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

Vinícius José Martin Nascimento
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
viniciusjmn@gmail.com

Luciano Mendes de Freitas
EMAS
ENGIE Brasil Energia
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
luciano.freitas@engie.com

Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
carlos.cacw@gmail.com

Tiago Kaoru Matsuo
Aqtech Power Prognostics
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
tiago.matsuo@aqtech.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 capabilidade do gerador, na Fig. 2.

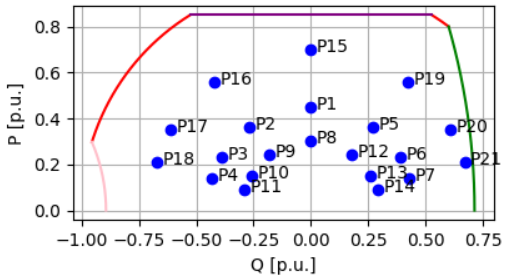


Fig. 2. Curva de capabilidade do gerador com os pontos de operação testados representados por pontos azuis.

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.

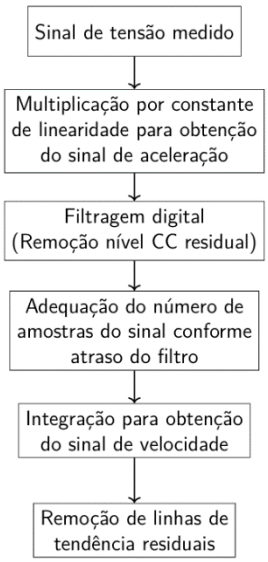


Fig. 3. Procedimentos para conversão do sinal de aceleração em velocidade de vibração.

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.

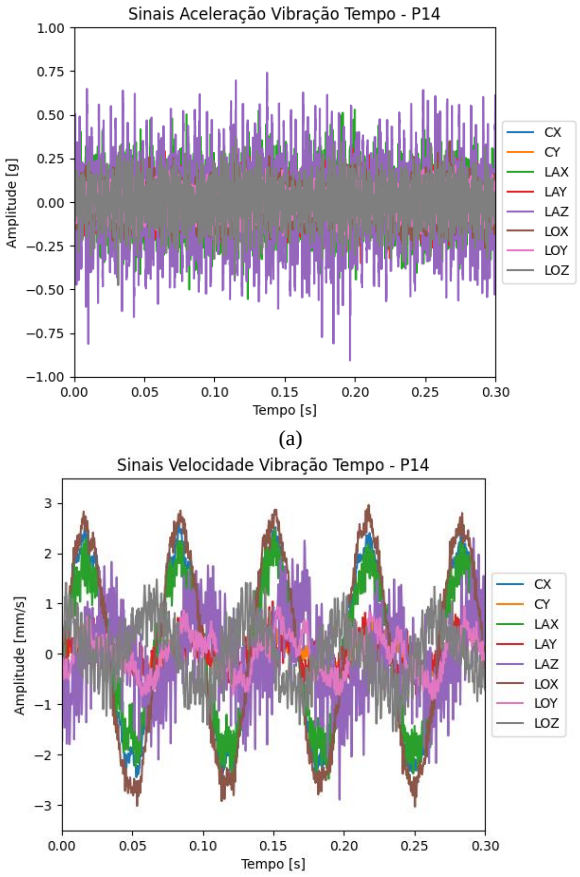


Fig. 4. Exemplo dos sinais de vibração (a) de aceleração medido e (b) de velocidade obtido através de processamentos digitais.

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	$\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N-1}(a_i-\overline{a})^4}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N-1}((a_i-\overline{a})^2)^2}$	Baseado na densidade do sinal. Sensível a impulsos. Independente de variação de frequência e amplitude.
Assimetria	$\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N-1}(a_i-\overline{a})^3}{\sigma^3}$	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.

