

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

PHILLIP LUIZ DE MENDONÇA

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA
ATRAVÉS DA ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA DO GERADOR
ACOPLADO**

Recife
2017

PHILLIP LUIZ DE MENDONÇA

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA
ATRAVÉS DA ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA DO GERADOR
ACOPLADO**

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva

Recife
2017

M539d Mendonça, Phillip Luiz de.

Diagnóstico de falhas em motores de combustão interna através da análise da assinatura elétrica do gerador acoplado / Phillip Luiz de Mendonça. - 2018.

161 folhas, il., tabs., abr., siglas e simb.

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Assinatura elétrica. 3. Detecção de falhas. 4. Gerador síncrono. 5. Motor de combustão interna. 6. Técnica preditiva. I. Shinohara, Armando Hideki (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-53

15 de dezembro de 2017.

“DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA
ATRAVÉS DA ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA DO GERADOR ACOPLADO”

PHILLIP LUIZ DE MENDONÇA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE.

Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. LUIZ EDUARDO BORGES DA SILVA
COORIENTADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)

Prof. Dr. LUIZ EDUARDO BORGES DA SILVA (UNIFEI)

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE)

Prof. Dr. EDSON GUEDES DA COSTA (UFCEG)

Dr. ERIK LEANDRO BONALDI (INSTITUTO GNARUS)

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR (UFPE)

A fonte de inspiração e sabedoria do
meu ser, minha mãe, Lindalva Antnia da Silva.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeira instância, pelo fato de me agraciar com uma vida de expressivos momentos de felicidade e de gozo em saúde. Todos estes sobre seu acompanhamento ininterrupto.

Aos meus pais, pela educação, embora simples, de conteúdo construtivo, ético e resiliente.

A minha esposa pela compreensão dos meus momentos de ausência e pelo absoluto incentivo.

As minhas filhas, que, pelo simples fato de existirem, vieram abrilhantar a minha vida com infinitos momentos de aprendizagem.

Aos professores Armando Hideki Shinohara e Luiz Eduardo Borges da Silva, pela orientação, apoio e amizade construída.

Ao pesquisador Erik Leandro Bonaldi, pelo apoio relevante e incondicional nos momentos mais decisórios de execução da pesquisa.

Aos colegas da empresa PS Soluções, pela sinergia, profissionalismo e apoio.

Aos colegas da empresa Energética Suape II S.A., pela oportunidade de me fazer colaborador de sua equipe e por ceder os dados necessários para execução da pesquisa.

Aos colegas do ITEP, pelo apoio, entendimento e aceitação das minhas circunstâncias de trabalho.

Por fim, a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste sonho.

*“O único homem que está isento de
erros, é aquele que não arrisca acertar”*

(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de falhas em grupos motor-gerador de combustão interna utilizados na geração de energia elétrica através da técnica de análise da assinatura elétrica (ESA). Isto foi possível através da realização de ensaios experimentais num laboratório de modelo reduzido onde se tinha instalado um motor a diesel do tipo monocilíndrico operando como máquina primária de um gerador síncrono. Lá foram simuladas algumas falhas, em ambas as máquinas, e colhidos os sinais elétricos de tensão e de corrente fornecidos pelo gerador. A partir disto procedeu-se a interpretação destes sinais em forma de espectro, com processamento via transformada rápida de Fourier (FFT), buscando divergência em suas características com outros oferecidos pelas máquinas na condição de normalidade, isto é, isenta de falha. Em seguida foi realizada uma exploração matemática das grandezas envolvidas, no sentido de representar cientificamente a metodologia. O resultado foi a identificação de padrões de falha típicos para cada tipo falha simulada, gerando como contribuição a abertura de uma nova linha de pesquisa da técnica ESA, que é a de identificação de problemas em motores de combustão interna. Isto também trouxe a possibilidade de correlacionar grandezas mecânicas e elétricas quando se utiliza o gerador como elemento transdutor de um motor numa operação acoplada. Ainda foi possível realizar aquisições de sinais em grupos motor-gerador de uma usina termelétrica com o intuito de buscar os padrões de falha observados nos ensaios experimentais e avaliar o comportamento do espectro elétrico fornecido por um motor do tipo multicilíndrico.

Palavras-chave: Assinatura elétrica. Detecção de falhas. Gerador síncrono. Motor de combustão interna. Técnica preditiva.

ABSTRACT

This work presents the development of a diagnostic methodology of failure in groups generating internal combustion of electric energy by means of an electric signature analysis (ESA) technique. This was possible by conducting experimental tests in a small model laboratory where a single-cylinder diesel engine is installed as the primary machine of a synchronous generator. There were simulated some faults, both as machines, and collected the electrical signals of voltage and current supplied by the generator. From this, we performed an interpretation of these signals in the form of a spectrum, with fast Fourier transform (FFT) processing, seeking divergence in its characteristics with other components in conditions of normality, that is, fault-free. Then a mathematical exploration of the surrounding greatneses was carried out, it does not have a sense of representing the methodology scientifically. The result was an identification of typical failure patterns for each type of simulated fault, generating as a contribution an opening of a new research line of the ESA technique, which is an identification of problems in internal combustion engines. This has also provided a possibility of correlating mechanical and electrical greatneses when using the generator as a transducer element of a coupled load motor. It was also possible to perform signal acquisition in the motor-generator groups of a thermoelectric plant with the purpose of searching for the failure patterns observed in the experimental tests and evaluate the behavior of the electric spectrum provided by a multi-cylindrical motor.

Keywords: Electrical signatures. Fault detection. Internal combustion engine. Predictive technique. Synchronous generator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Motor de combustão interna	33
Figura 2 - Conjunto cilindro-pistão-biela-manivela de um motor de combustão interna.....	34
Figura 3 - Esquema de funcionamento de um motor de quatro tempos do ciclo Diesel	35
Figura 4 - Curvas típicas de irregularidades para um motor de quatro cilindros com duas ignições por rotação.....	35
Figura 5 - Representação do diagrama p–V num motor de 4 tempos	37
Figura 6 - Esquema do mecanismo do conjunto biela-manivela	37
Figura 7 - Variação de torque x ângulo do virabrequim.....	40
Figura 8 - Princípio de funcionamento de um gerador.....	44
Figura 9 - Bobina de campo de um gerador.....	44
Figura 10 - Distribuição magnética sob um polo	45
Figura 11 - Chapa ranhurada.....	46
Figura 12 - Detalhe de um enrolamento.....	46
Figura 13 - Detalhe de um rotor	47
Figura 14 - Rotor de polo saliente	48
Figura 15 - Rotor de polo liso	48
Figura 16 - Modelo de funcionamento do sistema de excitação de um gerador	49
Figura 17 - Imãs permanentes no estator	49
Figura 18 - Sistema de autoexcitação de um gerador síncrono	50
Figura 19 - Sistema típico para análise espectral da corrente de um motor de indução trifásico	54
Figura 20 - Integração de um sistema de diagnóstico automático de um motor de indução trifásico	55

Figura 21 - Diagrama de bloco simplificado de aplicação da técnica ESA	56
Figura 22 - Diagrama das etapas da metodologia utilizada no trabalho	56
Figura 23 - Detalhes do laboratório de modelo reduzido	57
Figura 24 - Grupo motor-gerador do laboratório de modelo reduzido.....	58
Figura 25 - Equipamentos de transdução e aquisição de sinais. a) Transformador de corrente, b) Transformador de tensão e c) Sistema de aquisição de dados	58
Figura 26 - Sistema de transdução e aquisição de sinais instalado na usina termelétrica. a) Detalhe do sistema de aquisição de dados e do transformador de tensão e b) Detalhe do transformador de corrente	59
Figura 27 - Carga resistiva utilizada no grupo motor-gerador no laboratório de modelo reduzido. a) Detalhe do ventilador de resfriamento e b) Detalhe das conexões	59
Figura 28- Ilustração da falha no retificador da excitatriz do gerador por inserção de resistores	63
Figura 29 - Detalhe do resistor utilizado para inserção da falha.....	64
Figura 30 - Inserção de falha de desalinhamento mecânico	64
Figura 31 - Sistema de análise de um conjunto motor-gerador a partir da técnica ESA	65
Figura 32 - Diagrama de bloco da técnica ESA aplicada a um conjunto motor-gerador	66
Figura 33 - Sinais no domínio do tempo de corrente de um motor trifásico.....	69
Figura 34 - Sinais no círculo de Park de um motor trifásico saudável	70
Figura 35 - Desequilíbrio entre as fases de um motor de indução trifásico	71
Figura 36 - Alterações promovidas pelo desequilíbrio de fases de um motor trifásico. a) Círculo de Park distorcido e b) Presença da componente de duas vezes a frequência de alimentação.....	72
Figura 37 - Regiões de interesse do conjunto motor-gerador.....	72
Figura 38 - Parâmetros geométricos de um pistão de um motor de combustão interna.....	74
Figura 39 - Grupos motor-gerador da usina termelétrica.....	81

Figura 40 - Usina termelétrica UTE SUAPE II	83
Figura 41 - Resultado da simulação computacional. a) Sinais no tempo de tensão e de corrente retificadas antes e depois da inserção da falha por desequilíbrio elétrico e b) Assinatura da tensão retificada antes e depois da inserção da falha por desequilíbrio elétrico	85
Figura 42 - Sinais de tensão e de corrente no domínio do tempo para condição de baseline	86
Figura 43 - Assinaturas em frequência de tensão e de corrente para condição de baseline	86
Figura 44 - Sinais de tensão e de corrente no domínio do tempo para condição de falha por desequilíbrio elétrico	87
Figura 45 - Assinaturas em frequência de tensão e de corrente para condição de falha por desequilíbrio elétrico	87
Figura 46 - Curva de tendência do terceiro harmônico na assinatura da tensão devido a falha por desequilíbrio elétrico	88
Figura 47 - Curva de tendência de terceiro harmônico na assinatura da corrente devido a falha por desequilíbrio elétrico.....	88
Figura 48 - Sinais no domínio do tempo de tensão e de corrente retificados antes e depois da inserção da falha por curto-circuito no diodo do retificador.....	89
Figura 49 - Assinatura em frequência da tensão retificada antes e depois da inserção da falha por curto-circuito no diodo do retificador.....	90
Figura 50 - Assinatura em frequência da corrente retificada antes e depois da inserção da falha por curto-circuito no diodo do retificador.....	90
Figura 51 - Curva de tendência de terceiro harmônico na assinatura de tensão devido a falha por desequilíbrio elétrico	93
Figura 52 - Curva de tendência de terceiro harmônico na assinatura de corrente devido a falha por desequilíbrio elétrico.....	93
Figura 53 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com terceiro harmônico. a) Condição de baseline e b) Condição de falha por desequilíbrio elétrico.....	94
Figura 54 - Curva de tendência de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA de tensão	95

Figura 55 - Curva de tendência de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA de corrente	95
Figura 56 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com desequilíbrio elétrico por EPVA. a) Condição de baseline e b) Condição de falha.....	96
Figura 57 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de tensão por falha de desequilíbrio elétrico	97
Figura 58 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de corrente por falha de desequilíbrio elétrico.....	98
Figura 59 - Sequência negativa da componente fundamental de corrente e tensão. a) Condição de baseline e b) Condição de falha por desequilíbrio elétrico.....	98
Figura 60 - Curva de tendência de segundo harmônico na assinatura de tensão devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador	100
Figura 61 - Curva de tendência de segundo harmônico na assinatura de corrente devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador	100
Figura 62 - Curva de tendência de quarto harmônico na assinatura de tensão devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador.....	101
Figura 63 - Curva de tendência de quarto harmônico na assinatura de corrente devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador	101
Figura 64 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com harmônicos pares. a) Condição de baseline e b) Condição de falha por curto-circuito no diodo do retificador	102
Figura 65 - Inserção de arruelas no parafuso de fixação do gerador para simulação de falha de desalinhamento mecânico.....	103
Figura 66 - Curva de tendência de meia vez a frequência de rotação na assinatura de tensão devido a falha de desalinhamento mecânico.....	104
Figura 67 - Curva de tendência de meia vez a frequência de rotação na assinatura da corrente devido a falha de desalinhamento mecânico	105
Figura 68 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com meia vez a frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha por desalinhamento mecânico	105

Figura 69 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha no anel do pistão	107
Figura 70 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha no anel do pistão	108
Figura 71 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha no anel do pistão	108
Figura 72 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha no anel do pistão	109
Figura 73 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha no anel do pistão	109
Figura 74 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha no anel do pistão	110
Figura 75 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape	111
Figura 76 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape	112
Figura 77 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape	112
Figura 78 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape	113
Figura 79 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape	113
Figura 80 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha nas válvulas de admissão e escape....	114
Figura 81 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha na válvula de injeção	115
Figura 82 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha na válvula de injeção	116

Figura 83 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha na válvula de injeção	116
Figura 84 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha na válvula de injeção	117
Figura 85 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha na válvula de injeção	117
Figura 86 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha na válvula de injeção	118
Figura 87 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha na válvula de admissão	119
Figura 88 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha na válvula de admissão	120
Figura 89 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha na válvula de admissão	120
Figura 90 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha na válvula de admissão	121
Figura 91 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha na válvula de admissão	121
Figura 92 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha na válvula de admissão	122
Figura 93 - Curva de tendência de corrente RMS na fase A para as unidades geradoras da usina termelétrica.....	124
Figura 94 - Curva de tendência de tensão RMS na fase A para as unidades geradoras da usina termelétrica.....	125
Figura 95 - Curva de tendência de velocidade rotórica para as unidades geradoras da usina termelétrica	126
Figura 96 - IDH de tensão da fase A para as unidades geradoras da usina termelétrica ...	127
Figura 97 - IDH de tensão da fase B para as unidades geradoras da usina termelétrica ...	127
Figura 98 - IDH de tensão da fase C para as unidades geradoras da usina termelétrica ...	128

Figura 99 - Curva de tendência de terceiro harmônico nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica	130
Figura 100 - Assinatura em frequência com terceiro harmônico para as unidades geradoras da usina termelétrica.....	131
Figura 101 - Curva de tendência de desequilíbrio elétrico nas assinaturas de EPVA de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica.....	132
Figura 102 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com desequilíbrio elétrico no EPVA para as unidades geradoras da usina termelétrica.....	133
Figura 103 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de tensão para as unidades geradoras da usina termelétrica	135
Figura 104 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica	136
Figura 105 - Padrão de sequência negativa na componente fundamental para as unidades geradoras da usina termelétrica	136
Figura 106 - Curva de tendência de segundo harmônico nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica	138
Figura 107 - Curva de tendência de quarto harmônico nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica	139
Figura 108 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com harmônicos pares para as unidades geradoras da usina termelétrica.....	140
Figura 109 - Curva de tendência de meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica.....	142
Figura 110 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com meia vez a frequência de rotação para as unidades geradoras da usina termelétrica	143
Figura 111 - Curva de tendência de frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica	145
Figura 112 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação para as unidades geradoras da usina termelétrica	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de irregularidade x número de cilindros.....	41
Tabela 2 - Conjunto de dados experimentais das falhas.....	60
Tabela 3 - Tipos de falha x padrões de falha	129
Tabela 4 - Valores médios das curvas de tendência dos padrões de falha para as unidades geradoras da usina termelétrica	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i> - Corrente Alternada (CA)
ASTM	American Society Testing and Materials
CI	<i>Compression Ignition</i> - Ignição por Compressão
CSA	<i>Current Signature Analysis</i> - Análise da Assinatura de Corrente
C.G.	Centro de Gravidade
DC	<i>Direct Current</i> - Corrente Contínua (CC)
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> - Transformada Discreta de Fourier
EPVA	<i>Extended Park's Vetor Approach</i> - Abordagem Estendida do Vetor de Park
ESA	<i>Electrical Signature Analysis</i> - Análise da Assinatura Elétrica
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> - Transformada Rápida de Fourier
FEM	Força Eletro Motriz
FMM	Força Magneto Motriz
GI	Grau de Irregularidade
IDH	Índice de Distorção Harmônica
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i> - Análise da Assinatura de Corrente do Motor
MCI	Motor de Combustão Interna
MSP	Manutenção do Sistema Produtivo
MM	Manutenção de melhoria
OCB1	Óleo Combustível com Baixo Teor de Enxofre
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PSD	<i>Power Spectral Density</i> - Densidade Espectral de Potência
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> - Manutenção Centrada na Confiabilidade
RMS	<i>Root Mean Square</i> - Valor eficaz
RPM	Rotações por minuto
SI	<i>Spanish Ignition</i> - Ignição por Faísca
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> - Manutenção Produtiva Total
VSA	<i>Voltage Signature Analysis</i> - Análise da Assinatura de Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Frequência do sinal em Hz.
f_1	Frequência fundamental do sinal em Hz.
f_{mp}	Frequência característica de falhas na máquina primária em Hz.
f_r	Frequência de rotação do gerador em Hz.
$f_r(d)$	Frequência de rotação do gerador na banda lateral direita em Hz.
$f_r(e)$	Frequência de rotação do gerador na banda lateral esquerda em Hz.
F_p	Força no pistão do motor devida à pressão dos gases.
F_γ	Amplitude do γ -ésimo harmônico da FMM.
H_0	Hipótese nula.
H_1	Hipótese alternativa.
i_A	Corrente na fase A de um motor trifásico.
i_B	Corrente na fase B de um motor trifásico.
i_C	Corrente na fase C de um motor trifásico.
i_m	Valor de pico da corrente numa dada fase de um motor trifásico.
i_D	Corrente de eixo direto de um motor trifásico.
i_Q	Corrente em quadratura de um motor trifásico.
i_d	Valor de pico da corrente de sequência direta de um motor trifásico.
i_i	Valor de pico da corrente de sequência inversa de um motor trifásico.
$M_{\max}$	Momento máximo do motor.
$M_{\text{méd}}$	Momento médio do motor.
p'	Número de polos do gerador.
p, P	Pressão na câmara de combustão do motor.
p_0	Pressão no cárter do motor.
P_{falha}	Pressão de falha do motor.
P_{in}	Pressão de admissão do motor.
P_{ex}	Pressão de expansão do motor.

$T_i(t)$	Torque instantâneo total do motor.
T_i	Torque indicado do motor.
Tr	Torque resistivo do motor.
Te	Torque de expansão do motor.
Tc	Torque de compressão do motor.
T_{falha}	Torque de falha do motor.
T_{const}	Torque constante do motor.
T_{mp}	Amplitude da oscilação de torque causada pela falha mecânica na máquina primária.
V_0	Volume de folga do cilindro do motor.
V	Volume de entrada de ar do cilindro do motor.
V_t	Volume total do cilindro do motor.
X	Amplitude da fundamental.
X_0	Amplitude da componente característica da falha.
μ	Média aritmética das magnitudes da componente em análise.
μ_B	Média aritmética das magnitudes da componente em análise na condição de baseline.
μ_D	Média aritmética das magnitudes da componente em análise na condição de defeito ou falha.
ω_a	Frequência angular em rad/s.
ω_{mp}	Frequência angular característica de falhas na máquina primária em rad/s.
ω	Velocidade instantânea do virabrequim do motor.
α_d	Ângulo de fase inicial da corrente de sequência direta em rad.
α	Ângulo de fase em rad.
α'	Nível de significância do teste.
$E_{\varphi\gamma}$	Força eletromotriz.
N	Velocidade do campo girante do gerador.
B	Indução do campo magnético.
L	Comprimento do condutor.

v	Velocidade linear do condutor.
N_r	Número de ranhuras do gerador.
m	Número de fases do gerador.
q	Número de bobinas por polo do gerador.
D	Distância entre ranhuras no gerador.
t	Variável tempo.
β_i	Ângulo de fase inicial da corrente de sequência inversa em rad.
n	Tamanho da amostra.
d	Efeito do teste.
σ	Desvio padrão.
Z_K	Função de distribuição acumulada inversa para a probabilidade K.
Ap	Área do pistão do motor.
r	Raio da manivela do motor.
l	Comprimento da biela do motor.
θ	Posição angular do virabrequim do motor.
x_{pist}	Posição do pistão do motor.
$J(\theta)$	Constante de inércia varável do virabrequim do motor.
φ	Fase do enrolamento do estator do gerador.
γ	Ordem do harmônico.
w	Número de enrolamentos em série no estator do gerador.
$k_{w\gamma}$	Fator de enrolamento do γ -ésimo harmônico.
l	Comprimento efetivo do enrolamento do estator do gerador.
τ	Passo polar do gerador.
Λ	Permeância magnética do entreferro do gerador.
J_n	Função de Bessel.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	24
1.2	MOTIVAÇÃO	26
1.3	OBJETIVOS.....	26
1.3.1	Objetivo Geral	26
1.3.2	Objetivo Específico	27
1.4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	27
1.4.1	Problema	27
1.4.2	Hipótese.....	28
1.5	CONTRIBUIÇÕES	28
1.6	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	29
2	REFERENCIAL TEÓRICO	30
2.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	31
2.1.1	Breve Histórico.....	31
2.1.2	Funcionamento	32
2.1.3	Flutuações na Operação.....	35
2.2	GERADOR SÍNCRONO.....	42
2.2.1	Funcionamento da Máquina Síncrona	43
2.2.2	Aspectos Construtivos de um Gerador	45
2.2.2.1	Estator	45
2.2.2.2	Enrolamentos.....	46
2.2.2.3	Rotor	47
2.2.2.3.1	<i>Rotor de polos salientes</i>	47
2.2.2.3.2	<i>Rotor de polos lisos</i>	48
2.2.2.3.3	<i>Sistema de excitação</i>	48
2.3	A TÉCNICA ESA	50
2.3.1	Breve Histórico.....	50
2.3.2	Definição	53
3	METODOLOGIA.....	56
3.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	57
3.1.1	Equipamentos e Instrumentos	57

3.1.2	Determinação do Número de Amostras.....	60
3.1.3	Simulação de Falhas	62
3.1.3.1	Falhas no circuito retificador da excitatriz do gerador.....	63
3.1.3.2	Falhas de desalinhamento mecânico.....	64
3.1.3.3	Falhas no anel do pistão.....	64
3.1.3.4	Falhas nas válvulas de admissão e de escape.....	65
3.1.3.5	Falhas na válvula de injeção.....	65
3.1.3.6	Falha na válvula de admissão.....	65
3.2	ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA	65
3.2.1	Método.....	67
3.2.1.1	Análise por CSA e VSA	67
3.2.1.2	Análise por EPVA	68
3.3	ANÁLISE MATEMÁTICA	72
3.3.1	Descrição do Problema.....	72
3.3.2	Equacionamento	73
3.3.2.1	Do Motor para o Gerador.....	74
3.3.2.1.1	<i>Condição de baseline</i>	74
3.3.2.1.2	<i>Condição de falha</i>	77
3.3.2.2	Do Gerador para a Carga	77
3.3.2.2.1	<i>Condição de baseline</i>	77
3.3.2.2.2	<i>Condição de falha</i>	77
3.4	AQUISIÇÃO DE SINAIS NUMA USINA TERMELÉTRICA	81
4	RESULTADOS	84
4.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	84
4.1.1	Simulação Computacional	84
4.1.2	Condições de Ensaio	91
4.1.3	Sinais das Falhas Simuladas.....	92
4.1.3.1	Falhas no circuito retificador da excitatriz do gerador.....	92
4.1.3.2	Falhas de desalinhamento mecânico.....	102
4.1.3.3	Falhas no anel do pistão.....	106
4.1.3.4	Falhas nas válvulas de admissão e de escape.....	110
4.1.3.5	Falhas na válvula de injeção.....	114
4.1.3.6	Falhas na válvula de admissão.....	118
4.2	ANÁLISE NUMA USINA TERMELÉTRICA	123

4.2.1	Modos de Operação dos Geradores.....	123
4.2.2	Índice de Distorção Harmônica (IDH)	126
4.2.3	Padrões de Falha Avaliados	129
4.2.3.1	Desequilíbrio no gerador auxiliar da excitatriz	129
4.2.3.2	Curto-circuito no diodo do retificador da excitatriz	137
4.2.3.3	Desalinhamento mecânico no conjunto motor-gerador.....	141
4.2.3.4	Falhas mecânicas no motor	144
4.2.4	Análise das Unidades Geradoras	147
4.3	COMENTÁRIOS FINAIS	149
5	CONCLUSÕES.....	150
6	TRABALHOS FUTUROS	153
	REFERÊNCIAS.....	154
	APÊNDICE A.....	159
	APÊNDICE B.....	161

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido à evolução das estratégias de manutenção, já se tem percebido a intensificação da manutenção preditiva como ferramenta de apoio a engenharia de manutenção em máquinas, equipamentos e instalações. Isto tem acontecido devido às metas cada vez mais ousadas do setor produtivo as quais exigem elevado nível de excelência na disponibilidade de ativos. Neste contexto 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.

Como reflexo da ação preditiva se tem o monitoramento. Ação esta que se bem aplicada permite que a intervenção em determinado ativo se dê bem próxima da falha, trazendo vários resultados positivos, a exemplo dos econômicos por lucro cessante relativos à indisponibilidade das máquinas. Tal monitoramento pode ser de forma local ou remota. A local já traz algumas vantagens, todavia a remota é a mais eficiente devido à possibilidade de controle e manipulação dos dados de interesse, onde se evita a utilização de recursos humanos para a coleta de sinais, minizando a exposição de pessoal em áreas de risco. Alinhado a isto, ainda se tem a possibilidade de automatismo no diagnóstico e na intervenção. Embora consolidada este tipo de ação de manutenção ainda é ínfima em algumas plantas com equipamentos críticos que necessitam de supervisão constante e intensiva, a exemplo de usinas termelétricas, siderúrgicas e mineradoras.

No caso das usinas termelétricas, em particular aquelas que utilizam motores de combustão interna como máquina primária, a utilização de técnicas preditivas é restrita a um pequeno grupo de alternativas. Além haver relativa dependência humana, a análise e posterior diagnóstico dos problemas não são feitos de forma célere. Não é incomum ver situações onde o local de processamento, avaliação e indicação da decisão da ação a ser tomada na instalação é bem distante daquele onde é extraída as informações.

De maneira geral, o grupo de técnicas utilizado no diagnóstico de máquinas rotativas, considerando o grupo motor-gerador, pode ser dividido em dois, off-line e on-line. O primeiro implica operações efetuadas com a máquina fora de operação,

para que partes antes não disponíveis possam ser acessadas. Já o segundo, proporciona a obtenção do diagnóstico com a máquina em plena operação e, portanto, é o desejável. Como exemplo de técnicas off-line cita-se o teste de alto potencial, o teste de isolamento, o teste de resistência e a análise do circuito do motor (MCA). Para o caso daquelas on-line cita-se a análise de vibração, a análise termográfica, a análise acústica, a análise de medidas elétricas e a análise da assinatura elétrica (ESA).

Contudo, devido às particularidades do tipo de planta, do princípio de funcionamento dos motores e do porte da instalação, nos ambientes de utilização deste tipo máquina não se tem a aplicação de todas estas técnicas descritas. Basicamente é utilizado a análise de vibração, a análise termográfica e a análise Acústica. Neste contexto surge uma técnica relativamente nova e com grande aceitação no setor industrial. Trata-se da análise por assinatura elétrica do gerador, do inglês *Electrical Signature Analysis* - ESA, a qual consiste na avaliação espectral dos sinais de tensão e de corrente ofertadas por este equipamento. Nesta avaliação é possível fazer um diagnóstico do estado do próprio gerador, e até mesmo, do motor acoplado. Daí, como grande vantagem apresenta custos relativamente baixos de monitoramento, pois o aparato necessário é aquele utilizado para obtenção de grandezas elétricas numa instalação típica. A acessibilidade às informações é outro ponto que merece destaque, pois na maioria das situações não se consegue ou se tem muita dificuldade de leitura das grandezas de interesse. No caso da ESA, o que se precisa é o acesso ao painel elétrico do equipamento.

Assim este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de falhas em grupos motor-gerador de combustão interna utilizados na geração de energia elétrica através da técnica de análise da assinatura elétrica (ESA), utilizando o gerador como elemento transdutor. Para tanto será demonstrado o método de análise a partir de ensaios experimentais realizados num motor a diesel do tipo monocilíndrico o qual operava como máquina primária de um gerador síncrono e estava instalado num laboratório de modelo reduzido. Lá foram simuladas falhas, em ambas as máquinas, e colhidos os sinais elétricos de tensão e de corrente fornecidos pelo gerador. A partir disto procedeu-se a interpretação destes sinais em forma de espectro, com processamento via transformada rápida de Fourier (FFT), buscando divergência em suas características com outros oferecidos pelas máquinas na condição de normalidade, isto é, isenta de falha.

Como resultado o trabalho apresenta padrões de falha típicos para cada tipo falha simulada que fez parte de um grupo selecionado conforme operação do motor e do gerador. Ainda é exibida a análise realizada nos sinais adquiridos em grupos motor-gerador de uma usina termelétrica dotada de motores multicilíndricos com o intuito de buscar os padrões de falha observados nos ensaios experimentais e avaliar o comportamento do espectro elétrico fornecido por este tipo de motor.

Sua conclusão principal é a comprovação da hipótese motivadora da pesquisa, a qual se baseava no fato de distúrbios presentes em motores de combustão interna que resultam na alteração de seu torque modificam a assinatura elétrica de tensão e de corrente do gerador acoplado, gerando como contribuição a abertura de uma nova linha de pesquisa da técnica ESA, que é a de identificação de problemas em motores de combustão interna, além de proporcionar a possibilidade de correlacionar grandezas mecânicas e elétricas quando se utiliza o gerador como elemento transdutor de um motor numa operação acoplada.

1.2 MOTIVAÇÃO

O fator motivador para confecção deste trabalho advém do cenário atual de manutenção em que se encontram as plantas de geração de energia elétrica composta de motores de combustão interna. De forma mais específica, é possível relacionar alguns itens que serviram de estímulo para condução da pesquisa. Estes são:

- i) Ausência de técnicas remotas de monitoramento e de diagnóstico automático em usinas termelétricas;
- ii) Expressiva potencialidade da técnica ESA na análise de máquinas e equipamentos;
- iii) Intensa condição operativa das máquinas face às circunstâncias eletroenergéticas desfavoráveis do Brasil.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de falhas em motores de combustão interna utilizados na geração de energia elétrica, através da técnica de análise da assinatura elétrica (ESA) do gerador acoplado.

1.3.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos são:

- Comprovar a hipótese de identificação de problemas no motor de combustão interna a partir de sinais do gerador acoplado;
- Identificar padrões espectrais operativos do grupo motor-gerador de combustão interna, nas condições de normalidade e de falha;
- Descrever matematicamente as condições de operação do grupo motor-gerador correlacionando grandezas mecânicas com elétricas;
- Analisar padrões espectrais operativos de grupos motor-gerador de combustão interna do tipo multicilíndrico de uma usina termelétrica.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

1.4.1 Problema

A problemática deste trabalho é a de conseguir avaliar a condição de funcionamento de um motor de combustão interna a partir de sinais elétricos oferecidos por um gerador acoplado. De outra forma, a questão é descrever alguns fenômenos mecânicos da primeira máquina através do estado de algumas grandezas elétricas da segunda.

Quando em operação o motor sofre diversas flutuações que trazem como consequência a variação de diversas grandezas, tais como pressão, velocidade angular e torque. Como esta máquina opera de forma conjunta com o gerador é conveniente identificar uma grandeza comum entre ambas, neste caso o torque. Ocorre que sua alteração não reflete necessariamente as mesmas consequências para o motor e para o gerador. Daí vem a necessidade de se identificar outros parâmetros que sinalizem esta alteração.

Agrega-se a isto o fato de que na operação do grupo motor-gerador variações de torque podem ser despercebidas ou até mesmo compensadas pelo próprio sistema de controle. Além disto, para motores multicilíndricos, existe a provável compensação dos outros cilindros no ciclo de operação mecânica.

Sendo então o torque a grandeza principal tem-se a restrição da análise para um conjunto de falhas, pois o reflexo na variação desta grandeza advém das alterações no trabalho do conjunto de força do motor. Mesmo assim este pode permanecer inalterado em função da massa girante do conjunto motor-gerador. Tal

conjunto de falhas, pode ser representada por aquelas ocorridas no pistão, nas válvulas de injeção, admissão e escape bem como no acoplamento entre o motor e o gerador.

1.4.2 Hipótese

A hipótese estabelecida para o desenvolvimento do trabalho é a de que distúrbios presentes em motores de combustão interna que resultam na alteração de seu torque modificam a assinatura elétrica de tensão e de corrente do gerador acoplado. Isto é possível devido ao acoplamento mecânico existente entre o eixo do motor e o rotor do gerador.

Esta possibilidade decorre do comportamento não linear com variações instantâneas bem relevantes presentes no torque do motor quando em operação. A causa disto está no complexo sistema de transformação de energias, onde há ciclos mecânicos de pressão variável e momentos inerciais distintos em função das assimetrias do motor.

Considerando o acoplamento entre motor e gerador, o torque passa a ser o mesmo para ambas as máquinas e este, ao se alterar, acarreta no gerador uma mudança na velocidade angular, seguida de alteração da posição do rotor, com resultado final de variação da força magneto-motriz. Logo a produção de tensão e de corrente passa a ser totalmente do torque.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

Em termos de contribuição o que se pretende com este trabalho é desenvolver uma metodologia de análise de motores de combustão interna. Esta vem agregar ao estado da arte de análise deste tipo de máquina a técnica ESA. De forma mais específicas algumas colaborações podem ser relacionadas conforme os itens a seguir:

- i) Identificação de padrões de falhas espectrais inéditos para motores a combustão interna do tipo monocilíndrico;
- ii) Geração de sinais espectrais para motores a combustão interna do tipo multicilíndrico;
- iii) Proposição de uma metodologia de análise de grandezas mecânicas a partir de grandezas elétricas;

- iv) Inserção de mais uma técnica preditiva na manutenção de grupos motor-gerador que tenham como máquina primária o motor de combustão interna.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em seis capítulos conforme descrição a seguir:

O capítulo 1 apresentou os elementos textuais iniciais do trabalho, tais como, as considerações iniciais, a motivação, os objetivos, a formulação do problema, as contribuições e a organização da tese.

O capítulo 2 apresenta um referencial teórico sobre motores de combustão interna, geradores síncronos e a técnica ESA.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada na condução do trabalho, detalhando os aspectos de planejamento dos ensaios experimentais, o procedimento de avaliação pela técnica ESA, a análise matemática do problema e aquisição de sinais realizada numa usina termelétrica.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos ao longo do trabalho, e a análise sobre eles, divididos de duas formas. A primeira trata dos padrões de falha identificados nos ensaios experimentais do grupo motor-gerador monocilíndrico de combustão interna instalado num laboratório de modelo reduzido. E a segunda trata da análise realizada em alguns grupos motor-gerador do tipo multicilíndrico de uma usina termelétrica.

O capítulo 5 apresenta a conclusão geral do trabalho com ênfase aos resultados mais significativos e suas contribuições.

O capítulo 6, por fim, apresenta as sugestões para futuros trabalhos como forma de orientação a novas pesquisas e continuidade aos resultados obtidos nesta tese.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A base teórica para desenvolvimento deste trabalho está centrada em três vertentes. A primeira com respeito ao funcionamento dos motores de combustão interna. A segunda com respeito ao funcionamento dos geradores síncronos. E a terceira com respeito ao princípio da técnica ESA.

O motor de combustão interna, embora seja uma máquina de utilização cotidiana e, portanto, de pleno domínio no processo fabril, ainda é flagrante a carência de meios de avaliação e monitoramento quando em operação. Isto fica ainda mais evidente quando se envereda para o segmento onde estas máquinas trabalham na geração de energia elétrica. A causa para esta circunstância está no seu complexo funcionamento, onde se tem uma série variáveis de difícil controle. Sua modelagem, portanto, é uma das principais dificuldades encontradas quando de seu estudo.

O gerador síncrono, por possuir seu princípio fundamentado nos fenômenos eletromagnéticos, apresenta relativa facilidade nos métodos e meios de modelagem, avaliação e monitoramento. Isto se dá em função da pouca dependência mecânica existente no seu funcionamento. Evidentemente que esta consideração leva em conta não os aspectos construtivos e sim os de parâmetros de projeto. Desta forma, em várias situações, esta máquina é utilizada como elemento de referência em termos de medição de grandezas.

Quanto à análise da assinatura elétrica, esta tem sido uma técnica de resultados bem relevantes e altamente promissores no diagnóstico de máquinas elétricas. Embora utilizada de forma relativamente recente, sua potencialidade tem se demonstrado cada vez mais ascendente pelo simples fato de utilizar um aparato não complexo, até trivial em algumas situações, na aquisição dos sinais. Em contrapartida, o que se exige são pesquisas direcionadas para interpretação, avaliação e identificação de padrões espectrais de tensão e de corrente de acordo com o estado operativo dos equipamentos. Assim sendo, este tipo de técnica pode fornecer uma gama considerável de informações a partir de perfis de grandezas elétricas, seja numa avaliação de ótica mecânica seja numa de ótica elétrica. O que se necessita, portanto, é de uma investigação e manipulação de tais grandezas, ao ponto de estabelecer uma representação elétrica de qualquer sistema.

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

2.1.1 Breve Histórico

O surgimento do primeiro motor a combustão interna (MCI) ocorreu no século XIX. Em 1860, Etienne Lenoir (inventor nascido na Bélgica em 1822) construiu um MCI movido a gás de iluminação. Foram construídas entre 1860 e 1865, cerca de 5000 unidades desse motor, com uma potência de até 6 HP e eficiência em torno de 5%. Porém, em 1862, Alphonse Beau de Rochas (engenheiro francês nascido em 1815) indicou o método de operação desejável em um motor de combustão interna em quatro etapas:

1. Admissão durante o deslocamento do pistão do PMS para o PMI;
2. Compressão durante o movimento do pistão do PMI para o PMS;
3. Ignição da carga de combustível e ar no PMS do pistão, seguida por expansão durante o deslocamento seguinte do pistão, do PMS para o PMI;
4. Exaustão durante a corrida seguinte do pistão, do PMI para o PMS.

Beau de Rochas patenteou o princípio do motor de quatro tempos, mas não o desenvolveu comercialmente. Entretanto, este processo é utilizado até hoje **(FURLANI e SILVA, 2006)**. Apesar da ideia de o motor de quatro tempos ter sido originalmente concebida e patenteada por Alphonse Beau de Rochas, em 1862, a primeira realização prática foi de autoria do alemão Nikolaus Otto (engenheiro alemão nascido em 1832). Ele pôde obter uma patente em 1863 através da influência de seu novo sócio, Eugen Langen (engenheiro alemão nascido em 1833), que o financiou. Em 1867, seu motor de dois tempos, desenvolvido a partir do motor de Lenoir, ganhou uma medalha de ouro na Feira Mundial de Paris. Foram construídas cerca de 10000 unidades desse motor, com eficiência de até 11%, dominando o mercado até a introdução do motor Otto de quatro tempos.

Em 1872, Gottlieb Daimler (engenheiro alemão nascido em 1834) e Wilhelm Maybach (engenheiro alemão nascido em 1846), ambos discípulos de Otto, abriram sua própria oficina, perto de Stuttgart e, construíram o primeiro motor Daimler-Maybach. Comparando com o motor de Otto, que funcionava a 200 RPM, o Daimler-Maybach era de alta velocidade e alcançava 900 RPM.

Em 1876, Nikolaus Otto avançou ainda mais dentro da área de motores de combustão interna, fazendo funcionar um motor térmico segundo o ciclo quatro tempos de Beau Rochas.

Desde então, o ciclo de quatro tempos passou a ser conhecido como ciclo Otto, vendendo mais de 35000 unidades desse motor em poucos anos.

Em 1886, Karl Benz (engenheiro alemão nascido em 1844) desenvolveu um motor de quatro tempos alimentado por gasolina. Esse motor era mais pesado e mais lento que o motor Daimler-Maybach, porém duas características desse veículo persistem até hoje: a válvula de haste curta e o sistema de refrigeração à água (a água não circulava, ficava armazenada num compartimento) que tinha de ser constantemente abastecido para manter-se cheio e compensar as perdas por ebulição. Nascia assim, o pai do automóvel **(GIUCCI, 2004)**.

Outro tipo de motor que se consagrou no século XIX, foi o concebido por Rudolf Diesel (engenheiro alemão nascido em 1858), em 1892. Este dispositivo, senhor absoluto hoje em dia nos transportes públicos, de carga e marítimos, permitiu atingir um rendimento nunca antes obtido em motores de combustão interna e, funciona com o princípio da autoignição, onde a compressão do ar se eleva a tal ponto que o combustível admitido se inflama por si, definindo assim o ciclo Diesel.

O grande mérito de Rudolf Diesel foi demonstrar termodinamicamente que este tipo de motor tinha um rendimento superior. Ele desenvolveu previamente o conhecimento desta ciência, demonstrando o desempenho de sua máquina antes da sua construção.

Em 1898, Rudolf Diesel demonstrou sua invenção na Feira Mundial em Paris, usando óleo de amendoim como combustível. Os motores de ignição por compressão (ICO) foram alimentados com óleos combustíveis até 1920.

2.1.2 Funcionamento

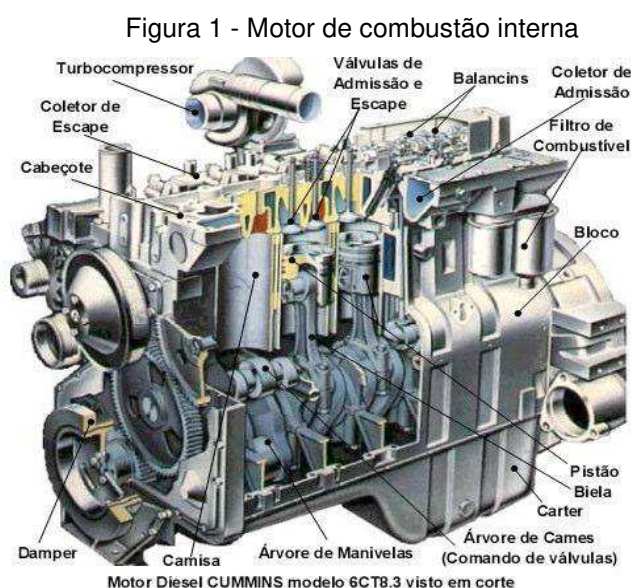
O motor de combustão interna, ou endotérmico, é uma máquina térmica que possui uma câmara de combustão no interior do cilindro do motor onde o combustível é queimado e transforma a energia proveniente desta reação química em energia mecânica. Tal combustão pode se dar de duas maneiras distintas de ignição. Uma por compressão de uma mistura ar/combustível e outra por centelha originada por uma vela. Este primeiro processo nomeia-se de ciclo Diesel enquanto que o segundo de ciclo Otto. Ambos, salvo o estágio de ignição, obedecem ao mesmo ciclo de funcionamento.

Tomando o ciclo diesel como exemplo, o funcionamento inicia ao se aspirar o ar, que após ser comprimido no interior dos cilindros, recebe o combustível sob

pressão superior àquela em que o ar se encontra. Daí, quando estes entram em contato acontece a combustão por autoignição.

O combustível que é injetado ao final da compressão do ar é o óleo diesel, porém o motor pode rodar com outros combustíveis, inclusive o óleo vegetal in natura (MEIRELLES, 2007).

Em linhas gerais, o motor diesel funciona de maneira semelhante ao motor de explosão. No primeiro tempo o ar é aspirado, passando pela válvula de aspiração que está aberta entrando no cilindro. No segundo tempo, tendo fechado a válvula de aspiração, o ar, comprimido dentro do cilindro até a uma pressão de cerca de 500, atinge temperatura da ordem de 649 °C. Próximo do PMS é injetado óleo combustível no cilindro. Este óleo, misturando-se com o ar altamente aquecido entra em ignição e a expansão dos gases resultantes força o êmbolo a realizar o terceiro tempo do ciclo, a expansão. Pouco antes de o êmbolo atingir o PMI, a válvula de descarga abre e os gases começam a ser descarregados do interior do cilindro. Antes de o êmbolo atingir o PMS, a válvula de aspiração abre e o ar que entra no cilindro faz aquilo que em linguagem técnica se chama lavagem do cilindro, expulsando quase a totalidade dos gases de descarga que ainda permaneciam no interior do motor. Ao atingir o PMS e fechando-se a válvula de descarga, inicia-se nova aspiração e, portanto, novo ciclo. O motor que trabalha da maneira acima é de quatro tempos, conforme é ilustrado na Figura 1. Há motores que trabalham a dois tempos.



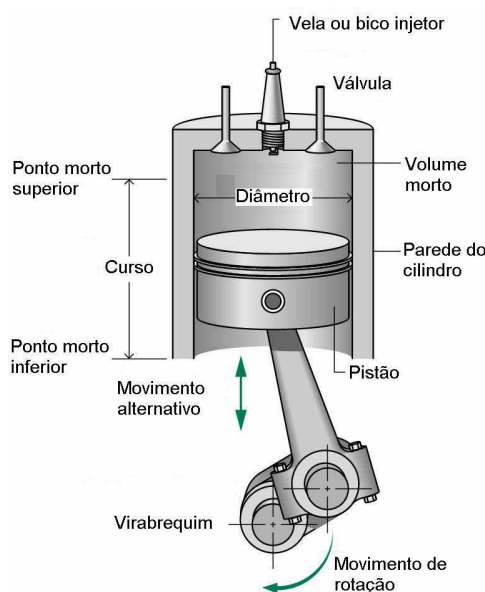
FONTE: (Meirelles, 2007)

Tudo isto tem o objetivo final de promover um movimento circular no virabrequim, o qual por sua vez, recebe a transferência de energia do pistão através

do conjunto biela-manivela, segundo ilustra a Figura 2. Este é o caso do motor de movimento alternativo. Existem aqueles de movimento rotativo.

No motor de quatro tempos, a cada duas voltas do virabrequim o motor produz trabalho no eixo, pois a cada meia volta é o tempo que o motor necessita para fechar o ciclo mecânico que nesse caso necessita de quatro tempos para operar.

Figura 2 - Conjunto cilindro-pistão-biela-manivela de um motor de combustão interna



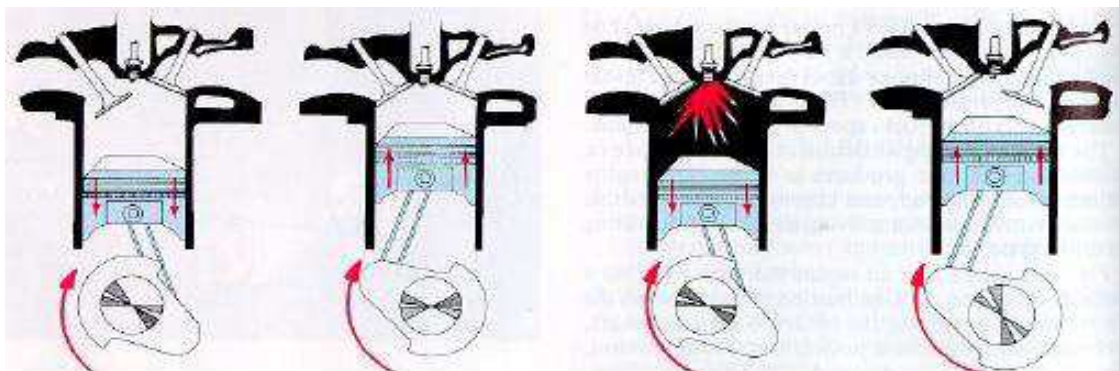
FONTE: (Moran e Shapiro, 2000)

Os motores de combustão interna podem diferir quanto ao movimento do pistão, ao método de ignição, ao ciclo operacional, a relação oxigênio-combustível, ao tipo de combustível, a pressão de alimentação, entre outras formas. A saber:

- Pelo movimento do pistão (alternativo ou rotativo);
- Pela ignição de combustível por faísca (SI) e ignição por compressão (CI);
- Pelo ciclo operacional (dois tempos e quatro tempos);
- Pela relação entre oxigênio e combustível na ignição (ignição pobre e ignição rica);
- Pelo tipo de combustível (gás natural, álcool, óleo combustível, gasolina, óleo diesel, e dual combustível);
- Pelo método de adição de combustível (carburação ou injeção de combustível);
- Pela pressão de alimentação da mistura (naturalmente turbinado ou aspirado).

A Figura 3 apresenta o esquema de funcionamento de um motor de combustão interna do ciclo diesel com movimento alternativo a quatro tempos com suas etapas características.

Figura 3 - Esquema de funcionamento de um motor de quatro tempos do ciclo Diesel



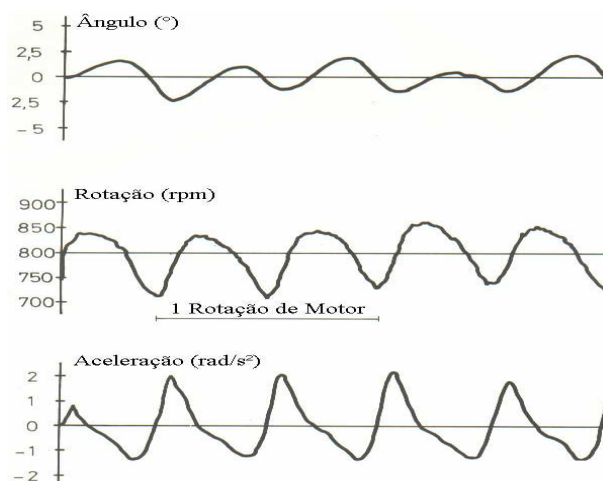
FONTE: (De Castro, 1987)

2.1.3 Flutuações na Operação

Os motores de combustão interna podem ser considerados como geradores de flutuações, ou de modo objetivo, vibrações, por excelência, uma vez que a cada ignição da mistura de combustível em um cilindro, uma aceleração angular é gerada no virabrequim devido à pressão dos gases, que é seguida por uma desaceleração causada pela compressão no próximo cilindro, originando as variações de rotação. Alinhando a isto ainda os movimentos alternativos de massas também contribuem com uma parcela considerável de irregularidade.

Como exemplo a Figura 4 mostra as curvas típicas de medição de irregularidades de um motor de quatro cilindros com duas ignições por rotação.

Figura 4 - Curvas típicas de irregularidades para um motor de quatro cilindros com duas ignições por rotação



FONTE: (Duque, 2005)

Essas vibrações existem devido à aplicação de excitações periódicas que atuam nos componentes responsáveis pela geração de torque, tais como: árvore de manivelas, bielas, pistões, etc. A componente tangencial da força atuante no pistão exerce uma ação de torção periódica, ora atuando num sentido ora em outro, promovendo as vibrações torcionais. Esse fenômeno pode em alguns casos, gerar deslocamentos angulares de grandes amplitudes.

Segundo **Aparecido (2002)** a função principal dos motores de combustão é ser fonte de potência. Esta geração de potência é um processo cíclico, onde temos um torque fornecido em forma de uma série de pulsos, que correspondem a cada explosão de cada cilindro.

Os motores de combustão interna a pistões têm uma cinemática que parte de um movimento de translação alternativo para gerar movimento rotativo, através de um eixo de manivelas. A geração de potência nesses motores é intermitente e os regimes de trabalho são variáveis, não somente devido à variação de pressão e à ordem de ignição, mas também devido às forças inerciais geradas pelos movimentos alternativos de virabrequim, bielas, pistões, etc.

Segundo **Taraza, et al. (1998)** a variação de velocidade do virabrequim é influenciada pela ação da pressão nos cilindros do motor que contribuem para a performance total do motor. Ao mesmo tempo, a variação de velocidade é influenciada pela rigidez torcional do virabrequim, momentos de inércia dos diversos mecanismos do motor, carga dos acessórios, etc.

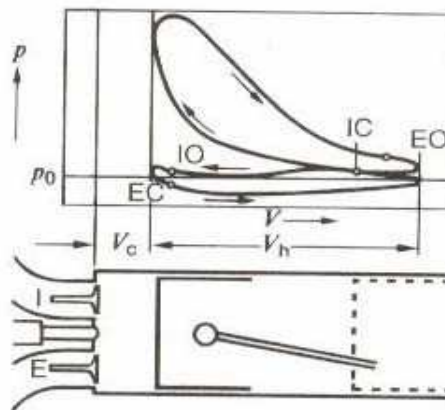
Luk (1998) aponta que esta variação é fruto, principalmente, do ciclo de combustão do motor, sendo função da frequência de ignição do mesmo. Já **Szadkowski (1991)** mostra que, além dos pulsos de torque gerado pela combustão, temos também que considerar as forças de inércia geradas pelas massas alternativas que estão em movimento dentro do motor (e. g. pistão, biela, anéis, etc.).

Taylor (1968) lembra que as forças inerciais variam com o quadrado da velocidade angular, não proporcionando um grande impacto na “geração” de vibrações torcionais em baixas rotações. Uma das forças que é responsável por uma parcela desta irregularidade é a força F_p devida à pressão dos gases. Esta força é dada por:

$$F_p = (p - p_0).A_p \quad (1)$$

Onde p é a pressão na câmara de combustão, p_0 a pressão no cárter e Ap a área do pistão. Conhecendo-se o diagrama $p - V$ da Figura 5 é possível se obter Fp em função do ângulo do virabrequim.

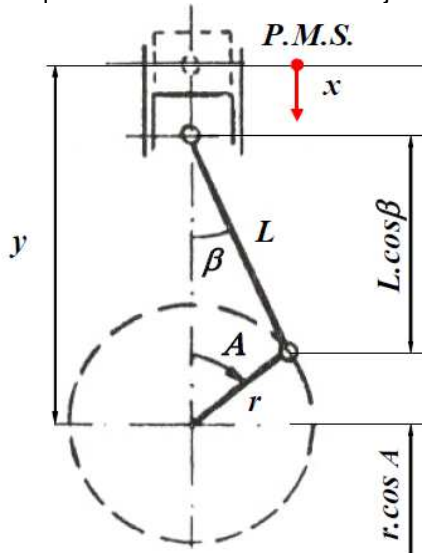
Figura 5 - Representação do diagrama $p-V$ num motor de 4 tempos



FONTE: (Duque, 2005)

A outra parcela é a gerada pelas forças inerciais dos componentes rotativos e alternativos que temos no motor as quais podem ser exploradas pelo mecanismo do conjunto biela-manivela que é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema do mecanismo do conjunto biela-manivela



FONTE: (Duque, 2005)

Neste esquema é possível determinar o equacionamento da variação da aceleração angular no virabrequim do motor. O procedimento consiste em obter a posição instantânea do pistão, a partir do PMS, e através de derivação no tempo, calcular sua velocidade e aceleração instantâneas.

$$x = r + L - y \quad (2)$$

$$y = r.\cos A + L.\cos \beta \quad (3)$$

E tiramos que,

$$L.\sin \beta = r.\cos A \quad (4)$$

$$\therefore \sin \beta = \frac{r}{L}.\sin A = \lambda.\sin A \quad (5)$$

Portanto, temos que:

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \lambda^2.\sin^2 A} \quad (6)$$

Substituindo (3) em (2):

$$x = r.(1 - \cos A) + L.\left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2.\sin^2 A}\right) \quad (7)$$

Esta expressão pode ser decomposta em uma série de Fourier em função de A , com harmônicos de ordem 2, 4, 6, etc. A razão pela qual se exprime a aceleração do pistão nessa forma advém da facilidade de adição das forças com variação das relações de fase, como nos motores de múltiplos cilindros. Isto ainda auxilia na solução dos problemas de vibração do motor em geral.

Ao ser multiplicadas pela massa do pistão, essas expressões de velocidade e aceleração passam a representar a quantidade de movimento vertical e a força vertical de inércia. Tais forças são compostas principalmente por dois termos: um que varia com a mesma frequência de rotação do virabrequim, conhecido como termo primário, e outro variando com o dobro dessa frequência, conhecido como termo secundário. Se a biela tiver comprimento infinito, o termo secundário desaparecerá e o pistão executaria movimento harmônico.

Agora, analisando as forças de inércias geradas pelas massas de biela e pistão, percebe-se uma divisão em modo alternativo e em modo centrífugo. Na Figura 6 verifica-se que o ponto superior da biela descreve uma linha reta, enquanto o ponto inferior move-se em círculo, enquanto que todos os outros pontos descrevem elipses, de forma que a determinação, e subsequente integração das forças de inércia de todos esses pontos, resultaria em grande trabalho.

Porém, **Den Hartog (1972)** define as características da biela substituindo a mesma por outra estrutura possuindo a mesma massa e o mesmo centro de gravidade, de forma que a trajetória do seu centro de gravidade (C.G.) não seja alterada. Assim a força total de inércia da biela fica aproximadamente igual àquela da nova estrutura.

Ao utilizar a relação da lei de NEWTON de que a componente da força de inércia de um corpo em uma determinada direção é igual ao produto de sua massa pela aceleração de seu C.G. nessa direção, a massa da biela é substituída por duas massas concentradas, uma em cada extremidade, de forma que a posição do C.G. não se altere e de tal forma que a soma das duas massas concentradas seja igual à massa total da biela original.

Com isso o resultado da aceleração do movimento alternativo das massas de biela e pistão é definido por:

$$F_a = -m_a \cdot x'' \quad (8)$$

Agora, pelo método dos trabalhos virtuais, considerando que o trabalho da força de pressão na cabeça do pistão mais o trabalho das forças de inércia alternativas é igual ao trabalho do torque de inércia das partes rotativas mais o torque externo. Desta forma, podemos escrever a seguinte equação já considerando também o rendimento do motor η_M :

$$[(p - p_0) \cdot Ap - m_a \cdot x''] \eta_M \cdot dx = M(t) \cdot dA \quad (9)$$

Como $x'' = \frac{d^2 x}{dt^2}$ então podemos escrever:

$$x'' = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d}{dA} \cdot \frac{dA}{dt} \cdot \left(\frac{dx}{dA} \cdot \frac{dA}{dt} \right) \quad (10)$$

E verificando que, em valores absolutos, o valor de Ω é muito maior que a variação de velocidade angular $\alpha'(t)$, temos que:

$$\frac{dA}{dt} \cong \Omega \quad (11)$$

Substituindo em (11):

$$x'' = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d}{dA} \cdot \frac{dA}{dt} \cdot \left(\frac{dx}{dA} \cdot \frac{dA}{dt} \right) = \frac{d^2 x}{dA^2} \cdot \Omega^2 \quad (12)$$

Desta forma, obteremos:

$$\left[(p - p_0) \cdot Ap - m_a \cdot \frac{d^2 x}{dA^2} \cdot \Omega^2 \right] \eta_M \cdot dx = M(t) \cdot dA \quad (13)$$

Assim o valor de torque instantâneo em função do ângulo do virabrequim pode ser dado pela expressão abaixo:

$$M(t) = \eta_M \cdot \left[(p - p_0) \cdot A_p - m_a \cdot \frac{d^2 x}{dA^2} \cdot \Omega \right] \cdot \frac{dx}{dA} \quad (14)$$

Segundo **Den Hartog (1972)** nas quatro posições de ponto morto durante as duas revoluções de um ciclo de combustão, o conjugado é nulo. E, quando o motor opera em condições parciais de carga, a curva de torque instantâneo muda apenas no trecho da queima da mistura.

As linhas pontilhadas 1 e 2 da Figura 7 indicam as curvas de conjugado para carga zero e meia carga respectivamente, sendo que, com carga nula, a pressão durante o período de combustão é igual àquela durante o período de compressão. Isso nos indica que, mesmo sem carga, temos momentos alternados de amplitude considerável.

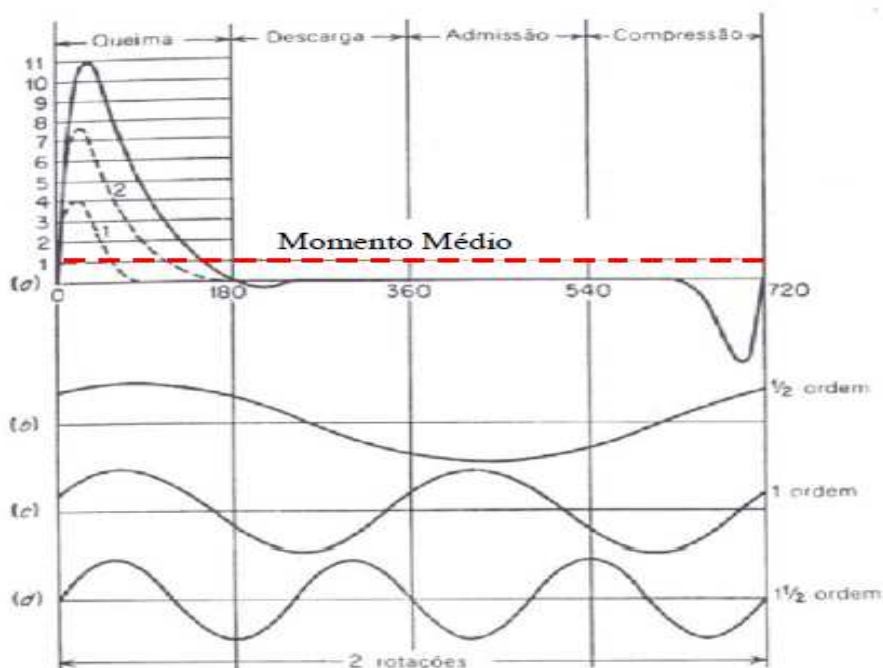
Fazendo uso das séries de Fourier podemos ainda decompor a curva do momento instantâneo em suas componentes harmônicas.

Desta forma a Eq. (15) poderia também ser escrita como:

$$M(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{N=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos N\omega t + b_n \cdot \sin N\omega t) \quad (15)$$

Para os motores de 4 tempos temos harmônicas de meia-ordem devido ao fato de que o ciclo completo ocorre em duas rotações, enquanto que para motores de 2 tempos e à vapor teremos apenas harmônicos de ordem inteira.

Figura 7 - Variação de torque x ângulo do virabrequim



FONTE: (Duque, 2005)

Den Hartog (1972) também mostra que se somarmos as três curvas indicadas na Figura 7 nos aproximamos “grosseiramente” da curva de momento (a). Logo, inúmeras outras harmônicas devem ser somadas às curvas (b), (c) e (d) para termos a curva (a) devidamente representada.

Com isso, sendo a excitação mencionada uma função periódica, a qual está longe de ter o comportamento de uma senóide, obrigatoriamente teremos componentes de altas frequências.

O desvio em cada instante do momento instantâneo do valor médio produz irregularidades na rotação que provocam vibrações. A intensidade dessas irregularidades pode ser medida através de um fator chamado grau de irregularidade GI , que é definido como:

$$GI = \frac{M_{\max}}{M_{\text{med}}} \quad (16)$$

Motores com grande número de cilindros possuem diversas vantagens em termos de grau de irregularidade. Como a cilindrada total é distribuída por diversos cilindros temos uma diminuição desta nos pistões e um aumento da frequência de ignição. Logo, teremos um aumento das irregularidades apenas em alta frequência devido às forças inerciais.

