionárias de operação utilizando entropia de amostra como indicador, utilizando-se de duas características: da independência entre cargas externas e a parte do sinal relativa à modulação em frequência; e das informações características de falta estarem contidas na modulação de falta (FENG, K. *et al.*, 2017).

B.3 TRABALHOS ACADÊMICOS SOBRE ANÁLISES DE TEMPO-FREQUÊNCIA

Em Manhertz e Berezky (2021), utiliza-se uma das técnicas de tempo-frequência mais simples, de espectrograma de STFT, para uma avaliação híbrida de sinais de vibração,

através de imagens, para suporte à análise transiente de máquinas rotativas. Em comparação à FFT, mencionada na Seção 3.3.2, o janelamento utilizado para STFTs é semelhante a uma convolução, com faixas de sobreposição do sinal para o cálculo da DFT em cada instante de tempo. O espectrograma resultante da técnica é mostrado na Figura 93, embora o trabalho em questão siga com outros algoritmos e processamentos para melhor extração e visualização das informações.

Figura 93 – Espectrograma de STFT do sinal de vibração transiente de um motor diesel.

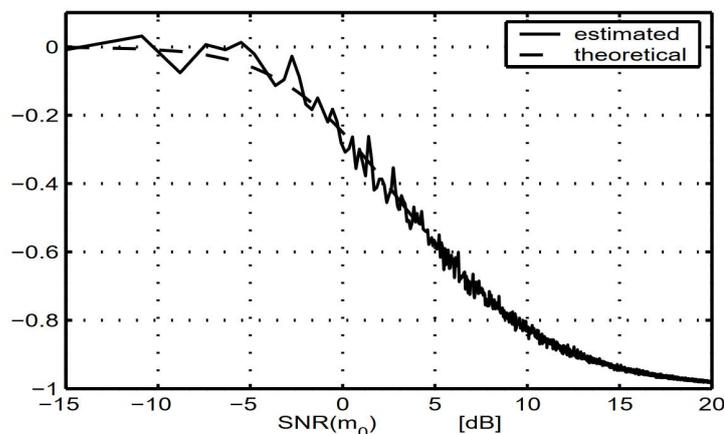


Fonte: Manhertz e Berezky (2021).

Já o trabalho de Liu *et al.* (2020), utiliza a transformada mais disseminada no contexto de análises de tempo-frequência, a transformada de *wavelet*. No trabalho, buscou-se detectar faltas de rolamento em pás de turbinas eólicas através de um método de limiarização empírica sobre *wavelets* de sinais de vibração. Essa abordagem consistiu em projetar as *wavelets* como uma família equivalente de filtros, os quais podem ser melhor compreendidos sob a ótica de Fourier, entretanto não se entrará em detalhes nesse exemplo de uso. Mais especificamente, porém, a construção das *wavelets* empíricas utilizadas no trabalho se baseou em outras duas: Littlewood-Paley e Meyer, as quais também são definidas como séries de filtros passa-faixa. Por fim, destaca-se que esse trabalho utilizou a métrica curtose como método indireto para avaliar a relação sinal-ruído de defeitos, o que pode ser visualizado pela Figura 94, de outro artigo, na qual o valor de curtose de um sinal é calculado para determinada faixa de frequência, por isso chama-se Kurtograma Espectral em Vrabie *et al.* (2003), em que se demonstra a imparcialidade do estimador.

Embora as técnicas de análise de tempo-frequências sejam as mais adequadas atualmente para a detecção de faltas com vibração, elas se mostram também com complexidade superior, cada qual apresentando suas dificuldades práticas. O trabalho de Xiuzhi He *et al.*

Figura 94 – Ilustração da relação entre o valor de curtose espectral e relação sinal-ruído.



Fonte: Vrabie *et al.* (2003).

(2021), por exemplo, focou em melhorar a extração de características do sinal de vibração, uma etapa da análise, ao melhorar o desempenho da decomposição variacional de modos com um algoritmo adaptativo para seleção dos hiperparâmetros do método.

Outro fator relevante para análises no domínio de tempo-frequência é a grande variedade de distribuições já existentes que poderiam ser testadas e possíveis combinações entre elas ou com outros métodos. O trabalho de Taghizadeh-Alisarai e Mahdavian (2019) investigou faltas em unidades injetoras com diferentes métodos. Entre eles, o teste de Welch divide o sinal de interesse em algumas partes sobrepostas, calcula a FFT de cada parte e calcula a densidade espectral de potência do sinal com algumas considerações adicionais, demonstrando a possibilidade de combinação de técnicas mais simples para melhoria de desempenho. Também foi explorada a STFT para demonstrar que, mesmo técnicas mais simples isoladas podem possuir vantagens, nesse caso de evitar interferência cruzada. Além disso, o trabalho explora processamentos de 2ª ordem do domínio tempo-frequência, como a distribuição de Wigner-Ville, que apresenta boa resolução entre tempo e frequência, porém pode causar a identificação de frequências erradas devido à presença de termos cruzados. Outra distribuição testada é a de Choi-Williams, com parâmetros como velocidade angular e fator de escala, o qual aproxima a distribuição com a de Wigner-Ville se possuir um valor alto o suficiente, demonstrando brevemente como se dá a evolução de métodos para análise de tempo-frequência e como esses se relacionam.

Em Gangsar e Tiwari (2019), comparam-se alguns tipos de *wavelet*, entre elas Daubechies, Haar, Coiflet e Shanon para extração dos dados dos sinais de vibração. O trabalho calcula a energia relativa das *wavelets* e então seleciona a escala que maximiza a energia para cada uma, para calcular os coeficientes correspondentes nessa configuração. As características estatísticas são extraídas das *wavelets* calculadas, formando o banco de dados para o aprendizado de máquina com Máquina de Vetores de Suporte. Por fim, ainda resta a etapa de

otimização do modelo para classificação das faltas estudadas.

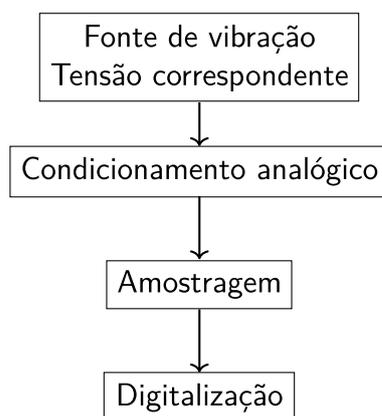
APÊNDICE C – AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO

Este Apêndice aprofunda conteúdos do Capítulo 4 sobre a aquisição de sinais de acelerômetros com eletrônica integrada e sobre os pré-processamentos necessários para obter o sinal de velocidade de vibração.

C.1 AQUISIÇÃO DOS SINAIS

Replica-se a Figura 49 abaixo, na Figura 95, para maior clareza sobre as etapas necessárias para aquisição dos sinais de vibração desde a captação até a disponibilização para análise com computador.

Figura 95 – Etapas para aquisição dos sinais de vibração.

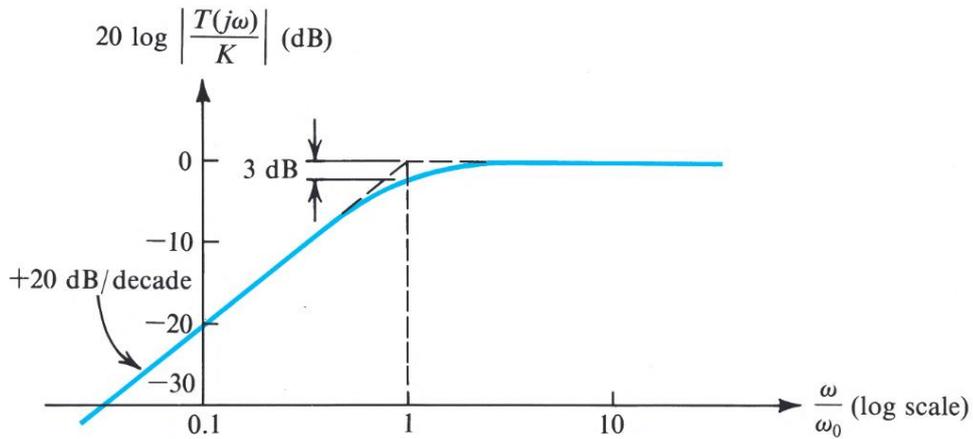


Fonte: Próprio autor.

Para a remoção do nível CC de um sinal, podem ser utilizados filtros analógicos. Como o interesse é apenas a remoção da frequência de 0 Hz do sinal, não há exigência quanto à ordem do filtro, que pode ser a mais baixa, de 1ª ordem, cuja função transferência é dada por (C.1), em que K é uma constante qualquer, s é a variável relativa à frequência no domínio de Laplace e ω_0 é a frequência angular de corte do filtro, cuja resposta em frequência é ilustrada na Figura 96 (SEDRA; SMITH, 2015). Vê-se que, abaixo da frequência de corte, a amplitude do sinal decai 20 dB por década. Na escala logarítmica, existem infinitas décadas entre 0 Hz e qualquer frequência acima, por isso é possível escolher um filtro de baixa ordem nesse contexto. Na prática, uma atenuação a partir de 30 dB (1000 vezes) seria suficiente para desprezar o nível CC do sinal, atenuação essa desejada em frequências não muito abaixo da mínima frequência do sinal, o que poderia ser insuficiente para atenuar outros sinais de baixa frequência indesejados. Ainda, pretendendo-se uma faixa de atenuação nula e plana nas frequências de interesse, é interessante escolher a frequência de corte uma década ou próximo abaixo da menor frequência de interesse.

$$T(s) = \frac{K \cdot s}{s + \omega_0} \tag{C.1}$$

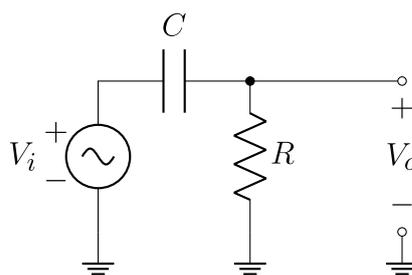
Figura 96 – Resposta em frequência de um filtro de 1ª ordem.



Fonte: Sedra e Smith (2015).

Um filtro simples de 1ª ordem pode ser implementado como o circuito da Figura 97. O circuito possui um capacitor no caminho do sinal para bloquear o nível CC e um resistor de referência para o terra, que forma um caminho fechado para o terra e deve ser no máximo na ordem de dezenas de kilo ohms (HOROWITZ; HILL, 2006).

Figura 97 – Circuito básico para remoção de nível CC de sinal.



Fonte: Próprio autor.

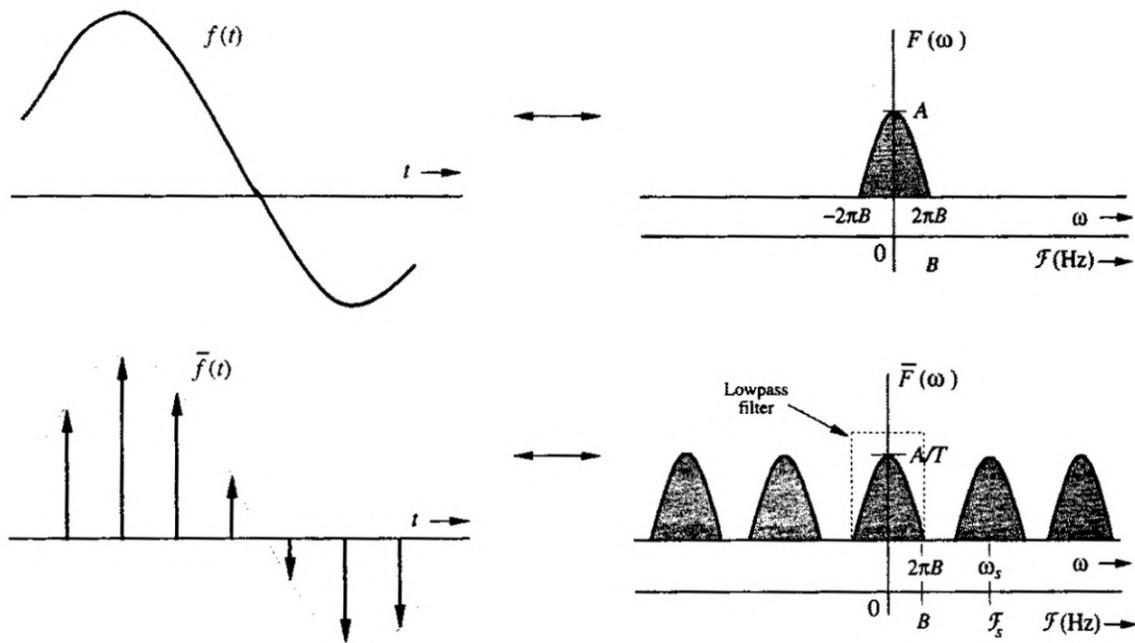
A função transferência do circuito pode ser obtida resolvendo-o conforme (C.2), obtendo-se os parâmetros do filtro ao comparar essa equação com (C.1), de onde $K = 1$ e $\omega_0 = 1/RC$. Com isso, é possível ajustar o filtro de acordo com as necessidades da aplicação.

$$\begin{cases} -V_i + \frac{1}{sC}I + RI = 0 \\ I = \frac{V_o}{R} \end{cases} \implies T(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{s}{\frac{1}{RC} + s} \tag{C.2}$$

Em posse do sinal filtrado, pode-se seguir com a amostragem, a qual permite o processamento de sinais contínuos através de um sistema discreto (LATHI, 1998).

O Teorema da Amostragem mostra que um sinal cujo espectro em frequência seja limitado a uma banda de B Hz pode ser completamente reconstruído se suas amostras forem obtidas uniformemente a uma taxa de amostragem $f_s > 2B$ amostras por segundo (LATHI, 1998), o que pode ser entendido pela Figura 98, em que o espectro do sinal amostrado é repetido em intervalos de f_s , de forma que idealmente a banda do sinal possa ser recuperada se a relação mencionado for atendida.

