



Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

Emprego de Nova Técnica na Detecção de Falta Incipiente em Gerador Síncrono através do Campo Magnético Externado

LUCIANO MENDES DE FREITAS(1); LIAN KOBARG CERCAL ROGÉRIO GOMES(2); NELSON JHOE BATISTELA(3); RODRIGO DA SILVA SOUZA(4); NELSON SADOWSKI(3); HELTON FERNANDO DOS SANTOS(3); RUBENS JOSÉ NASCIMENTO(5); ARTHUR HENRIQUE MUNARETTI(6); ENGIE(1); ENGIE(2); UFSC(3); ENGIE(4); ENGIE(5); ENGIE(6);

RESUMO

Este Informe Técnico apresenta e discute uma aplicação do aparelho MagAnalyzer em desenvolvimento para detectar faltas incipientes em máquinas elétricas síncronas, de qualquer potência e número de polos, tendo como grandeza mensurada formas de onda da derivada temporal do campo magnético externo à máquina ou do campo magnético. A técnica e a metodologia envolvidas são sumariamente apresentadas. Relata-se o sucesso na detecção de uma falta incipiente, associado a resultado de análise por meio de vibração mecânica.

PALAVRAS-CHAVE

Campo Magnético Externo, Detecção de Faltas Incipientes, Geradores Síncronos, Vibração Mecânica.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em Geradores Síncronos (GSs), a energia magnética (convertida da mecânica e que resultará na elétrica no final do processo) envolvida na máquina está em sua grande parte concentrada na região do entreferro, e resulta da interação do campo magnético e da indução magnética. O campo magnético depende da carga conectada à máquina ou de defeitos elétricos (por exemplo em um curto-circuito de espiras, a corrente cresce consideravelmente, e conseqüentemente a intensidade de campo magnético). Assim, neste contexto, uma das grandezas mais importantes da máquina síncrona (MS) é o campo magnético, o qual pode ser também uma fonte de informação de alterações não desejáveis na máquina devido a faltas incipientes.

Comercialmente há poucos sistemas disponíveis de monitoramento da parte magnética de GSs. Um exemplo de um sistema comercial atual utilizado mundialmente em GSs é o RFAII Analyzer da empresa Iris Power, o qual monitora alterações de amplitudes do fluxo magnético proveniente dos enrolamentos de campo na região de entreferro da máquina [1]. Mesmo havendo algumas desvantagens, tal como a intervenção na instalação dos sensores no entreferro, seu desempenho na detecção de problemas nos enrolamentos do rotor é comprovado e de fácil análise. Outras técnicas propostas na literatura relatam sucesso na detecção de faltas, tais como *Electrical Signature Analyses* (ESA), realizada através da tensão e/ou corrente dos enrolamentos de campo e/ou do estator [2]-[7]. Na opção para métodos não invasivos que monitoram a parte magnética da máquina, não se conhece sistemas instalados de monitoramento do campo magnético externo de geradores síncronos. Além disso, geralmente a área de manutenção das plantas de geração de energia ainda não conhece a possibilidade de avaliação da máquina por meio deste método aqui tratado, até porque a análise é mais complexa do que a metodologia de [1]. Por outro lado, possibilita detectar maior quantidade de tipos de defeitos do que a de [1].

O estudo sobre o campo magnético externo à carcaça de máquinas girantes remonta aos anos 70. Os primeiros trabalhos relatam medições e simulações numéricas do comportamento do campo no entorno de máquinas [8]-[13]. Por facilidades de obtenção de informações devido à natureza da máquina elétrica girante, e possibilidade de comprovação através de análises de formas de onda da corrente de alimentação, o emprego do monitoramento do campo magnético externo teve maior evolução na aplicação da técnica em motores de

indução. Para os motores de indução, o emprego da técnica para a detecção de faltas provavelmente teve início nos trabalhos de [14]-[16]. Este método ganhou maior visibilidade na última década [20]-[29], o Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) da UFSC desenvolve pesquisa com esta técnica anteriormente ao ano de 2008 [17]. Enquanto que há muitos trabalhos de pesquisa e equipamentos para máquinas de indução, encontram-se poucos estudos sobre a detecção de faltas em MSs empregando o campo magnético externo. Um dos primeiros trabalhos [18] aponta a possibilidade de detectar faltas elétricas no estator e no rotor. Para faltas no enrolamento do estator, a referência [18] mostra teórica e experimentalmente que, com a inclusão do defeito, ocorrem alterações significativas das amplitudes da fundamental elétrica, da terceira harmônica e de duas frequências relacionadas à multiplicação da frequência da fundamental pelo número de ranhuras do estator, somando ou diminuindo a frequência fundamental elétrica. Analisando o resultado experimental deste defeito em [18], nota-se também que outras amplitudes de componentes de frequência também são alteradas, mas não exploradas em [18]. No outro tipo de defeito analisado em [18], um curto-circuito de 12,5% do enrolamento do rotor, o espectro experimental ficou mais denso, e aparece a raia com a frequência da fundamental elétrica dividida pelo número de pares de polos. Os autores apontam esta raia como a indicadora de falta no rotor. Posteriormente, publicaram o trabalho [19] comparando resultados obtidos com análises espectrais com medições do campo disperso e de vibração.

Há outro grupo de pesquisa que monitora o campo magnético externo. Inicialmente, apresentam um método alternativo para calcular o campo externo de motores de ímãs permanentes através de harmônicas esféricas associadas à expansão em séries de Fourier [20]. Com estas técnicas, o campo magnético externo é calculado em função do espaço que envolve a máquina. Harmônicas esféricas ou cilíndricas [21] são a base teórica aplicada na patente [22], a qual descreve um sistema e método para monitorar e diagnosticar máquinas elétricas por meio do campo ou indução magnética externa, empregando magnetômetros como sensores. O diagnóstico é realizado por meio da comparação de valores medidos de indução ou do campo magnético com valores esperados, em um ou mais pontos no entorno da máquina. O trabalho teórico [23] complementa [22], e a referência [24] apresenta um levantamento de opções para diagnóstico de aerogeradores. Empregando um sensor do tipo Fluxgate do fabricante Bartington Instruments, e operando a máquina em rotações abaixo da nominal a fim de evitar a atenuação do campo magnético externo pela carcaça, as referências [25] e [26] propõem um procedimento para detecção, localização e quantificação de faltas. O método se baseia na teoria de problemas inversos [26].

