



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPT/01

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO – II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – GPT**

**SISTEMA PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM TURBOGERADORES UTILIZANDO ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA E COMPONENTES SIMÉTRICAS**

**Lambert-Torres, G. (\*)  
Salomon, C.P.  
Bonaldi, E.L.  
Oliveira, L.E.L.  
INSTITUTO GNARUS**

**Pellicel, A.L.  
Figueiredo, G.C.  
Lopes, M.A.A.  
TERMONORTE ENERGIA**

**Borges da Silva, L.E.  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**RESUMO**

Este trabalho aborda particularidades na aplicação da análise da assinatura elétrica para a detecção de falhas em geradores síncronos. A primeira está relacionada ao padrão de frequência de rotação, que é um indicativo de falhas elétricas e mecânicas no rotor. Propõe-se uma metodologia para se distinguir o efeito de falhas elétricas e mecânicas no rotor com base na análise de componentes simétricas. A segunda está relacionada ao estudo dos harmônicos pares e separação de harmônicos da rede e componentes de falha para geradores de dois polos. São apresentados resultados experimentais e exemplos de sinais reais de geradores em operação na Usina da Termo Norte, em Porto Velho.

**PALAVRAS-CHAVE**

Análise da Assinatura Elétrica, Componentes Simétricas, Gerador Síncrono, Harmônicos Pares, Manutenção Preditiva

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Geradores síncronos (GSs) são equipamentos substanciais no sistema elétrico de potência, sendo responsáveis pela produção da maior parte da geração de energia elétrica. No entanto, estas máquinas estão sujeitas a diversas falhas, de origem elétrica ou mecânica. A ocorrência de uma parada não-programada devido a uma falha no gerador pode causar diversos inconvenientes, desde pequenos desvios de tensão até grandes cortes de carga, além dos possíveis prejuízos financeiros decorrentes [1].

Desta forma, as estratégias para manutenção de máquinas elétricas têm evoluído, e a tendência atual é a intensificação do uso de filosofias de manutenção preditiva. Este tipo de manutenção baseia-se no acompanhamento contínuo das grandezas do equipamento monitorado e na análise de variação de características que indiquem a incipiência de uma falha no mesmo. Assim sendo, falhas são detectadas em um estágio prematuro, permitindo a programação de uma parada para intervenção no equipamento apenas quando realmente necessário ou no momento mais viável.

Dentre as metodologias utilizadas nos programas de manutenção preditiva, vem crescendo o emprego da Análise da Assinatura Elétrica (ESA – *Electrical Signature Analysis*). A ESA consiste em um conjunto de técnicas que se fundamenta, basicamente, na análise dos sinais de tensão e corrente da máquina no domínio da frequência, o que é chamado de assinatura elétrica. No caso da aplicação para GSs, o próprio gerador é utilizado como transdutor, sendo que os sinais de tensão e corrente do estator são tomados para análise. O princípio da ESA é que a assinatura de uma máquina saudável é diferente da assinatura de uma máquina com falha. Ou seja, existem componentes espectrais específicas que sofrem variações em suas amplitudes devido a ocorrência de uma falha, e estas geralmente são relacionadas à frequência fundamental e a características estruturais da máquina, como

número de polos, número de ranhuras, etc. Assim, é possível detectar a presença de uma falha e a parte da máquina em que a falha está ocorrendo. As principais vantagens do uso de um sistema de monitoramento baseado em ESA são o baixo nível de invasão, uma vez que são necessários apenas transdutores de tensão e corrente para medição; facilidade de instalação; viabilidade econômica; e o diagnóstico abrangente de falhas [2].

Existem algumas peculiaridades notadas na aplicação de ESA para máquinas síncronas. Primeiramente, o padrão de frequência de rotação na assinatura elétrica, definido como a frequência da rede (frequência fundamental) com bandas laterais nos múltiplos da frequência de rotação, é um indicativo de problemas mecânicos no rotor e curto-circuito no enrolamento rotórico [3]-[5]. Logo, analisando-se apenas as componentes espectrais do padrão de frequência de rotação, pode-se detectar um problema no rotor, mas não distinguir se se trata de um problema de origem elétrica ou mecânica. A fim de se ter um diagnóstico assertivo de falhas em GSs através de ESA, torna-se necessário separar os efeitos de falhas elétricas e mecânicas nestas componentes de falha [6].

Outra peculiaridade está na aplicação de ESA para GSs de dois polos. Neste caso, a frequência de rotação do rotor é igual à frequência da rede. Por causa disso, os padrões de falha coincidem com os harmônicos da rede. Os harmônicos ímpares são normalmente presentes em máquinas saudáveis, mas os harmônicos pares não são esperados de serem encontrados em máquinas ideais saudáveis. No entanto, na prática, para máquinas reais, eles são encontrados e podem atrapalhar o diagnóstico de falhas utilizando ESA. Os harmônicos pares são também padrões de falha para curto-circuito no enrolamento rotórico e o segundo harmônico coincide com a primeira banda lateral direita do padrão de frequência de rotação. Desta forma, para se melhorar o diagnóstico de falhas em GSs utilizando-se ESA, torna-se também importante separar o efeito dos harmônicos da rede do efeito relacionado a possíveis falhas internas no gerador síncrono [7].