Figura 98 – Representação de um sinal, de sua amostragem e dos respectivos espectros em frequência.

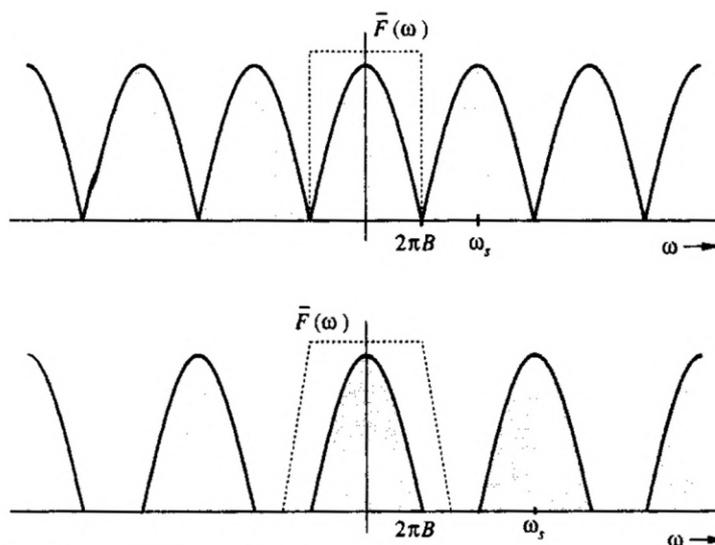


Fonte: Lathi (1998).

Na prática, como não é possível projetar filtros ideais, a frequência de amostragem deve ser maior do que $2B$ para que seja possível separar a banda do sinal de uma réplica sua centrada na frequência de amostragem Lathi (1998). Assim, é possível projetar um filtro que tenha uma resposta em frequência adequada às necessidades, conforme ilustrado na Figura 99. Esse tipo de filtro é chamado de *anti-aliasing*, ou anti-recobrimento, pois impede a sobreposição das múltiplas bandas do sinal discreto de interesse ao limitá-las (LATHI, 1998).

Por fim, com os sinais amostrados disponíveis, pode-se executar a etapa de digitalização. Para isso, é necessário um conversor A/D, devendo-se atentar para a sua resolução a depender da precisão desejada. A resolução é usualmente mencionada em número de bits n , relacionado com o número de estados 2^n que o conversor pode assumir (TEXAS INSTRUMENTS, 1995). A relação entre precisão analógica e número de bits do conversor é ilustrado na Figura 100,

Figura 99 – Representação das bandas de um sinal discreto com amostragem $f_s = 2B$ e $f_s > 2B$. Em pontilhado, a resposta em frequência necessária para os filtros de anti-recobrimento.



Fonte: Lathi (1998).

que representa o mapeamento dos valores analógicos para a sequência de bits correspondente, exemplificando com um conversor de 3 bits.

Conhecendo-se a excursão de tensão dos sensores devido aos sinais de vibração, é possível determinar o número de bits adequado ou, com uma resolução pré-definida, é possível determinar o menor sinal que poderia ser digitalizado. Como a alimentação dos sensores utilizados nesse trabalho é definida pelo fabricante e para a aquisição foi utilizada uma placa de aquisição comercial com resolução pré-definida, a análise possível é a segunda, através da relação (C.3), em que V_+ é a tensão de alimentação dos sensores.

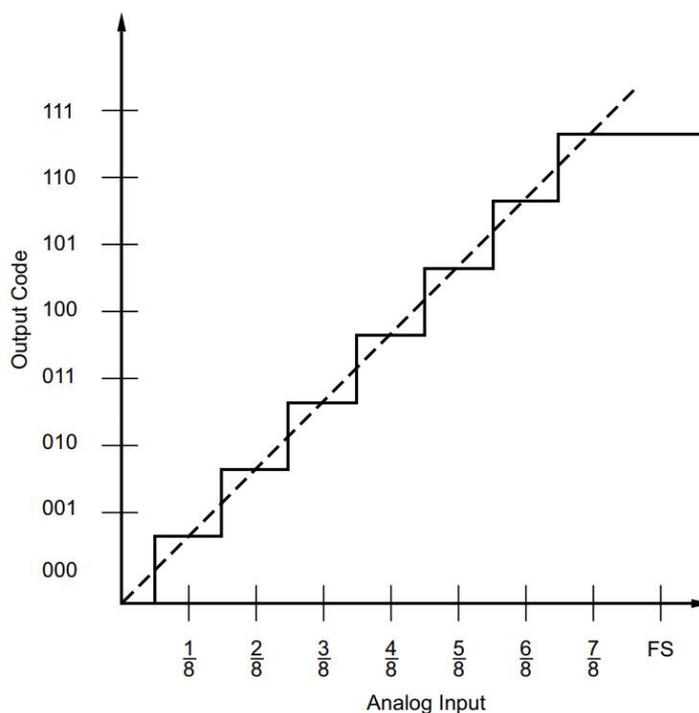
$$A_{min} = \frac{V_+}{2^n} \quad (C.3)$$

Existem diferentes tipos de conversores A/D, que dependem da aplicação, conforme ilustrado na Figura 101.

Conforme já mencionado, a banda de interesse de sinais de vibração, em especial os acelerômetros, abrangeria até 10 kHz, o que, pelo Teorema de Amostragem, requer uma taxa de amostragem a partir de 20 kHz. Entretanto, dadas as características do gerador do laboratório, cuja frequência teórica de interesse mais alta está perto de 1 kHz, entende-se que é possível considerar uma taxa menor para a aplicação. Dessa forma, conforme a Figura 101, o conversor $\Delta\Sigma$ se mostra o mais adequado para a aplicação deste trabalho. Esse conversor tem as vantagens de (TEXAS INSTRUMENTS, s.d.):

- Alta resolução;

Figura 100 – Representação da função de transferência de um conversor A/D ideal de 3 bits.



Fonte: Texas Instruments (1995).

- Alta estabilidade;
- Baixo consumo de potência;
- Baixo custo.

Ainda, de maneira geral, para esse tipo de conversor, os 8 bits menos significativos costumam não contribuir com informação, correspondendo a ruído aleatório produzido no conversor (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2023). Por um lado, o número equivalente de bits do conversor é menor do que o estabelecido, porém esses bits podem ser utilizados em algoritmos de filtros digitais para melhorar a resolução da medição ou digitalização, de forma que a perda de informação seja atenuada (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2023).

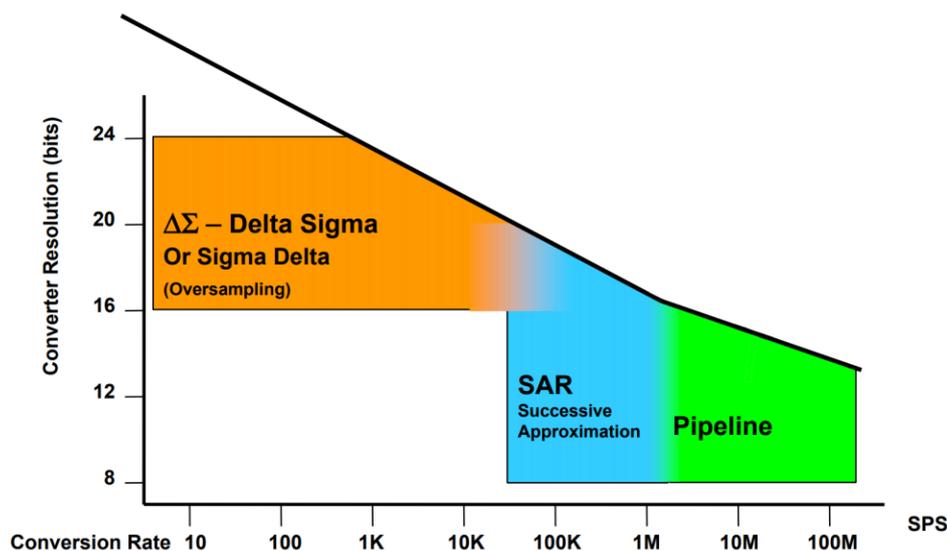
Com a conclusão da digitalização do sinal, tem-se os dados na forma requerida para seguir com processamentos e análises em computador.

C.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS ADQUIRIDOS

Replica-se a Figura 51 abaixo, na Figura 102, para maior clareza sobre as etapas necessárias para a obtenção dos sinais de vibração a partir dos sinais dos acelerômetros.

Essa Seção focará na teoria e contextualização dos pré-processamentos utilizados no trabalho, abordando brevemente as implementações.

Figura 101 – Tipos de conversores A/D conforme banda de interesse.



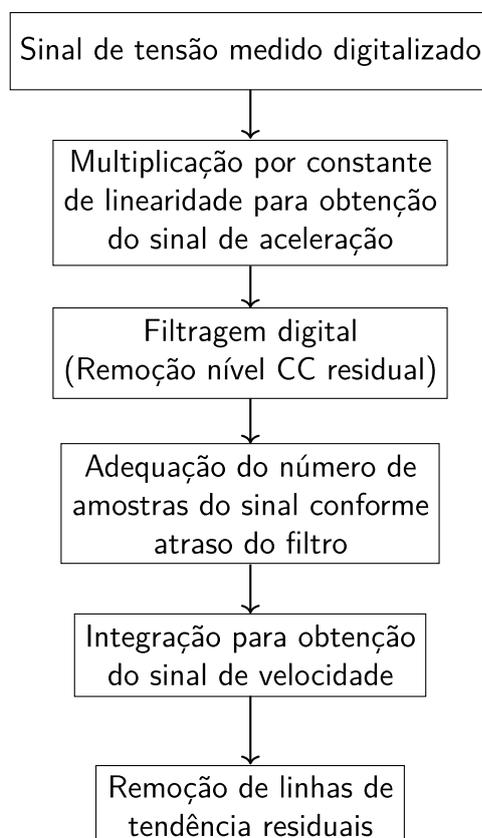
Fonte: Texas Instruments (s.d.).

C.2.1 Filtragem digital

Para remover o nível CC residual do sinal digitalizado e permitir que os algoritmos de integração consigam cumprir suas funções adequadamente, pode-se utilizar filtros digitais. Esses filtros podem ser classificados de acordo com suas respostas ao impulso: *Finite Impulse Response* (FIR) ou *Infinite Impulse Response* (IIR). Comparando-os, FIRs podem ter fase linear, maior estabilidade e requerem mais recursos computacionais, enquanto IIRs podem ser preferíveis para aplicações em tempo real, quando é necessário baixa latência (DIFFERENCE... , 2020). Entretanto, ambos os filtros são similares aos filtros analógicos do ponto de vista de projeto, possuindo as mesmas definições (FILHO, 1998), conforme ilustrado pela representação de respostas em frequência da Figura 103. Nessa figura, vê-se a amplitude da banda de passagem de 0 dB, com qualquer variação de amplitude nessa faixa ou ondulação caracterizando uma distorção (FILHO, 1998). Vê-se também a banda de rejeição de amplitude, em dB, $-A_{min}$ e, entre as frequências ω_s e ω_p , a faixa de transição, na qual a atenuação máxima pode ser A_{max} e a mínima A_{min} , podendo haver uma ou mais faixas de rejeição ao redor, dependendo do tipo de filtro. Assim como no sistema comercial de análise de vibração instalado no laboratório, este trabalho utilizou um filtro FIR para a aplicação, sobre o qual se dará o enfoque neste tópico.

A resposta dos filtros FIRs depende de suas N entradas anteriores, ponderadas pelos coeficientes h_k do filtro, também chamados de pesos dos *taps* (LATHI, 1998), conforme expresso em (C.4). Pela natureza finita da resposta do filtro, qualquer resposta obtida é necessariamente uma aproximação, com um número infinito possível de soluções para determinada configuração de N coeficientes, dada a periodicidade da resposta em frequência (LATHI, 1998).

Figura 102 – Etapas de pré-processamento dos sinais adquiridos.



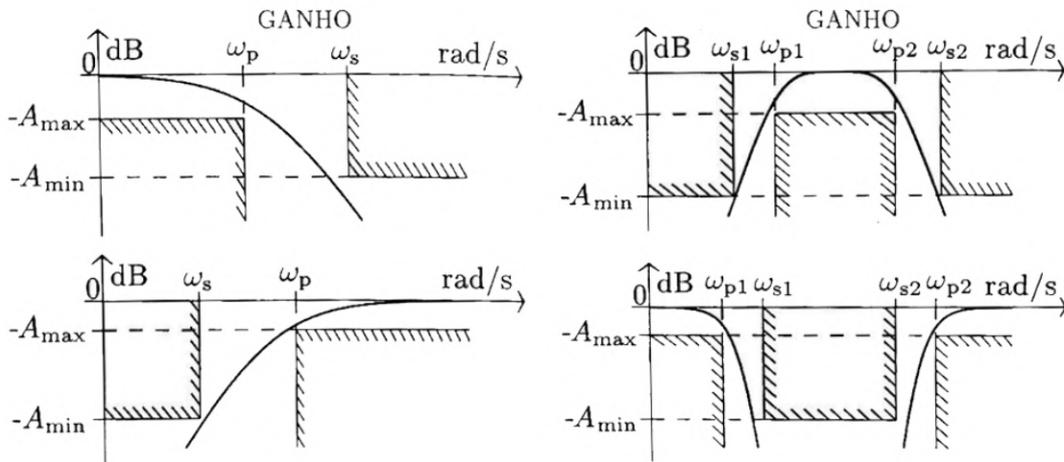
Fonte: Próprio autor.

