Detecção de falta em gerador síncrono de 305 MVA através do campo magnético externo considerando a influência do ponto de operação

Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo
GRUCAD/EEL/CTC/UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
luis.otavio.grillo@posgrad.ufsc.br

Gustavo Felipe Martin Nascimento
GRUCAD/EEL/CTC/UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
gugafmn@gmail.com

Nelson Jhoe Batistela
GRUCAD/EEL/CTC/UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
jhoe.batistela@ufsc.br

Patrick Kuo-Peng
GRUCAD/EEL/CTC/UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
patrick.kuo.peng@ufsc.br

Tiago Kaoru Matsuo
Diretoria Técnica
AQTech Power Prognostics
Florianópolis, SC, Brasil
tiago.matsuo@aqtech.com

Luciano Mendes de Freitas
EMAS
Engie Brasil Energia
Florianópolis, SC, Brasil
Luciano.Freitas@engie.com

***Resumo*— Este artigo apresenta um estudo de caso de detecção de uma falta de origem mecânica em um gerador síncrono de 305 MVA operando em uma usina hidrelétrica, utilizando medições do campo magnético disperso da máquina. A estratégia utilizada se baseia na monitoração da assinatura magnética do gerador ao longo de sua operação, obtida pela medição periódica da derivada temporal do campo magnético externo com sensores de campo por indução. Constatou-se que esta assinatura magnética pode ser sensibilizada tanto pela alteração do ponto de operação quanto pela ocorrência de faltas que alterem o circuito eletromagnético da máquina. Com isso, a detecção de faltas pode ser realizada aplicando-se técnicas de detecção de anomalias nesta assinatura. Para a aplicação destas técnicas, realizaram-se processos de estratificação da assinatura magnética com relação a diferentes variáveis que caracterizam o ponto de operação, com o objetivo de avaliar essa assinatura em condições de operação próximas a uma condição de regime. A aplicação desta estratégia comprovou a melhora dos indicadores estatísticos associados à estacionariedade da assinatura magnética monitorada quando em operação na condição sadia, onde se espera que essa assinatura se mantenha constante. Além disso, avaliou-se o desempenho desta estratégia no período de evolução de uma falta incipiente que ocorreu no gerador monitorado, onde se observou uma melhora na confiabilidade dos indicadores de detecção da falta.**

Palavras-chave— campo magnético externo, gerador síncrono, monitoração da condição, detecção de faltas.

I. INTRODUÇÃO

A confiabilidade e a disponibilidade das plantas de geração de energia elétrica dependem de estratégias eficientes para monitoração da condição dos ativos de geração. As estratégias de manutenção preditiva destes ativos englobam a monitoração conjunta de diferentes variáveis elétricas, magnéticas, mecânicas, térmicas e ambientais, com o objetivo de avaliar diferentes características do sistema de geração e de aumentar a robustez dos sistemas de monitoração dos ativos [1]. A monitoração da condição de geradores síncronos (GSs) tem uma papel de destaque nas estratégias de manutenção preditiva de usinas de energia elétrica, devido à função central desta máquina nestes sistemas.

A monitoração do campo magnético é uma estratégia eficiente para a monitoração da condição de GSs devido ao fato do comportamento desta grandeza estar relacionado com características construtivas e de operação da máquina. O campo magnético pode ser monitorado na parte interna da máquina, na região do entreferro, ou na parte externa, por meio da medição do campo magnético disperso através da carcaça do GS. A monitoração do campo magnético interno é uma técnica invasiva, uma vez que há a necessidade de intervenção na operação do GS para instalação ou manutenção dos sensores na região do entreferro [2]-[4]. Por outro lado, a monitoração do campo magnético externo é uma técnica não invasiva, pois emprega sensores instalados na parte externa da máquina, o que pode ser realizado sem interferir na operação do GS [2]-[5]. Esta característica não invasiva somada com a facilidade de implantação do sistema de monitoração do campo magnético externo e a capacidade de detecção de diferentes tipos de faltas incipientes, tanto de estator quanto de rotor [2]-[3], [6]-[11], colocam esta estratégia como uma tendência no diagnóstico de máquinas elétricas [12].

A avaliação do campo magnético externo em sistemas de detecção de faltas é realizada por meio da análise em frequência dos sinais medidos. No espectro destes sinais estão presentes uma componente espectral associadas à frequência de rotação mecânica da máquina (f_m) e componentes harmônicas desta frequência. As amplitudes destas componentes são sensibilizadas pela ocorrência de faltas incipientes, de maneira que a monitoração periódica destas componentes possibilita a detecção de faltas [6], [7], [13]. O padrão de amplitudes da componente f_m e de suas harmônicas é conhecido como assinatura magnética da máquina. Esta estratégia vem sendo explorada e o desenvolvimento de equipamentos para a monitoração do campo magnético externo de geradores síncronos já são relatados na literatura [6], [9]. Nestes equipamentos, as amplitudes das componentes harmônicas de interesse para a monitoração da condição do GS são armazenadas em séries de amplitudes que permitem acompanhar a evolução das características da assinatura magnética da máquina e a detecção de alterações.

Este trabalho foi parcialmente custeado pelo CNPq, pela ENGIE Brasil Energia e pela Itá Energética S.A.

Uma das dificultadas encontradas na monitoração do campo magnético para a detecção de faltas incipientes é a influência que as variações do ponto de operação do GS têm sobre o espectro de frequências dos sinais medidos. Estas variações de operação são comuns em GSs em operação sincronizada com grandes sistemas de potência em virtude das variações de carga, o que requer estratégias para evitar falsos alarmes em sistemas de detecção de faltas a partir do campo magnético externo. Neste sentido, recomenda-se a avaliação e comparação da assinatura magnética da máquina em condições de operação próximas a uma condição de regime, de maneira a limitar a influência das variações de operação sobre o campo magnético externo [9], [10].

Neste contexto, este artigo apresenta um estudo de caso de detecção de uma falta de vibração mecânica em um GS de 305 MVA, operando em uma usina hidrelétrica, por meio do campo magnético externo. Nesta avaliação, um processo de estratificação dos históricos de amplitudes das componentes harmônicas da f_m é proposto para permitir a avaliação da assinatura magnética do GS dentro de faixas limitadas de operação. Com isso, busca-se limitar o efeito de grandes variações de operação do GS sobre a assinatura magnética da máquina, contribuindo para o aumento da confiabilidade da resposta das técnicas de detecção de faltas.

