Influência de faltas incipientes e de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética de geradores síncronos

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

Tarcísio Pollnow Krüger
GRUCAD/EEL/CTC/UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
tarcisiokruger@gmail.com

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

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

***Resumo*— A assinatura magnética de geradores síncronos pode ser obtida de maneira não invasiva pela medição do campo magnético disperso, monitorando periodicamente a amplitude de componentes espectrais múltiplas da frequência de rotação da máquina. Esta assinatura é sensibilizada tanto pelas alterações do ponto de operação quanto pelas alterações do circuito eletromagnético da máquina causadas pela evolução de uma falta incipiente. Com isso, a monitoração da assinatura magnética é utilizada para detecção de faltas em sistemas de monitoração da condição de geradores. Uma avaliação experimental com um gerador síncrono de 10 kVA em uma bancada que permite a imposição controlada de diferentes tipos de faltas permitiu mensurar e comparar a influência de alterações do ponto de operação e da ocorrência de faltas sobre a assinatura magnética. A avaliação estatística das alterações observadas evidenciou que a assinatura magnética é influenciada de maneira mais significativa por alterações do ponto de operação do que pela ocorrência das faltas impostas. Com isso, constata-se que alterações naturais da operação da máquina podem causar falsos alarmes nos processos de detecção de faltas durante a monitoração do gerador. A avaliação realizada aponta a necessidade de monitorar a assinatura magnética da máquina em condições com pequenas variações de seu ponto de operação, próximas à condição de regime permanente, para garantir um prognóstico assertivo no processo de detecção de faltas.**

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

I. INTRODUÇÃO

A monitoração da condição dos ativos de sistemas de geração de energia elétrica é uma estratégia de manutenção preditiva amplamente utilizada para detectar faltas incipientes e programar as atividades de manutenção [1]. Esta estratégia permite minimizar as paradas de máquina e otimizar as ações de manutenção, aumentando a disponibilidade e confiabilidade das plantas de geração [2]. A monitoração da condição de geradores síncronos (GSs), os quais são elementos centrais em diversas plantas de geração de energia elétrica, pode ser realizada por meio da monitoração de características de diferentes grandezas elétricas, magnéticas, mecânicas e ambientais. Cada uma destas grandezas permite a monitoração de determinadas características da máquina, de maneira que a monitoração conjunta destas variáveis aumenta ainda mais a capacidade de detecção de faltas incipientes [3]. Neste contexto, a monitoração de grandezas magnéticas se destaca pelo fato de seu comportamento refletir características construtivas e de operação da máquina, possibilitando a detecção de diferentes tipos de faltas incipientes [4].

A monitoração do campo magnético pode ser realizada no interior do GS, com sensores instalados na região do entreferro, ou com sensores instalados na parte externa da máquina, para medição do campo magnético disperso. A monitoração do campo magnético interno é a técnica mais explorada na literatura neste segmento [5]-[7] e trata-se de uma técnica invasiva, já que necessita de intervenção na operação da máquina para instalação ou manutenção de sensores na região do entreferro, que é de difícil acesso dependendo das características da unidade geradora. A monitoração do campo magnético externo é mais atrativa para a implementação de um sistema de monitoração da condição da máquina, pois se trata de uma técnica não invasiva, na qual os sensores podem ser instalados na parte externa do GS sem interferir em sua operação. A monitoração de GSs por meio do campo magnético externo está sendo alvo de pesquisas recentes e tem eficácia comprovada na detecção de faltas tanto de rotor como de estator [8]-[16].

A monitoração da condição do GS por meio do campo magnético externo pode ser realizada através da monitoração das características da assinatura magnética da máquina, obtida a partir do espectro de frequências dos sinais medidos [11]-[12]. Esta assinatura magnética é definida pelo padrão de amplitudes de componentes espectrais múltiplas da frequência de rotação da máquina [8], [12]. A alteração desta assinatura pode ser associada tanto com variações do ponto de operação da máquina quanto com a ocorrência de faltas incipientes [12].

A detecção de faltas por meio da monitoração da assinatura magnética da máquina é tratada, em diversas pesquisas, em condições experimentais com o GS operando isolado e por meio de comparações pontuais entre espectros

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

de frequências de sinais medidos com o GS operando em uma mesma condição de operação [6]. Embora estes estudos sejam válidos para a condição de operação isolada, esta estratégia de avaliação não é adequada para a monitoração de GSs que operam conectados em sincronismo com sistemas elétricos. Nesta condição de operação em sincronismo as grandezas elétricas e magnéticas da máquina estão em constante alteração em virtude das alterações de demanda de carga do sistema. Com isso, as alterações da assinatura magnética podem estar associadas com as variações do ponto de operação da máquina, o que pode gerar falsos alarmes em sistemas de detecção de faltas.

Trabalhos recentes já indicam a necessidade de monitorar a assinatura magnética da máquina de maneira continua ao longo da operação do GS [11], [13] e indicam também a necessidade de executar os processos de detecção de faltas em condições de operação próximas às condições de regime permanente [12]. Contudo, não há relatos na literatura sobre investigações que comparem as alterações da assinatura magnética decorrentes de faltas incipientes com as alterações desta assinatura provocadas por variações do ponto de operação da máquina.

Neste contexto, este artigo apresenta uma avaliação experimental realizada em um GS de 10 kVA operando em sincronismo com o sistema elétrico brasileiro, na qual o GS é submetido tanto a variações de operação quanto a imposição controlada de diferentes tipos de faltas incipientes. Nesta avaliação, a assinatura magnética do GS é monitorada por meio de medições do campo magnético externo e suas características são comparadas em diferentes condições de teste. O objetivo desta avaliação é demonstrar teórica e experimentalmente a influência da ocorrência de faltas incipientes e de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética da máquina, comparando as amplitudes de variação observadas em cada cenário. Este artigo tem como contribuição a apresentação desta avaliação experimental, ainda não relatada na literatura, e a demonstração da necessidade de considerar as influências das variações de operação da máquina nos processos de detecção de faltas em GS.

