



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/08
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM GRUPOS MOTOR-GERADOR DE COMBUSTÃO INTERNA A PARTIR DE
ASSINATURA ELÉTRICA E PROCESSAMENTO DE SINAIS**

**Mendonça, P.L.D. (*)
Silva, A.V.D.
SUAPE ENERGIA**

**Bonaldi, E. L.
Oliveira, L. E. L.
Lambert-Torres, G.
Silva, J. G. B.
INSTITUTO GNARUS**

**Salomon, C. P.
Santana, W. C.
Silva, L. E. B.
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
ITAJUBÁ**

**Brito, C. N.
WARTSILA BRASIL**

RESUMO

A manutenção preditiva é uma das principais ferramentas utilizadas em ambiente industrial para se aumentar a disponibilidade de equipamentos críticos. No cenário atual, em que as usinas térmicas estão em pleno funcionamento por longos períodos de tempo, o acompanhamento da condição dos geradores e suas máquinas primárias se torna cada vez mais imperativo. Neste âmbito, o presente trabalho apresenta um sistema preditivo para diagnóstico de falhas em grupos motor-gerador de combustão interna através da análise da assinatura elétrica dos sinais de tensão e corrente do gerador. As principais contribuições são o desenvolvimento e montagem de um laboratório de modelo reduzido para ensaios e capacitação de pessoal; o desenvolvimento e instalação do protótipo do sistema em ambiente real; e a identificação de padrões de falha, incluindo resultados preliminares obtidos através da simulação de falha na excitatriz do gerador.

PALAVRAS-CHAVE

Análise da Assinatura Elétrica, Diagnóstico de Falhas, Manutenção Preditiva, Monitoramento da Condição, Motores de Combustão Interna.

1.0 - INTRODUÇÃO

A geração térmica tem se tornado cada vez mais crucial na garantia do fornecimento de energia elétrica no Brasil. No cenário atual, as térmicas estão em pleno funcionamento por longos períodos de tempo, o que faz com que o acompanhamento da condição dos geradores e suas máquinas primárias se torne cada vez mais imperativo.

O foco deste trabalho está em grupos motor-gerador de combustão interna. Sabe-se que, durante a operação destes grupos geradores, podem ocorrer interrupções intempestivas devido a problemas internos do conjunto e que podem ocasionar grandes perdas para a concessionária e, por consequência, para seus clientes. Desta forma, a avaliação criteriosa das condições operativas desses equipamentos pode levar a um substancial aumento de sua confiabilidade e a um programa efetivo de gerenciamento de ativos.

No contexto da aplicação de estratégias de manutenção nos mais diversos ambientes produtivos, nota-se a intensificação da manutenção preditiva. Esta vem aumentando os indicadores de disponibilidade e de confiabilidade em máquinas e equipamentos. A utilização destas técnicas vem sendo considerada não mais como um diferencial, mas sim como uma exigência, seja dos órgãos reguladores ou dos clientes internos ou externos num determinado mercado. Desta forma, a ausência de técnicas que se antecipem a possíveis falhas deixa um determinado ambiente em condições calamitosas, pois uma parada de máquina, por exemplo, traz consigo não só os prejuízos intrínsecos ao ativo, mas aqueles que afetam a sociedade, de uma forma geral.

(*) Rodovia PE 60, KM 10, N 8100, Engenho Serraria – Cabo de Santo Agostinho – Recife – PE – Brasil – CEP.: 54520-600
Tel: (+55 81) 3334-3008 – Cel: (+55 81) 8165-0283 Fax: (+55 81) 3334-3047 – Email: phillipmendonca@suapeenergia.com.br
Cel: (+55 81) 9201-2451 – Email: phillipmendonca@gmail.com

Como reflexo da ação preditiva se tem o monitoramento. Este permite que a intervenção em determinado ativo se dê bem próximo da falha, o que permite economia em diversas variáveis de observação. O monitoramento pode ser de forma manual ou remota. A manual já traz algumas vantagens, todavia a remota passa a ser a mais aplicada devido à possibilidade de controle e manipulação dos dados de interesse, onde se evita a utilização de recursos humanos para a coleta de sinais, minimizando a exposição de pessoal em áreas de risco.

No caso de usinas termelétricas, em particular aquelas movidas a óleo combustível com motor de combustão interna, não se verifica alguma técnica de manutenção preditiva remota que correlacione os dados de perfil das grandezas elétricas dos geradores com as termomecânicas dos motores. Os sistemas mais comuns disponíveis no mercado estão voltados para a Análise de Vibrações e não são específicos para coleta remota e análise automática dos dados com flexibilidade. Desta forma, para se obter tal correlação, pode-se realizar o monitoramento remoto através da técnica de Análise da Assinatura Elétrica (ESA – *Electrical Signature Analysis*). ESA é uma ferramenta promissora na detecção de falhas e defeitos em grupos motor-gerador, uma vez que permite o diagnóstico automático de falhas termomecânicas, com elevado potencial para criação de uma base de dados para o estabelecimento de possíveis prognósticos na máquina.