II. Processo de Monitoração do Campo Magnético Externo

Nesta seção são apresentados o princípio de monitoração do GS por meio do campo magnético externo, a arquitetura do equipamento para monitoração desta grandeza magnética e as estratégias de processamento dos dados medidos e de detecção de faltas.

A. *Princípio de monitoração*

O princípio de monitoração do GS por meio do seu campo magnético externo se baseia na monitoração contínua de componentes do espectro de frequências da derivada temporal do campo magnético externo *dH(t)/dt*, a qual pode ser obtida através de um sensor de campo por indução. As componentes espectrais de interesse para a monitoração da condição do GS são a frequência de rotação mecânica da máquina (f_m) e suas harmônicas. A localização destas componentes no espectro de frequências é definida por (1), onde f_e é a frequência fundamental elétrica, p é o número de pares de polos da máquina e k é a ordem da harmônica. Para k=1, tem-se a frequência de rotação mecânica do GS.

$$f_k = \frac{k f_e}{p} \tag{1}$$

As componentes espectrais, dadas por (1), compõe a assinatura magnética da máquina e refletem características construtivas e de operação do GS. A Fig. 1 apresenta o espectro de frequências de uma medição de *dH(t)/dt* realizada em um GS de 305 MVA e 56 polos, que apresenta f_m de aproximadamente 2,14 Hz na operação em 60 Hz. Pode-se observar a f_m e suas harmônicas ao longo do espectro ($2f_m$, $3f_m$, $4f_m$, ...), inclusive a componente f_e que, por definição, também é uma harmônica da f_m.

A monitoração da assinatura magnética deve ser realizada ao longo da operação do GS, comparando a amplitude das componentes harmônicas da f_m entre diferentes medições em busca de alterações de amplitude. Este procedimento é realizado de maneira mais eficiente por meio do armazenamento das amplitudes das componentes espectrais, de interesse para a monitoração da máquina, em séries temporais. Estas séries mantém o histórico de amplitudes das componentes harmônicas da f_m e facilitam a detecção de alterações de padrão de amplitude que possam estar associadas com a ocorrência de faltas incipientes. O conjunto destas séries temporais é denominado de assinatura magnética continuada [10] e é utilizado neste artigo para demonstrar a detecção de uma falta incipiente de um GS de 305 MVA operando em uma usina hidrelétrica.

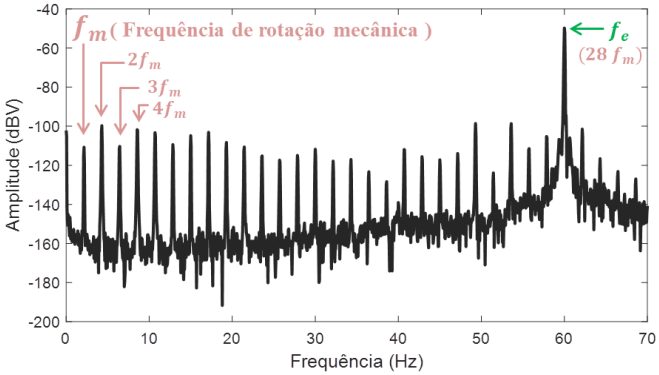


Fig. 1. Espectro de frequências de uma medição da derivada temporal do campo magnético externo em um GS de 305 MVA e 56 polos.

A monitoração da assinatura magnética deve ser realizada ao longo da operação do GS, comparando a amplitude das componentes harmônicas da f_m entre diferentes medições em busca de alterações de amplitude. Este procedimento é realizado de maneira mais eficiente por meio do armazenamento das amplitudes das componentes espectrais, de interesse para a monitoração da máquina, em séries temporais. Estas séries mantém o histórico de amplitudes das componentes harmônicas da f_m e facilitam a detecção de alterações de padrão de amplitude que possam estar associadas com a ocorrência de faltas incipientes. O conjunto destas séries temporais é denominado de assinatura magnética continuada [10] e é utilizado neste artigo para demonstrar a detecção de uma falta incipiente de um GS de 305 MVA operando em uma usina hidrelétrica.

B. *Equipamento para medição da derivada temporal do campo magnético externo*

A medição da derivada temporal do campo magnético externo é realizada por meio de sensores de campo magnético por indução e por equipamentos customizados para condicionar os sinais medidos. A tensão de saída do sensor, *v(t)*, induzida pelo campo magnético disperso é proporcional à *dH(t)/dt* como definido em (2), onde μ_0 é a permeabilidade magnética do ar, S é a seção do sensor e N é o número de espiras da bobina.

$$v(t) = -\mu_0 NS \frac{dH(t)}{dt} \tag{2}$$

O campo magnético disperso apresenta baixa amplitude, devido a sua atenuação pelo núcleo do estator e pela carcaça. Neste caso, a tensão *v(t)* induzida no sensor também apresenta amplitudes reduzidas, as quais podem variar em escalas de milivolts ou até microvolts. Com isso, o equipamento de medição compreende um circuito de condicionamento analógico, formado por etapas de filtragem e amplificação, antes da conversão A/D (analógico/digital) para proporcionar uma melhor resposta do sinal coletado. A arquitetura básica do sistema de medição da derivada

temporal do campo magnético externo é apresentada na Fig. 2.

A saída deste sistema é o sinal digitalizado *dH[t]/dt*, obtido a partir da tensão *v[t]* digitalizada e de uma constante dependente das características construtivas do sensor ($\mu_0 NS$). Este sinal apresenta as mesmas características espectrais que o campo magnético externo, com a vantagem de amplificar naturalmente as componentes de alta frequência, as quais normalmente são atenuadas pela carcaça e são empregadas na detecção de alguns tipos de faltas incipientes. Em [6] e [9] são apresentados mais detalhes de equipamentos desenvolvidos para executar esta função.

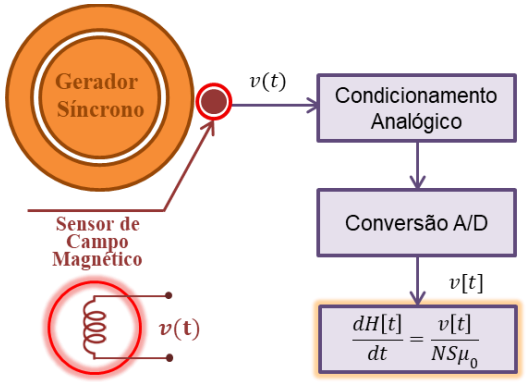


Fig. 2. Equipamento de medição da derivada temporal do campo magnético externo.