A referência [27] aprofundou as conclusões de [4] e [28], e mostrou que em máquinas reais, por pequenas assimetrias eletromecânicas, a frequência fundamental do campo magnético externo, ou no entreferro, naturalmente é a mecânica, e não a elétrica. Conforme [28], até sua publicação em 2008, a presença de componentes adicionais de frequências sub-harmônicas não tinha sido relatada amplamente, sendo candidatas para a detecção de falta no rotor. Porém, estas referências não evidenciam que, nos espectros de frequência da MS, a frequência fundamental é a mecânica, e não a elétrica.

A abordagem empregada aqui segue metodologias teóricas e experimentais um pouco diferentes daquelas dos trabalhos referenciados anteriormente, embora chegue praticamente às mesmas conclusões, e até esclarece alguns comportamentos observados e não explicados pelos trabalhos anteriores. Com a evolução da pesquisa apresentada em trabalhos prévios [27]-[30], juntamente com o desenvolvimento do projeto de P&D ANEEL PD-0403-0033/2012, resultou uma primeira versão do sistema MagAnalyzer, isto é, um equipamento para detecção de faltas incipientes em GSs através do campo magnético externado. Por meio de simulações por cálculo de elementos finitos (MEF) e em ensaios em laboratório, comprovou-se inicialmente que a técnica é eficaz na detecção de defeitos nos enrolamentos do rotor. Há uma nova abordagem teórica complementar que está atualmente em fase de conclusão, e será apresentada detalhadamente em trabalhos futuros. A solução inovadora de proposta no equipamento MagAnalyzer pode ser aplicada em MSs em geral. Futuramente, com alguma adaptação e desenvolvimento de pesquisa adicional, o sistema MagAnalyzer poderá ser instalado em aerogeradores síncronos e em aerogeradores assíncronos. Conforme o tipo de máquina, síncrona ou assíncrona, a metodologia de detecção de falta é diferente, o que exige softwares de análise distintos.

2.0 - PRIMEIRA VERSÃO DO APARELHO MAGANALYZER

Nesta seção, apresenta-se sumariamente uma descrição da primeira versão do aparelho MagAnalyzer instalado em um GS da Usina Hidrelétrica de Itá (UHIT- 1450 MW). Outro aparelho se encontra instalado em uma unidade geradora no Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda. O MagAnalyzer já foi tratado em trabalhos anteriores [28]-[30], e é reapresentado aqui acrescentando detalhes ou simplificando outros. O sistema de medição consiste basicamente de i) sensor de indução com núcleo de ar (preferencialmente), ii) circuitos eletrônicos de amplificação, filtragem e tratamento de sinais, iii) e sistema computacional para adquirir e analisar os dados presentes nas formas de onda medidas. O MagAnalyzer (vide Figura 1 e Figura 2) é subdividido em duas partes principais: Unidades de Monitoramento (UM) e Central de Processamento (CP). Adicionalmente no sistema, há uma Bobina de Rogowski para monitorar também formas de onda da derivada da corrente de aterramento do GS.

2.1 Unidade de Monitoramento (UM)

As unidades de monitoramento (UMs) possuem a função de captar as formas de onda do campo magnético (e de sua derivada temporal) até digitalizá-las, enviando-as à Central de Processamento (CP). O sensor de campo magnético por indução é o principal elemento sensor utilizado na primeira versão do equipamento, e é do tipo bobina-sonda com núcleo de material não ferromagnético e não condutor. A resposta da bobina-sonda é uma forma de onda de tensão $v(t)_{bobina}$ induzida nos seus terminais pelo campo magnético variável $H(t)$. Pela lei de Faraday-Lens, a forma de onda da tensão medida $v(t)_{bobina}$ é dada pela equação (1), sendo a derivada temporal proporcional do campo magnético. N representa o número de espiras da bobina, S sua seção transversal (área) magneticamente efetiva e μ_0 a permeabilidade magnética no ar. Assim, a sensibilidade do sensor depende de sua área, do número de espiras e da permeabilidade magnética. A resposta do sensor é composta por várias componentes de campo e não apenas por uma parcela de uma direção do campo magnético. Isto implica que, para uma maior resolução espacial em uma única direção (no caso da aplicação de sensor unidirecional), é desejável manter a área do sensor tão pequena quanto possível. Pode-se também utilizar sensores de três dimensões. O sensor foi projetado para uma banda passante de 0,25 Hz a 10 kHz.

$$v(t)_{bobina} = -\mu_0 NS \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

Os sensores utilizados na medição de campo magnético e os circuitos eletrônicos são acondicionados nas UMs instaladas dentro do compartimento da unidade geradora da usina (*housing*), na parede oposta à carcaça do gerador, em distâncias que podem chegar a 40 metros da CP. Assim, com a intenção de manter a integridade dos sinais e imunidade eletromagnética, empregou-se cabos de fibra óptica. Há um microcontrolador em cada UM responsável pelo processamento e por interpretar os comandos da CP que chegam pela fibra óptica. A Figura 1 apresenta uma foto do interior de uma das UMs e uma foto de uma UM instalada na UHIT, no lado interno da parede do *housing* do gerador. São seis UMs instaladas na circunferência do GS.

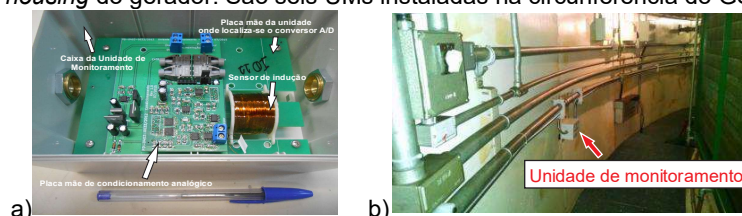


FIGURA 1 – a) Foto da parte interna de uma Unidade de Monitoramento (UM), tendo em detalhe o sensor de indução implementado e demais componentes. b) Foto de uma UM instalada dentro do *housing*.