II. Metodologia de Monitoração do Campo Magnético Externo

Nesta seção são apresentadas a estratégia de monitoração contínua da assinatura magnética, a arquitetura do sistema de monitoração do campo magnético externo e o processamento dos sinais medidos para extração desta assinatura. Além disso, é apresentado um método para detecção de alterações na assinatura magnética ao longo da operação da máquina, o qual é utilizado nos processos de detecção de faltas.

A. Monitoração da assinatura magnética continuada

A assinatura magnética do GS é extraída do espectro de frequências de medições do campo magnético da máquina e é definida como o padrão de amplitudes da frequência de rotação mecânica da máquina (f_m) e de suas harmônicas, dadas por kf_e/p, onde f_e é a frequência fundamental elétrica, p é o número de pares de polos e k é a ordem da componente harmônica. A existência destas componentes espectrais se deve às pequenas assimetrias magnéticas entre os polos de máquinas reais [14]. Na metodologia empregada neste artigo, a assinatura magnética do GS é obtida por meio da medição da derivada temporal do campo magnético externo por meio de sensores de campo magnético por indução. Este sinal apresenta as mesmas características do campo magnético disperso e tem como vantagem a amplificação natural de componentes espectrais de alta frequência, que são úteis para a detecção de alguns tipos de faltas incipientes [8], [14]. A Fig. 1 mostra o espectro de frequências de uma medição da derivada temporal do campo magnético externo em um GS de 10 kVA com 8 polos salientes. Pode-se observar a presença da frequência de rotação mecânica (f_m), que corresponde a frequência de 15 Hz para o GS de 8 polos operando em 60 Hz, e de algumas de suas componentes harmônicas.

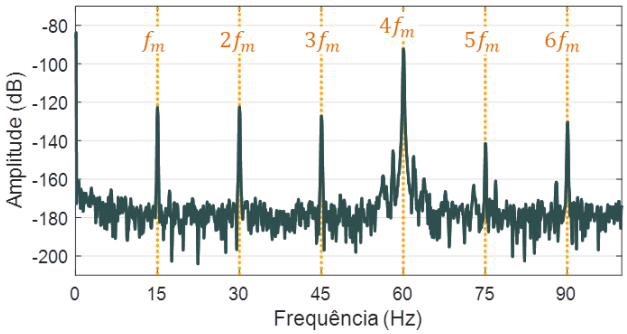


Fig. 1. Espectro de frequências da derivada temporal do campo magnético externo em um GS de 10 kVA e 8 polos.

A monitoração periódica da assinatura magnética ao longo do tempo pode ser realizada por meio da análise da assinatura magnética continuada do GS [12], obtida por meio do armazenamento periódico da amplitude de cada componente harmônica da f_m em uma série temporal. Cada uma destas séries representam o histórico de amplitudes de uma componente espectral ao longo do tempo, o que facilita a detecção de anomalias. A Fig. 2 apresenta as séries temporais com as amplitudes da f_m do GS de 10 kVA (15 Hz) e de 3 de suas harmônicas (30 Hz, 45 Hz e 60 Hz), representando a amplitude destas componentes ao longo de 25 medições da derivada do campo magnético externo realizadas periodicamente ao longo do tempo. Observa-se na Fig. 2 que, com a máquina operando com o ponto de operação aproximadamente constante, a assinatura magnética continuada do GS é formada por séries temporais em condição estacionária.

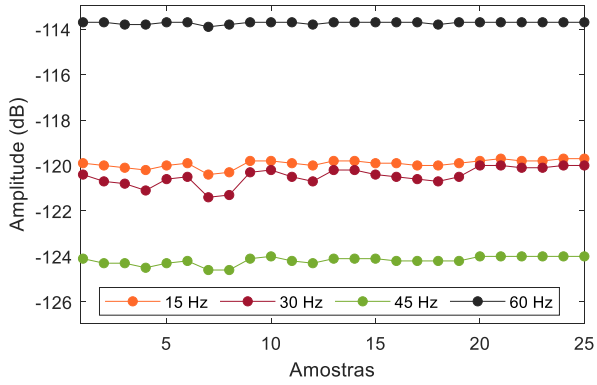


Fig. 2. Histórico de amplitudes da f_m e de três de suas harmônicas para medições realizadas no GS de 10 kVA e 8 polos.

A monitoração da assinatura magnética continuada é vantajosa pois: i) possibilita maior facilidade na detecção de alterações, já que podem ser utilizadas técnicas de detecção de anomalias já consolidadas para a manipulação de séries temporais; ii), diminui a quantidade de dados armazenados para monitoração periódica da máquina, uma vez que são

armazenados apenas a amplitudes das componentes espectrais de interesse para a monitoração da condição da máquina, não sendo necessário o armazenamento de todos os pontos do espectro de frequências computado para cada medição; iii) facilita a análise de correlação com o ponto de operação da máquina, uma vez que as grandezas elétricas podem facilmente ser medidas e armazenadas também no formato de séries temporais.

B. *Arquitetura do sistema de monitoração*

A arquitetura do sistema de monitoração GS por meio do campo magnético externo é apresentada na Fig. 3. O sensor de campo magnético empregado para a obtenção da assinatura magnética do GS é o sensor de campo por indução. A saída deste sensor é um sinal de tensão *v(t)* proporcional à derivada temporal do campo magnético externo *dH(t)/dt*, à permeabilidade magnética do ar (μ_0), ao número de espiras da bobina (*N*) e à seção *S* do sensor.