C. *Processamento de dados e obtenção da assinatura magnética continuada do GS*

O processamento do sinal coletado pelo equipamento de medição de *dH(t)/dt* é realizado pelos procedimentos apresentados na Fig. 3. Inicialmente, realiza-se o cômputo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal medido para a obtenção do seu espectro de frequências. A partir deste espectro, realiza-se uma etapa de rastreamento das raias espectrais de interesse para a monitoração da condição do GS, ou seja, realiza-se a identificação da assinatura magnética do GS. Para isso, são identificadas e armazenas a frequência das componentes harmônicas da f_m, dadas por (1), e são armazenas as amplitudes correspondentes destas componentes espectrais. Este processo é repetido periodicamente para cada nova medição de *dH(t)/dt*, armazenado a amplitude das componentes espectrais de interesse em séries temporais que formam a assinatura magnética continuada da máquina.

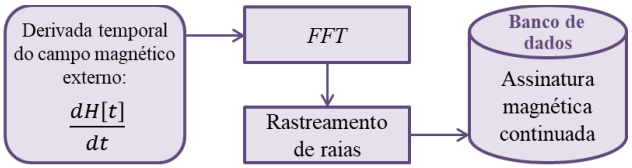


Fig. 3. Procedimentos para extração da assinatura magnética do GS a partir dos sinais *dH(t)/dt* medidos.

D. *Metodologia de detecção de faltas*

A assinatura magnética continuada do GS é sensibilizada pela ocorrência de faltas incipientes, apresentando alterações no padrão de valor médio de algumas séries de amplitudes durante a evolução da falta. Com isso, o processo de detecção de faltas é realizado por meio da aplicação de técnicas de detecção de alterações na assinatura magnética continuada do GS, avaliando cada série de amplitude individualmente em busca de alterações. A técnica de detecção de alterações aqui empregada é a técnica de gráfico de controle Shewhart, a qual é uma técnica de simples implementação computacional e eficiente na detecção de alterações de valor médio de séries temporais [10]. Esta técnica permite avaliar cada série temporal com relação a dois limites de controle que especificam a faixa de amplitudes na qual a máquina opera em uma condição de normalidade. Os limites de controle são definidos por (3), onde μ é a média, σ é o desvio padrão e k é um parâmetro de detecção que especifica a dimensão das alterações que se deseja detectar. Os parâmetros estatísticos (μ e σ) empregados na definição dos limites de controle são calculados em um período de referência de cada série de dados onde a máquina é considerada sadia (condição normal).

$$LC = \mu \pm k\sigma \tag{3}$$

A detecção de alterações é realizada a partir da violação de um dos limites de controle. A Fig. 4 apresenta uma série de amplitudes de uma componente harmônica da f_m obtida através da medição de *dH(t)/dt* em um ensaio experimental em um GS de 10 kVA e de 8 polos, onde foi aplicada uma falta de curto-circuito de espiras no estator. A aplicação da técnica de gráficos de controle Shewhart nesta série de dados permite a detecção de alteração do seu valor médio ocorrida devido a imposição da falta, possibilitando a sua detecção.

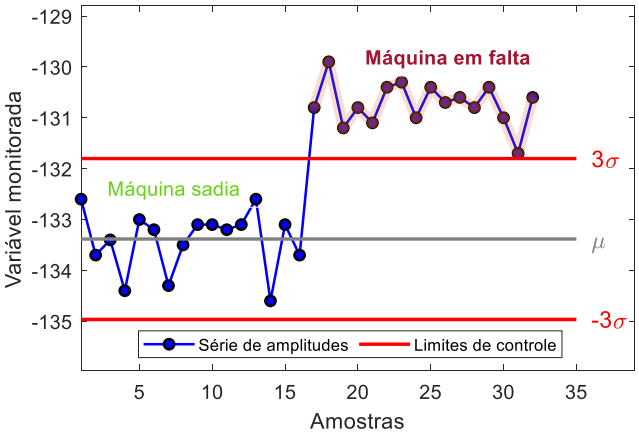


Fig. 4. Detecção de alteração do valor médio de uma série de amplitudes diante da imposição de uma falta em um ensaio experiemntal.

A monitoração da assinatura magnética continuada deve avaliar simultaneamente várias séries temporais que compõe o histórico das componentes harmônicas da f_m monitoradas. Para isto, a técnica de gráficos de controle Shewhart é aplicada a cada série temporal de maneira individual, como indicado no fluxograma da Fig. 5, o qual apresenta a metodologia de detecção de alterações na assinatura magnética continuada. Para um *dataset* composto por *N* séries de amplitudes, cada série é selecionada e avaliada com a técnica de gráficos de controle Shewhart na busca por alterações em seu valor médio. As séries alteradas e detectadas, se houverem, são submetidas a uma análise de correlação por meio da avaliação da matriz de correlação entre estas séries, como definido pela metodologia apresentada em [10]. Se a correlação entre as séries detectadas com alteração for forte, gera-se um indicador global de alteração (I_{GA}) da assinatura magnética da máquina que indica a ocorrência de um evento que pode ser associado à ocorrência de uma falta incipiente. A análise de correlação

entre as séries temporais detectadas com alteração possibilita descartar *outliers* e evitar falsos alarmes no processo de detecção de faltas [10].

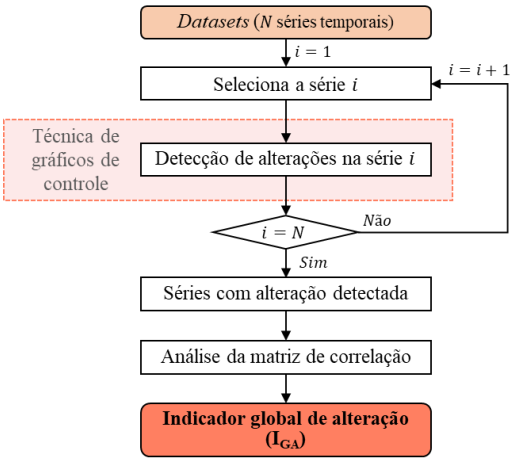


Fig. 5. Metodologia de detecção de alterações na assinatura magnética continuada.