2.2 Central de Processamento (CP)

Nesta primeira versão do hardware do equipamento, utilizou-se um sistema de processamento da National Instruments, denominado CompactRIO (CRIO). O sistema possui um processador físico conjugado com um processador FPGA. Esse sistema compõe a parte do equipamento denominada Central de Processamento (CP). Na CP são i) gerenciados todos os processos de aquisição, ii) obtidas as assinaturas magnéticas (espectros de frequência provenientes de decomposições de sinais através da Transformada Rápida de Fourier - FFT), iii) realizadas análises do comportamento de componentes de frequência e iv) armazenamento/salvamento de dados/arquivos. A Figura 2 apresenta (a) uma foto da parte interna da CP instalada na UHIT, (b) uma foto da parte externa de uma UM e (c) uma FFT de uma das formas de onda medida por um dos sensores, truncada em 200 Hz.

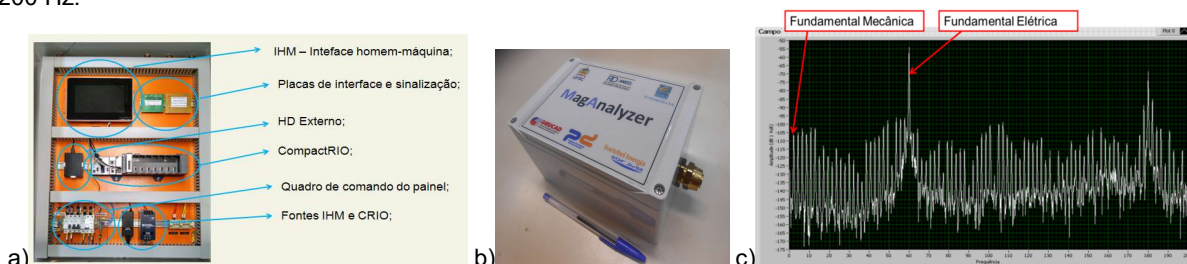


FIGURA 2 – (a) Foto da parte interna da Central de Processamento (CP) instalada na parede externa do *housing* de um gerador da UHIT. (b) Foto de uma UM, vista externa. (c) FFT de uma forma de onda de um dos sensores. Entre outras funções, como de configuração do MagAnalyzer e de apresentação de formas de onda no tempo, a Interface Homem-Máquina (IHM) apresenta assinaturas magnéticas (FFTs). A Figura 2(c) apresenta uma FFT até 200 Hz de uma forma de onda da derivada do campo magnético de uma UM, com as amplitudes das componentes de frequência calculadas em relação ao valor de 1 dBV. A amplitude da fundamental mecânica é quase 50 dB menor do que a da fundamental elétrica. Mesmo assim, estas amplitudes são expressivas em relação à amplitude média do ruído de fundo de cerca de -150 dB. A amplitude da frequência fundamental elétrica do campo é de cerca de 60 A/m (RMS) na posição do sensor, e a fundamental mecânica tem uma

amplitude de aproximadamente 0,19 A/m (RMS). A análise para a detecção de faltas incipientes é realizada através da tendência de variação de amplitudes de certas harmônicas da fundamental mecânica, podendo coincidir com harmônicas elétricas.

3.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA METODOLOGIA

Conforme apresentado em [27] e [28], explica-se a razão da existência da frequência fundamental mecânica e suas harmônicas nos espectros de frequências de campos magnéticos em MSs. Para o desenvolvimento da questão, i.e., mostrar a razão do surgimento de componentes no espectro de frequência além das elétricas, e para facilitar a abordagem teórica, considera-se uma forma de onda da indução magnética hipotética $B_g(t)$ em um ponto fixo no entreferro de uma MS de 8 polos. Se for imposto um defeito que provoque uma assimetria no fluxo, como por exemplo, a diminuição do número de espiras em um polo do rotor, há a diminuição da amplitude da indução neste polo. Assim, a amplitude de $B_g(t)$ tem valor B para toda revolução mecânica T_m , com exceção de um semi-ciclo elétrico em que a amplitude é b . O período elétrico tem duração T_e . As relações de período e de frequência mecânica e elétrica são dadas pela Equação (3), onde p é o número de pares de polos. A amplitude de $B_g(t)$ tem valor B para toda revolução mecânica de período T_m , com exceção em um semiciclo elétrico, com intervalo $T_e/2$ do período elétrico T_e , em que a amplitude é b . A Equação (2) descreve esta forma de onda.

$$B_g(t) = \begin{cases} b \text{sen}(\omega_e t), & 0 \leq t < \frac{T_e}{2} \\ B \text{sen}(\omega_e t), & \frac{T_e}{2} \leq t < pT_e \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{p} \quad \text{e} \quad T_m = pT_e \quad (3)$$

A Equação (2) é periódica definida por partes e pode ser representada por uma expressão analítica por meio da Série de Fourier, considerando o período fundamental T_m , i.e., para uma revolução mecânica. Obtém-se a expressão (4) para esta forma de onda de indução magnética:

- i) Quando não houver qualquer assimetria na variável $B_g(t)$ (i.e., $b=B$), a Série da Equação (4) adquire a expressão $B \text{sen}(\omega_e t)$ equivalente à uma função senoidal monotônica, com frequência elétrica nominal;
- ii) Se houver uma assimetria na amplitude da indução, seu espectro terá uma componente contínua (primeira parcela do lado direito da Equação (4)), e uma série de componentes espectrais harmônicas da fundamental mecânica, onde k é um inteiro natural, i.e, a ordem da harmônica mecânica.

$$B_r(t) = \frac{b-B}{2\pi p} + \frac{1}{2p} \left[b + B(2p-1) \text{sen}(p\omega_m t) \right] + \sum_{k \neq p}^{\infty} \left[\frac{p(b-B)}{\pi(p^2-k^2)} \left(2 \cos^2\left(\frac{\pi k}{2p}\right) \cos(k\omega_m t) + \text{sen}\left(\frac{\pi k}{p}\right) \text{sen}(k\omega_m t) \right) \right] \quad (4)$$

Simulou-se as condições para $b=0,999B$ e $b=0,9B$, e os espectros são apresentados na Figura 3. Ao aumentar a assimetria, aumenta também a amplitude relativa destas componentes em relação à amplitude da frequência de maior magnitude, i.e., 60Hz. As harmônicas elétricas de ordem par, associadas com inter-harmônicas próximas a elas, crescem em amplitude com a severidade da assimetria (falta).