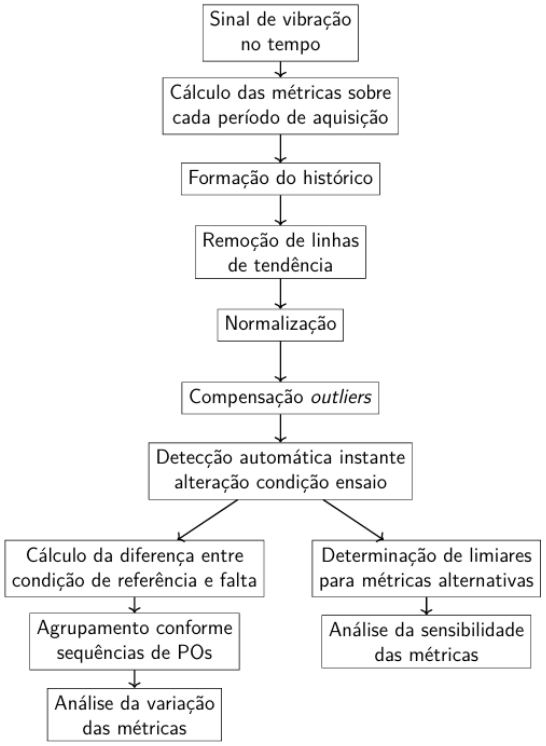


Fig. 5. Fluxo de processamentos para obtenção do histórico de valores globais e realização das análises do trabalho.

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.

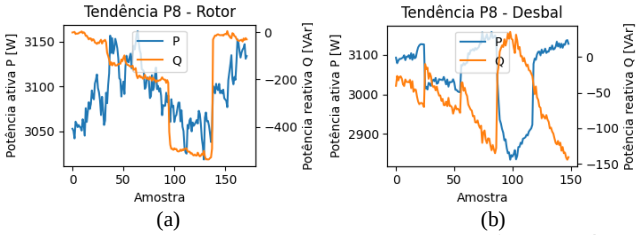


Fig. 6. Variação do ponto de operação com a imposição de faltas (a) elétrica e (b) mecânica.

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.

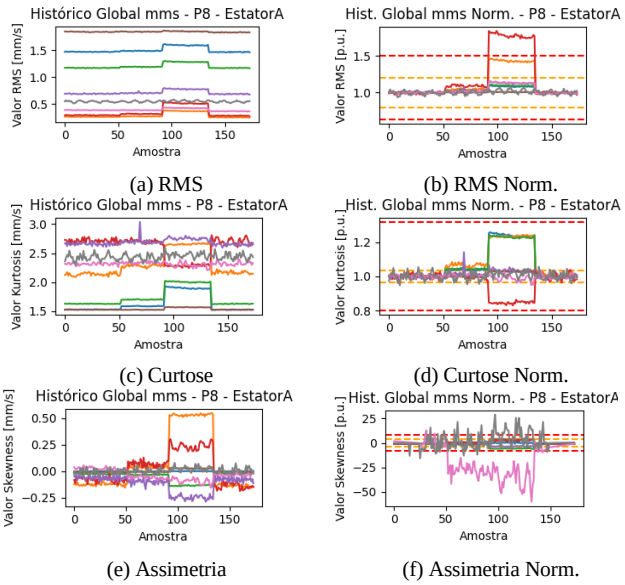


Fig. 7. Histórico global sem tendência antes e após a normalização.

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.

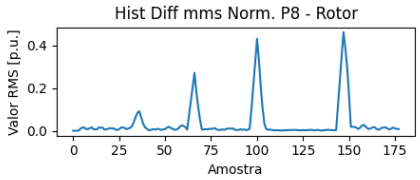


Fig. 8. Curva da diferença entre amostras subsequentes para detecção automatíca das regiões do histórico correspondentes a cada condição de ensaio.

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.

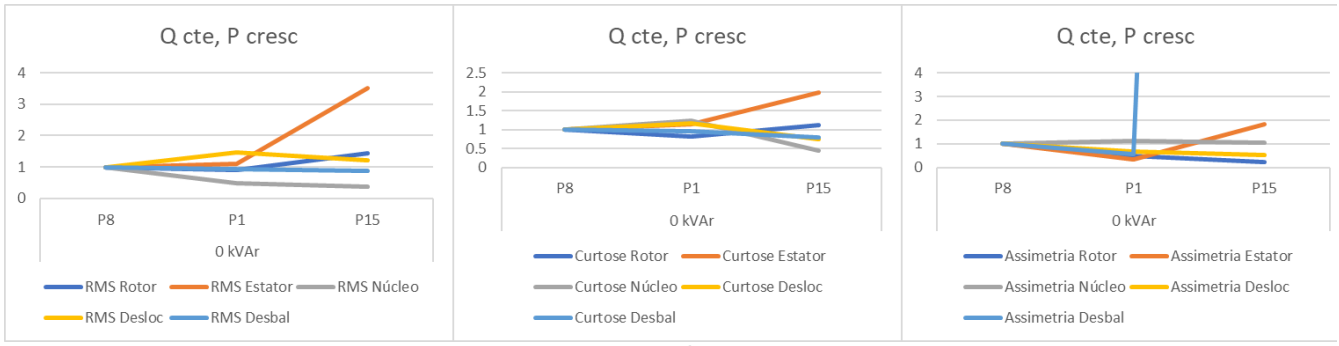
Para a Sequência Zero, há um aumento das variações de RMS em faltas elétricas, exceto para a falta de núcleo, que apresenta comportamento decrescente conforme o aumento da potência ativa. Para as faltas mecânicas, não há tendências evidentes, observando-se uma menor sensibilidade às faltas de desbalanceamento. 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.