Assim, com a adoção de motores multicilíndricos, onde o intervalo de ignição é igualmente espaçado ao longo de um ciclo do motor, temos uma diminuição de GI , como podemos ver na Tabela 1.

Tabela 1 - Grau de irregularidade x número de cilindros

z	1	2	3	4	6	8	...	∞
GI	10,3	4,5	3,5	2,0	1,7	1,5	...	1

FONTE: (Duque, 2005)

Considerando que o torque existente no motor apresenta caráter de um sinal de excitação periódico com diversas irregularidades ao longo do ciclo mecânico de operação é possível representá-lo segundo sua condição de funcionamento. Quanto mais irregularidades estiverem presentes no motor maior será a composição do seu torque. Numa observação mais instantânea cada irregularidade gera um torque adicional, modificando o torque total. Isto significa que a condição de falha no motor,

onde se tem uma variação brusca de alguns parâmetros, é percebida pela alteração do sinal de torque, como efeito semelhante ao de uma irregularidade.

O torque total, ou simplesmente o torque do motor, pode ser composto por uma série de pulsos, onde cada um destes representa um torque menor com frequência diferente daquela do torque médio. Assim, em cada instante, ou em cada posição angular, tem-se um valor específico de torque do motor quando consideradas as etapas distintas do ciclo mecânico. Ao imaginar uma alteração de pressão no cilindro, por exemplo, logo se deduz que o torque é modificado e por conseguinte a velocidade angular. Tal alteração pode ser representada como a inserção de um torque ao torque médio já existente. Isto é facilmente percebido no de sinal de vibração.

Desta forma, considerando o caráter aditivo de torques ao motor face a variação de algumas grandezas, pode-se exprimir a condição de falha no motor como aquela em que é inserido um torque de falha ao torque médio. Numa outra ótica, o torque do motor passa ser composto do torque médio e o torque de falha. Na realidade o termo “torque de falha” pode contemplar qualquer variação típica do funcionamento do motor. Contudo para este trabalho, ele diz respeito a situação de falha na admissão de ar do motor. Fato que gera uma variação bem diferente da típica.

Como todo o tratamento se dá num sinal periódico é possível realizar uma análise dinâmica do torque do motor através de uma expansão em série de Fourier. Cada torque que compõe o torque do motor, inclusive o de falha, gera harmônicos com amplitude e frequência bem característicos. Assim o espectro de torque do motor é assinatura do seu estado de operação.

Levando em conta que o motor de combustão interna está acoplado a um gerador síncrono, o torque de saída deste primeiro passa a ser o torque de entrada do segundo. Desta forma, pelo próprio princípio de funcionamento do gerador, este torque é convertido em espectros de tensão e de corrente na saída deste. Representando fielmente num sinal elétrico uma alteração mecânica. O que deixa o gerador como elemento transdutor da falha no motor.

2.2 GERADOR SÍNCRONO

O gerador síncrono é um modo de funcionamento da máquina síncrona. Portanto, o seu princípio eletromagnético é o mesmo dos motores síncronos,

deferindo apenas o sentido de operação, quanto à corrente elétrica. Um converte energia mecânica em elétrica, como é o caso do gerador, e o outro converte energia elétrica em mecânica, como é o caso do motor. Ambas as máquinas recebem a denominação de síncrona pelo fato de apresentarem dependência direta entre o número de rotações e a frequência da força eletromotriz.

De uma forma resumida pode-se descrever o funcionamento de um gerador síncrono a partir da geração de um campo magnético por um enrolamento de campo quando alimentado por uma fonte em corrente contínua (CC). Quando este fato acontece e este enrolamento é acionado por uma máquina motriz, como por exemplo, uma turbina, é induzida uma tensão alternada num enrolamento de armadura com frequência proporcional à velocidade deste e ao número de polos da máquina, conforme equação abaixo:

$$f = \frac{p' \times N}{120} \quad (17)$$

Onde:

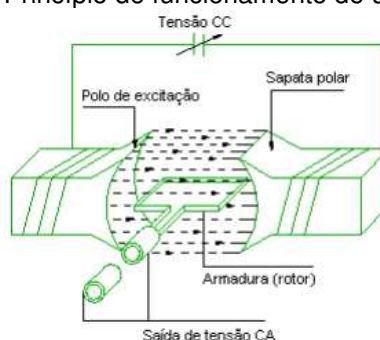
- f é a frequência
- p' é o número de polos do gerador
- N é a velocidade de giro expressa em rotações por minuto

2.2.1 Funcionamento da Máquina Síncrona

A máquina síncrona pode funcionar como motor ou gerador (ou simplesmente alternador), sendo que o princípio de funcionamento deste segundo, baseia-se nos fenômenos de indução eletromagnética a que está sujeito um condutor ou espira, quando sofre uma variação de fluxo magnético, que pode ser produzida girando-se a espira no campo indutor fixo, ou girando o campo indutor da espira fixa. Para facilitar a compreensão, o enrolamento de campo que produz o campo magnético de excitação está no rotor, e o enrolamento de armadura, que recebe a tensão induzida está no estator.

As duas maneiras de produzir a variação de fluxo, obtêm o mesmo resultado, para facilitar o estudo do princípio de funcionamento, será considerado inicialmente uma espira imersa em um campo magnético produzido por um ímã permanente conforme Figura 8 abaixo.

Figura 8 - Princípio de funcionamento de um gerador



FONTE: (Adaptado do manual WEG, 2010)

O funcionamento básico está baseado no movimento entre uma espira e um campo magnético, os terminais da espira são conectados a dois anéis que estão ligados ao circuito externo através de escovas. Admite-se que a bobina gira com velocidade uniforme dentro do campo magnético B que também é uniforme, se v é a velocidade linear do condutor em relação ao campo magnético, o valor instantâneo da FEM induzida no condutor em movimento de rotação é determinada pela seguinte formula:

$$fem = B \times L \times v \quad (18)$$

Onde:

B = Indução do campo magnético

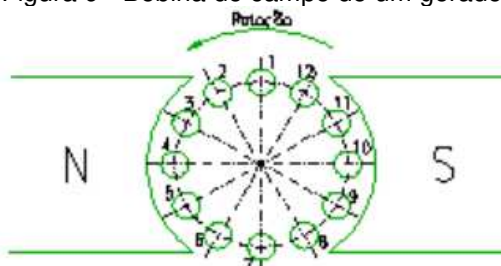
L = comprimento de cada condutor

v = velocidade linear

A variação da tensão é em função do tempo e a distribuição da indução magnética depende da forma da sapata polar, ou seja, a forma senoidal da indução depende diretamente da forma geométrica do material ferro magnético que faz a excitação.

A Figura 9 apresenta a bobina de campo em 12 posições diferentes, separadas 30° entre si.

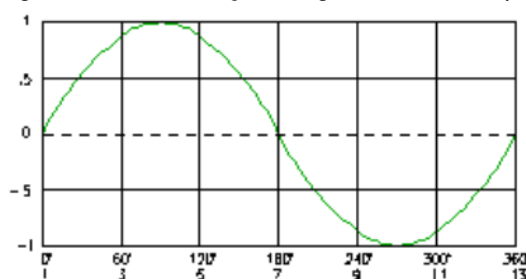
Figura 9 - Bobina de campo de um gerador



FONTE: (Adaptado do manual WEG, 2010)

Nas posições 1 e 7 as induções magnéticas serão anuladas, ou seja, atingirá o valor zero, enquanto nas posições 4 e 10 ocorrerá indução máxima, conforme Figura 10.

Figura 10 - Distribuição magnética sob um polo



FONTE: (Adaptado do manual WEG, 2010)

2.2.2 Aspectos Construtivos de um Gerador

Os geradores são construídos basicamente em 4 partes que são: estator, enrolamento, rotor e sistema de excitação que são descritos a seguir.

2.2.2.1 Estator

O estator é a parte fixa da máquina, é formado por um núcleo de ferro ranhurado, onde são colocadas as bobinas do enrolamento. O núcleo é a parte magneticamente ativa, a qual é envolvida pela carcaça metálica, que possui guias para a fixação do núcleo.

As chapas utilizadas para a confecção do núcleo são preferencialmente de aço silício, essa característica garante baixas perdas no circuito magnético e melhoram o rendimento da máquina.

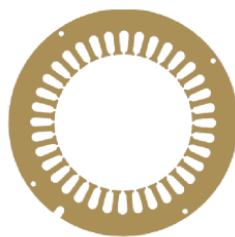
O núcleo é formado por um pacote de chapas, com espessura da ordem de 0,35 a 0,5 mm que são isoladas por um verniz em ambos os lados. Muitas vezes, o pacote é fracionado em intervalos de 3 a 10 cm para facilitar a refrigeração (**UNESP, 2010**).

O número de ranhuras N_r , necessárias para acomodar os enrolamentos está ligado ao número de polos p' , ao número de fases m e ao número de bobinas que formam o polo q .

Assim sendo a fórmula para calcular o número de ranhuras no núcleo de um gerador conforme Figura 11 é a seguinte:

$$N_r = p' \times m \times q \quad (19)$$

Figura 11 - Chapa ranhurada



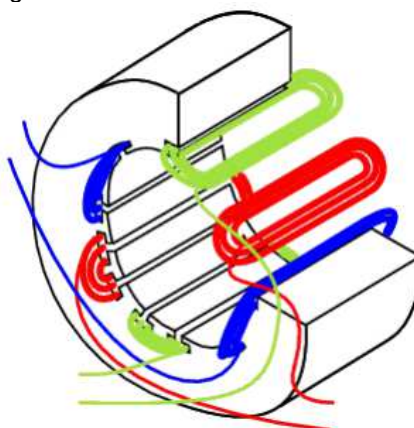
FONTE: (Adaptado do manual UNESP, 2010)

2.2.2.2 Enrolamentos

Os enrolamentos utilizados por máquinas de grande potência são do tipo trifásico, cada fase deve ser construída de forma idêntica às demais (mesmo número de espiras, seção do condutor, material, etc) e apresentar uma mesma distância com relação as outras fases, ou seja, o enrolamento deve ser equilibrado e simétrico.

A Figura 12 apresenta esquematicamente um estator com enrolamento trifásico:

Figura 12 - Detalhe de um enrolamento



FONTE: (Adaptado do manual UNESP, 2010)

Para os enrolamentos trifásicos algumas características se apresentam como muito importantes. São elas:

Número de ranhuras N_r

Número de polos p' - (número par maior ou igual a 2)

Número de bobinas por polo q - (número inteiro entre 1 -8)

Número fases m - 3

Distância entre as fases T_f - 120°

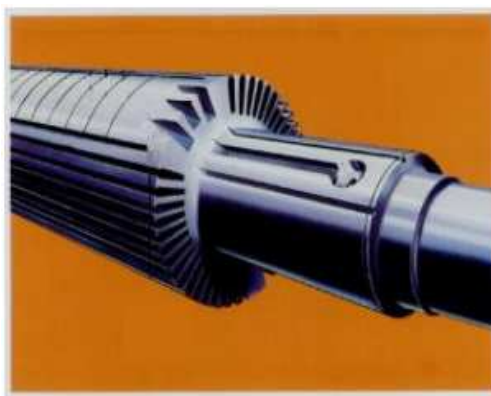
Distância entre polos T_p - 180°

Distância entre ranhuras D - $\tau p / (m \cdot q)$

2.2.2.3 Rotor

No rotor está o enrolamento de campo por onde circula uma corrente contínua a qual é obtida a partir de um sistema de excitação feito por baterias, ímãs permanentes, retificadores estáticos, arranjo *brushless* ou auto-excitação. Existe dois tipos de rotores, os cilíndricos que são chamados de rotor de polos lisos e os rotores de polos salientes. A Figura 13 apresenta o detalhe de um rotor.

Figura 13 - Detalhe de um rotor



FONTE: (Adaptado do manual UNESP, 2010)

2.2.2.3.1 Rotor de polos salientes

Se os polos magnéticos do enrolamento do rotor ficar exposto é chamado de rotor de polos salientes. Quando o núcleo tem polos salientes, as bobinas são enroladas em volta do rotor, sendo que a sua função é providenciar uma correta distribuição da densidade de fluxo no entreferro.

Os polos salientes são utilizados em máquinas síncronas que geralmente trabalham em baixas rotações, normalmente em usinas hidrelétricas que trabalham com uma velocidade baixa, entre 50 e 300 RPM, como a frequência é fixa em 60 Hz, o número de polos será relativamente grande.

O funcionamento em baixa rotação geralmente requer um grande diâmetro do rotor de forma a fornecer espaço suficiente para colocação de todos estes polos.

A Figura 14 apresenta o princípio de construção de uma máquina de polo saliente.

Figura 14 - Rotor de polo saliente



FONTE: (Adaptado do manual WEG, 2010)

2.2.2.3.2 Rotor de polos lisos

As máquinas de polos lisos possuem o bobinado do rotor embutido nas ranhuras. Estes são utilizados em máquinas que trabalham em altas rotações (de 1500 a 3600 RPM), como a frequência é fixa, o número de polos é baixo (de 2 a 4 polos). A Figura 15 apresenta o princípio de construção de uma máquina de polo liso.

Figura 15 - Rotor de polo liso

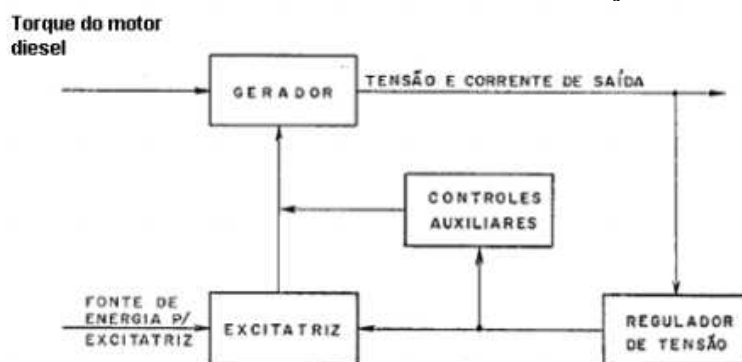


FONTE: (Adaptado do manual WEG, 2010)

2.2.2.3.3 Sistema de excitação

O objetivo do sistema de excitação é fornecer corrente contínua para o enrolamento de campo, estabelecendo a tensão interna do gerador e ajustando seu fator de potência. A excitação inicial é gerada por baterias, ímãs permanentes, retificadores estáticos, arranjo *brushless* ou auto-excitação, depois o gerador síncrono se auto excita. Na Figura 16 abaixo, é possível visualizar o princípio de funcionamento da auto excitação.

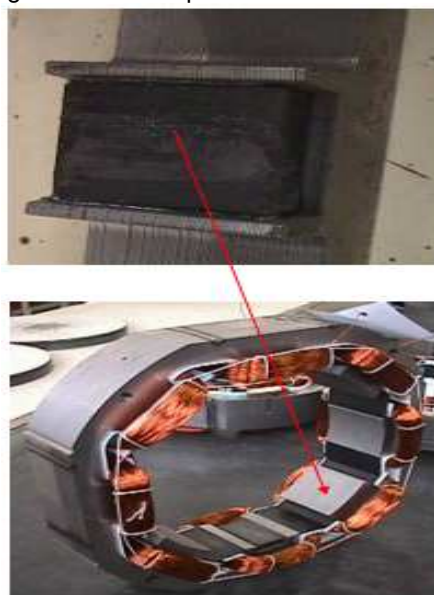
Figura 16 - Modelo de funcionamento do sistema de excitação de um gerador



FONTE: (Adaptado do manual WEG, 2010)

Conforme Figura acima, a fonte de energia primária para excitatriz era na maioria um gerador de corrente contínua montado no eixo do gerador, ou utilizava-se a própria tensão contínua da bateria de partida do motor diesel para gerar a excitação, porém hoje somente a excitação inicial é efetuada por um estator de imã permanente conforme Figura 17.

Figura 17 - Imãs permanentes no estator

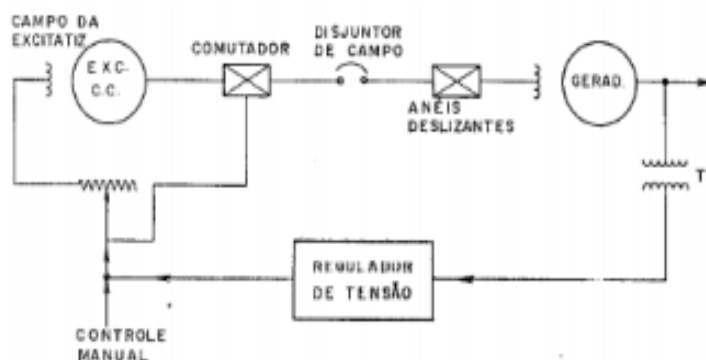


FONTE: (Adaptado do manual UNESP, 2010)

O regulador de tensão tem a função de controlar a saída da excitatriz, de modo que a tensão gerada e a potência reativa variem, da maneira desejada. Em sistemas muito primitivos, o operador desempenhava o papel do regulador de tensão, onde se observava a saída e ajustava o reostato de campo da excitatriz. Atualmente, o regulador funciona como um observador da tensão, corrente e potência ativa da saída do gerador, então inicia a ação corretiva através da variação do controle da excitatriz. A velocidade da ação do regulador é fundamental para a

estabilidade do sistema e os controles auxiliares têm a função de adição de amortecimento ao sistema de regulação. A Figura 18 apresenta um sistema clássico de auto excitação.

Figura 18 - Sistema de autoexcitação de um gerador síncrono



FONTE: (Adaptado do manual WEG, 2010)

2.3 A TÉCNICA ESA

2.3.1 Breve Histórico

Com vistas a proporcionar diagnósticos cada vez mais precisos de equipamentos elétricos, várias ações têm sido desenvolvidas ao longo dos anos com base na análise detalhada de grandezas elétricas. Estas, em função de seu vasto leque de possibilidades, foram agrupadas em um nome geral de Análise da Assinatura Elétrica (ESA) e, juntas, provêm um salto na capacidade de se detectar, analisar e corrigir a presença de anormalidades em equipamentos eletromecânicos, especialmente em motores de indução trifásicos.

O início deste tipo de técnica, ainda que de certa forma empírica, se deu quando da constatação de que pequenas oscilações em um amperímetro instalado no circuito de alimentação de um motor de indução no momento em que se tinha assimetrias relativas no seu rotor. Desta forma, flutuações nos valores da corrente absorvida por este equipamento passaram a servir de alerta para equipes de manutenção. Contudo, em função de variações na própria carga causarem o mesmo efeito, métodos mais detalhados de análise da corrente estatórica passaram a ser necessários.

Deste modo, a análise espectral da corrente, apesar de sensível à oscilação de carga, tem se demonstrado o principal alicerce dos métodos e técnicas de detecção de falhas em motores de indução. A publicação de vários trabalhos na linha de diagnóstico neste tipo de máquina desde a década de 80 tem ratificado isto.

Naturalmente, a partir dos anos 90, surgiram outras técnicas que utilizam a corrente como base da análise, mas que lançam mão de outras medidas e transformações para se avaliar a presença de frequências características de falhas.

Embora as pesquisas tenham se iniciado pela análise da corrente, outras formas de Análise da Assinatura Elétrica (ESA, conhecida em inglês por *Electrical Signature Analysis*) tem sido utilizada e apresentado resultados relevantes. Dentre algumas, são exemplos a Análise da Assinatura da Tensão (VSA, em inglês *Voltage Signature Analysis*) e a Abordagem do Vetor Estendido de Park (EPVA, em inglês *Extended Park Vector's Approach*). Contudo pelo próprio teor da descoberta, a sequência de trabalhos por Análise da Assinatura da Corrente (CSA, em inglês *Current Signature Analysis*) se intensificou ao longo do tempo, de forma tal que ela representa bem fielmente o histórico de evolução da técnica ESA.

Inicialmente, destacam-se os trabalhos de **Okitsu, et al. (1980)** e **Hargis (1982)** envolvendo a aplicabilidade da análise espectral da corrente no diagnóstico de falhas em motores de rotor bobinado e gaiola de esquilo, especialmente barras quebradas ou trincadas. **Thomson e Stewart (1988)** demonstraram ainda ser possível a detecção de barras quebradas em motores alimentados por inversores de frequência (ou VFD), que mais tarde foi estendida para os demais padrões de falhas.

Em seguida **Notelet e Ravalitera (1984)** demonstraram que em função das variações de indutância mútua nos enrolamentos estatóricos, decorrentes de excentricidade rotórica, se produzem flutuações na corrente estatórica. Estas flutuações se caracterizam por componentes espectrais obtidas a partir do número de polos e barras rotóricas, conforme **Cameron, et al. (1985 e 1986)**.

No diagnóstico de avarias no estator, **Thomson, et al. (1983)** verificaram o aparecimento de alterações significativas no espectro da corrente, particularmente com relação ao terceiro harmônico, quando da presença de desequilíbrios acentuados na alimentação ou curto-circuito de uma bobina. No último caso, também se registram alterações na amplitude dos harmônicos correspondentes ao efeito das ranhuras.

Schoen, et al. (1995) apresentam resultados que mostram, no espectro da corrente, o diagnóstico de avarias em rolamentos é possível através das frequências características de rolamentos (utilizadas em análise de vibração) desde que com uma resolução espectral suficiente. Contudo, notam que a sensibilidade de tal método é pequena para falhas incipientes, sendo possível o diagnóstico somente

nos estágios mais avançados da avaria. Mais tarde, **Obaid, Habetler e Stack (2003)** apresentam resultados experimentais obtidos com diversos tipos de avarias na pista interna.

A partir da década de 90, diversos trabalhos de análise espectral de corrente estatórica para o monitoramento de motores foram publicados. Todos estes agora, já com a agregação de recursos de inteligência artificial e sistemas especialistas no diagnóstico automático.

Em paralelo a isto, vários outros métodos de avaliação de motores também foram desenvolvidos, usando como premissa análises alternativas à corrente estatórica. A exemplo disto cita-se o método de **Maier (1992)**, a qual consiste na verificação da potência instantânea. Esta abordagem se justifica para falhas cujo efeito causa oscilações de torque, visto que a potência instantânea é mais sensível a mudanças de fase entre a corrente estatórica e a tensão de alimentação.

Neste contexto ainda se tem a abordagem por vetor de Park. Esta é particularmente útil por incluir informação das três correntes estatóricas. Sua aplicação abrange detecção de desequilíbrios elétricos, problemas estatóricos, problemas rotóricos e defeitos em rolamentos.

Maiores informações podem ser encontradas na revisão feita por **Benbouzid (2000)**, onde há uma completa e abrangente descrição das principais técnicas ESA envolvidas na detecção de falhas em motores de indução.

No início deste século, trabalhos teóricos e experimentais foram publicados até que, alguns fabricantes de equipamentos começaram a publicar casos reais de análise da corrente estatórica e expandiram a aplicabilidade da técnica para a detecção de falhas em partes até então não consideradas pelos trabalhos anteriores. Aparecem aí publicações com relação a falhas mecânicas no sistema de transmissão e carga acoplada por **Obaid, et al. (2000)** e **Bonaldi (2006)**.

De Lacerda de Oliveira (2006) apresenta um algoritmo inteligente na estimação de velocidade rotórica através da corrente estatórica. Tal trabalho traz diversas contribuições do ponto de vista de um sistema automático, pois propõe um método de busca, identificação e avaliação de componentes de falhas com base em características conhecidas do conjunto eletromecânico. É importante ressaltar que a determinação da velocidade rotórica, seja medida ou estimada, é indispensável para a obtenção da maioria dos padrões de detecção de falhas conhecidos.

Bonaldi e De Lacerda de Oliveira (2007) propõem um procedimento sistemático de implantação e operação de um sistema de manutenção preditiva através da técnica ESA em plantas industriais. A partir daí começou, em trabalhos de diversos autores, a ser explorada sua pontecialidade em instalações e equipamentos de maior complexidade de funcionamento e porte.

2.3.2 Definição

A Análise da Assinatura Elétrica é uma técnica não invasiva de análise e diagnóstico de falhas mecânicas e elétricas em equipamentos elétricos, tais como motores, geradores e transformadores. Utilizada como uma ferramenta de manutenção preditiva, esta provê além do diagnóstico de problemas, informações de desempenho do equipamento monitorado, sendo, portanto, uma excelente ferramenta para melhoria e otimização da manutenção. Seu potencial de detecção é extenso, podendo identificar falhas na alimentação, no próprio equipamento, na transmissão e na carga acoplada, utilizando apenas a leitura de sinais de corrente e tensão, como no caso de um motor.

As técnicas que compõem a ESA exploram a capacidade intrínseca de motores e geradores elétricos de atuar como transdutores. A partir do sensoramento não invasivo de grandezas de interesse, como corrente e tensão, estas técnicas de diagnóstico permitem detectar pequenas variações de carga e velocidade geradas em qualquer parte do conjunto eletromecânico através de assinaturas elétricas que podem ser usadas, inclusive para a detecção de falhas. A análise dessas assinaturas e suas respectivas tendências de evolução no tempo têm se mostrado muito eficazes quando aplicadas ao setor produtivo, que necessita de confiabilidade e máximo tempo de operação de tais equipamentos.

Em motores elétricos, além da detecção de barras rotóricas, excitações dinâmicas, assimetrias estatóricas e desvios da carga acoplada, ESA permite também identificar parâmetros de qualidade de energia, como desequilíbrio elétrico, presença de harmônicos, nível deTHD, fator de potência e potência consumida. Ainda como característica agregadora apresenta adaptação na avaliação de máquinas de difícil acesso e naquelas onde a análise por vibração não se faz possível. (**BONALDI, 2005**).

Em meio às diversas técnicas de ESA, a MCSA - *Motor Current Signature Analysis* vem sendo bem utilizada em motores. Esta é expressivamente difundida no

acompanhamento de tendências de sistemas energizados dinâmicos e seu resultado de avaliação permite identificar problemas, ainda em caráter preditivo, tais como:

- Problemas no enrolamento do estator;
- Problemas rotóricos;
- Problemas no acoplamento e na carga acoplada;
- Eficiência e carregamento do sistema;
- Problemas no Rolamento.

Nesta, o motor de indução é utilizado como elemento transdutor, permitindo que o usuário avalie sua condição elétrica e mecânica a partir do painel de alimentação e consiste basicamente na monitoração de uma de suas três fases de corrente de alimentação, conforme é ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Sistema típico para análise espectral da corrente de um motor de indução trifásico



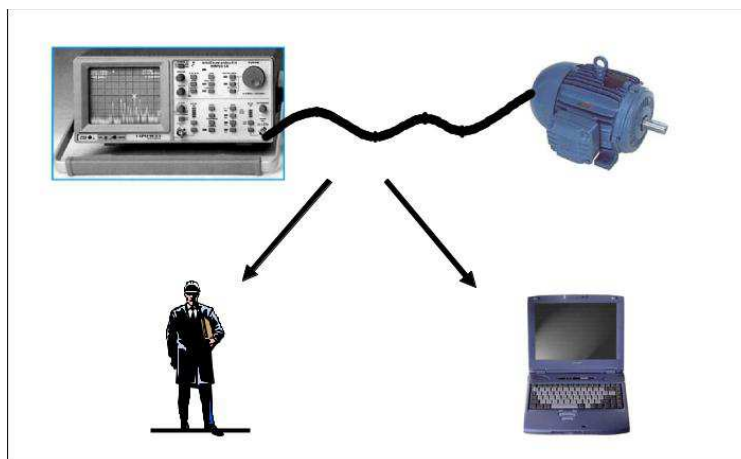
FONTE: (Bonaldi, 2005)

Assim, o sinal de corrente em uma das fases do motor é coletado, analisado e transformado sob a forma de espectro, normalmente referenciado como Assinatura da Corrente do Motor. Daí o objetivo é identificar a magnitude e frequência de cada componente individual que constitui o sinal de corrente do motor, dispostos em tal assinatura. Isso permite que padrões sejam identificados para diferenciar motores “saúdáveis” de motores em falta e ainda detectar em que parte da máquina a falha deve ocorrer.

Contudo, é importante ressaltar que o diagnóstico é algo de relativa complexidade, isto é, a definição de parar ou não o processo produtivo em virtude das indicações do espectro de corrente é sempre difícil e exige profunda experiência e conhecimento. É neste momento onde o saber do especialista tem que se alinhar ao histórico operativo do equipamento e seu conjunto (motor, sistema de transmissão e carga) de modo a considerar suas peculiaridades técnicas ou seus

vícios de manutenção. Por esta razão, qualquer sistema de diagnóstico automático que considere este fato encontra um nicho de mercado bastante promissor. Desta forma, o sistema de análise e diagnóstico automático já não é tão simples como o modelo apresentado na Figura 19, mas pode ser representado pela Figura 20 conforme ilustrado abaixo:

Figura 20 - Integração de um sistema de diagnóstico automático de um motor de indução trifásico



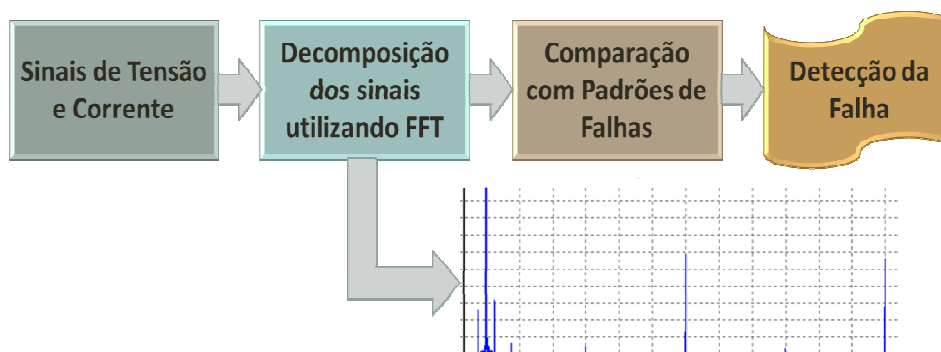
FONTE: (Bonaldi, 2005)

No sentido de promover mais agilidade no processamento e no poder de detecção de possíveis falhas, a ESA é alinhada a algumas ferramentas computacionais de resultado rápido e eficiente. Dentre as mais utilizadas para processamento digital de sinais, a que se destaca é a FFT - *Fast Fourier transform*, que tem como objetivo estabelecer um algoritmo de cálculo para a transformada discreta de Fourier (DFT).

Entretanto, alguns outros sistemas empregam, em conjunto, outras técnicas para aumentar a capacidade de detecção de falhas desde a aquisição do sinal, passando pelo processamento, até a etapa de diagnóstico.

Mesmo assim, de uma forma geral, a análise pela técnica ESA segue uma divisão em termos de etapas de execução que são bem características. Estas se iniciam pela aquisição dos sinais de tensão e de corrente, passam por aquelas de decomposição e comparação de sinais e finalizam nas de detecção da falha ou fenômeno observado. A Figura 21 apresenta um diagrama típico destas etapas.

Figura 21 - Diagrama de bloco simplificado de aplicação da técnica ESA

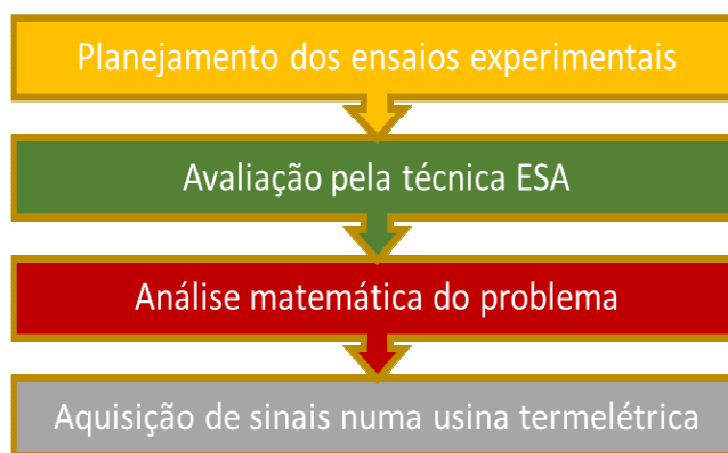


FONTE: (O autor, 2017)

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na condução do trabalho pode ser dividida em quatro etapas principais. Primeiramente, o planejamento dos ensaios experimentais, onde houve a especificação dos equipamentos, instrumentos e do ambiente utilizado, a determinação do número de amostras de sinais a partir de critérios estatísticos e a simulação de falhas num laboratório de modelo reduzido; posteriormente, a avaliação das assinaturas elétricas dos sinais coletados em cada falha simulada, buscando padrões de falha; em seguida, um análise matemática do problema, com vistas a uma descrição teórica e fundamentada da hipótese; e por último, a aquisição de sinais de grupos motor-gerador em operação numa usina termelétrica com o objetivo de localizar os padrões de falha observados nos ensaios experimentais num motor multicilíndrico, analisando seu espectro operativo. A Figura 22 apresenta o diagrama das etapas da metodologia.

Figura 22 - Diagrama das etapas da metodologia utilizada no trabalho



FONTE: (O autor, 2017)

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1.1 Equipamentos e Instrumentos

De uma forma geral pode-se dizer que o necessário para condução dos ensaios, em termos de equipamento e instrumentos, foi um grupo motor-gerador de combustão interna instalado no ambiente de um laboratório de modelo reduzido, equipamentos de transdução e aquisição de sinais e alguns itens acessórios.

O laboratório de modelo reduzido utilizado é um ambiente físico isento de interferências, inclusive com isolamento acústica, dotado de equipamentos, instrumentos e acessórios específicos para realização de ensaios. A Figura 23 apresenta detalhes do laboratório utilizado.

Figura 23 - Detalhes do laboratório de modelo reduzido



FONTE: (O autor, 2017)

O grupo motor-gerador utilizado no espaço do laboratório de modelo reduzido para aquisição de sinais, mediante os ensaios, tem características conjuntas de sistema de refrigeração a água por termosifão, sistema de partida elétrica e a manivela e alimentação trifásica. O gerador, em específico, é do tipo autorregulado de acoplamento direto com alimentação AC, modelo YTGD125TE do fabricante Yanmar, tensão de saída de 110 / 220 V, potência máxima de 12,5 kVA / 10,0 kW, potência contínua de 11,3 kVA / 9,0 kW, frequência de 60 Hz, rotação de 1800 rpm e 4 polos. Já o motor é do ciclo Diesel, modelo YT22E do fabricante Yanmar, com 1 cilindro em linha, rotação de 1800 rpm, tanque de capacidade de 10,5 L, 2 válvulas por cilindro, sistema de lubrificação sob pressão, sistema de acoplamento direto e sistema de combustão a injeção direta. A Figura 24 apresenta detalhes do grupo motor-gerador utilizado.

Figura 24 - Grupo motor-gerador do laboratório de modelo reduzido



FONTE: (O autor, 2017)

Os equipamentos de transdução e aquisição de sinais utilizados, para cada grupo motor-gerador, foram 3 transformadores de corrente, 3 transformadores de tensão e 1 sistema de aquisição de dados. O transformador de corrente é de núcleo bipartido com tensão de operação de 300 Vac a temperatura de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, defasagem de $1,5\text{ }^{\circ} \pm 1\text{ }^{\circ}$, acuidade de 1 % e erro de linearidade de 0,1 %. O transformador de tensão é de isolamento galvânica com tensão nominal de entrada de 480 Vac, tensão nominal de saída de 714 mVac, entrada com conectores tipo jacaré e pinça, saída via conector BNC fêmea e atenuação de 672 vezes. O sistema de aquisição de dados é formado por um kit de placas com resolução de 24bits e frequência de amostragem de 96 MHz, 8 canais simultâneos, processador ARM CORTEX A8 com clock de até 1 GHz e uma interface ethernet de 100 Mbps. A Figura 25 mostra os equipamentos de transdução e aquisição de sinais enquanto a Figura 26 detalha sua instalação na planta termelétrica.

Figura 25 - Equipamentos de transdução e aquisição de sinais. a) Transformador de corrente, b) Transformador de tensão e c) Sistema de aquisição de dados



FONTE: (O autor, 2017)

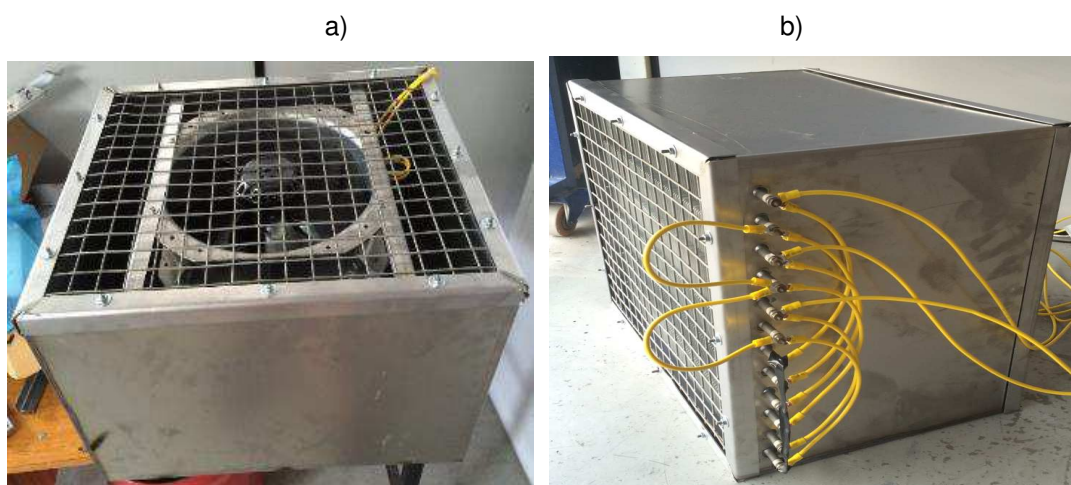
Figura 26 - Sistema de transdução e aquisição de sinais instalado na usina termelétrica. a) Detalhe do sistema de aquisição de dados e do transformador de tensão e b) Detalhe do transformador de corrente



FONTE: (O autor, 2017)

Ainda foram utilizados vários itens acessórios, dentre os quais, destaca-se a carga resistiva utilizada no grupo motor-gerador utilizado no espaço do laboratório de modelo reduzido. Esta é formada por 6 resistores com potência de 1500 W, tensão de 220 V e resistência de 33 Ω , cada, e 1 ventilador de resfriamento monofásico com tensão de 220 V, frequência de 60 Hz, corrente de 0,8 A e velocidade de 2700 rpm. A Figura 27 mostra detalhes da carga resistiva utilizada.

Figura 27 - Carga resistiva utilizada no grupo motor-gerador no laboratório de modelo reduzido. a) Detalhe do ventilador de resfriamento e b) Detalhe das conexões



FONTE: (O autor, 2017)

3.1.2 Determinação do Número de Amostras

No intuito de conhecer os padrões das assinaturas elétricas provocadas por uma máquina primária do tipo motor a combustão interna e até mesmo comprovar a hipótese lançada, iniciaram-se os experimentos com o grupo motor-gerador no laboratório de modelo reduzido. Para que isto fosse realizado com determinado nível de confiança procedeu-se um planejamento criterioso com embasamento estatístico, onde se determinou o número de amostras de sinais a ser coletado para cada caso simulado de falha.

O procedimento para realização dos ensaios experimentais consistiu em, para cada padrão de falha em análise do grupo motor-gerador, coletar um conjunto de dados elétricos. Estes dados são aquisições de sinais de tensão ou corrente do estator do gerador acoplado, considerando-se diferentes condições de carga e diferentes níveis de severidade de falha. A Tabela 2 ilustra o conjunto de dados experimentais, onde cada célula representa dados de tamanho n .

Tabela 2 - Conjunto de dados experimentais das falhas

	Baseline	Defeito X			
		Severidade 1	Severidade 2	...	Severidade m
Carga 1	Dados 1-b	Dados 1-s1	Dados 1-s2	...	Dados 1-sm
Carga 2	Dados 2-b	Dados 2-s1	Dados 2-s2	...	Dados 2-sm
...	...	...	...	...	...
Carga n	Dados n-b	Dados n-s1	Dados n-s2	...	Dados n-sm

FONTE: (O autor. 2017)

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-se um dado nível de severidade de falha). Assim a análise estatística visou determinar o número n de amostras, ou o mínimo dele, para se comprovar se os dados do conjunto Baseline eram diferentes dos dados do conjunto Defeito.

A análise para detecção de defeito é realizada através da assinatura elétrica, em que 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. Assim sendo, uma abordagem é tomar-se a média aritmética μ das magnitudes da componente de frequência em análise de cada aquisição para representar cada 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. Trata-se 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.

No problema definido, tem-se dois conjuntos de amostras independentes. Portanto deseja-se testar se estes conjuntos de dados são diferentes. Como os ensaios experimentais foram executados utilizando-se o mesmo processo, considera-se que ambos os conjuntos de dados possuem a mesma variância. Desta forma, o teste mais adequado para este problema foi 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:

$$d = \frac{|\mu_B - \mu_D|}{\sigma} \quad (20)$$

Onde d é o efeito do teste e σ é o desvio padrão. 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.

Após 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:

$$n = \frac{2}{d^2} \cdot (z_{1-\alpha'/2} + z_{1-\beta'})^2 \quad (21)$$

Onde Z_K é 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 (21), 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, caso esta diferença exista.

Uma observação é que, para estes mesmos parâmetros, a tabela de *Cohen* apresenta $n = 26$ amostras. Isso pode ser explicado pelo método de cálculo ou de arredondamento utilizado. Assim sendo, são consideradas 26 aquisições para cada conjunto de dados.

3.1.3 Simulação de Falhas

Com o objetivo de simular falhas mais próximas daquelas encontradas num ambiente real de operação de um conjunto motor-gerador, além de comprovar a hipótese lançada, procedeu-se uma série de estudos dos modos de falha identificados como de maior consequência para os equipamentos, como os que carecem de meios de monitoramento pré-falha, ou ainda, como aqueles de fácil realização nas atividades de comprovação. Isto só foi possível através da análise das ocorrências de alguns equipamentos do tipo bem como da engenharia de conhecimento.

Assim as simulações foram realizadas com formas bem específicas dentro de um laboratório de modelo reduzido o qual consistiu de um ambiente pojetado em menor escala para experimentar possíveis manipulações nas máquinas que não poderiam ser feitas no ambiente real de operação. Para tanto foi utilizado o grupo motor-gerador com todo aparato de instrumentação para aquisição de sinais.

As falhas simuladas foram aquelas observadas no circuito retificador da excitatriz do gerador; de desalinhamento mecânico; no anel do pistão; nas válvulas de admissão e escape; na válvula de injeção e na válvula de admissão, de forma isolada.

3.1.3.1 Falhas no circuito retificador da excitatriz do gerador

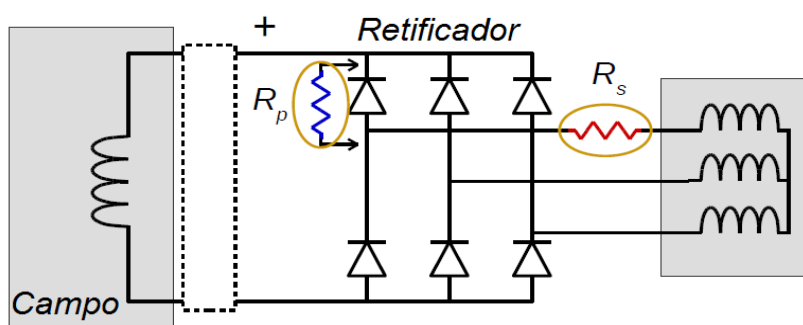
O primeiro tipo de falha simulada foi no circuito retificador da excitatriz do gerador síncrono. Composto por diodos para uma retificação de onda completa trifásica, o circuito sofreu modificação de modo a gerar duas situações de falha. A primeira relativa ao desequilíbrio de corrente e a segunda relativa a um curto-circuito nos diodos. Isto foi possível através da inserção de resistores dispostos em arranjos específicos.

Na primeira situação a falha foi simulada através da inserção de um resistor em série com uma das entradas AC do retificador da excitatriz. Para se obter níveis de severidade de falha foram utilizados resistores com valores de resistências distintos, tais como, 2,0; 5,0; 7,0 e 10,0 (Ω), sendo o de maior valor de resistência o que implica em um maior nível de severidade de falha, uma vez que provoca um maior desequilíbrio.

Já na segunda situação a falha foi simulada através da inserção de um resistor em paralelo com um dos diodos (entre um dos terminais AC e um dos terminais DC) do retificador da excitatriz. Também foram estabelecidos níveis de severidade a partir da utilização de resistores com valores de resistências distintos, neste caso com 30,0 e 15,0 (Ω), sendo o de menor valor de resistência o que implica em um maior nível de severidade de falha, uma vez que provoca uma condição mais próxima de um curto-circuito.

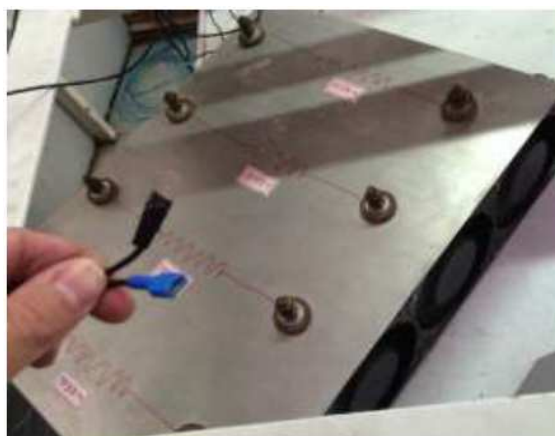
A Figura 28 ilustra a simulação das falhas enquanto a Figura 29 detalha o resistor utilizado.

Figura 28- Ilustração da falha no retificador da excitatriz do gerador por inserção de resistores



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 29 - Detalhe do resistor utilizado para inserção da falha

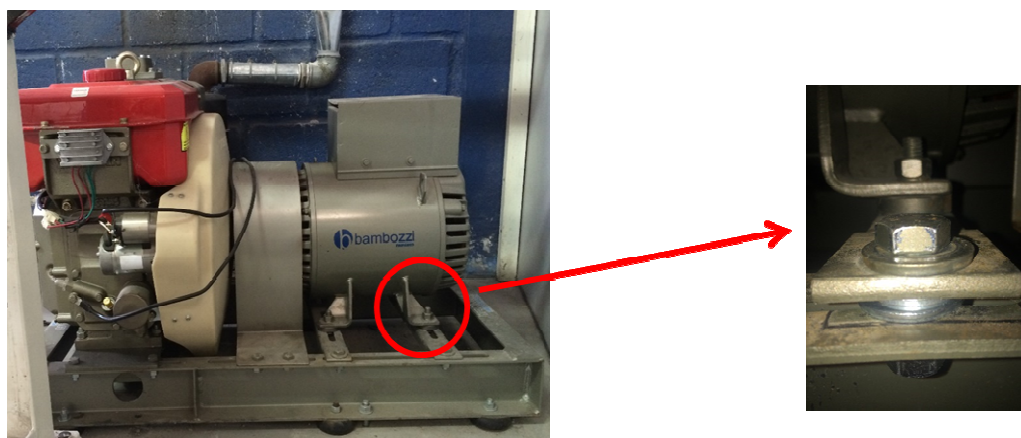


FONTE: (O autor, 2017)

3.1.3.2 Falhas de desalinhamento mecânico

Em seguida foi simulada a falha de desalinhamento mecânico no conjunto motor-gerador. Sua realização se deu através da inserção de arruelas nos parafusos de fixação do gerador síncrono, de modo a promover vários tipos de desvios no eixo. Dentre tantos, os escolhidos foram aqueles desvios observados no sentido vertical, seja paralelo, seja angular. Para o desalinhamento vertical paralelo, o mesmo número de arruelas foi inserido em cada um dos quatro parafusos de fixação. Já no caso do desalinhamento vertical angular, números diferentes de arruelas foram inseridos nos parafusos. A Figura 30 mostra a inserção da falha.

Figura 30 - Inserção de falha de desalinhamento mecânico



FONTE: (O autor, 2017)

3.1.3.3 Falhas no anel do pistão

Depois foi simulada a falha no anel do pistão na intenção de gerar problemas de lubrificação no motor. Sua realização se deu através do desgaste do próprio anel e da regulação do fluxo de óleo lubrificante.

3.1.3.4 Falhas nas válvulas de admissão e de escape

Logo após foi simulada a falha nas válvulas de escape do motor. Sua realização se deu desregulando-se as próprias válvulas.

3.1.3.5 Falhas na válvula de injeção

Outro tipo de falha simulada foi aquela encontrada na válvula de injeção de combustível do motor. Sua realização se deu através da redução da pressão interna na própria válvula.

3.1.3.6 Falha na válvula de admissão

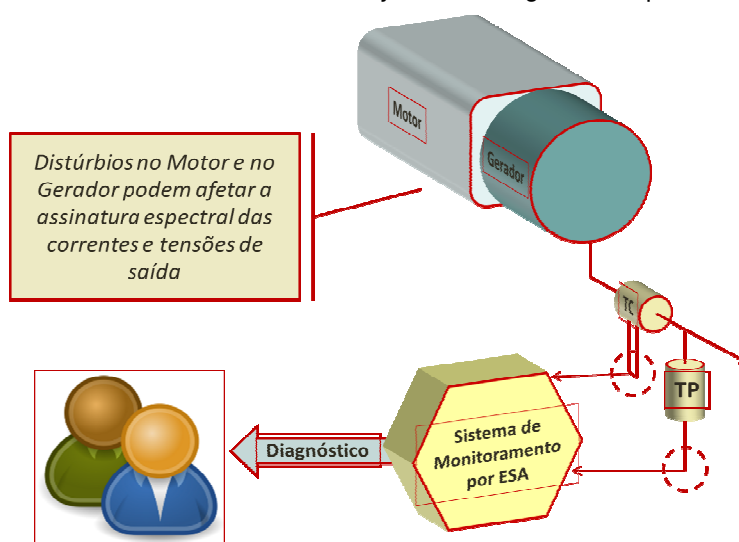
Por fim foi simulada a falha na válvula de admissão do motor de forma isolada. Sua realização se deu através da redução do fluxo de ar por obstrução total e parcial do filtro de ar.

Dentre todas as falhas esta foi a escolhida para aprofundamento da pesquisa, inclusive para fins de análise e representação matemática, dada a sua forte influência no completo e complexo sistema de funcionamento do motor, desde o momento de composição da mistura para queima até a geração de torque no movimento rotativo.

3.2 ANÁLISE DA ASSINATURA ELÉTRICA

A Figura 31 ilustra o sistema utilizado para análise do grupo motor-gerador a partir da técnica ESA. Nele é destacado como o sinal é adquirido em termos de tensão e de corrente, processado e diagnosticado como indicador de falha.

Figura 31 - Sistema de análise de um conjunto motor-gerador a partir da técnica ESA

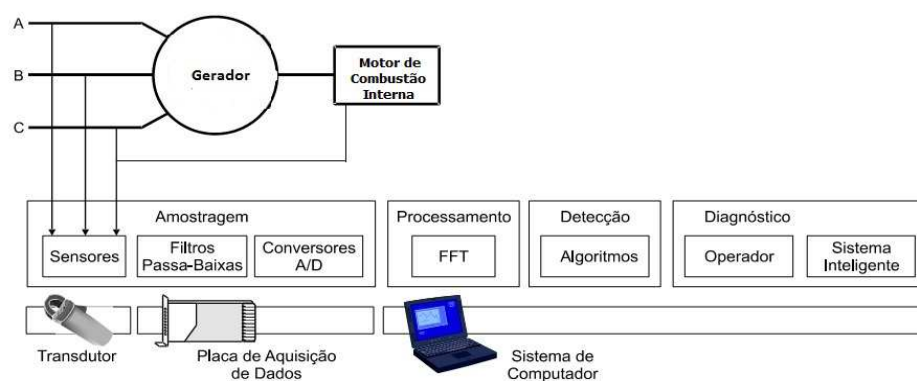


FONTE: (O autor, 2017)

É fácil perceber que a aquisição dos sinais elétricos do equipamento é a etapa prioritária para o início da análise. Portanto, a ESA em suas formas distintas de aplicação, como CSA, VSA e EPVA, exige uma qualidade satisfatória da coleta das grandezas elétricas em observação.

Para este trabalho uma quantidade expressiva de sinais foi coletada em duas situações distintas, de falha e de normalidade. Estes sinais foram submetidos a um intenso processamento, inclusive estatísticos, fornecendo espectros elétricos com a condição do grupo motor-gerador. Para se chegar a este processo conclusivo, diversas foram as etapas de análise. Estas, em termos de diagrama de blocos, podem ser descritas conforme Figura 32.

Figura 32 - Diagrama de bloco da técnica ESA aplicada a um conjunto motor-gerador



FONTE: (O autor, 2017)

A primeira etapa foi a de aquisição dos sinais. Nesta foram utilizados transdutores para leitura de corrente e tensão em pontos do circuito elétrico do gerador. Estes equipamentos foram transformadores de corrente (TC) e transformadores de tensão (TP) devidamente especificados conforme a particularidade da instalação, do equipamento e da topologia da rede.

Após a aquisição se deu a etapa de tratamento, onde foi realizado todo o trabalho de amostragem, filtragem e conversões de sinais. Nela foi onde aconteceu a conversão das grandezas analógicas para as digitais, além do processo de exclusão de possíveis ruídos e definição da zona de interesse da análise.

Em seguida foi realizada a etapa de processamento e diagnóstico. Nesta foi executado o processo mais refinado da análise e, portanto, de pesquisa e construção de conhecimento, pois nela foram utilizadas ferramentas e técnicas de manipulação de sinais, o que permitiu estabelecer uma separação entre eles, de acordo com suas características.

3.2.1 Método

O método para avaliação do grupo motor-gerador consistiu em analisar os sinais de tensão e de corrente que foram transduzidos pelo gerador a partir dos TCs e TP's instalados nas suas fases de saída. Com processamento que utiliza um algoritmo *Fast Fourier Transform* (FFT) tais sinais foram convertidos do domínio do tempo para o domínio da frequência. O passo seguinte foi a manipulação e interpretação do conjunto de dados ora por tensão, ora por corrente ou de forma conjunta. Neste sentido utilizou-se a técnica ESA nas suas formas de análise por CSA, VSA e EPVA.

3.2.1.1 Análise por CSA e VSA

Conhecida como *Current Signature Analysis* (CSA), esta técnica, que possibilita a detecção de falhas de origem mecânica e elétrica, é bem sensível à oscilação de carga. Sua utilização é bem intensa em motores de indução, onde permite a identificação de problemas nos enrolamentos rotóricos e estatóricos, de desalinhamento e desbalanceamento, de excentricidade estática e dinâmica, etc. No caso de geradores, sua aplicação é mais recente, porém apresenta elevado potencial para detecção de falha em suas máquinas primárias.

Assim como as outras técnicas, a CSA utilizou a FFT como principal ferramenta de processamento, contudo alguns sistemas empregam em conjunto outras técnicas para aumentar a capacidade de detecção de falhas desde a aquisição do sinal, passando pelo processamento, até a etapa de diagnóstico. Dentre as questões mais importantes relacionadas à aquisição dos sinais e ao uso desta ferramenta destacam-se:

Faixa de Frequência: a resposta em frequência normalmente necessária em CSA é de 5kHz. Desta forma, a faixa de passagem dos transdutores utilizados deve ser de no mínimo 10 kHz para satisfazer o teorema de *Nyquist*.

Teorema de *Nyquist*: esse teorema afirma que para representar um sinal qualquer para ser reconstruído sem perdas significativas devem ser retiradas amostras com o dobro da frequência máxima deste sinal. Na prática, pode-se usar 10 vezes a frequência máxima, podendo conferir uma excelente precisão.

Resolução: a resolução espectral, ou seja, a distância entre duas raia's espectrais é dada por:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (6)$$

Onde: Δf é a resolução espectral, f_s é a frequência de amostragem utilizada e N é o número de amostras.

O uso da escala em dB: ao contrário da análise de vibração, CSA utiliza a escala em dB para a análise da severidade da falha. A razão é muito clara, uma vez que a amplitude da componente fundamental da rede é muito maior que as amplitudes das componentes de falha, fica inviável a comparação entre essas frequências numa escala linear.

A análise por CSA foi utilizada para detecção de falhas no motor de combustão interna e no gerador acoplado. Em conjunto, foram utilizadas também as análises por VSA e EPVA.

A técnica de *Voltage Signature Analysis* (VSA) seguiu o mesmo método da CSA. Sua análise é especialmente relevante em casos onde os geradores estão isolados, isto é, sem a presença de outra fonte que controle tensão e frequência. Nesta situação as falhas são observadas na direção da máquina primária para o gerador.

3.2.1.2 Análise por EPVA

Conhecida como *Extended Park's Vector Approach* (EPVA), esta técnica teve suas primeiras pesquisas envolvendo o diagnóstico de avarias em motores tais como curto-circuito entre espiras, excentricidade do *airgap*, barras quebradas, danos nos enrolamentos, entre outras. Tudo isto com base na análise da corrente e da tensão estatóricas (DA SILVA, 2015).

Desenvolvida inicialmente para a representação bidimensional das correntes estatóricas do sistema trifásico, a detecção de avarias se baseava apenas nas distorções sofridas nesta representação (chamada círculo de Park) em função do surgimento e do agravamento das avarias. Porém, com o aprimoramento recente realizado pelo próprio professor Cardoso da Universidade de Coimbra, incorporando a análise espectral, esta técnica passou a ser mais facilitada no quesito interpretação, podendo assim ser descrita da forma apresentada em seguida (BONALDI, 2005).

Considerando um motor trifásico como exemplo, inicialmente obtêm-se as correntes das três fases de alimentação as quais se apresentam nas equações abaixo.

$$i_A = i_M \cos(\omega_a t - \alpha) \quad (22)$$

$$i_B = i_M \cos\left(\omega_a t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (23)$$

$$i_C = i_M \cos\left(\omega_a t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (24)$$

Onde: i_M é a o valor de pico da corrente; ω_a é a frequência angular em rad/s; α é o ângulo de fase inicial em rad; t é a variável tempo e i_A , i_B , i_C são respectivamente as correntes nas fases A, B e C.

Para uma análise em termos de vetor de Park, estas correntes podem ser exploradas por:

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)i_A - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_C \quad (25)$$

$$i_Q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_C \quad (26)$$

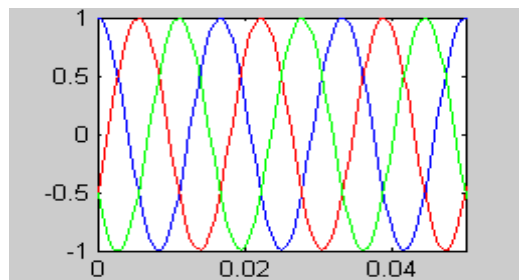
Em condições ideais tem-se:

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \cos(\omega_a t - \alpha) \quad (27)$$

$$i_Q = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \sin(\omega_a t - \alpha) \quad (28)$$

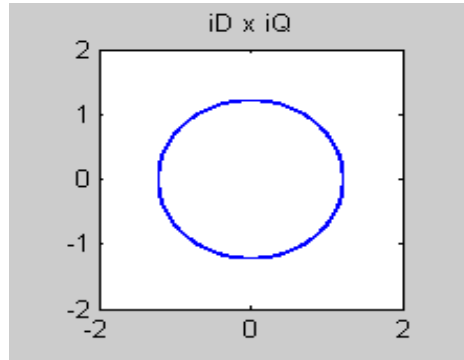
Graficamente isto é observado por um círculo de Park perfeito centrado na origem das coordenadas conforme Figura 34 que foi obtida a partir da Figura 33.

Figura 33 - Sinais no domínio do tempo de corrente de um motor trifásico



FONTE: (Bonaldi; et al, 2012)

Figura 34 - Sinais no círculo de Park de um motor trifásico saudável



FONTE: (Bonaldi; et al, 2012)

Sob condições anormais de operação, ou seja, quando do surgimento de avarias de origens mecânicas ou elétricas, as equações anteriores não são mais válidas e o círculo de Park passa a sofrer distorções. Como essas alterações são difíceis de serem mensuradas no círculo, foi proposta pelo método de EPVA a observação do espectro do módulo do vetor de Park.

Portanto, a vantagem da técnica de EPVA reside no fato da mesma combinar a simplicidade do método anterior (análise do círculo de Park) com a potencialidade da análise espectral. Além disso, a componente fundamental da alimentação do motor é automaticamente subtraída do espectro pela transformação de Park, fazendo com que as componentes características de falha apareçam com destaque. O ponto mais importante é o fato da técnica considerar as três fases de corrente, gerando um espectro mais significativo por englobar informações das três fases. Esta característica é extremamente útil em casos onde falha só pode ser detectada se consideradas as três fases (**BONALDI, 2005**).

Considerando que as correntes, onde existe um desequilíbrio nas tensões de alimentação, podem ser representadas por:

$$i_A = i_d \cos(\omega_a t - \alpha_d) + i_i \cos(\omega_a t - \beta_i) \quad (29)$$

$$i_B = i_d \cos\left(\omega_a t - \alpha_d - \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega_a t - \beta_i + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (30)$$

$$i_C = i_d \cos\left(\omega_a t - \alpha_d + \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega_a t - \beta_i - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (31)$$

Onde: i_d é o máximo valor da corrente de sequência direta; i_i é o máximo valor da corrente de sequência inversa; α_d é o ângulo de fase inicial da corrente de

sequência direta em rad; β_i é o ângulo de fase inicial da corrente de sequência inversa em rad.

No vetor de Park, tem-se:

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \right) [i_d \cos(\omega_a t - \alpha_d) + i_i \cos(\omega_a t - \beta_i)] \quad (32)$$

$$i_Q = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \right) [i_d \sin(\omega_a t - \alpha_d) - i_i \sin(\omega_a t - \beta_i)] \quad (33)$$

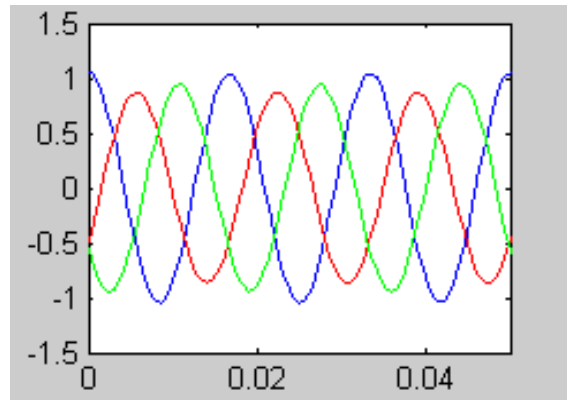
E o quadrado do módulo do vetor de Park será dado por:

$$|i_D + ji_Q|^2 = \left(\frac{3}{2} \right) (i_d^2 + i_i^2) + 3i_d i_i \cos(2\omega_a t - \alpha_d - \beta_i) \quad (34)$$

Agora, basta aplicar a FFT ao quadrado do módulo do vetor de Park e observar que o mesmo será composto de um nível DC mais um termo adicional localizado em duas vezes a frequência de alimentação. É exatamente este termo adicional que indica o surgimento e o agravamento de assimetrias elétricas estatóricas.