E. *Condições de aplicação da metodologia de detecção de faltas*

A assinatura magnética do GS é sensibilizada tanto pela ocorrência de faltas incipientes, que provocam alterações no circuito eletromagnético da máquina, quanto por variações do ponto de operação do GS, onde as variações das correntes internas da máquina alteram o seu campo interno e, consequentemente, seu campo magnético disperso [9].

A operação sincronizada é o modo de operação mais comum do GS em usinas de geração conectadas a grandes sistemas elétricos. Nesta condição, as variações do ponto de operação do GS são comuns em virtude da atuação dos controles de velocidade e tensão do GS, os quais são necessários para garantir o fornecimento de potência ativa e reativa ao sistema [14]. Neste contexto, as alterações de despacho de potência podem causar alterações nas séries de amplitudes que compõe a assinatura magnética continuada e podem, por consequência, provocar falsos alarmes no processo de detecção de faltas.

Uma estratégia que pode ser utilizada para evitar a ocorrência de falsos alarmes decorrentes de variações do ponto de operação da máquina é a aplicação da metodologia de detecção de faltas em períodos em que o GS opere com pequenas variações de operação, ou seja, onde o GS opere próximo a uma condição de regime permanente. Esta estratégia limita a influência das variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética continuada do GS, minimizando a ocorrência de falsos positivos no processo de detecção de faltas. Na seção seguinte é apresentada uma estratégia para estratificar a assinatura magnética continuada da máquina dentro de faixas limitadas de variações do ponto de operação, o que permite a avaliação da máquina próxima a uma condição de regime.

III. Estratificação da Assinatura Magnética Continuada com Relação ao Ponto de Operação

Uma maneira de garantir que a aplicação da metodologia de detecção de faltas seja realizada em condições com pequenas variações do ponto de operação é realizar a estratificação da assinatura magnética continuada com relação a faixas de operação limitadas. Nestas condições, as séries resultantes não apresentaram alterações significativas em virtude das variações do ponto de operação, conferindo maior confiabilidade ao processo de detecção de faltas.

Na sequência são apresentadas algumas relações de correlação entre séries de amplitudes da assinatura magnética continuada e grandezas elétricas que caracterizam o ponto de operação da máquina. Estas séries de medidas foram obtidas em um GS de 305 MVA e 56 polos operando em uma usina hidrelétrica em sincronismo com o sistema elétrico brasileiro. As séries compreendem um período de uma semana com medições periódicas das grandezas elétricas e magnéticas a cada 10 minutos, totalizando 1008 amostras em cada série de dados. Por fim, um processo de estratificação da assinatura magnética é apresentado, com o objetivo de fornecer condições favoráveis para a análise e detecção de faltas a partir da monitoração das características da assinatura magnética continuada.

A. *Alterações da assinatura magnética com as variações do ponto de operação*

A influência das variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética do GS é tratada em função dos despachos de potência ativa (P) e de potência reativa (Q). O despacho de P é alterado pelo controle de velocidade da máquina primária (controle de frequência do GS) e tem impactos diretos sobre as correntes internas da máquina, causando alteração tanto no campo magnético interno estabelecido quanto no campo magnético disperso através da carcaça. As alterações de P, e consequentemente da potência aparente (S), apresentam forte correlação com a amplitude da componente da frequência fundamental elétrica f_e e algumas de suas harmônicas. A Fig. 6 apresenta as séries temporais com o histórico de medições de P e S em comparação com o histórico de amplitude da componente f_e no GS de 305 MVA. Observa-se visualmente que as alterações em P e S são acompanhadas por alterações de amplitude da componente f_e. Neste conjunto de medições, a série temporal com o histórico de medidas de P apresenta valores negativos quando o GS opera como compensador síncrono. O consumo de P, neste caso, de deve a uma pequena demanda de potência ativa para suprir os serviços auxiliares da usina.

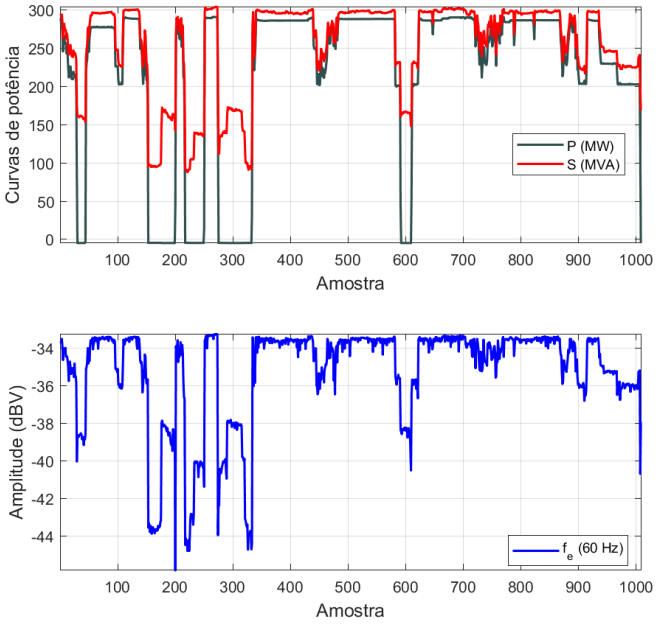


Fig. 6. Comparação entre as séries de medidas de P e S com a série de amplitudes da componente f_e.

Por outro lado, o despacho de potência reativa está associado ao controle de tensão do GS e é realizado através do ajuste da corrente de campo (I_f) da máquina. A variação de I_f altera o fluxo magnético no entreferro e a tensão interna induzida, o que altera tanto o campo magnético interno quanto o campo magnético disperso. A alteração de Q está associada diretamente com a alteração de amplitude da f_m e de muitas de suas harmônicas. A Fig. 7 mostra a série com medidas de Q em comparação com o histórico de amplitudes da f_m. Observa-se uma forte correlação estre estas duas séries, onde as alterações de potência reativa são acompanhadas por alterações de amplitude da f_m.

As relações entre as medidas de grandezas elétricas e o histórico de amplitudes das componentes f_m e f_e do campo magnético externo exemplificam a relação de dependência da assinatura magnética do GS com relação ao seu ponto de operação. A estratégia para avaliação da assinatura magnética em faixas de operação com pequenas variações das grandezas elétricas é apresentada a seguir.