Desta forma, este artigo aborda o problema de se identificar e acompanhar, de forma preditiva, a evolução de defeitos elétricos ou termomecânicos em motores de combustão interna através das assinaturas dos sinais de tensão e corrente do gerador acoplado. As vantagens de se empregar esta metodologia são: fácil acesso aos sinais elétricos do gerador, potencial de diagnóstico do motor de combustão interna e gerador através de uma única técnica de análise, avaliação do impacto da condição do motor na saída do gerador, cruzamento do diagnóstico pela ESA com outras técnicas mais usuais como análise de vibrações. A abordagem para a solução do problema apresentado está sendo desenvolvida através do projeto de P&D intitulado “Desenvolvimento de Sistema para Diagnóstico Termomecânico de Falhas em Motores de Combustão Interna” com suporte financeiro da Energética SUAPE II e executado pelo Instituto Gnarus e o Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI).

As principais contribuições deste trabalho são: desenvolvimento do protótipo, desenvolvimento do laboratório de modelo reduzido, projetos dos ensaios controlados, instalação do protótipo em ambiente real e resultados preliminares obtidos através de simulação de falha na excitatriz do gerador. Além disso, os resultados deste trabalho podem ser aplicados em qualquer usina termelétrica com motores de combustão interna.

2.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

A manutenção preditiva é uma das principais ferramentas utilizadas em ambiente industrial para se aumentar a disponibilidade de equipamentos críticos. No escopo do presente trabalho, o objetivo é desenvolver uma nova metodologia de análise para se detectar precocemente defeitos em grupos motor-gerador de combustão interna, sendo esta metodologia baseada na análise da assinatura elétrica do gerador.

A Análise da Assinatura Elétrica (ESA) é um conjunto de técnicas não-invasivas de análise e diagnóstico de falhas mecânicas e elétricas em equipamentos elétricos. Ela é baseada na análise no domínio da frequência dos sinais elétricos dos equipamentos sob monitoramento. Ela foi aplicada inicialmente aos motores de indução, em que se focava a análise da assinatura da corrente. A utilização desta técnica tem sido extensiva na indústria, podendo detectar problemas na alimentação do motor, no próprio motor, no acoplamento entre o motor e a carga e na própria carga, utilizando apenas sinais externos de corrente e tensão do motor [1]. Nos últimos anos, a utilização da técnica se estendeu a geradores síncronos, sendo que, neste caso, as assinaturas de tensão e corrente devem ser correlacionadas [2].

A ideia central das técnicas de ESA é que a assinatura elétrica de um equipamento muda se este passa de seu modo normal de funcionamento (*baseline*) para um modo em que há ocorrência de alguma anomalia no mesmo. Desta forma, pode-se definir um conjunto de padrões de falha na assinatura elétrica do equipamento, em que cada componente específica indique a ocorrência de um determinado tipo de falha. A análise das assinaturas e suas respectivas tendências de evolução, considerando-se o conjunto de padrões de falha, podem determinar os momentos corretos que as manutenções devem ser realizadas [3].

A hipótese estabelecida neste trabalho é a de que distúrbios no motor de combustão interna e no próprio gerador podem afetar a assinatura das correntes e tensões de saída do gerador. Desta forma, o potencial de detecção de falhas da metodologia proposta se aplicaria tanto para a máquina primária quanto para o gerador em si.

As falhas a serem consideradas para detecção através da assinatura elétrica foram definidas com base nas principais falhas apontadas pela equipe de SUAPE II nos motores de combustão interna e com base nos dados disponíveis dos grupos geradores instalados [4]. As falhas apontadas estão relacionadas à falta de lubrificação, problemas nas válvulas de admissão e escape e desalinhamento. Além dessas falhas, foram incluídas no escopo da pesquisa falhas relacionadas à retificação e ao gerador auxiliar do sistema de excitação.

Esses modos de falha serão estudados através de ensaios realizados com um laboratório de modelo reduzido e de sinais reais coletados pelo protótipo desenvolvido com o propósito de se selecionar aquelas falhas que sensibilizam

os parâmetros elétricos medidos e que podem ter sua evolução acompanhada através de curvas de tendência visando a um monitoramento preditivo dessas falhas. As falhas selecionadas terão seus padrões de falha levantados para acompanhamento automático das mesmas pelo software do sistema de manutenção preditiva em desenvolvimento.

3.0 - LABORATÓRIO DE MODELO REDUZIDO DESENVOLVIDO

3.1 Objetivos do Laboratório de Modelo Reduzido

O principal objetivo do laboratório de modelo reduzido é a simulação em escala reduzida de grupos motor-gerador a combustão interna, de forma a se inserirem falhas no motor no gerador acoplado e se observarem os efeitos destas falhas na assinatura elétrica do gerador, conforme a proposta do trabalho. As principais falhas a serem simuladas são relacionadas à falta de lubrificação, problemas nas válvulas de admissão e escape, desalinhamento mecânico e falhas relacionadas à retificação e ao gerador auxiliar do sistema de excitação.

Como objetivo secundário do laboratório de modelo reduzido, tem-se a capacitação dos profissionais da área na técnica de Análise da Assinatura Elétrica para a manutenção preditiva de grupos motor-gerador de combustão interna, permitindo a transferência de conhecimento e a continuação e a extensão da aplicação da metodologia.