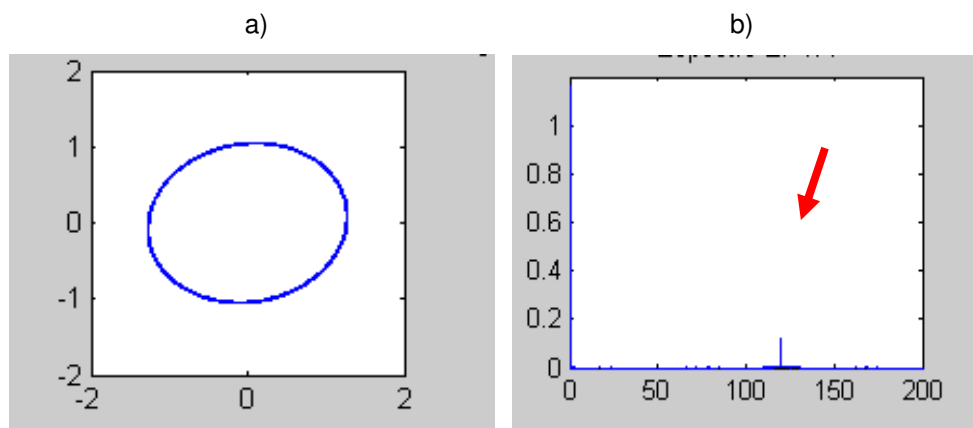
Seja o exemplo da Figura 35 onde foi considerada uma alimentação desequilibrada. O círculo de Park passa a se assemelhar a uma elipse conforme mostra a Figura 36a. Isto pode ser constatado através do surgimento no espectro da componente de duas vezes a frequência de alimentação, exposta na Figura 36b.

Figura 35 - Desequilíbrio entre as fases de um motor de indução trifásico



FONTE: (Bonaldi; et al, 2012)

Figura 36 - Alterações promovidas pelo desequilíbrio de fases de um motor trifásico. a) Círculo de Park distorcido e b) Presença da componente de duas vezes a frequência de alimentação



FONTE: (Bonaldi; et al, 2012)

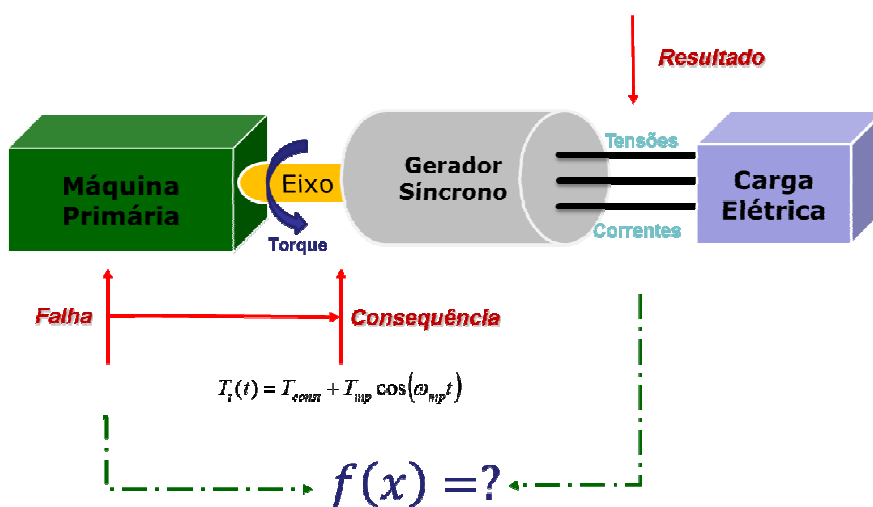
Sendo assim, a análise por EPVA foi utilizada quando o objetivo era o de identificar falhas que provocassem desequilíbrio de tensão ou de corrente no gerador. Com dados estatóricos do gerador as análises foram realizadas nas três fases de tensão e de corrente, além das análises por CSA e por VSA.

3.3 ANÁLISE MATEMÁTICA

3.3.1 Descrição do Problema

Antes de iniciar a análise matemática propriamente dita convém discorrer um pouco sobre o problema em questão. Para tanto será utilizada a Figura 37 a qual possibilita delimitar duas regiões de interesse numa visão completa do grupo motor-gerador em operação.

Figura 37 - Regiões de interesse do conjunto motor-gerador



FONTE: (O autor, 2017)

Conforme pode ser visto o problema envolve o conhecimento de operação da máquina primária, neste caso o motor de combustão interna, do gerador síncrono e da carga elétrica. Desta forma pode-se dizer que existe duas regiões de acoplamento, ou simplesmente de interesse. Esta consideração leva em conta o fato de nessas zonas de fronteira algumas grandezas serem determinantes para o funcionamento da máquina conectada. Além disso, é onde se tem maior sensibilidade a variações de operação.

Partindo do funcionamento elementar das máquinas envolvidas, a primeira região de interesse é aquela entre o motor de combustão interna e o gerador síncrono. Nela o objetivo é obter o torque do motor em função, ou a partir, da massa ou volume de ar na admissão do cilindro. A segunda é aquela entre o gerador síncrono e a carga elétrica acoplada. Nela o objetivo é obter os perfis de tensão e de corrente em função do torque do motor que é o mesmo do gerador, dado o eixo solidário existente entre tais máquinas.

Assim a análise matemática teve como problema central obter um $f(x)$ entre a massa ou volume de ar na admissão do cilindro, ou alguma grandeza relacionada diretamente, e os perfis de tensão e de corrente na saída do gerador. Para facilitar o equacionamento foi calculado o torque $T_i(t)$, aqui considerado como o torque indicado T_i , ora como grandeza de saída, para primeira região de interesse, ora como grandeza de entrada, para segunda região de interesse. Desta forma a falha, quando presente na admissão do cilindro, permite uma representação matemática no torque observado no virabrequim do motor e este parâmetro, por sua vez, determina os perfis de tensão e de corrente na saída do gerador.

3.3.2 Equacionamento

A representação matemática, ou de forma mais ampla o equacionamento, foi realizado para o torque do motor para o gerador, ou primeira região de interesse, e do gerador para a carga, ou segunda região de interesse. O equacionamento levou em conta duas circunstâncias de operação do grupo motor-gerador. Uma que trata de uma situação de normalidade, chamada de condição de baseline, e outra que trata de uma situação de anormalidade, chamada de condição de falha.

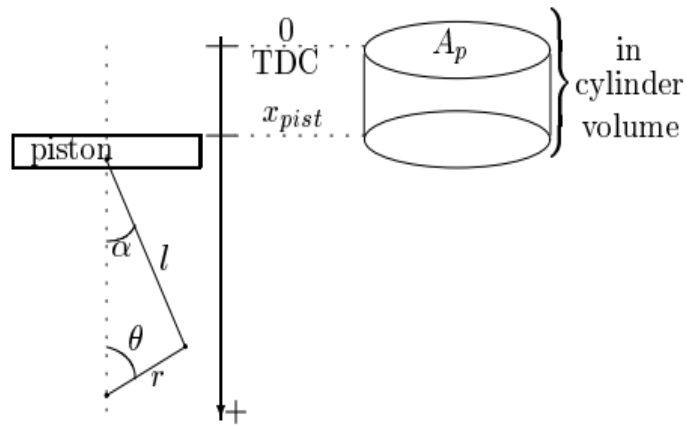
3.3.2.1 Do Motor para o Gerador

Para equacionamento do torque do motor para o gerador, ou primeira região de interesse, foi adotado como referência o modelo utilizado para um motor a diesel com quatro cilindros, a quatro tempos proposto por **Dupraz, et al. (1999)**.

3.3.2.1.1 Condição de baseline

A seguir tem-se o equacionamento do torque do motor para o gerador na condição de baseline. A Figura 38 apresenta os parâmetros geométricos do pistão.

Figura 38 - Parâmetros geométricos de um pistão de um motor de combustão interna



FONTE: (Dupraz; et al, 1999)

Onde:

- r é o raio da manivela
- l é o comprimento da biela
- θ é a posição angular do virabrequim
- $\beta = \frac{r}{l}$
- x_{pist} é a posição do pistão

Para posição do pistão:

$$x_{pist} = r \left[(1 - \cos \theta) + \frac{1}{\beta} \left(1 - \sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \theta} \right) \right] = r f_0(\theta) \quad (35)$$

E volume de entrada no cilindro:

$$V(\theta) = V_0 + A_p x_{pist} = V_0 + A_p r f_0(\theta) \quad (36)$$

Com:

- A_p é a seção do cilindro
- V_0 é o volume de folga (volume morto) do cilindro

Calcula-se a derivada:

$$\frac{dV(\theta)}{d\theta} = A_p r \frac{df_0}{d\theta} = A_p r f_1(\theta) \quad (37)$$

$$f_1(\theta) = \sin\theta + \beta \frac{\sin\theta \cos\theta}{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2\theta}} \quad (38)$$

E depois para o torque, tem-se:

$$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{2} J(\theta) \omega^2 \right) = T_i - T_r = K g_1(\theta) + g_2(\theta) - T_r \quad (39)$$

- $J(\theta)$ é a constante de inércia variável do virabrequim
- ω é a velocidade instantânea do virabrequim
- T_i é o torque indicado (ou torque T_t que se deseja estimar)
- T_r é o torque resistivo (torque de fricção e torque de carga)

K e T_r são constantes em cada intervalo de explosão $[n\pi, (n+1)\pi]$ (será considerado o intervalo $[0, \pi]$ e depois pode ser feita uma mudança de variável em θ para os outros intervalos).

Focando os cilindros nos momentos de compressão e expansão:

$$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{2} J(\theta) \omega^2 \right) = T_c(\theta) + T_e(\theta) - T_r, \text{ com } 0 \leq \theta \leq \pi \quad (40)$$

Sabe-se que o trabalho realizado por um gás (o que remete ao torque) é igual a pressão vezes a variação de volume.

Assim:

$$T_e(\theta) = A_p r f_1(\theta) P(\theta), \text{ com } 0 \leq \theta \leq \pi \quad (41)$$

$$T_c(\theta) = A_p r f_1(\theta - \pi) P(\theta - \pi), \text{ com } 0 \leq \theta \leq \pi \quad (42)$$

- T_e é o torque relacionado à expansão
- T_c é o torque relacionado à compressão
- P é a pressão do ar no cilindro

É necessário se desenvolver o modelo da pressão. Para tanto pode-se aplicar a seguinte relação adiabática:

$$P(\theta)V^\gamma(\theta) = \text{const}, \text{ com } \gamma = 1,4 \quad (43)$$

No início da compressão, tem-se:

$$\begin{aligned} P(-\pi) &= P_{in} \\ V(-\pi) &= V_t \end{aligned} \quad (44)$$

- V é o volume de entrada de ar no cilindro
- V_t é o volume total do cilindro

Assim,

$$P(\theta) = \frac{P_{in} V_t^\gamma}{[V(\theta)]^\gamma}, \text{ com } -\pi \leq \theta \leq 0, \quad (45)$$

sendo P_{in} a pressão de admissão.

E na expansão,

$$P(\theta) = K \frac{P_{ex} V_t^\gamma}{[V(\theta)]^\gamma}, \text{ com } 0 \leq \theta \leq \pi, \quad (46)$$

sendo P_{ex} a pressão de exaustão.

Tem-se o modelo global:

$$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{2} J(\theta) \omega^2 \right) = Ti - Tr = Kg_1(\theta) + g_2(\theta) - Tr \quad (47)$$

Sendo as funções conhecidas:

$$g_1(\theta) = A_p r f_1(\theta) P_{ex} V_t^\gamma [V(\theta)]^{-\gamma} \quad (48)$$

$$g_2(\theta) = A_p r f_1(\theta - \pi) P_{in} V_t^\gamma [V(\theta - \pi)]^{-\gamma} \quad (49)$$

Então o torque indicado é dado por:

$$Ti(\theta) = \hat{K} g_1(\theta) + g_2(\theta) \quad (50)$$

Desta forma a constante $\hat{K}$ está, de algum modo, relacionada com a massa do combustível e as funções $g_1(\theta)$ e $g_2(\theta)$ dependentes da pressão interna no cilindro, a qual varia sensivelmente com diversos parâmetros, inclusive com a própria massa de combustível e de ar.

Assim, das expressões (48), (49) e (50), tem-se que o torque de um motor saudável, ou na condição de baseline, é:

$$Ti_{baseline}(\theta) = Te + Tc = C_1 f_1(\theta) P_{ex} [V(\theta)]^{-\gamma} + C_2 f_1(\theta - \pi) P_{in} [V(\theta - \pi)]^{-\gamma} \quad (51)$$

Onde C_1 e C_2 denotam constantes.

3.3.2.1.2 Condição de falha

Com a inserção da falha, deve aparecer uma componente adicional de torque relacionado à falha (T_{falha}), sendo função de uma pressão variável em relação ao ângulo θ :

$$\begin{aligned} Ti_{falha}(\theta) &= Te + Tc + T_{falha} = \\ &= C_1 f_1(\theta) P_{ex} [V(\theta)]^{-\gamma} + C_2 f_1(\theta - \pi) P_{in} [V(\theta - \pi)]^{-\gamma} + C_3 f_1(\theta) P_{falha}(\theta) [V(\theta)]^{-\gamma} \end{aligned} \quad (52)$$

Onde C_3 denota uma constante e $P_{falha}(\theta)$ indica a variação de pressão causada pela falha com θ da seguinte forma:

$$\theta = \omega t + \delta \quad (53)$$

Sendo $\omega = 2\pi f_{falha}$ e δ uma fase.

O efeito na fase é devido a variação no instante da explosão no cilindro do motor em função da pressão de ar alterada pela falha.

3.3.2.2 Do Gerador para a Carga

Para equacionamento do torque do gerador para a carga, ou segunda região de interesse, foi adotado como referência o modelo utilizado para um motor de indução trifásico proposto por **Bonaldi, et al. (2012)**.

3.3.2.2.1 Condição de baseline

Como a falha objeto do trabalho estava presente no motor optou-se por não realizar uma descrição do equacionamento na condição de baseline nesta região de interesse. Portanto a atenção foi voltada já para a condição de falha conforme é explorado no item a seguir.

3.3.2.2.2 Condição de falha

Para o equacionamento da influência de oscilações no torque nas grandezas elétricas de saída do gerador síncrono é possível proceder com uma analogia feita para um motor elétrico acoplado a uma carga mecânica em falha. Neste caso, múltiplos da frequência de rotação aparecem na corrente do estator devido às oscilações de carga. Assim, para um gerador elétrico, falhas mecânicas na máquina primária, neste caso o motor a combustão interna, provocam oscilações de torque no

eixo do gerador, e estas oscilações, por sua vez, provocam alteração nas correntes e tensões de saída do mesmo.

Para grandezas de saída de um gerador tem-se nas assinaturas elétricas as seguintes componentes:

$$f_{mp} = f_1 \pm c \cdot f_r \quad (54)$$

Onde f_{mp} é a frequência característica de falhas na máquina primária; f_1 é a frequência fundamental do gerador; c é uma constante relacionada às características da máquina primária e ao tipo de falha; e f_r é a frequência de rotação do gerador.

Quando da ocorrência de uma falha mecânica na máquina primária do gerador, esta gera um torque adicional T_{falha} , ou de forma mais completa, T_{mp} . Assim, o torque total da máquina T_t , aqui considerado como o torque indicado T_i , pode ser representado por uma componente constante T_{const} mais esta componente variável adicional a qual varia periodicamente à frequência característica ω_{mp} como:

$$T_t(t) = T_{const} + T_{mp} \cos(\omega_{mp} t) \quad (55)$$

Onde T_{mp} é a amplitude da oscilação de torque causada pela falha mecânica na máquina primária e ω_{mp} é dada por:

$$\omega_{mp} = 2\pi f_{mp} \quad (56)$$

Conforme demonstrado no tópico de equacionamento do torque do motor para o gerador, a componente adicional variável de torque $T_{mp} \cos(\omega_{mp} t)$ que surge é aquela resultante de falha. Tal componente se mostra na saída do motor e, como ele está acoplado ao gerador, aparece neste último como entrada.

A relação entre o torque e a frequência de rotação ω_{mp} é dada por:

$$T(t) = T_{gerador}(t) - T_t(t) = J \frac{d\omega_r(t)}{dt} \quad (57)$$

Onde J é a inércia total do gerador e da máquina primária. Desta forma:

$$J \frac{d\omega_r(t)}{dt} = T_{gerador}(t) - T_{const}(t) - T_{mp} \cos(\omega_{mp} t) \quad (58)$$

Em regime permanente, tem-se que $T_{gerador} = T_{const}$. Logo:

$$\frac{d\omega_r(t)}{dt} = -\frac{1}{J} T_{mp} \cos(\omega_{mp} t) \quad (59)$$

$$\omega_r(t) = -\frac{T_{mp}}{J} \int \cos(\omega_{mp} t) dt + Const \quad (60)$$

$$\omega_r(t) = -\frac{T_{mp}}{J\omega_{mp}} \text{sen}(\omega_{mp} t) + \omega_{r0} \quad (61)$$

Nota-se em (61), que a velocidade mecânica consiste de uma componente constante ω_{r0} e de uma componente que varia de acordo com um sinal senoidal. Portanto a posição do rotor é dada através da integração desta equação, conforme resultado abaixo:

$$\theta_r(t) = \frac{T_{mp}}{J\omega_{mp}^2} \cos(\omega_{mp} t) + \omega_{r0} t \quad (62)$$

As oscilações na posição do rotor agem na força magneto-motriz (FMM) do gerador e esta, numa condição saudável deste equipamento com $2P$ polos, é dada por:

$$F(\theta_r) = F_1 \cos(P\theta_r) + F_3 \cos(3P\theta_r) + \dots = \sum_{\gamma \text{ ímpar}} F_\gamma \cos(\gamma P \theta_r) \quad (63)$$

Onde F_γ é a amplitude do γ -ésimo harmônico da FMM.

Substituindo (62) em (63), vem:

$$F(\theta_r) = \sum_{\gamma \text{ ímpar}} F_\gamma \cos \left[\gamma P \frac{T_{mp}}{J\omega_{mp}^2} \cos(\omega_{mp} t) + \gamma P \omega_{r0} t \right] \quad (64)$$

Seja $\beta = \frac{PT_{mp}}{J\omega_{mp}^2}$. Em (64), vem:

$$F(\theta_r) = \sum_{\gamma \text{ ímpar}} F_\gamma \cos[\gamma \beta \cos(\omega_{mp} t) + \gamma P \omega_{r0} t] \quad (65)$$

Destaca-se que o termo $\beta \cos(\omega_{mp} t)$ significa uma modulação em fase na FMM do gerador.

Sabe-se que o valor da força eletromotriz em um ramo do enrolamento do estator do gerador, $E_{\varphi\gamma}$, pode ser expresso por:

$$E_{\varphi\gamma} = 2,83 f_1 w k_{w\gamma} l \tau B = 2,83 f_1 w k_{w\gamma} l \tau \Lambda F \quad (66)$$

Onde φ é a fase do enrolamento do estator; γ é a ordem do harmônico; w é

o número de enrolamentos em série; $k_{w\gamma}$ é o fator de enrolamento do γ -ésimo harmônico; l é o comprimento efetivo do enrolamento; τ é o passo polar; B é a densidade magnética do γ -ésimo harmônico; Λ é a permeância magnética do entreferro; e F é a FMM do γ -ésimo harmônico.

Seja, por questão de simplicidade, considerar a permeância magnética Λ constante, ou seja, desprezando-se os efeitos de ranhuras e de excentricidade, e $k = 2,83 f_1 w k_{wn} l \tau \Lambda$. Desta forma, para um dado γ , vem:

$$E_{\phi\gamma} = k F_{\gamma} \cos[\gamma \beta \cos(\omega_{mp} t) + \gamma P \omega_{r0} t] \quad (67)$$

Além disso, sendo $\omega_{r0} = \omega_r$ e utilizando-se a relação $\omega_r = \frac{\omega_1}{P}$, tem-se:

$$E_{\phi\gamma} = k F_{\gamma} \cos[\gamma \beta \cos(\omega_{mp} t) + \gamma \omega_1 t] \quad (68)$$

Fazendo $E_m = k F_N$ e $\gamma = 1$, vem:

$$E_{\phi1} = E_m \cdot e^{j[\beta \cos(\omega_{mp} t) + \omega_1 t]} \quad (69)$$

Aplicando-se a DFT (*Discrete Fourier Transform*), obtém-se:

$$E_{\phi1} = E_m \cdot \sum_{n \rightarrow -\infty}^{\infty} j^n J_n(\beta) \delta[f - (f_1 + n f_{mp})] \quad (70)$$

Onde J_n é a função de Bessel de n -ésima ordem do primeiro tipo e $\delta(f)$ é a função delta de Dirac.

Como β é muito pequeno, as funções de Bessel de ordem $n \geq 2$ podem ser desprezadas. Considerando-se as aproximações feitas, a PSD (*Power Spectral Density*) da tensão induzida é dada por:

$$|E_{\phi1}(f)| = [E_m \cdot J_0(\beta)] \delta(f - f_1) + E_m \cdot J_1(\beta) \delta f - (f_1 \pm f_{mp}) \quad (71)$$

Desta forma, nota-se que a modulação em fase leva a componentes nas bandas laterais de $f_1 \pm f_{mp}$, como acontece na modulação em amplitude. Como as tensões geradas e, por consequência, as correntes são dependentes da força eletromotriz induzida, tais componentes também aparecem nos sinais destas grandezas elétricas na saída do gerador. Assim sendo, a análise espectral das tensões e correntes irá apresentar as componentes $f_1 \pm f_{mp}$, indicando a presença de falha mecânica na máquina primária que está acoplada ao gerador.

A partir do exposto fica claro que a análise e representação matemática comprova a hipótese lançada, o que resulta num embasamento teórico para realização dos ensaios e interpretação dos resultados no ambiente experimental.

3.4 AQUISIÇÃO DE SINAIS NUMA USINA TERMELÉTRICA

No sentido de analisar o espectro operativo de um outro tipo de motor, neste caso o multicilíndrico, e buscar alguns padrões de falha observados nos ensaios experimentais do grupo motor-gerador do laboratório de modelo reduzido, foram adquiridos sinais elétricos de alguns grupos motor-gerador em operação numa usina termelétrica.

Tais equipamentos apresentam as mesmas características entre si, sendo o gerador do tipo síncrono com excitatriz no eixo, fechamento em estrela, potência nominal aparente de 28,031 MVA, tensão de armadura de 13800 V, corrente de armadura de 1173 A, fator de potência de 0,80, frequência de 60 Hz, rotação de 600 rpm e 12 polos. Já o motor é do ciclo Diesel de 4 tempos com 20 cilindros em V, rotação de 600 rpm, funcionando com óleo combustível OCB1, 4 válvulas por cilindro, sistema de lubrificação sob pressão, sistema de acoplamento direto e sistema de combustão a injeção direta. A Figura 39 apresenta detalhes deles.

Figura 39 - Grupos motor-gerador da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

A usina termelétrica em referência é UTE SUAPE II que pertence a SPE Energética Suape II S.A e se apresenta como maior usina a óleo do Brasil. Tem como característica principal o fato de ser contratada por disponibilidade e ter despacho centralizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Com uma planta de alta eficiência faz uso do combustível principal o OCB1 Especial, fornecido pela Petrobras Distribuidora, combustível especial para térmicas, com baixo teor de enxofre e controle de metais.

Sua configuração é feita por 17 unidades moto-geradoras com motor do modelo 20V46F do fabricante Wartsila e gerador do modelo AMG 1600UT12 DSE do fabricante ABB, distribuídas em 3 casas de máquinas. Para cada casa de máquinas há um transformador Toshiba de 170 MVA de potência, responsável por elevar a tensão de geração de 13,8 kV para 230 kV. A partir da subestação localizada na própria usina, a energia é então transportada através de um circuito duplo de linhas de transmissão, de 5,5 km de extensão, até a subestação Suape II, de propriedade da CHESF, conectando assim ao Sistema Interligado Nacional (SIN). A Figura 40 apresenta detalhes da usina.

Figura 40 - Usina termelétrica UTE SUAPE II



FONTE: (O autor, 2017)

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Uma das etapas mais importantes na condução deste trabalho foi a de aquisição dos sinais no grupo motor-gerador monocilíndrico. Nela foi possível identificar sinais espectrais de corrente e de tensão alterados nas diversas condições de falha simuladas, o que comprovou a hipótese lançada. Para tanto procedeu-se com toda a preparação de coleta dos dados e avaliação da condição das máquinas.

Seu início se deu no laboratório de modelo reduzido onde se tinha todas as condições de ensaio controladas e possibilidades de danos minimizadas. O grupo motor-gerador foi submetido, além das mais variadas falhas, a condições de cargas diversas, no intuito de também mapear a influência dos valores de corrente nos espectros colhidos. A aquisição dados foi iniciada na condição de baseline, ou seja, em condições normais de funcionamento, sem a presença de falhas. Após isto, os testes foram continuados com a inserção de falhas.

O primeiro tipo de falha simulada foi de falha na excitatriz, considerando-se o desequilíbrio elétrico e o curto-circuito num diodo no gerador auxiliar desta. A simulação se deu, ora pela inserção de um resistor série em uma das entradas AC, ora pela inserção de um resistor em paralelo com um dos diodos (entre um dos terminais AC e um dos terminais DC), do retificador.

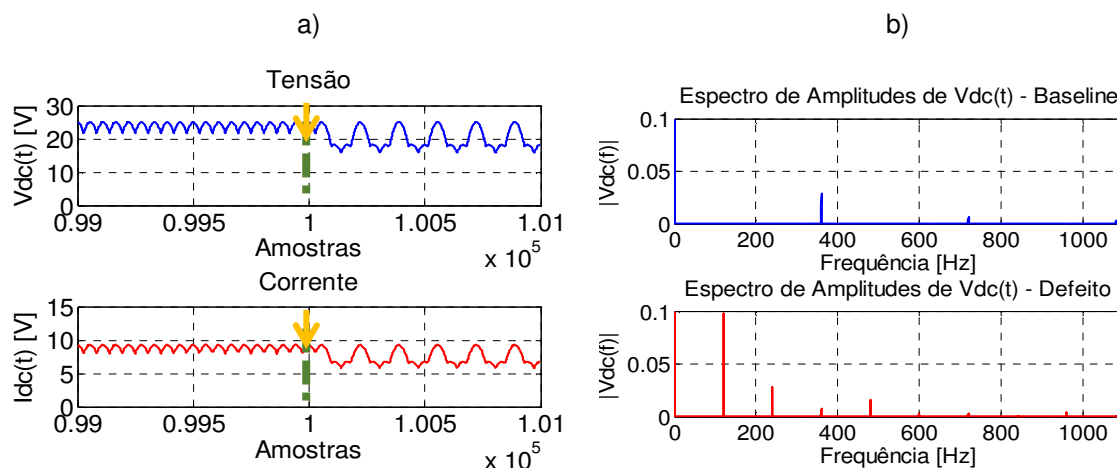
Antes de se iniciarem os testes efetivamente, uma simulação computacional foi desenvolvida para este tipo de falha com o objetivo de se identificar as componentes espectrais mais sensíveis. A simulação considerou a parte do retificador da excitatriz do gerador síncrono do laboratório de modelo reduzido alimentada com sinal senoidal de frequência de 60 (Hz).

4.1.1 Simulação Computacional

Como resultado da simulação computacional de desequilíbrio elétrico, a Figura 41a apresenta os sinais no tempo de tensão e de corrente retificados antes e depois da inserção da falha, a qual acontece no instante de tempo na metade do eixo horizontal. Pode-se notar uma variação nas formas de onda de tensão e de corrente após a inserção da falha. A Figura 41b apresenta a assinatura da tensão retificada antes e depois da inserção da falha.

A simulação considerou a região do retificador da excitatriz do gerador síncrono alimentada com sinal AC senoidal de frequência de 60 (Hz) onde a falha foi simulada através da inserção de um resistor série de 1,0 (Ω) em uma das entradas.

Figura 41 - Resultado da simulação computacional. a) Sinais no tempo de tensão e de corrente retificadas antes e depois da inserção da falha por desequilíbrio elétrico e b) Assinatura da tensão retificada antes e depois da inserção da falha por desequilíbrio elétrico



FONTE: (O autor, 2017)

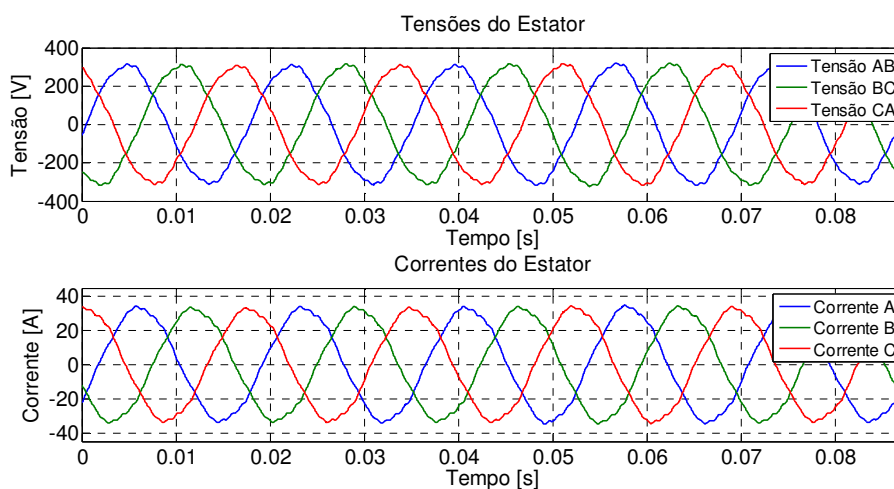
A inserção da falha levou ao surgimento de componentes múltiplas de 120 (Hz), desconsiderando-se as múltiplas de 360 (Hz), e a diminuição das componentes múltiplas de 360 (Hz). Isto também foi constatado na assinatura da corrente retificada.

A análise realizada foi feita para as grandezas retificadas (tensão e corrente DC de excitação). Como a proposta do presente trabalho é feita para as grandezas elétricas do estator (AC), deve-se somar o valor da frequência fundamental. Desta forma, um padrão potencial para a detecção de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz é o acompanhamento das componentes do tipo $(1 + 2k) \cdot f_1$, onde f_1 é a frequência fundamental, k é um número inteiro e deve-se desconsiderar os valores k que são múltiplos de 3. Nota-se que a primeira banda lateral direita deste padrão é a componente do terceiro harmônico.

Uma vez realizados os ensaios de baseline e simulação de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz, os sinais coletados foram analisados em busca da identificação de padrões de falha. Para se ilustrar os resultados, tomou-se um exemplo de sinal de baseline e um sinal de condição de falha, considerando-se o nível de severidade de 10,0 (Ω). Ambos os sinais foram coletados na configuração C de carga, ou seja, com a carga resistiva desenvolvida em conexão delta, consumindo cerca de 88,0% da potência nominal do gerador.

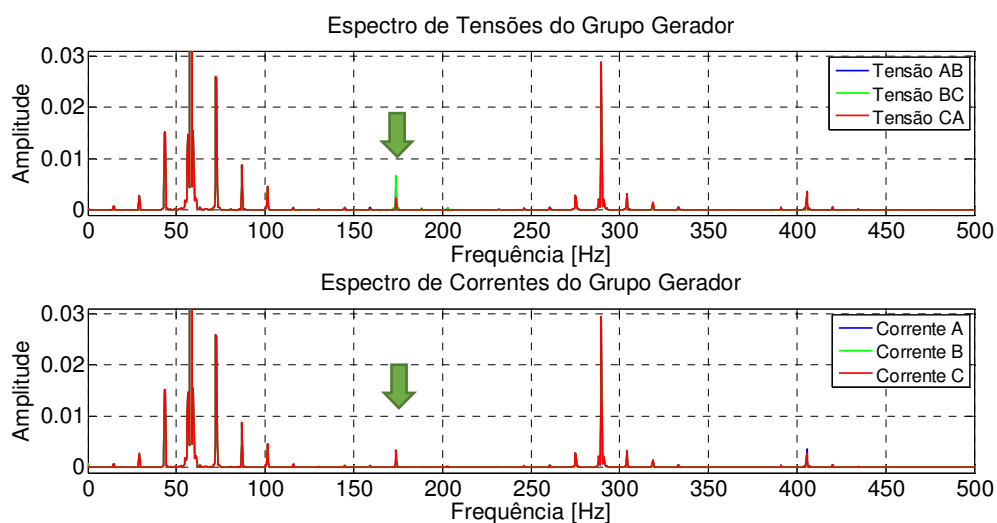
As Figuras 42 e 43 apresentam os sinais no tempo e no domínio da frequência de tensões e correntes do estator, para a condição de baseline.

Figura 42 - Sinais de tensão e de corrente no domínio do tempo para condição de baseline



FONTE: (O autor, 2017)

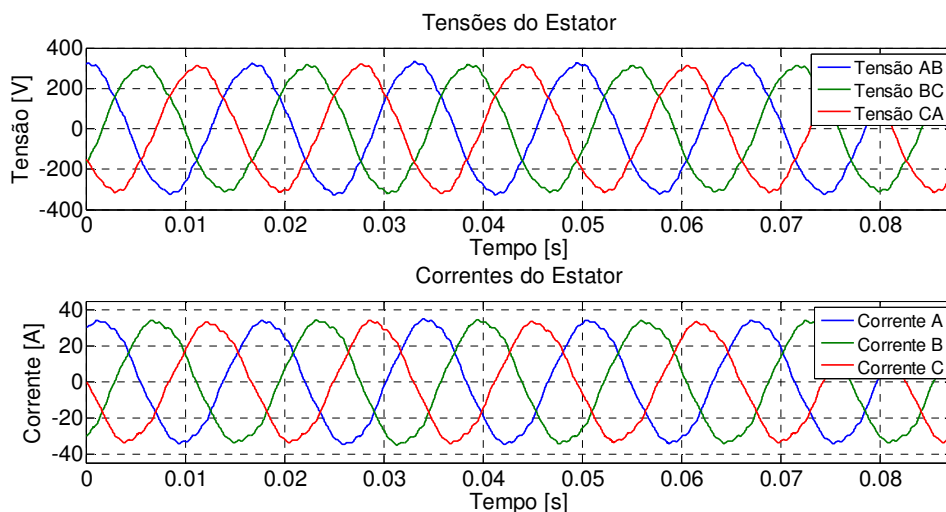
Figura 43 - Assinaturas em frequência de tensão e de corrente para condição de baseline



FONTE: (O autor, 2017)

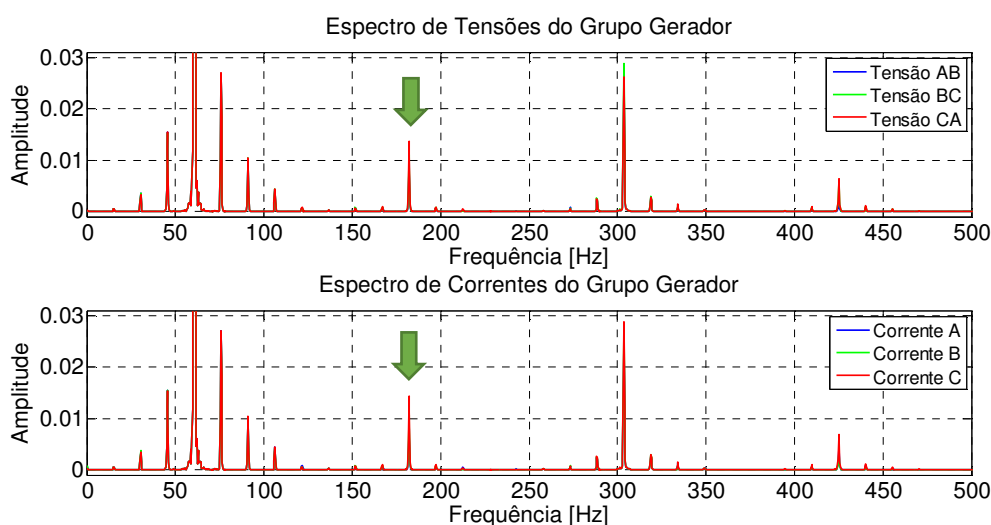
As Figuras 44 e 45 apresentam os sinais no tempo e no domínio da frequência de tensões e correntes do estator, para a condição de falha.

Figura 44 - Sinais de tensão e de corrente no domínio do tempo para condição de falha por desequilíbrio elétrico



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 45 - Assinaturas em frequência de tensão e de corrente para condição de falha por desequilíbrio elétrico



FONTE: (O autor, 2017)

Comparando-se os espectros das Figuras 43 e 45, nota-se o aumento no terceiro harmônico, como destacado nos gráficos. Este resultado é coerente com as constatações obtidas através de simulação computacional.

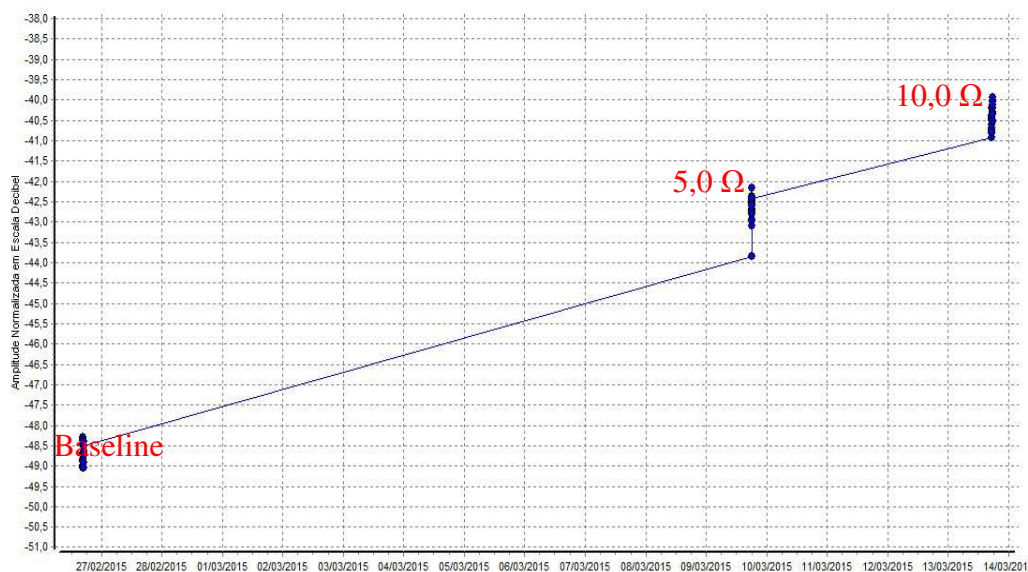
Considerando-se 26 aquisições para cada condição, conforme apresentado no planejamento dos testes, e as condições testadas, foram criadas as curvas de tendência para o padrão de terceiro harmônico na assinatura elétrica.

As Figuras 46 e 47 apresentam as curvas de tendência de terceiro harmônico na assinatura de tensão e da corrente, respectivamente. Analisando-se as figuras, nota-se a tendência de aumento desta componente de acordo com o aumento do

nível de severidade de falha, comprovando-se a resposta do padrão para este tipo de falha.

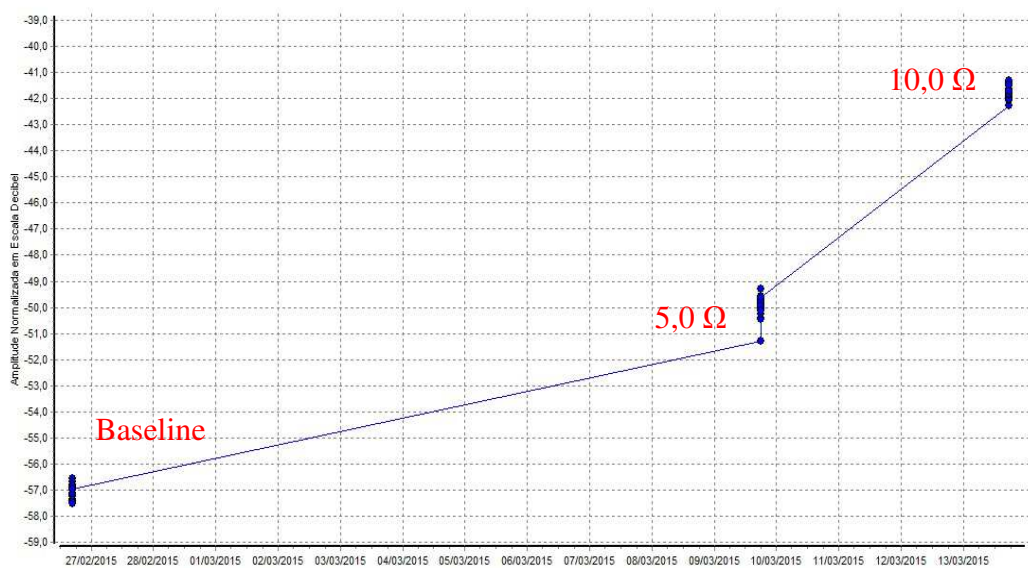
Com base na análise dos sinais coletados com a simulação deste tipo de falha, foi possível a identificação de características dos sinais que possibilitam a predição de falhas.

Figura 46 - Curva de tendência do terceiro harmônico na assinatura da tensão devido a falha por desequilíbrio elétrico



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 47 - Curva de tendência de terceiro harmônico na assinatura da corrente devido a falha por desequilíbrio elétrico



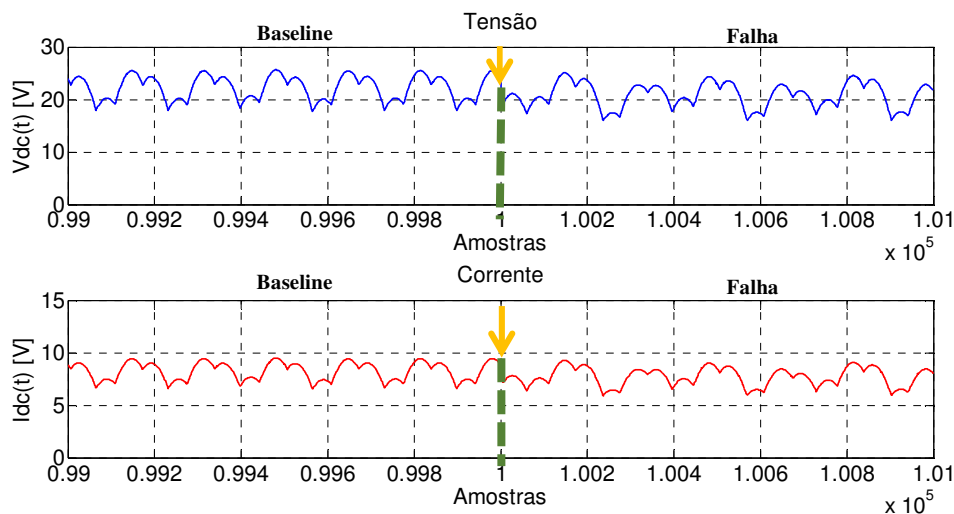
FONTE: (O autor, 2017)

Da mesma forma como se procedeu no primeiro tipo de falha, antes de se iniciarem os ensaios experimentais, uma simulação computacional foi desenvolvida

para a falha de curto-circuito em diodo do retificador da excitatriz, com o intuito de se identificarem as componentes espectrais sensíveis a esta falha. A simulação considerou a região do retificador da excitatriz do gerador síncrono alimentada com sinal senoidal AC de frequência de 60 (Hz). A falha foi simulada através da inserção de um resistor de 15,0 (Ω) em paralelo com um dos diodos do retificador.

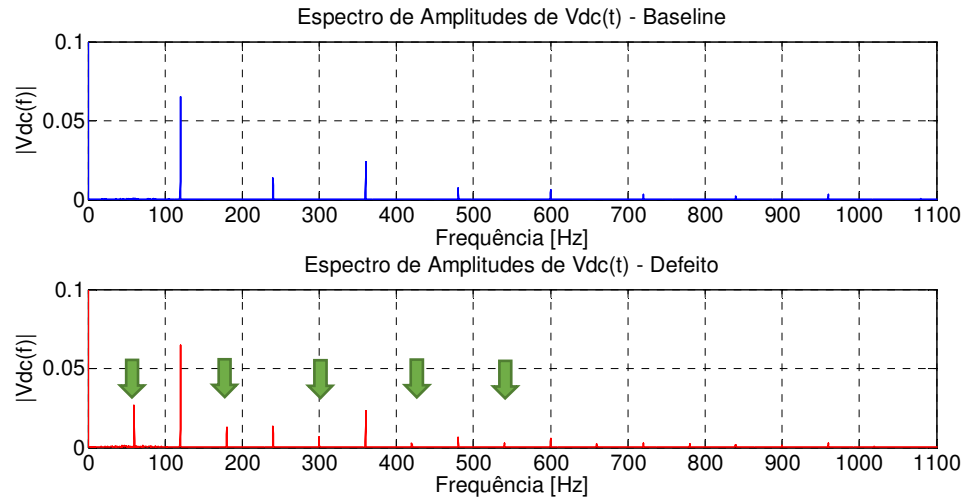
A Figura 48 apresenta os sinais no tempo de tensão e de corrente retificados antes e depois da inserção da falha, que acontece no instante de tempo na metade do eixo horizontal, conforme indicado. Pode-se notar uma variação nas formas de onda de tensão e de corrente após a inserção da falha. As Figuras 49 e 50 apresentam, respectivamente, as assinaturas de tensão e de corrente retificadas antes e depois da inserção da falha. Uma observação é que as impedâncias de entrada medidas possuíam um pequeno desequilíbrio, por isso as formas de onda de tensão e de corrente retificadas apresentam desequilíbrio mesmo para a condição de baseline e as assinaturas dos respectivos sinais apresentam múltiplos pares da frequência fundamental.

Figura 48 - Sinais no domínio do tempo de tensão e de corrente retificados antes e depois da inserção da falha por curto-circuito no diodo do retificador



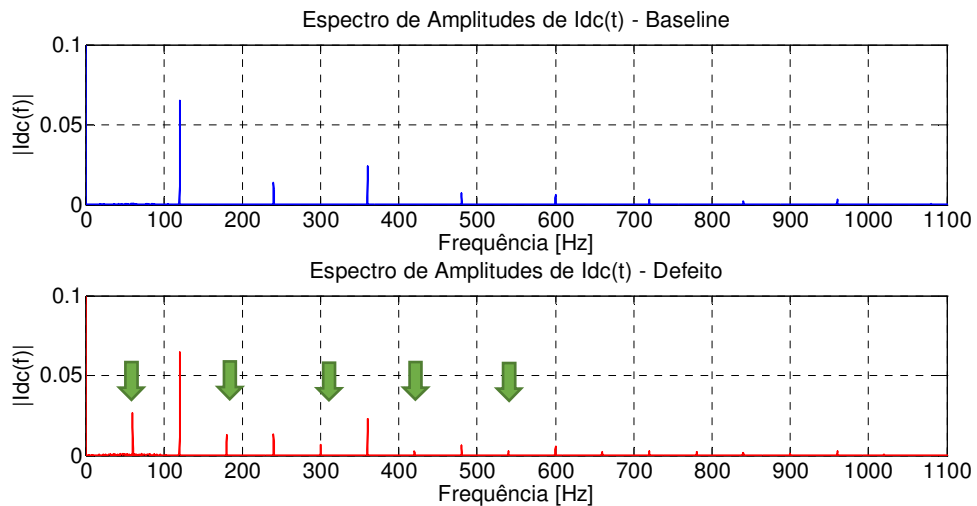
FONTE: (O autor, 2017)

Figura 49 - Assinatura em frequência da tensão retificada antes e depois da inserção da falha por curto-circuito no diodo do retificador



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 50 - Assinatura em frequência da corrente retificada antes e depois da inserção da falha por curto-circuito no diodo do retificador



FONTE: (O autor, 2017)

Tanto para a assinatura da corrente quanto da tensão retificada, nota-se que a inserção da falha levou ao surgimento de componentes do tipo $(1 + 2k) \cdot f_1$ (Hz), onde $k \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ e f_1 é a frequência fundamental. Deve-se notar que, praticamente, não houve alteração nas componentes presentes antes da inserção da falha (múltiplos pares da frequência fundamental).

A análise foi realizada para as grandezas retificadas (tensão e corrente DC de excitação). Como a proposta do presente trabalho é feita para as grandezas elétricas do estator (AC), devendo-se portanto somar a este sinal o valor da frequência fundamental. Desta forma, um padrão potencial para a detecção de curto-circuito em diodo do retificador da excitatriz é o acompanhamento da amplitude das

componentes do tipo $(2 + 2k) \cdot f_1(\text{Hz})$, ou seja, $2 \cdot (1 + k) \cdot f_1(\text{Hz})$, que são os harmônicos pares. Nota-se que a primeira banda lateral direita deste padrão é a componente do segundo harmônico.

4.1.2 Condições de Ensaio

Os ensaios de simulação de falhas no laboratório de modelo reduzido foram realizados seguindo-se procedimentos e metodologias específicas. Portanto, para aquisição de sinais reais, foram utilizados os equipamentos já mencionados.

Assim, para início dos ensaios, na saída do gerador foi conectada a carga resistiva apresentada na seção 3.0, nas configurações delta ou estrela, sendo esta primeira a que resultou num consumo de potência mais próximo do nominal do gerador. A fim de se complementar a análise, também foram utilizadas outros tipos cargas. Desta forma as seguintes configurações foram testadas:

- Configuração A: carga puramente resistiva de $P \approx 2688 \text{ (W)}$ (26,9% da nominal, com $\text{FP} = 1$);
- Configuração B: carga puramente resistiva de $P \approx 5621 \text{ (W)}$ (56,2% da nominal, com $\text{FP} = 1$);
- Configuração C: carga puramente resistiva de $P \approx 8800 \text{ (W)}$ (88,0% da nominal, com $\text{FP} = 1$);
- Configuração D: carga resistiva indutiva de $S \approx 2967 \text{ (VA)}$, com $\text{FP} = 0,906$;
- Configuração E: carga resistiva indutiva de $S \approx 6157 \text{ (VA)}$, com $\text{FP} = 0,913$;
- Configuração F: carga resistiva indutiva de $S \approx 9152 \text{ (VA)}$, com $\text{FP} = 0,962$.

As condições foram estabelecidas com quatro aquisições com duração de amostragem de 120 (s) cada numa frequência de aquisição de dados de 46875 (Hz) por caso simulado. Depois cada aquisição foi quebrada em sinais de 8 (s), e, então, considerados 26 sinais (conforme análise estatística) de 8 (s) para cada caso simulado, considerando-se a configuração de carga, o tipo de falha e a severidade de falha.

Como observação, tem-se que as curvas de tendência de padrões de falha e exemplos de assinatura elétrica apresentados serão para a configuração de carga C, uma vez que esta é a condição de carga mais próxima da nominal do gerador.

4.1.3 Sinais das Falhas Simuladas

4.1.3.1 Falhas no circuito retificador da excitatriz do gerador

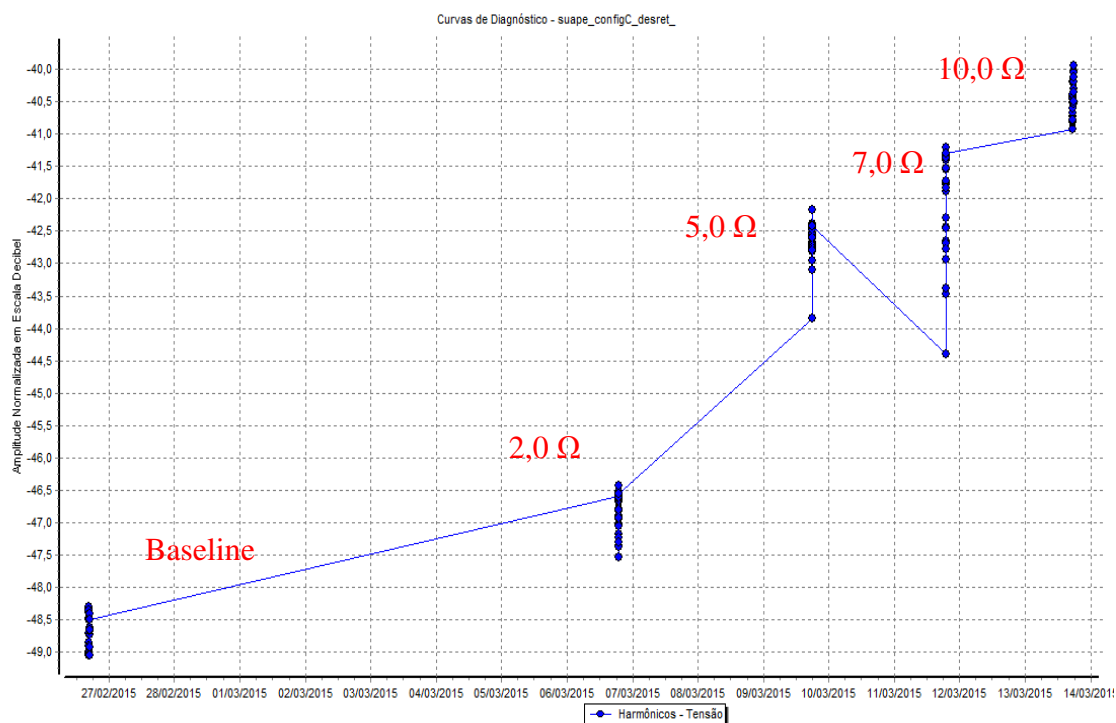
O primeiro tipo de falha foi o de desequilíbrio no gerador auxiliar da excitatriz. Sua simulação se deu através da inserção de um resistor série em uma das entradas AC do retificador da excitatriz do gerador. Os níveis de severidade de falha considerados foram aqueles com valores de resistência de 2,0; 5,0; 7,0 e 10,0 (Ω), sendo o maior valor o que implica em um nível de maior severidade de falha, uma vez que provoca maior desequilíbrio.

Uma vez realizados os ensaios de baseline e simulação de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz, os sinais coletados foram analisados em busca da identificação de padrões de falha. Três padrões de falha foram detectados para este tipo de falha:

- Aumento da amplitude da componente de terceiro harmônico nas assinaturas de tensão e de corrente;
- Aumento da amplitude da componente de desequilíbrio elétrico nas assinaturas de EPVA de tensão e de corrente;
- Aumento da amplitude da sequência negativa da componente de frequência fundamental da tensão e da corrente.

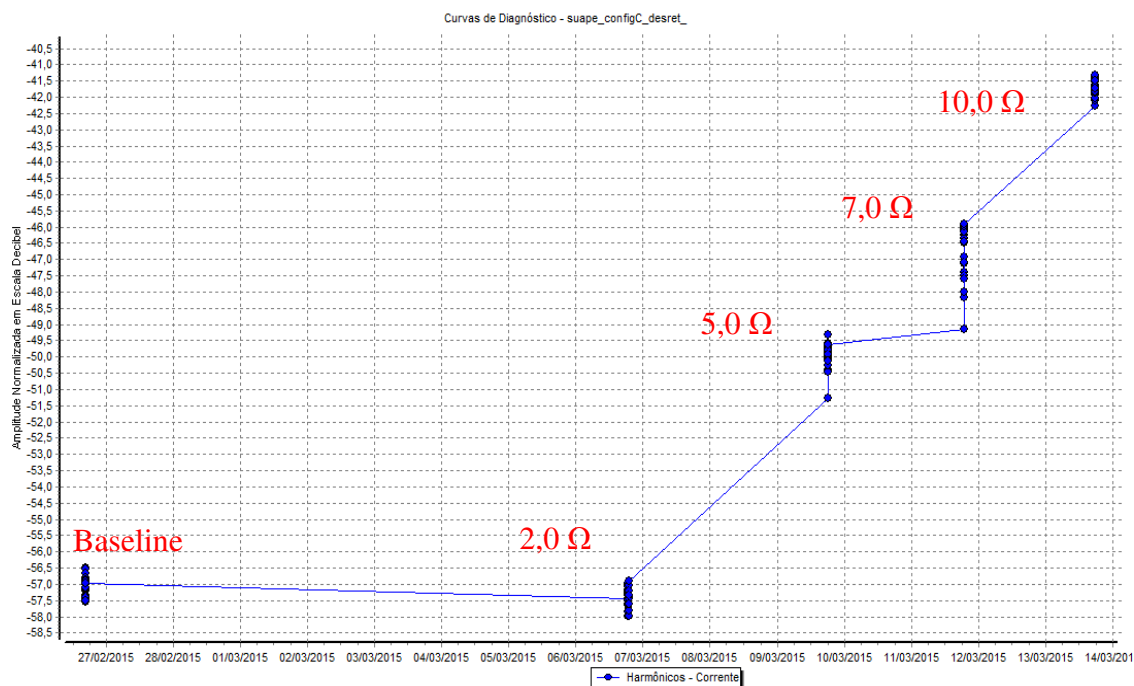
O padrão do terceiro harmônico é dado por $3 \cdot f_1$ nas assinaturas de tensão e de corrente. As Figuras 51 e 52 apresentam as curvas de tendência de amplitude de terceiro harmônico na assinatura de tensão e da corrente, respectivamente. Analisando-se as figuras, nota-se a tendência de aumento desta componente de acordo com o aumento do nível de severidade de falha, comprovando-se a resposta do padrão para este tipo de falha.

Figura 51 - Curva de tendência de terceiro harmônico na assinatura de tensão devido a falha por desequilíbrio elétrico



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 52 - Curva de tendência de terceiro harmônico na assinatura de corrente devido a falha por desequilíbrio elétrico



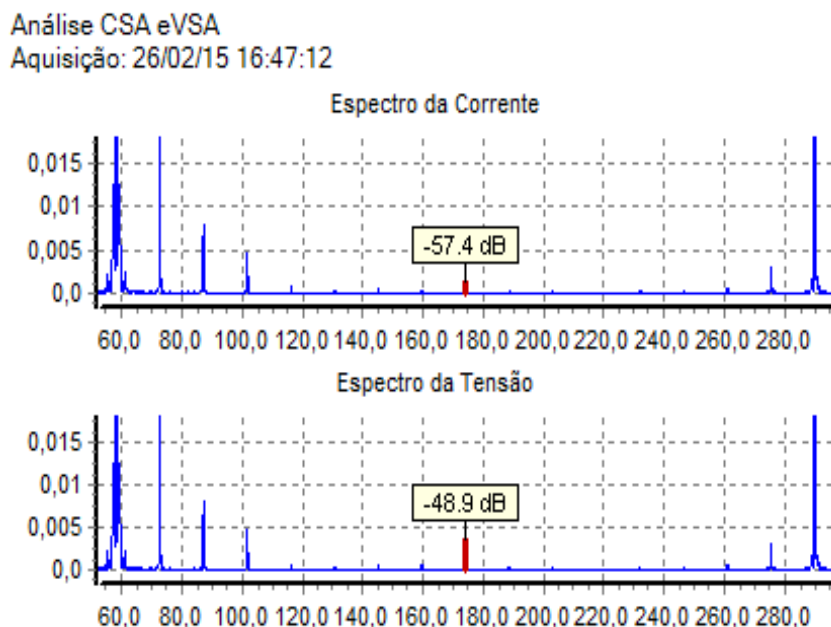
FONTE: (O autor, 2017)

Para fins de ilustração, a Figura 53 apresenta exemplos deste padrão nas assinaturas de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de

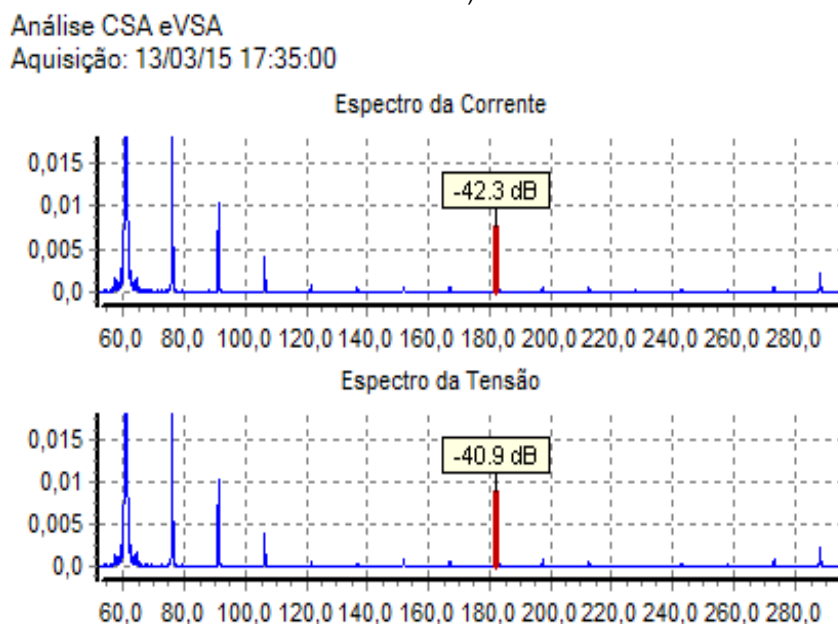
falha. Nota-se o aumento na amplitude da componente da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 53 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com terceiro harmônico. a) Condição de baseline e b) Condição de falha por desequilíbrio elétrico

a)



b)

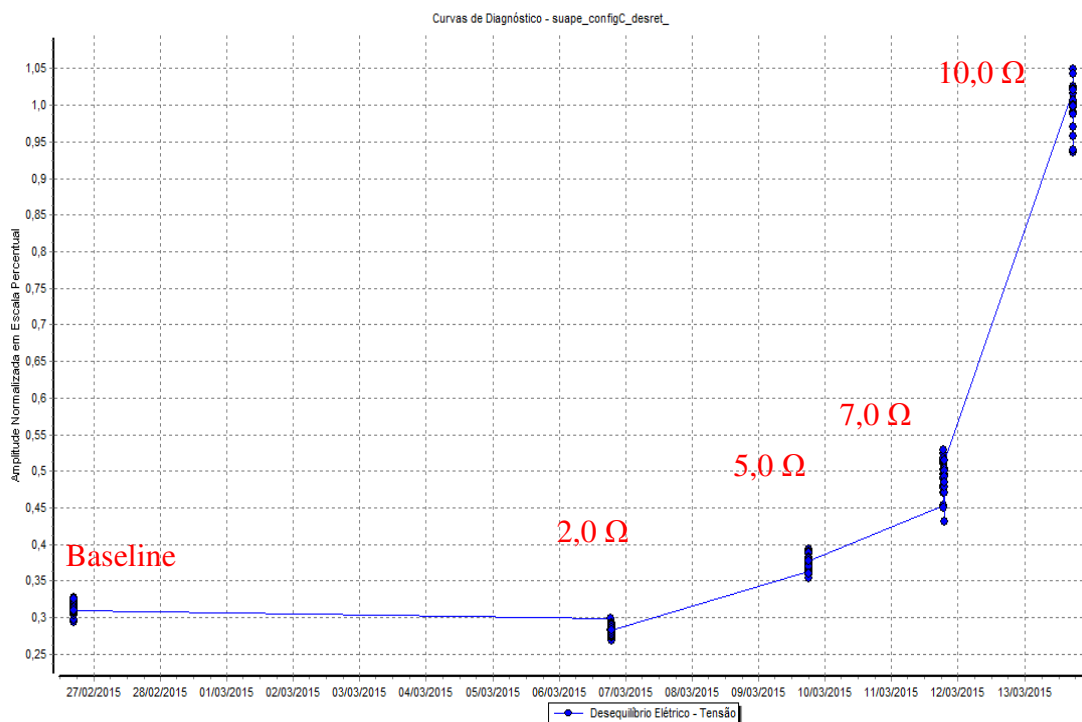


FONTE: (O autor, 2017)

O padrão de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA é dado pela amplitude das componentes de $2 \cdot f_1$ nas assinaturas de EPVA de tensão e de corrente. As Figuras 54 e 55 apresentam as curvas de tendência de desequilíbrio elétrico nas assinaturas de EPVA de tensão e de corrente, respectivamente. Nota-se

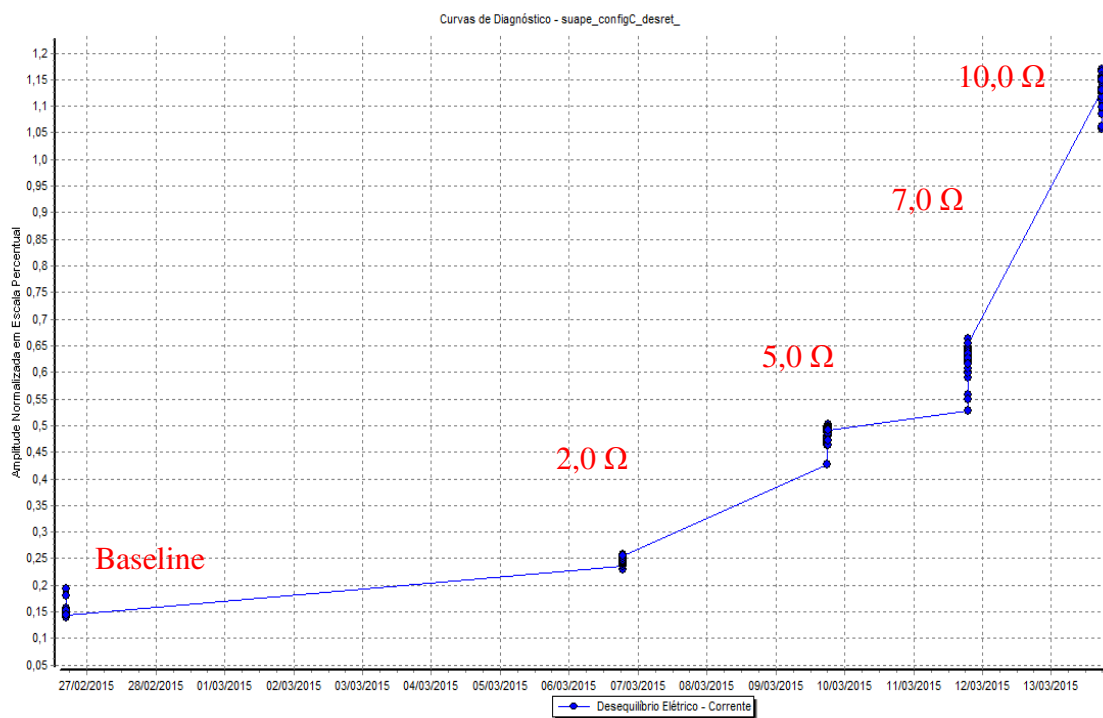
nas figuras a tendência de aumento desta componente de acordo com o aumento do nível de severidade de falha, comprovando-se a resposta deste padrão.