Para contornar isso, um método simples e eficaz é selecionar as frequências do filtro separadas uniformemente entre 0 e 2π . O projeto do filtro é finalizado com a seleção do número de *taps* desejados, i.e. o comprimento do filtro, o que pode fornecer uma aproximação melhor conforme mais coeficientes são utilizados (LATHI, 1998).

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x[n-k] \quad (\text{C.4})$$

Ainda, uma prática comum para o projeto desses filtros que se mostra rápida, conveniente e robusta, embora geralmente subótima, é o janelamento, que consiste em aplicar uma função de janelamento a uma resposta ao impulso ideal (WINDOW..., 2023). As funções de janelamento são limitadas no tempo, de forma que quando são aplicadas a um sinal, o produto também é limitado no tempo (WINDOW..., 2023). Além de limitar o comprimento do sinal, usualmente as primeiras e últimas amostras são atenuadas para que, ao aplicar uma transformada de Fourier e forçar uma periodicidade, não haja diferença brusca de amplitude na transição entre um período do sinal e outro, o que incluiria harmônicas fictícias na resposta ao impulso (WINDOW..., 2023). Pelo Teorema da Convolução, a resposta ao impulso do produto escalar entre o sinal amostrado e a função de janelamento no domínio do tempo é a

Figura 103 – Características de interesse para o projeto de filtros, como banda de passagem, rejeição e transição nos filtros de tipo (de cima para baixo) passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa.



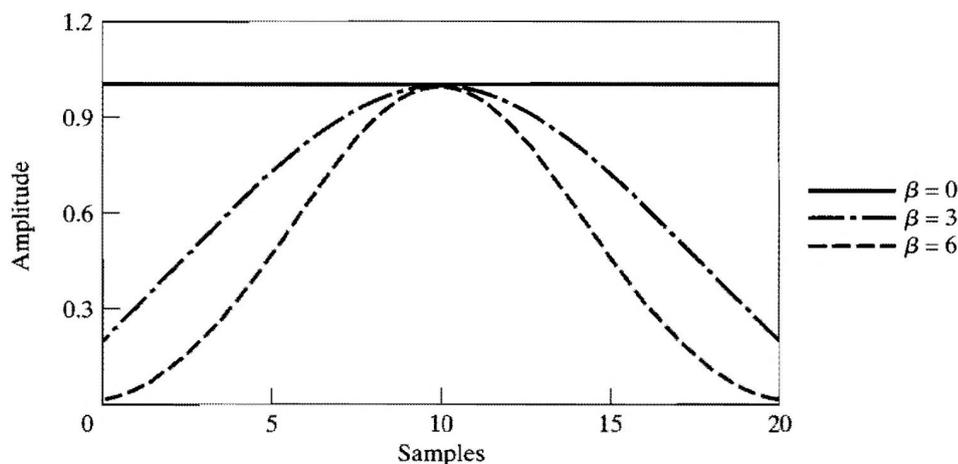
Fonte: Adaptado de Filho (1998).

convolução entre ambos no domínio da frequência, existindo inúmeras funções de janelamento que podem ser escolhidas de acordo com o compromisso de projeto, buscando impactar o menos possível determinadas características do sinal ou ressaltar outras (WINDOW... , 2023).

Uma função de janelamento comum para filtros digitais é a Kaiser, ou Kaiser-Bessel, que tem desempenho excelente para concentração de energia no lóbulo principal, ou no pico ao redor da frequência zero (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011). Isso contribui para uma manutenção mais fiel da resposta ao impulso do sinal, visto a atenuação das amostras extremas da janela e das bandas laterais (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011). O compromisso entre a largura do lóbulo principal e a amplitude das bandas laterais pode ser ajustado com o parâmetro β , que para esse trabalho vale 5.65326, e com o comprimento da janela $M + 1$, conforme (C.5), em que $\alpha = M/2$ e $I_0(\cdot)$ é a função Bessel modificada de ordem zero e de primeiro tipo (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011). As Figuras 104 e 105 mostram a variação da janela e das transformadas de Fourier de acordo com a variação dos parâmetros mencionados.

$$w[n] = \begin{cases} \frac{I_0 \left[\beta \sqrt{1 - \left(\frac{n - \alpha}{\alpha} \right)^2} \right]}{I_0(\beta)}, & 0 \leq n \leq M, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{C.5})$$

Felizmente, atualmente existem ferramentas disponíveis na linguagem de programação *Python* que auxiliam no projeto desses filtros, como a biblioteca *Scipy*, mais em específico seu submódulo *Signal*. Considerando o projeto do filtro com o método de janelamento, a função *firwin* projeta o filtro, determinando seus *taps* a partir do número de *taps*, da

Figura 104 – Janelas Kaiser para diferentes valores de β .

Fonte: Adaptado de Oppenheim e Schafer (2011).

frequência de corte, da função de janelamento e do ganho na frequência zero ou tipo de filtro desejados (SCIPY..., 2023). Com `kaiserord`, é possível determinar valor ótimo para o número de *taps* e para o parâmetro β a partir da ondulação desejada na banda de passagem do filtro e do tamanho permitido para a banda de transição (SCIPY..., 2023).

Para o caso desse trabalho, em que o filtro FIR foi utilizado para remoção do nível CC do sinal, pode-se observar o filtro projetado pelo método de janelamento nas Figuras 106 e 107, respectivamente os *taps* e a resposta em frequência obtidos.

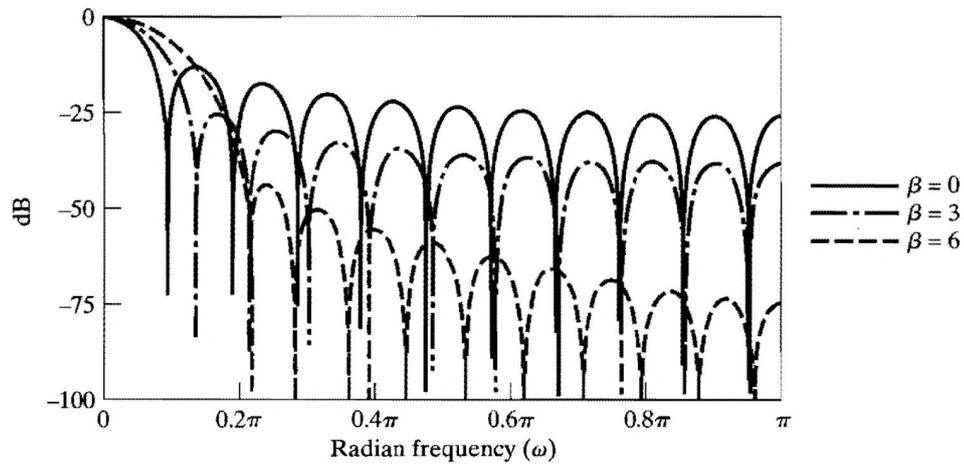
Por fim, para aplicar o filtro ao sinal de vibração, foi utilizada a função `lfilter`. Com ela, basta fornecer os coeficientes do filtro e o sinal que se deseja filtrar (SCIPY..., 2023). Entretanto, como com qualquer filtro, sua aplicação causa um atraso no sinal, que no caso de sinais amostrados, que têm tamanho fixo, é equivalente a uma perda de amostras portadoras de informação, conforme ilustrado na Figura 108. Portanto, essas amostras são retiradas do sinal para que seu tamanho corresponda apenas ao resultado final do sinal filtrado.

Para o caso deste trabalho, o filtro apresentou um atraso de 0.90636 segundo, equivalente a 22659 amostras. Para se ter um tempo de aquisição inteiro, mais facilmente conhecido em análises práticas, escolheu o tempo final de 9 segundos, abaixo do resultante do atraso do filtro. Com isso, desconsideraram-se 27340 amostras por aquisição, além da amostra perdida no processo de integração, como será comentado a seguir.

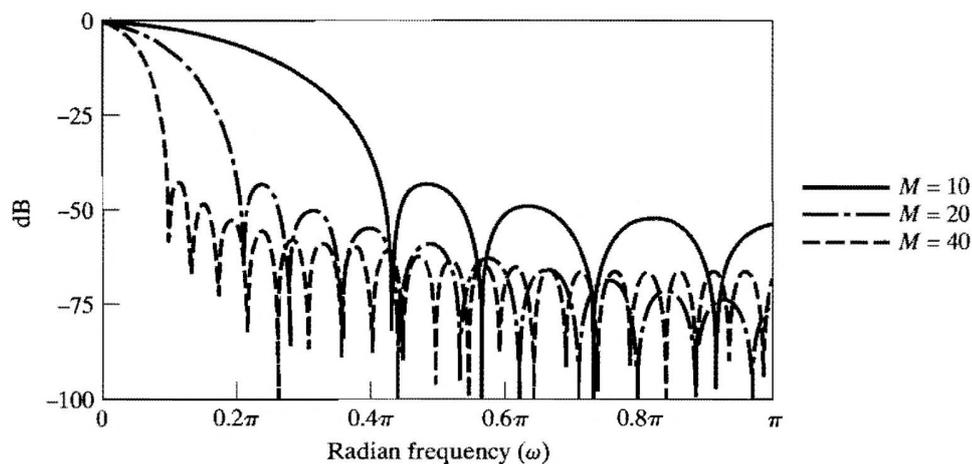
C.2.2 Integração digital

Outro pré-processamento necessário para a obtenção do sinal de velocidade a partir do sinal de aceleração é a integração. Existem algumas opções para realizar a integração numérica de um sinal, sendo a regra trapezoidal escolhida nesse trabalho, pois possui um balanço satisfatório entre precisão e desempenho. O método de integração pode ser calculado

Figura 105 – Transformadas de Fourier da janela Kaiser para diferentes valores de β e M , demonstrando o compromisso entre largura do lóbulo principal e amplitude das bandas laterais.



(a) Variação de β .



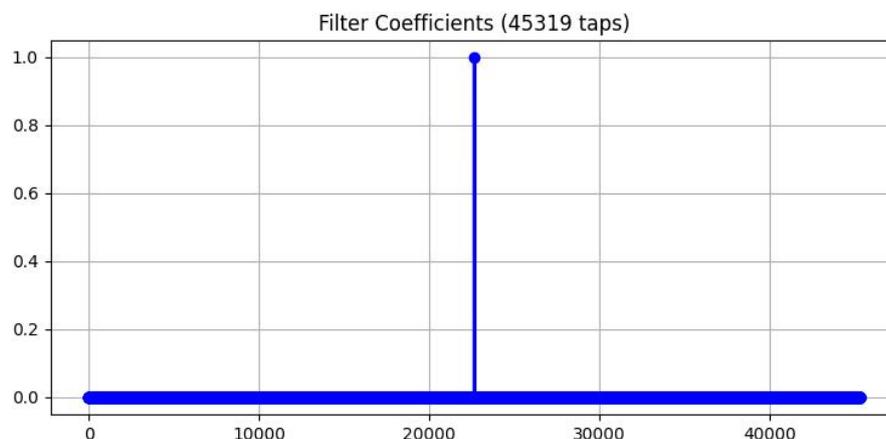
(b) Variação de M .

Fonte: Adaptado de Oppenheim e Schaffer (2011).

por (C.6), em que a e b são as coordenadas do eixo independente e $f(*)$ é a função, ou sinal, de interesse nesse pontos; o termo atrelado a $f''(\xi)$ representa o erro do método (FAIRES; BURDEN, 2002). Vê-se que a integração pelo método trapezoidal é, basicamente, a média entre valores do sinal, por isso qualquer nível CC existente será somado duas vezes em cada passo da integração, o que explica a sensibilidade do algoritmo a constantes. Foi utilizada a implementação em *Python* do método citado com a função `cumulative_trapezoid`, dessa vez do submódulo *Integrate* da biblioteca *Scipy*.

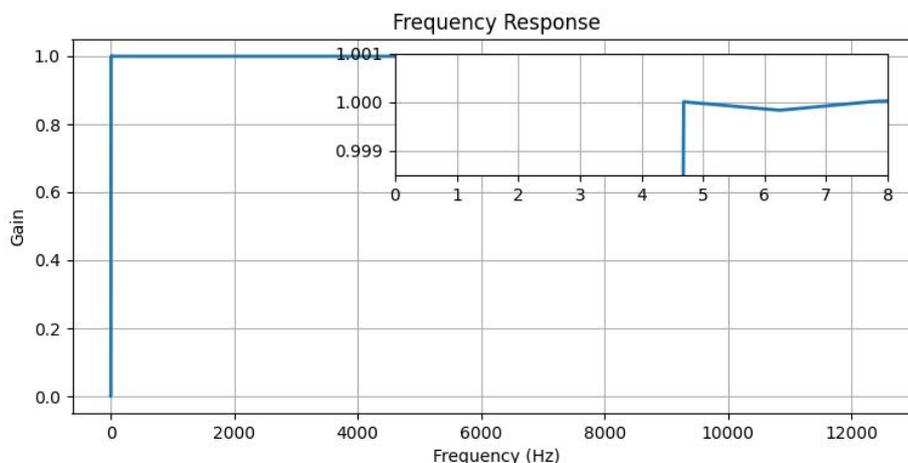
Na prática, mesmo com a filtragem analógica descrita na Seção C.1, além de persistir algum nível CC mínimo que o filtro não atenua, fontes externas também têm impacto. A própria placa de aquisição e digitalização utilizada nesse trabalho pode inserir erros de *offset*, se não calibrada adequadamente para desvios de temperatura (INSTRUMENTS, 2023). Por

Figura 106 – *Taps* obtidos para o filtro FIR projetado pelo método de janelamento com a função Kaiser.



Fonte: Próprio autor.

Figura 107 – Resposta em frequência do filtro FIR projetado pelo método de janelamento com a função Kaiser, com destaque para frequências em torno da frequência de corte desejada.