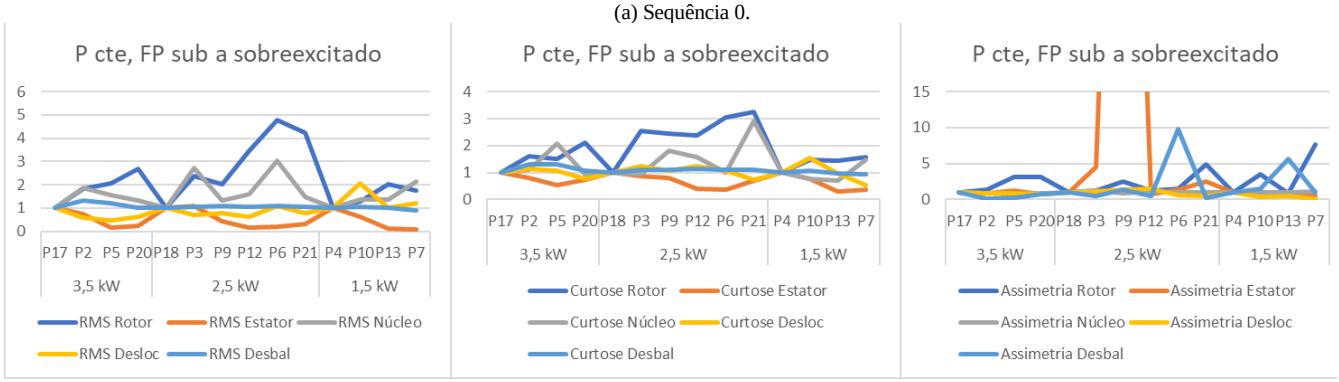
A métrica curtose apresenta comportamento semelhante ao RMS para faltas elétricas. Para a falta de núcleo, vê-se uma tendência aproximadamente contrária à do RMS no caso de menor potência ativa: há um decrescimento da curtose com o aumento do fator de potência. Para a maior potência ativa, observa-se 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

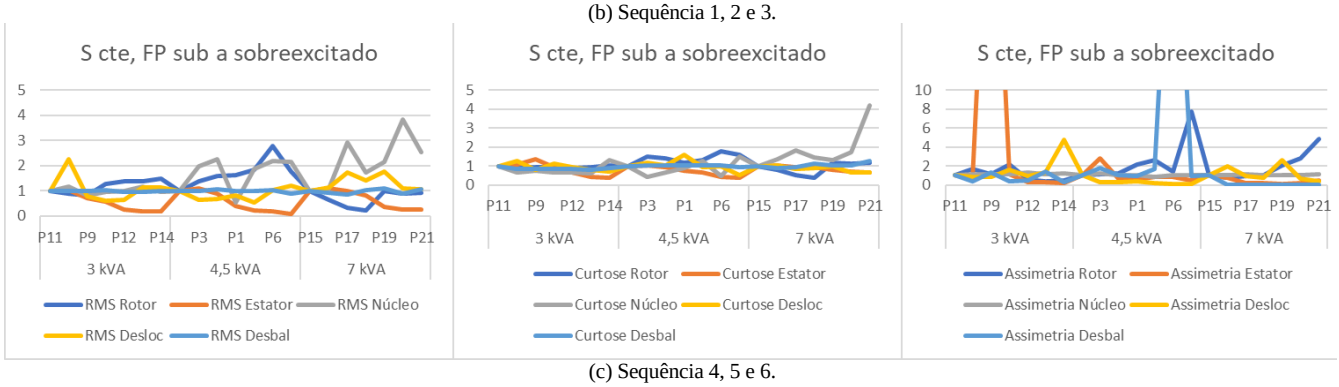
a assimetria. A falta de núcleo não apresentou influência no valor da métrica. Com relação às outras métricas, a assimetria apresentou a variação mais notável para a falta de desbalanceamento, embora haja variação entre os níveis de potência ativa: para a maior potência ativa, a assimetria diminuiu com 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.



(a) Sequência 0.



(b) Sequência 1, 2 e 3.