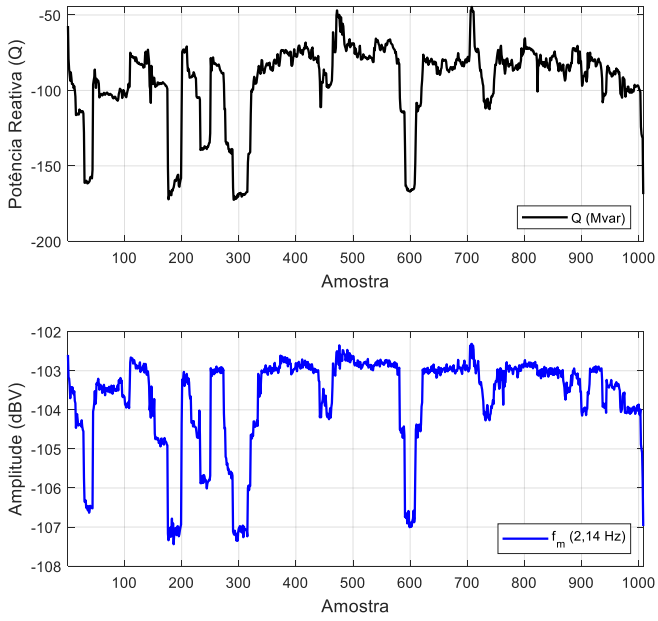


Fig. 7. Comparação entre a série de medidas de Q com a série de amplitudes da componente f_m.

B. *Processo de estratificação da assinatura magnética*

O processo de estratificação aqui proposto consiste em filtrar as medidas, tanto das amplitudes das harmônicas da f_m associadas com a medição da derivada temporal do campo magnético externo quanto das medidas das grandezas elétricas, que ocorrem quanto o GS opera dentro de uma região de operação definida por uma faixa limitada de P e de Q. Assim, obtém-se um novo conjunto de medidas, menor que o conjunto original, obtido dentro de uma faixa com pequenas variações das grandezas elétricas usadas como referência para o processo de estratificação.

A Fig. 8 apresenta o fluxograma do processo de estratificação da assinatura magnética continuada com relação ao ponto de operação. As entradas deste processo são as séries com as medidas de P e Q e as séries de amplitudes que compõe a assinatura magnética continuada. Na sequência, é processado um histograma bivariado das medidas de P e Q para identificação de faixas de potência onde o GS operou com mais frequência no conjunto de dados avaliado. Este processo é realizado para selecionar o maior número de amostras em uma faixa de operação limitada. A faixa selecionada para P é dada por $[P_{máx}\ P_{mín}]$ e a faixa selecionada para Q é dada por $[Q_{máx}\ Q_{mín}]$. Na sequência é realizada a estratificação da assinatura magnética continuada, filtrando do conjunto inicial as medidas que ocorrem com o GS operando dentro das faixas $[P_{máx}\ P_{mín}]$ e $[Q_{máx}\ Q_{mín}]$. O resultado desta etapa é um novo conjunto de dados, com tamanho reduzido em relação ao conjunto inicial e com medidas obtidas dentro de uma faixa limitada de P e Q.

Esse processo de estratificação é exemplificado com sua aplicação nas séries de medidas de P e Q e da assinatura magnética continuada da máquina apresentadas na Fig. 6 e na Fig. 7. Utilizando este conjunto inicial de séries formadas por 1008 amostras, processa-se o histograma bivariado entre P e Q, o qual é apresentado na Fig. 9. Observa-se na região selecionada e identificada nesta figura que 196 amostras foram coletadas enquanto o GS operou com P na faixa [268 300] MW e com Q na faixa [-82,4 -76] Mvar. Selecionando estas faixas como referência, realiza-se o processo de estratificação da assinatura magnética continuada, o que resulta em novas séries de amplitudes com 196 amostras.

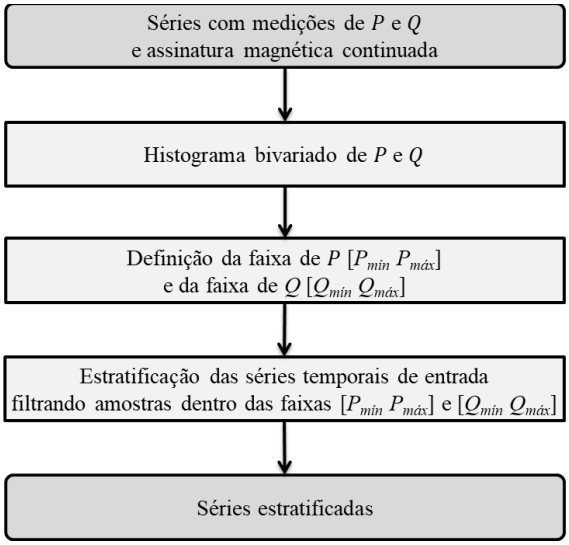


Fig. 8. Fluxograma do processo de estratificação da assinatura magnética continuada com relação ao ponto de operação.

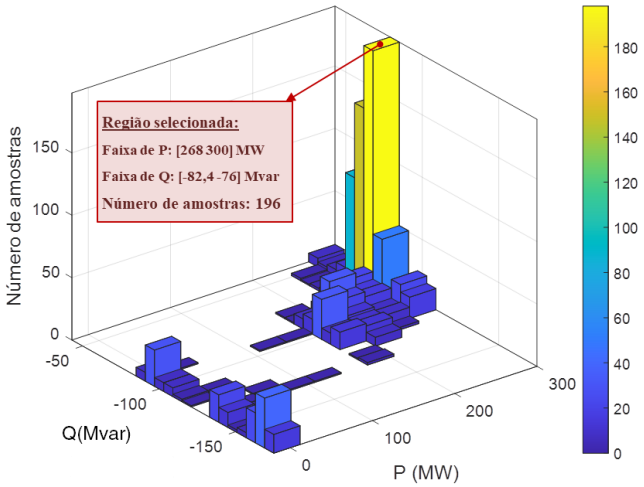


Fig. 9. Histograma bivariado de P e Q para identificação das faixas de potência onde o GS opera com mais frequência.