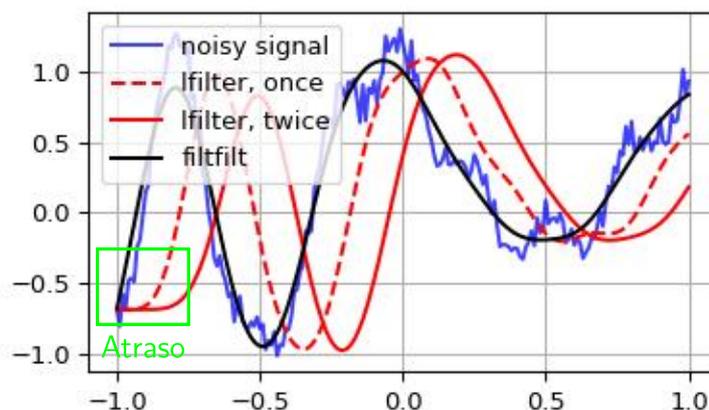
Fonte: Próprio autor.

isso, caso o sinal não fosse filtrado novamente, a integração digital ocasionaria no resultado da Figura 109, em que os sinais se tornam rampas que tendem ao infinito ou menos infinito devido aos níveis CC residuais, ilustrando a sensibilidade do algoritmo de integração mencionado.

$$\int_a^b f(x)dx = (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2} - \frac{f''(\xi)}{12} (b - a)^3 \quad (\text{C.6})$$

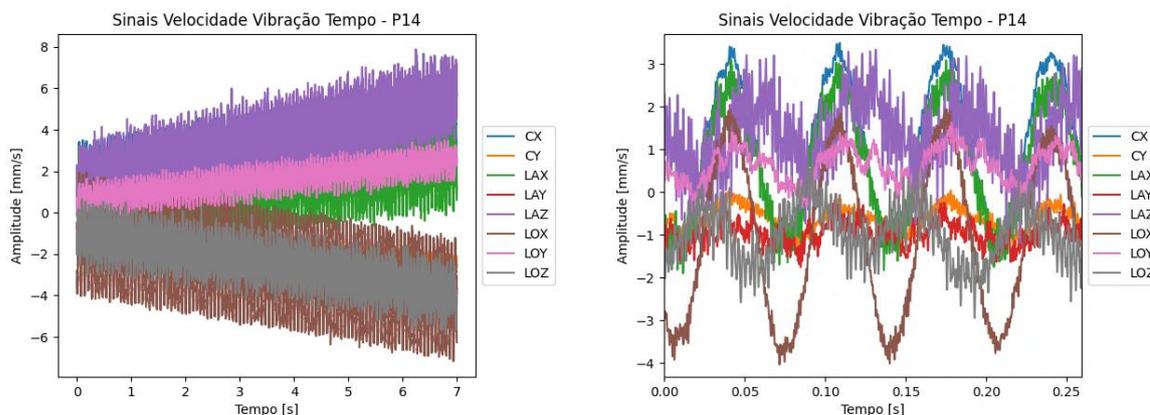
Por fim, além das medidas realizadas nas implementações em *Python* para a preservação das informações originais dos sinais de interesse, após a integração ainda foi aplicada a função

Figura 108 – Ilustração do efeito de filtragem com respectivos atrasos, destacados em verde, resultando na perda de amostras posteriormente.



Fonte: Adaptado de SCIPY... (2023).

Figura 109 – Efeito da integração digital em sinais com pequenos níveis CC residuais. Vê-se que a informação de interesse está presente no sinal integrado, apesar da presença da rampa.



(a) Rampa visível no sinal integrado.

(b) Detalhe de alguns períodos do sinal.

Fonte: Próprio autor.

detrend, novamente do submódulo *Signal*. Essa função permite a remoção de qualquer rampa gerada, garantindo um sinal integrado com ainda menos interferências numéricas.

ANEXO A – ARTIGOS PRODUZIDOS

Apresenta-se alguns produtos acadêmicos do trabalho na forma de artigos.

Foram duas publicações e apresentações no 15º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, de 2022, sobre resultados preliminares deste trabalho:

- Electrical Faults in a Grid-Synchronized Generator Detected by Vibration Monitoring;
- Detection of Electrical Faults in a Synchronized Generator through Mechanical Vibration at Various Operating Conditions.

Publicou-se e apresentou-se também, no 16º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, de 2024, um artigo que compila as principais conclusões da dissertação:

- Aplicação de métricas globais complementares à ISO 20816 para o monitoramento de vibração mecânica em gerador síncrono.

Electrical Faults in a Grid-Synchronized Generator Detected by Vibration Monitoring

Guilherme F. dos Santos, Carlos A. C. Wengerkiewicz, Nelson J. Batistela and Nelson Sadowski
GRUCAD/EEL
Federal University of Santa Catarina
Florianópolis, Brazil

Luciano M. de Freitas and
Rubens J. Nascimento
ENGIE Brasil Energia
Florianópolis, Brazil

Marcos H. N. Nishioka
and Tiago K. Matsuo
AQTech Power Prognostics
Florianópolis, Brazil

Abstract—Mechanical vibration analysis is widely used for the early detection of mechanical faults in rotating machines. A synchronous generator test bench that allows the controlled imposition of faults was used in this work to explore the sensitivity of vibration monitoring procedures to electrical faults. A methodology based on the standard ISO 20816-1 employed the analysis of the vibration velocity RMS values and frequency spectrum to detect and identify the faults imposed. The sensitivity of the vibration methodology was demonstrated for both detection and identification purposes.

Keywords—vibration, electrical, fault, detection, identification, methodology, generator

I. INTRODUCTION

Vibration analysis is a widely used technique for condition monitoring of synchronous generators. It is usually complemented by other techniques, like temperature, airgap magnetic flux and partial discharge monitoring, in order to improve the detection and identification of several fault types [1]. For instance, mechanical issues are commonly detected through vibration sensors, while short circuits in the field winding are mainly detected by means of internal flux sensors.

These additions, however, tend to increase the installation complexity and cost. This study assesses the detection and identification of electrical faults, i.e. interturn short circuits in the stator and rotor windings, through the analysis of changes in RMS values and frequency spectra of vibration velocity signals. The assessment is achieved by performing a series of tests in a test bench which allows the controlled imposition of faults and then measuring the signals from accelerometers installed in the generator bearings and frame.

II. TEST BENCH AND VIBRATION ANALYSIS SYSTEM

The test bench employed in this work was designed to enable the development of a fault detection technique based on stray magnetic flux [2]–[4]. As depicted in Fig. 1, the test bench contains a 15 kW DC motor, positioned at the center and acting as a primary machine, a 10 kVA two-pole smooth-rotor synchronous generator on the left and a 10 kVA eight-pole salient rotor generator on the right. The generators can operate either isolated or synchronized to the grid.

Both generators feature mechanisms for controlled fault imposition: taps in the stator and rotor windings for the



Fig. 1: Test bench for fault imposition with positions of accelerometers illustrated.

imposition of short circuits; terminals for short circuiting the stator sheets; bearings with adjustable height for shaft misalignment; and support disks on the shaft ends and weights for mechanical unbalance.

The vibration monitoring system is composed of a processing unit and 8 accelerometers: three at the X, Y and Z axes on the bearing at the drive side (DS), three on the opposite (OS) bearing and two on the frame corresponding to the X and Y axes. Thus, the accelerometers are identified as DSX, DSY, DSZ, OSX, OSY, OSZ, FX and FY, as indicated in Fig. 1.

The processing unit continuously registers acceleration and velocity RMS values for all sensors, measured at 5 s intervals, as well as the operating condition (OC), i.e. the active and reactive power delivered by the machine. A detailed record sampled at 20 kHz during 30 s can be triggered manually to allow frequency analysis of the vibration velocity signal.

III. METHODOLOGY

The ISO 20816 standard [5] recommends the classification of the condition of machines smaller than 15 kW according to the following vibration velocity RMS thresholds:

- Below 0.71 mm/s: excellent;
- From 0.71 mm/s to 1.8 mm/s: normal;
- From 1.8 mm/s to 4.5 mm/s: unsatisfactory (Alarm);
- Above 4.5 mm/s: severe (TRIP).

The accelerometer signals present different magnitudes according to their position. Thus, the thresholds for each accelerometer were adjusted according to the magnitudes

observed with the generator operating near the rated condition with no fault imposed.

Once an Alarm level is reached, the cause of the anomaly is typically investigated in the frequency domain, as each fault has a specific effect. The most common faults have known characteristics which can be recognized by visual analysis [5]–[7].

IV. TESTS AND RESULTS

The tests were performed with the generator synchronized to the electrical grid. Faults were applied in the machine using an automated system [8] that allows the online fault imposition, i.e. without turning the machine off. The following 5 conditions were applied to the generator sequentially: healthy → stator interturn short circuit (50% of phase A) → healthy → rotor interturn short circuit (50% of one pole) → healthy.

The Fig. 2 shows a trend of vibration velocity RMS values normalized by the Alarm thresholds to illustrate the procedure for fault detection. It is observed that, for most sensors, the steps caused by the fault impositions were sufficient to indicate Alarm levels, demonstrating that the vibration was sufficiently sensitized by the imposed faults.

The main frequency components of the vibration signal for the generator tested are shown in Fig. 3 for the five test conditions. The frequencies are expressed in terms of the rotor frequency (1xRPM), indicating the relation with the electrical (1xElect) and slot (1xSlot) frequencies. When the stator fault is applied, a significant increase occurs in the component of 2 times the electrical frequency. This is related to the event of an stator electrical fault [7], since it produces an asymmetry in the airgap flux whose resulting force has twice the frequency of the stator mmf. With the rotor fault, the components of 1 and 2 times the rotating frequency increase, which indicates a magnetic unbalance in the machine [7], whose effect is a magnetic pull that rotates with the rotor. This shows the different effects from each fault and allow their distinction.

V. CONCLUSION

This work aimed to assess whether it is possible to detect and identify electrical faults in a synchronous generator through vibration monitoring. The results showed that the vibration analysis procedures are sensitive to this type of fault, indicating Alarm levels that detected the anomalies due to the faults imposed. The frequency domain analysis showed the effects from each fault and demonstrated that they can be distinguished.

VI. ACKNOWLEDGMENTS

This work was motivated and partially funded in the scope of the ANEEL R&D program and developed in the R&D programs of ENGIE Brasil Energia and Itá Energética S.A, PD-0403-0033/2012 and PD-00403-0048/2019, both entitled “Non-invasive equipment for fault detection in synchronous generators through the external magnetic field”. This study was also financed by CAPES - Finance Code 001, and by CNPq.

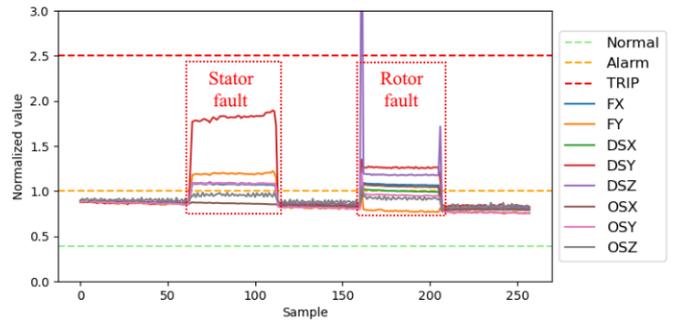


Fig. 2: Vibration RMS values during fault imposition.

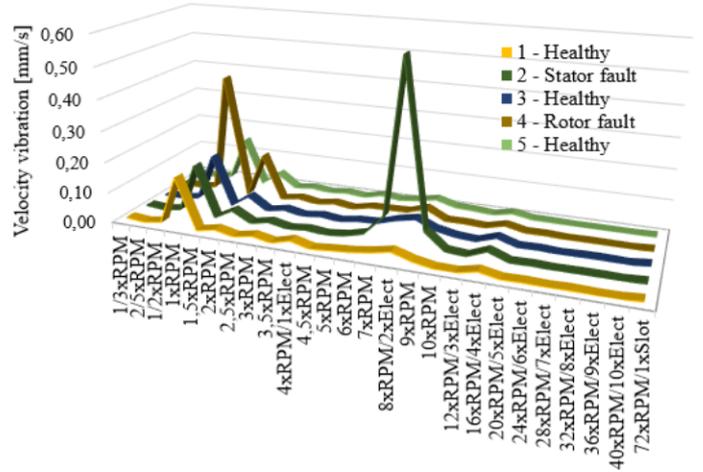


Fig. 3: Trend of main frequency components.

REFERENCES

- [1] P. Tavner, L. Ran, J. Penman and H. Sedding, "Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines", 2nd ed., England: Institution of Engineering & Technology, 2008.
- [2] H. F. Santos et al, "Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field," JMOe, vol. 16, pp. 70-89, 2017.
- [3] H. F. Santos et al, "Estudo experimental de detecção de curto-circuito de chapas em um gerador síncrono de dois polos," in 13th CBMag, Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, Brazil, 2018, vol. 1, pp. 707-711.
- [4] M. Hoegen et al, "Detection of Changes in Magnetic Field Spectra of Synchronous Generators due to Imposed Faults," in 14th CBMag, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil, 2020.
- [5] *Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration*, ISO 20816, International Organization for Standardization (ISO), 2016.
- [6] *Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring*, ISO 13373, International Organization for Standardization (ISO), 2002.
- [7] P. Girdhar, "Machinery fault diagnosis using vibration analysis," in *Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*, 1st ed. Oxford, England: Newnes, 2004, ch. 5.
- [8] G. P. Hessmann, "Sistema automatizado para imposição de faltas em uma máquina síncrona modificada," Undergraduation Final Work, Department of Electrical and Electronic Engineering, UFSC, Florianópolis, 2018.