Figura 54 - Curva de tendência de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA de tensão



FONTE: (O autor, 2017)

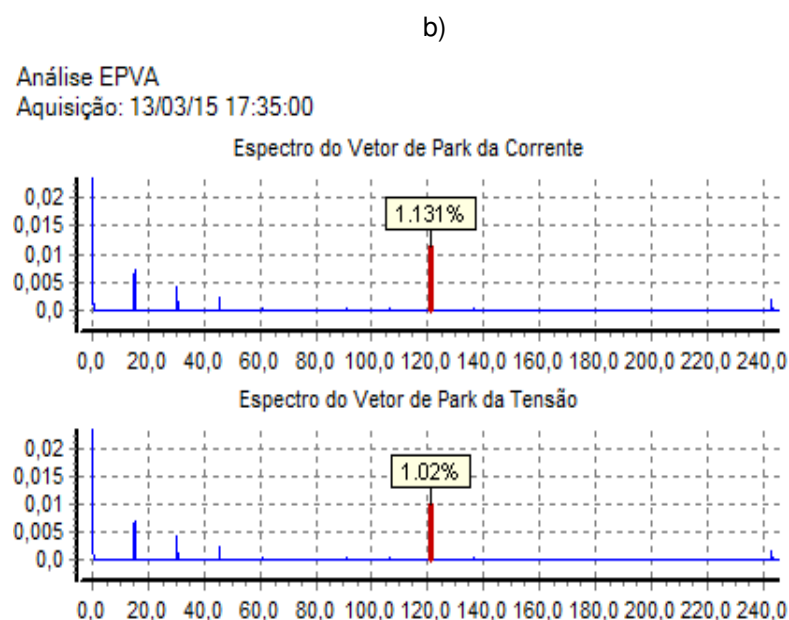
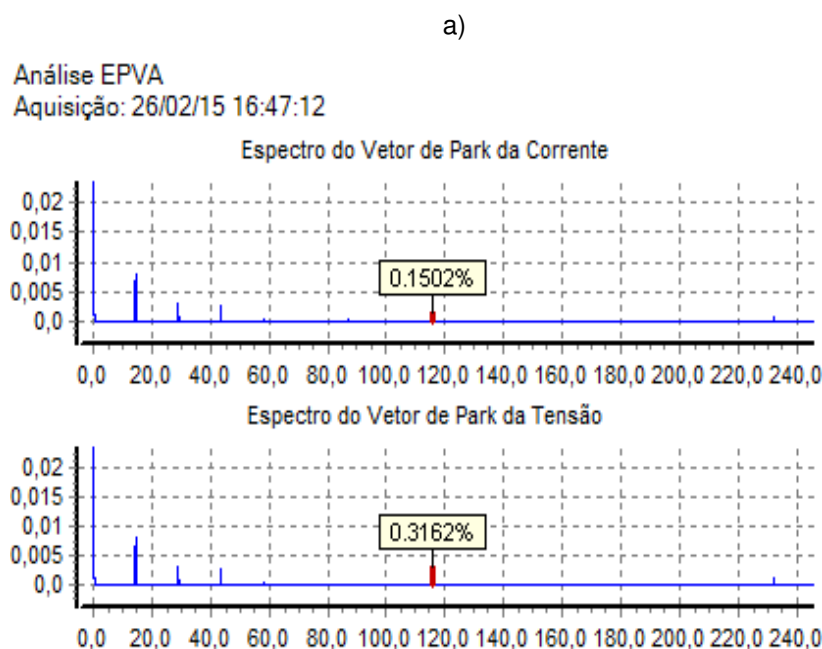
Figura 55 - Curva de tendência de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA de corrente



FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 56 apresenta exemplos de desequilíbrio elétrico nas assinaturas de EPVA de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de falha. A amplitude da componente em questão aumenta da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 56 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com desequilíbrio elétrico por EPVA.
a) Condição de baseline e b) Condição de falha

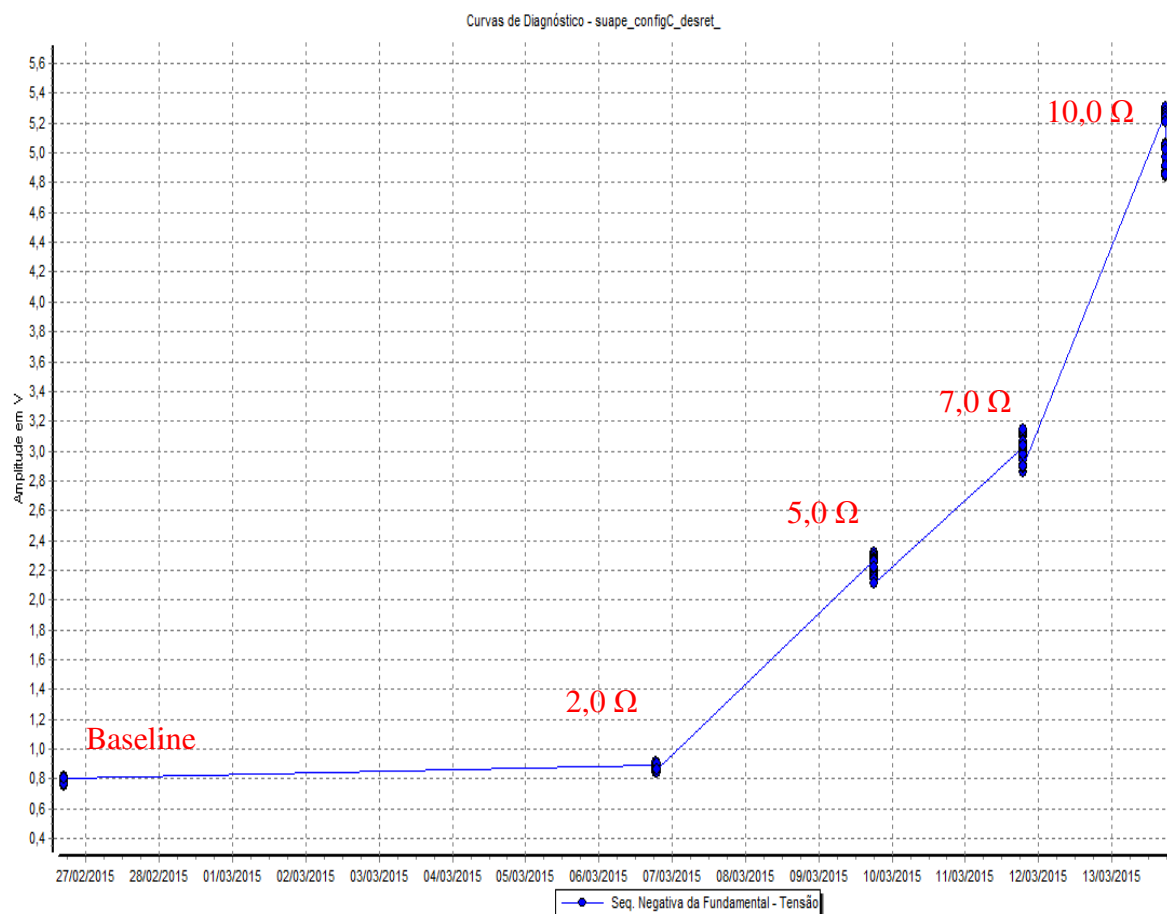


FONTE: (O autor, 2017)

O padrão de amplitude da sequência negativa da frequência fundamental é obtido através do cálculo das componentes simétricas desta. As Figuras 57 e 58 apresentam as curvas de tendência de sequência negativa da componente fundamental de tensão e de corrente, respectivamente. Nota-se que, à medida que

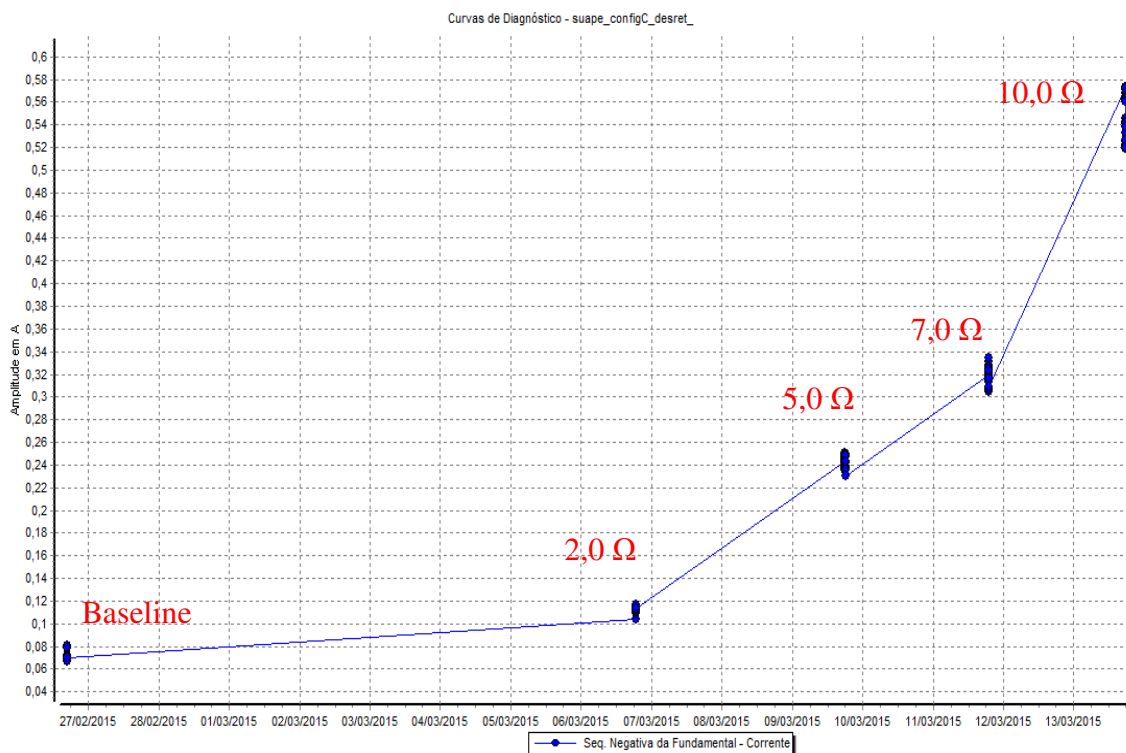
aumenta o nível de severidade de falha, há um aumento desta componente, comprovando-se a resposta deste padrão de falha.

Figura 57 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de tensão por falha de desequilíbrio elétrico



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 58 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de corrente por falha de desequilíbrio elétrico

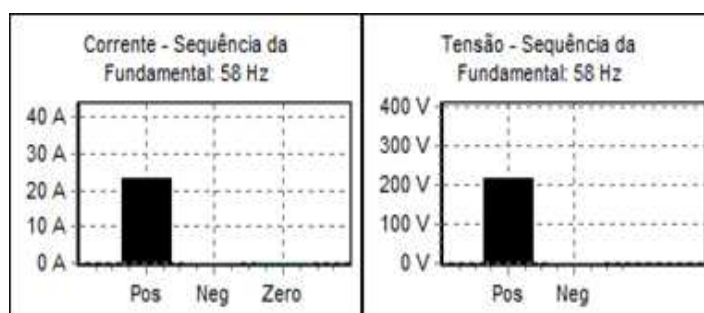


FONTE: (O autor, 2017)

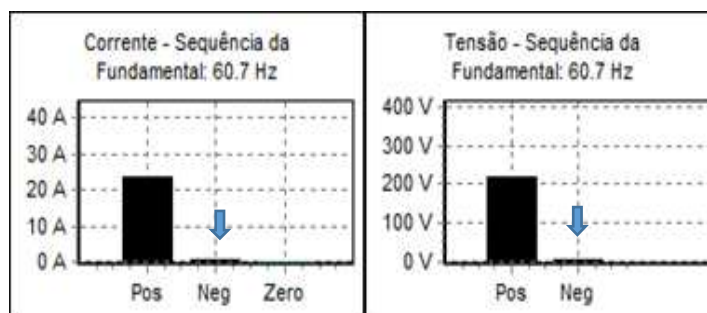
A Figura 59 apresenta exemplos de sequência negativa da componente fundamental de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de falha. Nota-se o surgimento de uma parcela de sequência negativa na condição de falha.

Figura 59 - Sequência negativa da componente fundamental de corrente e tensão.
a) Condição de baseline e b) Condição de falha por desequilíbrio elétrico

a)



b)



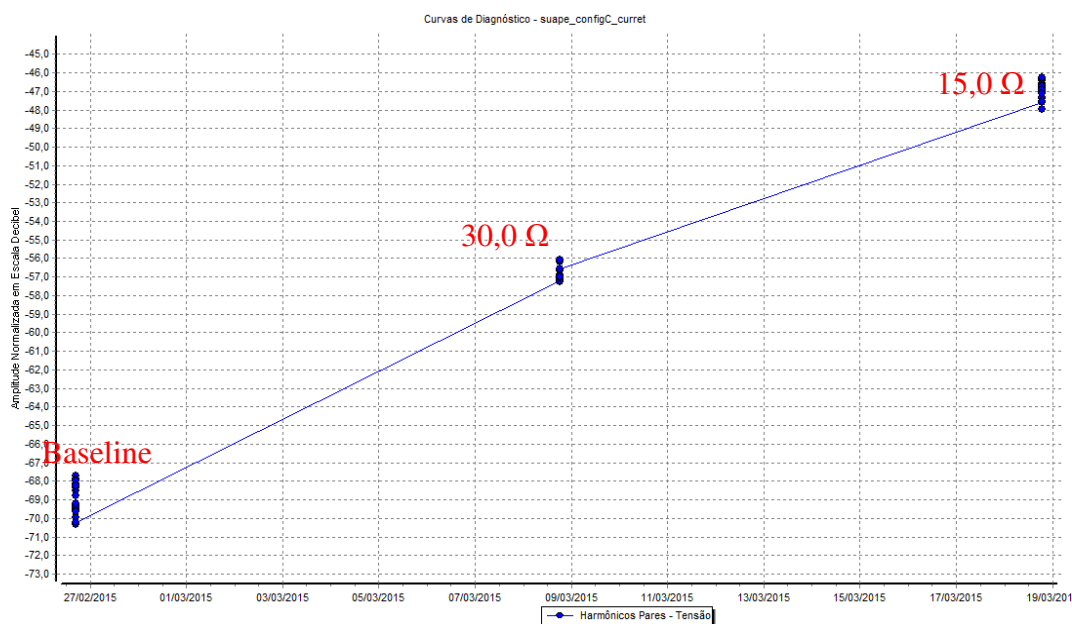
FONTE: (O autor, 2017)

O segundo tipo de falha foi o de curto-circuito em um dos diodos do retificador da excitatriz. Sua simulação se deu através da inserção de um resistor em paralelo com um dos diodos (entre um dos terminais AC e um dos terminais DC) do retificador da excitatriz do gerador. Os níveis de severidade de falha considerados foram aqueles com valores de resistência de 30,0 e 15,0 (Ω), sendo o menor valor o que implica em um nível de maior severidade de falha, uma vez que provoca uma condição mais próxima de um curto-circuito.

Uma vez realizados os ensaios de baseline e simulação de falha no diodo do retificador da excitatriz, os sinais coletados foram analisados em busca da identificação de padrões de falha. O padrão de falha detectado para esta falha foi a amplitude dos harmônicos pares, dados por $2 \cdot (1 + k) \cdot f_1$.

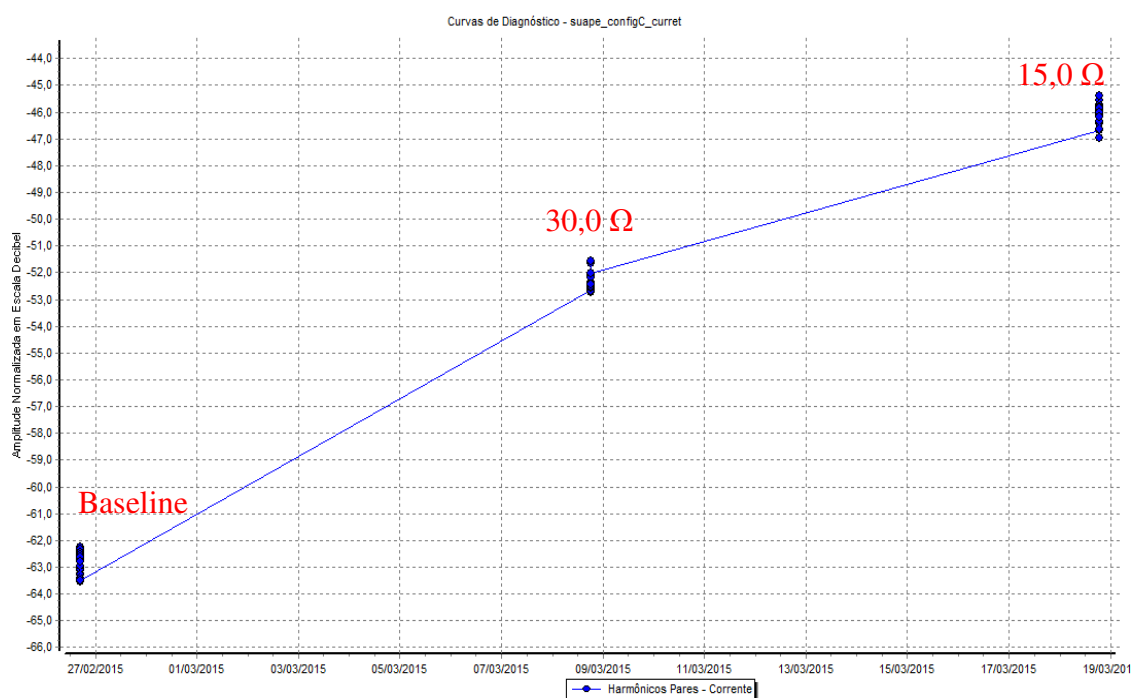
As Figuras 60 e 61 apresentam as curvas de tendência de segundo harmônico na assinatura de tensão e da corrente, respectivamente. Analisando-se as figuras, nota-se que, à medida que aumenta o nível de severidade de falha, há um aumento na componente de análise, comprovando-se a resposta do padrão para este tipo de falha.

Figura 60 - Curva de tendência de segundo harmônico na assinatura de tensão devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador



FONTE: (O autor, 2017)

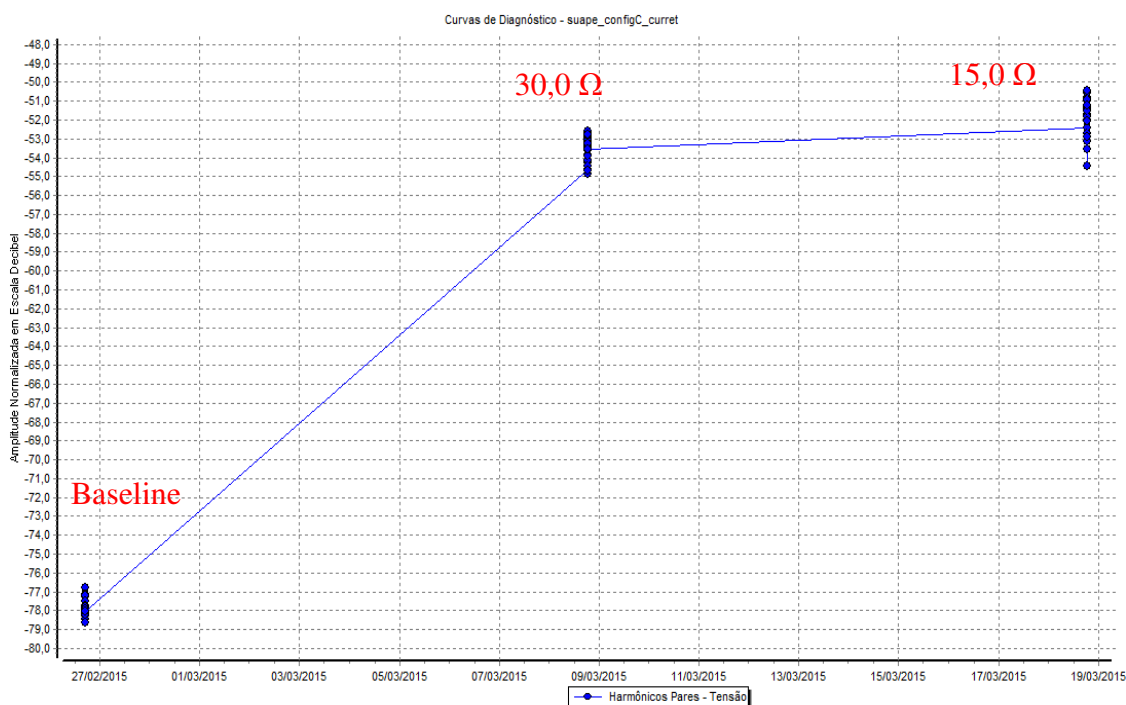
Figura 61 - Curva de tendência de segundo harmônico na assinatura de corrente devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador



FONTE: (O autor, 2017)

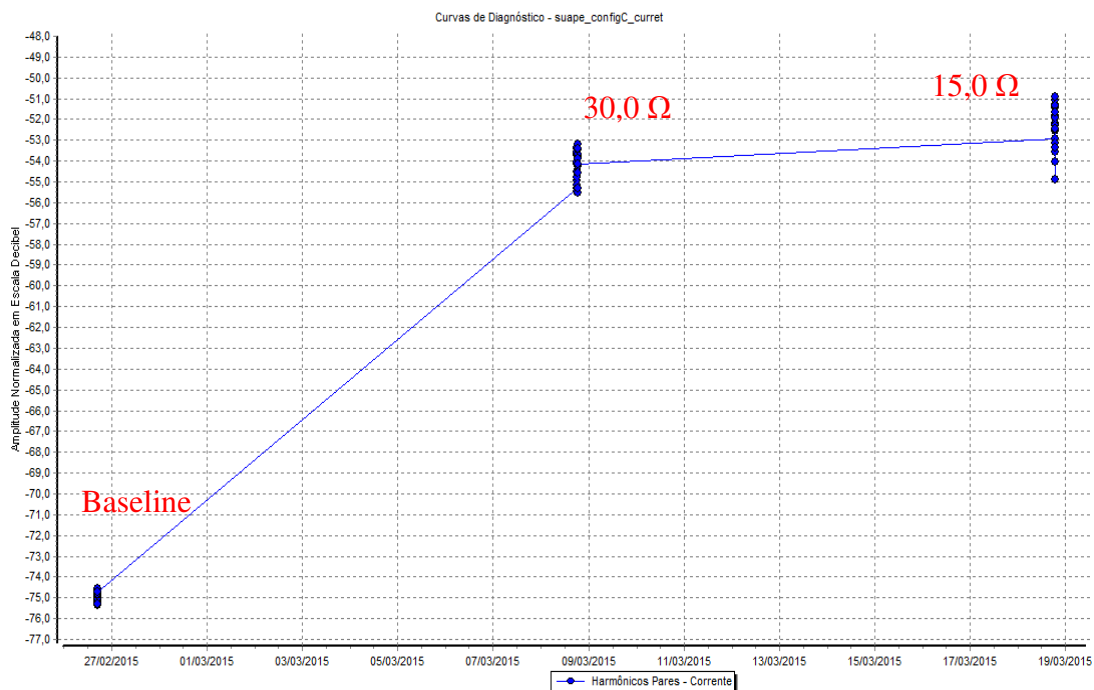
As Figuras 62 e 63 apresentam as curvas de tendência de quarto harmônico na assinatura de tensão e da corrente, respectivamente. Analisando-se as figuras, nota-se que este padrão também respondeu para esta falha, conforme esperado.

Figura 62 - Curva de tendência de quarto harmônico na assinatura de tensão devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 63 - Curva de tendência de quarto harmônico na assinatura de corrente devido a falha de curto-circuito no diodo do retificador



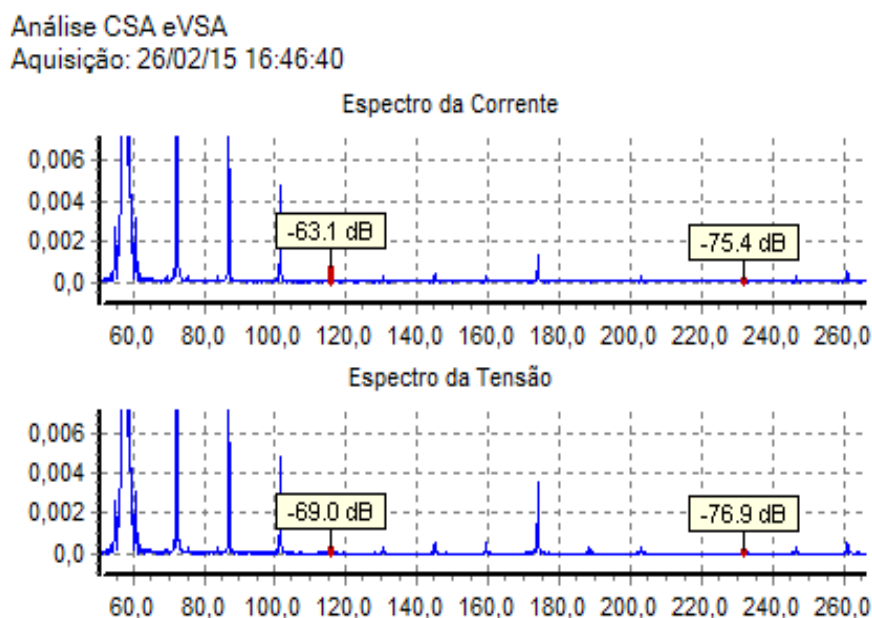
FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 64 apresenta exemplos de harmônicos pares (segundo e quarto harmônico) nas assinaturas de tensão e de corrente para a condição de baseline e a

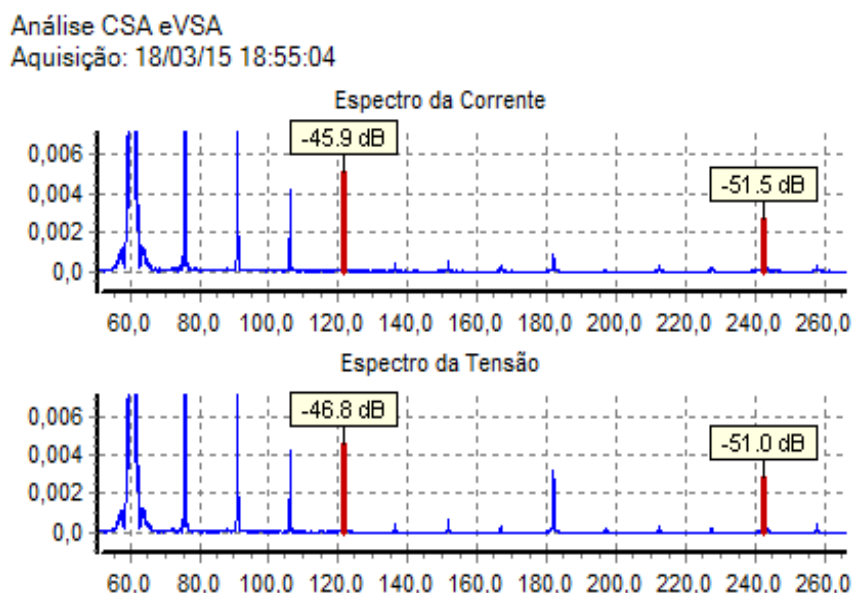
condição de falha. Nota-se o aumento na amplitude da componente da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 64 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com harmônicos pares. a) Condição de baseline e b) Condição de falha por curto-circuito no diodo do retificador

a)



b)



FONTE: (O autor, 2017)

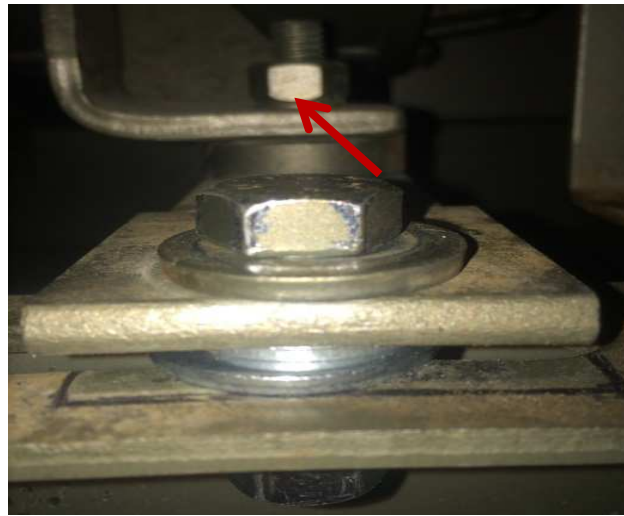
4.1.3.2 Falhas de desalinhamento mecânico

O terceiro tipo de falha foi o de desalinhamento mecânico no conjunto motor-gerador. Sua simulação se deu através da inserção de arruelas nos parafusos de fixação do gerador síncrono de duas formas. A vertical paralelo e a vertical angular. Para a forma de desalinhamento vertical paralelo, o mesmo número de arruelas foi

inserido em cada um dos quatro parafusos de fixação. Já no caso da forma de desalinhamento vertical angular, números diferentes de arruelas foram inseridos nos parafusos.

A Figura 65 ilustra a inserção de arruelas em um parafuso de fixação do gerador síncrono, para a simulação de falha de desalinhamento mecânico no conjunto motor-gerador.

Figura 65 - Inserção de arruelas no parafuso de fixação do gerador para simulação de falha de desalinhamento mecânico



FONTE: (O autor, 2017)

Uma vez realizados os ensaios de baseline e simulação de falha de desalinhamento mecânico no conjunto motor-gerador, os sinais coletados foram analisados em busca da identificação de padrões de falha. O padrão de falha detectado para esta falha foi o da amplitude da meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente. Este padrão é dado por $f_1 \pm k \cdot f_r / 2$ nas assinaturas de tensão e de corrente, onde k é um valor inteiro positivo.

Vale recordar que o gerador do laboratório de modelo reduzido é de quatro polos, ou dois pares de polos, e logo a frequência de rotação é dada por:

$$f_r = \frac{f_1}{p} = \frac{60}{2} = 30 \text{ (Hz)}$$

Onde: f_r é a frequência de rotação; f_1 é a frequência fundamental e p é o número de pares de polos.

Logo, meia vez a frequência de rotação é dada por:

$$\frac{f_r}{2} = \frac{30}{2} = 15 \text{ (Hz)}$$

A primeira banda lateral direita é dada por:

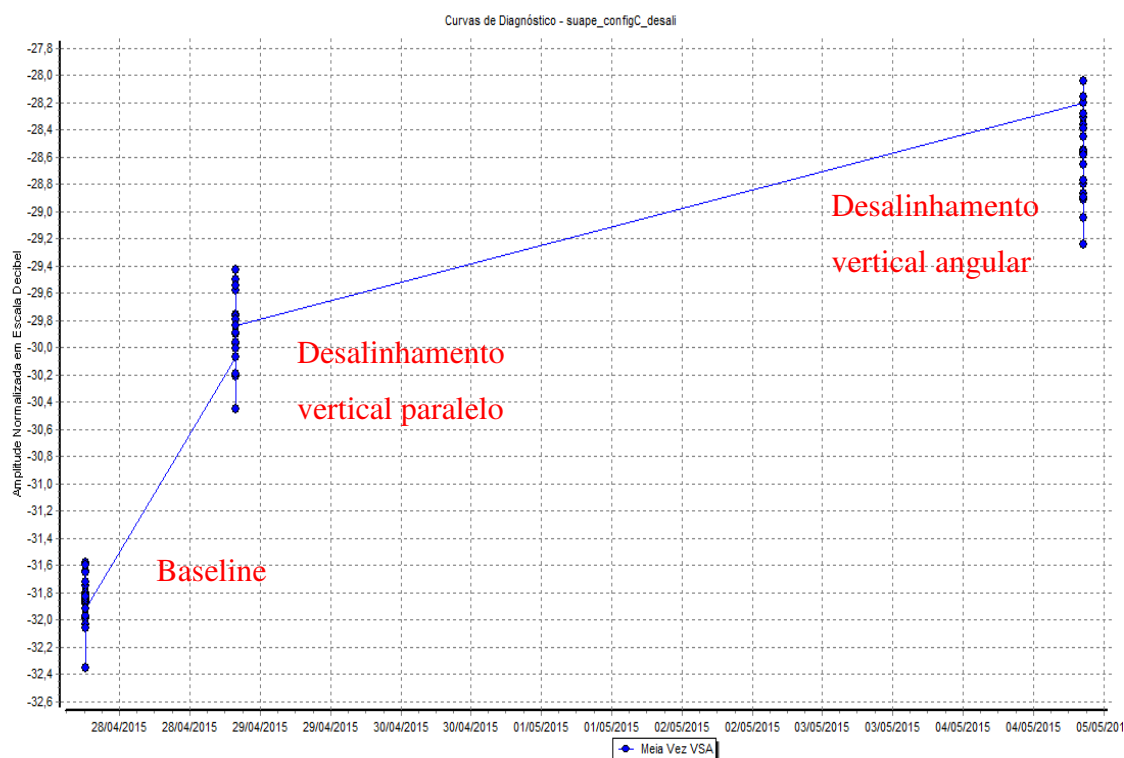
$$\frac{f_r}{2}(d) = 60 + 15 = 75 \text{ (Hz)}$$

A primeira banda lateral esquerda é dada por:

$$\frac{f_r}{2}(e) = 60 - 15 = 45 \text{ (Hz)}$$

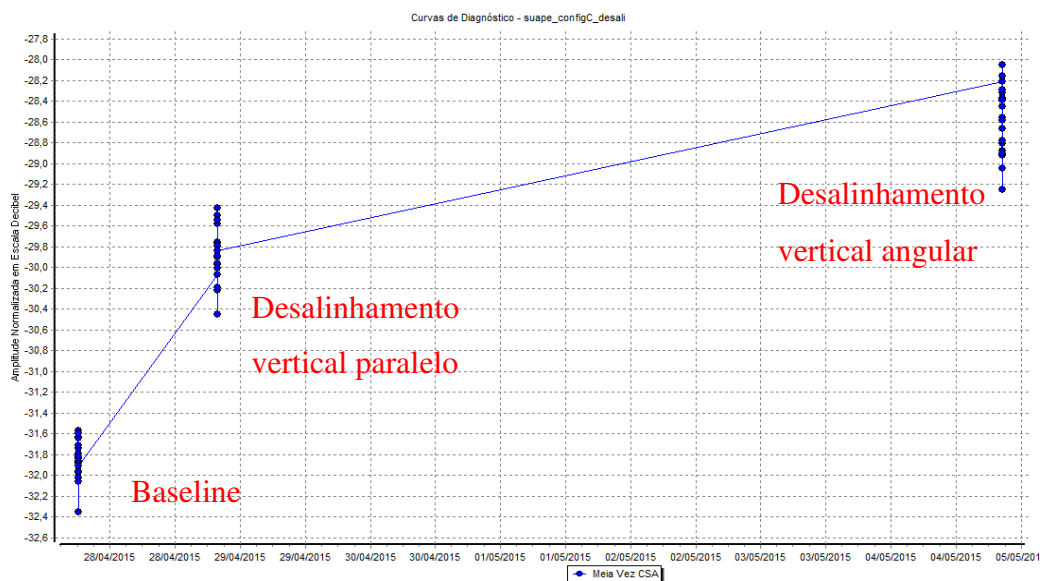
As Figuras 66 e 67 apresentam as curvas de tendência de meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente, respectivamente, considerando-se a primeira banda lateral direita. Pelas figuras, nota-se que, à medida que aumenta o nível de severidade de falha, há um aumento na componente de análise, comprovando-se a resposta do padrão para este tipo de falha.

Figura 66 - Curva de tendência de meia vez a frequência de rotação na assinatura de tensão devido a falha de desalinhamento mecânico



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 67 - Curva de tendência de meia vez a frequência de rotação na assinatura da corrente devido a falha de desalinhamento mecânico

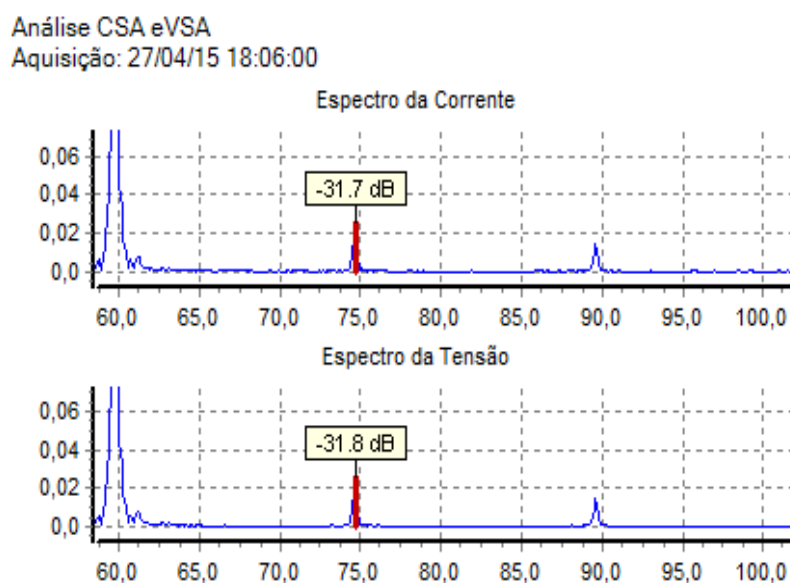


FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 68 apresenta exemplos de meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de falha. Nota-se o aumento na amplitude da componente da condição de baseline para a condição de falha.

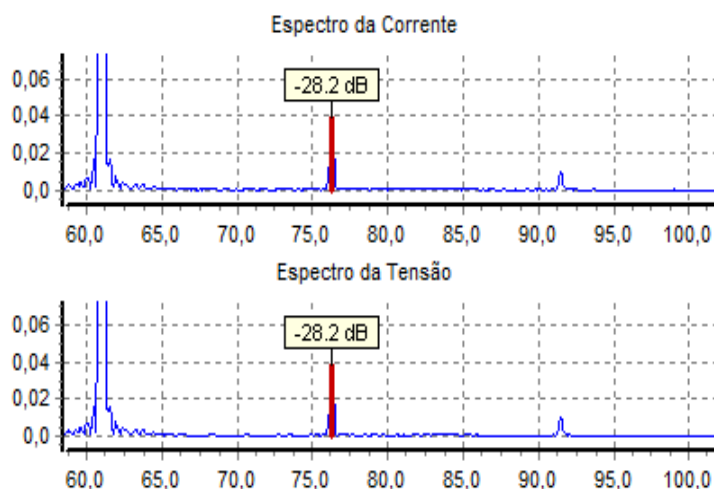
Figura 68 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com meia vez a frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha por desalinhamento mecânico

a)



b)

Análise CSA eVSA
Aquisição: 04/05/15 20:34:00



FONTE: (O autor, 2017)

Como observação final, tem-se que, para este tipo de falha era esperado haver aumento nas componentes de frequência de rotação. No entanto, de acordo com os resultados experimentais obtidos, houve um aumento nas componentes de meia vez a frequência de rotação. Desta forma, o padrão obtido empiricamente para esta falha foi o de meia vez a frequência de rotação na assinatura elétrica.

4.1.3.3 Falhas no anel do pistão

Outro tipo de falha foi aquele encontrado no anel do pistão do motor a diesel. Sua simulação se deu através do desgaste do anel do pistão e da regulação do óleo lubrificante.

Uma vez realizados os ensaios de baseline e simulação de problema no anel do pistão do motor a diesel, os sinais coletados foram analisados em busca da identificação de padrões de falha. Para esta falha, também se esperava haver uma redução na eficiência do motor a diesel. Assim, houve uma queda acentuada na tensão RMS, na corrente RMS, na velocidade rotórica e, por consequência, na frequência fundamental do gerador. A falha também provocou uma variação na amplitude da componente de frequência de rotação do rotor, padrão dado por $f_1 \pm k \cdot f_r$ nas assinaturas de tensão e de corrente, onde k é um valor inteiro positivo.

Conforme mencionado anteriormente, o gerador do laboratório de modelo reduzido é de quatro polos, ou dois pares de polos, e logo a frequência de rotação é dada por:

$$f_r = \frac{f_1}{p} = \frac{60}{2} = 30 \text{ (Hz)}$$

Desta forma, a primeira banda lateral direita do padrão de frequência de rotação é dada por:

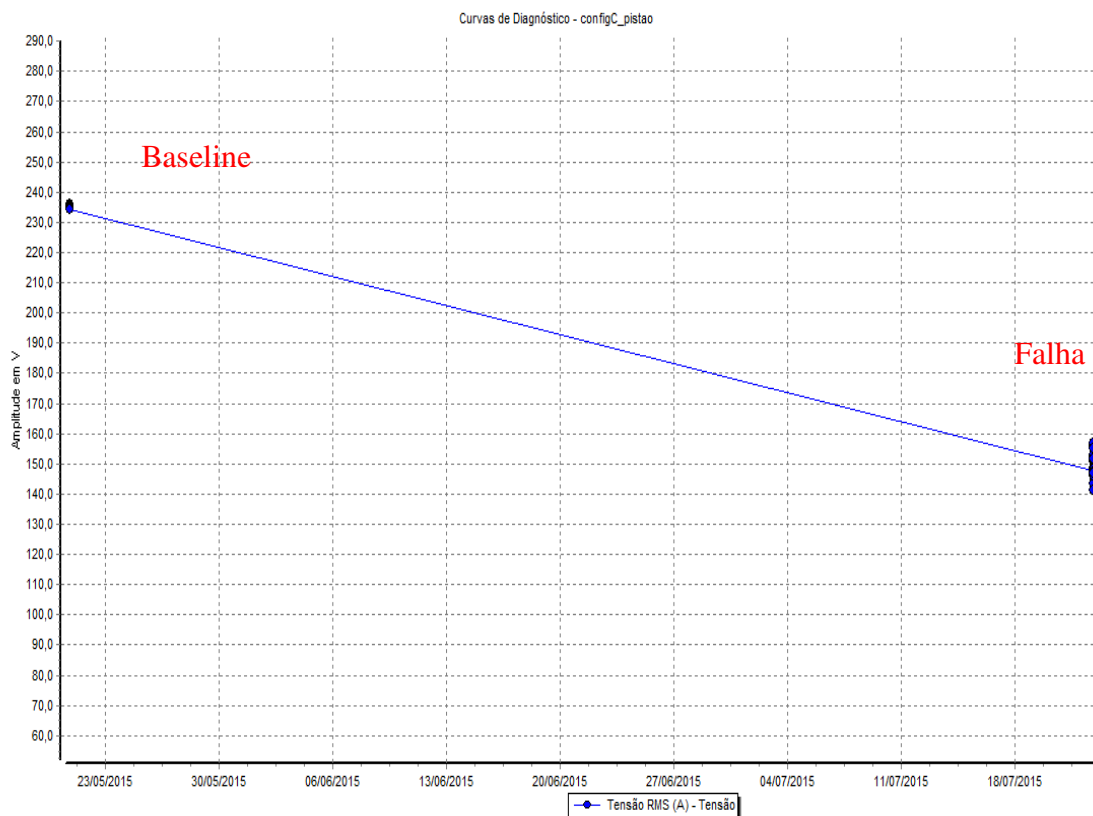
$$f_r(d) = 60 + 30 = 90 \text{ (Hz)}$$

A primeira banda lateral esquerda é dada por:

$$f_r(e) = 60 - 30 = 30 \text{ (Hz)}$$

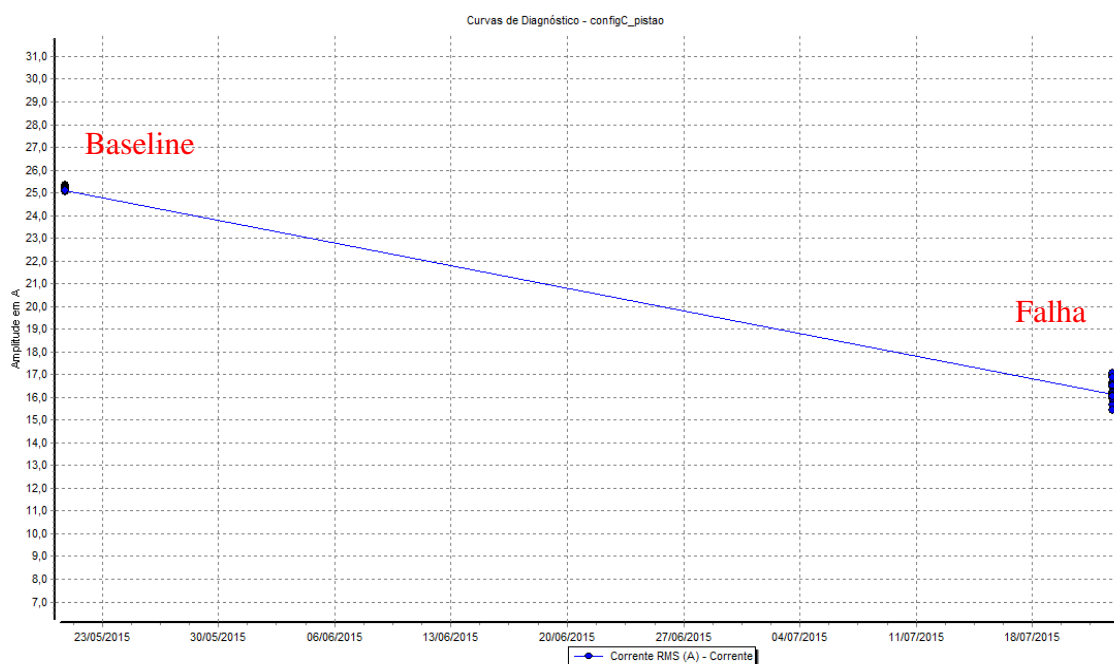
As Figuras 69 a 71 apresentam as curvas de tendência de tensão RMS, corrente RMS e velocidade, respectivamente. Nota-se uma diminuição acentuada destas grandezas do baseline para a condição de falha.

Figura 69 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha no anel do pistão



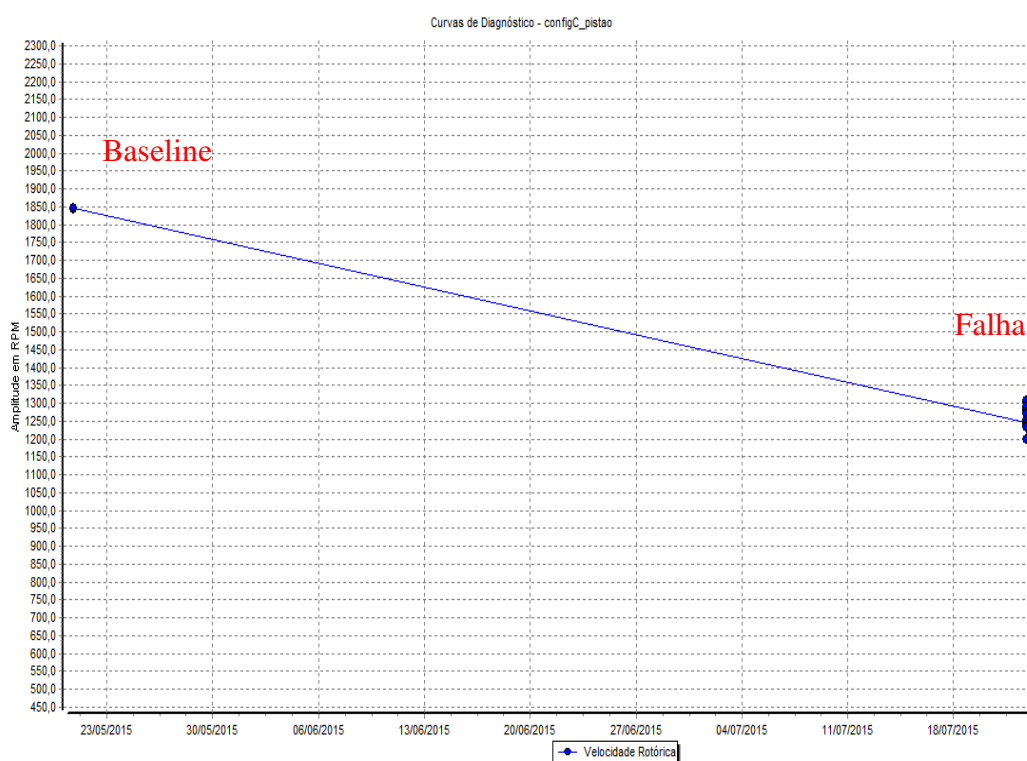
FONTE: (O autor, 2017)

Figura 70 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha no anel do pistão



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 71 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha no anel do pistão

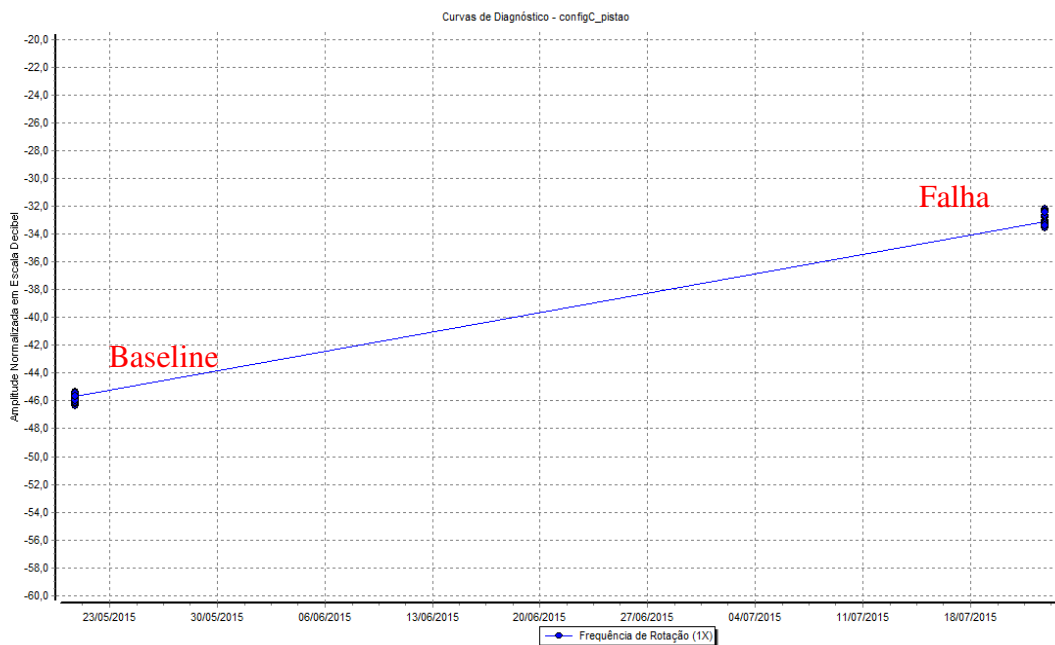


FONTE: (O autor, 2017)

As Figuras 72 e 73 apresentam as curvas de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão e de corrente, respectivamente, considerando-se a primeira banda lateral direita. Nota-se que, da condição de baseline para a condição

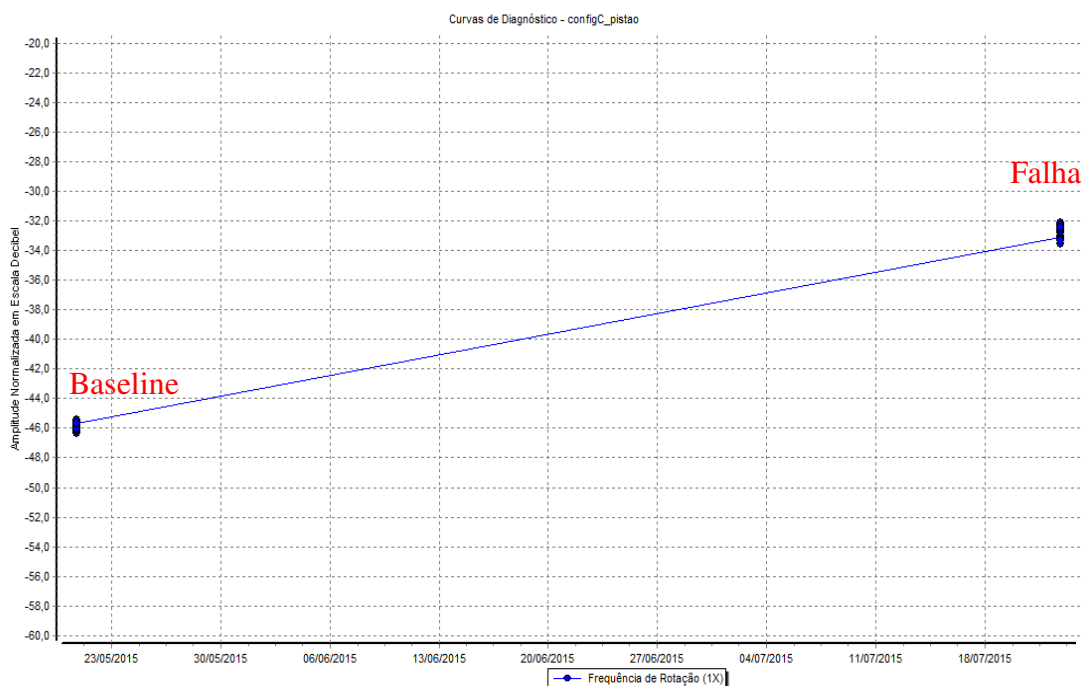
de falha, houve um aumento acentuado da amplitude da componente de frequência de rotação, de forma que houve resposta deste padrão para esta falha.

Figura 72 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha no anel do pistão



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 73 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha no anel do pistão

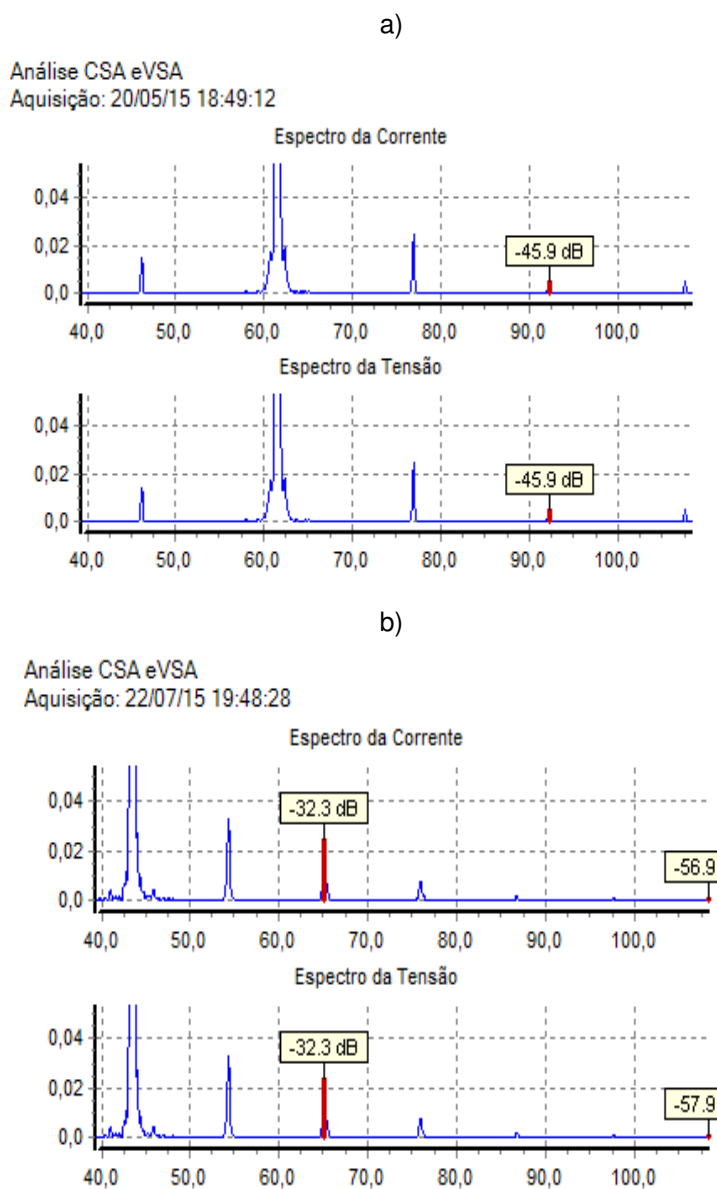


FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 74 apresenta exemplos de frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de falha. Nota-se um

aumento acentuado na amplitude da componente da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 74 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha no anel do pistão



FONTE: (O autor, 2017)

4.1.3.4 Falhas nas válvulas de admissão e de escape

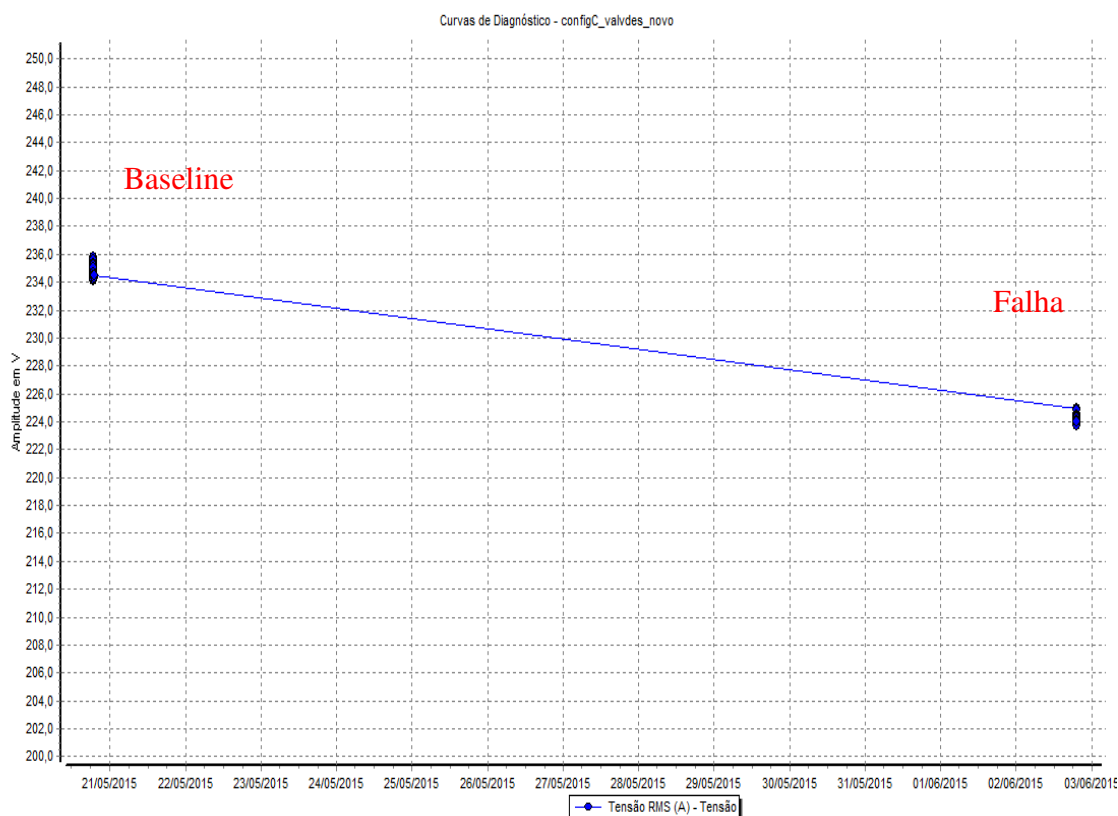
O próximo tipo de falha foi aquele encontrado nas válvulas de admissão e de escape do motor a diesel. Sua simulação se deu desregulando-se tais válvulas.