Este trabalho aborda através de análises experimentais as peculiaridades levantadas na aplicação da ESA para detecção de falhas em GSs. O trabalho propõe uma análise para determinação de características a serem utilizadas para a distinção de falhas de origem elétrica de falhas de origem mecânica nas componentes de frequência de rotação. A distinção é realizada através de uma proposta inovadora, associando-se a análise de componentes simétricas à ESA. Também se investiga o comportamento dos harmônicos pares em GSs, visando a melhorar a ESA para o diagnóstico de falhas em GSs de dois polos. A investigação foi realizada através de ensaios experimentais realizados em um laboratório de modelo reduzido com um pequeno GS de dois polos.

Propõe-se uma metodologia para manutenção preditiva que consiste em se coletarem periodicamente dados de tensão e corrente dos GSs e se analisarem padrões de falha de ESA para o diagnóstico de falhas. Os padrões de falha são baseados em características estruturais da máquina, sendo aplicáveis para quaisquer tipos de GSs de rotor bobinado. Desenvolveu-se um sistema para manutenção preditiva de turbogeradores baseado na metodologia proposta, que está instalado em quatro unidades geradoras da usina da Termo Norte, de 404 MW, em Porto Velho, Rondônia [1]. Exemplos de aplicação da metodologia proposta são apresentados em sinais reais das unidades geradoras da Termo Norte.

## 2.0 - ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA PARA GERADORES SÍNCRONOS

A análise da assinatura elétrica consiste em se analisar os sinais de tensão e corrente do equipamento monitorado no domínio da frequência, isto é, na obtenção do espectro destas grandezas, que é chamado de *assinatura elétrica*. Esta é obtida através do cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) para os sinais elétricos adquiridos. A detecção de falhas é realizada através da comparação de amplitudes de algumas componentes de frequências específicas, chamadas *padrões de falhas*, que são alteradas quando ocorre o início de uma falha. Os padrões de falha são geralmente funções da frequência fundamental e algumas características estruturais da máquina. Elas permitem detectar o surgimento de uma falha e a parte do equipamento em que a falha está localizada, porque cada falha excita componentes de frequências específicas no espectro [2].

Por exemplo, um padrão de falha identificado para problemas no rotor da máquina é o padrão da frequência de rotação, que consiste em se analisar a frequência da rede (fundamental) com bandas laterais em múltiplos da frequência de rotação nas assinaturas de corrente e de tensão. O GS rotaciona na velocidade síncrona, assim a frequência de rotação é dada por:

$$f_r = \frac{f_1}{p} \quad (1)$$

Onde:  $f_r$  é a frequência de rotação;  $f_1$  é a frequência da rede (fundamental); e  $p$  é o número de pares de polos. Logo, o padrão da frequência de rotação é dado por:

$$f_{rp} = f_1 \pm n \cdot f_r \quad (2)$$

Onde:  $f_{rp}$  são as componentes espectrais analisadas para problemas no rotor do GS e  $n$  é um valor inteiro positivo.

Um sistema para manutenção preditiva de GSs baseado em ESA geralmente consiste na aquisição de sinais de tensão e corrente da máquina periodicamente e no cálculo da FFT e de outras operações de processamento de sinais. Uma base de dados é gradualmente criada para avaliação da condição do GS. Assim sendo, as curvas de tendência dos padrões de falha conhecidos são continuamente analisadas, a fim de se monitorar a condição do GS em busca de uma possível falha incipiente. Se uma falha é diagnosticada, é possível se ter uma ideia sobre sua severidade e agendar a parada do GS para uma possível intervenção de manutenção [2]. A Tabela 1 apresenta alguns padrões de falha para GSs.

Tabela 1 – Alguns Padrões de Falha Conhecidos para GSs [1]

Falha	Padrões de Falha nas Assinaturas de Tensão e Corrente
Curto-circuito entre espiras do enrolamento estático	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terceiro harmônico</li> <li>• Duas vezes a frequência da rede na assinatura de EPVA (<i>Extended Park's Vector Approach</i>)</li> </ul>
Curto-circuito entre espiras do enrolamento rotórico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Padrão da frequência de rotação</li> <li>• Harmônicos pares</li> </ul>
Problemas mecânicos no rotor	Padrão da frequência de rotação

### 3.0 - LABORATÓRIO DE MODELO REDUZIDO

Dois *setups* experimentais, conforme o esquema apresentado na FIGURA 1, foram utilizados para se investigar o comportamento das componentes de frequência de rotação, desenvolver uma metodologia para separação do efeito de falhas elétricas e mecânicas e estudar o comportamento dos harmônicos pares. O modelo de *setup* experimental engloba um GS, que é acionado mecanicamente por um motor de indução trifásico alimentado por um inversor de frequência. O GS é capaz de trabalhar em diferentes condições de carga e falhas simuladas. A saída do estator do GS é conectada a um banco de carga resistiva-indutiva. Para a aquisição e o processamento de sinais, foi utilizado o sistema para monitoramento de turbogeradores descrito em [1]. Os transdutores de tensão e corrente são conectados à saída do estator do GS e os sinais de tensão e corrente são adquiridos pelo sistema de aquisição de dados, que comunica com a interface homem-máquina.