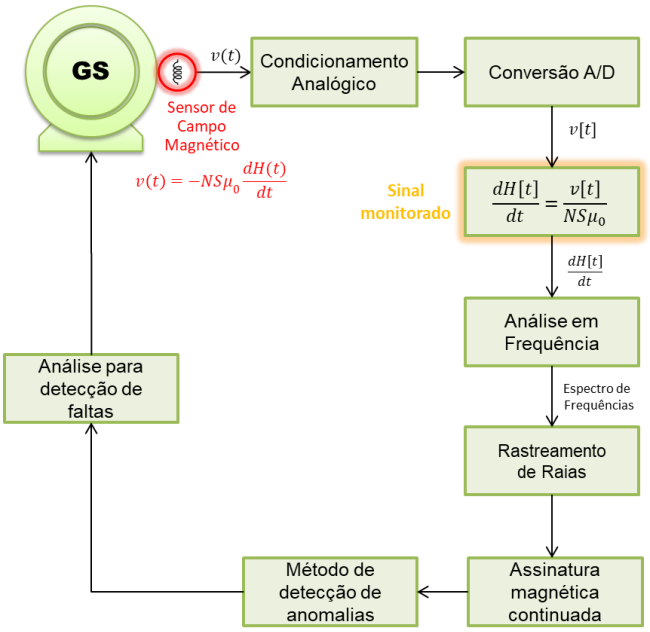


Fig. 3. Arquitetura do sistema de monitoração do campo magnético externo em GSs.

A baixa amplitude do campo magnético disperso concatenado pela seção do sensor induz uma tensão com amplitude também reduzida, que pode variar em escalas de milivolts ou até microvolts, dependendo da potência do GS, da espessura da carcaça e da posição do sensor. Isso implica na necessidade de uma etapa de condicionamento analógico deste sinal, composta por estágios de amplificação e filtragem para garantir boa relação sinal/ruído e elevar a amplitude do sinal para a etapa de conversão analógico/digital (A/D), propiciando uma melhor resposta para o sinal coletado. Após a etapa de conversão A/D, o sinal *dH(t)/dt* é obtido pela divisão do sinal de tensão digitalizado *v[t]* por uma constante ($NS\mu_0$), a qual dependente das características do sensor empregado [8], [12], [14].

O processamento do sinal medido é realizado por meio do cômputo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal *dH(t)/dt* para a obtenção do seu espectro de frequências. A identificação da assinatura magnética é realizada por meio de uma etapa de rastreamento das raias espectrais de interesse, dadas por kf_e/p. A amplitude das componentes harmônicas da f_m são armazenadas periodicamente para análise posterior, formando séries temporais com o histórico de amplitude para cada frequência monitorada. A assinatura magnética continuada é avaliada periodicamente em busca de anomalias que possam estar associadas com a ocorrência de alterações no circuito eletromagnético da máquina. A análise destas anomalias pode proporcionar a detecção de faltas incipientes e então direcionar a equipe de manutenção da usina na programação das ações de manutenção.

C. *Detecção de alterações na assinatura magnética continuada*

As alterações dos padrões de amplitudes da assinatura magnética continuada podem ser detectadas com o uso de técnicas de detecção de anomalias em séries temporais. Uma estratégia de simples implementação computacional é a utilização da técnica de gráficos de controle Shewhart [11]-[12], que avaliam o comportamento da amplitude de cada componente harmônica monitorada dentro de uma região de controle. Esta região é definida por limites de controle especificados na faixa definida por $\mu \pm k\sigma$, onde *k* é a distância dos limites de controle com relação a média central, μ é a média e σ é o desvio padrão de uma região de referência da série temporal onde a máquina é considerada sadia. A violação de um destes limites de controle possibilita a detecção automática de uma anormalidade e a geração de alertas de eventos para auxiliar as equipes de manutenção.

A Fig. 4 apresenta um exemplo de detecção de alteração na assinatura magnética continuada por meio da aplicação de gráficos de controle Shewhart com limites 3σ em uma série temporal com o histórico de amplitudes da 27ª componente harmônica da f_m em medições realizadas no GS de 10 kVA. Neste experimento, o GS operou na condição sadia no período que compreende as primeiras 18 medições. Após a medida 19 ocorreu a imposição controlada de uma falta de retirada de espiras de um polo de uma fase do estator. Observa-se que ocorre a alteração do padrão de amplitudes desta componente espectral, violando um dos limites de controle e permitindo a detecção automática da falta, como indicado na Fig. 4. Neste experimento a máquina operou próxima a condição de regime, de maneira que as alterações na assinatura magnética continuada possam ser associadas com a ocorrência da falta incipiente, a qual foi imposta com o GS em operação.

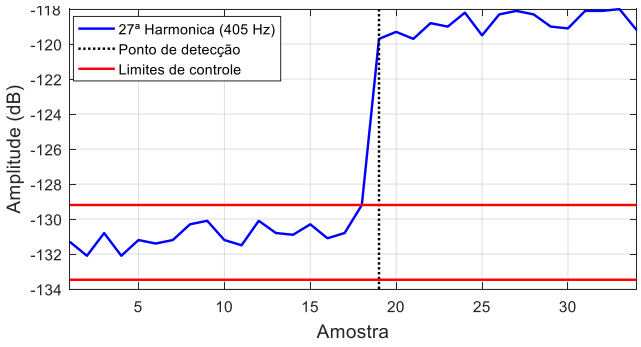


Fig. 4. Detecção de alteração em uma série temporal com o histórico de amplitudes de uma componente harmonica da f_m obtido no GS de 8 polos .

III. Alterações da Assinatura Magnética do GS

O campo magnético externo medido para monitorar a assinatura magnética do GS é uma imagem do campo magnético interno, atenuado pelo núcleo do estator e pela carcaça. O campo magnético interno do GS é resultante das interações entre os campos magnéticos gerados pelas

correntes elétricas dos enrolamentos do rotor, do estator, dos enrolamentos amortecedores presentes no rotor e, em uma escala menor, por correntes parasitas estabelecidas no núcleo do estator e do rotor. Com isso, quaisquer alterações nas características do campo magnético interno causam alterações no campo magnético disperso da máquina, causando alterações em sua assinatura magnética.