3.2 Desenvolvimento do Laboratório de Modelo Reduzido

O primeiro passo foi a determinação dos métodos de inserção de falhas. Com base nesse estudo realizado, foi escolhido o modelo do grupo gerador, considerando-se os disponíveis no mercado, as características dos grupos presentes na Usina de SUAPE II e as restrições de instalação do laboratório. Por fim, foi feita uma pesquisa por fornecedores e aquisição do grupo gerador com as customizações necessárias. Estas customizações incluem a inserção de falhas e montagem de uma carga compatível com o gerador.

Para especificação do grupo gerador do laboratório de modelo reduzido, os seguintes requisitos foram considerados: o número de tempos do motor (quatro); o número de fases do gerador (três); a portabilidade do grupo gerador; o número de polos do gerador (quatro ou mais); o sistema de lubrificação (sob pressão); o tipo de acoplamento (direto); a questão da facilidade para montagem e desmontagem das peças relacionadas às variáveis de estudo; o nível de ruído. Uma vez definidas as necessidades do laboratório de modelo reduzido, os equipamentos necessários foram adquiridos. As Figuras 1(a) e 1(b) apresentam, respectivamente, o conjunto motor-gerador a diesel escolhido e a carga resistiva montada.

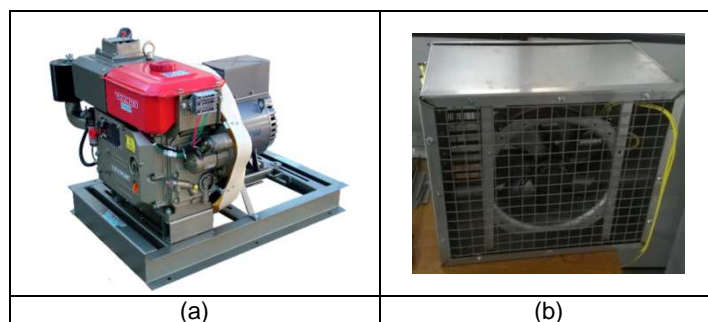


FIGURA 1 – (a) Grupo Gerador Integrante do Laboratório de Modelo Reduzido, (b) Carga Resistiva do Gerador

A Tabela 1 apresenta as características do grupo gerador do laboratório de modelo reduzido comparadas às características do grupo gerador da SUAPE.

Tabela 1 – Comparação entre Grupos Geradores da Wärtsilä e do Laboratório de Modelo Reduzido

Característica	Wärtsilä 20V46F	Laboratório
Nº. De Cilindros	20	1
Tipo de Motor	Em V	Em linha
Sistema de Lubrificação	Sob pressão	Sob pressão
Sistema de Refrigeração	Água	Água
Nº. De Válvulas/Cilindro	4	2
Tipo de Acoplamento	Direto	Direto
Sistema de Combustão	Injeção direta	Injeção direta
Gerador	12 polos	4 polos

4.0 - PROJETO DOS EXPERIMENTOS

4.1 Estudo Estatístico

Como ensaios experimentais serão realizados com o grupo gerador do laboratório de modelo reduzido a fim de se analisarem as assinaturas de tensão e corrente em busca de padrões de falhas e sua comprovação, os ensaios devem ser planejados com critério estatístico, de forma que a comprovação de padrões de falha seja feita com um determinado nível de confiança.

Para cada padrão de falha em análise do grupo motor-gerador, coleta-se um conjunto de dados experimentais, que são aquisições de dados de tensão ou corrente do estator do gerador acoplado, considerando-se diferentes condições de carga e diferentes níveis de severidade de falha. Tem-se n aquisições de dados para cada caso, e o objetivo é comparar um conjunto de dados de Baseline (máquina saudável) com um conjunto de dados de Defeito (máquina em condição de falha, considerando um dado nível de severidade de falha). Desta forma, o objetivo desta análise estatística é se determinar o número n de amostras, ou o mínimo valor de n , para se comprovar que os dados do conjunto Baseline são diferentes dos dados do conjunto Defeito, caso essa diferença exista.

A análise para detecção de defeito é realizada através da assinatura elétrica, ou seja, a grandeza é o valor da magnitude (geralmente em dB, em relação à componente fundamental) de uma determinada componente de frequência da tensão ou da corrente, que é o padrão de falha em questão. Desta forma, pode-se tomar a média aritmética μ das magnitudes da componente de frequência em análise de cada aquisição para representar o conjunto de dados, tanto de Baseline quanto de Defeito. Tem-se, então, o seguinte teste de hipóteses, em que μ_B representa a média dos dados de Baseline e μ_D representa a média dos dados de Defeito:

$$H_0: \mu_B = \mu_D$$

$$H_1: \mu_B \neq \mu_D$$

A hipótese nula H_0 , que se deseja rejeitar, é a de que as médias dos conjuntos de dados são iguais, ou seja, que não houve variação na componente de análise entre as condições de Baseline e Defeito. A hipótese alternativa H_1 é a de que as médias dos conjuntos de dados são diferentes, ou seja, houve variação na componente de análise entre as condições de Baseline e Defeito. Nota-se que se trata de um teste bilateral.