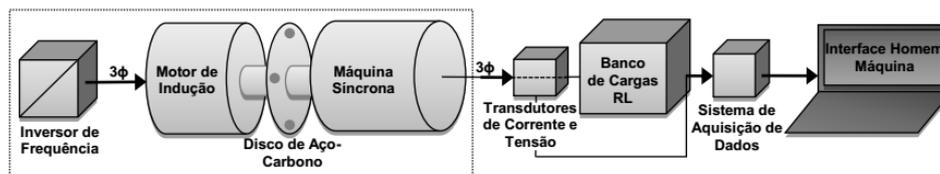


FIGURA 1 - *Setup* experimental para análise da assinatura elétrica do gerador síncrono

Falhas elétricas e mecânicas podem ser simuladas no *setup* experimental. Os enrolamentos do estator e do rotor possuem tapes em que se podem simular curto-circuito entre espiras do enrolamento através do uso de elementos passivos (resistores, capacitores ou indutores) inseridos entre tapes selecionados. Além disso, o *setup* possui um disco de aço-carbono no acoplamento entre o motor de indução e o GS, como apresentado na FIGURA 1. O disco possui furos, em que um ou mais parafusos podem ser inseridos, simulando-se desbalanceamento mecânico no rotor.

Dois laboratórios de modelo reduzido foram utilizados nos ensaios apresentados neste trabalho, um com GS de 1 CV (735,5 W), de 4 polos, e outro com um GS de 2 kVA, de 2 polos.

### 4.0 - SEPARAÇÃO DO EFEITO DE FALHAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS NAS COMPONENTES DE FALHA [6]

Ensaio experimentais foram realizados com o laboratório de modelo reduzido para se investigar um método para separação do efeito de falhas elétricas e mecânicas nas componentes de frequência de rotação. Estes ensaios foram realizados com o laboratório de modelo reduzido de GS de quatro polos, a fim de não se ter a influência dos harmônicos da rede nas componentes de falha de ESA.

Os ensaios experimentais foram realizados para a frequência de 50 Hz nas tensões do estator. Uma carga resistiva-indutiva de  $180/j115,7 \Omega$  foi utilizada na saída do gerador, correspondente a 165,7 VA. O estator do GS foi conectado na configuração estrela com neutro acessível, e os sinais coletados foram as três tensões fase-neutro e as três correntes de linha. A aquisição dos sinais foi realizada com frequência de amostragem de 8192 Hz.

Foram realizados ensaios de curto-circuito entre espiras do enrolamento rotórico e desbalanceamento mecânico, conforme a descrição apresentada na seção 3. Em ambos os casos, analisou-se o padrão de frequência de rotação, que é um indicativo para ambos os tipos de falhas. Para o GS de quatro polos, com a frequência de saída do estator em 50 Hz, a primeira banda lateral deste padrão é cerca de 75 Hz.

#### 4.1 Curto Circuito entre Espiras do Enrolamento Rotórico

Realizou-se a inserção de um elemento resistivo entre dois tapes do enrolamento do rotor, resultando em um efeito de 34% do enrolamento curto-circuitado. A FIGURA 2 apresenta o resultado na assinatura elétrica da corrente. Os resultados são apresentados através das assinaturas elétricas com *zoom* em torno da primeira banda lateral da frequência de rotação, que é cerca de 75 Hz. As amplitudes das componentes analisadas são normalizadas em relação à frequência fundamental. Além disso, os resultados são apresentados para a corrente na fase *a*, no entanto, o comportamento das três fases, tanto na tensão quanto na corrente, foi similar.

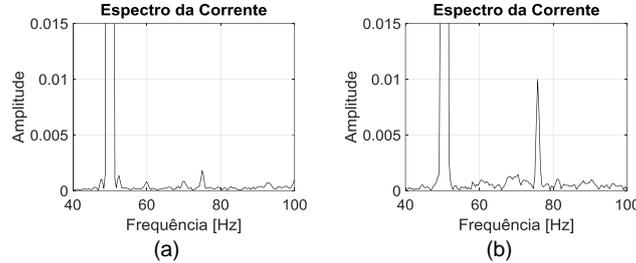


FIGURA 2 - Espectro de corrente, com *zoom* em torno da primeira banda lateral da frequência de rotação, para *baseline* (a) e curto-circuito no enrolamento rotórico (b)

Nota-se o aumento significativo da amplitude da frequência de rotação do *baseline* (FIGURA 2(a)) para a condição de falha (FIGURA 2(b)), conforme esperado.

#### 4.2 Desbalanceamento Mecânico do Rotor

A FIGURA 3 apresenta o resultado na assinatura da corrente para a falha de desbalanceamento mecânico. Nota-se o aumento significativo da amplitude da frequência de rotação do *baseline* (FIGURA 3(a)) para a condição de falha (FIGURA 3(b)), conforme esperado.