Detection of Electrical Faults in a Synchronized Generator through Mechanical Vibration at Various Operating Conditions

Guilherme F. dos Santos, Carlos A. C. Wengerkievicz, Nelson J. Batistela and Laurent D. Bernard
GRUCAD/EEL
Federal University of Santa Catarina
Florianópolis, Brazil

Luciano M. de Freitas
and Luiz A. C. Borges
ENGIE Brasil Energia
Florianópolis, Brazil

Tiago K. Matsuo
and Luan Tominaga
AQTech Power Prognostics
Florianópolis, Brazil

Abstract—Mechanical vibration analysis is widely used for the early detection of mechanical faults in rotating machines. A previous study [2] indicated that it is possible to detect electrical faults in a synchronous generator by monitoring vibration velocity RMS values from accelerometers. The objective of this work is to assess whether this detection is effective at different levels of active and reactive power. Employing a test bench that allows the controlled online imposition of faults in a grid-synchronized generator, stator and rotor interturn short circuits were imposed at 12 different load conditions. Both faults were detected in most of the load conditions, and a clear impact of the excitation is observed in the number of sensitized sensors for each fault.

Keywords—vibration, electrical, fault, detection, generator, operating condition

I. INTRODUCTION

Vibration analysis is a widely used technique for condition monitoring of synchronous generators. It is usually complemented by other techniques, like temperature, airgap magnetic flux and partial discharge monitoring, in order to improve the detection and identification of several fault types [1]. For instance, mechanical issues are commonly detected through vibration sensors, while short circuits in the field winding are mainly detected by means of internal flux sensors.

These additions, however, tend to increase the installation complexity and cost. In another short paper [2] submitted to this conference it was verified that mechanical vibration is sensitized by faults of electrical origin. Interturn short circuits in the stator and rotor windings were detected and identified through the analysis of changes in RMS values and frequency spectra of vibration velocity signals.

This study assesses the detection of electrical faults through mechanical vibration analysis at different levels of active and reactive power, to verify if the detection efficiency is maintained. The assessment is achieved by measuring signals from accelerometers on the bearings and on the frame of a grid-connected synchronous generator subjected to controlled faults at 12 different load conditions.

II. TEST BENCH AND VIBRATION ANALYSIS SYSTEM

The test bench employed in this work was designed to enable the development of a fault detection technique based



Fig. 1: Test bench for fault imposition with positions of accelerometers illustrated.

on stray magnetic flux [3]. As depicted in Fig. 1, the test bench contains a 15 kW DC motor, positioned at the center and acting as a primary machine, a 10 kVA two-pole smooth-rotor synchronous generator on the left and a 10 kVA eight-pole salient rotor generator on the right. The generators can operate either isolated or synchronized to the grid.

Both generators feature mechanisms for controlled fault imposition: taps in the stator and rotor windings for the imposition of short circuits; terminals for short circuiting the stator sheets; bearings with adjustable height for shaft misalignment; and support disks on the shaft ends and weights for mechanical unbalance.

The vibration monitoring system is composed of a processing unit and 8 accelerometers: three at the X, Y and Z axes on the bearing at the drive side (DS), three on the opposite (OS) bearing and two on the frame (F) corresponding to the X and Y axes. Thus, the accelerometers are identified as DSX, DSY, DSZ, OSX, OSY, OSZ, FX and FY, as indicated in Fig. 1.

The processing unit continuously registers acceleration and velocity RMS values for all sensors, measured at 5 s intervals, as well as the operating condition (OC), i.e. the active and reactive power delivered by the machine. A detailed record sampled at 20 kHz during 30 s can be triggered manually to allow frequency analysis of the vibration velocity signal.

III. FAULT DETECTION METHODOLOGY

The methodology used for the detection of electrical faults is explained in more detail in [2] submitted for the same conference. It consists in adjusting Alarm and TRIP levels from the

standard ISO 20816-1 [4] for RMS values of vibration velocity signals. A given accelerometer is sensitized if its RMS value reaches an Alarm or TRIP level during the fault imposition.

IV. TESTS AND RESULTS

The tests were performed with the generator synchronized to the electrical grid in a total of 12 operating conditions (OCs), according to Table I. Faults were applied in the machine using an automated system that allows the online fault imposition, i.e. without turning the machine off. The following 5 conditions were applied to the generator sequentially: healthy → stator interturn short circuit (50% of phase A) → healthy → rotor interturn short circuit (50% of one pole) → healthy.

The Fig. 2 shows the amount of sensitized accelerometers for each fault and for each OC. The top chart, which features the OCs with no reactive power, indicates that a higher active power tends to improve the effectiveness of the detection, and that at least one sensor was sensitized for each fault and for each OC. The center chart, which features OCs at minimum active power and various levels of reactive power, shows an increasing trend in the number of sensitized sensors due to the rotor fault as the excitation increases, and an opposite trend in the stator fault case. Similar trends are observed in the bottom chart, which corresponds to an intermediate level of active power. However, a general decrease of sensitivity is observed and two OCs did not have any accelerometer sensitized with the methodology employed.

Fig. 3 shows the number of OCs in which the faults were detected through each sensor. The accelerometer installed in the Y direction on the drive side bearing, along with the other sensors in the Y direction, provided the greatest number of detections. This effect may be attributed to the horizontal character of the generator and might be further investigated.

V. CONCLUSION

This work followed the developments of [2], which verified that vibration is capable of indicating electrical faults in a grid-synchronized generator. The aim of this work was to verify how the operating condition impacts the detection of the faults applied with the methodology employed.

The increase in active power favored the vibration sensitivity. Moreover, it was shown that, as the excitation increases, the rotor effect on the vibration becomes more prominent and its faults are detected more easily. On the other hand, as the excitation decreases, the stator effects stand out and enable an easier detection of the respective faults. This indicates that in

TABLE I: OCs tested: active (P) and reactive (Q) power and corresponding percentage of the rated apparent power.

		P (kW)			
		1	3	5	7
Q (kVar)	-6	60.83%	67.08%	-	-
	-3	31.62%	42.43%	-	-
	0	10.00%	30.00%	50.00%	70.00%
	3	31.62%	42.43%	-	-
	6	60.83%	67.08%	-	-

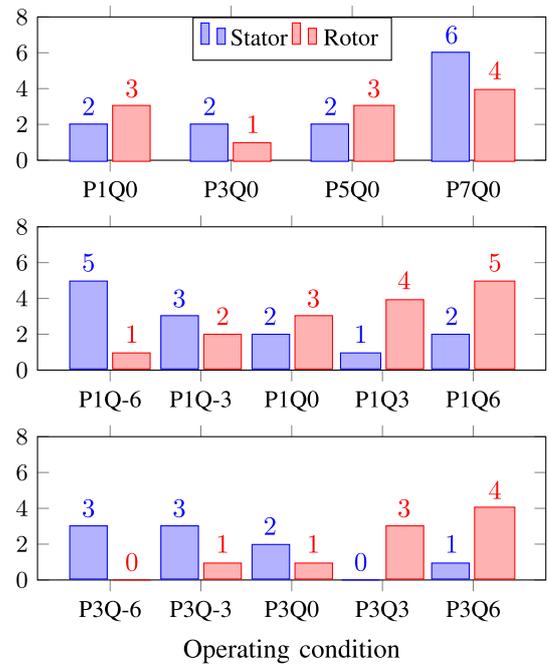


Fig. 2: Number of sensitized accelerometers for each OC.

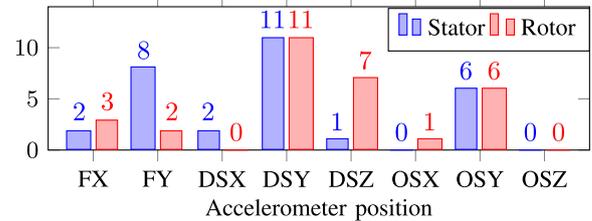


Fig. 3: Number of OCs that sensitized each accelerometer.

a power plant, it would be easier to identify different faults at different times of a load cycle.

Additionally, the accelerometers performances were investigated. It was observed that bearing vertical accelerometers had an advantage in this case.

VI. ACKNOWLEDGMENTS

This work was motivated and partially funded in the scope of the ANEEL R&D program and developed in the R&D programs of ENGIE Energia and Itá Energética S.A, PD-0403-0033/2012 and PD-00403-0048/2019, both entitled “Non-invasive equipment for fault detection in synchronous generators through the external magnetic field”. This study was also financed by CAPES - Finance Code 001, and by CNPq.

REFERENCES

- [1] P. Tavner, L. Ran, J. Penman and H. Sedding, “Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines”, 2nd ed., England: Institution of Engineering & Technology, 2008.
- [2] G. F. dos Santos et al, “Electrical Faults in a Grid-Synchronized Generator Detected by Vibration Monitoring,” submitted for publication.
- [3] H. F. Santos et al, “Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field,” JMOe, vol. 16, pp. 70-89, 2017.
- [4] *Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration*, ISO 20816, International Organization for Standardization (ISO), 2016.

Aplicação de métricas globais complementares à ISO 20816 para o monitoramento de vibração mecânica em gerador síncrono

Guilherme Felipe dos Santos
GRUCAD/EEL/CTC

Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
gui.felipe.s@hotmail.com

Carlos Alexandre Corrêa
Wengerkievicz
GRUCAD/EEL/CTC

Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
carlos.cacw@gmail.com

Vinicius José Martin Nascimento
GRUCAD/EEL/CTC

Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
viniciusjmn@gmail.com

Tiago Kaoru Matsuo
Aqtech Power Prognostics

Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
tiago.matsuo@aqtech.com

Luciano Mendes de Freitas
EMAS

ENGIE Brasil Energia
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
luciano.freitas@engie.com

Nelson Jhoe Batistela
GRUCAD/EEL/CTC

Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
jhoe.batistela@ufsc.br

Resumo — Normas como a VDI 2056, ISO 2372, ISO 10816 e a mais recente ISO 20816 buscam padronizar a medição de sinais de vibração no monitoramento e diagnóstico de ativos desde 1964. Definem-se as grandezas a serem medidas e métricas utilizadas, tais como valores pico-a-pico para sinais de deslocamento e RMS para sinais de velocidade e de aceleração. Entretanto, o diagnóstico de faltas ainda tem forte embasamento na experiência de especialistas, não empregando avanços das últimas décadas no âmbito acadêmico com relação ao processamento dos sinais de vibração. Entre os processamentos, cita-se a utilização de métricas diferentes das padronizadas, por vezes com desenvolvimentos específicos para as aplicações. Este trabalho explorou duas das métricas estatísticas mais utilizadas, curtose e assimetria, para a detecção de faltas em um gerador síncrono de uma bancada apta à imposição de faltas, sob diferentes pontos de operação. A partir da metodologia sugerida pela ISO 20816 para valores RMS, propõe-se uma metodologia para determinação dos limiares das métricas alternativas testadas. Os resultados indicam que a variação das amplitudes das métricas é semelhante para faltas elétricas no estator e no rotor, havendo proporcionalidade com a intensidade das faltas para todos os POs avaliados. Com relação às faltas mecânicas, o desbalanceamento gera variações de valor RMS diferentes do valor de curtose, ambos mantendo suas características entre os diferentes POs. A variação da métrica assimetria sofre pouca influência do nível de desbalanceamento. A resposta das métricas às faltas de excentricidade é menos uniforme entre os pontos de operação, com menor variabilidade para a assimetria e maior para a curtose. Demonstra-se que o uso das três métricas em conjunto contribui para diferenciar algumas das faltas testadas. Mostra-se que essas métricas são sensibilizadas por faltas incipientes de origem elétrica e mecânica no gerador síncrono, com respostas diferentes. Demonstra-se que a métrica curtose apresenta um melhor desempenho no espectro geral das condições testadas, especialmente para faltas de estator e de excentricidade, e a assimetria se destaca em algumas faltas de baixa intensidade. Conclui-se que as métricas alternativas complementam o valor RMS.

Palavras-chave — monitoramento de condição, vibração, gerador síncrono, métricas estatísticas, norma, detecção de faltas

I. INTRODUÇÃO

Geradores síncronos são máquinas elétricas cuja função é converter energia mecânica em elétrica, sendo a base do sistema energético. A ocorrência de defeitos e anormalidades de funcionamento pode exigir intervenções nesses ativos,

retirando-os de operação e causando interrupções no fornecimento de energia. São vários os tipos de faltas que podem ocorrer em um gerador síncrono: curtos-circuitos em espiras do rotor ou do estator, falha de isolamento entre lâminas do núcleo do estator, excentricidades do rotor, desbalanceamentos, entre outros.

Manutenções corretivas emergenciais geram alto custo para as concessionárias de energia, o qual se soma à falta de produção do ativo e a multas elevadas, atreladas aos danos à sociedade [1]. Uma alternativa para melhorar a confiabilidade dos geradores é o monitoramento de condição, o qual permite o acompanhamento da condição do ativo e diagnósticos sem a necessidade de parada da máquina [2]. Isso proporciona um ganho no planejamento das manutenções, pois o estado de saúde do ativo é averiguado antes da parada, podendo-se atrasar ou adiantar a atuação dos responsáveis conforme a viabilidade, para evitar falhas inesperadas. Além disso, o conhecimento prévio de indícios sobre causas para as anomalias acelera ações direcionadas aos problemas conhecidos, favorecendo um ganho de produtividade neste aspecto.

A análise de vibração se apresenta como uma ferramenta proeminente para manutenção preditiva, sendo uma técnica já estabelecida industrial e cientificamente [3,4]. Desde 1964, com normas iniciais, como a VDI 2056 [5] e a ISO 2372 [6], até versões mais atualizadas, como a ISO 10816 [7], recentemente substituída pela ISO 20816 [8], busca-se a padronização dessas análises. As normas definem as grandezas e métricas a serem utilizadas, usualmente velocidade de vibração e RMS, respectivamente. Os diagnósticos, por sua vez, ainda são fortemente dependentes da experiência de profissionais da área [9], havendo também a referência de literaturas clássicas [10].