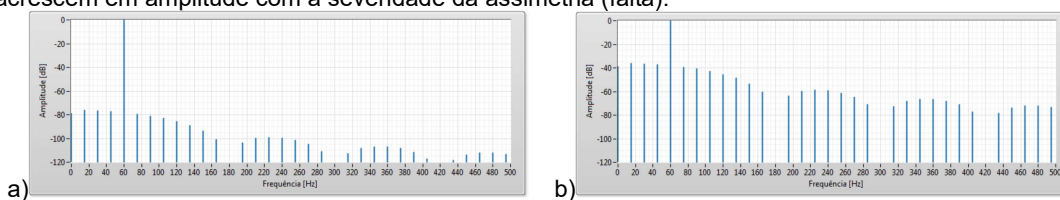


FIGURA 3 – FFTs para (a) $b=0,999B$ e $b=0,9B$.

A Figura 4 mostra a carta de campo obtidas via MEF para uma MS de 8 polos sadia, a forma de onda da tensão induzida em um sensor sonda em um ponto do entreferro e a FFT desta forma de onda. Foram simulados 50 períodos elétricos (fundamental elétrica de 50Hz). Note que a forma de onda é não senoidal, mas simétrica em todos os períodos e semiperíodos, e de valor médio nulo. Portanto, o espectro de frequência é composto pela fundamental elétrica e suas harmônicas ímpares, como mostra o espectro de frequência da Figura 3(c). Não há sub-harmônicas e se esperava não haver inter-harmônicas da fundamental elétrica. Porém, aparecem algumas raias de amplitudes relativamente pequenas que, como se constata, são harmônicas mecânicas. Elas poderiam ser atribuídas a problemas numéricos (aproximações, erros de truncamento, malha não homogênea etc.).

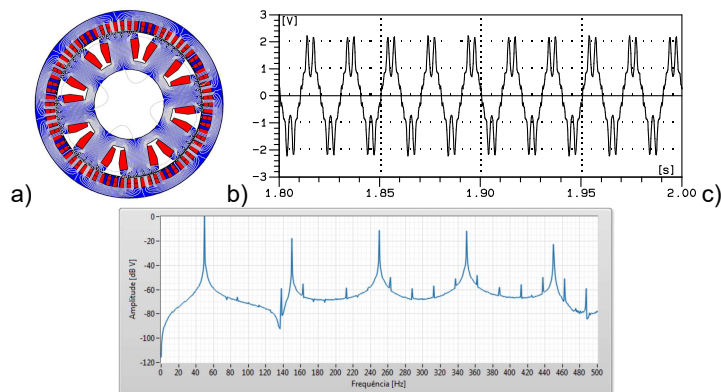


FIGURA 3 – (a) carta de campo p/ polos sadios; (b) forma de onda da tensão induzida em um sensor sonda no entreferro da MS de 8 polos sem defeito operando em vazio e à 50Hz e (c) seu espectro de frequência (FFT). Retirando todas as espiras ativas de um dos polos [27], a MS de 8 polos foi simulada no MEF, resultando a forma de onda da tensão induzida no sensor sonda no entreferro mostrada na Figura 4. Como esperado, a componente fundamental mecânica e suas harmônicas surgem com amplitudes relativamente significativas. O espectro de frequência da Figura 4(c) quando comparado com o da Figura 3(c) muda significativamente.

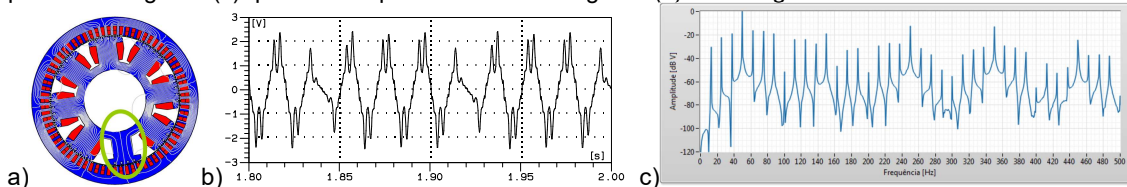


FIGURA 4 – (a) carta de campo com um dos polos sem espiras ativas; (b) forma de onda da tensão induzida no sensor sonda no do entreferro da MS de 8 polos com defeito de polo operando em vazio e à 50Hz e (c) seu espectro de frequência (FFT).

Sob o aspecto teórico, em breve será publicado uma abordagem teórica que contemple o comportamento das alterações nos espectros de frequências de MS em relação a outros tipos de defeitos. Na próxima seção, através da medição de campos externos, mostrar-se-á o comportamento da evolução de outros tipos de defeitos propositalmente inseridos em ensaios em laboratório de uma MS de 8 polos.

4.0 - RESULTADOS DE TESTES DO MAGANALYZER EM TESTES EM LABORATÓRIO

Para o desenvolvimento da primeira versão do MagAnalyzer, foi utilizada uma bancada projetada e implementada pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. A máquina de 8 polos salientes é 10 kVA, 0,8 indutivo, 750 a 900 rpm, 15,2 A, 380 V (Y+N), 50/60 Hz [27]. Aqui, apresenta-se alguns resultados obtidos na MS de 8 polos na validação da metodologia. A Figura 5 apresenta a comparação do espectro até 100 Hz do campo externo e do campo interno (entreferro) da máquina [27], onde praticamente há a mesma composição espectral.

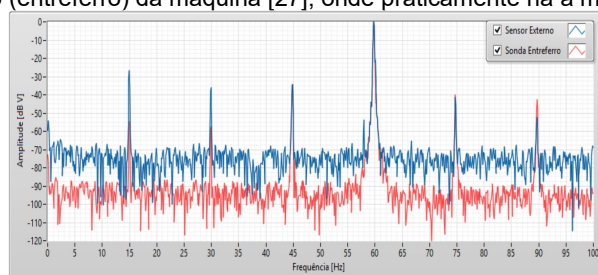


FIGURA 5 – FFTs (assinaturas magnéticas) de formas de onda medidas com sensor externo e através de uma sonda no entreferro da máquina operando em 60Hz.