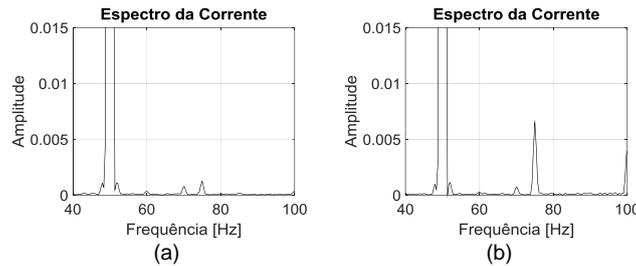


FIGURA 3 - Espectro de corrente, com *zoom* em torno da primeira banda lateral da frequência de rotação, para *baseline* (a) e desbalanceamento mecânico no rotor (b)

#### 4.3 Análise das Componentes Simétricas

Como pôde-se notar nos itens anteriores, ambas as falhas simuladas provocaram um aumento na amplitude da componente de frequência de rotação na assinatura elétrica. Esta componente foi analisada em detalhes através do cálculo das componentes simétricas. As componentes simétricas de um vetor de três tensões em uma dada frequência são dadas por [8]:

$$\dot{V}_{012} = T^{-1} \cdot \dot{V}_{abc} \quad (3)$$

Onde:  $\dot{V}_{012}$  representa o vetor de fasores de tensão nas componentes zero, positiva e negativa, respectivamente;  $\dot{V}_{abc}$  representa o vetor de fasores de tensão em componentes de fase (A, B, C); e  $T^{-1}$  é a matriz de transformação inversa, dada por:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde  $a = e^{j2\pi/3}$ . O mesmo procedimento é aplicado para os sinais de corrente.

Aplicou-se a equação (3) para a primeira banda lateral direita das componentes de frequência de rotação, considerando-se a amplitude e o ângulo de fase. A FIGURA 4 apresenta os resultados da aplicação desta análise para as componentes de interesse na corrente para os ensaios de curto-circuito no enrolamento rotórico e desbalanceamento mecânico no rotor.

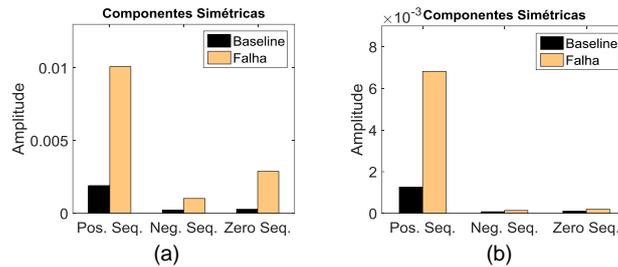


FIGURA 4 - Componentes simétricas da componente de frequência de rotação na assinatura de corrente, para os ensaios de curto-circuito no enrolamento rotórico (a) e desbalanceamento mecânico (b).

Os resultados apresentados mostram que, para ambos os tipos de falhas, houve um aumento significativo da componente de sequência positiva da frequência de rotação da condição de *baseline* para a condição de falha. Já a componente de sequência negativa e, principalmente, a componente de sequência zero tiveram um aumento considerável do *baseline* para a condição de falha apenas no caso do ensaio de curto-circuito no enrolamento rotórico. Estas componentes não apresentaram uma mudança significativa no caso do ensaio de desbalanceamento mecânico do rotor.

Assim sendo, constatou-se que as componentes de sequência zero e negativa da frequência de rotação são bons parâmetros para se distinguir o efeito das falhas elétricas e mecânicas nas componentes do padrão de frequência de rotação. Ambos os tipos de falha provocaram aumento na componente de sequência positiva da frequência de rotação, mas apenas a falha de curto-circuito no enrolamento rotórico provocou uma mudança considerável nas componentes de sequência zero e negativa da frequência de rotação. A constatação obtida foi comprovada matematicamente, conforme apresentado em [6].

## 5.0 - ESTUDO SOBRE HARMÔNICOS PARES EM GERADORES DE DOIS POLOS

Esta seção apresenta ensaios realizados a fim de analisar o comportamento dos harmônicos pares do GS. Isso porque, conforme mencionado anteriormente, no caso de GSs de dois polos, os padrões de falha coincidem com harmônicos da rede. Logo, torna-se importante o estudo do comportamento dos harmônicos da rede visando à diferenciação das componentes de falha. O objetivo era estudar a variação destas componentes com relação a outros parâmetros monitorados do GS.

### 5.1 Descrição dos Ensaio

Os ensaios foram realizados com o laboratório de modelo reduzido de GS de dois polos, a fim de se analisar a influência dos harmônicos da rede na análise. Foram realizados dois tipos de ensaios. Primeiramente, um ensaio de *baseline* (máquina saudável), considerando-se diferentes condições de carga na saída do estator do GS, e um ensaio com simulação de curto-circuito entre espiras do rotor. Os ensaios foram realizados para a frequência de 50 Hz nas tensões de saída do estator. O estator do GS foi conectado na configuração estrela com neutro acessível, e os sinais coletados foram as três tensões fase-neutro e as três correntes de linha. A aquisição dos sinais foi realizada com a frequência de amostragem de 20,52 kHz.

Os ensaios de *baseline* foram realizados considerando-se diferentes condições de carga, de carga mais leve até carga mais alta, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das Condições de Carga

Carga Resistiva	Valor ( $\Omega$ )	Potência (W)	Porcentagem de Carga (%)
Nível 1	180,0	260,0	13,0
Nível 2	90,0	520,0	26,0
Nível 3	60,0	780,0	39,0
Nível 4	45,0	1040,0	52,0

A falha de curto-circuito no enrolamento rotórico foi simulada através da inserção de um elemento resistivo entre dois tapas do enrolamento, sendo os valores e porcentagens de falha como apresentados na Tabela 3, e considerando-se a condição de carga nível 1. Para cada condição testada, foram coletadas cinco aquisições de tensão e corrente.