Na academia, métricas diferentes das sugeridas em norma são exploradas para o diagnóstico de faltas, inclusive para aplicações específicas [11]. Nessa linha, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o emprego de duas métricas alternativas ao valor RMS para a análise de valores globais: curtose e assimetria do sinal de velocidade de vibração. A comparação é realizada com dados experimentais de múltiplos sensores instalados no gerador operando com diferentes tipos de faltas impostas de maneira controlada e sob vários pontos de operação.

Este trabalho foi motivado e parcialmente custeado com apoio da CAPES - Código de Financiamento 001, e do CNPq.

II. APARATO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA DE ENSAIOS

A bancada experimental utilizada no trabalho foi projetada para possibilitar o estudo de faltas incipientes em geradores síncronos. A bancada ilustrada na Fig. 1 contém um motor CC de 10 kW como máquina primária de dois geradores de 10 kVA cada, um de 2 polos lisos e outro de 8 polos salientes, o qual foi utilizado neste trabalho. Ambos os geradores são especificados para 380 V em 60 Hz e podem operar de maneira isolada ou sincronizados com a rede elétrica.



Fig. 1. Bancada de testes para imposição de faltas com posições dos acelerômetros instalados indicadas.

O sistema de monitoramento de vibração é composto por 8 acelerômetros de nível industrial, padrão ICP®, também representados na Fig. 1: três nos eixos X, Y e Z de cada mancal, lado acoplado (LA) e lado oposto ao acoplado (LO); e dois fixados na carcaça do gerador (C), nas posições ortogonais X e Y. A aquisição dos dados de vibração foi realizada com uma placa *National Instruments USB-6212* acoplada a um filtro analógico para remoção do nível CC inerente dos sensores e um programa desenvolvido em *Python* para controlá-la com a biblioteca *nidaqmx* e salvar os dados. Escolheu-se a taxa de aquisição de 25 kHz para maior detalhamento do sinal no tempo e um tempo de aquisição de 11 segundos, o qual é efetivamente reduzido com a aplicação de filtros digitais para a transformação do sinal de aceleração medido para o sinal de velocidade utilizado nas análises.

Em operação sincronizada com a rede elétrica, utilizou-se um banco de transformadores ΔY para filtrar harmônicas de 3ª ordem da rede. Esse arranjo possui um multimedidor acoplado para medição do ponto de operação do gerador. Os pontos de operação testados são mostrados na curva de capacidade do gerador, na Fig. 2.

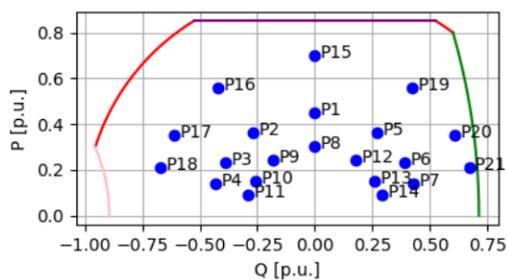


Fig. 2. Curva de capacidade do gerador com os pontos de operação testados representados por pontos azuis.

Os geradores da bancada possuem mecanismos para a imposição de faltas: *taps* no estator e rotor para curto-circuitar parte dos enrolamentos; terminais para curto-circuitar chapas do estator; mancais com ajuste de altura para desalinhamento do eixo; e discos de suporte que permitem a fixação de pesos para inserção de desbalanceamento. As faltas elétricas podem ser impostas de forma *online* [12], enquanto as mecânicas requerem a parada do gerador para imposição manual. As seguintes sequências de condição do gerador foram testadas para cada tipo de falta:

- Retirada gradual de espiras de 1 polo do rotor: Sadia → 20% → 50% → 100% → Sadia;
- Retirada gradual de espiras de 1 polo do estator (3 fases): Sadia → 16% → 50% → Sadia;
- Curto de lâminas do núcleo do estator: Sadia → Curto de Lâminas → Sadia;
- Eixo deslocado: Sadia → +0,5 mm LA e +0,5 mm LO → -0,5 mm LA e -0,5 mm LO → -0,5 mm LA e +0,5 mm LO → 0 mm LA e +1 mm LO → Sadia;
- Desbalanceamento: Sadia → 1 LO → 1 LA → 2 LO (ortogonais) → Sadia.

III. METODOLOGIAS DE OBTENÇÃO E ANÁLISE DO HISTÓRICO DE VALORES GLOBAIS

A. Tratamento dos sinais

Os acelerômetros instalados na bancada fornecem sinais de tensão que, com uma constante de proporcionalidade, correspondem à aceleração de vibração. Entretanto, a ISO 20816-1 e a maior parte das literaturas e trabalhos na área consideram principalmente sinais de velocidade área. Para converter os sinais medidos em sinais de velocidade, utilizou-se um procedimento que envolve integração, conforme Fig. 3. Além do filtro analógico para remoção do nível CC intrínseco do sistema de alimentação dos sensores, outra etapa de filtragem digital é necessária para remoção do nível CC residual no sinal digitalizado, após a aquisição dos dados. Essa etapa evita distorções em forma de rampa no sinal de velocidade resultante da etapa integração do sinal. Ainda assim, eventuais linhas de tendência residuais nos sinais de velocidade também foram removidas posteriormente à integração.

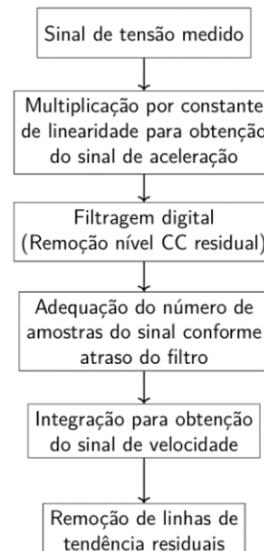


Fig. 3. Procedimentos para conversão do sinal de aceleração em velocidade de vibração.

Um exemplo dos sinais de aceleração medidos e de velocidade obtidos é mostrado na Fig. 4. Nota-se maior presença de altas frequências no sinal de aceleração, enquanto no de velocidade formas senoidais são mais aparentes.

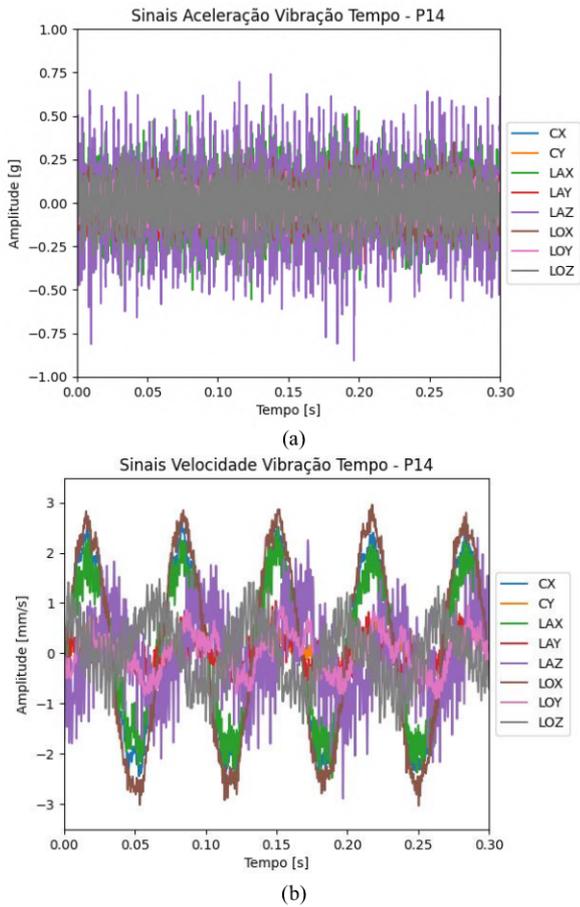


Fig. 4. Exemplo dos sinais de vibração (a) de aceleração medido e (b) de velocidade obtido através de processamentos digitais.

B. Cálculo das Métricas

As três métricas testadas neste trabalho são apresentadas na Tabela I [11,13-15]. A métrica RMS é a mais utilizada na literatura clássica e em normas, principalmente para sinais de velocidade de vibração, tendo relação com a potência do sinal. A curtose, outra métrica escolhida, é um indicador estatístico definido como a cumulante de quarta ordem da transformada de Fourier, representando a densidade do sinal e, portanto, sendo mais sensível a impulsos do que o RMS. Por fim, a última métrica recebe o nome de sua função: quantificar a assimetria do sinal.

TABELA I. CÁLCULO DAS MÉTRICAS TESTADAS E CONSIDERAÇÕES SOBRE SEUS INDICATIVOS.

Métrica	Cálculo	Considerações
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} a_i^2}$	Proporcional à potência do processo. Insensível a picos isolados.
Curtose	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (a_i - \bar{a})^4}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} ((a_i - \bar{a})^2)^2}$	Baseado na densidade do sinal. Sensível a impulsos. Independente de variação de frequência e amplitude.
Assimetria	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (a_i - \bar{a})^3}{\sigma^3}$	Medida de assimetria.

C. Histórico Global e Processamentos para Análises

Em posse dos sinais de velocidade de vibração, a Fig. 5 apresenta o fluxo de processamentos realizados para a obtenção do histórico de valores globais e realização das análises propostas.

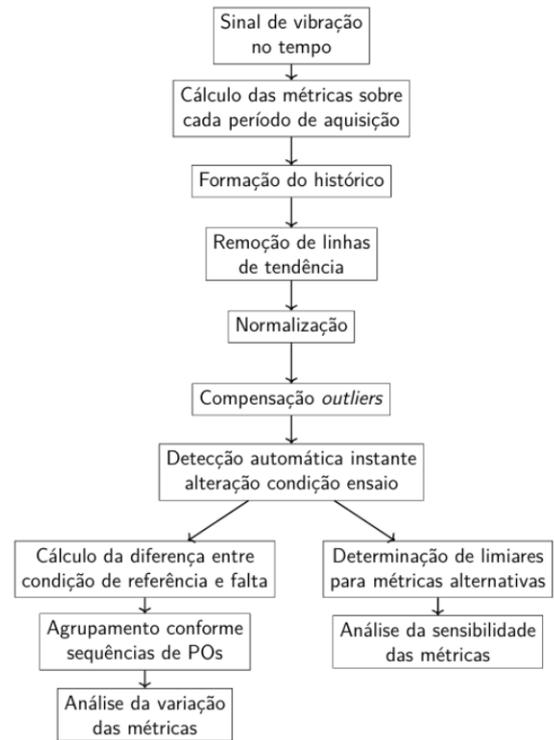


Fig. 5. Fluxo de processamentos para obtenção do histórico de valores globais e realização das análises do trabalho.

Os cálculos da Tabela I são realizados com todas as amostras de cada período de aquisição para formar os históricos de valores globais.

Embora a máquina seja pré-aquecida antes da realização de cada ensaio, ainda é perceptível leve variação do ponto de operação durante as execuções, conforme exemplo da Fig. 6 para uma falta elétrica e outra mecânica. Isso ocorre porque o regime térmico do gerador não atingiu o equilíbrio total antes do início dos ensaios e porque a própria imposição de faltas, ou da parada da máquina para tal, causa variações na temperatura. Essa variação suave poderia distorcer a ultrapassagem de limiares, estipulados conforme Seção V.A. Por isso, realizou-se um procedimento para remover as linhas de tendência entre o início e o final de cada ensaio, tendo como referências as condições sadias.

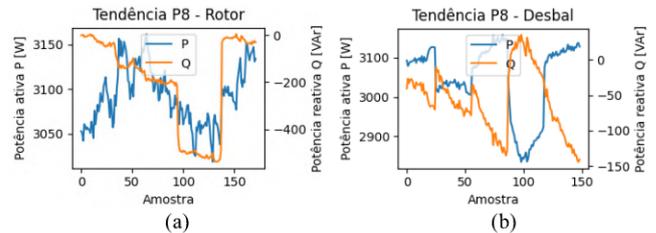


Fig. 6. Variação do ponto de operação com a imposição de faltas (a) elétrica e (b) mecânica.

Outro processamento realizado sobre os históricos foi a normalização com relação à condição de referência (sadia) para cada sensor. Este passo possibilita uma comparação mais direta entre sensores e entre pontos de operação. A Fig. 7 mostra o histórico global sem tendência antes e após a normalização para cada métrica.

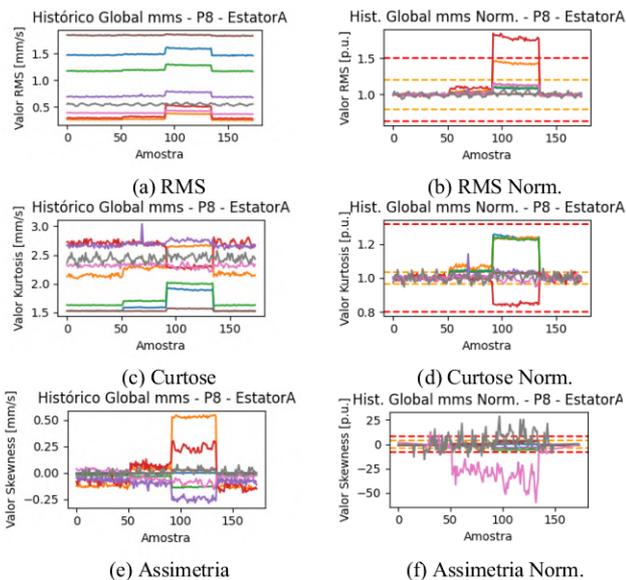


Fig. 7. Histórico global sem tendência antes e após a normalização.