Definem-se os valores α (nível de significância do teste) e β como:

$$\alpha = P(\text{Erro I}) = P(\text{rejeitar } H_0 \mid H_0 \text{ verdadeira})$$

$$\beta = P(\text{Erro II}) = P(\text{não rejeitar } H_0 \mid H_0 \text{ falsa})$$

Deseja-se manter α e β pequenos. Porém, para um número fixo de amostras, a diminuição de um implica no aumento do outro. Como observação, tem-se que $(1-\alpha)$ é o nível de confiança do teste e $(1-\beta)$ é o poder do teste.

No problema definido, têm-se dois conjuntos de amostras independentes e deseja-se testar se estes conjuntos de dados são diferentes. Como os ensaios experimentais são realizados utilizando o mesmo processo, considerar-se-á que ambos os conjuntos de dados possuem a mesma variância. Desta forma, o teste mais adequado de se aplicar é o teste de duas amostras (*Two Sample Test*).

O efeito do teste (*Effect Size*), considerando-se os conjuntos com a mesma variância, é definido por:

$$d = \frac{|\mu_B - \mu_D|}{\sigma} \quad (1)$$

Onde d é o efeito do teste e σ é o desvio padrão, sendo o mesmo para ambos os conjuntos. O efeito d representa a mínima distância entre as médias, normalizada em termos de desvio padrão, a partir da qual será considerado que estas são diferentes entre si.

Feitas estas considerações acerca do teste em questão e dos parâmetros que o definem, o número n de amostras pode ser estimado utilizando-se a expressão [5]:

$$n = \frac{2}{d^2} \cdot (z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2 \quad (2)$$

Onde z_k é a a função de distribuição acumulada inversa para a probabilidade k .

Para o problema definido, valores de α , β e d foram definidos como: $\alpha = 0,05$ (nível de confiança de 95%); $\beta = 0,2 \Rightarrow (1-\beta) = 0,8$ (poder de teste de 80%); $d = 0,8$ desvios padrão (considerando-se significativa uma diferença entre médias a partir de 0,8 vezes o desvio padrão). Tem-se que: $z_{1-\alpha/2} = z_{0,975} = 1,96$ e $z_{1-\beta} = z_{0,8} = 0,84$. Logo,

substituindo-se em (2), tem-se que $n = 25$ aquisições para cada conjunto de dados, para se ter um nível de confiança de 95% e um poder de teste de 80%, para que se identifique estatisticamente uma diferença mínima de 0,8 desvios padrão entre as médias dos conjuntos Baseline e Defeito, se esta diferença existe.

4.2 Projeto dos Experimentos

4.2.1. Falha na Excitatriz

O método de ensaio definido foi o de simular falha no retificador da excitatriz e simular desequilíbrio no gerador auxiliar com a utilização de elementos passivos, como ilustrado na Figura 2 considerando o sistema de excitação das máquinas síncronas de SUAPE II. O resultado esperado para o ensaio é alteração no *ripple* da tensão retificada da excitatriz, o que provoca alteração nas componentes relacionadas à tensão retificada refletidas nas assinaturas de tensão e corrente do estator.

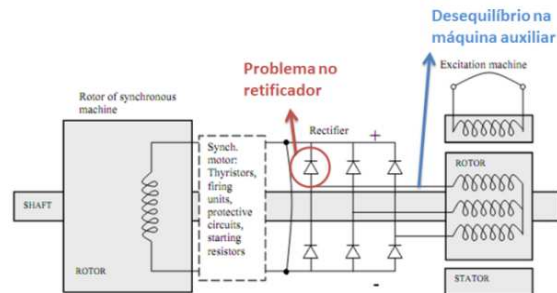


FIGURA 2 – Diagrama do Sistema de Excitação das Máquinas Síncronas de SUAPE II

4.2.2. Desalinhamento Mecânico

O método de ensaio definido foi o de se inserir desalinhamento horizontal e/ou vertical entre motor e gerador para o grupo gerador do laboratório de modelo reduzido. Os resultados esperados para o ensaio são alterações na componente de frequência de rotação das assinaturas de tensão e corrente do estator.

4.2.3. Problemas de Lubrificação

O método de ensaio definido foi o de esvaziar o reservatório de óleo lubrificante, o que leva à falta de lubrificação no pistão. Os resultados esperados para o ensaio são: engripamento do pistão, levando à alteração no movimento, modulação do torque e alteração de componentes na assinatura elétrica.

4.2.4. Problemas nas Válvulas de Admissão e Escapamento

O método de ensaio definido foi o de se trabalhar com as peças relacionadas ao comando das válvulas de admissão e escapamento (molas, tuchos, varetas). Assim, trabalhar-se-ia com itens de reposição do motor. O resultado esperado para o ensaio é a alteração no movimento, levando à modulação do torque e alteração de componentes na assinatura elétrica.

5.0 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

A parte de hardware do protótipo do sistema preditivo para diagnóstico de falhas em motores de combustão interna é composta basicamente de sensores de tensão e corrente para a transdução do sinal e hardware de aquisição. A Figura 3 apresenta os principais componentes do protótipo desenvolvido.