As alterações na assinatura magnética da máquina podem estar associadas tanto à ocorrência de faltas incipientes, que alteram o circuito eletromagnético da máquina, quanto às variações do ponto de operação do GS que ocorrem constantemente pela ação dos controles de frequência e tensão do GS em operação sincronizada. A Fig. 5 apresenta um fluxograma mostrando as possíveis causas de alterações na assinatura magnética continuada do GS.

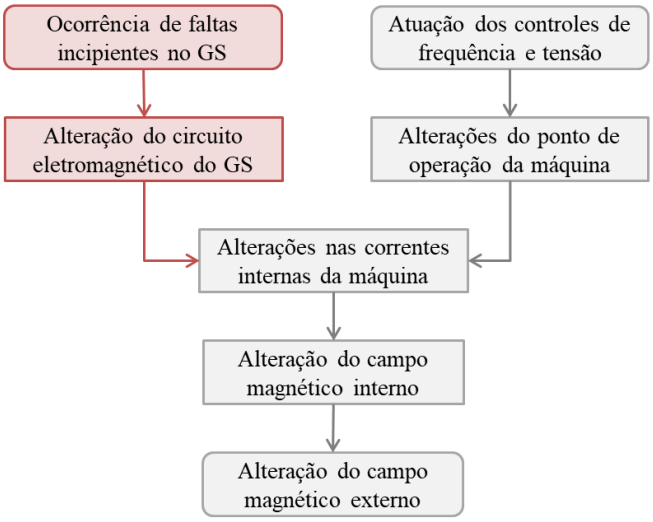


Fig. 5. Causas de alterações na assinatura magnética do GS.

Tanto as alterações do circuito eletromagnético da máquina quanto as alterações de seu ponto de operação provocam alterações nas correntes internas, alterando o campo magnético interno e consequentemente, o campo magnético externo disperso através da carcaça.

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

De maneira geral, a aplicação de GSs em plantas de geração de energia elétrica conectadas de maneira sincronizada a sistemas elétricos de potência é muito mais significativa do que a aplicação de GSs em sistemas isolados. No modo de operação sincronizado, as variações do ponto de operação dos GSs são frequentes e estão associadas ao impacto de mudanças de carga e aos controles executados para garantir o fornecimento de potência, mantendo requisitos básicos de tensão e frequência nominais exigidos pelo sistema. Em outras palavras, as variações do ponto de operação do GS prestam-se a garantir o equilíbrio carga-geração, necessário para manter o fornecimento de energia para a carga em condições adequadas e para manter a estabilidade do sistema elétrico [17].

Com o GS operando sincronizado com um grande sistema de potência, a tensão terminal e a frequência de operação são regidas pelo próprio sistema no ponto de conexão. A frequência de operação do GS é mantida estreitamente próxima ao valor nominal, garantindo o sincronismo com a frequência do sistema. Neste caso, o controle de velocidade mecânica de rotação (η), denominado também de controle da máquina primária ou controle de frequência, tem como função assegurar o despacho de potência ativa (P) ao sistema. Por outro lado, a tensão terminal do GS sofre pequenas variações em torno de seu valor nominal com o objetivo de fornecer ou consumir potência reativa, para colaborar na manutenção dos níveis de tensão do sistema. Neste caso, a alteração da corrente de campo (I_f) do GS controla o fluxo de potência reativa (Q) da máquina de acordo com as necessidades do sistema ao qual o GS está conectado [17]. Como as cargas de um sistema de potência estão em constante mudança, as alterações de despacho de potências ativa e reativa são frequentes ao longo da operação do GS. Neste contexto, pode-se dividir a atuação dos controles do GS em dois segmentos: i) o controle de frequência, associado ao despacho de P e ii) o controle de tensão, associado ao despacho de Q. A Fig. 6 ilustra a atuação destes dois sistemas de controle e sua influência sobre a assinatura magnética do GS.

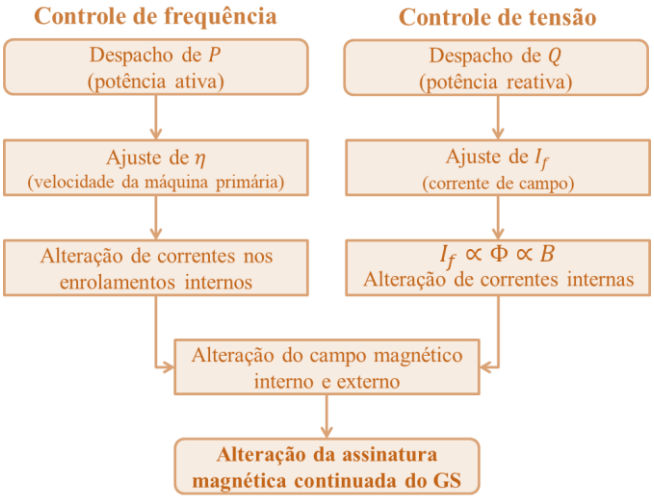


Fig. 6. Atuação dos controles de frequência e tensão do GS e sua influência sobre a assinatura magnética continuada da máquina.

As alterações de despacho de P, realizadas pelo ajuste de velocidade da máquina primária (η), têm como reflexo a alteração de correntes nos enrolamentos internos da máquina, alterando o campo magnético interno estabelecido e também o campo magnético externo. As alterações de despacho de Q, realizadas por meio do ajuste de I_f, alteram a tensão interna induzida (E_a) e o fluxo magnético no entreferro, alterando a indução magnética (B) e os campos magnéticos interno e externo. Com isso, para quaisquer alterações dos controles de frequência e tensão que atuam sobre os geradores sincronizados, têm-se alterações na assinatura magnética continuada, cuja amplitude irá depender, principalmente, da amplitude de variação do ponto de operação.