Uma vez realizados os ensaios de baseline e simulação de problema na regulação nas válvulas de admissão e escape, os sinais coletados foram analisados em busca da identificação de padrões de falha. Para esta falha, também se esperava haver uma redução na eficiência do motor a diesel. Assim, houve uma

queda na tensão RMS, na corrente RMS, na velocidade rotórica e, por consequência, na frequência fundamental do gerador. A falha também provocou uma variação na amplitude da componente de frequência de rotação do rotor, padrão dado por $f_1 \pm k \cdot f_r$ nas assinaturas de tensão e de corrente, onde k é um valor inteiro positivo. Tem-se para este padrão, conforme calculado anteriormente, a primeira banda lateral direita dada por $f_r(d) = 90(Hz)$ e a primeira banda lateral esquerda dada por $f_r(e) = 30(Hz)$.

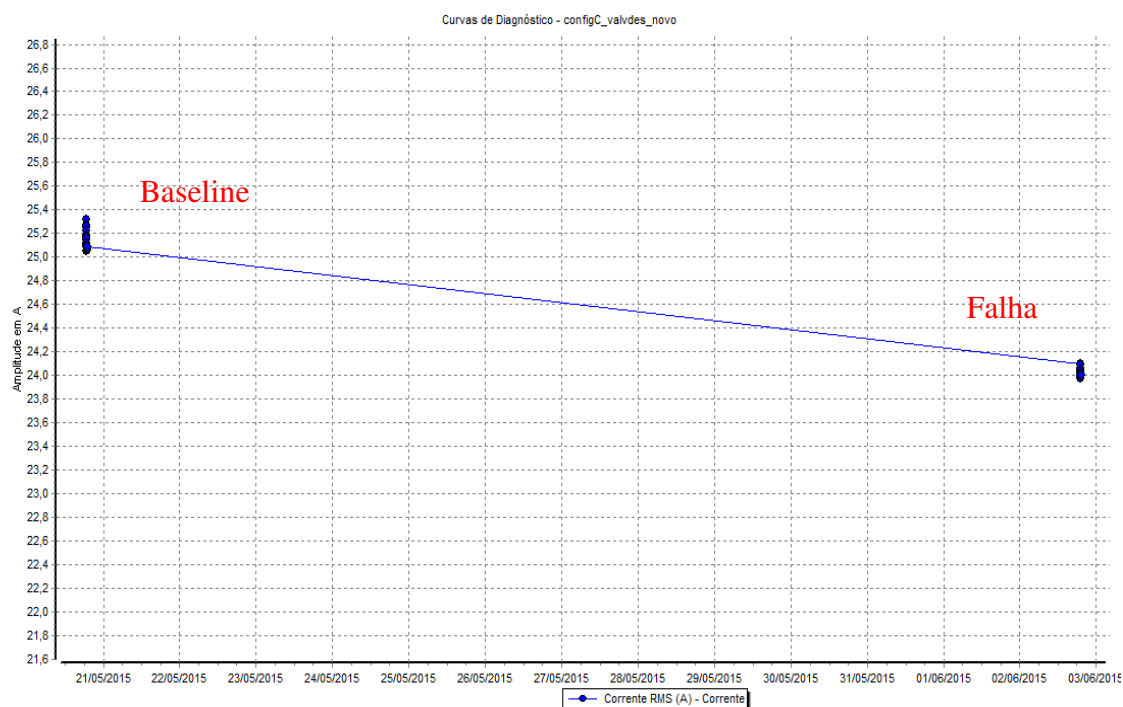
As Figuras 75 a 77 apresentam as curvas de tendência de tensão RMS, corrente RMS e velocidade, respectivamente. Nota-se a queda destas grandezas do baseline para a condição de falha.

Figura 75 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape



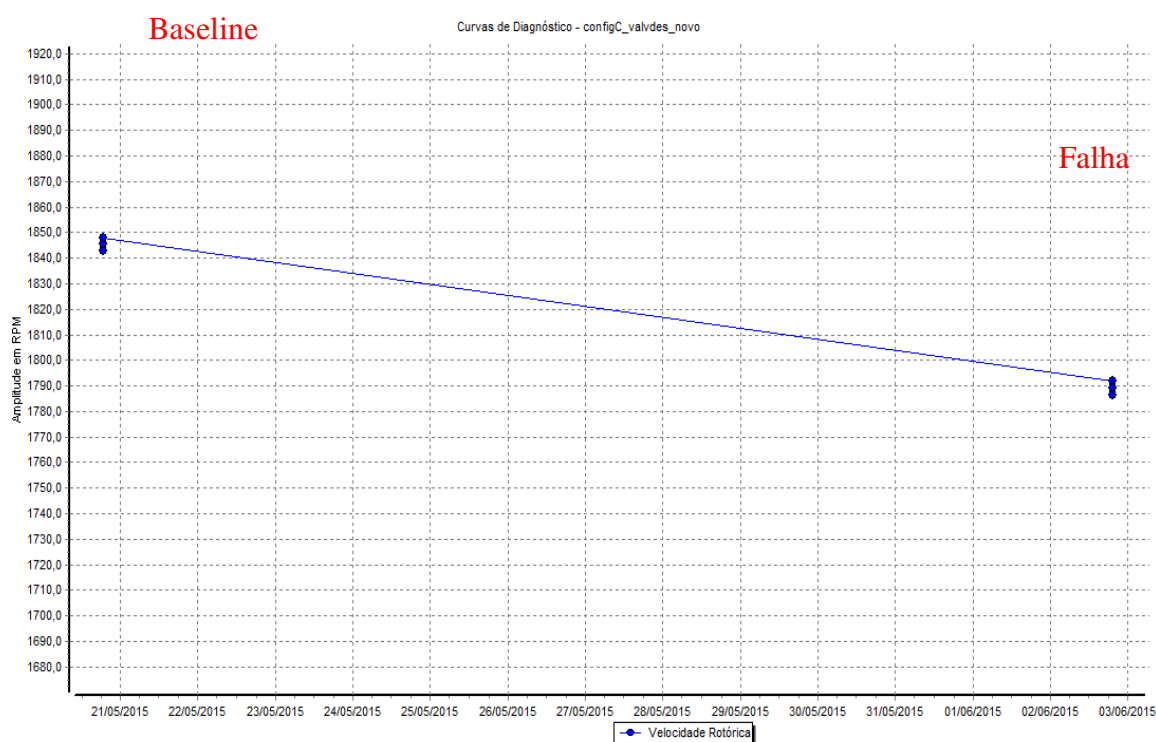
FONTE: (O autor, 2017)

Figura 76 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 77 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape

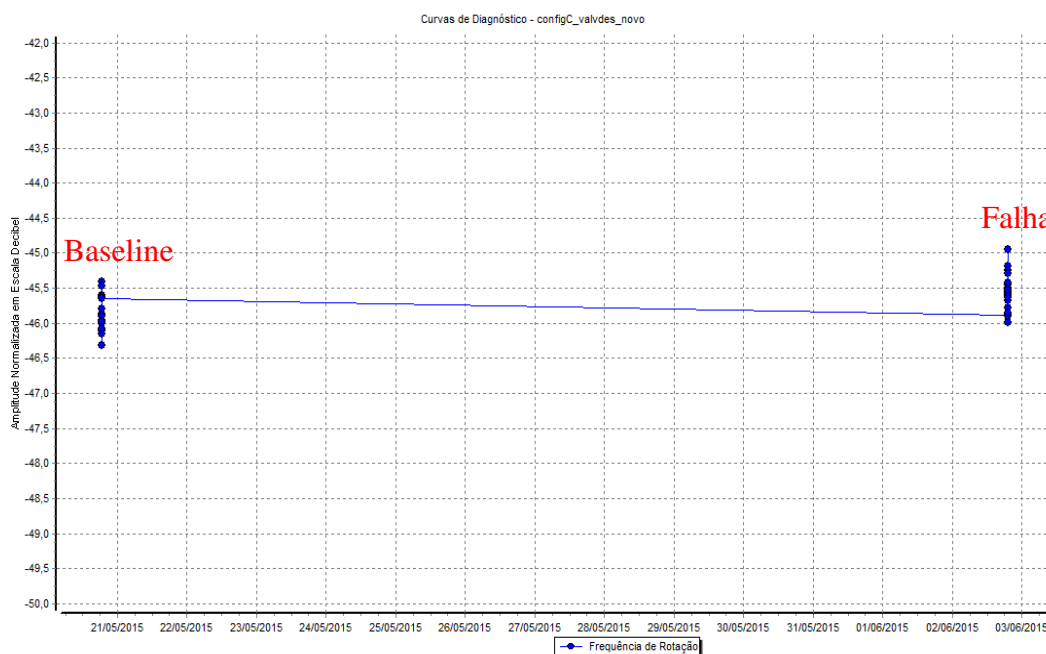


FONTE: (O autor, 2017)

As Figuras 78 e 79 apresentam as curvas de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão e de corrente, respectivamente, considerando-se a

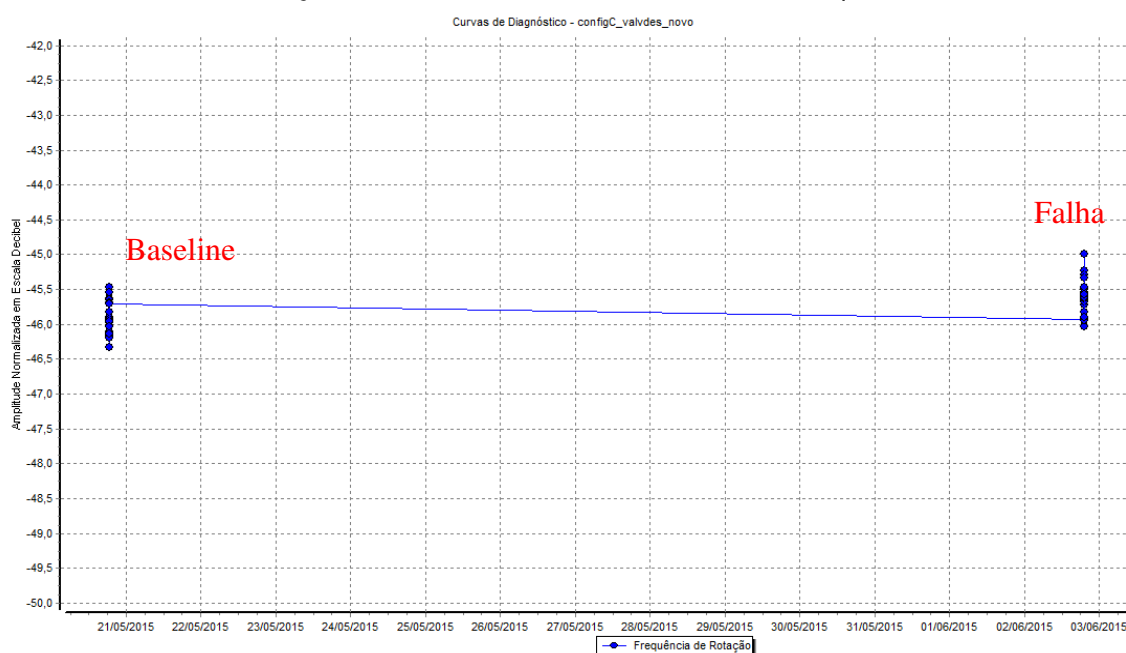
primeira banda lateral direita. Nota-se que, da condição de baseline para a condição de falha, houve um aumento sutil da componente de frequência de rotação, que pode ser um indicativo para esta falha.

Figura 78 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 79 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha nas válvulas de admissão e escape

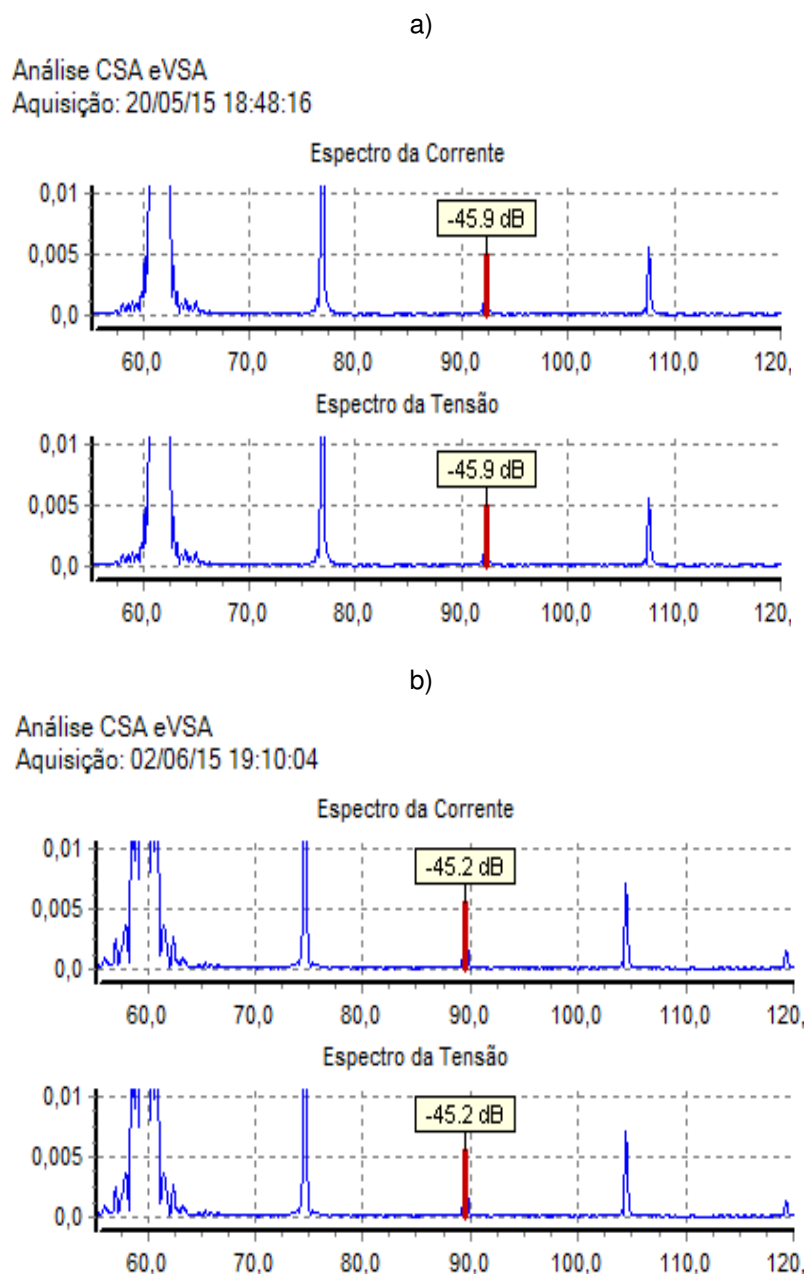


FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 80 apresenta exemplos de frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de falha. Nota-se um

aumento sutil da amplitude da componente da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 80 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha nas válvulas de admissão e escape



FONTE: (O autor, 2017)

4.1.3.5 Falhas na válvula de injeção

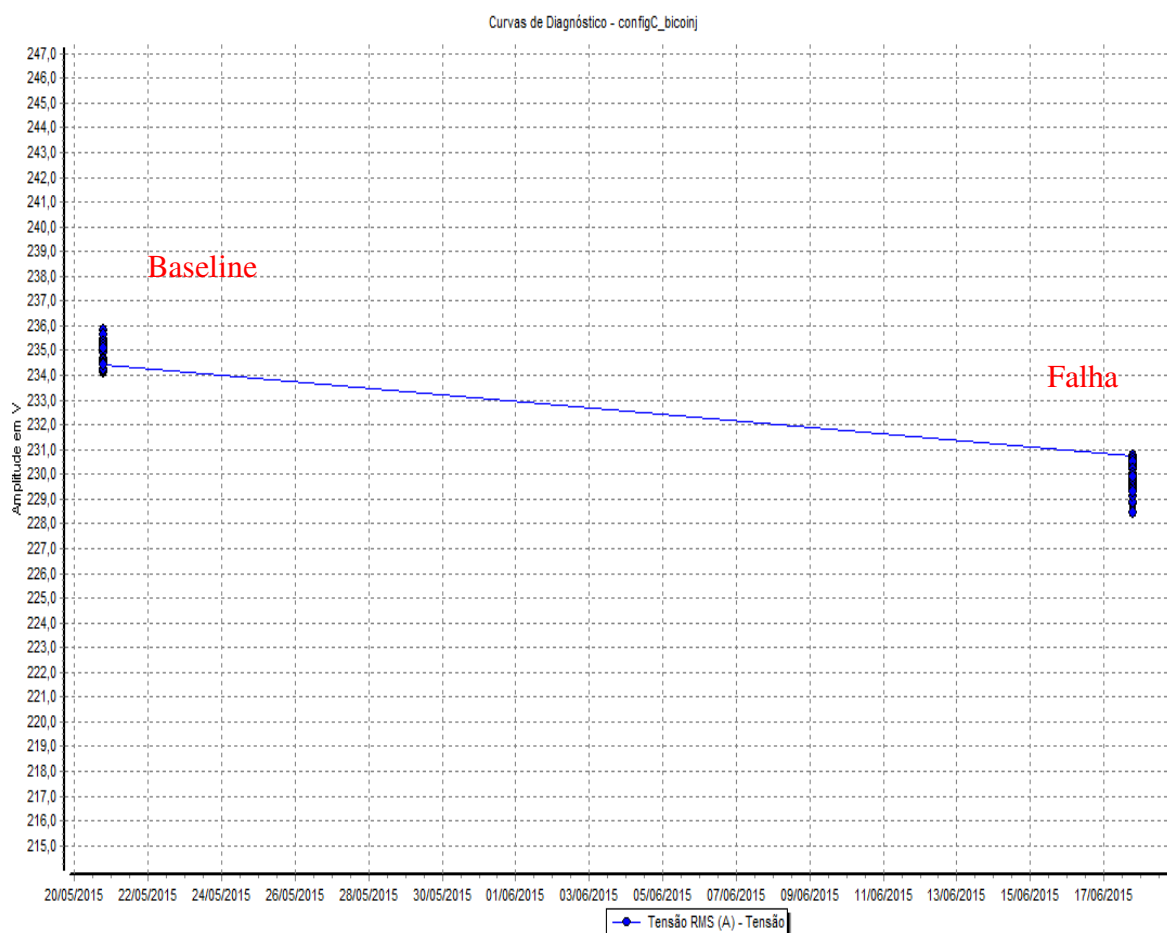
Este tipo de falha foi aquele encontrado na válvula de injeção de combustível do motor a diesel. Sua simulação se deu através da redução da pressão interna em tal válvula.

Após a realização dos ensaios de baseline e simulação de problema no bico injetor de combustível, os sinais coletados foram analisados em busca da

identificação de padrões de falha. Para esta falha, esperava-se haver uma redução na eficiência do motor a diesel. Assim, houve uma leve queda na tensão RMS, na corrente RMS, na velocidade rotórica e, por consequência, na frequência fundamental do gerador. A falha também provocou uma variação na amplitude da componente de frequência de rotação do rotor, padrão dado por $f_1 \pm k \cdot f_r$, nas assinaturas de tensão e de corrente, onde k é um valor inteiro positivo. Tem-se para este padrão, conforme também calculado anteriormente, a primeira banda lateral direita dada por $f_r(d) = 90 (Hz)$ e a primeira banda lateral esquerda dada por $f_r(e) = 30 (Hz)$.

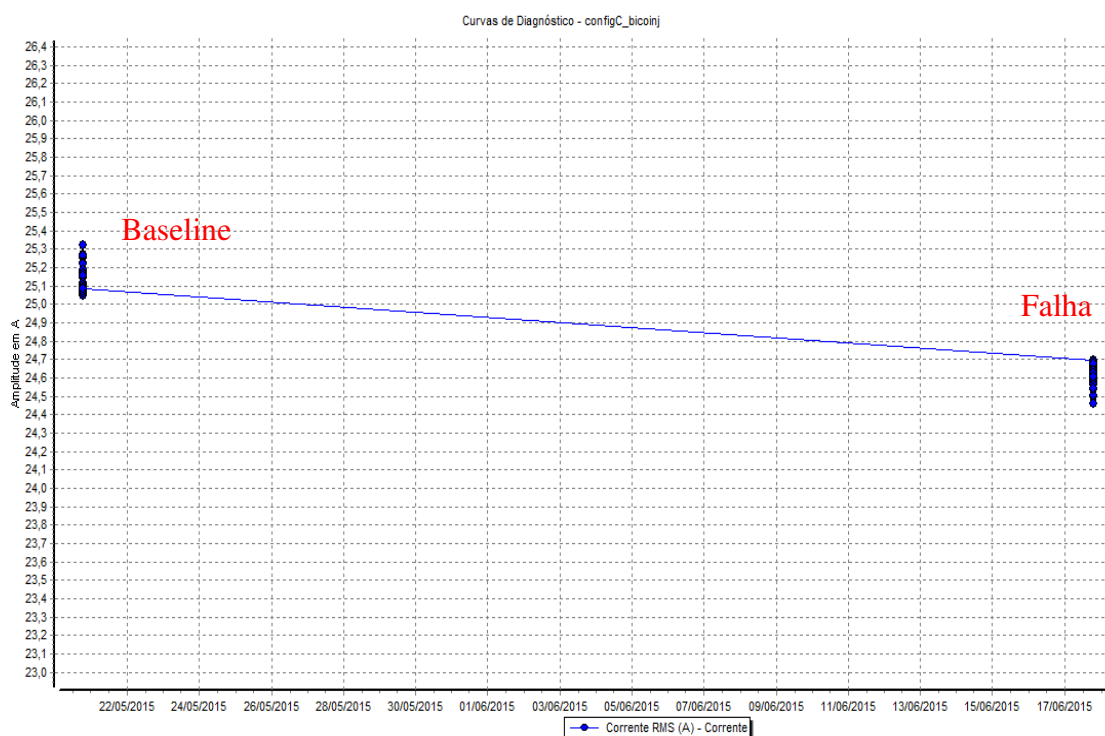
As Figuras 81 a 83 apresentam as curvas de tendência de tensão RMS, corrente RMS e velocidade, respectivamente. Nota-se uma leve diminuição destas grandezas do baseline para a condição de falha.

Figura 81 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha na válvula de injeção



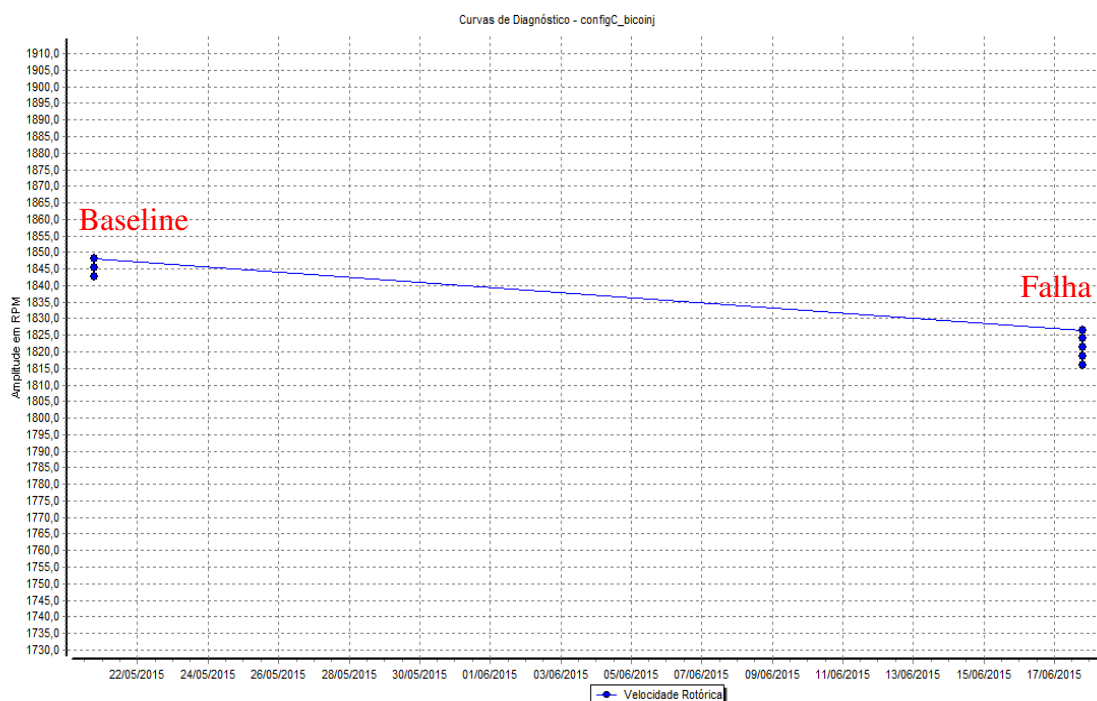
FONTE: (O autor, 2017)

Figura 82 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha na válvula de injeção



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 83 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha na válvula de injeção

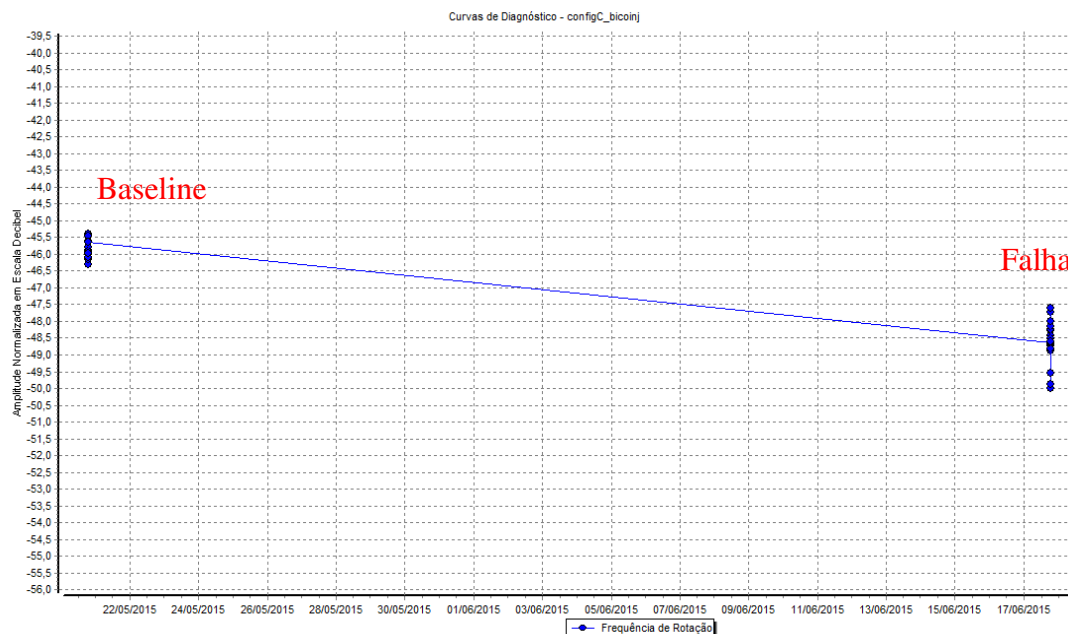


FONTE: (O autor, 2017)

As Figuras 84 e 85 apresentam as curvas de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão e de corrente, respectivamente, considerando-se a primeira banda lateral direita. Nota-se que, da condição de baseline para a condição

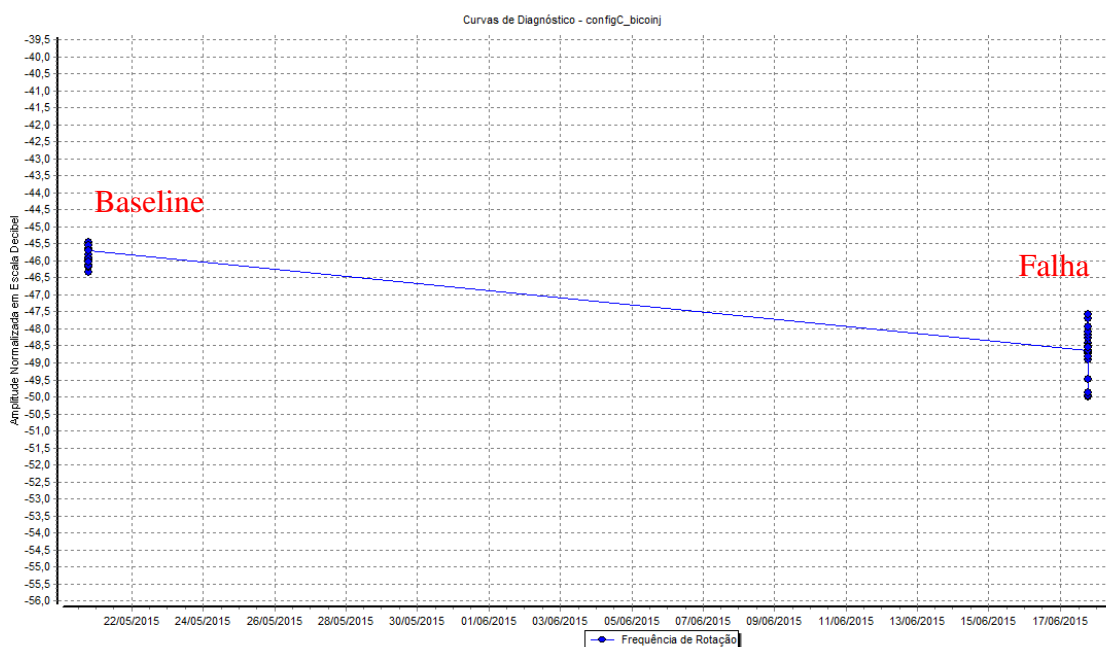
de falha, houve uma leve diminuição da amplitude componente de frequência de rotação.

Figura 84 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha na válvula de injeção



FONTE: (O autor, 2017)

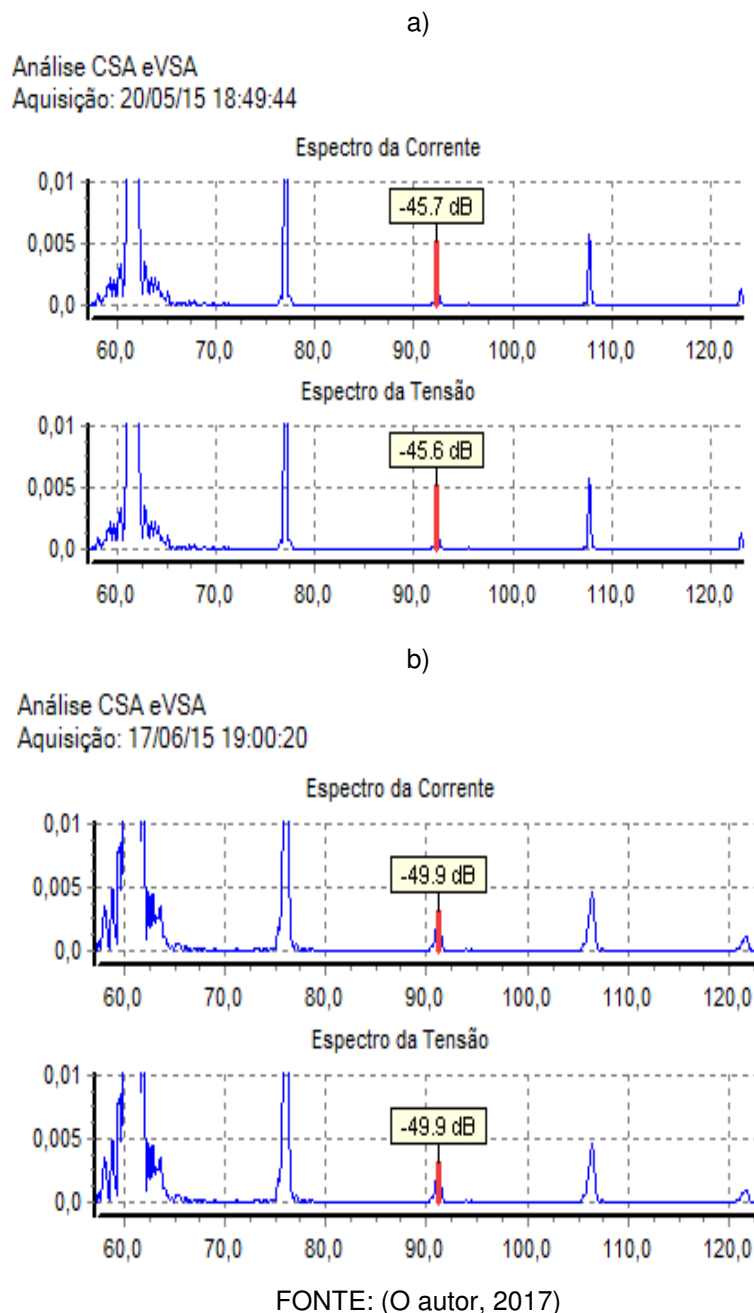
Figura 85 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha na válvula de injeção



FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 86 apresenta exemplos de frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de falha. Nota-se uma diminuição na amplitude da componente da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 86 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha na válvula de injeção



4.1.3.6 Falhas na válvula de admissão

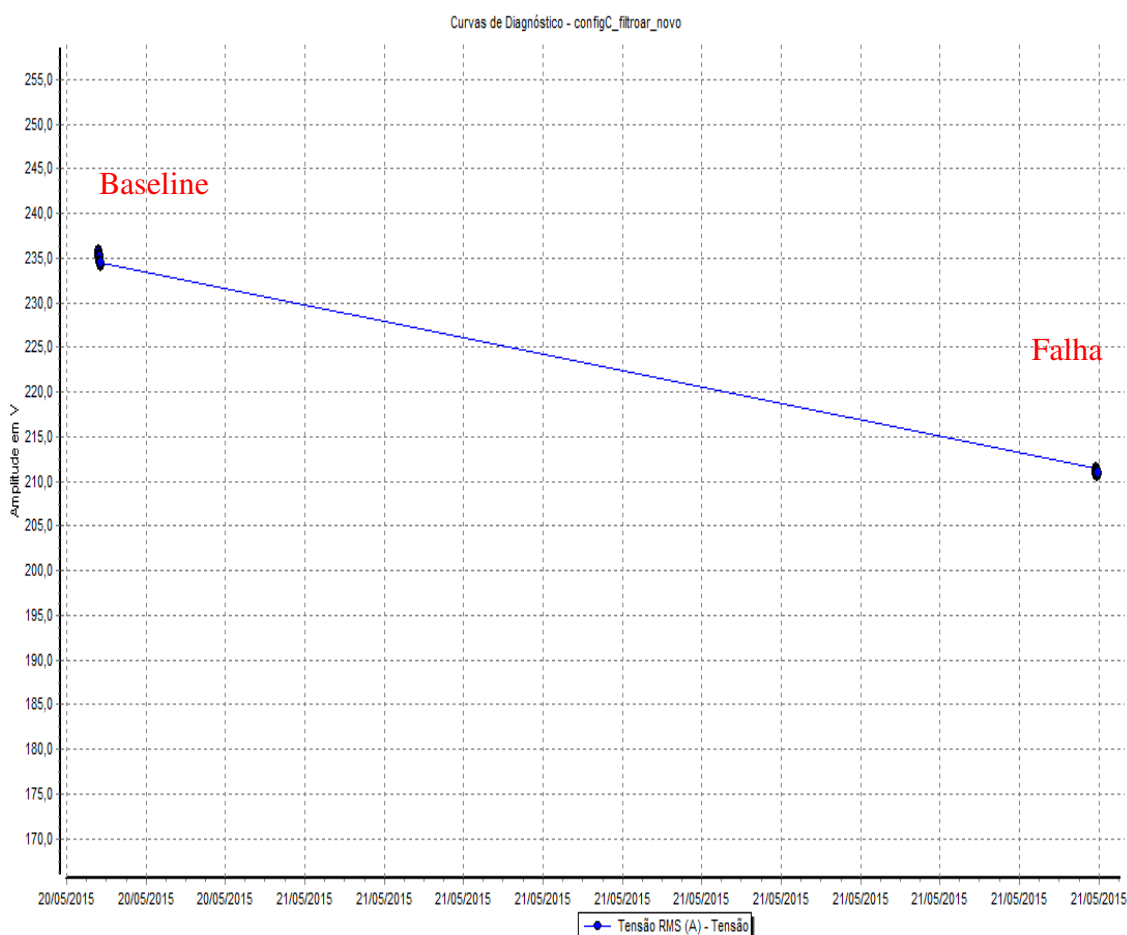
Por fim, o último e mais explorado, tipo de falha foi aquele encontrado na válvula de admissão do motor a diesel. Sua simulação se deu através da obstrução do filtro de ar do motor.

Após a realização dos ensaios de baseline e simulação de problema na válvula de admissão no filtro de ar, os sinais coletados foram analisados em busca da identificação de padrões de falha. Para esta falha, era esperado haver uma redução na eficiência do motor a diesel. Assim, houve uma queda na tensão RMS, na

corrente RMS, na velocidade rotórica e, por consequência, na frequência fundamental do gerador. A falha também provocou uma variação na amplitude da componente de frequência de rotação do rotor. Este padrão é dado por $f_1 \pm k \cdot f_r$ nas assinaturas de tensão e de corrente, onde k é um valor inteiro positivo. Tem-se para este padrão, conforme também calculado anteriormente, a primeira banda lateral direita dada por $f_r(d) = 90 (Hz)$ e a primeira banda lateral esquerda dada por $f_r(e) = 30 (Hz)$.

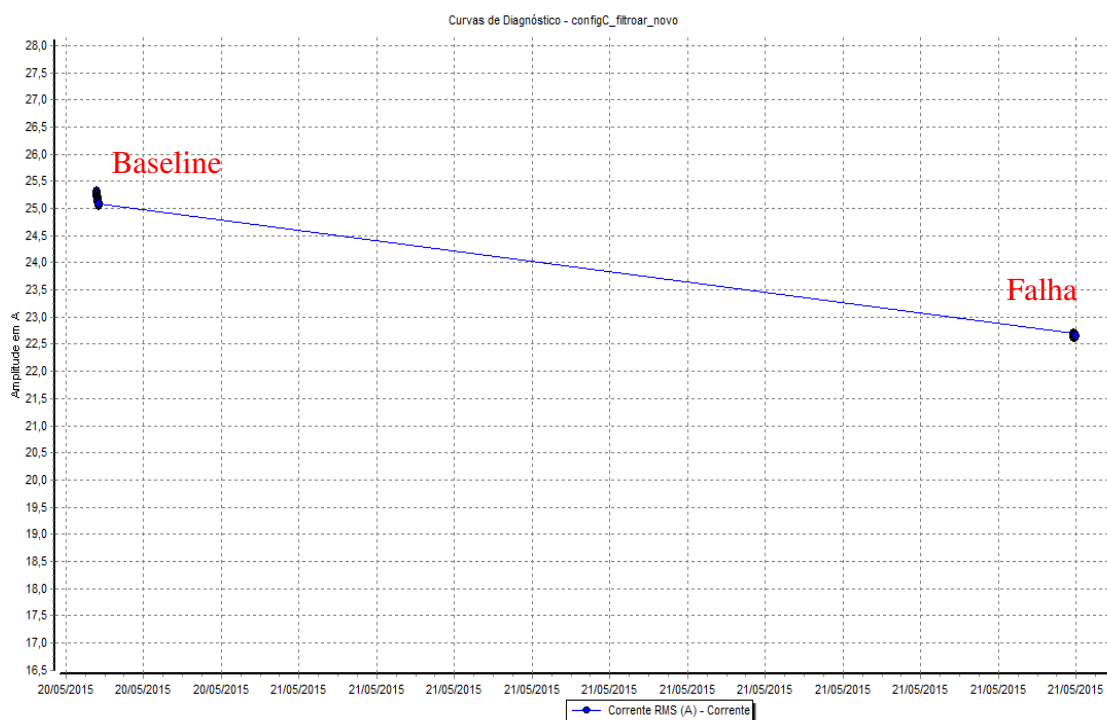
As Figuras 87 a 89 apresentam as curvas de tendência de tensão RMS, corrente RMS e velocidade, respectivamente. Nota-se a queda destas grandezas da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 87 - Curva de tendência de tensão RMS para simulação de falha na válvula de admissão



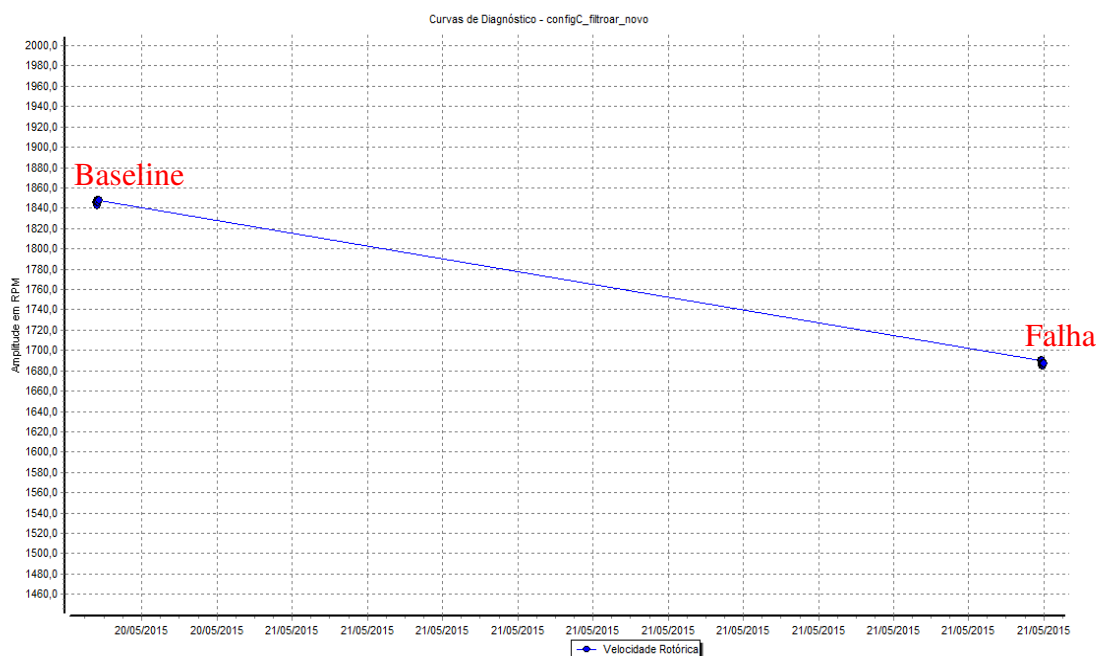
FONTE: (O autor, 2017)

Figura 88 - Curva de tendência de corrente RMS para simulação de falha na válvula de admissão



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 89 - Curva de tendência de velocidade rotórica para simulação de falha na válvula de admissão

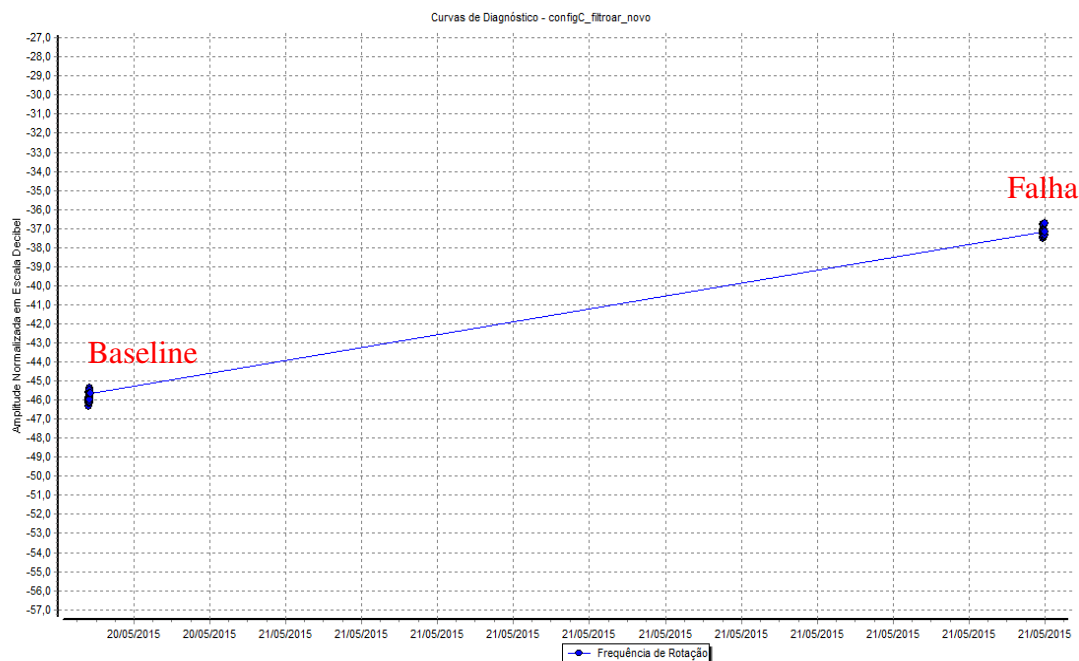


FONTE: (O autor, 2017)

As Figuras 90 e 91 apresentam as curvas de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão e de corrente, respectivamente, considerando-se a primeira banda lateral direita. Nota-se que, da condição de baseline para a condição

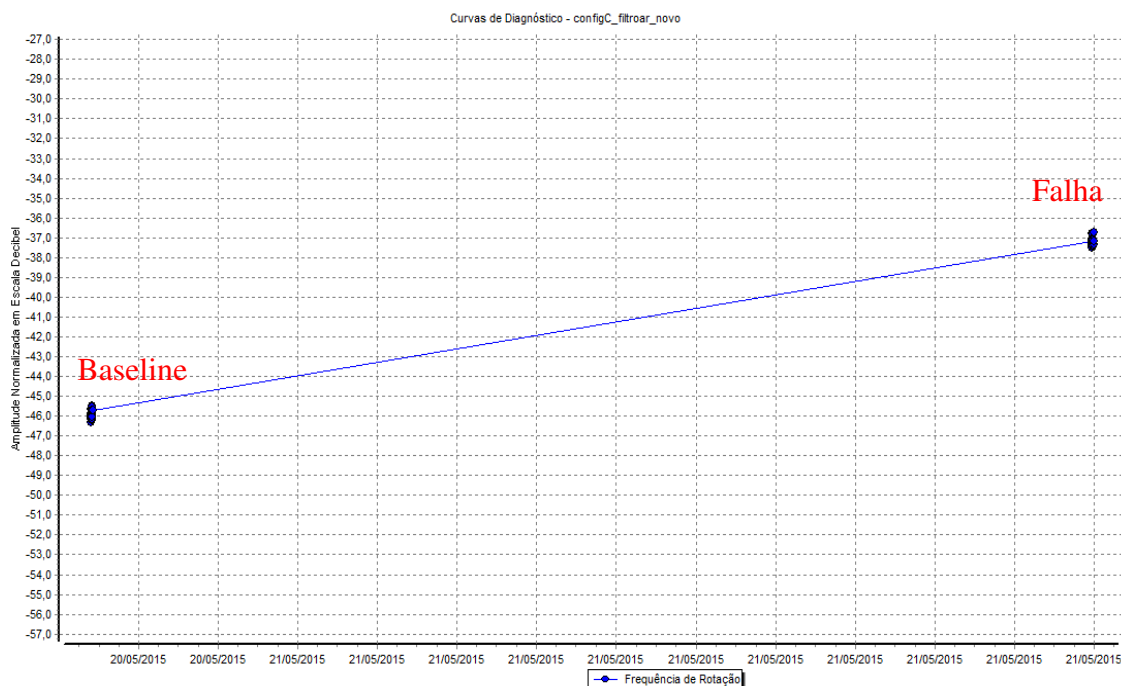
de falha, houve um aumento da componente de frequência de rotação, comprovando-se a resposta do padrão para esta falha.

Figura 90 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de tensão para simulação de falha na válvula de admissão



FONTE: (O autor, 2017)

Figura 91 - Curva de tendência de frequência de rotação na assinatura de corrente para simulação de falha na válvula de admissão

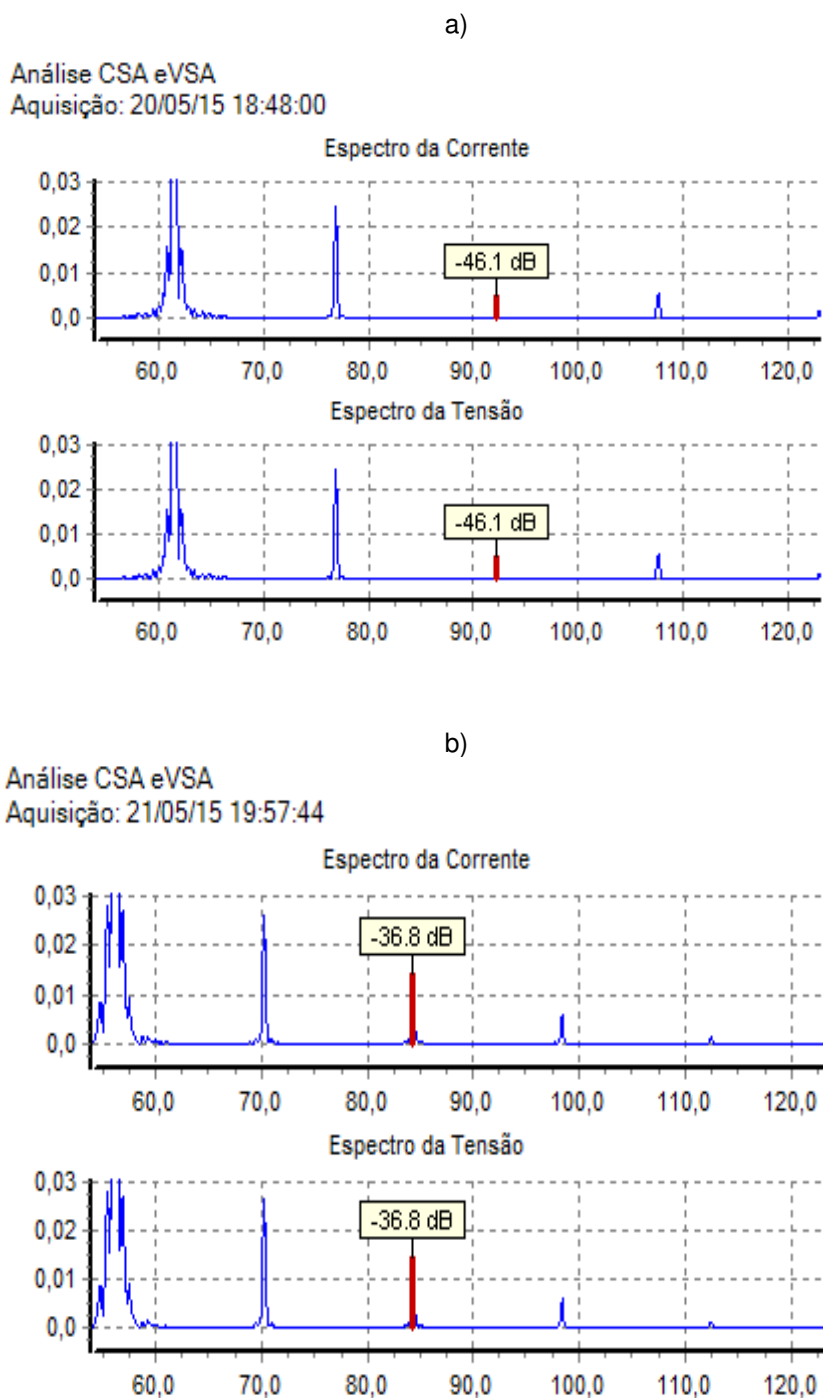


FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 92 apresenta exemplos de frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para a condição de baseline e a condição de falha. Há um

aumento na amplitude da componente da condição de baseline para a condição de falha.

Figura 92 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação. a) Condição de baseline e b) Condição de falha na válvula de admissão



FONTE: (O autor, 2017)

É importante enfatizar que todos os padrões de falha apresentados do laboratório de modelo reduzido foram obtidos através de ensaios experimentais com com o gerador em malha aberta. Por outro lado, os grupos geradores da planta termelétrica estão em malha fechada, com controle de tensão e velocidade, portanto.

Desta forma, para esta falha e todas as outras de caráter mecânico, supõe-se haver variação apenas da amplitude da componente de frequência de rotação na assinatura elétrica, uma vez que a tensão e a velocidade são mantidas em intervalos de valores pré-estabelecidos.

4.2 ANÁLISE NUMA USINA TERMELÉTRICA

Na usina termelétrica foram coletados sinais elétricos de alguns grupos motor-gerador com o objetivo de buscar alguns dos padrões de falha observados nos ensaios experimentais do grupo motor-gerador do laboratório de modelo reduzido e de analisar o tipo de espectro elétrico, dadas as características diferenciadas do motor de combustão interna que é multicilíndrico. Isto foi feito a partir das análises das assinaturas de tensão (VSA e EPVA) e de corrente (CSA e EPVA).

O conjunto de dados constou de aquisições de tensão e de corrente dos grupos motor-gerador, ou mais especificamente unidades geradoras, 3, 6, 11 e 13, referidas como G3, G6, G11 e G13, respectivamente. Sua coleta se deu, para as unidades G6 e G11, no período de março a novembro de 2015. Nas unidades G3 e G13, a coleta se deu no período de outubro e novembro de 2015, para G13, e novembro de 2015, para G3. Este último esteve desligado na maior parte do período de coleta de dados. Apenas em dois dias conseguiram-se aquisições de dados deste gerador em que a condição de carga fosse próxima da condição de carga dos outros geradores, para que a análise comparativa entre as unidades fosse coerente.

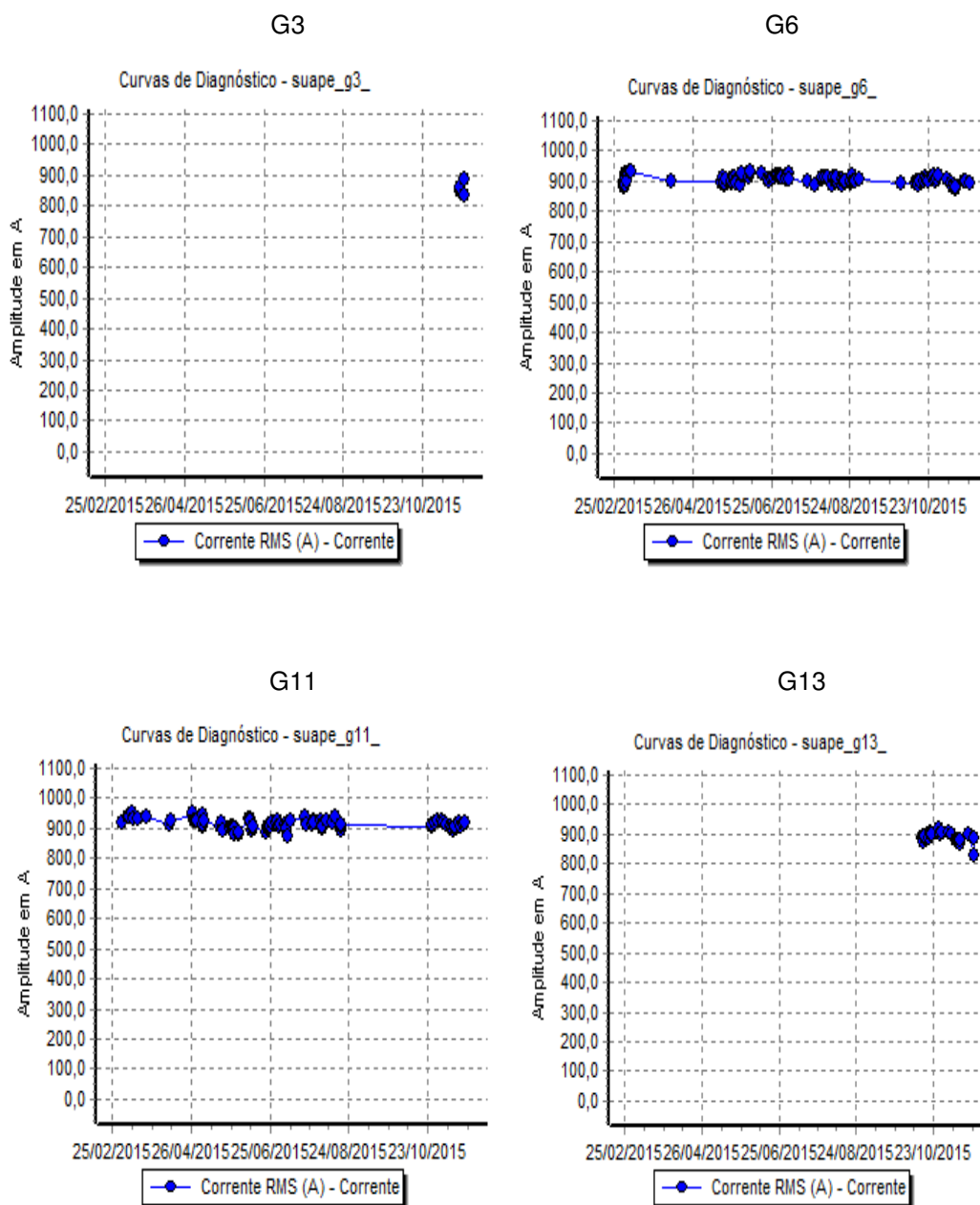
De forma a adquirir sinais próximo da condição de carga plena procedeu-se uma análise dos modos de operação dos geradores e as curvas de tendência dos padrões de falha. Para efeito de ilustração das assinaturas de tensão e de corrente, foi considerado como exemplo aquisições arbitrárias contidas no conjunto de dados do período mencionado. Como observação final, tem-se que, para se apresentarem as curvas de tendência dos padrões, tomou-se a média diária, por ser adequada para análise, levando em conta o período de dados disponível.

4.2.1 Modos de Operação dos Geradores

Para a análise comparativa entre as unidades geradoras, no que se refere aos seus sinais, era imperativo que estas apresentassem a mesma condição de carga. Assim sendo, tomaram-se para análise os dados na condição principal de operação destas durante o período de coleta. Desta forma sua corrente margeou o patamar de

900 A, o que corresponde a 77% da carga nominal. A Figura 93 apresenta as curvas de tendência de corrente RMS na fase A das unidades geradoras.

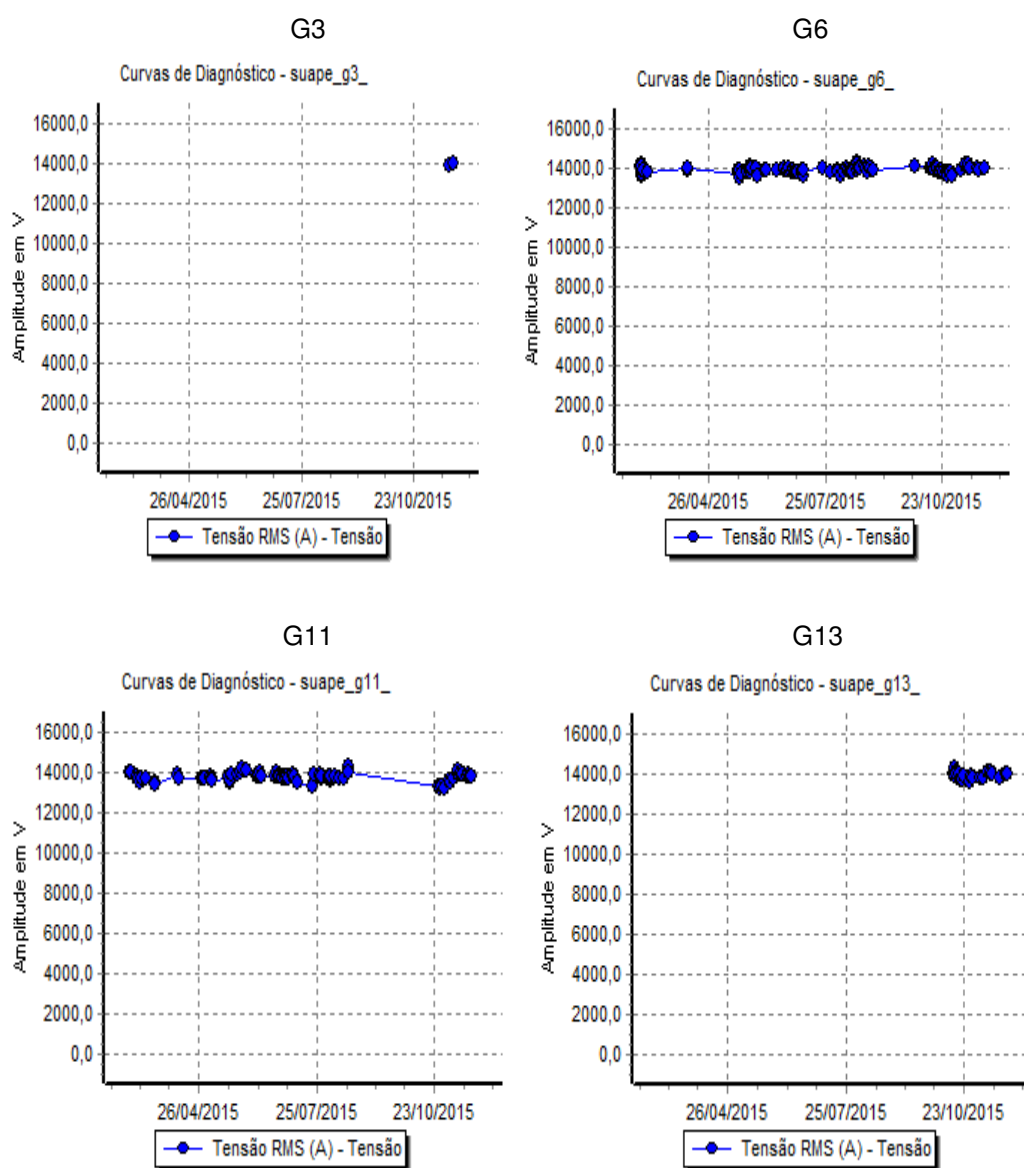
Figura 93 - Curva de tendência de corrente RMS na fase A para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 94 apresenta as curvas de tensão RMS na fase A das unidades geradoras. Nota-se que a tensão varia pouco em torno do valor nominal de 13800 V.