A Fig. 10 apresenta uma comparação das séries de medidas de *P* e *Q* originais (1008 amostras) e as séries de medidas de *P* e *Q* resultantes (196 amostras) após o processo de estratificação. Uma comparação estatística entre estas séries é realizada através do cálculo do desvio padrão σ de casa série de dados e da sua amplitude ou *range* (*R*), a qual é definida pela diferença entre o maior e o menor valor da série de dados. A diminuição destes indicadores estatísticos é benéfica para a aplicação dos métodos de gráficos de controle para detecção de faltas, pois permite a detecção de alterações mais sutis de amplitude. Para *P*, o conjunto original de dados apresenta *R* de 295,8 MW e σ de 106,7 MW. Após a etapa de estratificação, a nova série de dados apresenta *R* de 22,8 MW e σ de 4,6 MW. Para *Q*, a série de dados original apresenta *R* de 127,8 Mvar e σ de 26,6 Mvar, enquanto a série resultante da estratificação apresenta *R* de 6,3 Mvar e σ de 1,7 Mvar. Observa-se uma diminuição substancial dos indicadores σ e *R* nas séries de medidas resultante do processo de estratificação.

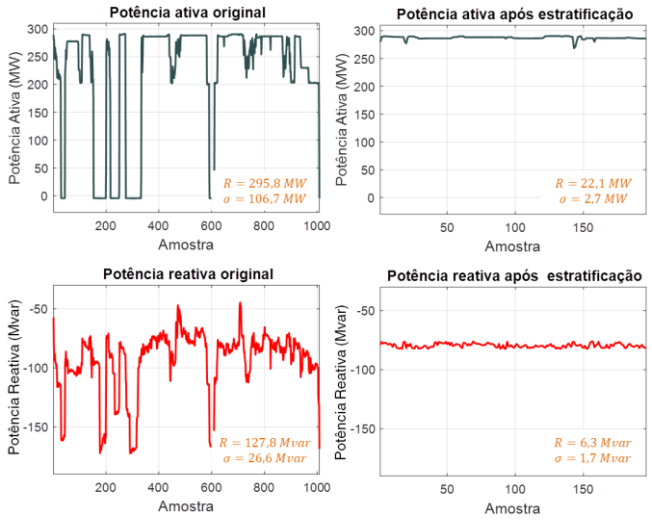


Fig. 10. Comparação entre as séries de medidas de *P* e *Q* antes e depois do processo de estratificação.

O impacto do processo de estratificação sobre a assinatura magnética continuada é a diminuição da variabilidade das séries de amplitudes, a qual pode ser representada pela diminuição dos indicadores σ e *R*. A Fig. 11 apresenta uma comparação entre as séries de amplitudes das componentes f_m e f_e do conjunto original de dados com relação as séries obtidas após o processo de estratificação, incluindo os indicadores *R* e σ em cada caso. O resultado do processo de estratificação sobre o histórico de amplitudes da f_m evidencia a redução *R*, de 5,1 dB na série original para 0,6 dB após a etapa de estratificação, e do σ, de 1,2 dB na série original para 0,1 dB na série resultante. O histórico de amplitudes da f_e também apresenta redução de sua variabilidade, com *R* diminuindo de 12,6 dB para 1,1 dB e σ diminuindo de 1,1 dB para 0,1 dB. O mesmo padrão de redução da variabilidade é observado no histórico de amplitudes de diversas componentes harmônicas da f_m.

A redução da variabilidade das séries de amplitudes facilita a detecção mais assertiva de faltas incipientes que alteram a assinatura magnética continuada, uma vez que a avaliação é realizada com amostras obtidas dentro de faixas de operação limitadas (condição próxima a de regime).

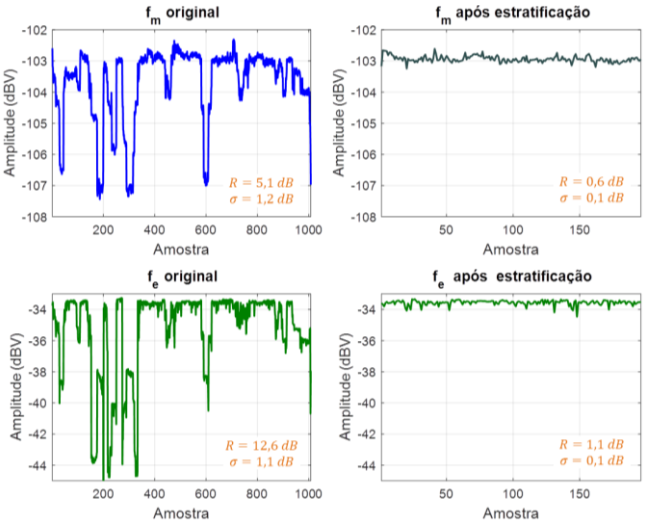


Fig. 11. Comparação entre as séries temporais com as aplitudes da f_m e da f_e antes e depois do processo de estratificação.

IV. Avaliação Experimental e Resultados

Nesta seção é apresentado o resultado da metodologia de detecção de faltas em um conjunto de dados obtidos no GS de 305 MVA durante o período de evolução de uma falta incipiente de vibração mecânica. A aplicação da metodologia de detecção de faltas é realizada após a aplicação do processo de estratificação da assinatura magnética continuada do GS com base em uma faixa limitada de despacho de *P* e *Q*, para limitar a influência das variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética da máquina.

A. Descrição do caso avaliado

O GS de 305 MVA avaliado neste estudo de caso é uma máquina de eixo vertical que apresenta como máquina primária uma turbina Francis e que opera em uma usina hidrelétrica em sincronismo com o sistema elétrico brasileiro. Este GS é monitorado por um equipamento para monitoração do campo magnético externo, descrito em [6], que segue as especificações apresentadas na seção 2, composto por seis sensores de campo por indução. Os sensores são posicionados próximo ao centro da altura do pacote estatórico, na parte externa da carcaça do estator, de maneira distribuída para monitorar diferentes regiões do GS. O *dataset* avaliado é composto pelas séries com histórico de amplitudes das componentes harmônicas da f_m (aproximadamente 2,14 Hz) até a frequência de 1000 Hz, totalizando 467 séries temporais que compõe a assinatura magnética do GS. Além disso, séries temporais contendo as medidas de *P* e *Q* no período avaliado completam o conjunto de dados.