Estas alterações de operação da máquina, que são normais durante o modo de operação sincronizado, estarão sempre presentes e tem potencial para gerar falsos positivos em processos de detecção de faltas, nos quais a falta é detectada a partir de alterações na assinatura magnética continuada da máquina.

B. Alterações da assinatura magnética com a ocorrência de faltas incipinetes

O campo magnético interno e o campo magnético disperso são dependentes tanto das correntes internas da

máquina quanto do circuito eletromagnético da máquina por onde circulam tais correntes. Desta maneira, alterações na máquina que impliquem em alterações deste circuito eletromagnético, como as alterações causadas pela ocorrência de faltas incipientes ou estabelecidas, irão modificar a assinatura magnética da máquina. Como exemplo, faltas de curto-circuito entre espiras, do estator ou rotor, ou curto-circuito entre chapas do núcleo estatórico geram novos laços de correntes, ou alteram os já existentes, modificando o campo magnético nestas regiões. Da mesma maneira, faltas de origem mecânica como o desbalanceamento, estático e dinâmico, alteram a configuração do circuito magnético da máquina, alterando a configuração do campo magnético estabelecido e, consequentemente, a assinatura magnética da máquina.

Neste contexto, a detecção de faltas a partir da assinatura magnética apresenta como dificuldade o fato de as alterações detectadas nas séries temporais que compõe a assinatura magnética continuada poderem ser originadas tanto pela ocorrência de faltas incipientes quanto pelas alterações do ponto de operação. A Fig. 7 apresenta as séries temporais com o histórico de amplitudes da f_m de um GS de 8 polos em duas situações distintas. Na Fig. 7 (a) o GS inicialmente opera em uma condição de operação próxima à condição de regime e é submetido a uma variação de aproximadamente 25% de sua potência aparente, provocando uma alteração no padrão de amplitudes da f_m. Por outro lado, na Fig. 7 (b) o GS opera em uma condição próxima à de regime e é imposta uma falta de retirada de espiras de um polo do rotor, causando também alterações na assinatura magnética da máquina, que são observadas na série com o histórico de amplitudes.

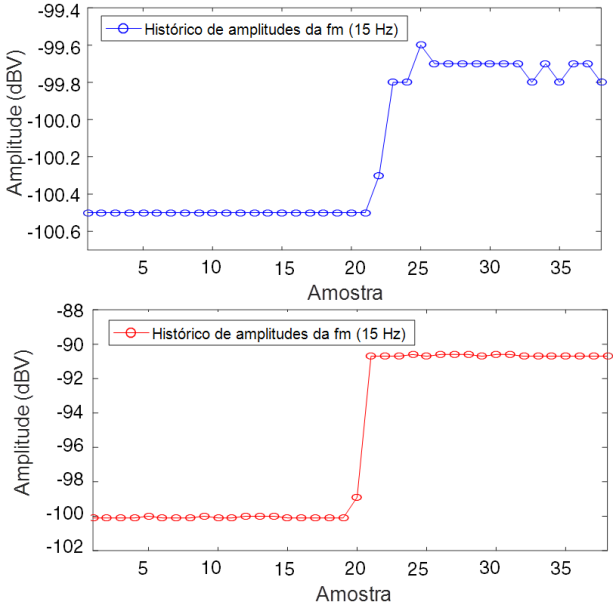


Fig. 7. Série temporal com o histórico de amplitudes da f_m em um GS de 8 polos diante de: (a) uma variação de 25% do seu carregamento e (b) uma falta de retirada de espiras do rotor com o GS operando em condição próxima a de regime permanente.

Observa-se que, nestas duas condições, os padrões de variação de amplitudes desta componente espectral são similares, apenas com diferenças na amplitude de variação. Com isso, torna-se evidente que a classificação das alterações detectadas nestas séries é necessária para evitar falsos alarmes nos sistemas de monitoração da condição da máquina e detecção de faltas. Na literatura não são encontrados relatos ou métricas que comparem as características das alterações observadas na assinatura magnética devido à ocorrência de faltas incipientes e devido à influência das variações do ponto de operação, de maneira que a classificação das alterações detectadas se torna uma tarefa dependente de análises adicionais junto com o histórico de medições de grandezas elétricas da máquina. Diante disso, a seção seguinte busca apresentar uma análise experimental onde são avaliadas as amplitudes de alterações detectadas na assinatura magnética diante de variações do ponto de operação e da imposição controlada de diferentes tipos de faltas incipientes.

IV. Avaliação Experimental e Resultados

A avaliação experimental é realizada por meio da medição do campo magnético externo em um GS de 10 kVA em duas categorias de ensaios: i) ensaios com imposição controlada de faltas mantendo o ponto de operação aproximadamente constante, e ii) ensaios com o GS na condição sadia, impondo variações no seu ponto de operação. A partir destas medidas, é extraída a assinatura magnética continuada do GS e é realizado o processo de detecção de alterações para verificar quais componentes espectrais monitoradas são sensibilizadas em cada ensaio. Na sequência, são comparadas as amplitudes de alteração observadas e detectadas em cada categoria de ensaio.

A. Bancada experimental e equipamento para monitoração do campo magnético externo

A bancada experimental utilizada é composta por um GS de 10 kVA e 8 polos (salientes), a qual é apresentada na Fig. 8. Este GS tem como máquina primária um motor de corrente contínua e é parte de uma bancada de ensaios customizada que permite a imposição controlada de diferentes tipos de faltas tanto de estator quanto de rotor. Esta bancada experimental conta com um sincronoscópio que permite operar o GS em sincronismo com a rede elétrica, aproximando suas características de operação com a dos GSs operando em plantas de geração de energia elétrica.

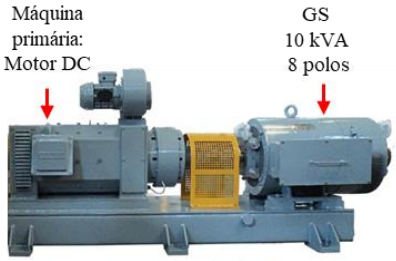


Fig. 8. Bancada experiemental utilizada para avalação do compostamento da assinatura magnética do GS em diferentes condições.