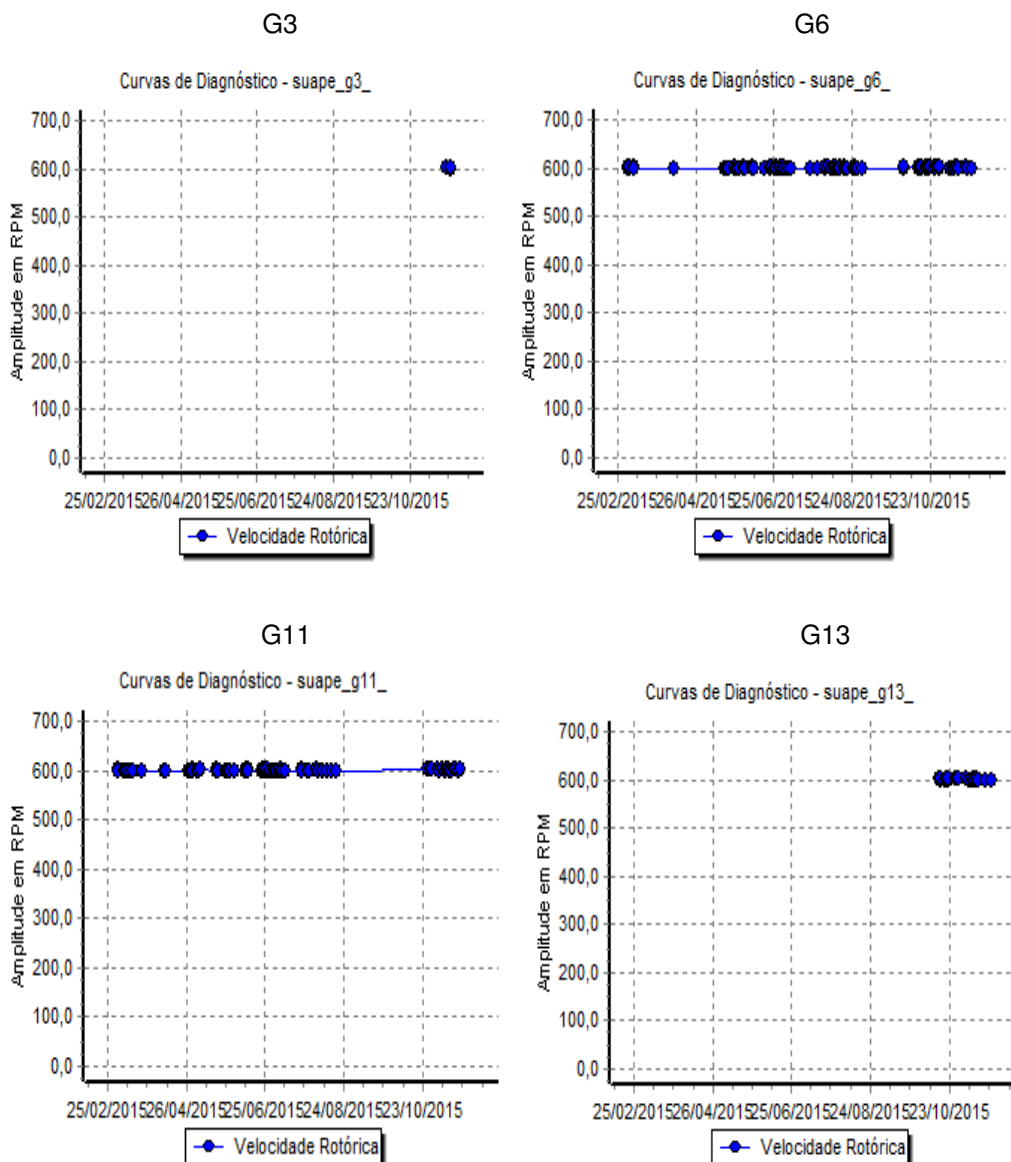
Figura 94 - Curva de tendência de tensão RMS na fase A para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 95 apresenta as curvas de velocidade rotórica das unidades geradoras. Nota-se que a velocidade varia pouco em torno do valor nominal de 600 rpm.

Figura 95 - Curva de tendência de velocidade rotórica para as unidades geradoras da usina termelétrica

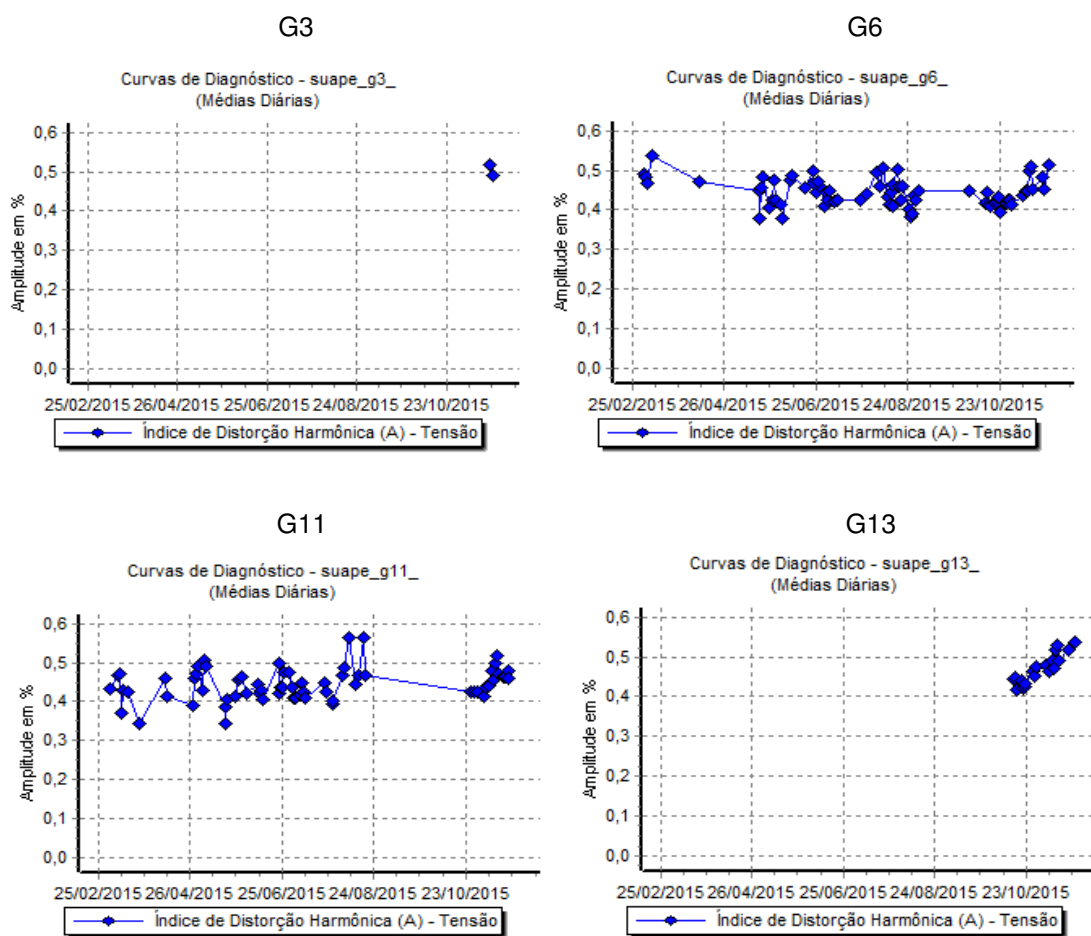


FONTE: (O autor, 2017)

4.2.2 Índice de Distorção Harmônica (IDH)

Para uma análise inicial da qualidade do sinal tensão produzido foi observado seu nível de conteúdo harmônico, aqui representado pelo índice de distorção harmônica (IDH). Para a fase A ele ficou em torno de 0,45% para todos os geradores, conforme apresentado na Figura 96.

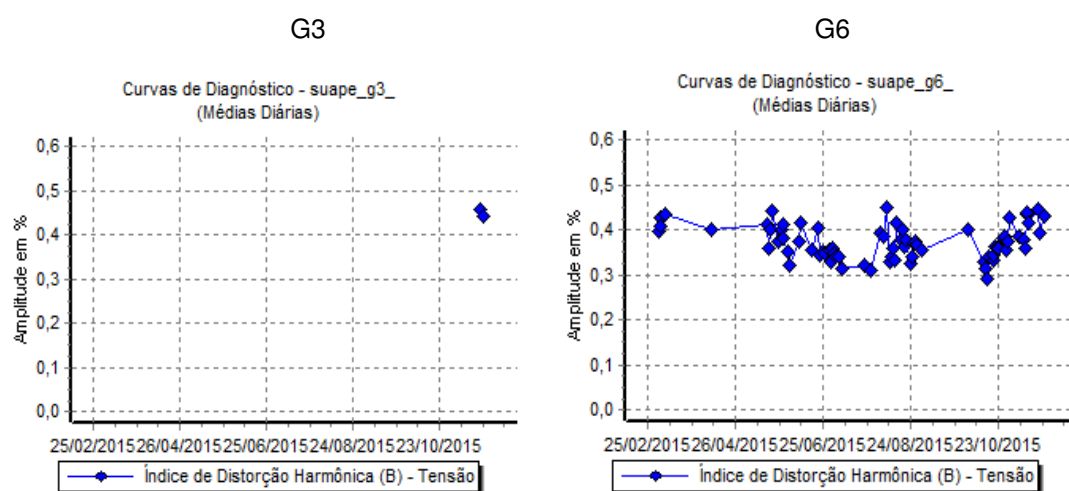
Figura 96 - IDH de tensão da fase A para as unidades geradoras da usina termelétrica

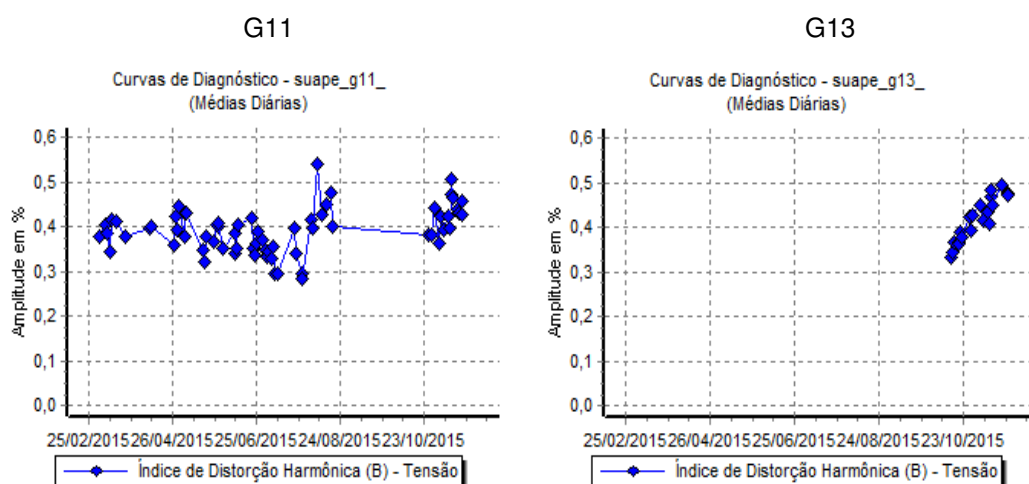


FONTE: (O autor, 2017)

Para a fase B ele ficou em torno de 0,4% para todos os geradores, como ilustrado na Figura 97.

Figura 97 - IDH de tensão da fase B para as unidades geradoras da usina termelétrica

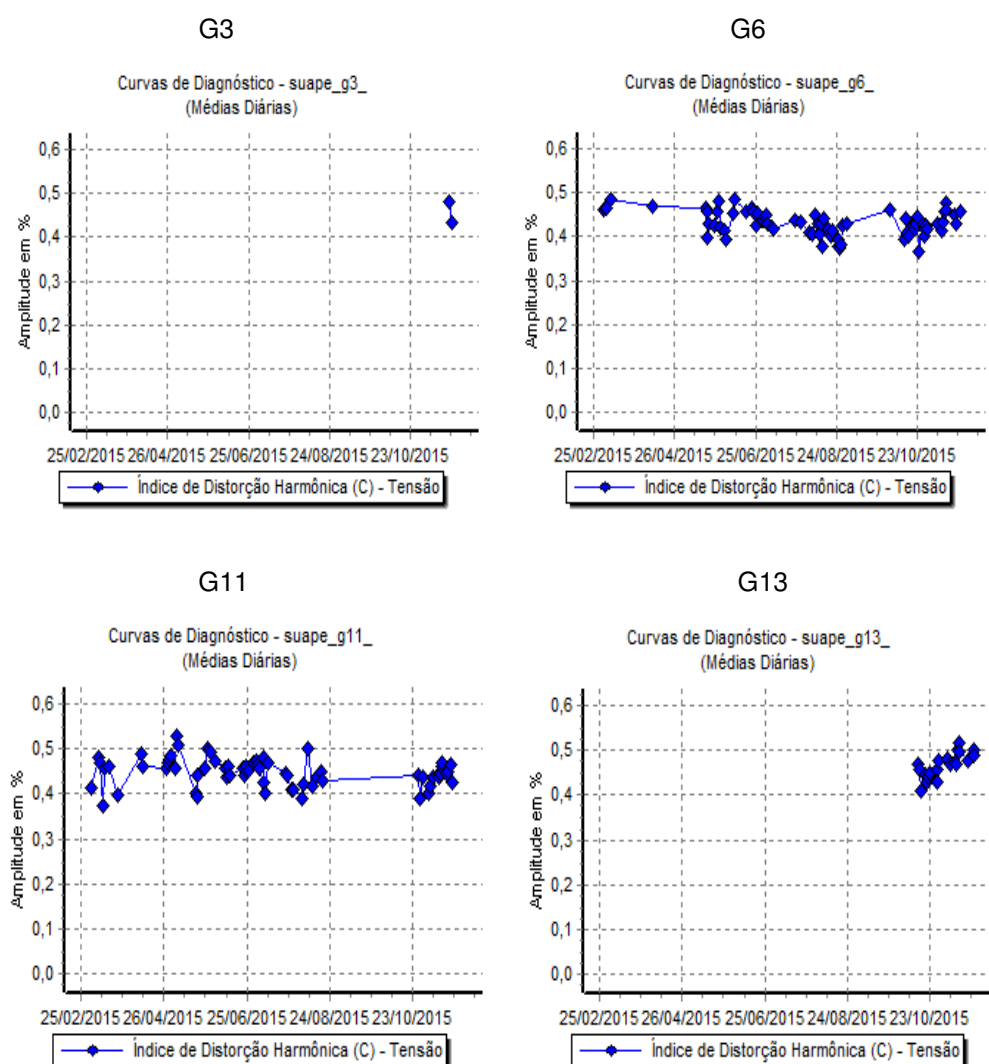




FONTE: (O autor, 2017)

E para fase C ele ficou em torno de 0,45% para todos os geradores, conforme apresentado na Figura 98.

Figura 98 - IDH de tensão da fase C para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

Pelo que se nota o IDH em todas as três fases ficou em patamares bem pequenos e inferior ao admissível, o que deixa claro uma pequena alteração do sinal de tensão produzido em relação aquele típico da fundamental, ou de frequência de 60 Hz.

4.2.3 Padrões de Falha Avaliados

Alguns padrões de falha observados no laboratório foram utilizados como parâmetro para sinalização das falhas típicas simuladas. Assim em cada sinal dos geradores, em termos espectrais, buscava-se localizar frequências características de cada falha com possíveis alterações de outros parâmetros.

A Tabela 3 apresenta a relação dos tipos de falha com seus respectivos padrões de falha.

Tabela 3 - Tipos de falha x padrões de falha

Tipo de Falha	Padrões de Falha
Desequilíbrio no Gerador Auxiliar da Excitatriz	• Aumento da sequência negativa da componente de frequência fundamental da tensão e da corrente • Aumento da amplitude da componente de desequilíbrio elétrico no EPVA nas assinaturas de tensão e corrente • Aumento da amplitude de terceiro harmônico nas assinaturas de tensão e corrente
Curto-circuito em Diodo do Retificador da Excitatriz	Aumento da amplitude dos harmônicos pares nas assinaturas de tensão e corrente
Desalinhamento Mecânico	Aumento da amplitude da componente de meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de tensão e corrente
Problema na Válvula de Admissão Problema nas Válvulas de Admissão e Escapamento Problema no Bico Injetor Desgaste do Anel do Pistão	• Queda da tensão RMS • Queda da corrente RMS • Queda da velocidade de rotação • Mudança na amplitude da frequência de rotação nas assinaturas de tensão e corrente

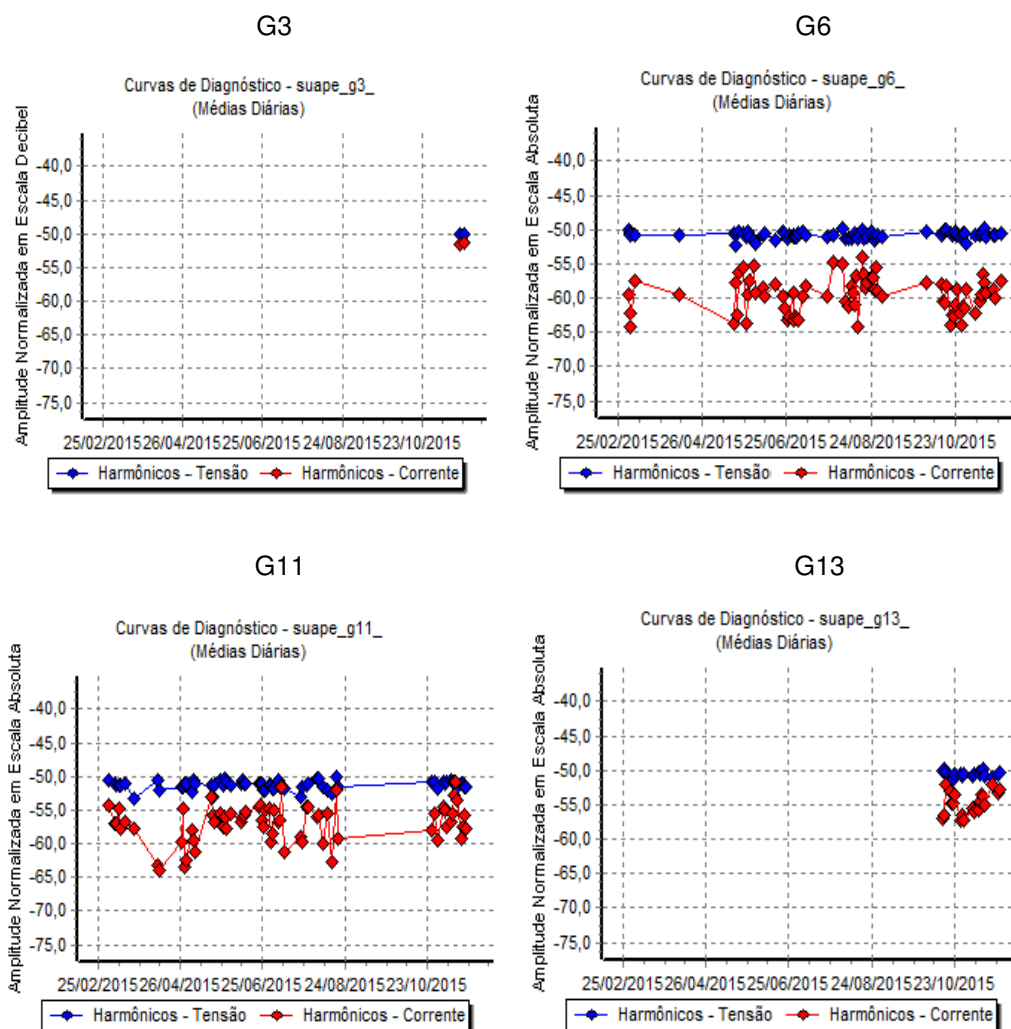
FONTE: (O autor, 2017)

4.2.3.1 Desequilíbrio no gerador auxiliar da excitatriz

O primeiro padrão verificado para esta falha foi a amplitude do terceiro harmônico. A Figura 99 apresenta as curvas de tendência de terceiro harmônico nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) nas unidades geradoras. Nota-se que as componentes da tensão estão em torno de -50 dB e as componentes da corrente estão entre -65 dB e -55 dB, para G6, G11 e G13, e em -50 dB para G3. Não há tendência de aumento nas componentes nem diferenças significativas entre os geradores. Apesar de o terceiro harmônico na corrente estar um pouco maior para G3, houve momentos nos outros geradores que eles atingiram tal valor.

Lembra-se ainda que tal unidade geradora ofereceu aquisição de dados em apenas dois dias, dada a sua condição de carga.

Figura 99 - Curva de tendência de terceiro harmônico nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica



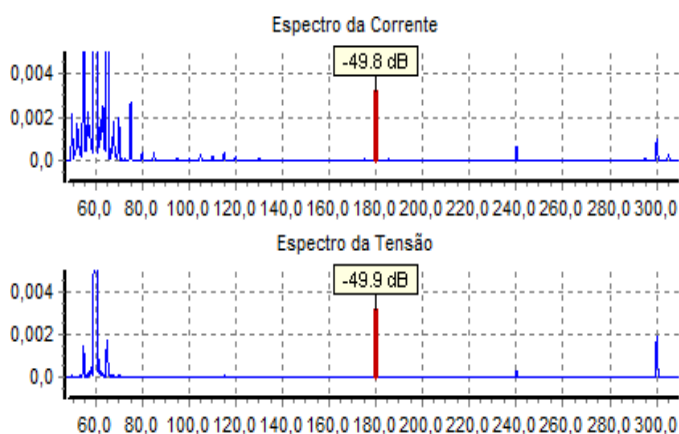
FONTE: (O autor, 2017)

Para fins de ilustração, a Figura 100 apresenta o padrão de terceiro harmônico nas assinaturas de corrente e tensão para as unidades geradoras. Nota-se as componentes destacadas nas assinaturas.

Figura 100 - Assinatura em frequência com terceiro harmônico para as unidades geradoras da usina termelétrica

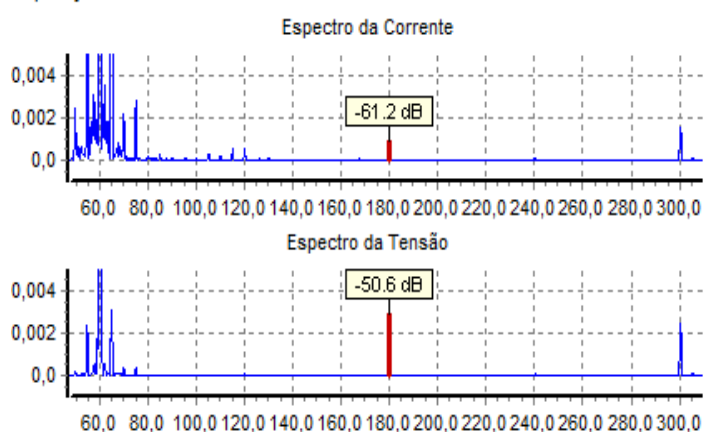
G3

Análise CSA eVSA
Aquisição: 11/11/15 15:09:15



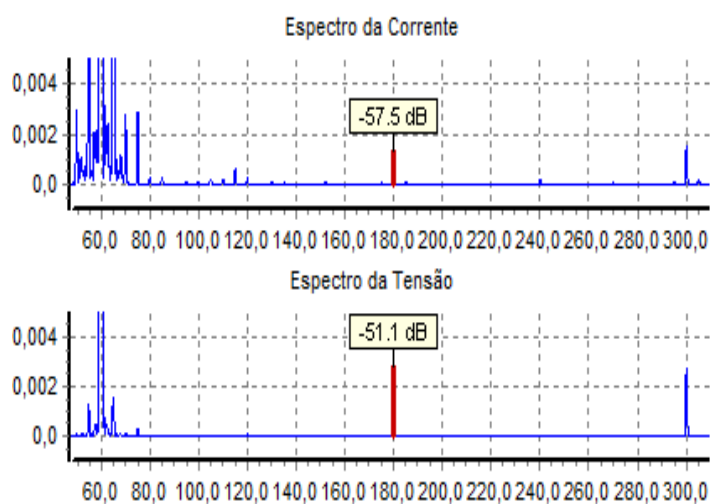
G6

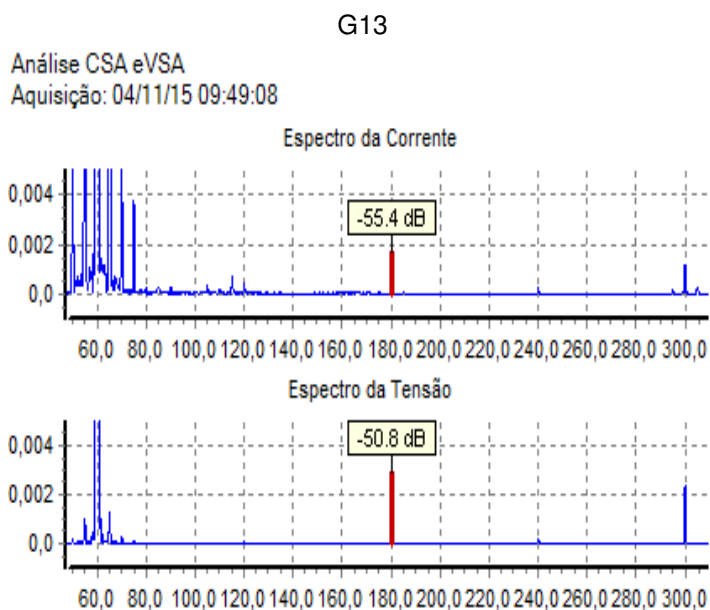
Análise CSA eVSA
Aquisição: 28/10/15 08:35:31



G11

Análise CSA eVSA
Aquisição: 26/10/15 14:59:26

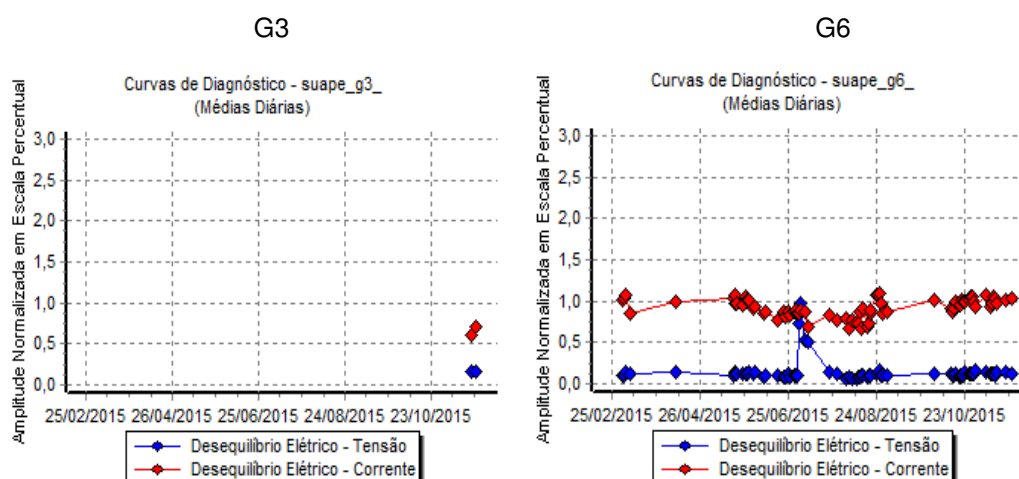


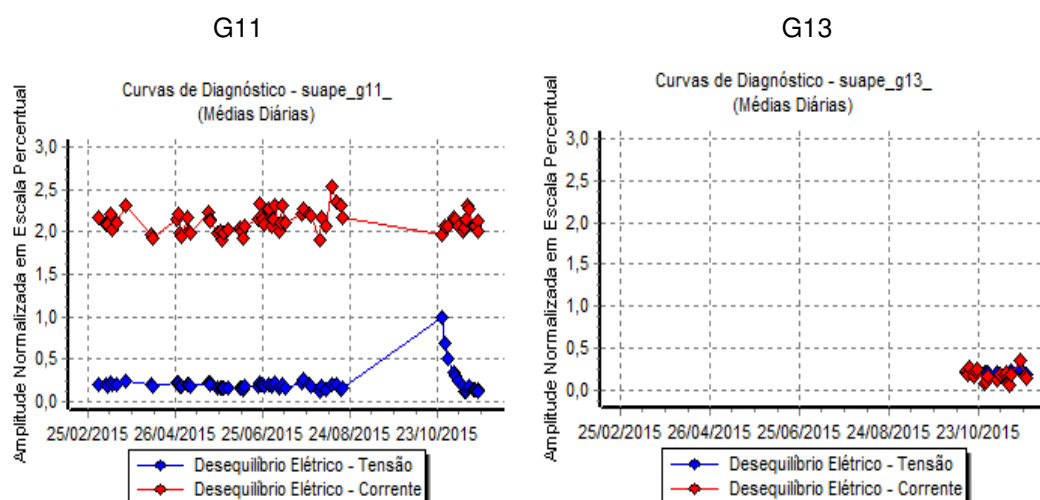


FONTE: (O autor, 2017)

O segundo padrão verificado para esta falha foi o da amplitude do desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA. A Figura 101 apresenta as curvas de tendência deste padrão de falha nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para as unidades geradoras. As componentes na tensão ficaram em torno de 0,15% para G3, 0,1% para G6, e 0,2% para G11 e G13. Na corrente, as componentes ficaram em torno de 0,65% para G3, 0,9% para G6, 2,1% para G11 e 0,2% para G13. Desta forma, em geral, as componentes de desequilíbrio elétrico, tanto na tensão quanto na corrente, ficaram maiores no gerador 11 do que para os outros geradores. Nota-se também que existe um pico de 1,0% no desequilíbrio elétrico na tensão em 03/07/2015, para o gerador 6, e em 26/10/2015, para o gerador 11.

Figura 101 - Curva de tendência de desequilíbrio elétrico nas assinaturas de EPVA de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica



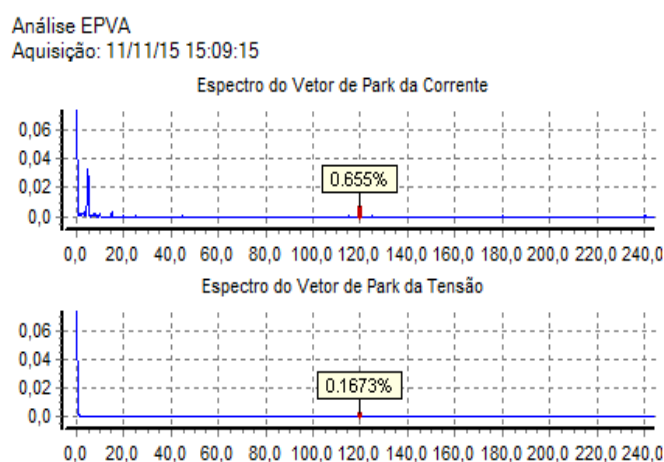


FONTE: (O autor, 2017)

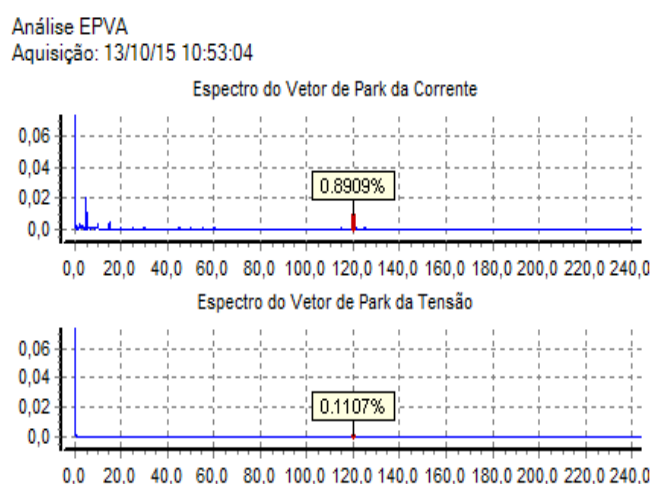
A Figura 102 apresenta o padrão do desequilíbrio elétrico nas assinaturas de EPVA de corrente e tensão. Nota-se as componentes destacadas nas assinaturas.

Figura 102 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com desequilíbrio elétrico no EPVA para as unidades geradoras da usina termelétrica

G3



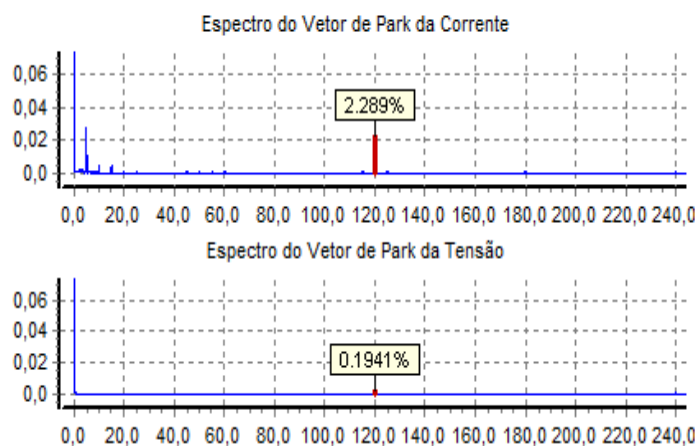
G6



G11

Análise EPVA

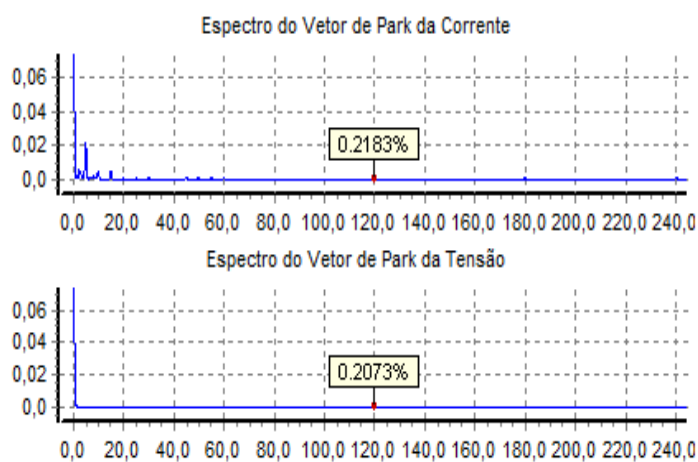
Aquisição: 14/08/15 08:26:02



G13

Análise EPVA

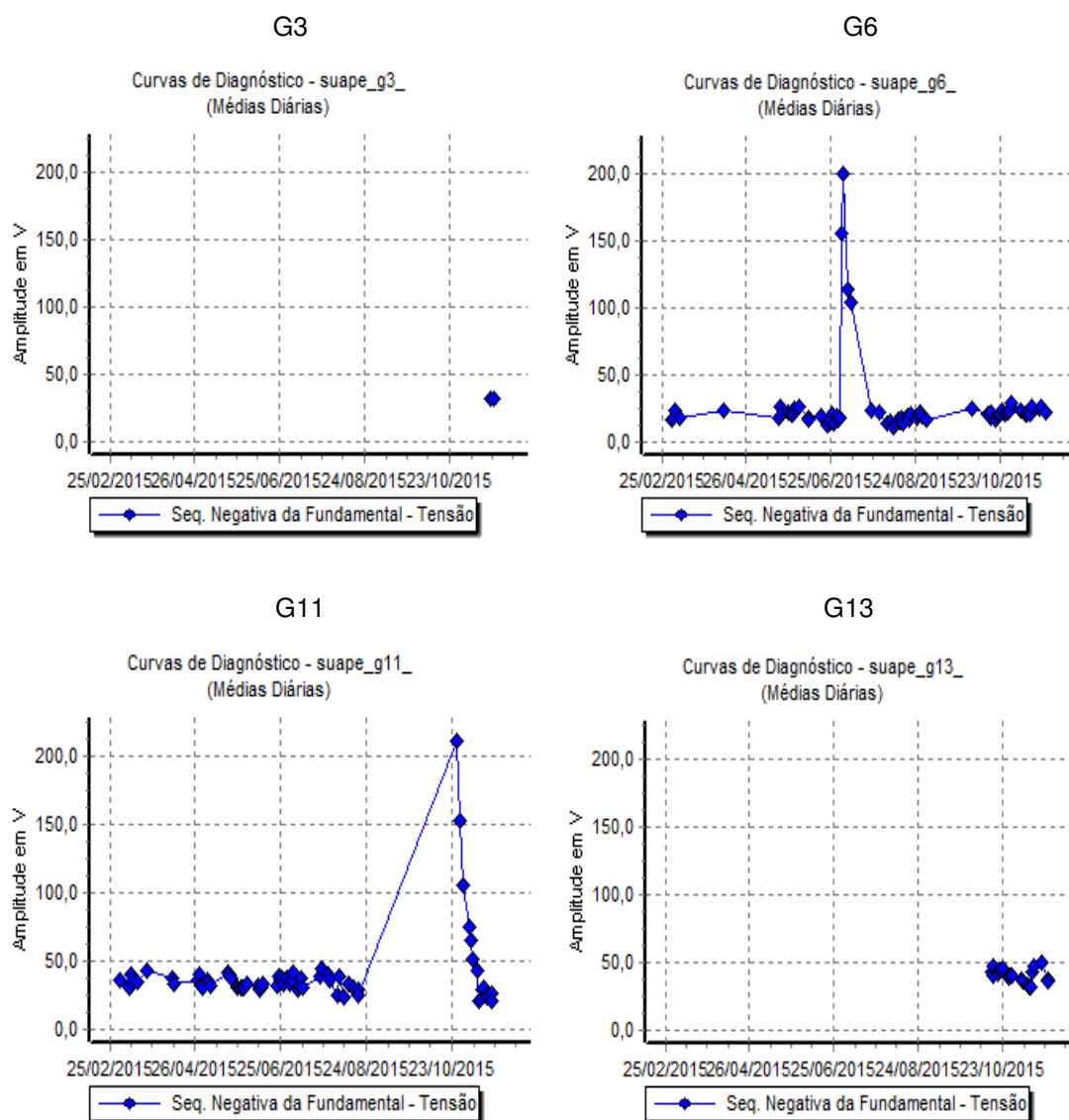
Aquisição: 19/10/15 15:11:09



FONTE: (O autor, 2017)

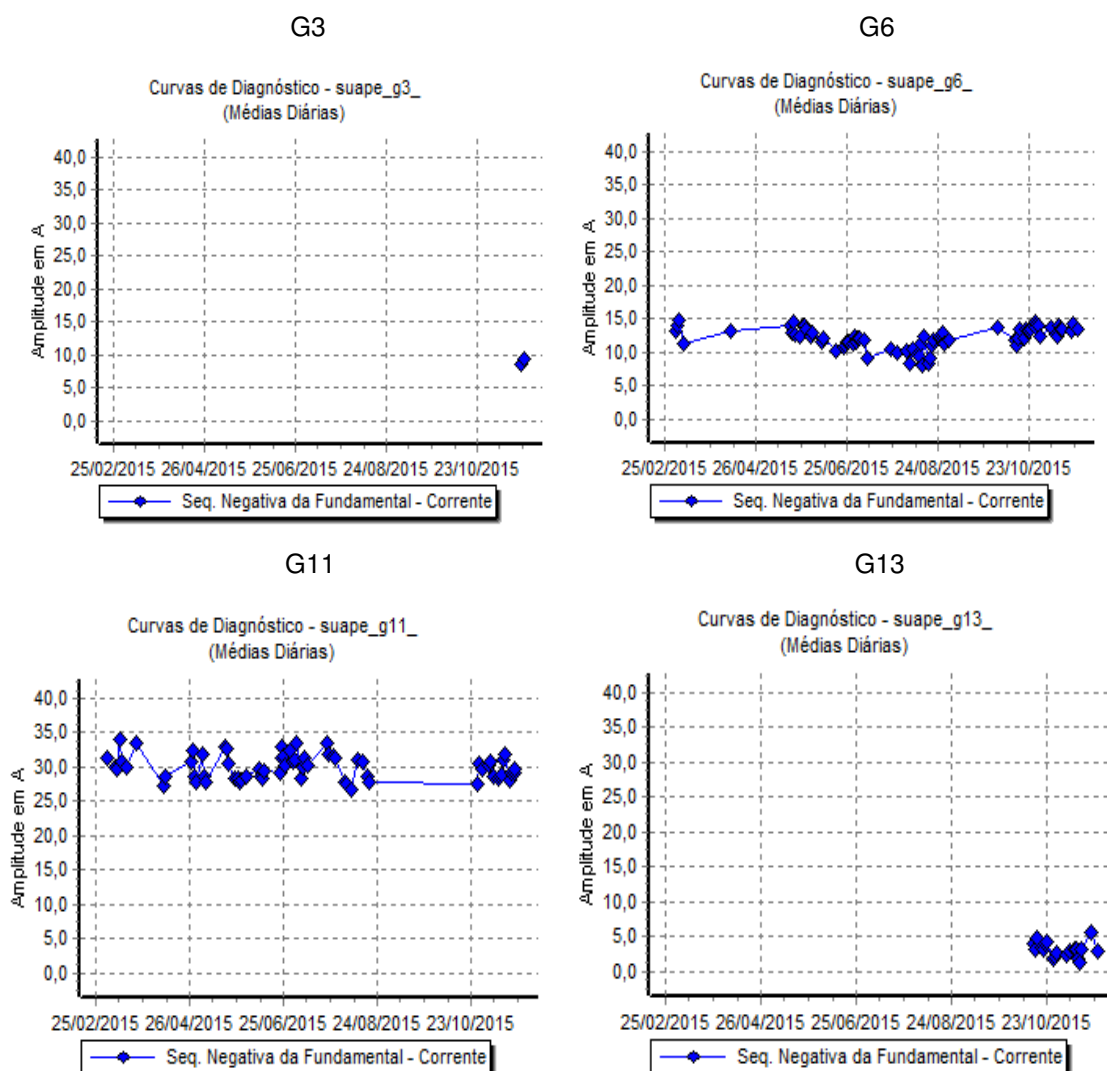
O último padrão verificado para esta falha foi o de sequência negativa na componente fundamental da tensão e da corrente. As Figuras 103 e 104 apresentam as curvas de tendência da sequência negativa da componente fundamental da tensão e da corrente, respectivamente, para as unidades geradoras. Para a tensão, estas ficaram em torno de 30 V para G3, 20 V para G6, 35 V para G11 e 40 V para G13, sendo que há um pico de 200 V para G6 e um de 210 V para G11. Na corrente, as componentes ficaram em torno de 9 A para G3, 12 A para G6, 30 A para G11 e 4 A para G13. Desta forma, as componentes deste padrão ficaram maiores em G11 do que nas outras unidades geradoras.

Figura 103 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de tensão para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

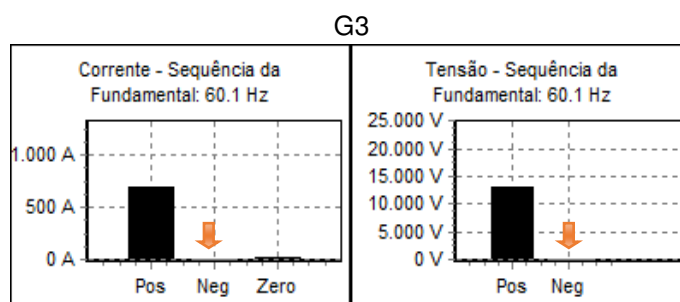
Figura 104 - Curva de tendência de sequência negativa da componente fundamental de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica



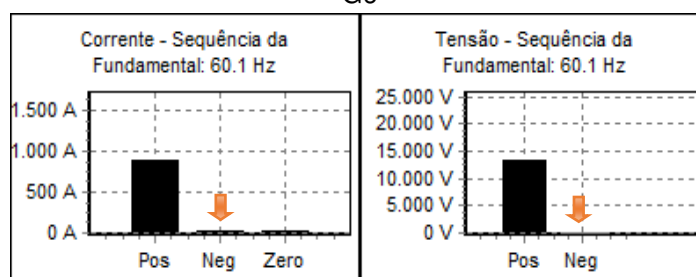
FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 105 apresenta o padrão da sequência negativa na componente fundamental da tensão e da corrente das unidades geradoras.

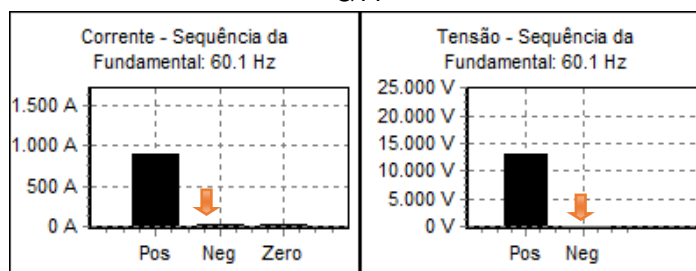
Figura 105 - Padrão de sequência negativa na componente fundamental para as unidades geradoras da usina termelétrica



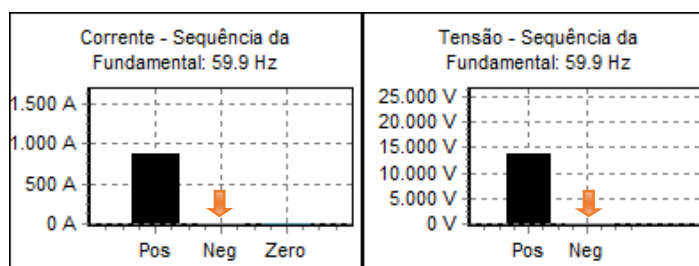
G6



G11



G13



FONTE: (O autor, 2017)

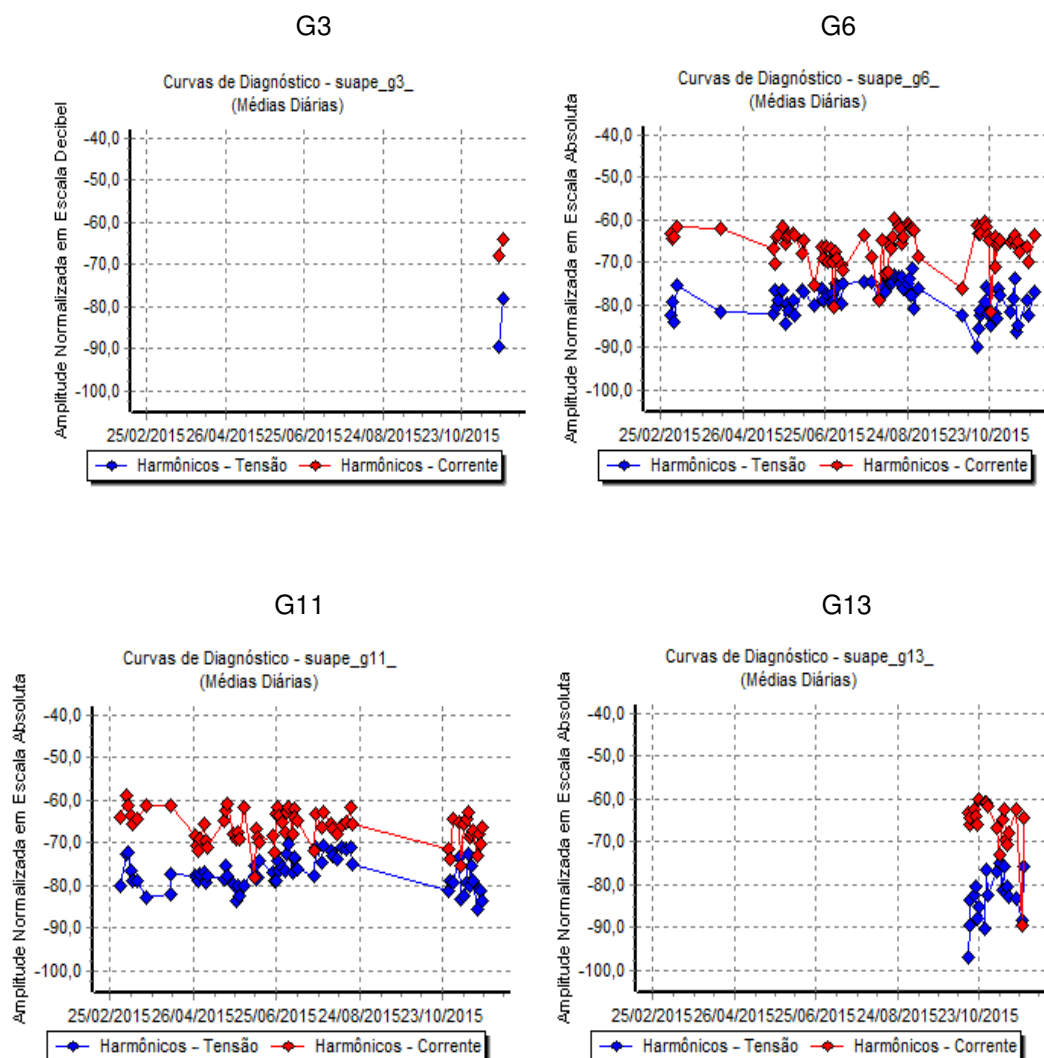
Para esta falha, notou-se que os padrões de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA e sequência negativa da componente fundamental apresentaram amplitudes maiores para a unidade 11. Este fato pode ser um indicativo de falha incipiente de desequilíbrio elétrico estático ou desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz, de forma que as componentes devem ser monitoradas continuamente. Deve-se também correlacionar com o histórico de dados das unidades geradoras no período para se chegar a um possível diagnóstico.

4.2.3.2 Curto-circuito no diodo do retificador da excitatriz

O padrão verificado para esta falha foi a amplitude dos harmônicos pares nas assinaturas de tensão e de corrente. A Figura 106 apresenta as curvas de tendência de segundo harmônico nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para as unidades geradoras. As componentes apresentam variações ao longo do período, mas não há diferenças significativas entre as unidades, nem há

tendência de aumento. As componentes na tensão ficaram entre -85 dB a -70 dB. As componentes na corrente ficaram entre -75 dB e -60 dB.

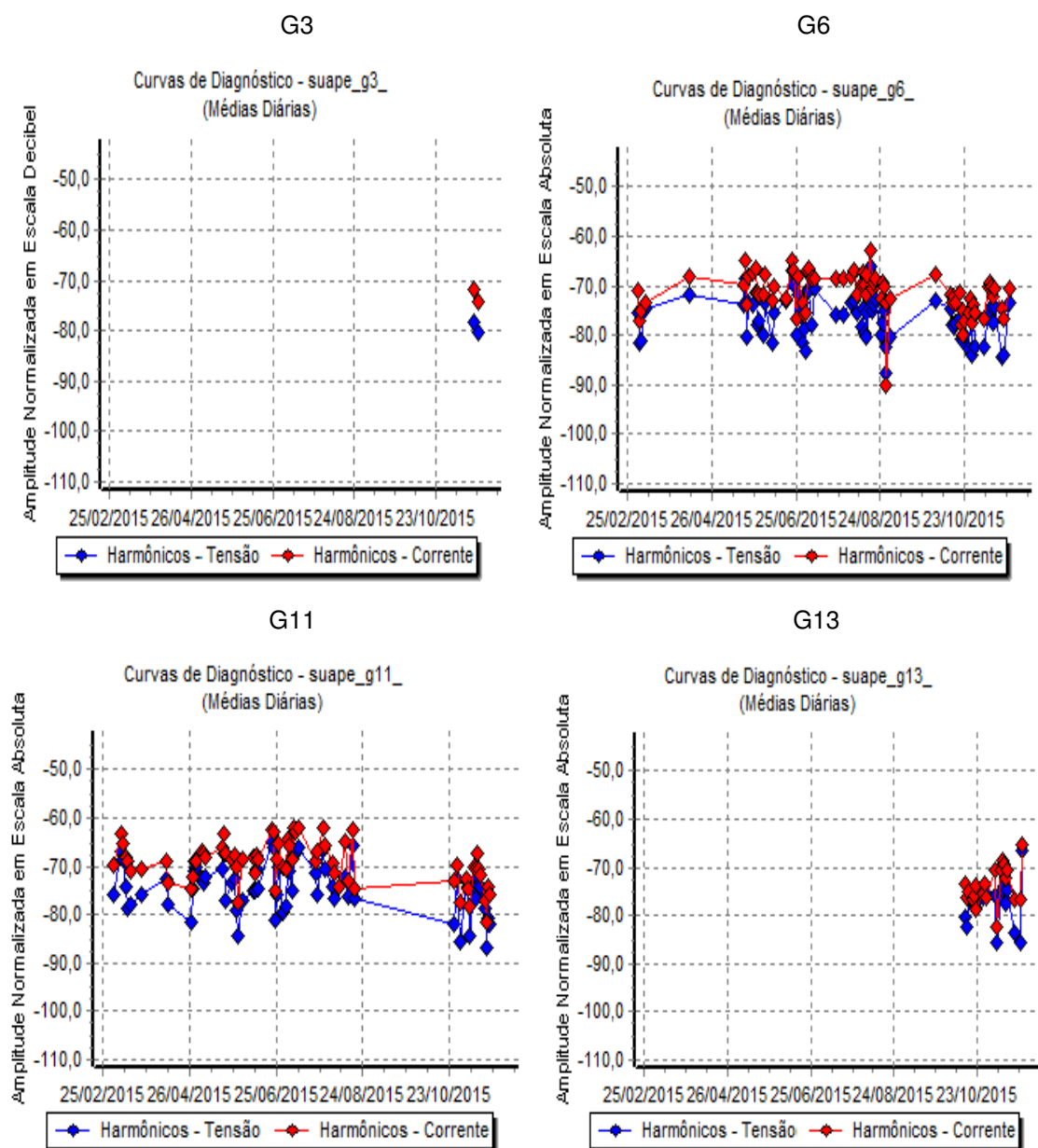
Figura 106 - Curva de tendência de segundo harmônico nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

A Figura 107 apresenta as curvas de tendência de quarto harmônico nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para as unidades geradoras. Pelas figuras, nota-se que também não há diferenças significativas nas componentes de quarto harmônico entre as unidades geradoras, nem há tendência de aumento, mesmo havendo algumas variações ao longo do período. As componentes na tensão ficaram entre -80 dB a -70 dB. As componentes na corrente ficaram entre -75 dB e -65 dB.

Figura 107 - Curva de tendência de quarto harmônico nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

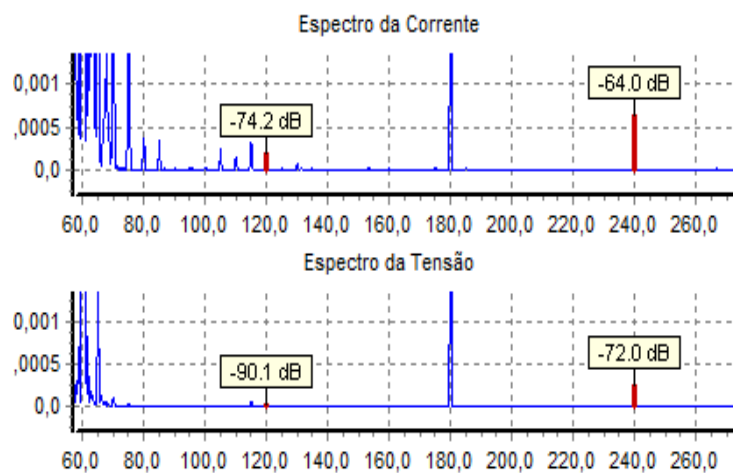
A Figura 108 apresenta o padrão dos harmônicos pares nas assinaturas de corrente e tensão. Nota-se as componentes destacadas nas assinaturas.

Figura 108 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com harmônicos pares para as unidades geradoras da usina termelétrica

G3

Análise CSA eVSA

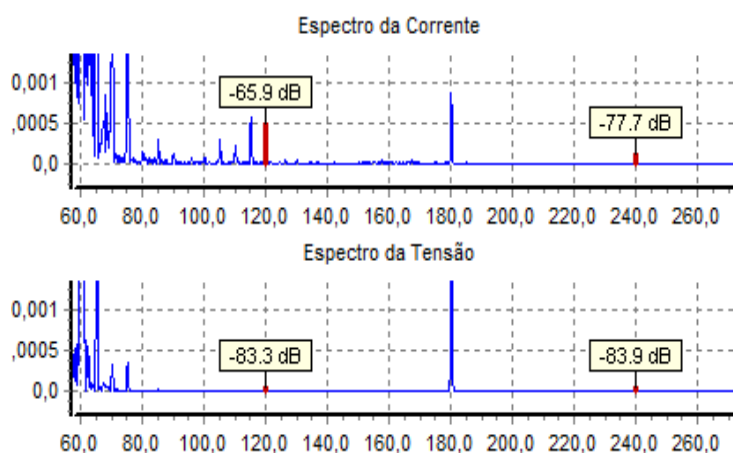
Aquisição: 11/11/15 15:09:15



G6

Análise CSA eVSA

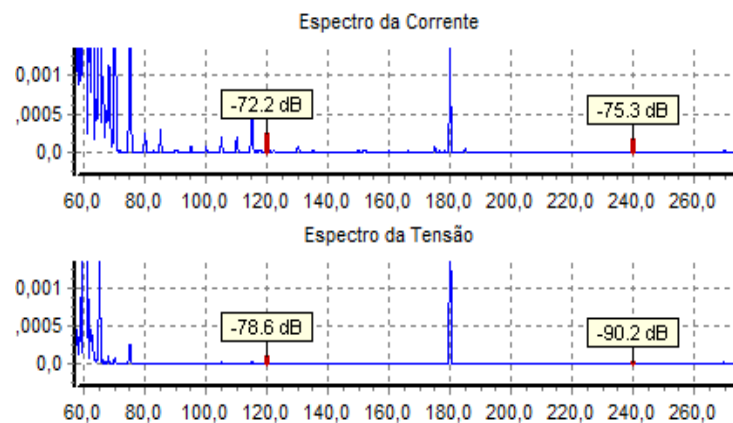
Aquisição: 28/10/15 08:35:31



G11

Análise CSA eVSA

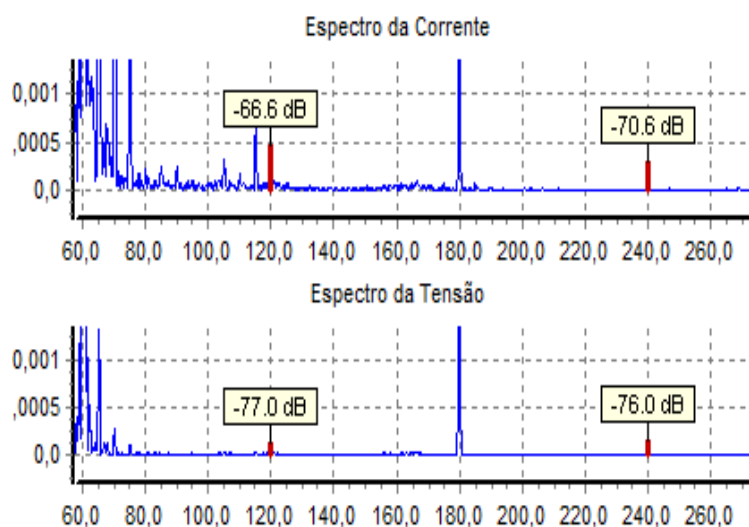
Aquisição: 26/10/15 14:59:26



G13

Análise CSA eVSA

Aquisição: 04/11/15 09:49:08

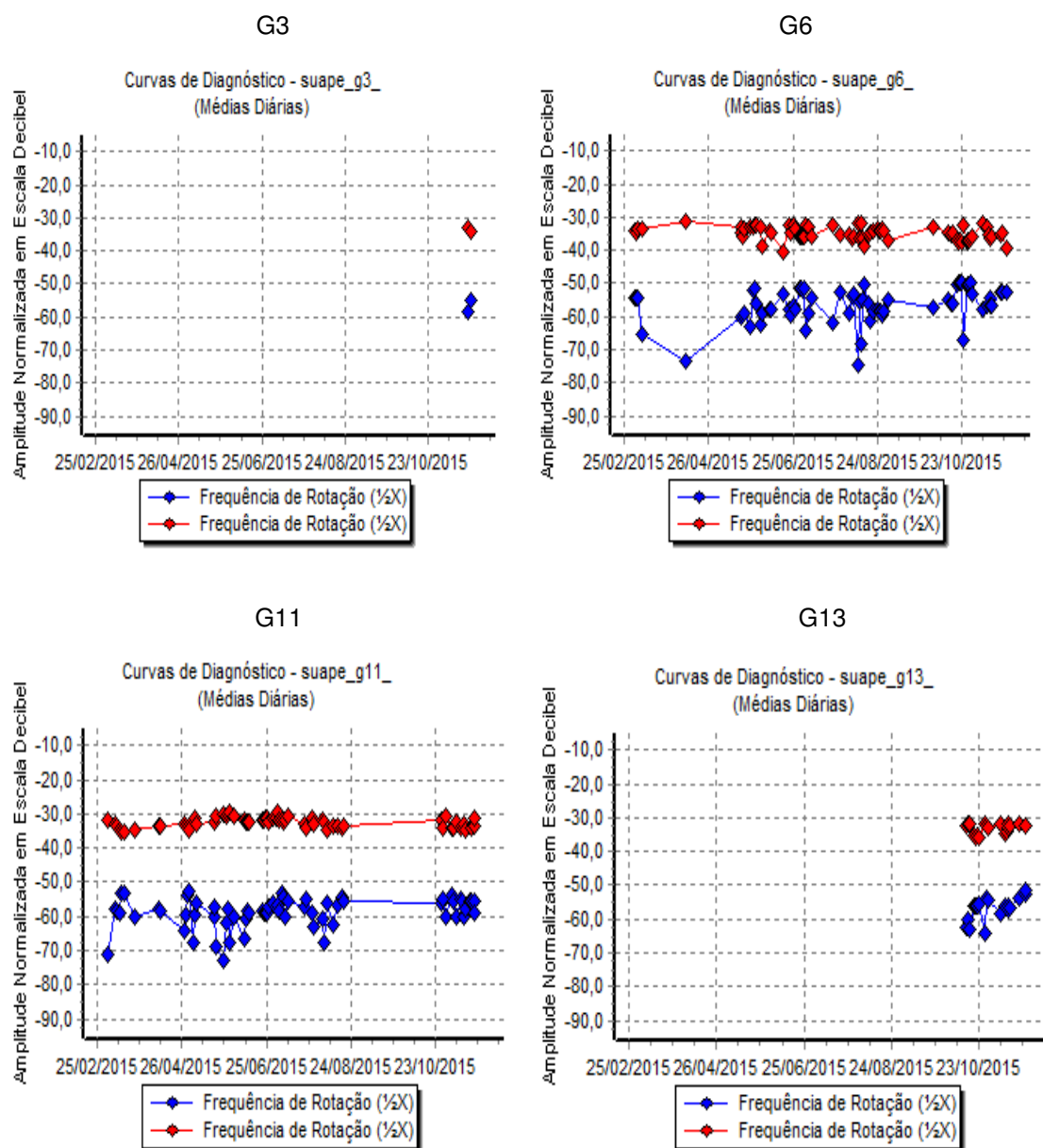


FONTE: (O autor, 2017)

4.2.3.3 Desalinhamento mecânico no conjunto motor-gerador

O padrão verificado para esta falha foi o da amplitude de meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente. A Figura 109 apresenta as curvas de tendência de meia vez a frequência de rotação, considerando-se a primeira banda lateral direita, nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) das unidades geradoras. Pelas figuras, nota-se que não há tendência de aumento destas componentes e não há diferenças significativas entre as componentes das unidades geradoras. As componentes ficaram entre -65 dB e -50 dB na tensão e entre -40 dB e -30 dB na corrente.