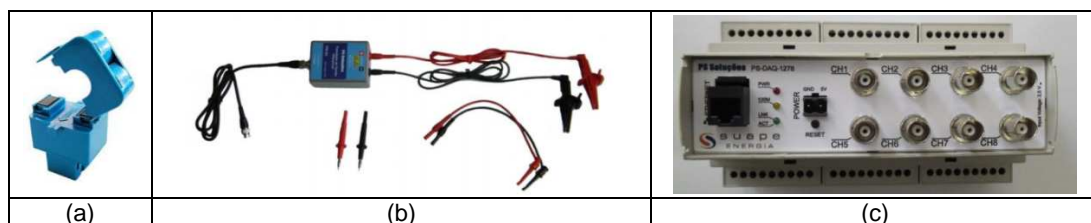


FIGURA 3 – (a) Transdutor de Corrente Empregado no Protótipo, (b) Transdutor de Tensão Empregado no Protótipo, (c) Visão Frontal do Hardware de Aquisição Montado

Os transdutores de corrente, na Figura 3(a), são do tipo PS-TT50; os transdutores de tensão, na Figura 3(b), são do tipo tensão diferencial modelo TTD-01; e o sistema de aquisição de dados utilizado é o PS-DAQ-1278, ilustrado na Figura 3(c). Este sistema é um kit de placas e interface de software que permite a montagem de sistemas de aquisição de dados remotos com resolução de 24 bits e frequência de amostragem de até 96 MHz. O sistema

possui 8 canais para aquisição simultânea de sinais, no entanto, para a aplicação em questão, serão usados apenas 6 canais.

Toda a parte de hardware do protótipo já se encontra instalada na Usina de SUAPE II, conforme descrito em seção posterior, e um dos protótipos está instalado no laboratório de modelo reduzido.

6.0 - SIMULAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO NA MÁQUINA AUXILIAR DA EXCITATRIZ

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a simulação de falha de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz. Esta falha é simulada através da inserção de uma resistência série em uma das entradas AC do retificador da excitatriz do laboratório de modelo reduzido, uma vez que seu sistema de excitação é por retificador com escovas.

Primeiramente, desenvolveu-se uma simulação computacional para se avaliar o efeito desta falha no conteúdo espectral das tensões e correntes retificadas e, assim, apontar as componentes espectrais que deveriam ser analisadas para esta falha. Em seguida, realizaram-se ensaios de simulação desta falha com o laboratório de modelo reduzido, considerando-se diferentes níveis de severidade de falha, e os resultados foram analisados.

6.1. Resultados de Simulação

Uma simulação computacional foi desenvolvida em MATLAB® considerando-se a parte do retificador da excitatriz do gerador síncrono do laboratório de modelo reduzido alimentada com sinal senoidal de frequência fundamental de 60 Hz. A falha foi simulada através da inserção de uma resistência série de $1,0 \, [\Omega]$ em uma das entradas AC do retificador. A Figura 4(a) apresenta os sinais no tempo de tensão e corrente retificados antes e depois da inserção da falha, que acontece no instante de tempo na metade do eixo horizontal. Nota-se a variação nas formas de onda de tensão e corrente após a inserção da falha. A Figura 4(b) apresenta a assinatura elétrica da tensão retificada antes e depois da inserção da falha.

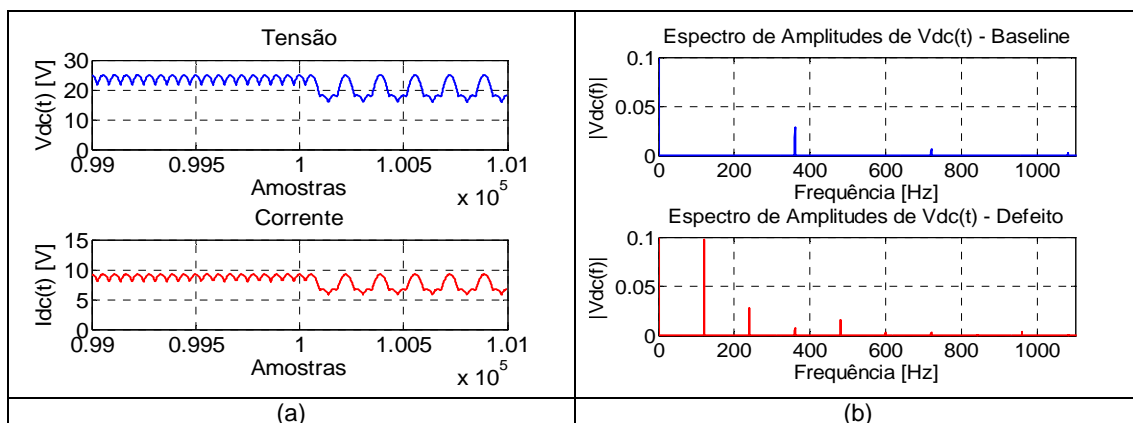


FIGURA 4 – (a) Sinais no Tempo de Tensão e Corrente Retificadas Antes e Depois da Inserção da Falha, (b) Assinatura da Tensão Retificada Antes (Baseline) e Depois (Defeito) da Inserção da Falha

Nota-se que a inserção da falha provocou o surgimento de componentes múltiplas de 120 Hz (desconsiderando-se as múltiplas de 360 Hz) e a diminuição das componentes múltiplas de 360 Hz. A assinatura da corrente retificada apresentou o mesmo comportamento, sendo que foi omitida por questão de espaço.