Na literatura, principalmente nos trabalhos com MSs, a detecção de defeito é realizada por meio de comparação de amplitudes de FFTs (assinaturas magnéticas) com ou sem defeito. Percebeu-se que esta metodologia não é adequada, pois pequenas alterações na operação da máquina levam a possíveis e/ou significativas alterações nas composições das FFTs. Optou-se por realizar a análise/detecção de defeito por meio da avaliação através de registros de tendências das amplitudes das raias ao longo do tempo, como mostra o resultado na Figura 6 [27][28]. Com a avaliação da tendência é possível concluir se certa componente harmônica se altera devido à falta ou não, ou se possui uma variação aleatória, e também se sua alteração é devida a mudanças do ponto de operação da MS. A Figura 6 [27] apresenta a evolução das amplitudes das componentes sub-harmônicas em relação à fundamental elétrica (60 Hz) para a MS de 8 polos intensificando o defeito em um dos polos. Como pode ser observado, conforme o agravamento da falta, as amplitudes das sub-harmônicas aumentam. É

interessante notar que a amplitude da componente de 15 Hz (fundamental mecânica) atingiu o mesmo valor da componente elétrica fundamental de 60 Hz quando todo um polo ficou danificado.

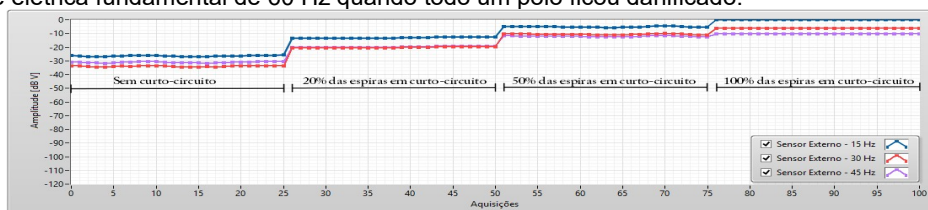


FIGURA 6 – Evolução das amplitudes das sub-harmônicas em relação à amplitude da fundamental elétrica com o agravamento de defeito em um polo da MS de 8 polos à 60Hz, com medição através de sensor externo.

Para a máquina operando em 50 Hz, foi imposta uma falta simulando curto-circuito de chapas do estator (há um condutor abraçando uma parcela de chapas do estator para simular um caminho de corrente induzida no núcleo). A Figura 7(a) apresenta a evolução da amplitude da componente de 862,5 Hz (69ª harmônica mecânica) em relação a 1 dBV. Quando se impôs o defeito, houve um aumento de 8 dB na amplitude. Este tipo de falta é difícil de ser detectado, mostrando que o equipamento desenvolvido é sensível. A Figura 7(b) apresenta o comportamento para a mesma componente de frequência de 862,5Hz quando se impõe i) curto-circuito de espiras do estator em uma das fases, ii) curto-circuito de chapas e iii) curto-circuito de espiras juntamente com o curto-circuito de chapas simultaneamente. Para ambos os defeitos, o equipamento detectou a falta, apresentado alterações da amplitude da componente de 862,5 Hz. Porém, com defeitos impostos simultaneamente, a alteração de amplitude não resultou em uma variação distinta do que quando há somente curto-circuito de chapas. Há a necessidade de avaliação da alteração de outras componentes através de programa de inteligência artificial (que está em desenvolvimento).

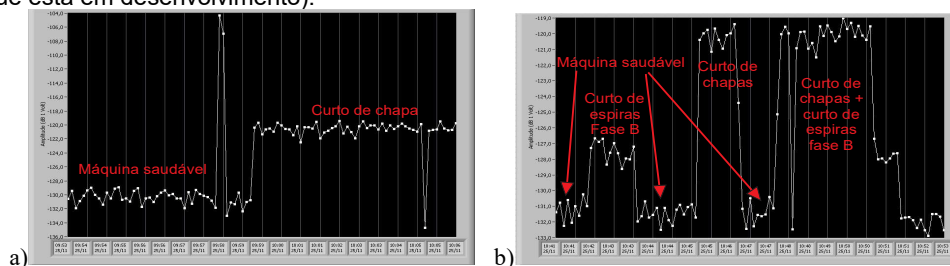


FIGURA 7 – Evolução da amplitude da 69ª harmônica na MS de 8 polos em 50 Hz: (a) curto-circuito de chapas do estator e (b) para curto-circuito de chapas do estator e curto de espiras de um polo de uma das uma das fases.

5.0 - CASO VIBRAÇÃO EXCESSIVA – CORREÇÃO DO MANCAL GUIA DO GERADOR

O problema aqui tratado foi identificado e solucionado de maneira preditiva pela equipe de engenharia e manutenção da Engie. O desenvolvimento do trabalho possibilitou uma melhor compreensão da influência de diversos aspectos que impactam na vibração de unidades geradoras, como exemplo, a variação de folga nos segmentos do mancal no decorrer de sua vida útil. O trabalho também evidenciou a importância do monitoramento de condição das unidades geradoras para os propósitos de diagnóstico, possibilitando um planejamento adequado e assertivo para a solução. Os detalhes dos passos para descoberta do problema, análise de engenharia, diagnóstico, prognóstico, definição de ações corretivas, monitoramento e testes operacionais não são aqui abordados, pois foge ao escopo deste IT, o qual tem por objetivo apresentar e relatar o emprego de uma nova técnica na detecção de falta incipiente em gerador síncrono através do campo magnético externado. O caso aqui apresentado se resume no seguinte: detectou-se que a linha de eixo, no plano do mancal guia do gerador estava vibrando em níveis acima dos aceitáveis. A Unidade Geradora foi originalmente montada e comissionada por volta do ano de 2000, sendo naquela ocasião ensaiada e aprovada sem necessidade de balanceamento mecânico devido aos baixos níveis de vibração relativa do eixo no Mancal Guia da Turbina (MGT) e Mancal Guia do Gerador (MGG).