Figura 109 - Curva de tendência de meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

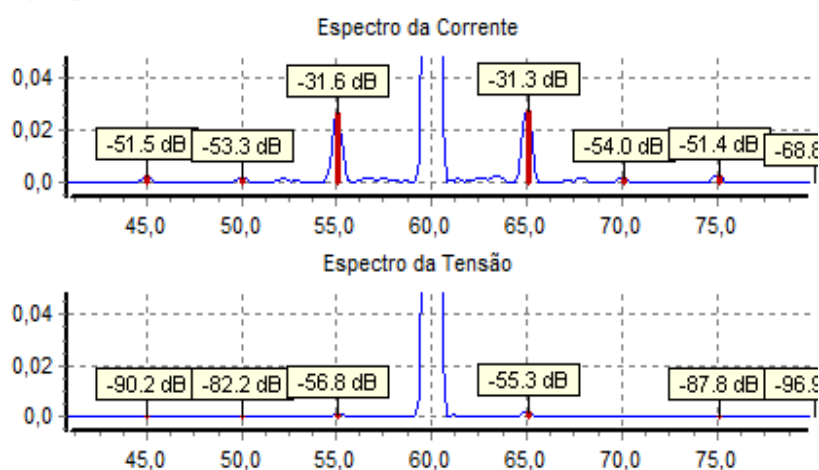
A Figura 110 ilustra as componentes de meia vez a frequência de rotação nas assinaturas de corrente e tensão. Nota-se as componentes bem destacadas nos espectros.

Figura 110 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com meia vez a frequência de rotação para as unidades geradoras da usina termelétrica

G3

Análise CSA eVSA

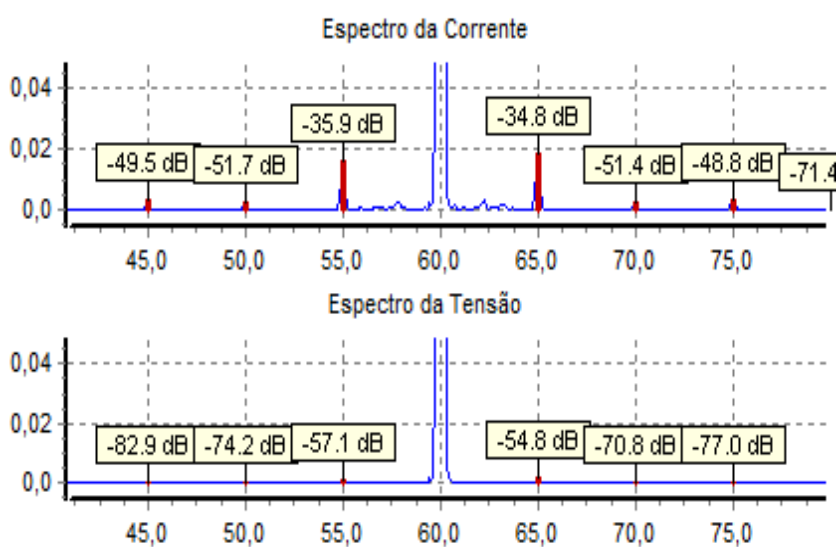
Aquisição: 11/11/15 15:09:15



G6

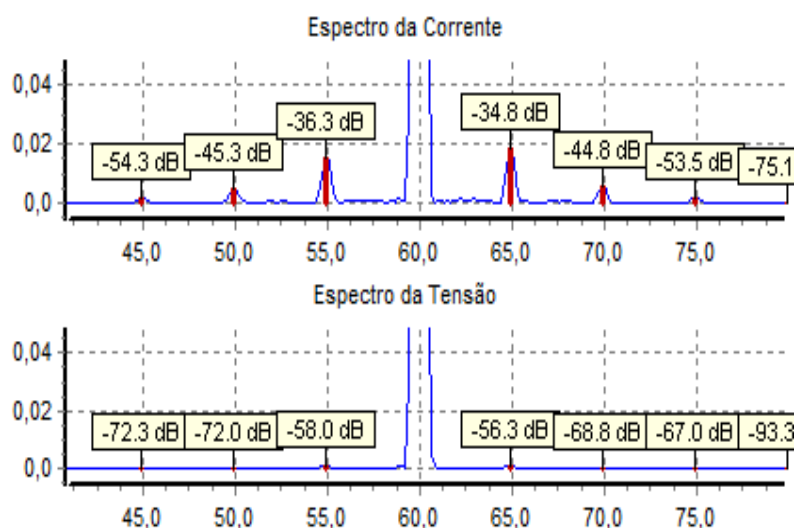
Análise CSA eVSA

Aquisição: 13/10/15 10:53:04



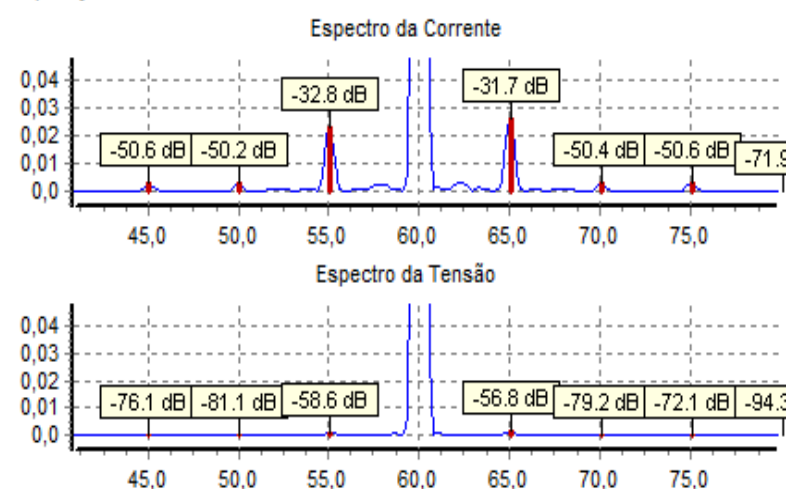
G11

Análise CSA eVSA
Aquisição: 09/11/15 09:55:59



G13

Análise CSA eVSA
Aquisição: 26/10/15 09:56:53

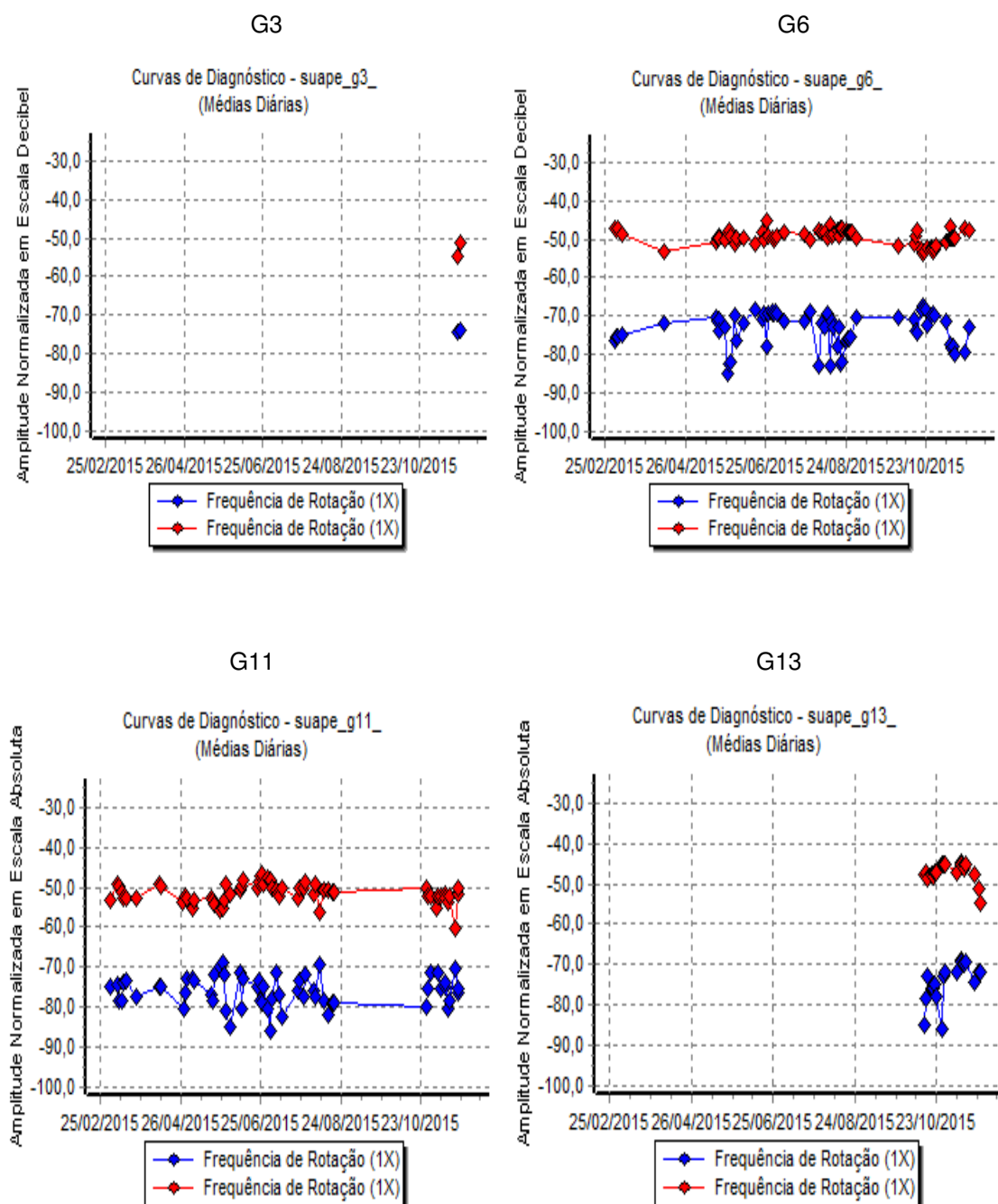


FONTE: (O autor, 2017)

4.2.3.4 Falhas mecânicas no motor

O padrão verificado para esta falha foi o da amplitude de frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente. A Figura 111 apresenta as curvas de tendência de frequência de rotação nas assinaturas de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para as unidades geradoras. As componentes ficaram entre -80 dB e -70 dB para a tensão e entre -55 dB e -45 dB para a corrente. Não há tendência de crescimento nas componentes nem diferenças significativas entre os geradores.

Figura 111 - Curva de tendência de frequência de rotação nas assinaturas de tensão e de corrente para as unidades geradoras da usina termelétrica



FONTE: (O autor, 2017)

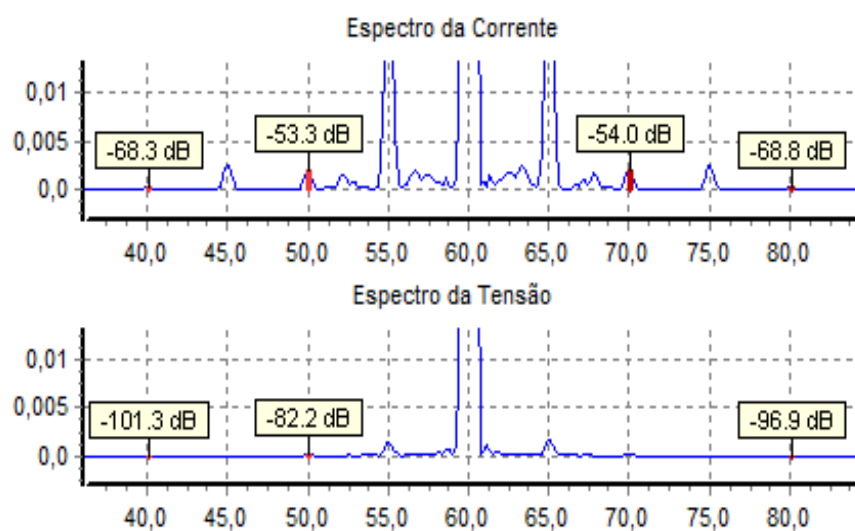
A Figura 112 ilustra componentes de frequência de rotação nas assinaturas de corrente e tensão. Nota-se as componentes destacadas nas figuras.

Figura 112 - Assinatura em frequência de corrente e tensão com frequência de rotação para as unidades geradoras da usina termelétrica

G3

Análise CSA eVSA

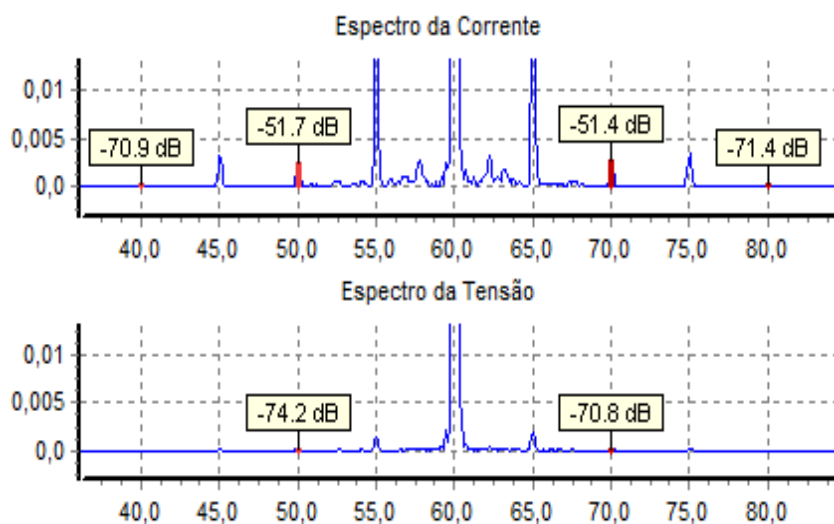
Aquisição: 11/11/15 15:09:15



G6

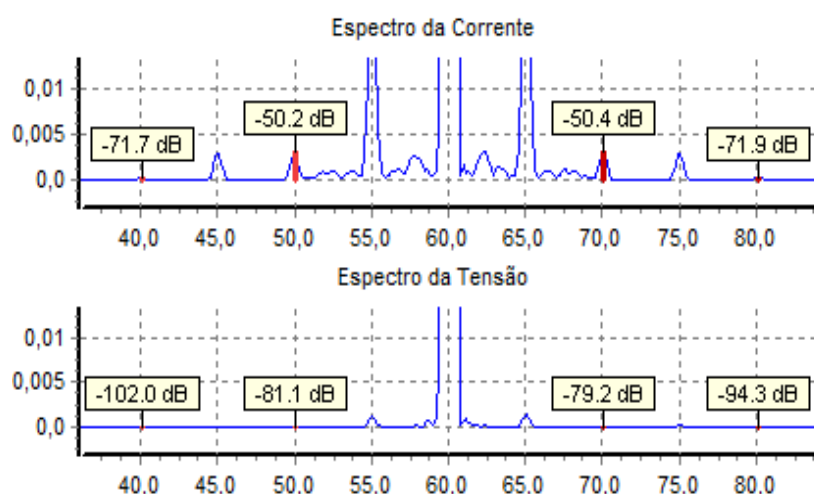
Análise CSA eVSA

Aquisição: 13/10/15 10:53:04



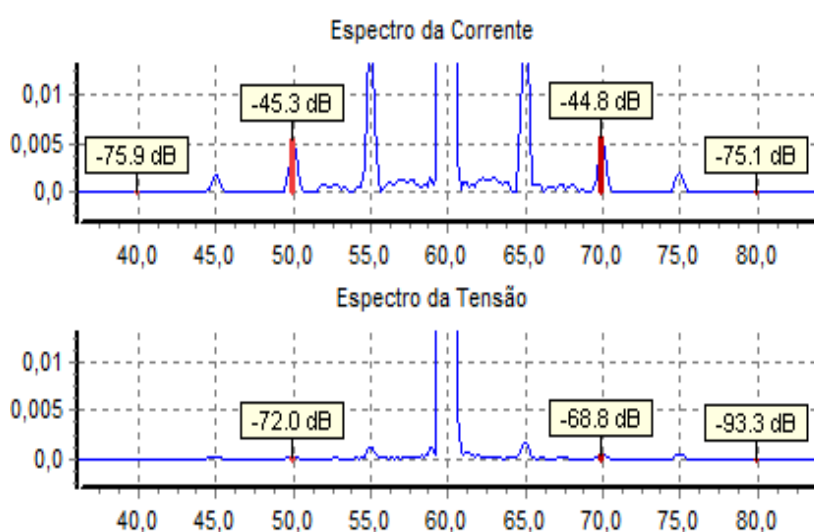
G11

Análise CSA eVSA
Aquisição: 26/10/15 09:56:53



G13

Análise CSA eVSA
Aquisição: 09/11/15 09:55:59



FONTE: (O autor, 2017)

Por apresentarem o mesmo padrão de falha considerou-se como falhas mecânicas no motor aquelas observadas na válvula de admissão, nas válvulas de admissão e escape, na válvula de injeção e no anel do pistão.

4.2.4 Análise das Unidades Geradoras

Como etapa final foi realizada uma comparação entre as tendências dos padrões de falha obtidas para as quatro unidades geradoras monitoradas. Com base nos resultados apresentados no item anterior confeccionou-se um resumo dos parâmetros de interesse observados.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos valores médios das curvas de tendência dos padrões de falha para fins de comparação.

Tabela 4 - Valores médios das curvas de tendência dos padrões de falha para as unidades geradoras da usina termelétrica

Falha		Desequilíbrio na Máquina Auxiliar da Excitatriz			Falha no Retificador da Excitatriz		Desalinhamento Mecânico	Falhas Mecânicas no Motor
Padrão de Falha		Terceiro Harmônico	Desequilíbrio Elétrico no EPVA	Sequência Negativa da Fundamental	Harmônicos Pares (Segundo Harmônico)	Harmônicos Pares (Quarto Harmônico)	Meia Vez a Frequência de Rotação	Frequência de Rotação
G3	Tensão	-50 dB	0,15%	30 V	-90 a -80 dB	-80 dB	-60 dB	-75 dB
	Corrente	-50 dB	0,65%	9 A	-70 a -60 dB	-70 dB	-30 dB	-50 dB
G6	Tensão	-50 dB	0,1%	20 V	-85 a -70 dB	-80 a -70 dB	-70 a -50 dB	-80 a -70 dB
	Corrente	-65 a -55 dB	0,9%	12 A	-80 a -60 dB	-80 a -65 dB	-40 a -30 dB	-50 dB
G11	Tensão	-50 dB	0,2%	35 V	-85 a -70 dB	-80 a -65 dB	-70 a -50 dB	-80 a -70 dB
	Corrente	-65 a -55 dB	2,1%	30 A	-70 a -60 dB	-80 a -60 dB	-35 a -30 dB	-55 a -45 dB
G13	Tensão	-50 dB	0,2%	40 V	-90 a -75 dB	-85 a -70 dB	-60 a -50 dB	-80 a -70 dB
	Corrente	-60 a -55 dB	0,2%	4 A	-70 a -60 dB	-80 a -70 dB	-35 a -30 dB	-50 a -45 dB

FONTE: (O autor, 2017)

Em geral, pode-se afirmar que não houve modificações significativas entre os grupos motor-gerador. Desta forma, estes devem estar em condições semelhantes em termos de “saúde” do equipamento para os padrões de falhas analisados.

Os valores mais discrepantes, destacados em verde na Tabela 4, foram os padrões de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA e de sequência negativa da frequência fundamental para o gerador 11 (tensão e corrente) e para o gerador 13 (tensão). Estes padrões são indicativos de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz ou desequilíbrio estatórico. Em geral, tal circunstância ficou mais evidente no gerador 11. Isto não implica necessariamente na ocorrência da falha, contudo recomenda-se o acompanhamento contínuo destes padrões para se chegar a um possível diagnóstico.

4.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Os padrões de falha identificados nas assinaturas elétricas do motor do tipo monocilíndrico, na ocasião dos ensaios experimentais no laboratório de modelo reduzido, também foram identificados em todos os motores multicilíndricos analisados da usina termelétrica, os quais estão em operação real. Isto valida a aplicação da metodologia como forma de avaliação de motores de combustão interna e ainda contribui com a geração de um conjunto de sinais inéditos para este último tipo de motor. Tais sinais servirão de base para novas pesquisa em ESA nesta máquina.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de falhas em motores de combustão interna utilizados em plantas de geração de energia elétrica. Isto foi possível a partir da utilização da técnica ESA considerando o gerador acoplado como elemento transdutor.

A partir de ensaios e experimentos realizados num laboratório de modelo reduzido onde se tinha instalado um motor a diesel do tipo monocilíndrico operando como máquina primária de um gerador síncrono foi possível comprovar a hipótese motivadora da pesquisa, a qual se baseava no fato de distúrbios presentes em motores de combustão interna que resultam na alteração de seu torque modificam a assinatura elétrica de tensão e de corrente do gerador acoplado.

Isto se deu em função do caráter de excitação periódica que apresenta o torque do motor, sendo este composto por pulsos de outros torques de menor amplitude com frequências diferentes. Como no ciclo de mecânico de operação do motor há diversas irregularidades que resultam na alteração de torque é conveniente atribuir um perfil aditivo a esta grandeza, onde variações do estado do motor, inclusive o de falha, significam a geração de um torque característico.

Levando em conta que o torque entre o motor e o gerador eram iguais, devido ao funcionamento acoplado entre tais máquinas, os sinais de tensão e de corrente fornecidos pelo gerador representaram fielmente a operação do motor. Daí, através de um processamento via transformada rápida de Fourier (FFT), foi realizada uma interpretação destes sinais, em forma de espectro, buscando divergência em suas características com outros oferecidos pelas máquinas na condição de normalidade, isto é, isenta de falha.

O resultado direto desta metodologia foi a análise do grupo motor-gerador a partir dos seus sinais de tensão e de corrente nas condições de normalidade, ou baseline, e de anormalidade, ou falha com diferentes condições de carga e níveis de severidade. Isto foi realizado para um grupo de falhas selecionado, onde cada falha teve um procedimento específico de simulação e padrões de falha característicos observados. Estes padrões apresentaram componentes com amplitudes e frequências distintas daquelas do motor em condição de normalidade.

O grupo de falha selecionado foi composto por falhas presentes no gerador e no motor. No gerador estas foram por problemas na excitatriz, ora por curto-circuito no diodo do retificador ora por desequilíbrio no gerador auxiliar. No motor as falhas

foram por desalinhamento mecânico do conjunto motor-gerador, nas válvula de admissão, nas válvulas de admissão e de escape, na válvula de injeção e no anel do pistão.

No caso da falha por desequilíbrio no gerador auxiliar da excitatriz os padrões de falha observados foram o de aumento na componente de terceiro harmônico, dada por $3 \cdot f_1$, tanto nas assinaturas de tensão quanto nas de corrente; o de aumento da componente de desequilíbrio no EPVA, dada por $2 \cdot f_1$, tanto nas assinaturas de tensão quanto nas de corrente; e o de aumento da componente de sequência negativa na frequência fundamental, obtida através do cálculo das componentes simétricas, tanto nas assinaturas de tensão quanto nas de corrente.

Para a falha de curto-circuito no diodo do retificador da excitatriz o padrão de falha foi o de aumento na componente dos harmônicos de ordem par, dada por $2 \cdot (1 + k) \cdot f_1$, tanto nas assinaturas de tensão quanto nas de corrente. Os harmônicos de segunda e quarta ordem foram os que mais evidenciaram isto, na medida em que o nível de severidade de falha se elevou.

Na falha de desalinhamento mecânico do conjunto motor-gerador o padrão de falha foi o de aumento de meia vez a frequência de rotação, dada por $f_1 \pm k \cdot f_r / 2$, com primeira banda lateral direita em $75 (Hz)$ e primeira banda lateral esquerda em $45 (Hz)$, tanto nas assinaturas de tensão quanto nas de corrente.

Já nas falhas tipicamente mecânicas, que são aquelas observadas na válvula de admissão, nas válvulas de admissão e de escape, na válvula de injeção e no anel do pistão, o padrão de falha foi o de aumento da frequência de rotação, dada por $f_1 \pm k \cdot f_r$, com primeira banda lateral direita em $90 (Hz)$ e primeira banda lateral esquerda em $30 (Hz)$, tanto nas assinaturas de tensão quanto nas de corrente. Neste caso a variação da condição de baseline para a condição de falha nas amplitudes das componentes se apresentou diferente entre as quatro falhas.

Na falha na válvula de admissão a componente da frequência de rotação foi aumentada significativamente com a elevação do nível de severidade. Já na falha nas válvulas de admissão e de escape a componente da frequência de rotação foi aumentada de forma sutil com a elevação do nível de severidade. Para falha na válvula de injeção a componente da frequência de rotação foi diminuída com a elevação do nível de severidade. E na falha no anel do pistão a componente da

frequência de rotação também foi aumentada de forma acentuada com a elevação do nível de severidade.

Ainda foi possível realizar aquisições de sinais em grupos motor-gerador de uma usina termelétrica com o intuito de buscar os padrões de falha observados nos ensaios experimentais do laboratório de modelo reduzido e avaliar o comportamento do espectro elétrico fornecido por um motor do tipo multicilíndrico. O resultado disto foi a identificação de todos padrões de falha nas assinaturas de tensão e de corrente nos quatro grupos motor-gerador e a geração de um conjunto de sinais inéditos para este tipo de motor.

Em geral, pode-se afirmar que não houve modificações significativas entre os grupos motor-gerador nem ao longo do tempo. Desta forma, estes devem estar em condições semelhantes de operação e sanidade para os padrões de falhas analisados. Contudo foi observado valores mais discrepantes, nos padrões de desequilíbrio elétrico na assinatura de EPVA e de sequência negativa da frequência fundamental para o gerador 11 (tensão e corrente) e para o gerador 13 (tensão). Estes padrões são indicativos de desequilíbrio na máquina auxiliar da excitatriz ou desequilíbrio estatórico. Tal circunstância ficou mais evidente no gerador 11. Isto não implica necessariamente na ocorrência da falha, contudo recomenda-se o acompanhamento contínuo destes padrões para se chegar a um possível diagnóstico.

Por fim ficou evidente a potencialidade da metodologia como mais uma alternativa de caráter preditivo para uso em plantas de geração de energia elétrica que utilizem motores de combustão interna como máquina primária. Os resultados obtidos permitem aplicá-la noutros ambientes que envolvam o mesmo tipo de conjunto motor-gerador, o que torna o desenvolvimento de maior abrangência, em particular para o setor elétrico, e não apenas de aplicação local.

Assim a contribuição principal deste trabalho está na incorporação da metodologia na análise de equipamentos e instalações como técnica mais assertiva e de custo reduzido. Para tanto se faz necessário sua expansão em número maior de ambientes, e em situações variadas, de forma a construir padrões diversos de operação do conjunto motor-gerador.

6 TRABALHOS FUTUROS

A experiência obtida neste trabalho proporcionou a visualização de novas pesquisas, de caráter complementar e adicional, conforme sugestões nas temáticas abaixo:

- Aplicação da técnica ESA na identificação de padrões de falha em motores de combustão interna do tipo multicilíndrico;
- Aplicação da técnica ESA na identificação de cilindros em falha em motores de combustão interna a partir do seu ciclo mecânico de operação;
- Aplicação da técnica ESA para monitoramento da eficiência operacional de motores de combustão interna a partir da variação de pressão e da emissão do gás NOx;
- Aplicação da transformada de *Wavelet* no processamento dos sinais elétricos de forma a explorar as informações no domínio do tempo e não apenas no domínio da frequência, como foi feito por transformada de *Fourier*;
- Aplicação de lógica fuzzy e inteligência artificial no reconhecimento de padrões de sinais de forma a identificar o método mais assertivo de diagnóstico de motores de combustão interna.

REFERÊNCIAS

Livros:

- [1] BRUNETTI, F. **Motores de combustão Interna**. FEZ. 1992.
- [2] DEN HARTOG, J. P. **Vibrações nos sistemas mecânicos**. 27ª ed. 1972.
- [3] DOMSCHKE, A. G. **Cinemática e dinâmica do motor**. São Paulo. 2000.
- [4] HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill. 1988.
- [5] INMAN, D. J. **Engineering vibration**. 3ª ed. Prentice Hall, 2007.
- [6] MOHAN, N. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. LTC. 2015.
- [7] TAYLOR, C. F. **The internal combustion engine in theory and practice**. 2ª ed. Vol 1. 1977.
- [8] THOMSON, W. T. **Teoria da vibração com aplicações**. Rio de Janeiro. 1978.
- [9] UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7ª ed. Editora AMGH. 2014.

Teses e Dissertações:

- [10] BONALDI, E.L. **“Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados”**. 2005. Tese de Doutorado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.
- [11] DA SILVA, J.G.B. **“Modelagem e Tratamento dos Sinais da Assinatura Elétrica de Máquinas para Melhoria do Diagnóstico de Falhas”**. 2015. Tese de Doutorado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.
- [12] DUQUE, E.L. **“Efeito das Vibrações Torcionais do Volante de Motores na Determinação do Sistema de Embreagem Veicular”**. 2005. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [13] GRACIANO, V. **“Modelagem e Simulação de Motores a Ignição por Compressão (Ico) Movida a Misturas de Diesel, Gás Natural e Biodiesel”**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [14] HELLSTROM, M. **“Engine Speed Based Estimation of the Indicated Engine Torque”**. 2005. Master’s thesis. Linkopings Universitet, Linkoping.
- [15] JONES, F. **“Diesel Combustion Modeling and Simulation for Torque Estimation and Parameter”**. 2008. Master’s thesis. Linkopings Universitet, Linkoping.

- [16] MENDES, A.S. **“Desenvolvimento e Validação de Metodologia para Análise de Vibrações Torcionais em Motores de Combustão Interna”**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [17] SELIM, A.B. **“Influência das Forças de Inércia e do Balanceador de Massas na Dinâmica do Motor de Combustão Interna”**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [18] XAVIER, E.M.R.S. **“Ferramentas Virtuais Dinâmicas para Processo de Calibração de um Sistema Controle Motor”**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Artigos e Periódicos:

- [19] ALBIZU, I.; ZAMORA, I.; MAZON, A.J. e TAPIA, A. **“Techniques for Online Diagnosis Ofstator Shorted Turns in Induction Motors”**. Electr. Power Compon. Syst. 34, 2006, p.97–114.
- [20] BEUSCHEL, M. e SCHRÖDER, D. **“Identification and Compensation of Combustional Torque Pulsation Using a Harmonic Activation Neural Network”**. Technische Universität München: Munique, 1999.
- [21] BONALDI, E.L.; DE 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, por Rui Araujo, ISBN 978-953-51-0843-6, InTech, Croácia, 2012, p.487-520.
- [22] BONALDI, E.L.; DE OLIVEIRA, L.E.L.; TORRES, G.L.; DA SILVA, J.G.B.; L.E.B.; DA SILVA, M.R. e VENCESLAU, A. **“Sistema para Diagnóstico Termomecânico de Falhas em Motores de Combustão Interna”**. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético CBPE, Florianópolis, 2014.
- [23] BOYSAL, A. e RAHNEJA. T. **“Torsional Vibration Analysis of a Multi-Body Single Cylinder Internal Combustion Engine Model”**. Appl. Math. Modeling. 1997, p.21:481-493.
- [24] BRUSA, E.; DELPRETE, C. e GENTA, G. **“Torsional Vibration of Crankshafts: Effect of Nonconstant Moments of Inertia”**. Journal of Sound and Vibration. 205(2), 1997, p.135-150.
- [25] CAPITANI, R.; DELOGU, M. e PILO, L. **“Analysis of the Influence of a Vehicle’s Driveline Dynamic Behaviour Regarding the Performance Perception at Low Frequencies”**. SAE, 2001-01-3333.

- [26] CARDOSO, A.J.M. e SARAIVA, E.S. **"Computer-aided Detection of Airgap Eccentricity in Operating Three-Phase Induction Motors by Park's Vector Approach"**. IEEE Transactions on Industry Applications, v 29, n 5, 1993, p.897-901.
- [27] CRUZ, S.M.A. e CARDOSO, A.J.M. **"Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vectorapproach"**. IEEE Trans. Ind. Appl. 37 (5), 2001, p.1227–1233.
- [28] DO NASCIMENTO, V.C.; LAMBERT-TORRES, G.; COSTA, C.I.A.; BORGES DA SILVA, L.E. **"Control Model for Distributed Generation and Network Automation for Microgrids Operation"**. Electr. Power Syst. Res. 127, 2015, p.151–159.
- [29] DUPRAZ, P; SENAME, O. e DUGARD, L. **"Engine Torque Estimation for di Diesel Engines"**. European Control Conference (ECC). Karlsruhe, 1999, p.2487-2492.
- [30] FRANCOA, J.; FRANCHEKB, M.A. e GRIGORIADIS, K. **"Real-Time Brake Torque Estimation for Internal Combustion Engines"**. Mechanical Systems and Signal Processing, 22, 2008, p.338–361.
- [31] FUJIYA, K.; TANAKA, H.; ASADA, T. e YAMAMOTO, T. **"Failure Diagnosis by Expert System at Start-up of Main Diesel Engine"**. Journal of the Marine Engineering Society. Japan, v 25, n 2, 1990.
- [32] HESTERMANN, D.C. e STONE, B.J. **"Secondary Inertia Effects in the Torsional Vibration of Reciprocating Engines"**. Proc. Inst. Mech. Eng. 208(CI), 1994, p.11-15.
- [33] JASTRZ, G.; LESZEK, B. e ANOWICZ, U. **"Experimental Method of Determining Characteristics of Power and Torque Engine for Low-Power Unmanned Aerial Vehicles"**. Journal of KONES Powertrain and Transport. v 18, n 3, 2011.
- [34] JOHNSTON, P.R. e SHUSTO, L.M. **"Analysis of Diesel Engine Crankshaft Torsional Vibrations"**. SAE Special Publications. 1987, p.21-26, ISSN: 0099-5908, ISBN: 0-89883-985-8.
- [35] LEITE, V.C.M.N.; DA SILVA, J.G.B.; VELOSO, G.F.C.; DA SILVA, L.E.B. e TORRES, G.L. **"Detection of Localized Bearing Faults in Induction Machinesby Spectral Kurtosis and Envelope Analysis of Stator Current"**. IEEE Trans. Ind.Electron. 62 (3), 2015, p.1855–1865.

- [36] MARAGONIS, I.E. **"The Torsional Vibrations of Marine Diesel Engines under Fault Operation of its Cylinders"**. Forschung im Ingenieurwesen — Engineering Research. v 58, 1992, p.13-25.
- [37] MULLER, P.C. e SCHIEHLEN, W.O. **"Linear vibrations"**. Martinus Nijhoff Publishers. 1985, ISBN90-247-2983-1.
- [38] NETI, P. e NANDI, S. **"Stator Inter-turn Fault Detection of Synchronous Machines Using Field Current Signature Analysis"**. IEEE Transactions on Industry Applications, v 45. n 3, 2009.
- [39] OGIDI, O.O.; BARENDSE, P.S.; KHAN, M.A. **"Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Axial-Flux Permanent Magnet Wind Generators"**. Electr. Power Syst. Res. 136, 2015, p.1–7.
- [40] OLIVEIRA, L.M.R.; CARDOSO, A.J.M. e CRUZ, S.M.A. **"Power Transformers Winding Faultdiagnosis by the On-Load Exciting Current Extended Park's Vector Approach"**. Electr. Power Syst. Res. 81, 2011, p.1206–1214.
- [41] PASRICHA, M.S. **"Effect of the Gas Forces on Parametrically Excited Torsional Vibrations of Reciprocating Engines"**. Journal of Ship Research. v 45, is.4, 2001, p.262-268.
- [42] PINTÉR, I e BAGÁNY, M. **"Estimation of Parameters for an Extremely Low Fuel Consumption Internal Combustion Engine-Based Megameter-III Vehicle Hungarian"**. Journal of Industry and Chemistry Veszprém. Vol. 41(1), 2013, p.35–40.
- [43] SALOMON, C.P.; SANTANA, W.C.; DA SILVA, L.E. B.; TORRES, G.L.; BONALDI, E.L.; DE OLIVEIRA, L.E.L. e DA SILVA, J.G.B. **"Induction Motor Efficiency evaluation Using a New Concept of Stator Resistance"**. IEEE Trans. Instrum.Meas. 64 (11), 2015, p.2908–2917.
- [44] SONG, X.G.; SONG, T.X.; XUE, D.X. e LI, B.Z. **"Progressive Torsional-Axial Continued Vibrations M Crankshaft Systems: A phenomenon of coupled vibration"**. Trans. ASME, Rotating Mach. Vehicle Dyn. 35, 1991, p.319-323.
- [45] STEELE, M.E.; ASHEN, R.A. e KNIGHT, L.G. **"An Electrical Method for Condition Monitoring of Motors"**. International Conference on Electrical Machines – Design and applications, IEE Conference Publication Number 213, 1982, p.216-220.
- [46] TARAHA, D. e HENEIN, N.A. **"Determination of the Gas-Pressure Torque of a Multicylinder Engine from Measurements of the Crankshaft's Speed Variation"**. SAE, 980164.

- [47] THOMSON, W.T.; DEANS, N.D.; LEONARD, R.A. e MILNE, A.J. **“Condition Monitoring of Induction Motors for Availability Assessment in Offshore Installations”**. 4th Euredata Conference, Venice, Italy, March. 1983.
- [48] VALIPOUR, M. **“Sprinkle and Trickle Irrigation System Design Using Tapered Pipes for Pressure Loss Adjusting”**. J. Agric. Sci. 4 (12), 2012, p.125–133.
- [49] ZWEIRI, Y.H. **“Diesel Engine Indicated Torque Estimation Based on Artificial Neural Networks”**. International Journal of Intelligent Technology. v 1, n 1, 2006, ISSN 1305-6417.
- [50] YAHIA, K.; CARDOSO, A.J.M.; GHOGGAL, A. e ZOUZOU, S.E. **“Induction Motor Brokenrotor Bars Diagnosis through the Discrete Wavelet Transform of The instantaneous Reactive Power Signal under Time-Varying Load Conditions”**. Electr. Power Compon. Syst. 42, 2014, p.682–692.
- [51] YANNOPOULOS, S.I.; LYBERATOS, G.; THEODOSSIOU, N.; LI, W.; VALIPOUR, M.; TAMBURRINO, A.; ANGELAKIS, A.N. **“Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) Over the Centuries Worldwide”**. Water 7, 2015, p.5031–5060.
- [52] YONGGANG, L.; HEMING, L. ; HUA, Z. e SHUTING, W. **“Fault Identification Method of Rotor Inter Turn Short-Circuit Using Stator Winding Detection”**. Electrical Machines and Systems, ICEMS. Sixth International Conference on, v 2, 2003.
- [53] YUCAI, W. e YONGGANG, L. **“Diagnosis of Short Circuit Faults within Turbogenerator Excitation Winding Based on the Expected Electromotive Force Method”**. IEEE Trans. Energy Convers. 31 (2), 2016, p.706–713.

APÊNDICE A

TRABALHOS PUBLICADOS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PREDITIVO PARA DIAGNÓSTICO TERMOMECÂNICO DE FALHAS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

MENDONÇA, P. L.; BONALDI, E. L.; OLIVEIRA, L. E. L.; TORRES, G. L.; SILVA, J. G. B.; SILVA, L. E. B.; SALOMON, C. P.; SANTANA, W. C.

VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, Costa do Sauípe - BA. ANEEL. 2015.

DEVELOPMENT OF A REDUCED MODEL LABORATORY FOR TESTING PREDICTIVE FAULT SYSTEM IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

MENDONÇA, P. L.; BONALDI, E. L.; OLIVEIRA, L. E. L.; TORRES, G. L.; SILVA, J. G. B.; SILVA, L. E. B.; SALOMON, C. P.; SANTANA, W. C.

10th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives – SDEMPED, Guarda - PORTUGAL. SDEMPED. 2015.

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM GRUPOS MOTORGERADOR DE COMBUSTÃO INTERNA A PARTIR DE ASSINATURA ELÉTRICA E PROCESSAMENTO DE SINAIS

MENDONÇA, P. L.; BONALDI, E. L.; OLIVEIRA, L. E. L.; TORRES, G. L.; SILVA, J. G. B.; SILVA, L. E. B.; SALOMON, C. P.; SANTANA, W. C.; BRITO, C. N.

XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Foz do Iguaçu - PR. CIGREELETROBRAS. 2015.

PREDICTIVE FAULT SYSTEM IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES IN: 28TH INTERNATIONAL CONGRESS OF CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC ENGINEERING MANAGEMENT

MENDONÇA, P. L.; BONALDI, E. L.; OLIVEIRA, L. E. L.; TORRES, G. L.; SILVA, J. G. B.; SILVA, L. E. B.; SALOMON, C. P.; SANTANA, W. C.

COMADEM, Buenos Aires - ARGENTINA. COMANDEM. 2015.

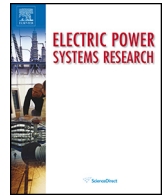
SISTEMA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO ELÉTRICA BASEADA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

MENDONÇA, P. L.; BONALDI, E. L.; OLIVEIRA, L. E. L.; TORRES, G. L.; SILVA, J. G. B.; SILVA, L. E. B.; SALOMON, C. P.; SANTANA, W. C.

XI Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission – GLAGTEE, São José dos Campos - SP. GLAGTEE. 2015.

APÊNDICE B

**ARTIGO PUBLICADO EM 25 DE ABRIL DE 2017 NA REVISTA INTERNACIONAL
ELECTRIC POWER SYSTEM RESEARCH, ISSN 0378-7796, VOL. 149, PP 30-45.**



Detection and modelling of incipient failures in internal combustion engine driven generators using Electrical Signature Analysis

P.L. Mendonça^a, E.L. Bonaldi^b, L.E.L. de Oliveira^b, G. Lambert-Torres^{b,*},
J.G. Borges da Silva^b, L.E. Borges da Silva^c, C.P. Salomon^{b,c}, W.C. Santana^{b,c},
A.H. Shinohara^d

^a Pernambuco Institute of Technology, ITEP, Recife, PE, 50740-540, Brazil

^b Gnarus Institute, Itajuba, MG, 37500-052, Brazil

^c Itajuba Federal University, UNIFEI, Itajuba, MG, 37500-903, Brazil

^d Federal University of Pernambuco, UFPE, Recife, PE, 50670-901, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 December 2015

Received in revised form

30 November 2016

Accepted 8 April 2017

Keywords:

Electrical signature analysis

Failure patterns

Fault detection

Internal combustion engines

Maintenance

Synchronous generators

ABSTRACT

Condition-based maintenance of electric generators have been gaining increasing importance due to the electricity demand and the criticality that this equipment represents to electrical power systems. In this context, this paper proposes a methodology and a system for detection and modeling of incipient failures in the components of internal combustion engine-driven generators based on Electrical Signature Analysis (ESA). The proposed methodology enables the detection of incipient faults both in the prime mover and in the coupled synchronous generator, only relying on measurements of the generator stator voltages and currents. The proposed ESA failure patterns are based on defined frequencies and the structural features of the machine, so they can be reproduced in a wide range of engine-generators sets. The main advantages of the proposed system are its low intrusiveness, feasible installation and cost efficiency. A scale model laboratory has been designed to simulate faults in a small diesel generator and apply the ESA methodology to detect these faults and obtain the failure patterns. Experimental results are presented to prove the effectiveness of the proposed methodology. The main results include the findings that exciter generator unbalance induces electrical unbalance components, exciter diode short circuit induces even harmonics, intake valve failure and piston ring failure induce multiples of rotation frequency components, and mechanical misalignment of the engine generator set induces multiples of half order speed frequency components on ESA. Moreover, the proposed prototype is installed at two large in-service internal combustion engine-driven generators and examples of signal analysis are provided.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Internal combustion engine-driven generators are common in fossil-fuel power stations for power generation and in industries and commercial buildings as supplementary electricity supply. The presence of an abnormal event in such a machine can influence its operation, efficiency and can cause even power interruption [1]. It is known that the current global scenario is related to an ever-increasing electric power demand, because of industrialization, general facilities, society habits, including, for instance, the increasing modern agriculture and irrigation systems, which also leads

to more energy consumption [2–5]. Thus, an unforeseen power interruption can be disastrous, causing losses to electric power companies, industries and to society as a whole.

Careful evaluation of the operation condition of electric generators can lead to a substantial increase of their reliability and to an effective program of asset management. Prognostics and health monitoring of these equipment are no longer a supplementary accessory to the system, but a necessary element to ensure reliability and productivity in an optimized, effective and cost-efficient way [6].

In this context, it is known that condition monitoring and novel maintenance techniques applied to electric generators can increase the reliability of the power generation process as a whole. Thus, several works in this field have been proposed in the literature, including early fault diagnosis [7–10].

* Corresponding author.

E-mail addresses: germanoltorres@gmail.com, germano@unifei.edu.br (G. Lambert-Torres).

Condition monitoring of electrical machines can be defined as the continuous process for assessing the health of the equipment under supervision during its life cycle. This process brings significant benefits to power generation companies and their customers, including avoidance of potentially unsafe conditions, minimization of damage to components, timely performance of maintenance actions, more efficiency in the electricity generation, reduction of penalties and losses by non-scheduled stops, and the creation of historical data of failures [11,12].

Combined with condition monitoring systems, the condition-based maintenance aims to develop a process for the diagnosis of equipment under supervision indicating incipient failures based on the variables acquired by the mentioned associated systems. Thus, the indication for a maintenance intervention occurs only when the operational state of the equipment presents an important deterioration condition. This indication can inform even the deterioration level of the equipment and provide a forecast of how much time it can still work before a general breakdown occurs [13,14].

Among the condition-based maintenance techniques for electrical machines, Electrical Signature Analysis (ESA) has been gaining attention in the last years. This technique uses the electrical machine as a transducer and consists in the analysis of the machine voltages and currents in the frequency domain. ESA became widespread in the predictive maintenance of induction motors. In this case, the focus is on Motor Current Signature Analysis (MCSA), which has been proposed in several related works and successfully applied in practice [13–17]. The application of ESA has been extended to predictive maintenance of synchronous generators. In this case, the Current Signature Analysis (CSA) is useful to detect mechanical problems in the generator and the rotating assembly. To detect electrical problems, it is also important to apply the Voltage Signature Analysis (VSA) and Extended Park's Vector Approach (EPVA) techniques [14,18–20].

One of the advantages of ESA-based techniques is that it is a low-intrusion method, as it only requires access to the machine electrical quantities. Thus, focus is given to methods relying only on the stator electrical quantities because they are usually easily accessible in the generation unit panels at power stations. Some works are based on field currents or search coils, however, it can be difficult to access the field winding on in-service generators at power stations to take measurements. Besides, the use of search coils is somehow intrusive. Based on the aforementioned topics, several works have been proposed to detect faults in electrical machines by applying ESA-based techniques [7,11,19–24].

In the case of fossil-fuel power stations, in particular that driven by internal combustion engines, the presence of a condition-based maintenance technique that correlates the electrical quantities of the generators and the thermomechanical data of the engines is not usual. The most common systems available in the market are based on Vibration Analysis and are not specific to remote acquisition and automatic analysis of data in a flexible way. Thus, this correlation can be obtained by using ESA. This approach has potential to detect automatically electrical and thermomechanical faults and allows the creation of a database to establish possible prognostics for the machine.

Considering the described scenario, this paper proposes an innovative system for condition-based maintenance of internal combustion engine-driven generators based on ESA. The novelty consists of analyzing only the stator voltages and currents of the coupled synchronous generator to detect possible faults in the coupled generator and the internal combustion engine. The advantages of the proposed methodology are easy access to the electric signals of the generator (low intrusiveness); potential to perform the diagnostics of the internal combustion engine and the generator by using a single technique; evaluation of the impact of the motor

condition to the generator output; and correlation of the ESA diagnostics with other techniques such as Vibration Analysis.

The proposed software performs data acquisition, sampling, windowing, and spectral estimation by using Fast Fourier Transform (FFT). The software implements parameters estimation (supply frequency, rotational frequency) and a process of search and identification of frequency components related to faults. Then, with the help of lists of severity and history of failures, the software assesses the severity and the system provides the diagnosis for the user by presenting notifications with traffic lights and alerts. The process of signal acquisition and evaluation occurs periodically, so the trend curves of the failure patterns are continuously analyzed.

Thus, the main contributions of this paper are (1) proposition of a practicable methodology for ESA-based maintenance of internal combustion engine driven generators capable to detect faults in both the machines, only relying on stator electrical quantities, and being low intrusive and cost-effective; (2) a summary of obtained ESA failure patterns based only on defined frequencies and machine structural features, which can be reproduced for a wide range of engine-generator sets with synchronous generators; (3) description of a custom-made scale model laboratory designed for simulating faults in a small engine-generator set to validate the proposed methodology without the need for an intervention in a real power station. The main innovation of this work is the application of ESA to the generator output signals to detect faults in the coupled internal combustion engine, as this has not been found in previous works. The proposed ESA based methodology only requires the use of voltage and current transducers and it is low intrusive, whereas the common methods for condition monitoring in power plants as Vibration Analysis requires several transducers placed in special places and are somewhat intrusive. Finally, the proposed system is installed in a real Brazilian power station to perform the condition-based maintenance of two in-service 28-MVA generation units.

This paper is divided as described as follows. In Section 2, it is described the Electrical Signature Analysis technique applied for synchronous generators. In Section 3, the proposed methodology is presented, including the system and the ESA failure patterns. The development of the scale model laboratory is presented in Section 4. In Section 5, it is presented the planning of the tests, including the statistical analysis and the methodology of experiments. In Section 6, the experimental results are presented, highlighting the verification of the ESA failure patterns. Section 7 presents the application of the proposed methodology applied on a real power station.

2. Analysis for synchronous generators

The principle of ESA-based techniques is to perform the analysis of the voltage and current signals of the equipment under supervision in the frequency domain. The ESA presupposition is that the electrical signature of a “healthy” machine is different from the electrical signature of a faulty machine and each type of failure excites some particular frequency components. Thus, it is possible to detect the presence of an incipient failure and, if positive, the exact part of the machine where the failure is developing. These assumptions enable the determination of a set of ESA failure patterns based only on definite frequencies and machine structural features (e.g., number of poles, number of stator slots), which can list each type of failure with determinate frequency components in a generalized way [14].

The main advantages of ESA-based techniques for predictive maintenance of electrical machines are that they are low intrusive, as they only rely on electrical quantities; they can provide a diagnosis of incipient failures, so the user can program the maintenance intervention; and they can be implemented in an economically feasible way, as they mainly depend on voltage and current trans-

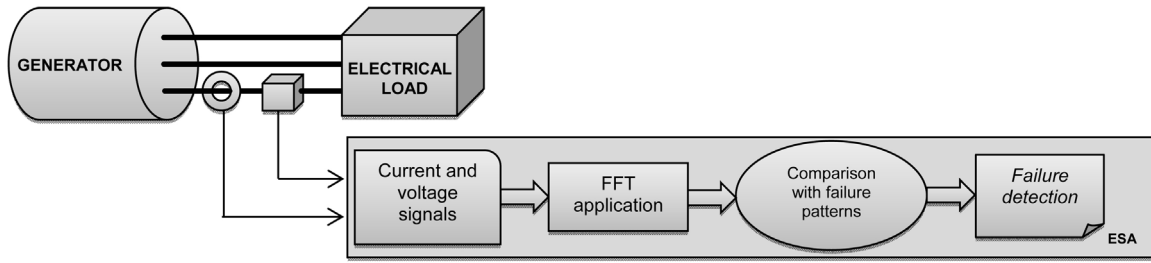


Fig. 1. Flowchart of the ESA procedure.

ducers, a hardware for data acquisition and a software for data processing and interface.

The first step of a condition-based maintenance system based on ESA is to acquire the machine voltages and currents. For synchronous generators, it is performed through voltage and current transducers usually installed at the secondary of Potential Transformers (PTs) and Current Transformers (CTs) at the generator unit panels. The acquired signals are processed and a Fast Fourier Transform (FFT) algorithm is applied to obtain the signals in the frequency domain. The electrical signatures can be provided in a user-friendly computational environment to be compared with a pre-defined set of failure patterns, so an incipient failure can be detected. Fig. 1 illustrates the simplified ESA procedure.

It is important to point out that VSA is related to an upstream analysis, that is, towards the generator and the CSA is related to a downstream analysis, that is, towards the load. Thus, in the case of ESA applied to synchronous generators, the analysis must focus on the voltage signature (VSA and EPVA) and correlate to the current signature (CSA and EPVA). If the magnitude of the component under analysis is greater in the voltage than in the current (in dB), one may suppose that there is an incipient failure in the generator. Otherwise, one may suppose that there is an incipient failure in the load [22].

2.1. Voltage and Current Signature Analysis

VSA and CSA consist of analyzing the stator voltage and current signals, respectively, in the frequency domain, so the frequency spectrum is obtained, which is usually referred to as electrical signature. The voltage and current signatures are obtained through the application of the Fast Fourier Transform (FFT) to the current and voltage signals, respectively, to process the signals from time to frequency domain. FFT consists in an algorithm to accelerate the Discrete Fourier Transform (DFT) computation, which converts a finite sequence of equally-spaced samples of a function in a list of coefficients of a finite combination of complex sinusoids, ordered by their frequencies, which have the same values of the samples. The DFT makes a sequence of N complex numbers $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ be transformed in a periodic sequence of N complex numbers, according to:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j2\pi kn/N}, \quad k \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

where k is the index of DFT or harmonic; n is the index in the time domain; N is the input sequence samples; X_k is the DFT k^{th} component; and x_n is the samples sequence.

By means of the generator signatures, it is possible to identify the magnitude and frequency of each individual component that constitutes the voltage or current signal of the generator. Thus, as mentioned previously, patterns can be identified in the signature in order to differentiate healthy motors from unhealthy ones [14].

For instance, a known failure pattern for mechanical problems in the generator rotor (misalignment and unbalance) is the rotational frequency pattern, which consists in analyzing the line frequency with rotational frequency side bands in the voltage and current signatures. The synchronous generator rotates at synchronous speed, so the rotational frequency is given by Eq. (2):

$$f_r = \frac{f_1}{p} \quad (2)$$

where f_r is the rotational frequency, in Hz; f_1 is the line (or fundamental) frequency, in Hz; and p is the number of generator pole pairs. Thus, the rotational frequency pattern is represented by Eq. (3):

$$f_{rmp} = f_1 \pm k \cdot f_r \quad (3)$$

where f_{rmp} are the frequency components analyzed for generator rotor mechanical problems and k is a positive integer value.

2.2. Extended Park's Vector Approach

The Park's vector method was proposed on 1990s decade to detect motor faults as inter-turn short circuits, air-gap eccentricity, broken bars, etc. Firstly, the fault detection was based only on the distortion suffered by circle of Park on the emergence and on the aggravation of the fault [14]. Recently, the method has been improved to EPVA, which is described in the following Refs. [13,14]. The three phases of currents in a generator can be described by Eq. (4):

$$\begin{aligned} i_A &= i_G \cos(\omega t - \theta) \\ i_B &= i_G \cos\left(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C &= i_G \cos\left(\omega t - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

where i_A, i_B and i_C are the currents in phases A, B and C, respectively; i_G is the peak value of the line current; ω is the angular frequency, in rad/s; θ is the initial phase angle, in rad; and t is the time variable. The components of Park's vector are obtained by applying the Clarke transformation to Eq. (4), resulting in Eq. (5):

$$\begin{aligned} i_D &= \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) i_A - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_C \\ i_Q &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_C \end{aligned} \quad (5)$$

Ideal conditions generate a perfect Park circle centered at the origin of coordinates, in graphical terms. Thus, by substituting Eq. (4) in Eq. (5), the obtained components are given by Eq. (6):

$$\begin{aligned} i_D &= \left(\frac{\sqrt{6}}{2} \right) i_G \cos(\omega t - \theta) \\ i_Q &= \left(\frac{\sqrt{6}}{2} \right) i_G \sin(\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

In the presence of electrical unbalance, the Park circle becomes distorted. In this case, the generator currents are composed by a parcel of direct sequence and a parcel of inverse sequence, which can be represented by:

$$\begin{aligned} i_A &= i_d \cos(\omega t - \theta_d) + i_i \cos(\omega t - \gamma_i) \\ i_B &= i_d \cos\left(\omega t - \theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega t - \gamma_i + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C &= i_d \cos\left(\omega t - \theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega t - \gamma_i - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

where i_d is the maximum value of the current direct sequence; i_i is the maximum value of reverse sequence current; θ_d is the current initial phase angle direct sequence, in rad; and γ_i is the initial phase angle reverse sequence current, in rad. In Park's vector, by substituting Eq. (7) in Eq. (5), it is obtained:

$$\begin{aligned} i_D &= \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \right) (i_d \cos(\omega t - \theta_d) + i_i \cos(\omega t - \gamma_i)) \\ i_Q &= \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \right) (i_d \sin(\omega t - \theta_d) - i_i \sin(\omega t - \gamma_i)) \end{aligned} \quad (8)$$

For purpose of analysis, the square of Park's vector module is calculated, which is performed by using Eq. (9):

$$|i_D + ji_Q|^2 = \left(\frac{3}{2} \right) (i_d^2 + i_i^2) + 3i_d i_i \cos(2\omega t - \theta_d - \gamma_i) \quad (9)$$

Thus, the FFT is applied to the square of Park's vector module. When there is an electrical unbalance, the result is composed by a DC level plus one additional term located at twice the line frequency, which is called EPVA electrical unbalance in this paper. The same procedure can be applied to voltage signals.

The method to discriminate EPVA electrical unbalance is described as follows: once the voltage and current signals are acquired, they are pre-processed, and the EPVA spectrum is computed, by using the expressions (4)–(9). The component of twice the line frequency in the EPVA spectrum is monitored. If it is greater than a pre-defined threshold, it can be considered that the machine presents EPVA electrical unbalance.

3. Definition of the proposed methodology

The proposed methodology for the predictive maintenance of internal combustion engine-driven generators is based on ESA applied to the stator voltages and currents of the coupled synchronous generator. The hypothesis established in this work is that faults in the internal combustion engine and in the coupled generator can affect the generator output voltages and currents. Thus, the potential of the proposed methodology to detect faults is applied both to the prime mover and the coupled generator. The next items present the proposed methodology, including the system developed and the ESA failure patterns, which constitute the basis for the machine monitoring and fault diagnosis.

3.1. Proposed system

A prototype has been developed for acquisition of stator voltages and currents and data processing. The proposed system consists basically of current and voltage transducers and a hardware for data acquisition. The transduction system consists of two TTD-01 differential AC voltage transducers and two PS-TT50 split-core AC current transducers, including cables and accessories. The voltage transducer is provided with a peak-to-peak voltage error less than 2.5% and the current transducer with an error less than 2.0%. The data acquisition hardware is a PS-DAQ-1278. This system is a board kit and software interface that allows the assembly of remote data acquisition systems with a 24-bit resolution and a maximum sampling frequency of 96 MHz. The system is provided with eight channels for the signals simultaneous acquisition. However, for the present application, only six channels are used.

3.2. ESA failure patterns

The faults selected for detection by using ESA are mechanical misalignment of the engine-generator set; intake valve failure; piston ring failure; exciter diode short-circuit; and exciter generator unbalance. These types of faults have been studied by performing tests in the developed scale model laboratory. Thus, the electrical signal datasets of the different Fault conditions have been acquired by using the prototype and have been analyzed in the time and frequency domains. The spectral components (Fourier coefficients) or signals features that significantly changed in the presence of these faults have been organized to produce a set of failure patterns for failure detection and identification. An observation is that the experimental results are presented in the Section 6.

Table 1 presents the empirically obtained ESA failure patterns. Note that they are based on defined frequencies and machine structural features, being applicable for any wound rotor synchronous generator. Moreover, by analyzing the failure patterns, it is possible to discriminate among the faults, since each one excites particular frequency components. The only types of faults that cannot be discriminated one from another are the intake valve failure and the piston ring failure, since both of them causes change in the amplitude of the same frequency component—the rotational frequency pattern. The mathematical proof of the failure patterns can be found on known fault frequencies for synchronous generators [11,22] and the adaptation of CSA failure patterns from induction motors to synchronous generators [14].

It is important to emphasize that the failure patterns presented in Table 1 have been obtained from the experimental tests performed with the scale model laboratory, with the internal combustion engine-driven generator in open loop. On the other hand, the in-service internal combustion engine driven generators at power plants are usually in closed loop. Thus, for intake valve failure and piston ring failure in in-service generators, it is expected only the change in the rotational frequency magnitude on voltage and current signatures. This is because the RMS voltage and the rotation speed are controlled to be maintained in a predefined acceptable range.

Moreover, it is known that FFT analysis assumes the signals are recorded at steady-state condition. Some works have approached failure detection in electrical machines under non-stationary conditions [25,26]. However, in the case of the present work, it should be noted that the verified speed changes reported in Table 1 occurred from Baseline to Fault condition, i.e., not during a single data acquisition. In condition-based maintenance systems, it is usual to perform data acquisitions periodically, which can be a few times per day, in order to monitor continuously the supervised equipment condition, and these acquisitions can be of a few seconds. It means that it is difficult to occur a significant speed change

Table 1
Failure patterns.

Type of Fault	Failure patterns	Failure patterns expressions
Exciter generator unbalance	Increase of the negative sequence of the line frequency on voltage and current signatures Increase of EPVA electrical unbalance magnitude on voltage and current signatures Increase of third harmonic magnitude on voltage and current signatures	– In EPVA voltage and current signatures In voltage and current signatures
Exciter diode short circuit	Increase of even harmonics magnitudes on voltage and current signatures	In voltage and current signatures
Intake valve failure and piston ring failure	• Decrease of RMS voltage; • Decrease of RMS current; • Decrease of rotation speed	–
	Change in the rotational frequency magnitude on voltage and current signatures	In voltage and current signatures
Mechanical misalignment of the engine generator set	Increase of the half order speed frequency on voltage and current signatures	In voltage and current signatures

during a data acquisition, thus the FFT application will not be compromised. On the other hand, if a significant speed or torque change occurs during a data acquisition, this acquisition can be deleted (because it is not appropriate for analysis by applying FFT), and the system monitoring will not be compromised, because the purpose is to analyze the trends of the components periodically to detect incipient faults.

4. Development of a scale model laboratory

This section presents the development of the scale model laboratory used to perform the experimental tests with internal combustion engine generator.

4.1. Goals of the scale model laboratory

The main goal of the scale model laboratory is the operation of a scaled internal combustion engine-driven generator in order to insert faults in the engine and in the coupled generator, and then analyze the effects of these faults in the generator electrical signature, as proposed in this work. By using the scale model, it is possible to perform tests and simulate faults in a controlled way, including different load configurations, several kinds of faults to be simulated and fault severity levels. Thus, it is possible to analyze several conditions and analyze the machine behavior and the electrical signatures in depth. The simulated faults are mechanical misalignment of the engine-generator set; intake valve failure; piston ring failure; exciter diode short-circuit; and exciter generator unbalance.