Tabela 3 – Valores de Resistência para Simulação de Curto Circuito no Enrolamento Rotórico

Elemento Resistivo	Valor ( $\Omega$ )	Porcentagem de Falha (%)
R3	6	20,9
R1	1	24,3
R0 (curto-circuito)	0	25,2

## 5.2 Resultados Experimentais para o Ensaio de *Baseline*

A FIGURA 5 apresenta as curvas de tendência de segundo harmônico (a) e harmônicos pares (nível global) (b) nas assinaturas de tensão e corrente. A FIGURA 5(c) apresenta a corrente RMS da fase A, indicativo da condição de carga em que as aquisições correspondentes foram efetuadas. Nota-se que as amplitudes das componentes, principalmente as de segundo harmônico, apresentaram um aumento coerente com o crescimento da condição de carga. Realizando-se o cálculo da correlação, o segundo harmônico na assinatura de tensão apresentou uma correlação de 0,897635 com a corrente RMS na fase A (parâmetro relacionado à condição de carga). O segundo harmônico na assinatura de corrente apresentou uma correlação de 0,837271 com a corrente RMS na fase A. Desta forma, houve uma correlação significativa do segundo harmônico com a condição de carga. Nota-se a presença de harmônicos pares mesmo para a máquina saudável e o segundo harmônico apresentou uma forte correlação com a condição de carga. Deduz-se que as componentes de segundo harmônico podem ser causadas por um desajuste mecânico temporário na estrutura da bancada de máquinas ou por assimetrias internas construtivas da máquina.

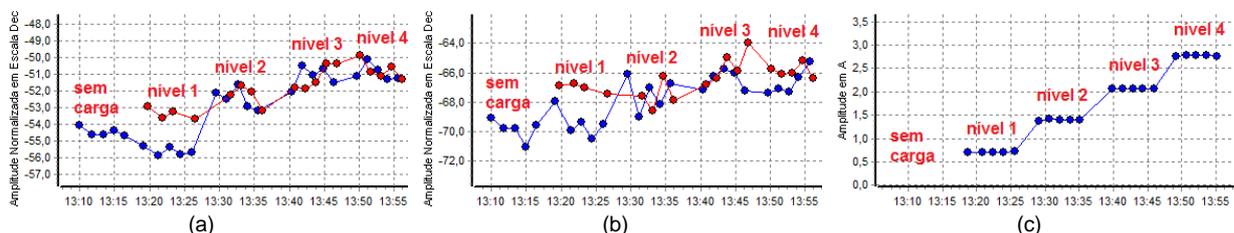


FIGURA 5 - Tendência de harmônicos pares nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) - segundo harmônico (a) e nível global dos harmônicos pares (b) para o ensaio de *baseline*; e corrente RMS na fase A (c)

A FIGURA 6 apresenta exemplos de harmônicos pares nas assinaturas de tensão (a) e corrente (b). Estas componentes espectrais ficaram evidentes nas assinaturas elétricas, principalmente o segundo harmônico, sendo que as outras permaneceram no nível do ruído.

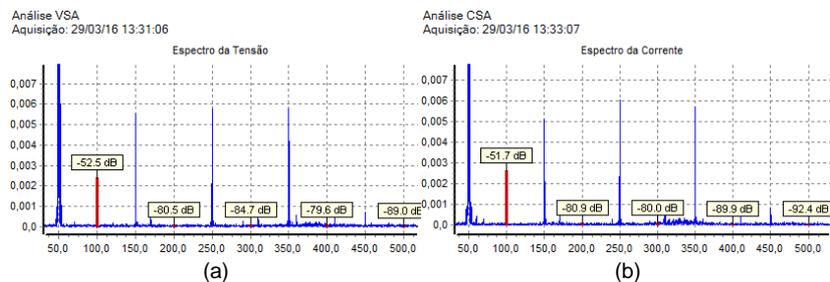


FIGURA 6 - Harmônicos pares nas assinaturas de tensão (a) e corrente (b) para a condição de *baseline*

## 5.3 Resultados Experimentais para o Ensaio de Curto Circuito no Enrolamento Rotórico

Os principais padrões de falha para curto-circuito entre espiras no enrolamento do rotor são o padrão da frequência de rotação e os harmônicos pares. O GS do laboratório de modelo reduzido é um GS de dois polos lisos, logo a frequência de rotação é igual à frequência da rede. Assim sendo, a primeira banda lateral direita do padrão da frequência de rotação é igual ao segundo harmônico. A FIGURA 7 apresenta as tendências de segundo harmônico (a) e harmônicos pares (nível global) (b). A FIGURA 7(c) apresenta a corrente RMS da fase A, indicativo da condição de carga em que as aquisições correspondentes foram efetuadas, a título de conhecimento.