Sensores de vibração relativa, calibrados, foram adicionalmente instalados para a investigação do problema. Analisaram-se seus espectros de vibração mecânica e órbitas, os quais apresentavam valores acima dos recomendados em norma (vide Figura 8) apresentando vibração relativa de eixo na ordem de 850 µm (pico a pico). A norma ISO 7919-5 classifica as vibrações relativas de eixo em 4 faixas. A Figura 8 apresenta os critérios. A faixa D, na qual a unidade geradora da UHIT encontrava-se, é considerada imprópria para operação, exigindo assim a parada da unidade para investigações e correções. Como não havia histórico dos níveis de vibração, apenas medições em uma condição de referência, uma tomada de decisão era difícil. Seria interessante saber se a unidade geradora apresentava os níveis de vibração elevados há muito tempo ou se tinham ocorrido alterações em relação à condição de referência. Seria necessário, portanto, mais informações para a tomada da decisão de parada de máquina para a averiguação de possível falta incipiente. Assim, utilizou-se dados do MagAnalyzer, que serão parcialmente abordados na próxima seção.

Entre os dias 13/06/2018 até 27/07/2018, conforme planejamento, ações para correção da vibração foram executadas. As atividades tiveram o seguinte andamento e ações: i) desmontagem dos mancais de guia do gerador e guia da turbina; ii) conferência de *Run-Out* – os valores encontrados estavam dentro dos parâmetros de projeto; iii) centragem da unidade geradora, tendo como referência a cuba do mancal guia do gerador, e conferência nos anéis de desgaste da turbina; iv) ajuste do Mancal Guia da Turbina na folga de projeto de 0,3 mm na direção radial; v) ajuste do Mancal Guia do Gerador na folga de projeto 0,4 mm na direção radial. Após estes ajustes, os mancais foram remontados e a unidade geradora normalizada para retorno as atividades de balanceamento mecânico nas condições de giro mecânico e em operação com carga. Na Figura 8, no eixo X são apresentados os valores de rotação por minuto e no eixo Y as vibrações em μm (pico a pico). Identifica-se a situação do Mancal de Guia do Gerador considerando a rotação nominal de 128 rpm, onde a vibração apresentou o valor de 850 μm pico a pico e com a correção do problema, o gerador passou à condição aceitável, com vibração de 225 μm pico a pico.

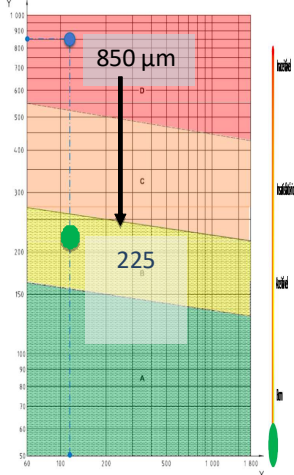


FIGURA 8 – Valores recomendados de oscilação do eixo do GS segundo norma ISO 7919-5, com os pontos de vibração mecânica com defeito incipiente (850 μm de vibração) e depois da correção (225 μm de vibração).

6.0 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO DO GERADOR

A primeira versão do MagAnalyser instalada no GS da UHIT começou a operar em 12/11/2015. Em 28/08/2016, houve a necessidade de reparo de uma das placas eletrônicas da CP. Nas figuras a seguir, o período de tempo até a indicação “*Antes*” se refere ao período de operação normal do MagAnalyser, que vai até 28/08/2016. Depois da interrupção, o sistema voltou a operar em 24/02/2018 (correspondente ao período de tempo que começa em “*Depois*” da manutenção do MagAnalyser). Os resultados mostrados a seguir mostram evoluções de quatro amplitudes de harmônicas do campo magnético externo do gerador, respeitando os períodos sem dados coletados (período de interrupção de coleta de dados). As curvas foram truncadas no dia 13/05/2018 (final da apresentação de dados). Estes períodos de coleta de dados contêm as informações necessárias e de interesse para o caso aqui estudado. Há seis sinais coletados pelas seis UMs. A Figura 9 mostra o comportamento de duas harmônicas: (a) para a fundamental mecânica (2,14 Hz) e (b) para a 5ª harmônica mecânica de (10,71 Hz). Nota-se que praticamente não há alterações ao longo do tempo, indicando que não há problemas de alteração de amplitudes magnéticas dos polos do rotor. As oscilações se devem às alterações dos pontos de operação da máquina.

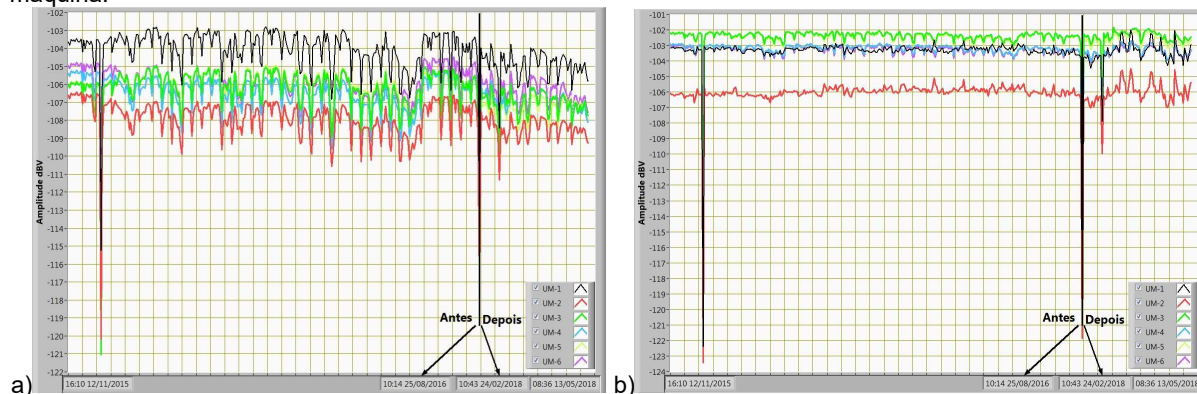


FIGURA 9 – Evolução da amplitude ao longo do tempo medida pelos seis sensores: (a) para fundamental mecânica (2,14 Hz) e (b) para a 5ª harmônica mecânica (10,71 Hz).