Para a automatização da obtenção de valores das métricas nas regiões correspondentes a cada falta, realizou-se um algoritmo baseado na diferença entre amostras subsequentes para indicar os instantes mais prováveis de alteração da condição da máquina. A Fig. 8 mostra um caso da curva de diferenças obtida para um ensaio de falta de rotor, que possui 4 instantes de alteração claramente visíveis na figura.

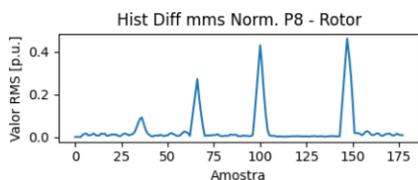


Fig. 8. Curva da diferença entre amostras subsequentes para detecção automática das regiões do histórico correspondentes a cada condição de ensaio.

IV. VARIAÇÃO DAS MÉTRICAS GLOBAIS CONFORME O PONTO DE OPERAÇÃO DO GERADOR

A. Separação dos Pontos de Operação

A partir dos dados da Fig. 2, podem-se considerar alguns conjuntos de pontos de operação com sentido físico. Será chamada de Sequência Zero a condição de potência reativa nula com variação da potência ativa. Outras duas considerações podem ser realizadas considerando o aumento da excitação do enrolamento do rotor, conforme o gerador passa de uma condição subexcitada para sobreexcitada. Essa variação pode ser feita de duas formas: mantendo a potência ativa constante e variando a potência reativa, configuração obtida, aproximadamente, conforme os pontos da Tabela II; ou mantendo a potência aparente constante e variando diretamente o fator de potência, conforme a Tabela III.

TABELA II. SEQUÊNCIAS DE PONTOS DE OPERAÇÃO COM POTÊNCIA ATIVA CONSTANTE E VARIAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA

Sequência	P (kW)	Q (kVAr)					
		FP Subexcitado			FP Sobreexcitado		
1	1.5	-	-4.3	-2.6	2.6	4.3	-
2	2.5	-6.7	-3.9	-1.8	1.8	3.9	6.7
3	3.5	-	-2.8	-1.8	1.8	2.8	-

TABELA III. SEQUÊNCIAS DE PONTOS DE OPERAÇÃO COM POTÊNCIA APARENTE CONSTANTE E VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

Sequência	S (kVA)	Fator Potência						
		FP Subexcitado			FP Sobreexcitado			
4	3	0.3	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.3
5	4.5	0.3	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.3
6	7	0.3	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.3

B. Análise da Variação de Cada Métrica

A Fig. 9 compila os dados de variação das métricas ao longo dos históricos de valores globais. Ela apresenta o valor da variação média entre os sensores e entre as condições de um tipo de falta e a condição sadia de referência. Para os casos de variação da potência reativa, as figuras devem ser analisadas de maneira setorizada, avaliando a variação para cada nível de potência ativa ou aparente individualmente.

Para a Sequência Zero, há um aumento das variações de RMS em faltas elétricas, exceto para a falta de núcleo, que apresenta comportamento decrescente conforme o aumento da potência ativa. Para as faltas mecânicas, não há tendências evidentes, observando-se uma menor sensibilidade às faltas de desbalanceamento. Para a curtose, vê-se uma tendência crescente apenas para a falta de estator. O comportamento das faltas mecânicas é similar à métrica RMS. A assimetria, por sua vez, apresenta comportamento decrescente para as faltas de rotor com o aumento da potência do gerador, sendo contrário ao efeito observado para o RMS e curtose. Para as demais faltas, as tendências são neutras ou indefinidas.

Sobre as Sequências 1, 2 e 3, vê-se um crescimento do valor RMS com faltas de rotor, conforme a excitação da máquina aumenta, e um decrescimento com faltas de estator, normalmente, conforme o fator de potência aumenta, tanto para condição sub quando sobreexcitada. A tendência da métrica para falta de núcleo do estator é menos uniforme, porém há uma tendência geral de aumento com a excitação do rotor para o menor valor de potência ativa. A falta de desbalanceamento não demonstra influência no valor da métrica e a falta de deslocamento causa comportamentos, no geral, indefinidos e diferentes entre os níveis de potência ativa. Destaca-se o caso de maior potência ativa, com comportamento semelhante ao da falta de estator, havendo redução do RMS conforme o aumento do fator de potência.

A métrica curtose apresenta comportamento semelhante ao RMS para faltas elétricas. Para a falta de núcleo, vê-se uma tendência aproximadamente contrária à do RMS no caso de menor potência ativa: há um decrescimento da curtose com o aumento do fator de potência. Para a maior potência ativa, observa-se um crescimento da métrica com o fator de potência para essa falta. Para as faltas mecânicas, há poucas tendências evidentes, mas é possível afirmar que a falta de deslocamento gerou um aumento na curtose conforme o aumento do fator de potência para a potência ativa mais baixa fornecida e para a mais alta, em menor intensidade. Já o desbalanceamento apresentou comportamento similar apenas para o caso de maior potência ativa.

Por fim, a métrica assimetria também aumenta para as faltas de rotor, com o aumento da excitação da máquina, embora de maneira mais irregular se comparado ao RMS e curtose. Com a falta de estator, também há irregularidade notável, impedindo a determinação de alguma tendência para

a assimetria. A falta de núcleo não apresentou influência no valor da métrica. Com relação às outras métricas, a assimetria apresentou a variação mais notável para a falta de desbalanceamento, embora haja variação entre os níveis de potência ativa: para a maior potência ativa, a assimetria diminuiu com o aumento do fator de potência, já para a menor potência, o comportamento foi contrário. A excentricidade

causa uma tendência de decaimento da assimetria com o aumento da excitação do gerador, no caso de menor potência ativa. Para a potência intermediária, há um aumento da métrica com o aumento do fator de potência, já para a maior potência, não há influência.

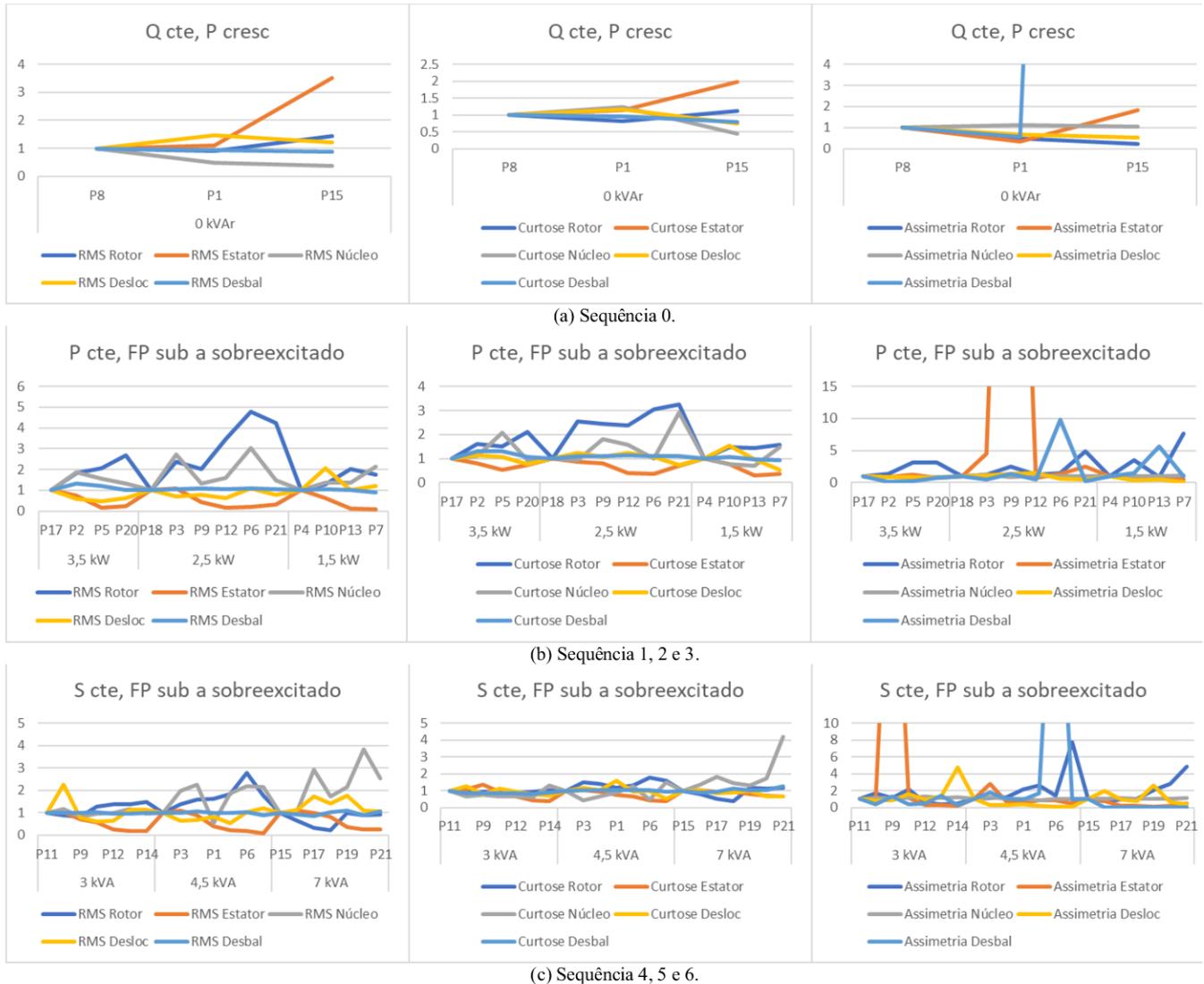


Fig. 9. Simplificação da variação das métricas globais com relação ao ponto de operação, considerando a média entre os sensores e entre condições de cada tipo de falta e normalização com relação à condição sadia de referência.

Demonstraram-se relações gerais de variação das métricas em condições de faltas conforme alguns pontos de operação. Para o caso de potência aparente constante e variação do fator de potência, as conclusões são similares na maioria dos casos, porém mais evidentes no caso com potência ativa constante e variação da potência reativa.

A Tabela IV resume as relações entre as métricas e os pontos de operação. Separaram-se as classificações entre crescente ou decrescente com relação à excitação do gerador, porém também se adicionou o sufixo “FP” em alguns casos para indicar que a tendência foi observada com relação ao crescimento do fator de potência, seja sub ou sobreexcitado. Classificaram-se também as tendências em neutras, quando não há variação aparente, e indefinidas, quando há variações

significativas nas métricas, porém essas variações não apresentam tendências claras ou que não se encaixam nas duas formas de variação consideradas. Em termos gerais, observa-se que a tendência de comportamento não é unânime entre as métricas, o que contribui para o diagnóstico de faltas, visto que quando determinada métrica não é sensibilizada por alguma anormalidade de operação, é possível que outra métrica seja. Dessa forma, as métricas se complementam na sensibilização pelas faltas.

TABELA IV. RESUMO DA TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO DAS AMPLITUDES DAS MÉTRICAS GLOBAIS PARA CADA FALTA. CLASSIFICAÇÃO EM TENDÊNCIA CONFORME AUMENTO DA EXCITAÇÃO DO GERADOR: CRESCENTE (C), DECRESCENTE (D), NEUTRA (N) E INDEFINIDA (I).

Falta	Métrica	Sequência de ensaio							
		0	1	2	3	4	5	6	
Rotor	RMS	C	C	C	C	C	C	C	I
	Curt.	I	C	C	C	N	C	C	I
	Assim.	D	I	I	C	C.FP	C	C	C
Estator	RMS	C	D	D.FP	D.FP	D	D	D	D
	Curt.	C	D	D.FP	D.FP	D	D	D	D
	Assim.	I	N	I*	N	I	N	D	D
Núcleo	RMS	D	C	I	I	N	I	C	C
	Curt.	I	D.FP	I	C.FP	N	N	C	C
	Assim.	N	N	N	N	N	N	N	N
Desloc	RMS	I	I	I	D.FP	I	I	C.FP	C.FP
	Curt.	I	C.FP	I	C.FP	D	C.FP	D	D
	Assim.	D	D	C.FP	N	C	N	I	I
Desbal	RMS	N	N	N	I	N	N	N	N
	Curt.	D	N	N	C.FP	D	N	C	C
	Assim.	D	C.FP	I	D.FP	N	I	N	N

*Possui lógica de variação que não se enquadra nas classificações consideradas.
FP: tendência conforme aumento do fator de potência em vez da excitação do gerador.

V. DETECÇÃO DE FALTAS PELAS MÉTRICAS

A. Determinação dos Limiares das Métricas Alternativas

A metodologia padrão para detecção e anomalias propostas em norma consiste em determinar um limiar, que pode ser com relação a um valor de referência, para os níveis de alarme e *trip*. O valor de alarme diz respeito a uma alteração do valor global que indica a possível presença de anomalia, recomendando-se aprofundamento da investigação de sua causa. Sugere-se, em norma, o valor relativo de 1,2 vezes para aplicações de hidrogeração [16]. O limiar de *trip* é relativo a um valor que, se ultrapassado, pode ocasionar em danos severos à máquina, sendo um indicativo de que o ativo deve ser retirado de operação imediatamente. Esse valor pode ser determinado em relação ao valor de alarme, sendo sugerida a relação de 1,25 vezes em norma [16]. Observou-se o efeito dessas considerações para os resultados dos ensaios obtidos em laboratório com a métrica RMS e, visto a detecção geral razoável das anomalias, mantiveram-se os valores sugeridos para estudo inicial, como um resultado base para comparação posterior com as outras métricas testadas.