Houve um aumento nas componentes da condição de baseline para as condições de falha, conforme esperado, principalmente no segundo harmônico. Nota-se que os harmônicos pares e as componentes de frequência de rotação ficaram evidentes nas assinaturas elétricas para as condições de falha. Assim sendo, apesar das fontes que causaram a presença destes harmônicos mesmo no caso da máquina saudável, ainda foi possível detectar a presença do curto-circuito no enrolamento rotórico através da análise destas componentes. Uma observação importante é que, para a detecção de falhas através de ESA, a curva de tendência analisada deve conter aquisições em condição de carga semelhante, para que haja uma correta comparação de sinais.

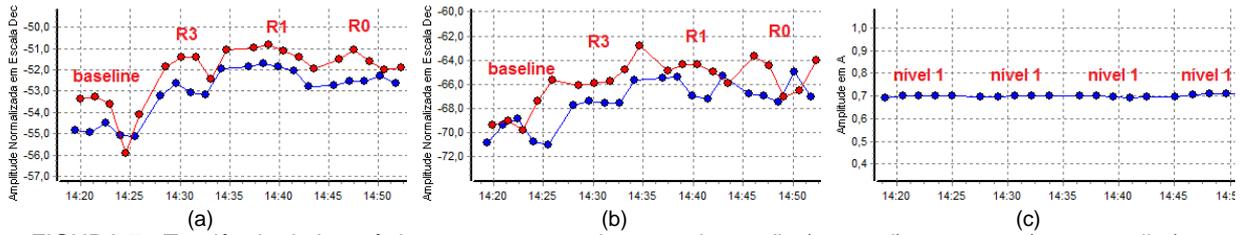


FIGURA 7 - Tendência de harmônicos pares nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) - segundo harmônico (a) e nível global dos harmônicos pares (b) para o ensaio de curto circuito no enrolamento rotórico; e corrente RMS na fase A (c)

## 6.0 - OPERAÇÃO DO SISTEMA EM USINA EM OPERAÇÃO

Um sistema para monitoramento inteligente de turbogeradores e detecção de falhas através da análise da assinatura elétrica foi desenvolvido e está em operação na Usina da Termo Norte, de 404 MW, em Porto Velho, como parte de um projeto de P&D. Esta usina é composta por quatro moto-geradores de 16 MW, três turbogeradores de turbinas a gás de 73,8 MW, e um turbogerador de turbina a vapor de 119 MW. O sistema é baseado em ESA e análise das componentes simétricas para a detecção de falhas em GSs. O sistema depende apenas de medições de grandezas elétricas na saída do estator do GS e está instalado em quatro turbogeradores da Usina da Termo Norte [1].

### 6.1 Características do Sistema Proposto

O sistema desenvolvido consiste em três transdutores de tensão; três transdutores de corrente; um *hardware* de aquisição de dados; fonte de alimentação para o *hardware* de aquisição de dados; e um *software* para transferência, processamento e análise de dados, incluindo uma interface homem-máquina. O *hardware* de aquisição de dados possui seis canais simultâneos e pode amostrar até 131072 pontos em uma taxa mínima de 1638,4 Hz e taxa máxima de 20517,5 Hz. O A/D possui resolução de 16 bits.

As falhas que o sistema é capaz de detectar são curto circuito no enrolamento rotórico; curto circuito no enrolamento estatórico e problemas mecânicos no rotor. O curto-circuito no enrolamento rotórico e os problemas mecânicos no rotor são detectados através da metodologia proposta de ESA associado à análise de componentes simétricas. A falha de curto-circuito no enrolamento estatórico é detectada através da análise da componente de terceiro harmônico nas assinaturas de tensão e corrente e duas vezes a frequência da rede nas assinaturas de EPVA (*Extended Park's Vector Approach*) de tensão e corrente [1].

### 6.2 Exemplos de Sinais Reais

Este item apresenta exemplos de sinais reais para o turbogerador a vapor de 119 MW, a fim de se exemplificar o uso do sistema em operação. A FIGURA 8 (a) e (b) apresenta exemplos de assinaturas de corrente e tensão com as componentes de frequência de rotação destacadas nos espectros.

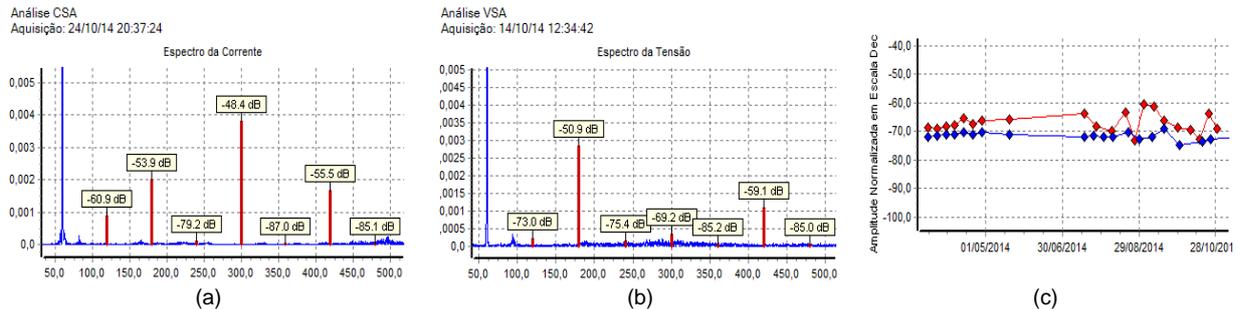


FIGURA 8 - Exemplos de assinaturas de corrente (a) e tensão (b) com componentes destacadas de padrão de frequência de rotação e tendência da primeira banda lateral da frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente (tensão em azul e corrente em vermelho) (c)

Na FIGURA 8 (a) e (b), o eixo x é a frequência, em Hz, e o eixo y é a amplitude normalizada com relação à frequência fundamental. A FIGURA 8(c) apresenta a curva de tendência da primeira banda lateral da frequência de rotação para os sinais de corrente e tensão durante um período de aquisição de dados. As amplitudes ficaram em cerca de -70 dB, na assinatura de tensão, e -65 dB, na assinatura de corrente. Como não houve tendência de aumento destas componentes, espera-se que a máquina esteja em condição saudável.