Entre outras harmônicas mecânicas, escolheu-se apresentar duas que tiveram suas evoluções de amplitudes alteradas: 141^a harmônica mecânica (302,14Hz) e 212^a harmônica mecânica (454,26Hz). A Figura 10 mostra o comportamento da evolução das amplitudes das harmônicas ao longo do tempo para os seis sensores. Nota-se que houve um crescimento na amplitude para os sinais dos seis sensores, e que se estabilizou após cerca de três meses. Como houve alterações semelhantes nos seis sensores, inferiu-se que uma alteração (falta incipiente) estava relacionada com fenômeno relativo à parte rotativa mecânica. Após a intervenção de manutenção, as amplitudes voltaram para um patamar de amplitude menor, próximo ao início da alteração (antes da ocorrência da falta incipiente), mas não exatamente o mesmo. Após a intervenção, as amplitudes não retornam aos mesmos valores, pois se alterou a distribuição e comportamento do campo magnético na máquina, i.e., a assinatura magnética. Comparando as evoluções das amplitudes da Figura 9 com as da Figura 10, nota-se que as harmônicas de ordem mais elevada possuem amplitudes menores, resultando variações pontuais aleatórias. As variações nas harmônicas de baixa ordem devem-se principalmente à variação do ponto de operação da máquina.

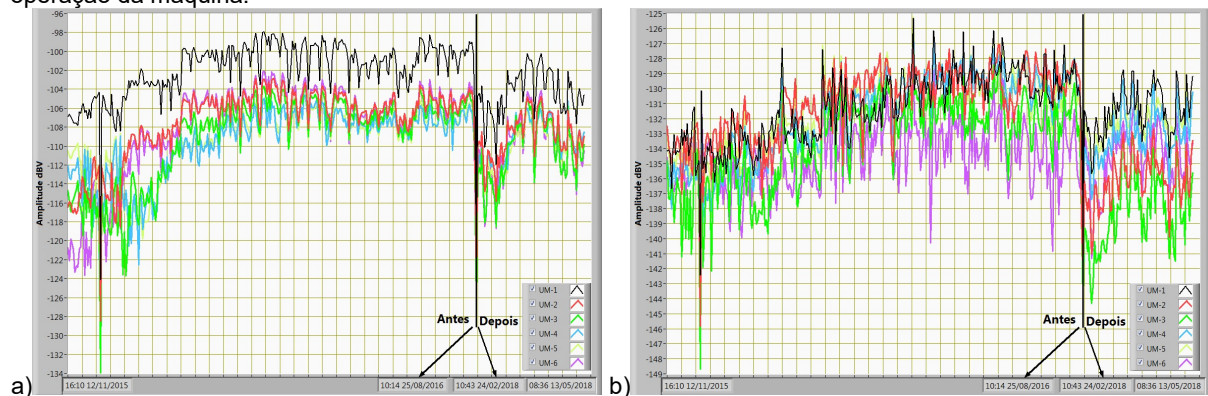


FIGURA 10 – Evolução da amplitude ao longo do tempo medida pelos seis sensores: (a) para 141^a mecânica (302,14 Hz) e (b) para a 212^a harmônica mecânica (454,26 Hz).

Com os resultados apresentados pelo MagAnalyzer, indicando uma alteração da máquina, juntamente com a análise de vibração, concluiu-se que havia uma falta incipiente no gerador, corrigida posteriormente pela equipe de manutenção da Engie, como mencionado na seção 5.

7.0 - CONCLUSÃO

Este IT apresentou sumariamente um aparelho de monitoramento por meio do campo magnético externado de Gs, denominado MagAnalyzer. O método de detecção de faltas incipientes empregado é não invasivo, e de fácil instalação dos sensores. O equipamento se encontra instalado em um gerador da UHIT, o qual identificou alterações no campo magnético externo, indicando a ocorrência de falta incipiente. Associado a uma abordagem tradicional de vibração mecânica, que também indicava a falta incipiente, decidiu-se fazer uma intervenção de manutenção no gerador, ajustando-se a folga dos mancais e efetuando-se o balanceamento do rotor. Como resultado da manutenção, a máquina passou de uma vibração considerada inaceitável pela norma ISO 7919-5 para uma condição de aceitável. Não se conhece mundialmente um relato que um aparelho, empregando o campo magnético externo, detectou uma falta incipiente em um gerador hidráulico de grande porte.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M. Sasic, S. Campbell, B. Lloyd. Flux monitoring improvement. IEEE Industry Applications Magazine, 2011, pp. 66 - 69.
- (2) C. P. Salomon, W. C. Santana, G. Lambert-Torres, L. E. B. da Silva, E. L. Bonaldi, L. E. L. de Oliveira, J. G. B. da Silva, A. L. Pellicel, G. C. Figueiredo, M. A. A. Lopes. Discrimination of Synchronous Machines Rotor Faults in Electrical Signature Analysis Based on Symmetrical Components. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, Issue 3, 2017, pp. 3146 - 3155.
- (3) J. Penman, H. Jiang. The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analysing excitation current harmonics. Proc. Int. Conf. Opportunities Adv. Int. Electr. Power Generation, 1996, pp. 137-142.
- (4) P. Neti, S. Nandi. Stator interturn fault detection of synchronous machines using field current and rotor search-coil voltage signature analysis. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 3, 2009, pp. 911-920.
- (5) M. Fayazi, F. Haghjoo. Turn to turn fault detection and classification in stator winding of synchronous generators based on terminal voltage waveform components. Proc. Power Syst. Protection Control Conf. 2015, Jan. 14-15, 2015, pp. 36-41.
- (6) G. Joksimovic, C. Bruzzese, E. Santini. Static eccentricity detection in synchronous generators by field current and stator voltage signature analysis-Part I: Theory. Proc. Int. Conf. Elect. Mach., Sep. 6-8, 2010, pp. 1-6.
- (7) C. Bruzzese, G. Joksimovic, E. Santini. Static eccentricity detection in synchronous generators by field current and stator voltage signature analysis-Part II: Measurements. Proc. Int. Conf. Elect. Mach., Sep. 6-8, 2010, pp. 1-5.