O período avaliado neste estudo de caso compreende a evolução de uma falta incipiente de vibração mecânica no eixo do GS. Este período compreende aproximadamente 10 meses de monitoração com medições realizadas a cada 10 minutos, o que corresponde a aproximadamente 41000 amostras. A ocorrência da falta sensibilizou a assinatura magnética do GS através da alteração do valor médio de algumas séries temporais de amplitude de harmônicas da f_m, o que possibilitou sua detecção por meio da monitoração do campo magnético externo. A análise da assinatura magnética continuada do GS diante desta falta é relatada por [8]-[11]. A evolução desta falta também foi detectada por

um sistema comercial de monitoração de vibração mecânica instalado no GS e constatada pela equipe de manutenção da usina em uma parada de manutenção, onde foi feito o reparo da falta [8], [11].

B. *Aplicação do processo de estratificação da assinatura magnética continuada*

A execução do processo de estratificação da assinatura magnética continuada é iniciada a partir da concepção do histograma bivariado com as medidas das grandezas *P* e *Q* durante o período avaliado. Este histograma é apresentado na Fig. 12, onde é selecionada uma região de operação para análise (região 1) definida por *P* na faixa de 283,9 MW à 294 MW, que corresponde a uma faixa de variação de aproximadamente 3,3% da potência nominal do GS, e por *Q* na faixa de -82,25 Mvar à -77,86 Mvar, correspondendo a uma faixa de 1,4% da potência nominal. Nesta aplicação, o histograma bivariado foi particionado em faixas estreitas de *P* e *Q*, indicadas na Fig. 12, para limitar consideravelmente as influências do ponto de operação sobre a assinatura magnética continuada no conjunto de dados resultantes.

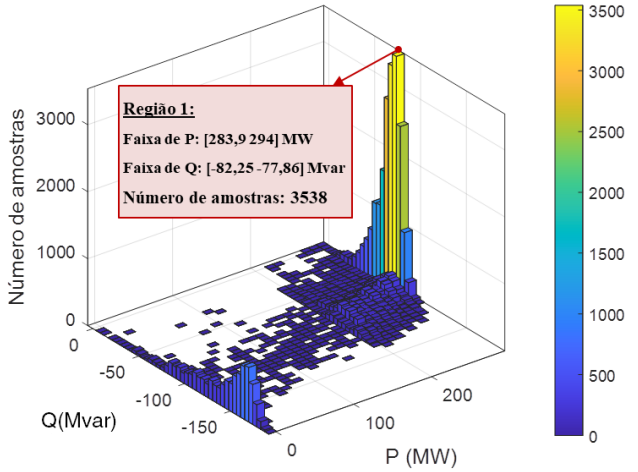


Fig. 12. Histograma bivariado de *P* e *Q* para identificação das faixas de potência onde o GS opera com mais frequência no período avaliado.

O conjunto de séries temporais resultantes do processo de estratificação é composto por séries com 3538 amostras. A Fig. 13 apresenta uma comparação das séries de medidas de *P* e *Q* originais e as séries de medidas de *P* e *Q* resultantes após o processo de estratificação. Para *P*, a série de medidas original apresenta *R* de 299,36 MW e σ de 113,56 MW e a série de medidas resultante da etapa de estratificação apresenta *R* de 8,91 MW e σ de 1,41 MW. Para *Q*, a série de medidas original apresenta *R* de 193,45 Mvar e σ de 32,55 Mvar, enquanto a série resultante da estratificação apresenta *R* de 4,39 Mvar e σ de 1,26 Mvar. Pode-se observar que os conjuntos de medidas de *P* e *Q* após o processo de estratificação apresentam uma variabilidade muito menor que o conjunto inicial de medidas, limitando a variação de amplitude do despacho de potências no conjunto selecionado.

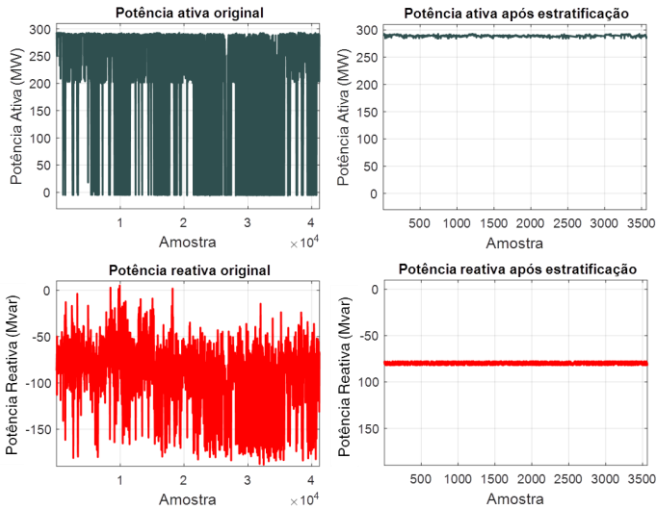


Fig. 13. Comparação entre as séries de medidas de *P* e *Q* antes e depois do processo de estratificação.

C. *Aplicação da metodologia de detecção de faltas*

O conjunto de séries de amplitudes resultante do processo de estratificação da assinatura magnética continuada é avaliado por meio da metodologia de detecção de faltas. As primeiras 300 amostras desta série foram selecionadas como referência de normalidade da máquina (condição sadia) para a configuração dos limites de detecção com limites de controle 3σ, já que este período antecede o início da evolução da falta incipiente. O resultado desta aplicação possibilitou a detecção de alterações em diversas séries de amplitudes nos seis sensores avaliados. A Fig. 14 apresenta a aplicação da técnica de gráficos de controle Shewhart na avaliação da série de amplitudes estratificada da 141ª componente harmônica da f_m em um dos sensores. Observa-se que a amplitude média da série sofre alteração e viola um dos limites de controle, permitindo a detecção.

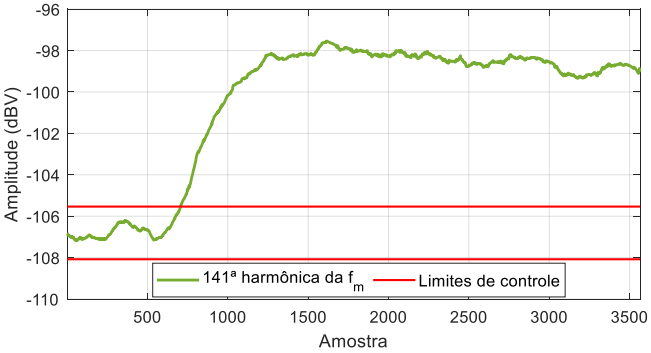


Fig. 14. Detecção de alteração do valor médio de um série de amplitudes com a metodologia de detecção de alterações.