Este GS foi projetado com conexões internas, tap's, que permitem a imposição de faltas de curto-circuito ou a retirada de espiras de um polo do estator ou do rotor. Além disso, a imposição de falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator é possível por meio de um tap que chaveia uma espira curto-circuitada que enlaça uma seção do pacote estatórico. Estas faltas podem ser impostas de maneira online, ou seja, com o gerador síncrono em operação, por meio de um dispositivo projetado para realizar o fechamento e abertura destes tap's por meio de comandos do operador. Esta estratégia possibilita a obtenção de históricos de amplitude de forma contínua, sem a necessidade de parada

da máquina, permitindo a avaliação exclusiva do efeito da falta sobre a assinatura magnética da máquina.

O equipamento para monitoração do campo magnético externo empregado para realizar as medições segue a arquitetura apresentada na Fig. 3 [8], [11] e foi programado para realizar aquisições do sinal dos sensores de campo magnético durante 10 segundos com uma frequência de amostragem de 10 kHz. Esta configuração resulta em vetores de tensão amostrados de 100000 pontos com período entre amostras de 100 µs. A análise em frequência do sinal resultante fornece um espectro de frequências com resolução espectral (*df*) de 0,1 Hz, adequada para a execução do processo de rastreamento de raias neste GS. O equipamento conta com um software desenvolvido na plataforma LabVIEW, da National Instruments, que processa o sinal digitalizado, computando a FFT, executando o processo de rastreamento de raias e armazenando os dados em arquivos com o histórico de amplitudes na forma de séries temporais. Para o desenvolvimento da avaliação das influências de variações do ponto de operação, este equipamento foi integrado com um analisador de energia, permitindo o armazenamento de variáveis elétricas de maneira sincronizada com a assinatura magnética continuada.

B. *Avaliação de ensaios com imposição controlada de faltas*

A avaliação da influência da imposição de faltas sobre a assinatura magnética do GS foi realizada por meio da análise de um conjunto composto por 117 ensaios realizados em condições de operação distintas. Nestes ensaios foram realizadas a imposição e a retirada de faltas de maneira *online*, mantendo o ponto de operação aproximadamente constante em cada ensaio para garantir que as variações detectadas na assinatura magnética continuada sejam alterações provocadas pela falta imposta. A Fig. 9 mostra a alteração do histórico de amplitudes da componente harmônica de 3ª ordem da f_m em um sensor, sensibilizada por uma falta de retirada de espiras de um polo do rotor. Nota-se que a imposição da falta faz a amplitude desta componente harmônica aumentar consideravelmente em relação a sua condição inicial (máquina sadia). Além disso, após a remoção da falta, observa-se que a amplitude volta ao nível observado para a máquina em condição sadia.

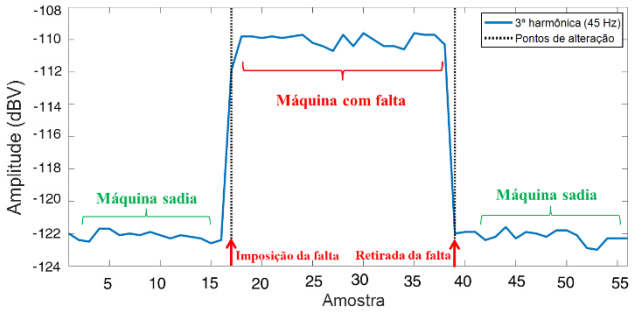


Fig. 9. Alteração do histórico de amplitudes da componete espectral de 45 Hz diante da imposição e da retirada de uma falta.

Nesta análise foram avaliadas 6 faltas distintas: i) curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator; ii) curto-circuito entre espiras da fase A do estator (16,7% das espiras de um polo); iii) curto-circuito entre espiras da fase C do estator (16,7% das espiras de um polo); iv) retirada de espiras da fase A do estator (16,7% das espiras de um polo); v) retirada de espiras da fase B do estator (50% das espiras de um polo); vi) retirada de espiras de um polo do rotor (20% das espiras de um polo). Cada um dos ensaios foi realizado em uma condição operativa diferente, com valores distintos de potência ativa, potência reativa e fator de potência, para avaliar as alterações da assinatura magnética provocadas pela falta em diferentes condições de carregamento. A monitoração foi realizada por meio de três sensores de campo por indução, posicionados ao redor da carcaça no ponto médio da largura do pacote estatórico, com o objetivo de detectar, preferencialmente, o campo magnético disperso através da carcaça. As aquisições foram realizadas a cada 22 segundos, salvando 405 séries temporais para cada ensaio, o que corresponde a monitoração da amplitude de 135 componentes espectrais múltiplas da f_m em cada um dos sensores utilizados.

A detecção de alterações de amplitude em cada série foi realizada por meio da técnica de gráficos de controle Shewhart com limites de controle de 3σ para a detecção tanto da imposição quanto da retirada da falta. Com este procedimento, foi possível detectar as faltas impostas em cada um dos 117 ensaios realizados. As séries detectadas com alteração em cada ensaio apresentam amplitudes médias distintas entre si e as proporções de alteração de amplitude entre as séries sensibilizadas pela falta também são diferentes entre si, o que dificulta a comparação. Para contornar esse problema, empregou-se um coeficiente normalizado que caracteriza o percentual de variação (*PV*) de amplitude entre a condição com falta e a condição de máquina sadia. Este coeficiente pode ser definido por (1), onde $A_{\mu f}$ é a média de amplitudes no período que a máquina operou com a falta e $A_{\mu s}$ é a média de amplitudes nos períodos em que a máquina operou na condição sadia. Este coeficiente indica, de maneira percentual, a taxa de variação de amplitude provocada pela falta, com relação à sua condição inicial (máquina sadia), para cada série com alteração de amplitude detectada.

$$PV = \left(1 - \frac{A_{\mu f}}{A_{\mu s}}\right).100 \qquad (1)$$

A Tabela I apresenta as faltas avaliadas, o número de ensaios realizados com cada tipo de falta (cada ensaio em uma condição de operação distinta) e os percentuais de variação mínimo e máximo obtidos a partir das séries detectadas com alteração de amplitude.