(c) Sequência 4, 5 e 6.

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	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
Desloc	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
Desbal	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

*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.

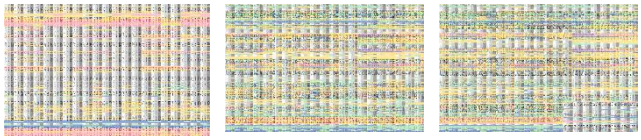
V. DETECÇÃO DE FALTAS PELAS MÉTRICAS

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*.



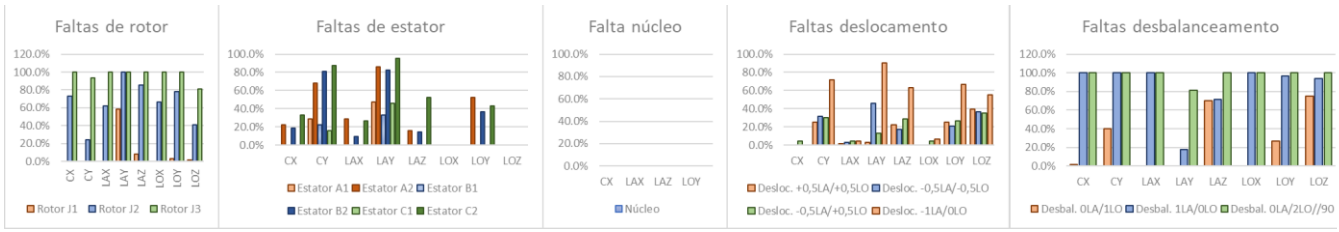
(a) RMS. (b) Curtose (c) Assimetria.

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.

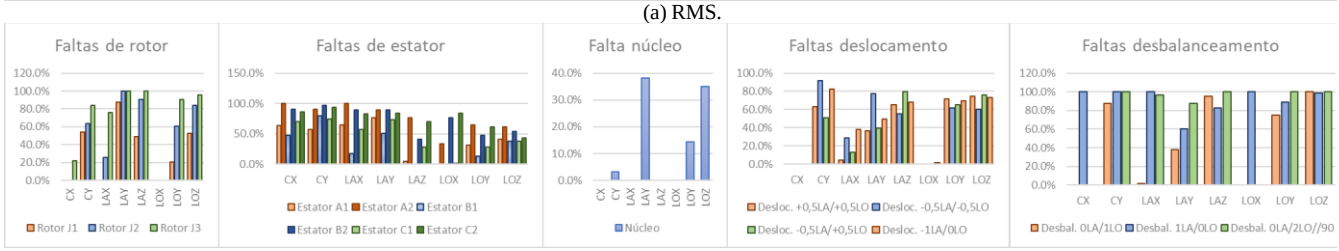
Pela Fig. 10, percebe-se que a curtose é mais expressiva na detecção de faltas, no contexto geral, seguida por RMS e assimetria. Entretanto, nota-se que a distribuição de detecção da assimetria, embora seja menos densa, se distribui mais uniformemente do que a métrica RMS, a qual possui alguns espaços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

B. Comparação das Métricas

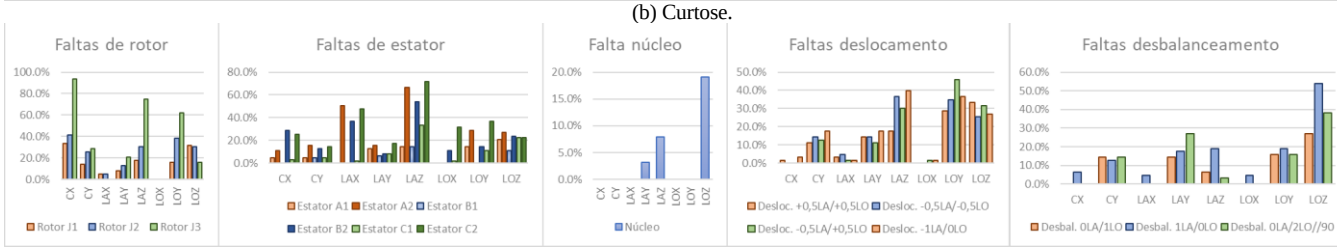
Para comparar as métricas de maneira mais simples e direta, a Fig. 11 compilou os dados correspondentes à ultrapassagem dos limiares de alarme pelo valor relativo médio para cada métrica, separando os dados entre os tipos de falta testados e os sensores e apresentando a proporção de pontos de operação 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.



(a) RMS.



(b) Curtose.



(c) Assimetria.

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.