A análise realizada foi feita para as grandezas retificadas (tensão e corrente DC de excitação). Logo, como na metodologia proposta no trabalho a análise é feita para as grandezas elétricas do estator (AC), deve-se somar a frequência fundamental. Considerando-se a frequência fundamental de 60 Hz, tem-se, então, que um padrão potencial para a detecção de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz é o acompanhamento das componentes do tipo $60 + k \cdot 120$, ou seja, $(1+2k) \cdot f_1$, onde f_1 é a frequência fundamental e desconsiderando-se os valores k que são múltiplos de 3. A primeira banda lateral direita deste padrão é a componente terceiro harmônico.

6.2. Resultados Experimentais

Os experimentos foram realizados no laboratório de modelo reduzido com o protótipo do sistema desenvolvido. Considerou-se uma condição de carga de 88% da nominal do gerador, utilizando-se a carga resistiva customizada desenvolvida. Foram coletados dados de baseline e dados de simulação de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz, o que foi feito inserindo-se resistências série em uma das entradas AC do retificador da excitatriz. Os níveis de severidade de falha considerados foram de resistência de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 Ω , sendo que um maior valor de resistência implica em um nível de maior severidade de falha.

A Figura 5 apresenta, como exemplo, as tensões e correntes do estator para uma aquisição de baseline. Na Figura 8(b), notam-se algumas componentes em destaque nas assinaturas elétricas.

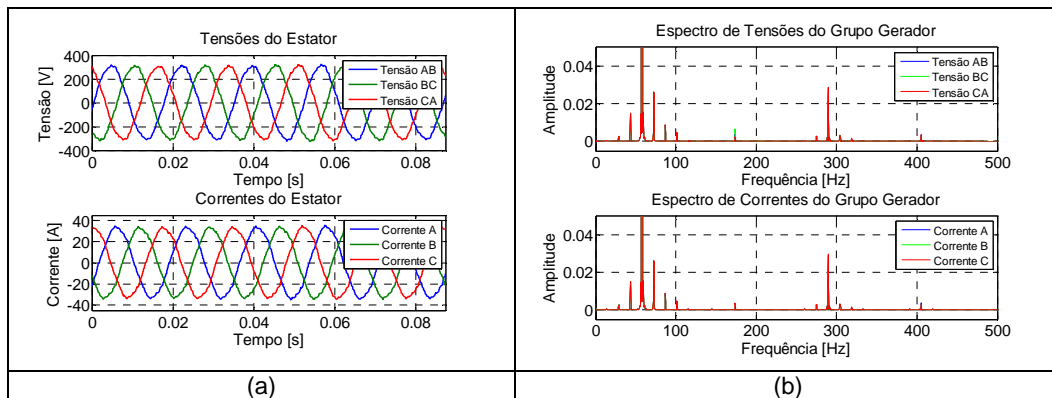


FIGURA 5 – Tensões e Correntes do Estator: (a) no Domínio do Tempo, (b) no Domínio da Frequência

Os dados coletados foram analisados com base no padrão de falha em potencial detectado através dos resultados de simulação. As Figuras 6(a) e 6(b) apresentam, respectivamente, as curvas de tendência de terceiro harmônico na assinatura da tensão e de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA (*Extended Park's Vector Approach*) da corrente. As curvas de tendência foram construídas considerando-se a ordem crescente da severidade de falhas, ou seja: baseline; falha com 0,5 Ω ; falha com 1,0 Ω ; falha com 1,5 Ω e falha com 2,0 Ω . Nota-se nas Figuras 9 e 10 que estes padrões de falha responderam, ou seja, que um aumento na severidade de falha provocou um aumento da componente em análise.

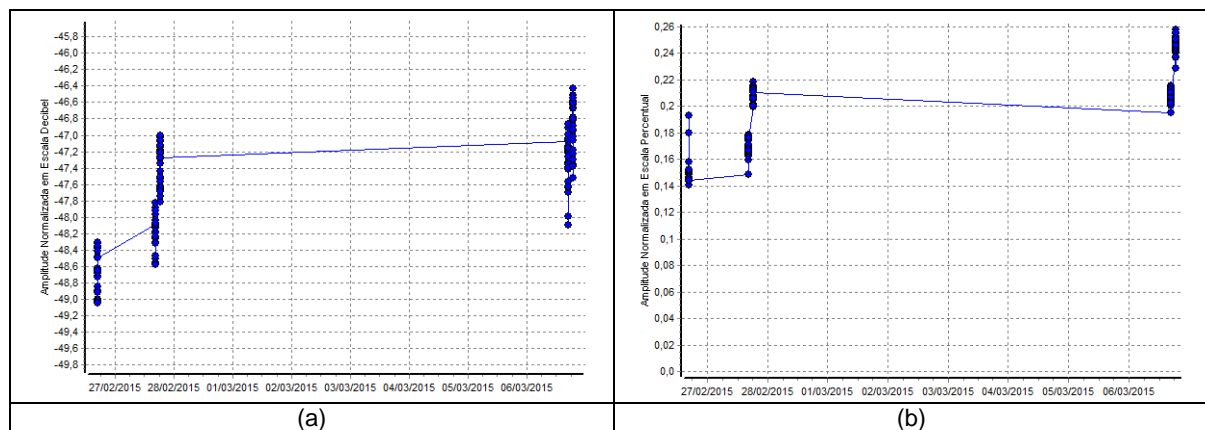


FIGURA 6 – (a) Tendência de Terceiro Harmônico da Assinatura de Tensão, (b) Tendência de Desequilíbrio Elétrico na Assinatura de EPVA de Corrente