TABELA I. PERCENTUAIS DE VARIAÇÃO DE AMPLITUDE MÍNIMO E MÁXIMO OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS PARA CADA TIPO DE FALTA.

Tipo de falta	**Nº de ensaios**	$PV_{mínimo}$	$PV_{máximo}$
Curto-circuito entre lâminas do núcleo	24	0,41%	11,66%
Curto-circuito entre espiras da fase A do estator	25	0,22%	12,19%
Curto-circuito entre espiras da fase C do estator	17	0,27%	10,12%
Retirada de espiras da fase A do estator	17	0,16%	11,86%
Retirada de espiras da fase B do estator	9	0,20%	11,49%
Retirada de espiras de um polo do rotor	25	0,84%	13,50%
Faixa de variação de amplitude:		**0,16%**	**13,50%**

Observa-se que os valores mínimo e máximo do indicador *PV* para as séries detectadas com alteração de amplitude são próximos entre as diferentes faltas avaliadas. Para este conjunto de ensaios foram detectadas séries com

percentual de variação de amplitude de até 13,50% com relação a sua amplitude inicial.

C. *Avaliação de ensaios com a imposição de variações no ponto de operação do GS*

Esta avaliação foi realizada por meio de medições do campo magnético externo e das potências geradas no GS de 10 kVA operando em sincronismo com a rede elétrica. Os ensaios foram realizados apenas com variações de *P* e/ou *Q* do GS, sem realizar a imposição de faltas, com o objetivo de avaliar o impacto das variações das grandezas elétricas sobre a assinatura magnética continuada da máquina. Na realização de cada ensaio, duas alterações de carregamento foram realizadas a partir de uma condição inicial, com o objetivo de criar três regiões de operação com despacho de potência distinto e aproximadamente constante, como apresentado na Tabela II. O carregamento (potência aparente gerada) é apresentado em valor percentual com relação à potência nominal do GS (10 kVA).

TABELA II. ENSAIOS COM VARIAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO.

Ensaio	Característica	Carregamento		
		Região 1	Região 2	Região 3
1	Alteração de P e Q	13%	37%	62%
2	Alteração de Q com P =5 kW (GS subexcitado)	58%	71%	85%
3	Alteração de Q com P =1 kW (GS sobrexcitado)	22%	32%	51%
4	Alteração de Q com P =1 kW (GS subexcitado)	14%	32%	53%

A Fig. 10 apresenta as curvas de despacho de potência obtidas no ensaio 1 com o percentual de carregamento em cada região de operação, assim como a evolução da amplitude da 4ª componente harmônica da f_m, que é sensibilizada pelas variações de operação impostas.

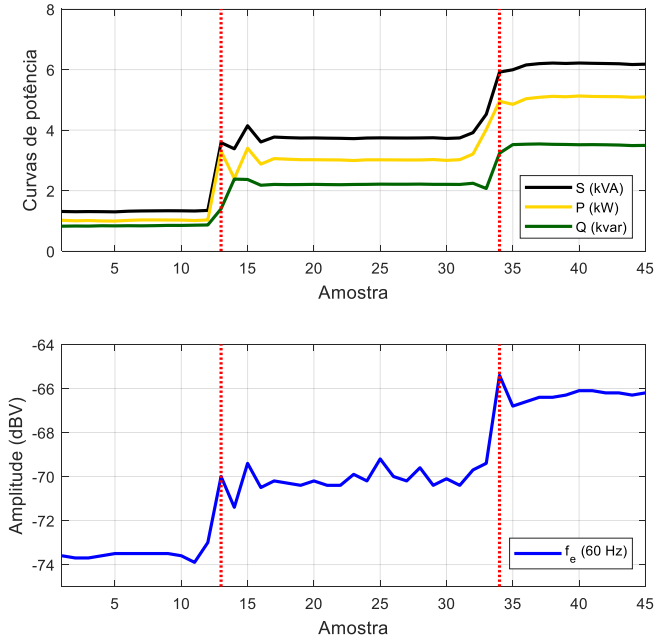


Fig. 10. Séries com as medidas de potências no ensaio 1 e o histórico de amplitudes da 4ª harmônica da f_m obtido em um dos sensores.

As medições do campo magnético externo foram realizadas de maneira análoga as medições realizadas para os ensaios com imposição de faltas, onde forma utilizados três sensores de campo magnético por indução realizando medições a cada 22 segundos e monitorando 135 componentes harmônicas da f_m em cada sensor, resultando em uma assinatura magnética continuada composta por 135 séries de amplitudes. A detecção de alterações de amplitude em cada série foi realizada por meio da técnica de gráficos de controle Shewhart com limites de controle de 3σ para a detecção de cada alteração presente nas séries de amplitude correspondentes, neste caso, as alterações do ponto de operação. Os resultados do método de detecção de alterações permitiram a detecção de alterações na assinatura magnética da máquina nas duas variações do carregamento da máquina impostas em cada ensaio.

As variações no ponto de operação o percentual de variação de amplitude (*PV*), definido por (1), foi obtido relacionando a média de amplitude nas regiões 2 e 3 ($A_{\mu r2}$ e $A_{\mu r3}$), da série detectada com alteração, com a média de amplitudes da região 1 ($A_{\mu r1}$), utilizada como referência. A Tabela III apresenta os percentuais de variação mínimo e máximo obtidos entre as séries detectadas com alteração para os ensaios realizados, tanto relacionando a região 2 com a região 1 ($A_{\mu r2}/A\mu_{r1}$) quanto relacionando as médias de amplitude da região 3 com relação à região 1 ($A_{\mu r3}/A\mu_{r1}$).