A FIGURA 9(a) apresenta um exemplo de análise de componentes simétricas para uma aquisição arbitrária de sinal de corrente, onde o eixo y é a amplitude normalizada em relação à componente de frequência fundamental. A FIGURA 9(b) apresenta a tendência das componentes simétricas da primeira banda lateral de frequência de rotação na assinatura da corrente, onde o eixo y é a amplitude, em A. Nota-se que não houve tendência de aumento nas componentes e, em geral, as componentes de sequência positiva e negativa ficaram mais altas que as componentes de sequência zero.

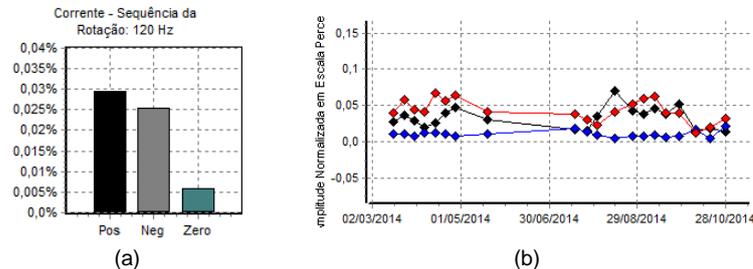


FIGURA 9 – (a) Exemplo de análise de componentes simétricas da primeira banda lateral da frequência de rotação na corrente e (b) tendência de componentes simétricas na primeira banda lateral da frequência de rotação na assinatura da corrente (azul – sequência zero, preto – sequência positiva e vermelho – sequência negativa)

## 7.0 - CONCLUSÃO

Este artigo abordou peculiaridades na aplicação da ESA para a detecção de falhas em GSs. Apresentou-se uma metodologia para separação do efeito de falhas elétricas e mecânicas nas componentes de falha de ESA baseada na análise das componentes simétricas. Também se apresentou um breve estudo sobre o comportamento dos harmônicos pares, visando à aplicação de ESA para GSs de dois polos. A metodologia proposta está implementada no sistema para monitoramento inteligente para manutenção preditiva de turbogeradores, instalado na Usina da Termo Norte, em Porto Velho, como parte de um projeto de P&D. O sistema desenvolvido possui baixo custo, baixo nível de invasão e abrange a detecção de falhas elétricas e mecânicas em GSs.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SALOMON, C.P.; SANTANA, W.C.; BONALDI, E.L.; OLIVEIRA, L.E.L.; BORGES DA SILVA, J.G.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; PELLICEL, A.L.; LOPES, M.A.A.; e FIGUEIREDO, G.C., "A system for turbogenerator predictive maintenance based on Electrical Signature Analysis," *Proc. I2MTC 2015*, pp. 79-84, 11-14 Maio 2015.
- (2) BONALDI, E.L.; OLIVEIRA, L.E.L.; BORGES DA SILVA, J.G., LAMBERT-TORRES, G., e BORGES DA SILVA, L.E., "Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors", *Induction Motors - Modelling and Control*, by Rui Araujo, ISBN 978-953-51-0843-6, InTech, Croatia, pp. 487-520, 2012, doi: 10.5772/48045.
- (3) PENMAN, J. e JIANG, H., "The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analysing excitation current harmonics," *International Conference on Opportunities and Advances in International Electric Power Generation (Conf. Publ. No. 419)*, pp. 137-142, 1996.
- (4) SOTTILE, J.; TRUTT, F.C.; e LEEDY, A.W., "Condition Monitoring of Brushless Three-Phase Synchronous Generators With Stator Winding or Rotor Circuit Deterioration," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 5, pp. 1209-1215, Set.-Out. 2006.
- (5) YUCAI, W.; YONGGANG, L.; e HEMING, L., "Diagnosis of turbine generator typical faults by shaft voltage," *2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, NV, pp. 1-6, 7-11 Out. 2012.
- (6) SALOMON, C.P.; SANTANA, W.C.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; BONALDI, E.L.; OLIVEIRA, L.E.L.; BORGES DA SILVA, J.G.; PELLICEL, A.L.; FIGUEIREDO, G.C.; e LOPES, M.A.A., "Discrimination of Synchronous Machines Rotor Faults in Electrical Signature Analysis based on Symmetrical Components," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, a ser publicado, doi: 10.1109/TIA.2016.2613501.
- (7) SALOMON, C.P.; BONALDI, E.L.; OLIVEIRA, L.E.L.; LAMBERT-TORRES, G.; BORGES DA SILVA, L.E.; PELLICEL, A.L.; FIGUEIREDO, G.C.; e LOPES, M.A.A., "Monitoramento Inteligente para Manutenção Preditiva de Turbogeneradores", *Anais do X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, Gramado, Brasil: Editora da SBPE, pp. 1-10, 2016.
- (8) FORTESCUE, C.L., "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 1027-1140, Jul. 1918.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Germano Lambert-Torres**

Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento da PS Soluções, desde 2010. Pesquisador-Associado e Membro do Conselho Técnico-Científico do Instituto Gnarus, desde 2012. Professor Titular da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), 1983-2012. Engenheiro Eletricista, formado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), em 1982. Bacharel em Ciências Econômicas pela Faculdade de Ciências Econômicas do Sul de Minas, em 1981. Licenciatura Plena em Matemática pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Itajubá, em 1981. Mestre em Engenharia Elétrica pela EFEI, em 1986. Doutor (Ph.D.) em Engenharia Elétrica pela École Polytechnique de Montreal, Canadá, em 1990. É consultor e tem proferido palestras e mini-curso em congressos, universidades e centros de pesquisa no Brasil, Estados Unidos, Canadá, Europa e Ásia. Orientou mais de 80 teses de doutorado e dissertações de mestrado. Autor de 9 livros e mais de 600 artigos técnicos em revistas e conferências nacionais e internacionais. É Fellow do IEEE.

**Camila Paes Salomon**

Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2011 e 2014). Atualmente é doutoranda pela Universidade Federal de Itajubá. Tem conhecimentos em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência e Sistemas Elétricos Industriais. Tem pesquisado e desenvolvido trabalhos nas áreas de Manutenção Preditiva de Máquinas Elétricas, Análise da Assinatura Elétrica, Estimação de Eficiência de Motores e Inteligência Artificial Aplicada.

**Alexandre Luiz Pellicel**

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1997). Atualmente, ele é o gerente geral da planta da Usina Termo Norte, em Porto Velho. Ele tem experiência na área de operação de sistemas elétricos de potência e geração térmica.

**Gonçalo Cassio Figueiredo**

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Mato Grosso e Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal da Paraíba (1997 e 2003). Tem experiência em comissionamento, operação e manutenção de usinas termelétricas com motores de grande escala (Wärtsilä) e usinas termelétricas em ciclo combinado (turbinas a gás GE e turbinas a vapor Fuji). Por 13 anos, responsável técnico pela UTE Termo Norte I (motores) e II (ciclo combinado) – 404 MW com subestação 13,8 / 230 kV e linha de interconexão com circuito duplo 230 kV. Atualmente, trabalha como engenheiro de segurança no trabalho e gerente ambiental na Termo Norte Energia.

**Marco Aurélio Araújo Lopes**

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade do Amazonas (1996). Atualmente, ele é engenheiro na Usina da Termo Norte e é estudante de MBA pela Fundação Getúlio Vargas. Tem experiência na área de operação de sistemas elétricos de potência e geração térmica.

**Erik Leandro Bonaldi**

Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1999, 2002 e 2006). É sócio-diretor da PS Soluções Indústria, Comércio, Representações e Consultoria Ltda. Pesquisador-Associado e Membro do Conselho Técnico-Científico do Instituto Gnarus desde 2012. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: processamento digital de sinais, monitoramento de máquinas, manutenção preditiva, análise da assinatura elétrica e inteligência artificial.

**Levy Ely de Lacerda de Oliveira**

Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1999, 2002 e 2006). Atualmente é Diretor de Desenvolvimento e Qualidade da PS Soluções Ind., Com., Rep. e Consultoria Ltda. Pesquisador-Associado e Membro do Conselho Técnico-Científico do Instituto Gnarus desde 2012. Possui experiência no desenvolvimento de sistemas eletrônicos (hardware, firmware e software) para monitoramento de máquinas elétricas por Análise da Assinatura Elétrica. Suas áreas de interesse são: monitoramento de máquinas elétricas, máquinas elétricas, sistemas de aquisição de dados, processamento digital de sinais, eletrônica e microcontroladores.

**Luiz Eduardo Borges da Silva**

Possui graduação e mestrado pela Universidade Federal de Itajubá (1977 e 1982) e doutorado (Ph.D.) pela École Polytechnique de Montreal (1988), todos em Engenharia Elétrica. É professor titular da Universidade Federal de Itajubá. De 1989 a 1993, foi Chefe do Departamento de Eletrônica. Desde 1996, é o Coordenador do Grupo de Eletrônica e Controle Industrial da UNIFEI. Além disso, desde 2009, é o Decano do Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação. De 1998 a 1999, foi professor visitante na Universidade do Tennessee, em Knoxville. É membro de diversas comissões no brasileiro governamentais e agências reguladoras, tais como: do Ministério da Educação, do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Tem ministrado cursos e tutoriais para mais de 700 engenheiros e técnicos de mais de 100 indústrias brasileiras, ensinando eletrônica de potência, DSP e controles inteligente e clássico. Orientou mais de 75 supervisões de tese de mestrado e doutorado e publicou mais de 250 artigos de revistas e conferências, nas áreas de sistemas inteligentes, eletrônica de potência, conversores de potência, filtros ativos de potência, e manutenção preditiva. É Senior Member do IEEE.