Para ambos os casos apresentados, realizou-se um teste de hipóteses *Two Sample Test* para verificar se o conjunto de dados de Baseline era realmente diferente do conjunto de dados de Defeito (para o Defeito, considerou-se apenas o nível de severidade mais grave, de 2,0 Ω). Uma observação é que se adotou $\alpha = 0,05$, logo, o resultado do teste vai implicar em conjuntos de dados diferentes quando P-Value < 0,05. A Tabela 2 apresenta os resultados de *Two Sample Test* para os padrões analisados de terceiro harmônico na assinatura de tensão e desequilíbrio elétrico no EPVA de corrente.

Tabela 2 – Resultados de *Two Sample Test* para os Padrões Analisados

Terceiro Harmônico na Assinatura da Tensão					Desequilíbrio Elétrico no EPVA da Corrente				
	N	Mean	StDev	SE Mean		N	Mean	StDev	SE Mean
Baseline	26	-48,696	0,245	0,048	Baseline	26	0,1512	0,0113	0,0022
Defeito	26	-46,861	0,317	0,062	Defeito	26	0,24592	0,0063	0,0012
Diferença estimada: 1,8349					Diferença estimada: 0,09477				
95% IC para diferença: (1,6771; 1,9927)					95% IC para diferença: (0,08968; 0,09986)				
T-Test da diferença = 0 (vs not =): P-Value = 0,000					T-Test da diferença = 0 (vs not =): P-Value = 0,000				

Em ambos os casos, nota-se que o conjunto de dados de Baseline é diferente do conjunto de dados de Defeito, comprovando-se que os padrões responderam. Como observação final, conforme anteriormente mencionado, estes resultados apresentados são preliminares. O levantamento dos padrões de falha está em andamento, sendo que

testes estão sendo realizados exaustivamente com o laboratório de modelo reduzido para confirmar os padrões de falha.

7.0 - INSTALAÇÃO EM AMBIENTE REAL

Conforme mencionado na Seção 5.0, os protótipos estão instalados em ambiente real para o monitoramento dos geradores 6 e 11 da Usina de SUAPE II. A Figura 7 apresenta, um exemplo de sinal real coletado com o protótipo desenvolvido no gerador 6. As componentes espectrais em destaque na assinatura da tensão e corrente são os harmônicos do 60Hz, incluindo-se aí as componentes de falha do padrão estudado na seção 6. Além disso, no entorno do 60 Hz podem ser vistas as frequências relacionadas à rotação do conjunto que, por sua vez, estão relacionadas a outros padrões de falhas.

Fazendo-se uma analogia com o sinal de baseline do grupo-gerador do laboratório (fig. 5), infere-se que as condições de operação da unidade 6 encontram-se dentro da normalidade. Contudo, vale ressaltar que a partir desse momento, as curvas de tendência dessa máquina, com relação aos padrões de falhas levantados no estudo, serão acompanhadas ao longo do tempo em busca de desvios que venham a prever a deterioração da máquina no tocante às falhas sob monitoramento.

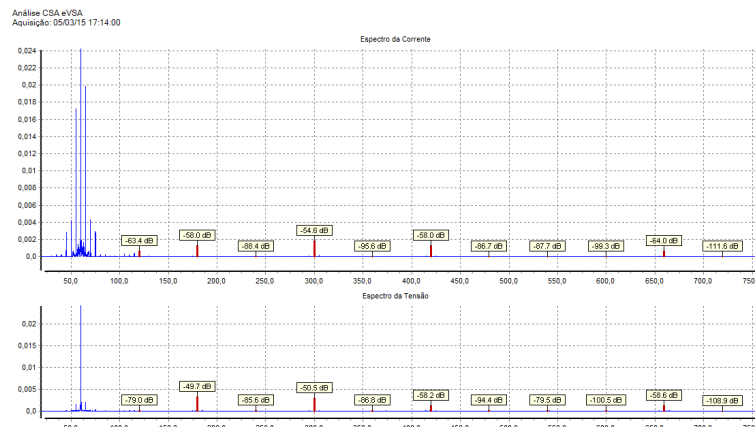


FIGURA 7 – Espectro de Tensão e Corrente de Sinal Coletado no Gerador 6 SUAPE II

8.0 - CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um sistema preditivo para diagnóstico de falhas em grupos motor-gerador de combustão interna através da análise da assinatura elétrica. A originalidade da abordagem proposta é evidente, o que abre um novo campo de pesquisa. Além de inovadora, a metodologia proposta pode ser aplicada a qualquer termelétrica com motores de combustão interna, sendo um desenvolvimento de maior abrangência no setor elétrico e não apenas de aplicação local.