- (8) D. Howe and P. Hammond. Examination of the axial flux in stator cores with particular reference to turbogenerators. IEE Proceedings, vol. 121, no. 12, 1974.
- (9) P. Tavner, P. Hammond, and J. Penman. Contribution to the study of leakage fields at the ends of rotating electrical machines. IEE Proceedings, vol. 125, no. 12, 1978.
- (10) A.F. Anderson, B.Sc, Ph.D., C.Eng., M.I.E.E., T. Bedford, B.Sc, and A.F. Craddock, B.Sc, C.Eng. M.I.E.E. Transient leakage flux in small universal motors. IEE Proceedings, vol. 128, no. 5, 1981.
- (11) B. Belhoucine, A. Foggia, G. Meunier, M. Besseau, and H. Kermorgant. 3d finite element investigation of the magnetic field outside electromagnetic devices. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, no. 5, 1994.
- (12) G. Karady, S. Berisha, M. Muralidhar, J. Demcko, and M. Samotyj. Variable speed motor drive generated magnetic fields. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 3, 1994.
- (13) G. L. Coat, P. L. Thiec, J.-P. Bongiraud, and A. Foggia. Electromagnetic signature of induction machines. IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. Pages: MB1/13.1 - MB1/13.3.
- (14) J. Penman, M. Dey, A. Tait, and W. Bryan. Condition monitoring of electrical drives. IEE Proceedings, vol. 133, no. 3, 1986. Page(s):142 - 148
- (15) J. Penman, H. Sedding, and W. Fink. Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 9, no. 4, 1994. Volume: 9 , Issue: 4 Pages: 652 - 658
- (16) G. Kliman, R. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 3, no. 4, 1988. Page(s): 873 - 879
- (17) Rigoni, M.; Santos, T. A.; Santos, A. L., Sadowski, N., Batistela, N. J. Estudo Experimental da Detecção de Defeitos em Rotores em Gaiola por meio do Campo Externo. 13º SBMO Simpósio De Microondas e Optoeletrônica/8º CBMAG Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, p. 166-170, 2008.
- (18) D. Thailly, R. Romary, J.-P. Lecointe, J.-F. Brudny, P. Suau. Synchronous machine diagnosis using an external magnetic flux sensor. International Conference on Electrical Machines - ICEM, Chania, Paper No 462, 2006.
- (19) M. Cuevas, R. Romary, J. Lecointe, T. Jacq. Non-Invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, Volume: 52.
- (20) J.P. Selvaggi ; S. Salon ; O-Mun Kwon ; M.V.K. Chari. Calculating the external magnetic field from permanent magnets in permanent-magnet motors-an alternative method. IEEE Transactions on Magnetics. 2004 , Volume: 40, Issue: 5. Page s: 3278 - 3285.
- (21) Jerry P. Selvaggi, Sheppard Salon, O.-Mun Kwon, M. V. K. Chari, Mark DeBortoli. Computation of the External Magnetic Field, Near-Field or Far-Field, From a Circular Cylindrical Magnetic Source Using Toroidal Functions. IEEE Transactions on Magnetics Year: 2007 , Volume: 43 , Issue: 4. Page s: 1153 - 1156.
- (22) Chari Madabushi Venkatakrishnama, Salem Sameh Ramadan, Salon Sheppard, Kwon O-Mun. US-7880473-B2: Non-invasive monitoring and diagnosis of electric machines by measuring external flux density. Assignee: General Electric Company. Filed: Mar.31,2008, Date of Patente: February 1, 2011.
- (23) Jerry P. Selvaggi ; Sheppard J. Salon ; Madabushi V. K. Chari. Employing Toroidal Harmonics for Computing the Magnetic Field From Axially Magnetized Multipole Cylinders. IEEE Transactions on Magnetics. Year: 2010, Volume: 46, Issue: 10. Page s: 3715 - 3723.
- (24) S. Salon, S. Salem, K. Sivasubramaniam. Monitoring and diagnostic solutions for wind generators. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011 Page s: 1 - 4.
- (25) Viet Phuong Bui. Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. França.
- (26) V. P. Bui, O. Chadebec, L.-L. Rouve, and J.-L. Coulomb. Noninvasive Fault Monitoring of Electrical Machines by Solving the Steady-State Magnetic Inverse Problem. IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 44, NO. 6, JUNE 2008, pag. 1050 - 1053.
- (27) 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. 2014.
- (28) Mauricio Rigoni et al. Aparelho de Detecção de Faltas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo. Citenel - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Costa do Sauípe - Bahia, 2015.
- (29) H. F. Santos, M. Rigoni, R. A. Elias, L. A. Feler, C. Wengerkievicz, N. J. Batistela, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, J. P.A. Bastos, L. M. Freitas. Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 16, p. 70-89, 2017.
- (30) H. F. dos Santos, N. Sadowski, N. J. Batistela, J. P. A. Bastos. Synchronous Generator Fault Investigation by Experimental and Finite-Element Procedures. IEEE Transactions on Magnetics, v. 52, p. 1-4, 2016.
- (31) P. Neti, A. B. Dehkordi, and A. M. Gole. A new robust method to detect rotor faults in salient-pole synchronous machines using structural asymmetries. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, 2008.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luciano Mendes de Freitas, nascido em Francisco Beltrão, PR, Graduado em Tecnologia em Eletrônica pelo CEFET em 2003, Engenharia de Controle e Automação pela FAG em 2007, Engenharia Elétrica pela SATC em

2014 e Especialista em Gerenciamento de Projetos pelo SENAI em 2017. Atualmente é Engenheiro de Manutenção de Ativos de Sistemas na Usina Hidrelétrica de Itá. Contato luciano.freitas@engie.com e telefone (49) 3458-9044.

10.0 - AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto PD-0403-0033/2012, intitulado "Desenvolvimento de um equipamento para detecção de falhas em geradores síncronos através do campo magnético externo", desenvolvido no âmbito do Programa de P&D da Tractebel Energia regulamentado pela ANEEL, e pela ENGIE, ITASA, UFSC, CNPq e CAPES.