A partir do conjunto de dados de ensaios contendo valor mínimo, médio e máximo de cada sensor para cada condição de ensaio e ponto de operação, definiram-se limiares de curtose e assimetria atrelados aos de RMS, para haver uma relação de equivalência nas análises comparativas entre as métricas. Para isso, definiu-se um procedimento para obter um valor representativo de todo o conjunto de dados normalizados de cada métrica, o que foi utilizado juntamente com recursos visuais sobre a variação das métricas e sobre a distribuição de detecção das anomalias para validação. A metodologia consistiu em calcular a média do valor relativo entre todos os

sensores e todas as condições de falta para cada ponto de operação e para cada tipo de valor mínimo, médio e máximo. Em seguida, calculou-se a mediana, entre o tipo de valor e os pontos de operação, das médias obtidas no passo anterior. O valor obtido para o conjunto de dados de RMS foi de 1,170, para a curtose foi de 0,864 e para a assimetria foi de 3,363. Então, aplicou-se a relação entre os valores obtidos para os limiares de alarme das demais métricas, resultando em 1,037 para a curtose e 4,036 para a assimetria. A visualização desses limiares pode ser vista na Fig. 7, apresentada anteriormente para os valores normalizados, demonstrando, inicialmente, compatibilidade entre os valores determinados para cada métrica.

A métrica curtose se comporta de maneira similar ao valor RMS, já a assimetria varia entre valores positivos e negativos, então, a abordagem de definição de seus limiares diferiu das outras duas: considerou-se o mesmo nível de alarme para valores positivos e negativos. O limiar de *trip* não tem impacto direto nas análises do trabalho, mas, como seu comportamento é diferente das outras duas, seus valores relativos ao valor de alarme foram definidos para os níveis de *trip* conforme avaliação visual: 1,2 vezes para curtose e 2 vezes para assimetria. A Fig. 10 mostra um mapa de cores das definições descritas para cada métrica, cujas linhas são relativas às 17 condições de falta, cada uma com 8 sensores, e as colunas se referem aos 21 pontos de operação, cada um com valor mínimo, médio e máximo da métrica normalizada do sinal de vibração na região correspondente a cada estado da máquina. As cores amarela e vermelha indicam a ultrapassagem dos limiares superiores, respectivamente, de alarme e *trip*. As cores verde e azul indicam a ultrapassagem dos limiares inferiores, respectivamente, de alarme e *trip*.

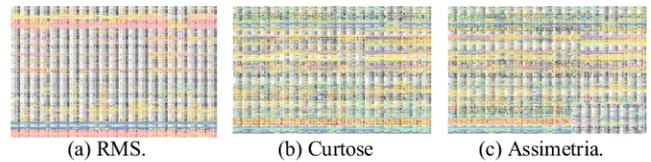


Fig. 10. Mapa de cores dos limiares de alarme e *trip* sobre os conjuntos de dados das métricas globais normalizadas para todos os pontos de operação, tipos de falta e sensores testados, considerando valores mínimo, médio e máximo durante cada condição de falta.

Pela Fig. 10, percebe-se que a curtose é mais expressiva na detecção de faltas, no contexto geral, seguida por RMS e assimetria. Entretanto, nota-se que a distribuição de detecção da assimetria, embora seja menos densa, se distribui mais uniformemente do que a métrica RMS, a qual possui alguns espaços extensos sem detecção.

B. Comparação das Métricas

Para comparar as métricas de maneira mais simples e direta, a Fig. 11 compilou os dados correspondentes à ultrapassagem dos limiares de alarme pelo valor relativo médio para cada métrica, separando os dados entre os tipos de falta testados e os sensores e apresentando a proporção de pontos de operação para os quais houve detecção da falta. Essa visualização permite a inferência sobre posições de sensores que são mais sensíveis a cada situação, porém o enfoque do trabalho, no momento, é para comparar as métricas. Para isso, adicionou-se mais uma camada de processamento para reduzir a análise apenas aos tipos de falta, realizando a média entre as condições de cada um e entre os sensores. Dessa forma, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela V.

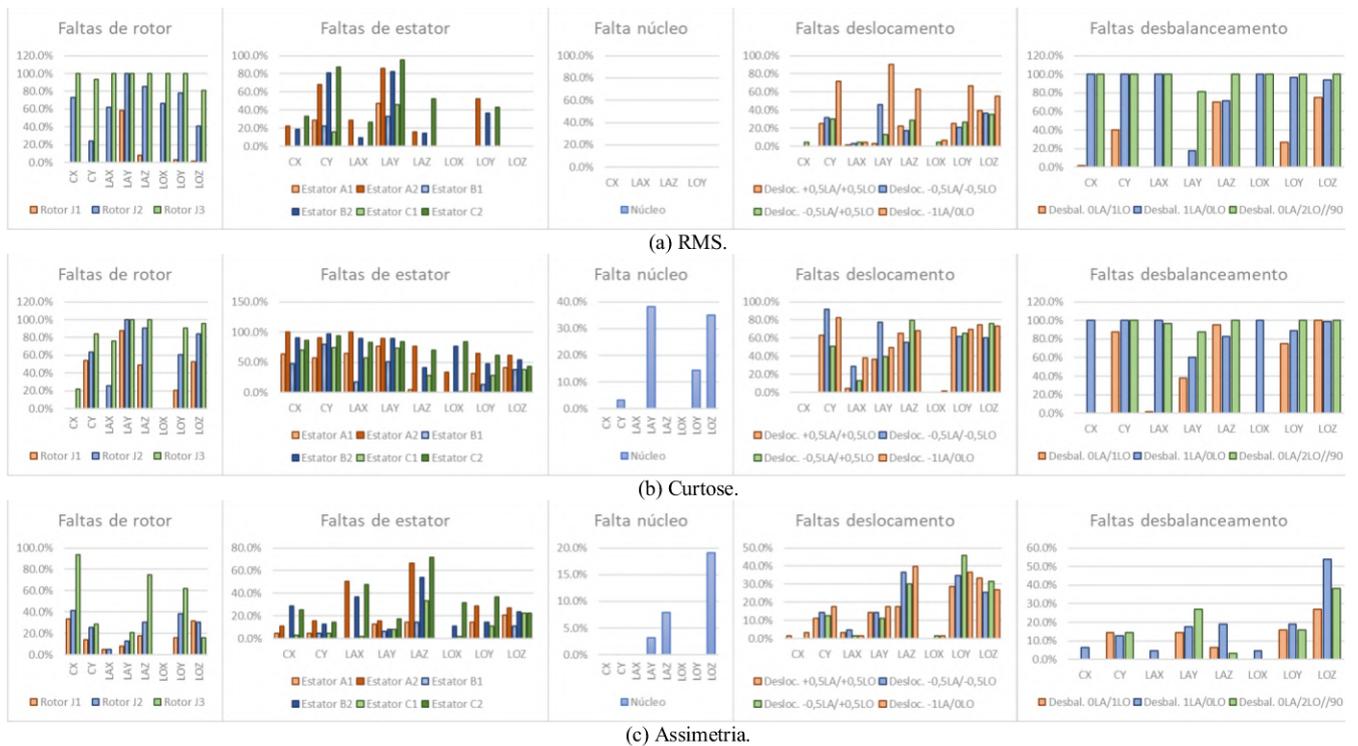


Fig. 11. Sensibilização das métricas globais em nível de alarme com relação ao ponto de operação, para cada tipo de falta e sensor.

TABELA V. PROPORÇÃO DE PONTOS DE OPERAÇÃO PARA OS QUAIS HOUVE SENSIBILIZAÇÃO DAS MÉTRICAS EM NÍVEL DE ALARME. MÉDIA ENTRE OS SENSORES E ENTRE AS CONDIÇÕES DE FALTA TESTADAS.

	RMS	Curtose	Assimetria
Rotor	57.34%	52.31%	25.13%
Estator	21.83%	57.54%	18.02%
Núcleo	0.00%	11.31%	3.77%
Desloc	24.36%	43.70%	16.22%
Desbal	69.71%	71.30%	13.10%
Geral	35.85%	53.07%	17.15%

Os resultados da Tabela V mostram que a métrica curtose apresentou um melhor desempenho de sensibilização no contexto geral, seguida pelo RMS e assimetria, considerando a equivalência dos limiares determinados para as métricas. Para as faltas de rotor, a curtose foi semelhante à métrica RMS, porém seu destaque foi para as faltas de estator, muito superior aos seus concorrentes. A curtose também apresentou um desempenho bastante superior para as faltas de núcleo do estator. Embora ainda seja uma proporção relativamente baixa de detecção, esse tipo de falta se mostrou muito sutil em todos os contextos considerados. Nota-se que a assimetria também foi capaz de detectar alguns casos de falta de núcleo, fenômeno que passou completamente despercebido pelo valor clássico de RMS. A detecção de falta de deslocamento de eixo foi outro destaque para a métrica curtose, com desempenho bastante superior. Por fim, o desbalanceamento foi detectado em proporções semelhantes entre a curtose e o RMS.

Observando a Fig. 11 com relação às faltas elétricas, que têm distinção de intensidade, nota-se também que a métrica RMS, na maior parte dos casos, detecta poucos casos de baixa intensidade da falta, enquanto essa frequência de detecção e porcentagem é maior para as métricas curtose e assimetria, sendo essa uma vantagem de ambas.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou o tema de monitoramento de vibração, visando aumentar a visibilidade para possíveis vantagens do uso de métricas alternativas àquelas tipicamente utilizadas na indústria, seja por recomendações de normas ou literaturas clássicas. Para isso, utilizou-se uma abordagem experimental, com levantamento de dados de vibração de um gerador sincronizado à rede elétrica sob diferentes condições de faltas simuladas em diversos pontos de operação.

Apresentou-se a metodologia de pré-processamentos dos dados de vibração obtidos na bancada experimental e os processamentos necessários para as análises do trabalho, considerando passos importantes para a automatização do processamento de dados.

Mostrou-se a variação das métricas para tipos de falta com a variação do ponto de operação do gerador, demonstrando que as relações podem ser bastante complexas e irregulares. Essa variabilidade reforça a importância de abordagens futuras que considerem o uso de técnicas modernas de processamento de dados, como aprendizado de máquina, para análise dos dados com maior propriedade. Houve maior relação da variação das métricas com os pontos de operação para as faltas elétricas. A diferença entre as respostas das três métricas indica que seu uso em conjunto pode favorecer a distinção de faltas em aplicações práticas.

Por fim, apresentou-se também uma metodologia para determinação de limiares de detecção de anomalias baseada na ISO 20816, propondo-se uma relação de equivalência dos limiares entre as métricas para fim de comparação. Os dados foram condensados entre pontos de operação para mostrar a taxa de detecção sob esse ponto de vista. Houve diferenças de detecção entre as métricas: os resultados evidenciam que a métrica curtose tem potencial para trazer grandes melhorias na detecção de faltas por vibração, mas os resultados considerando as três métricas em conjunto também pode ser

relevante para a detecção de faltas específicas e, especialmente, de faltas com nível maior de incipiência, ou seja, em estados ainda mais iniciais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi motivado e parcialmente custeado pelos projetos regulados pela ANEEL e desenvolvidos no âmbito do Programa de P&D da ENGIE Brasil Energia e Itá Energética S. A.; PD-0403-0033/2012 e PD-00403-0048/2019, ambos intitulados “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. “RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021,” dez. 2021.
- [2] P. Tavner; L. Ran, J. Penman and H. Sedding. “Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines,” [S.l.]: IET, jul. 2008. ISBN 978-0-86341-741-2.
- [3] Q. G. Holloter and C. G. Gordon, “Monitoring of Vibration in Vibration-Sensitive Facilities,” In: VIBRATION Monitoring and Control. [S.l.]: SPIE, out. 1994. P. 170–177. DOI: 10.1117/12.188871.
- [4] T. A. Shifat, J. W. Hur, “An Effective Stator Fault Diagnosis Framework of BLDC Motor Based on Vibration and Current Signals,” IEEE Access, v. 8, p. 106968–106981, 2020. ISSN 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000856.
- [5] VDI-2056, “Standards of Evaluation for Mechanical Vibrations of Machines,” Associação de Engenheiros Alemães, out. 1964.
- [6] ISO 2372, “Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 Rev/s — Basis for Specifying Evaluation Standards,” Organização Internacional de Normalização, nov. 1974.
- [7] ISO 10816, “Mechanical Vibration — Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts,” Organização Internacional de Normalização, dez. 1995.
- [8] ISO 20816, “Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration,” Organização Internacional de Normalização, nov. 2016.
- [9] K. Upadhyay, “Basics of Vibration and Condition Analysis,” [S.l.]: Notion Press, jul. 2020. ISBN 978-1-64899-963-5.
- [10] C. Scheffer and P. Girdhar, “Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance,” [S.l.]: Elsevier, jul. 2004. ISBN 978-0-08-048022-0.
- [11] M. H. M. Ghazali and W. Rahiman, “Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review,” Shock and Vibration, Hindawi, v. 2021, e9469318, set. 2021. ISSN 1070-9622. DOI: 10.1155/2021/9469318.
- [12] G. P. Hessmann, “Sistema automatizado para imposição de faltas em uma máquina síncrona modificada,” UFSC, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Florianópolis.
- [13] M. Tiboni, C. Remino, R. Bussola and C. Amici, “A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery,” Applied Sciences, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 972, jan. 2022. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app12030972.
- [14] T. Wang, Q. Han, F. Chu and Z. Feng, “Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Wind Turbine Planetary Gearbox: A Review,” Mechanical Systems and Signal Processing, v. 126, p. 662–685, jul. 2019. ISSN 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.02.051.
- [15] T. Nowakowski and P. Komorski, “Diagnostics of the Drive Shaft Bearing Based on Vibrations in the High-Frequency Range as a Part of the Vehicle’s Self-Diagnostic System,” Eksploatacja i Niezawodność, Vol. 24, no. 1, 2022. ISSN 1507-2711. DOI: 10.17531/ein.2022.1.9.
- [16] ISO 20816-5, “Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration — Part 5: Machine Sets in Hydraulic Power Generating and Pump-Storage Plants,” Organização Internacional de Normalização, jul. 2018.