A avaliação do conjunto total das séries de amplitudes de cada sensor (467 séries) apresenta séries com alteração detectada em diferentes instantes devido à natureza de evolução da falta incipiente investigada. Neste tipo de falta, as séries de amplitudes das harmônicas da f_m sensibilizadas apresentam uma alteração de tendência lenta e são detectadas com alteração em diferentes instantes, dependendo da velocidade de evolução da alteração e do grau de sensibilidade de cada série. Por este motivo, a Fig. 15 mostra para cada sensor um gráfico com o somatório do número de séries detectadas com alteração em períodos (*T*) compostos por 500 amostras. Com isso, consegue-se ilustrar de maneira mais assertiva as regiões com maior número de séries

alteradas e detectadas. A análise de correlação entre as séries detectadas com alteração permitiu identificar conjuntos de séries detectadas com alteração com correlação forte entre si entre as amostras 500 e 1500, permitindo a geração do alarme I_{GA} (indicador global de alterações) em cada um dos sensores avaliados.

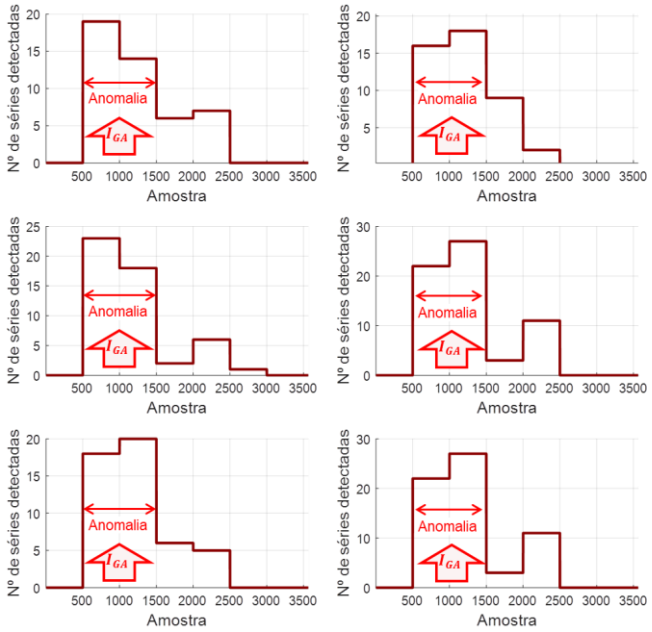


Fig. 15. Resposta da metodologia de detecção de faltas no conjunto de medidas de cada um dos 6 sensores.

V. Conclusões

A aplicação da metodologia de detecção de alterações na assinatura magnética continuada obtida a partir da derivada temporal do campo magnético externo possibilitou a detecção da falta de vibração mecânica no GS de 305 MVA por meio da detecção de alterações no conjunto de dados estratificados. A utilização do processo de estratificação para limitar a assinatura magnética avaliada dentro de uma faixa limitada de potência minimiza as chances das alterações detectadas serem originadas por variações de operação da máquina e aumenta a probabilidade destas alterações estarem associadas com a evolução de uma falta incipiente. Os resultados da aplicação do processo de estratificação da assinatura magnética continuada demostram a significativa redução dos indicadores de variabilidade das séries de amplitudes resultantes, permitindo a detecção de alterações mais sutis e conferindo maior confiabilidade aos resultados do processo de detecção de faltas. O procedimento de estratificação apresentado contribui para a detecção de faltas em GS em operação sincronizada, pois possibilita a avaliação da assinatura magnética da máquina em condições próximas a de regime, com pequenas variações de operação.

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-0403-0048/2019 e PD-00403-0057/2023, ambos intitulados “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”, realizado em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.

Referências

[1] “IEEE Guide for Online Monitoring of Large Synchronous Generators (10 MVA and Above),” *IEEE Std 1129-2014*, pp. 1–62, Abr. 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6797854.

[2] B. Kedjar, A. Merkhouf, e K. Al-Haddad, “Large Synchronous Machines Diagnosis Based on Air-Gap and Stray Fluxes - An Overview,” *In 2020 International Conferen,ce on Electrical Machines*, Gothenburg, Suécia: IEEE, Ago. 2020, pp. 1384–1389. doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270868.

[3] G.-A. Capolino, R. Romary, H. Henao, e R. Pusca, “State of the Art on Stray Flux Analysis in Faulted Electrical Machines,” *In 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Atenas, Grécia: IEEE, Abr. 2019, pp. 181–187, doi: 10.1109/WEMDCD.2019.8887805.

[4] I. Zamudio-Ramirez *et al.*, “Magnetic Flux Analysis for the Condition Monitoring of Electric Machines: A Review,” *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 18, pp. 2895–2908, Mai 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3070581.

[5] H. Ehya e J. Faiz, *Electromagnetic Analysis and Condition Monitoring of Synchronous Generators*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2022.

[6] H. F. dos Santos *et al.*, “Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field,” *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 16, pp. 70–89, Mar. 2017, doi: 10.1590/2179-10742017v16i1872.

[7] M. Rigoni, “Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo,” Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2014.

[8] L. M. de Freitas *et al.*, “Emprego de nova técnica na detecção de falta incipiente em gerador síncrono através do campo magnético externo,” *In Anais do XXV Seminario Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Belo Horizonte, Brasil, Set. 2019.

[9] L. O. S. Grillo *et al.*, “Equipment for Monitoring Synchronous Generators Condition through External Magnetic Field Waveforms”, *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*; vol. 21, p. 527-548, 2022, doi: 10.1590/2179-10742022v21i4268102.

[10] L. O. S. Grillo *et al.*, “A Method for Statistical Processing of Magnetic Field Sensor Signals for Non-Invasive Condition Monitoring of Synchronous Generators,” *Sensors*, vol. 22, p. 8631, 2022, doi: 10.3390/s22228631.

[11] H. F. dos Santos, “Detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio de históricos de harmônicos do campo magnético externo,” Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2021.

[12] H. Henao *et al.*, “Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, pp. 31–42, Jun. 2014, doi: 10.1109/MIE.2013.2287651.

[13] P. Neti, A. B. Dehkordi, e A. M. Gole, “A New Robust Method To Detect Rotor Faults in Salient-Pole Synchronous Machines Using Structural Asymmetries,” *In 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Edmonton, Canadá: IEEE, Out. 2008, pp. 1–8, doi: 10.1109/08IAS.2008.22.

[14] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. Nova York: McGraw-Hill, 1994.