As principais contribuições deste trabalho foram o desenvolvimento do protótipo, desenvolvimento do laboratório de modelo reduzido, projetos dos ensaios controlados, instalação do protótipo em ambiente real e resultados preliminares obtidos através de simulação de falha na excitatriz do gerador. Os resultados futuros esperados são: confirmação dos padrões de falhas em motores de combustão interna na assinatura elétrica do gerador, incorporação do sistema preditivo à rotina de manutenção da SUAPE II, detecção das falhas estudadas em ambiente real, capacitação do pessoal da Usina.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bonaldi, E.L., De Oliveira, L.E.L., Borges Da Silva, J.G., Lambert-Torres, G., Borges Da Silva, L.E. - "Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors", In: *Induction Motors - Modelling and Control*, por Rui Araujo, ISBN 978-953-51-0843-6, InTech, Croácia, pp. 487-520, 2012.
- (2) H. Penrose, "Electrical Motor Diagnostics for Generators Part 3: Analysis", ALL-TEST Pro, 2005.
- (3) E. L. Bonaldi, L. E. L. De Oliveira, G. L. Torres, J. G. B. Da Silva, L. E. B. Da Silva, M. Ribeiro, A. Venceslau, "Sistema para Diagnóstico Termomecânico de Falhas em Motores de Combustão Interna", IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético CBPE, Florianópolis 2014.
- (4) Synchronous Machine AMG 1600UT12 DSE, Wärtsilä, Project UTE Suape II.

(5) "Designing Your Experiment: How Large the Sample Do You Need?", BESTA – Center for Bioengineering Statistics, BME, GT, 2007: <http://zoe.bme.gatech.edu/~bv20/bmed2803/Bank72/samplesize.pdf>. Acesso em 22/01/2015.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Phillip Luiz de Mendonça

Nasceu em Recife-PE no Brasil em 1980. Recebeu o título de Técnico em Eletrotécnica em 1997 pelo IFPE, o de Engenheiro Eletricista em 2006 e o de Especialista em Gestão da Manutenção em 2011 pela UPE, o de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração materiais e fabricação, em 2013 pela UFPE e atualmente é discente do programa de Doutorado desta mesma instituição. Com alguns artigos técnicos divulgados, conhecimento e prática do PMBOK/PMI e domínio de metodologias de engenharia de manutenção e ferramentas de gestão tais como, RCM, TPM, FTA, FMEA, PARETO, ISHIKAWA, BSC, ISO, e SEIS SIGMA, possui vasta experiência no sistema elétrico de potência nas atividades de gestão, planejamento, engenharia, manutenção e construção de linhas de transmissão, redes de distribuição, equipamentos e subestações de grande porte. Tem seguido como linha de pesquisa o desempenho de isoladores do tipo compósito em linhas de transmissão de alta tensão. Atualmente desempenha a função de coordenador de engenharia elétrica da Usina Termoelétrica Energética Suape II S.A.

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.

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. Pesquisador 1B do CNPq. Professor Titular da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), 1983-2012. Engenheiro Eletricista, formado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), em 1982. Mestre em Engenharia Elétrica pela EFEI, em 1986. Doutor (Ph.D.) em Engenharia Elétrica pela École Polytechnique de Montreal, Canadá, em 1990. 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. Professor do Curso de Especialização em Sistemas Elétricos (CESE - ELETROBRÁS), 1990-2001. Instrutor e Consultor da FUPAI, desde 1983. Dr. Lambert-Torres também é autor, coautor ou organizador de 9 livros e mais de 30 capítulos de livros.

Jonas Guedes Borges da Silva

Possui graduação em Engenharia de Computação (2005) pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e mestrado (2008) e doutorado (2015) em Engenharia Elétrica, também pela mesma instituição. Tem experiência na área de Engenharia da Computação atuando principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento de softwares, processamento digital de sinais e manutenção preditiva de motores elétricos. Atualmente trabalha como pesquisador em diversos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento para o setor elétrico e como professor universitário na Fundação de Ensino e Pesquisa de Itajubá (FEPI).

Camila Paes Salomon

Nascida em Itajubá, MG, em 15 de abril de 1989.

Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2011 e 2014). 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.

Wilson Cesar Santana

Nascido em São José dos Campos, SP, em 21 de janeiro de 1976.

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (2001) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2004). Atualmente é doutorando pela Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, Eletrônica de Potência e Sistemas de Controle.

Luiz Eduardo Borges da Silva

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1977), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1982) e doutorado em Engenharia Elétrica - Ecole Polytechnique de Montreal (1988). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos, atuando principalmente nos seguintes temas: controle inteligente, eletrônica de potência, operação de sistemas, controle adaptativo e manutenção preditiva. Orientou mais de 50 teses de doutorado e dissertações de mestrado. Publicou mais de 200 artigos técnicos em revistas e conferências nacionais e internacionais. É Senior Member do IEEE.

Cristiano Nascimento de Brito

Nasceu em Recife-PE no Brasil em 1981. Recebeu o título de Técnico em Eletrotécnica em 1999 pela ETFPE, o de Engenheiro de Produção em 2013 e atualmente é discente do programa de Mestrado da UFPE. Possui vasta experiência no sistema elétrico nas atividades de comissionamento e start-up de Usinas Térmicas do ciclo diesel, PCH's e subestações de grande porte. Atua em cálculos de desempenho térmico(Heat-rate) e consumo específico. Atualmente desempenha a função de supervisor de elétrica da Usina Termoelétrica Energética Suape II S.A. operada pela Wartsilä Brasil Ltda.