TABELA III. PERCENTUAIS DE VARIAÇÃO DE AMPLITUDE MÍNIMO E MÁXIMO OBTIDOS NOS ENSAIOS COM VARIAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO.

Ensaio	Taxa de variação avaliada	Variação de amplitude	
		$PV_{mínimo}$	$PV_{máximo}$
1	$A_{\mu r2}/A_{\mu r1}$	0,22%	9,97%
	$A_{\mu r3}/A_{\mu r1}$	0,72%	15,70%
2	$A_{\mu r2}/A_{\mu r1}$	0,18%	8,73%
	$A_{\mu r3}/A_{\mu r1}$	0,28%	22,20%
3	$A_{\mu r2}/A_{\mu r1}$	0,11%	5,88%
	$A_{\mu r3}/A_{\mu r1}$	0,39%	13,70%
4	$A_{\mu r2}/A_{\mu r1}$	0,29%	9,64%
	$A_{\mu r3}/A_{\mu r1}$	1,07 %	14,88%
Faixa de variação de amplitude		**0,11%**	**22,20 %**

Observa-se que o percentual de variação de amplitude das séries detectadas com alteração variou de 0,11% até 22,20%. Além disso, os percentuais de variação de amplitude aumentaram com o aumento da variação de amplitude, ou seja, a relação $A_{\mu r3}/A\mu_{r1}$ apresentou valores mais elevados do indicador *PV* do que a relação $A_{\mu r2}/A\mu_{r1}$. Isso demonstra que a amplitude das componentes espectrais sensibilizadas pela variação do ponto de operação aumenta, em módulo, à medida que o carregamento da máquina aumenta. Esta característica é esperada em virtude da associação entre as grandezas elétricas e magnéticas do GS e mostra que determinadas séries de amplitudes da assinatura magnética continuada são fortemente sensibilizadas pelas variações das potências geradas.

D. *Comparação entre as alterações detectadas na assinatura magnética*

A avaliação de ensaios com imposição controlada de diferentes tipos de faltas revelou alterações na assinatura magnética continuada com percentuais de variação na faixa $0{,}16\% \leq PV \leq 13{,}50\%$. Por outro lado, os ensaios avaliados com o GS na condição sadia e com variações no seu ponto de operação apresentaram alterações na assinatura magnética

continuada com percentuais de variação na faixa $0{,}11\% \leq PV \leq 22{,}20\%$. Comparando as faixas de variação do indicador PV nos dois grupos de ensaios avaliados, conclui-se que as variações do ponto de operação apresentaram maior influência na alteração da assinatura magnética continuada do GS, em comparação com a imposição das faltas. Este resultado comprova o fato de que tanto a ocorrência de faltas incipientes quanto as variações do ponto de operação da máquina podem provocar alterações de mesma ordem na amplitude na assinatura magnética continuada do GS, dificultando a diferenciação entre estes dois tipos de eventos. Embora a avaliação experimental aqui apresentada seja realizada em um GS síncrono em particular e com um número limitado de condições de operação e graus de severidade de faltas, as conclusões obtidas podem ser estendidas para outros GSs em operação sincronizada, uma vez que é ampla a faixa de variação de amplitudes das séries detectadas com alteração.

V. Conclusões

A partir da avaliação experimental apresentada neste artigo, foi comprovada a forte sensibilidade da assinatura magnética continuada tanto em eventos onde se tem a ocorrência de faltas incipientes quanto em eventos onde ocorrem variações do ponto de operação. Além disso, constatou-se que as variações de amplitude das componentes espectrais múltiplas da f_m ocorrem na mesma faixa de amplitude em ambos os eventos avaliados, embora as variações do ponto de operação poderem apresentar variações de amplitude superiores em comparação com as alterações de amplitude ocasionadas pela ocorrência de faltas incipientes. Este fato demostra a dificuldade de classificação dos eventos causadores de alteração da assinatura magnética continuada do GS em operação sincronizada, necessária para os processos de detecção de faltas. Neste contexto, pode-se inferir que o processo de detecção de faltas em GSs em operação sincronizada por meio da monitoração de sua assinatura magnética deve ser realizado em condições de operação com pequenas perturbações, próxima à condição de regime permanente, ou em faixas específicas de potências geradas. Nestas condições, a influência de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética continuada do GS é limitada, de maneira que as alterações observadas possam ser associadas com maior assertividade com a ocorrência de uma falta incipiente, evitando a ocorrência de falsos alarmes e aumentando a confiabilidade do sistema de monitoração.

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] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Woburn: Elsevier, 2002.

[2] F. S. Fogliato e J. L. D. Ribeiro, *Confiabilidade e Manutenção Industrial*, Rio de Janeiro: LTC, 2011.

[3] IEEE Std 1129-1992, “*IEEE Recommended Practice for Monitoring and Instrumentation of Turbine Generators*.” 1992.

[4] 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.

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

[6] E. Mazaheri-Tehrani e J. Faiz, “Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis of electrical machines: An overview,” *IET Electric Power Appl.*, vol. 16, pp. 277–299, Mar. 2022, doi: 10.1049/elp2.12157.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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*, Atenas, Grécia: IEEE, Abr. 2019, pp. 181–187, doi: 10.1109/WEMDCD.2019.8887805.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] R. Pusca *et al.*, “Procedure for Detection of Stator Inter-Turn Short Circuit in AC Machines Measuring the External Magnetic Field,” *Energies*, vol. 14, p. 1132, fev. 2021, doi: 10.3390/en14041132.

[16] M. Irhoumah *et al.*, “Detection of the Stator Winding Inter-Turn Faults in Asynchronous and Synchronous Machines Through the Correlation Between Harmonics of the Voltage of Two Magnetic Flux Sensors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, pp. 2682–2689, Mai 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2899560.

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