The secondary goal of the scale model laboratory points to the training of the maintenance staff on the use of the ESA technique for the predictive maintenance of internal combustion engine-driven generators. This allows the knowledge transfer and the extension of the methodology application.

4.2. Development of the scale model laboratory

The first step of the development of the scale model laboratory was the determination of the methods to insert the selected faults. Then, the defined engine-generator group has been purchased and the required customizations have been performed. The customizations include the design for insertion of faults and the production of a resistive load compatible with the generator.

Also, for the specification of the scale model laboratory engine-generator set, the following requirements were considered: number of engine strokes (four-stroke engine); number of phases of the generator (three-phase generator); portability of the

Table 2

Comparison between Suape II Engine–Generator Set and the scale model laboratory.

Feature	Suape II	Laboratory
Number of cylinders	20	1
Motor type	V	Line
Lubrication system	Pressure	Pressure
Refrigeration system	Water	Water
Number of valves/cylinder	4	2
Coupling type	Direct	Direct
Combustion system	Direct injection	Direct injection
Generator	12 poles	4 poles

engine-generator set; number of poles of the generator (four-pole generator); engine lubrication system (pressure lubrication system); coupling type (direct coupling); noise level; and easiness to assemble and disassemble the parts related to the fault insertion. Once the requirements of the scale model laboratory were defined, the equipment was obtained.

Table 2 presents the engine-generator set features compared with one in-service motor generator at Suape II Power Station, where the developed prototype is installed.

5. Planning of the experiments

This section presents the planning of the experiments, including the statistical analysis to determine the number of samples for each test and the methodology of inserting faults in the scale model laboratory.

5.1. Statistical analysis

Experimental tests would be performed in the scale model laboratory in order to analyze the voltage and current signatures in search of failure patterns and their proof. Thus, before the execution of the tests, they have been planned by using statistical criterion, so that the proof of the failure patterns would be realized considering a predefined confidence level.

For each failure pattern under analysis, a set of experimental data is collected. These experimental data are the acquired signals of the generator stator voltages and currents, taking into consideration different load conditions and different fault severity levels. There are n data acquisitions for each case, and the goal is to compare a set of *Baseline* data (healthy machine condition) with a set of *Fault* data (faulty machine condition, considering a determined fault severity level). Thus, the goal of the performed statistical analysis was the determination of the sample number n , or the minimum n , to prove that the Baseline data set was different from the Fault data set, in case this difference existed.

The fault detection analysis is performed by using ESA. The analyzed parameter is the magnitude value, generally in dB, related to the line frequency, of a determined component of voltage or current frequency, which is the failure pattern in question. Thus, each dataset, both Baseline and Fault, can be represented by the arithmetic mean μ of the magnitudes of the frequency component under analysis for each acquisition. The following hypothesis test is defined, where μ_B represents the mean of Baseline data and μ_D represents the mean of Fault data:

$$H_0 : \mu_B = \mu_D \quad (10)$$

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

The null hypothesis H_0 assumes that the means of the data sets are equal, that is, the frequency component under analysis does not change from the Baseline to the Fault condition. The alternative hypothesis H_1 assumes that the dataset means are different, that is, the frequency component under analysis changes from the Baseline to the Fault condition. This is a bilateral test.

The values α (significance level) and β are defined as:

$$\alpha = P(\text{Type I Error}) = P(\text{reject } H_0 | H_0 \text{ is true}) \quad (11)$$

$$\beta = P(\text{Type II Error}) = P(\text{not reject } H_0 | H_0 \text{ is false})$$

The values of α and β are preferred to be small. However, for a fixed number of samples, the decrease of one of these parameters implies an increase of the other. As a remark, $(1 - \alpha)$ is the confidence level of the test and $(1 - \beta)$ is the power of the test.

In the defined problem, there are two independent sample sets and the objective is to test if the datasets are different. As the experimental tests are performed by using the same process, it is considered that both datasets have the same variances. Thus, the more appropriate test to be applied is the Two Sample Test.

The effect size is defined by:

$$d = \frac{|\mu_B - \mu_D|}{\sigma} \quad (12)$$

where d is the effect size and σ is the standard deviation of both datasets. The effect size d represents the minimum distance between the means, normalized in terms of standard deviation, from which the means are considered different one from each other.

The number of samples n can be estimated by using [27]:

$$n = \frac{2}{d^2} \cdot (z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2 \quad (13)$$

where z_k is the inverse cumulative distribution function for the probability k .

For the problem in question, the values of α , β and d have been defined as: $\alpha = 0.05$ (confidence level of 95%); $\beta = 0.2$ (power of the test = $1 - \beta = 80\%$); and $d = 0.8$ standard deviations. Considering these values, $z_{1-\alpha/2} = z_{0.975} = 1.96$ and $z_{1-\beta} = z_{0.8} = 0.84$. Therefore, $n = 25$ acquisitions for each dataset, to obtain a confidence level of 95% and a power of test of 80%, in order to statistically identify a minimum difference of 0.8 standard deviations between the means of the Baseline and Fault sets, in case this difference exists.

5.2. Methodology of the experiments

5.2.1. Exciter generator unbalance

The in-service synchronous machines at Suape II Power Station are provided with brushless excitation system. Also, the synchronous generator of the scale model laboratory is provided with a stationary rectifier excitation system. Thus, the exciter generator unbalance fault is simulated by inserting a passive element (resistance) in series with one of the AC inputs of the exciter rectifier of the scale model laboratory generator. Fig. 2 presents the excitation system diagram of the scale model laboratory generator with

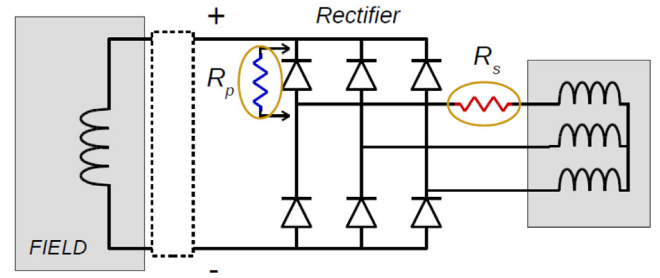


Fig. 2. Excitation system diagram of the scale model laboratory.

the fault insertion approaches indicated. A series resistance R_s is inserted in one AC input of the exciter rectifier, as indicated in Fig. 2.

5.2.2. Exciter diode short circuit

This fault is simulated by inserting a passive element in parallel with one of the diodes of the exciter rectifier, that is, between an AC input and a DC output of the rectifier. A parallel resistance R_p is inserted in one of the exciter rectifier diodes, as indicated in Fig. 2.

5.2.3. Intake valve failure

This type of fault is simulated by obstructing the air inlet in the air filter of the diesel engine. This is performed by wrapping toilet paper around the air filter. This is an indirect way to simulate intake valve failure, once the air inlet is obstructed.

5.2.4. Mechanical misalignment of the engine-generator set

This fault is simulated by inserting vertical or angular misalignment between the motor and the generator of the scale model laboratory. This is performed by inserting washers in the bolts of the synchronous generator fastening.

5.2.5. Piston ring failure

This fault is simulated by replacing the healthy piston ring with a worn-out piston ring. The worn-out piston ring causes excessive oil consumption, white or gray exhaust smoke and overall loss of power or poor performance.

6. Experimental results

This section presents the experimental results obtained through the tests performed by using the scale model laboratory. The experimental results are intended to validate the proposed ESA based methodology for internal combustion engine driven generators condition monitoring. As already mentioned, by using the scale model laboratory, several kinds of tests and fault simulation can be performed in a controlled way. On the other hand, in a power plant, it could take a considerable time to occur a given failure event, and other variables could interfere the process, increasing the complexity of the methodology validation. Because of this, the results are focused on the tests performed with the scale model laboratory and not on Suape II generation units.

The data acquisition of the experimental tests has been performed by using the developed prototype. The acquired signals are the synchronous generator three line currents and the three phase-to-phase voltages. Regarding the load of the generator, the developed resistance load was used as delta connected, resulting in a load condition of 88% of the generator rated power. Other load conditions have been considered in the experiments. However, because of the space limitation, only the results for the mentioned load condition will be presented. Moreover, the trend curves of the ESA failure patterns are presented only for the voltage signatures, but the behavior of all the presented failure patterns was similar for voltage and current signatures. For each case study, 25 data

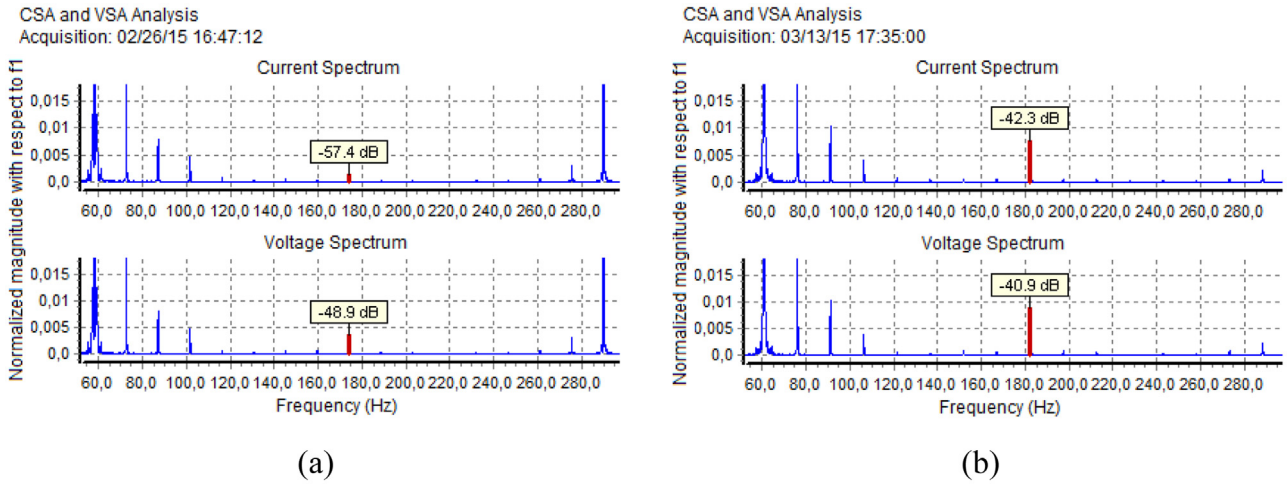


Fig. 3. Third harmonic on current and voltage signatures: (a) Baseline, and (b) Fault.

samples were acquired, and so the trend curves of the frequency components were analyzed. This analysis is realized by comparing the Baseline condition data with the faulty condition data.

6.1. Exciter generator unbalance

To perform the simulation of exciter generator unbalance, a resistance element was inserted in series with one of the AC inputs of the exciter rectifier. The considered resistance values, which define the levels of fault severity (FS), were: FS #1 = 2 (Ω), FS #2 = 5 (Ω), FS #3 = 7 (Ω) and FS #4 = 10 (Ω). As the inserted resistance value increases, the unbalance in the three-phase input system of the scale model laboratory exciter rectifier increases, and it emulates a larger unbalance in the three-phase output system of the exciter generator. Thus, a larger value of resistance is associated with a larger level of fault severity, because it increases the electrical unbalance.

For this failure type, the obtained failure patterns were the negative sequence of the line frequency, the EPVA electrical unbalance and the third harmonic. The failure patterns were analyzed in the voltage signals and correlated to the current signals. Because of the space limitation, the results for the trend curves are presented only for the voltage signatures.

The third harmonic pattern is given by $3 \cdot f_1$ in voltage and current signatures. Fig. 3 shows examples of the third harmonic on

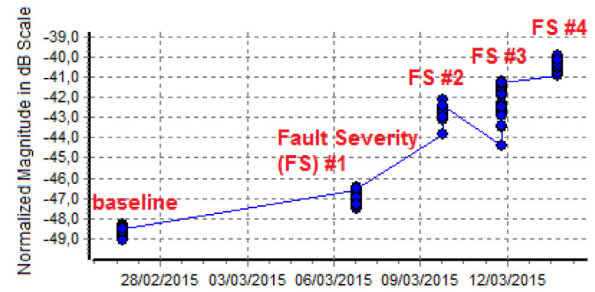


Fig. 4. Trend curve of the third harmonic on voltage signature.

current and voltage signatures for Baseline and Fault conditions. Fig. 4 illustrates the obtained trend curve of the third harmonic on voltage signature. Note that the third harmonic component magnitude increases from Baseline to Fault condition, and the component magnitudes increase as the fault severity increases.

The EPVA electrical unbalance pattern is given by $2 \cdot f_1$ in EPVA voltage and current signatures. Figs. 5 and 6(a) show examples of electrical unbalance on current and voltage EPVA signatures and the trend of electrical unbalance on voltage EPVA signature, respectively. The electrical unbalance magnitude on EPVA signature increases from Baseline to Fault condition, and the component magnitudes increase as the fault severity increases.

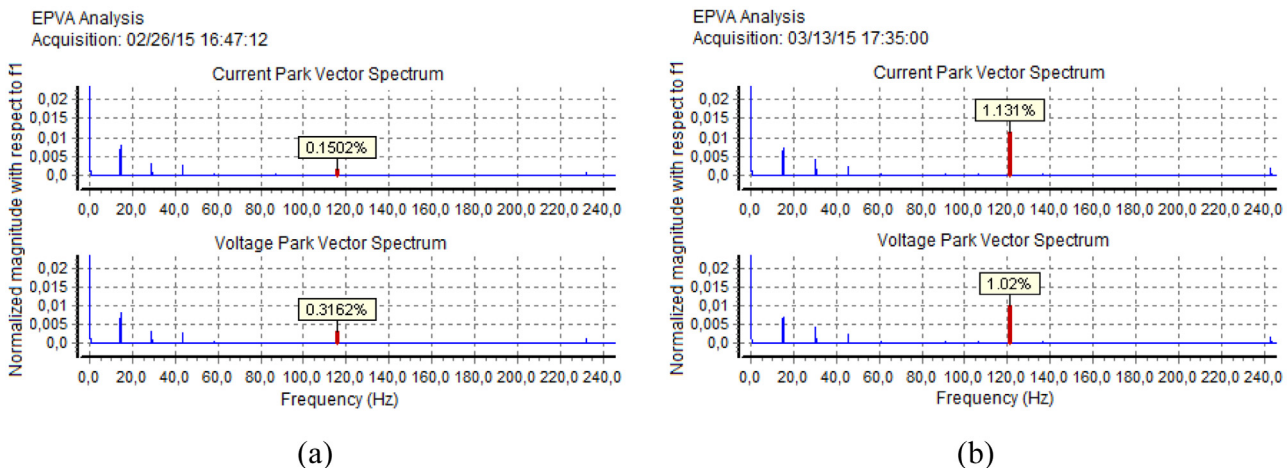


Fig. 5. Electrical unbalance on current and voltage EPVA signatures: (a) Baseline, and (b) Fault.

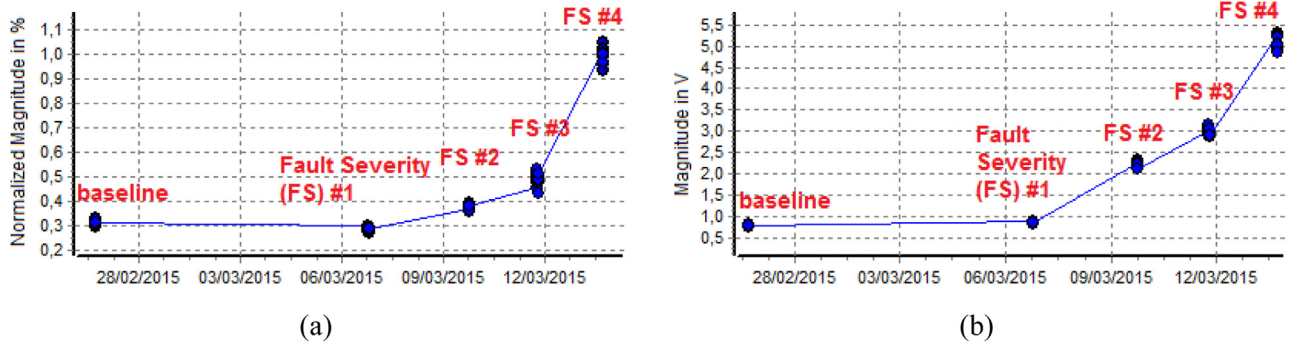


Fig. 6. Trend curves of (a) the electrical unbalance on EPVA voltage signature and (b) the negative sequence of voltage fundamental frequency.

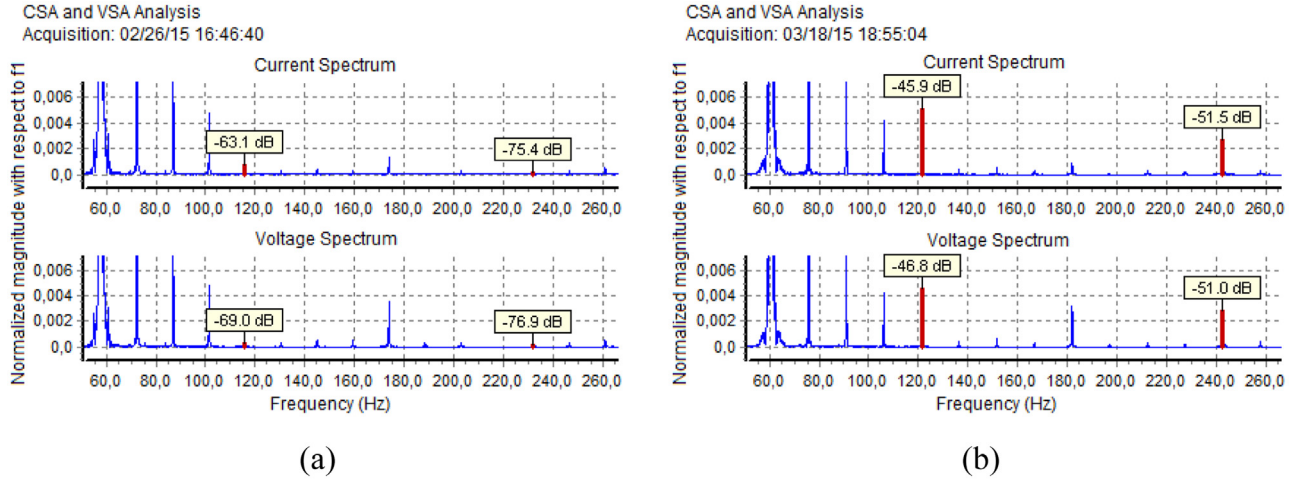


Fig. 7. Even harmonics (2nd and 4th) on current and voltage signatures: (a) Baseline, and (b) Fault.

The negative sequence of voltage and current fundamental frequency is obtained by applying the method of symmetrical components. Considering the phase quantities expressed in phasor notation using complex numbers, the symmetrical components are given by:

$$\dot{V}_{012} = T^{-1} \cdot \dot{V}_{ABC} \quad (14)$$

where $\dot{V}_{012}$ is the vector of voltages in the zero, positive and negative sequence components; $\dot{V}_{ABC}$ is the vector of phase voltages in the A, B, C components; and T^{-1} is the inverse transformation matrix, which is given by:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (15)$$

where $a = e^{j120^\circ}$. The same procedure can be applied for the current signals.

Fig. 6(b) shows the obtained trend curve of the negative sequence of voltage fundamental frequency. Note that the negative sequence of current and voltage fundamental frequency components increases from Baseline to Fault condition, and the component magnitudes increase as the fault severity increases. Moreover, in comparison with the last two presented failure patterns, this was the failure pattern that better responded to the exciter generator fault.

6.2. Exciter diode short circuit

To perform the simulation of exciter diode short circuit, a resistance element was inserted in parallel with a rectifier diode, that is, between one of the AC inputs and one of the DC outputs of the exciter rectifier. The resistance values considered, which define the levels of fault severity (FS), were FS #1 = 30 (Ω) and FS #2 = 15 (Ω). The decrease of the resistance value inserted in parallel with a diode of the scale model laboratory excitation rectifier conduces to a condition closer to a short circuit to the diode under analysis, so it emulates a situation closer to that of a diode short circuit in the rectifier of the generator excitation system. Thus, a smaller value of resistance is associated with a larger level of fault severity because it is closer to a short circuit.

For this failure type, the obtained failure patterns were the even harmonics. The failure patterns were analyzed on voltage signatures and correlated to the current signatures. There was an increase of these components from Baseline to Faulty condition and an increase according to the fault severity for both voltage and current signatures.

The even harmonics pattern is given by $2 \cdot k \cdot f_1$ on voltage and current signatures, where k is a positive integer value. Fig. 7 shows examples of even harmonics (second and fourth harmonics) on current and voltage signatures for Baseline and Fault conditions. Fig. 8 illustrates the obtained trend curves for the second harmonic and fourth harmonic on voltage signatures. Note that the even harmonics magnitudes increase from Baseline to Fault condition and the component magnitudes increase as the fault severity level increases.

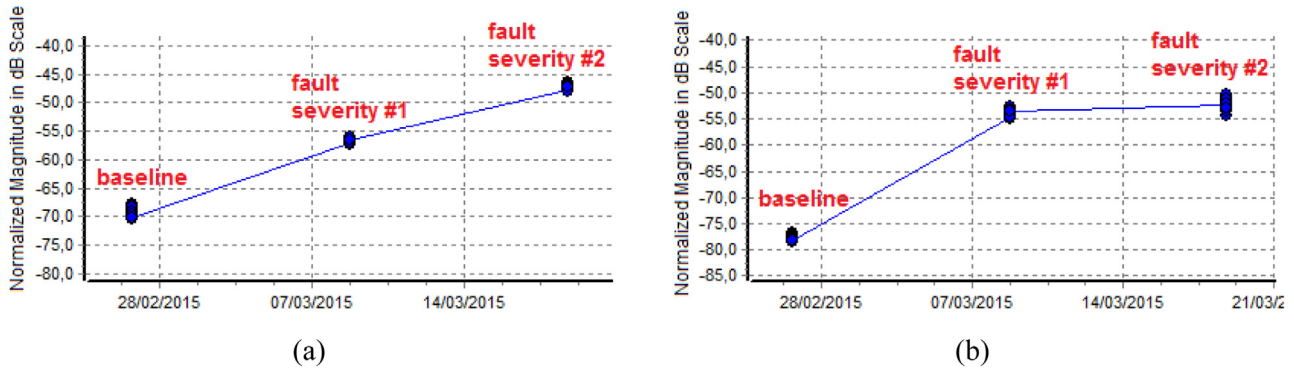


Fig. 8. Trend curve of the even harmonics on voltage signature: (a) second harmonic, and (b) fourth harmonic.

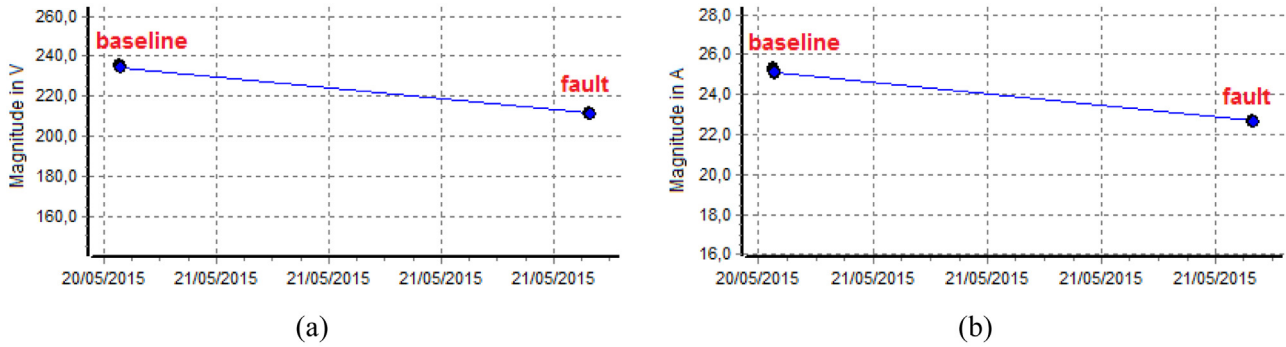


Fig. 9. Trend curve of RMS electrical quantities: (a) RMS voltage, and (b) RMS current.

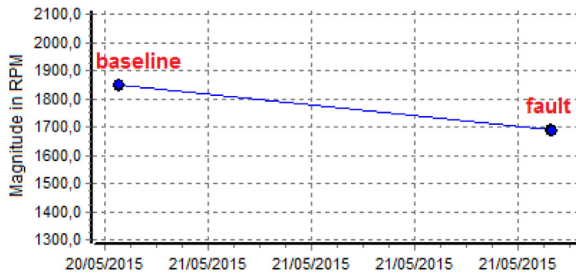


Fig. 10. Trend curve of the rotation speed.

6.3. Intake valve failure

To perform the simulation of intake valve failure, toilet paper was wrapped around the air filter. Thus, the air inlet in the air filter of the diesel engine is obstructed.

This failure type caused a decrease of RMS voltage, RMS current, rotation speed, and as consequence, in the line frequency and a change in the rotational frequency magnitude on voltage and current signatures.

Figs. 9 and 10 show the trend curves of RMS voltage and current and of rotation speed, respectively. Note the decrease of the RMS voltage, RMS current and rotation speed from Baseline to Fault condition, evidencing the loss of performance caused by this type of fault.

The rotational frequency pattern is given by $f_1 \pm k \cdot f_r$ on voltage and current signatures, where k is a positive integer. The presented analysis focuses on the first right side band ($k = 1$). Fig. 11 shows examples of rotational frequency on current and voltage signatures for Baseline and Fault conditions. Fig. 12 shows the trend curve of rotational frequency on voltage signature. The rotational frequency

component magnitude on current and voltage signatures increased from Baseline to Fault condition.

6.4. Mechanical misalignment

To perform the simulation of mechanical misalignment of the engine-generator set, parallel vertical misalignment (fault severity #1) and angular vertical misalignment (fault severity #2) were imposed to the genset. In this case, the fault severity numeration was used only to differentiate the two types of simulated mechanical misalignment faults, and it does not indicate different levels of severity.

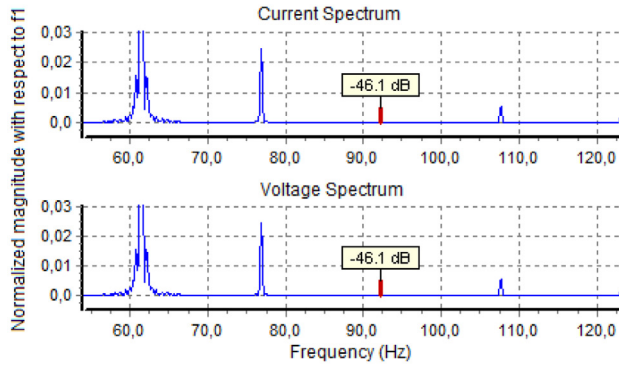
This failure type caused an increase of the half order speed frequency magnitude on voltage and current signatures. The half order speed frequency pattern is given by $f_1 \pm k \cdot (f_r/2)$ on voltage and current signatures, where k is a positive integer. The presented analysis focuses on the first right side band ($k = 1$). Fig. 13 shows examples of half order speed frequency on current and voltage signatures for Baseline and Fault conditions. Fig. 14 illustrates the half order speed frequency on the voltage signature. Note that the components magnitudes increase from the Baseline condition to the Fault condition.

6.5. Piston ring fault

To perform the simulation of piston ring fault, a worn-out piston ring was inserted in the scale model laboratory piston. This failure type caused a decrease of RMS voltage, RMS current, rotation speed, and as consequence, in the line frequency and a change in the rotational frequency magnitude on voltage and current signatures.

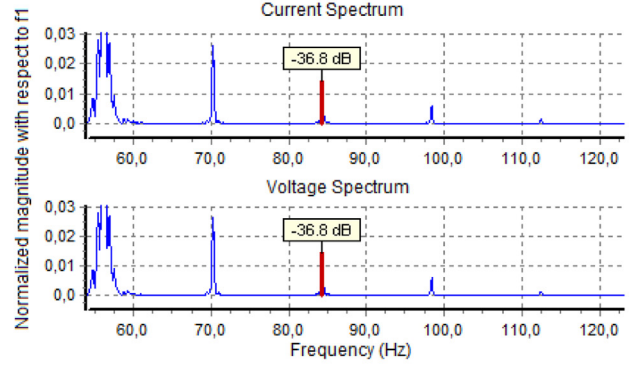
Figs. 15 and 16 present the trend curves of RMS voltage and current and of rotation speed, respectively. Note the decrease of the RMS voltage, RMS current and rotation speed from Baseline to

CSA and VSA Analysis
Acquisition: 05/20/15 18:48:00



(a)

CSA and VSA Analysis
Acquisition: 05/21/15 19:57:44



(b)

Fig. 11. Rotational frequency on current and voltage signatures: (a) Baseline, and (b) Fault.

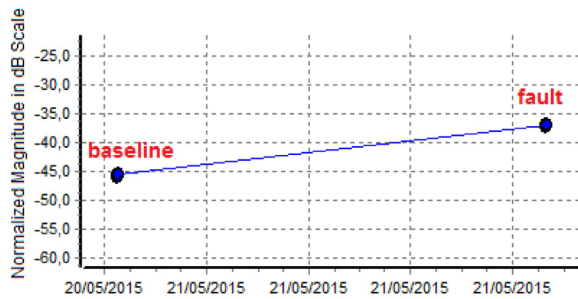


Fig. 12. Trend curve of the rotational frequency on voltage signature.

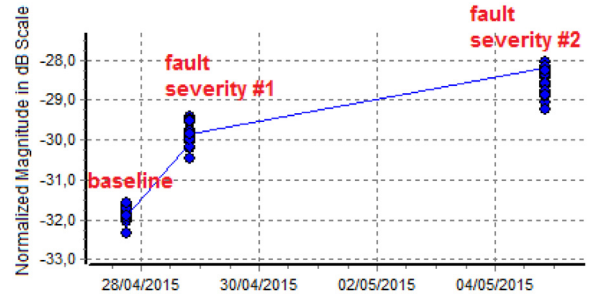


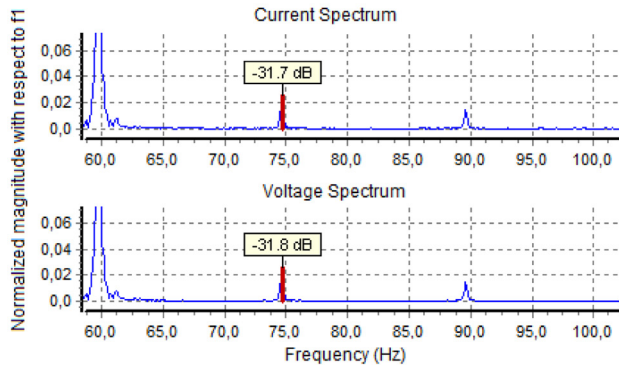
Fig. 14. Trend curve of the half order speed frequency on voltage signature.

Fault condition, which evidences the loss of performance caused by this fault.

The rotational frequency pattern is given by $f_1 \pm k \cdot f_r$ on voltage and current signatures, where k is a positive integer. The presented analysis focuses on the first right side band ($k=1$). Fig. 17 shows examples of rotational frequency on current and voltage signatures for Baseline and Fault conditions. Fig. 18 illustrates the obtained trend curve of rotational frequency on voltage signature. There was an increase in the rotational frequency component magnitude on current and voltage signatures from Baseline to Fault condition.

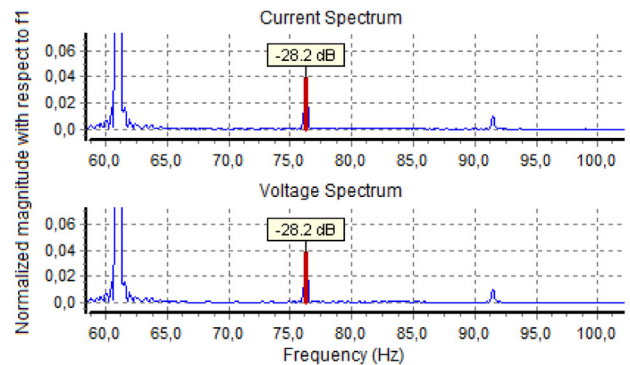
It can be concluded that, through the tests performed with the scale model laboratory, differences in the magnitudes of specific spectral components, depending on the type of the fault, were observed. Thus, it was possible to organize the failure patterns set presented in Table 1 and prove the paper proposal of detecting faults in the internal combustion engine and the coupled synchronous generators by applying ESA to the generator electrical quantities. Moreover, by analyzing the failure patterns obtained through the tests, it can be noticed that each type of fault imply in the change of magnitude of a particular frequency component, thus, the system can discriminate the faults. An exception occurs

CSA and VSA Analysis
Acquisition: 04/27/15 18:06:00



(a)

CSA and VSA Analysis
Acquisition: 05/04/15 20:34:00



(b)

Fig. 13. Half order speed frequency on current and voltage signatures: (a) Baseline, and (b) Fault.

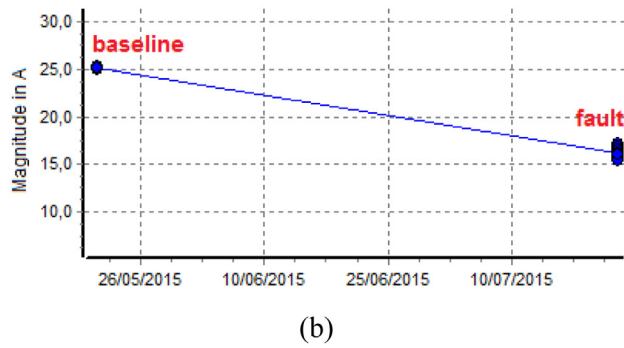
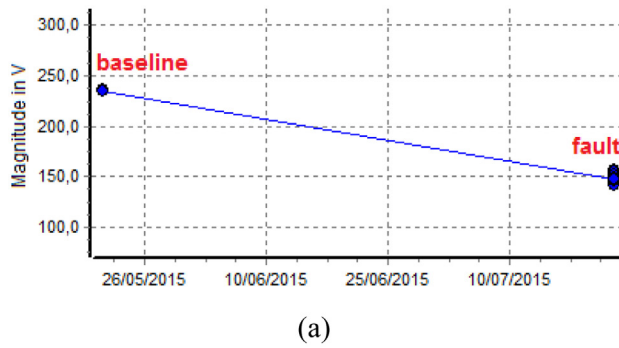


Fig. 15. Trend curve of RMS electrical quantities: (a) RMS voltage, and (b) RMS current.

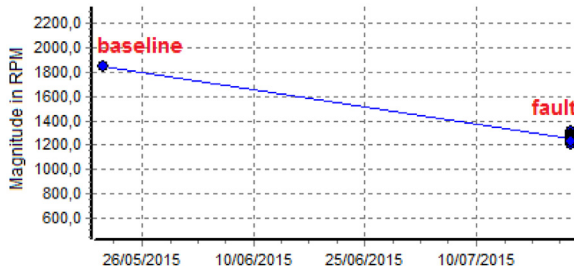


Fig. 16. Trend curve of the rotation speed.

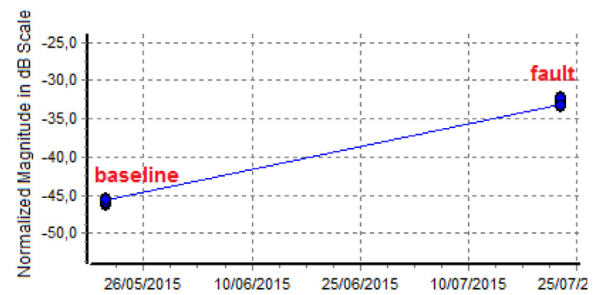


Fig. 18. Trend curve of the rotational frequency on voltage signature.

for the combustion related faults (intake valve failure and piston ring failure), as both of them excites the rotational frequency component. This is because both faults induce the same effect in the shaft of the generator and, as consequence, in the voltages and currents of the generator stator. Thus, both faults present the same failure patterns, which are the multiples of rotation frequency on voltage and current signatures.

Regarding the sources of error in this study, they are mainly related to the signal transduction and acquisition system and possible thermomechanical changes of the machines during the tests. They can be considered in next investigations.

Finally, as mentioned previously, the failure patterns are function of the line frequency and structure features of the synchronous generator. Thus, the obtained failure patterns are not limited to the machines of the scale model laboratory, but can be extended to different types and sizes of internal combustion engine driven generators. Therefore, it is expected that the same failure patterns are valid for in-service units.



Fig. 19. Prototype installed at a Panel of Suape II Power Station.

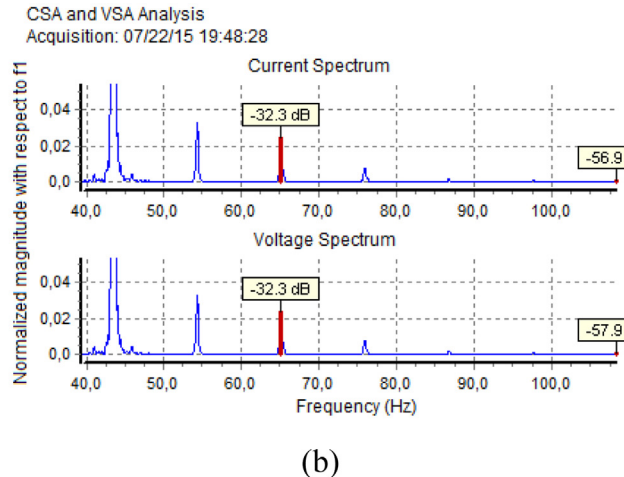
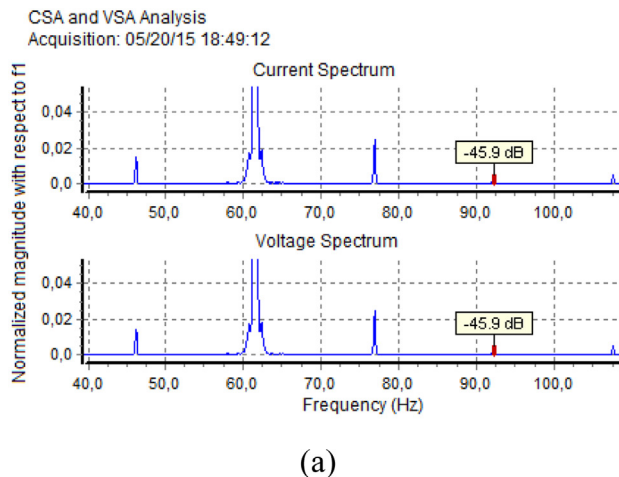


Fig. 17. Rotational frequency on current and voltage signatures: (a) Baseline, and (b) Fault.

7. Application on an actual power station

The developed prototypes are installed at the Brazilian power station Suape II to perform the condition monitoring of two generation units, here called G6 and G11, as part of an R&D project. This section presents the system installation and some examples of acquired real data.

7.1. Prototype installation at Suape II Power Station

The Suape II fossil-fuel power station, owned by Suape Energia, is located in the Northeast Region of Brazil. This biggest internal combustion power station in Brazil is provided with the installed generating capacity of 381.2 MW. The generators of this power plant are salient-pole, 12 poles, and are provided with brushless excitation. There are 17 generation units divided in three hangars. Fig. 19 shows a prototype installed at a panel of Suape II Power Station and Fig. 20 illustrates in-service 28-MVA generation units in a hangar of Suape II.

7.2. ESA analysis of in-service generation units

In order to provide the ESA analysis of the in-service generation units at Suape II Power Station, data acquired of the generator units G6 and G11 were considered. The signals were collected by using the developed prototype. As an observation, the trend curves presented henceforward considered the daily average of the frequency components magnitudes under analysis.



Fig. 20. In-service 28-MVA generation units in a hangar of Suape II Power Station [28].

The first failure patterns analyzed were the third harmonic on voltage and current signatures and the electrical unbalance on EPVA signature, which are patterns for exciter generator unbalance. Fig. 21 shows the trend curve of the third harmonic on voltage and current signatures and Fig. 22 illustrates examples of these components on the electrical signatures. Note that there is not a significant difference between the components of G6 and G11. Fig. 23 shows the trend curve of the electrical unbalance on EPVA voltage and current signatures and Fig. 24 illustrates examples of these components on the EPVA signatures. The electrical unbalance was higher

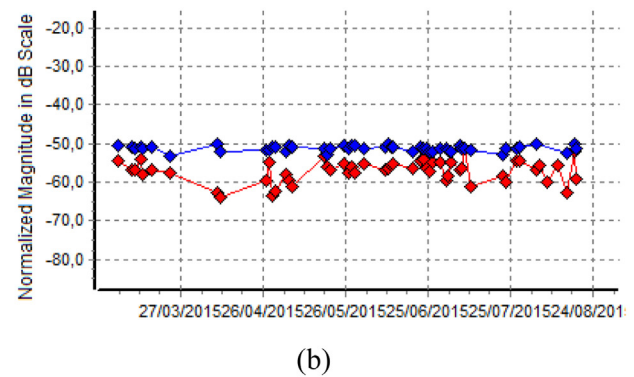
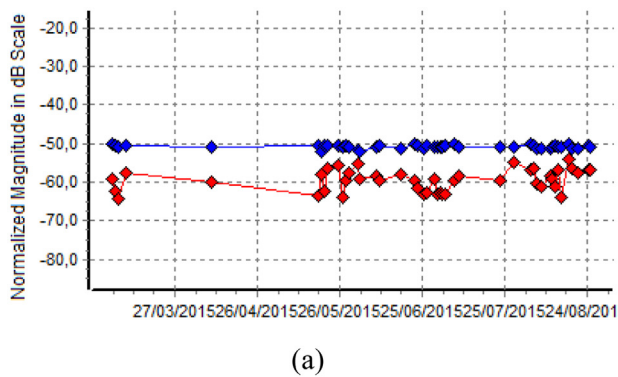


Fig. 21. Trend curve of the third harmonic on voltage (blue) and current (red) signatures: (a) G6, and (b) G11. For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

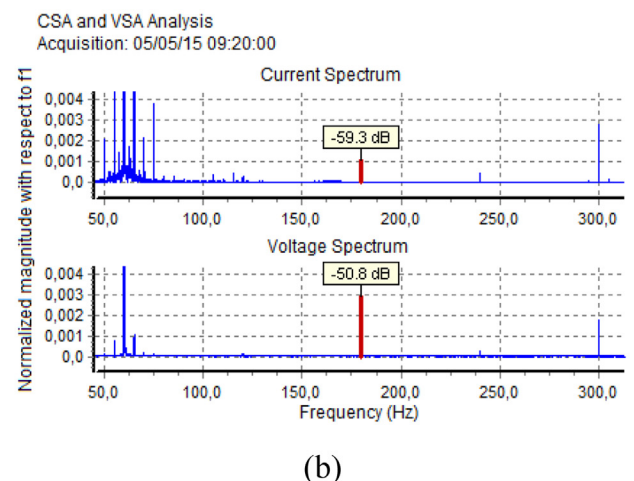
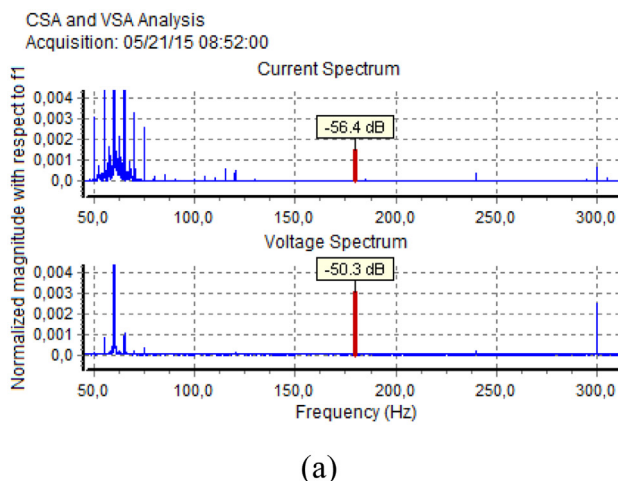


Fig. 22. Third harmonic on current and voltage signatures: (a) G6, and (b) G11.

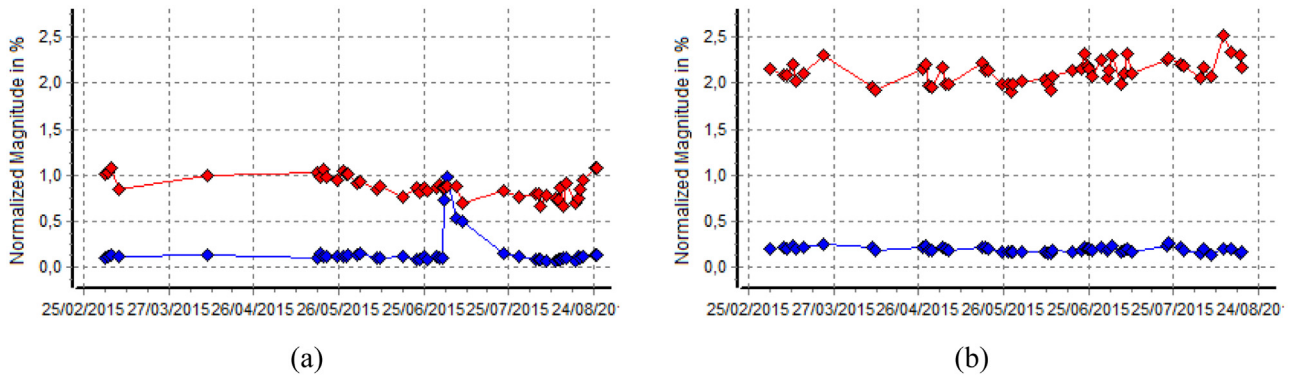


Fig. 23. Trend curve of the electrical unbalance on EPVA voltage (blue) and current (red) signatures: (a) G6, and (b) G11. For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

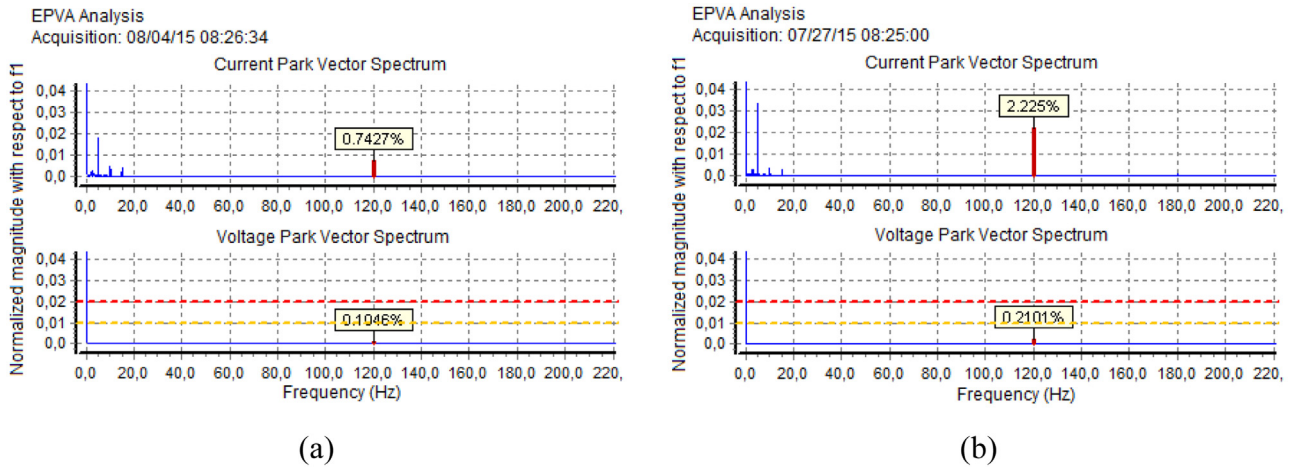


Fig. 24. Electrical unbalance on EPVA current and voltage signatures: (a) G6, and (b) G11.

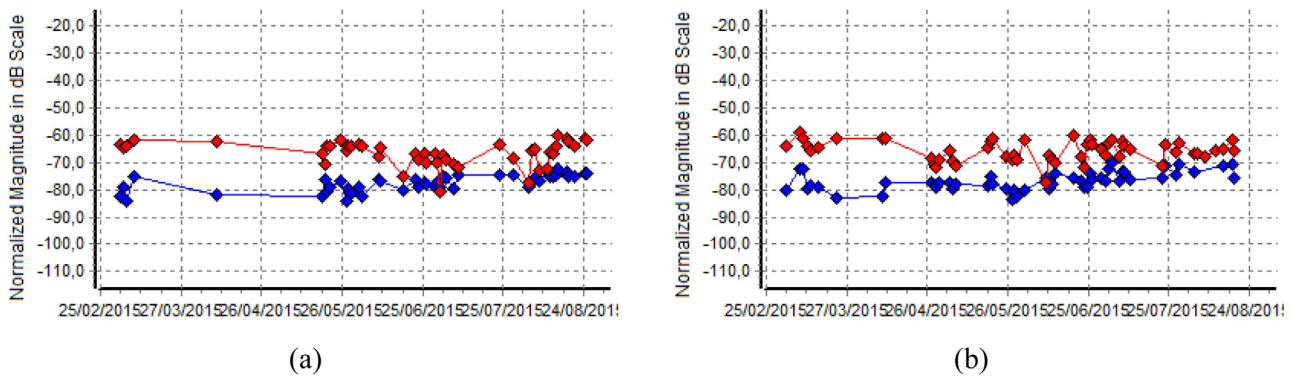


Fig. 25. Trend curve of the second harmonic on voltage (blue) and current (red) signatures: (a) G6, and (b) G11. For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

in G11 than in G6. The current unbalance was about 1.0% for G6 and 2.0% for G11. The voltage unbalance was about 0.1% for G6 and 0.2% for G11. Moreover, there was a peak of 1.0% of voltage unbalance in G6 during this period.

Then, the even harmonics pattern was analyzed, which are indicative of exciter diode short circuit. Fig. 25 shows the trend curve of second harmonic on voltage and current signatures. Fig. 26 illustrates examples of the even harmonics on the electrical signatures. There are not significant changes between G6 and G11 components during the period of analysis.

The rotation speed pattern was analyzed, which is an indicative of intake valve failure and piston ring failure. Fig. 27 shows the trend curve of the rotational frequency on voltage and current signatures and Fig. 28 illustrates examples of these components on the electrical signatures. Note that there are no significant changes between G6 and G11. The current components were about -50 dB and the voltage components were between -80 dB and -70 dB.

Finally, the half order speed frequency pattern was analyzed, which is an indicative of mechanical misalignment. Fig. 29 shows the trend curve of the half order speed frequency on voltage and

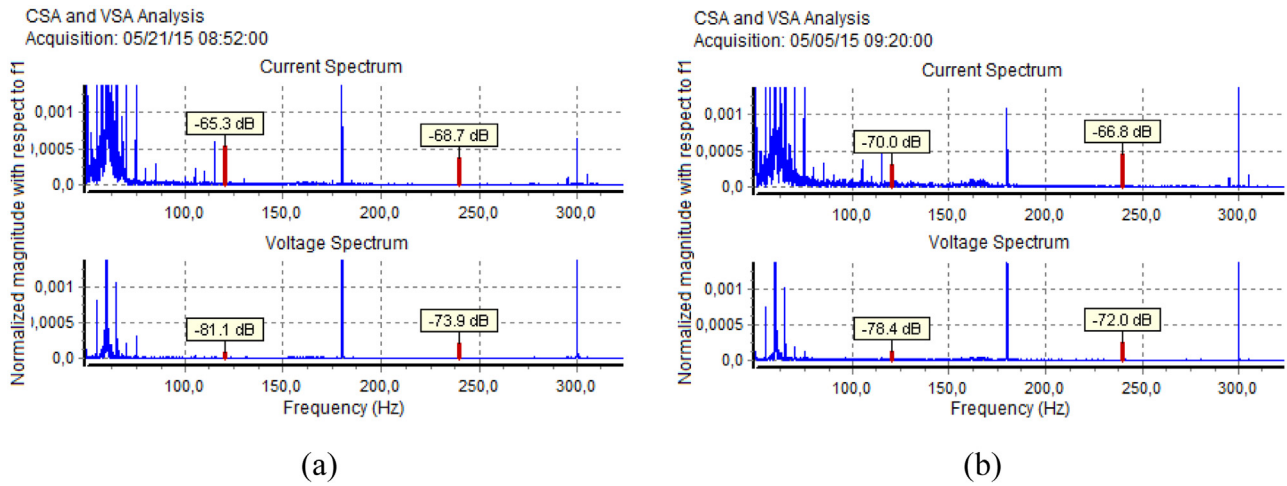


Fig. 26. Even harmonics on current and voltage signatures: (a) G6, and (b) G11.

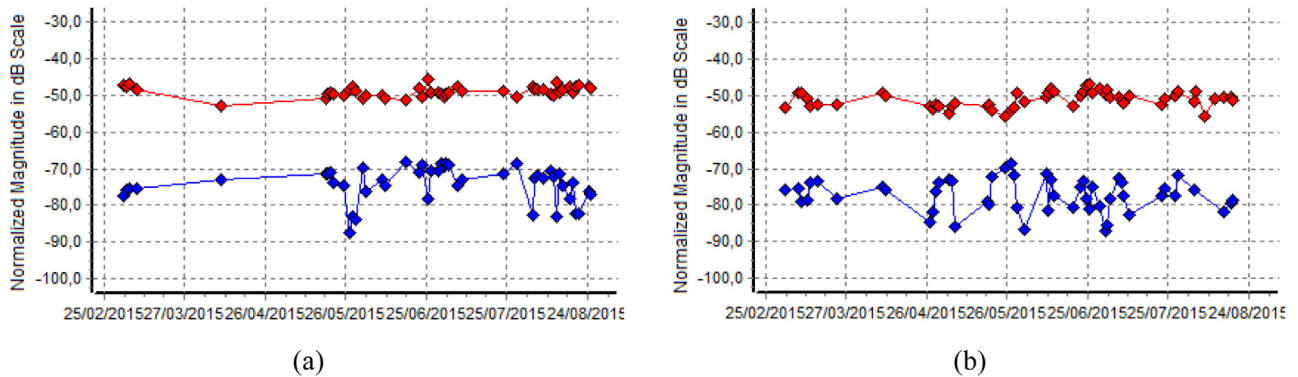


Fig. 27. Trend curve of the rotational frequency on voltage (blue) and current (red) signatures: (a) G6, and (b) G11. For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

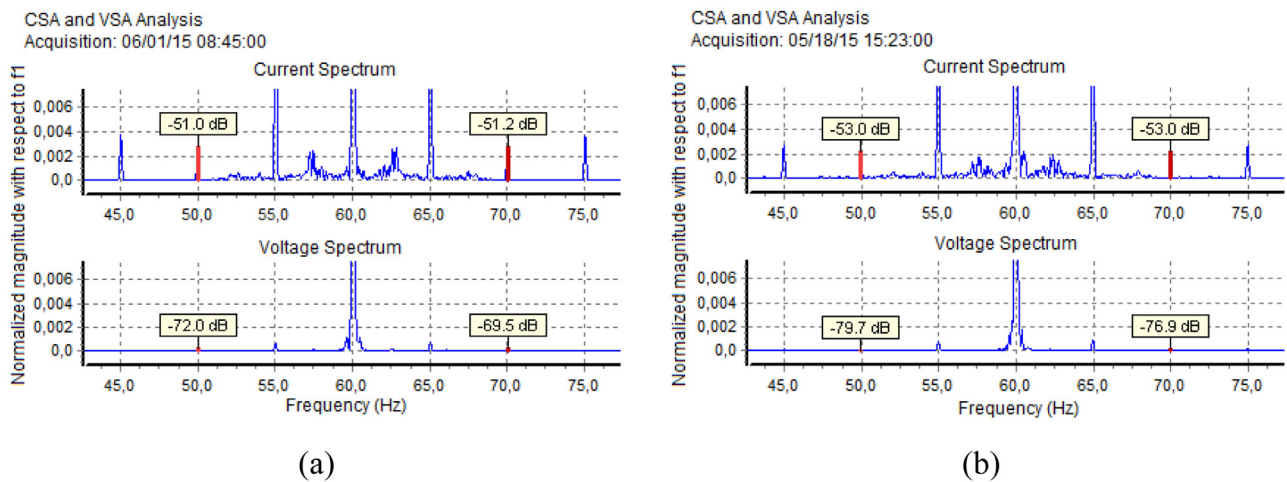


Fig. 28. Rotational frequency on current and voltage signatures: (a) G6, and (b) G11.

current signatures and Fig. 30 illustrates examples of these components on the electrical signatures. There are no significant changes between G6 and G11. The current components were between -40 dB and -30 dB and the voltage components were between -70 dB and -60 dB.

As a final observation, the presented prominent components do not imply the occurrence of a failure. It is necessary to follow the

trend curves before reaching a diagnosis. Sometimes it can take a long time before a failure occurrence in an in-service generation unit. This is the reason why there were no failure examples at in-service generators provided in this paper. However, the system is currently operating and it is important to emphasize that the system and the methodology have already been validated through the experimental tests performed with the scale model laboratory.

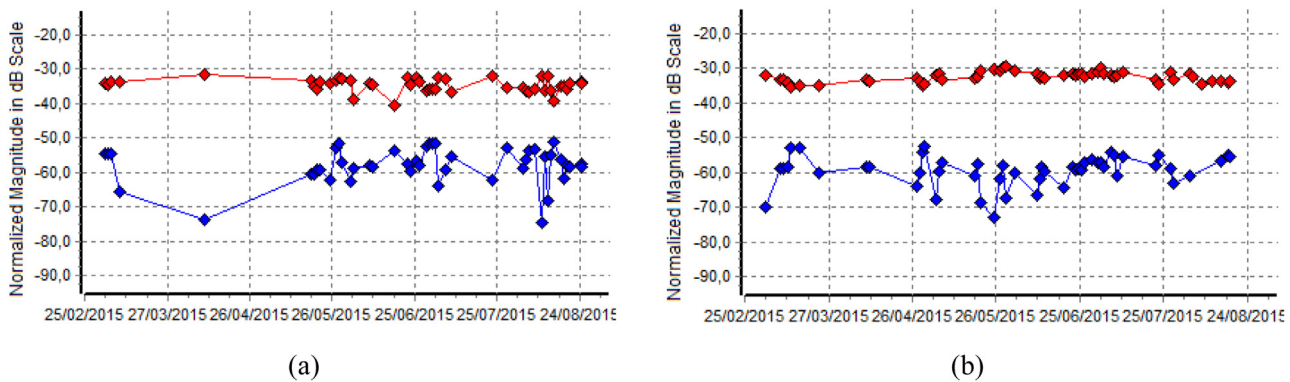


Fig. 29. Trend curve of the half order speed frequency on voltage (blue) and current (red) signatures: (a) G6, and (b) G11. For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

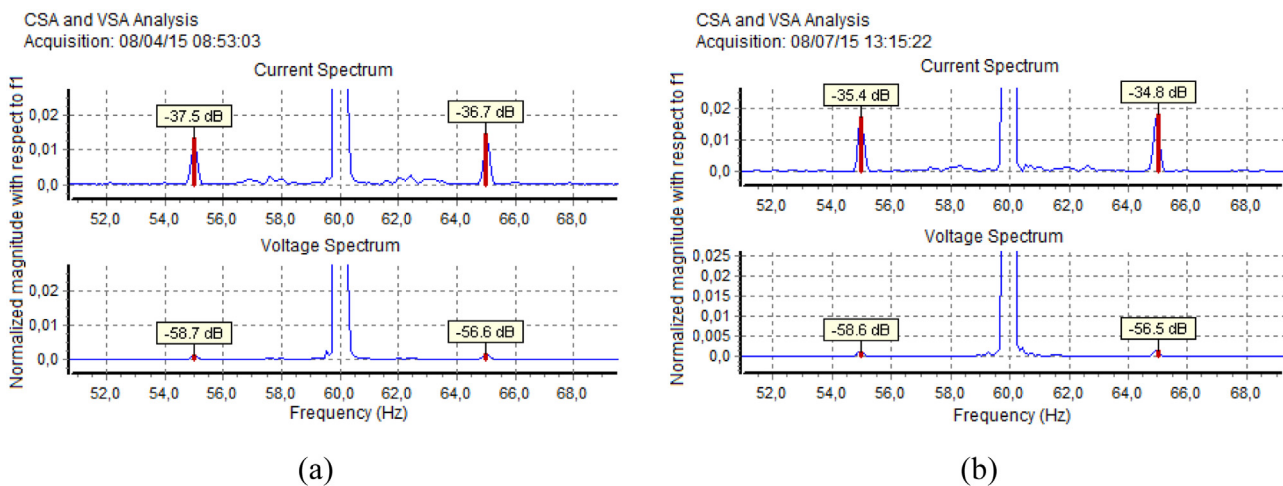


Fig. 30. Half order speed frequency on current and voltage signatures: (a) G6, and (b) G11.

8. Conclusions

This paper presented a methodology and a system for early failure detection and modeling for predictive maintenance of internal combustion engine driven generators by applying ESA. The proposed methodology of detecting faults both in the internal combustion engine and the coupled synchronous generator by analyzing the electrical signature of the generator has been proved with the experimental tests performed with the developed scale model laboratory. Moreover, failure patterns in the electrical signature have been obtained for the tested faults—exciter generator unbalance, exciter diode short circuit, intake valve failure, mechanical misalignment of the engine generator set and piston ring failure. By monitoring continuously the failure patterns, it is possible to detect and discriminate faults. Finally, the presented system is currently working at two in-service engine-generator sets at a Brazilian fossil-fuel power station to perform predictive maintenance. Examples of real data analysis have been provided for both the generation units.

Acknowledgements

The authors would like to thank Suape II Power Station and the following Brazilian Research Agencies: ANEEL R&D, CNPq, and CAPES, for the financial support of this project.

References

- [1] C.P. Salomon, W.C. Santana, L.E. Borges da Silva, G. Lambert-Torres, E.L. Bonaldi, L.E.L. de Oliveira, J.G. Borges da Silva, Induction motor efficiency evaluation using a new concept of stator resistance, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64 (11) (2015) 2908–2917.
- [2] S.I. Yannopoulos, G. Lyberatos, N. Theodossiou, W. Li, M. Valipour, A. Tamburrino, A.N. Angelakis, Evolution of water lifting devices (pumps) over the centuries worldwide, *Water* 7 (2015) 5031–5060.
- [3] M. Valipour, Sprinkle and trickle irrigation system design using tapered pipes for pressure loss adjusting, *J. Agric. Sci.* 4 (12) (2012) 125–133.
- [4] M.M. Khasraghi, M.A.G. Sefidkouhi, M. Valipour, Simulation of open- and closed-end border irrigation systems using SIRMOD, *Arch. Agron. Soil Sci.* 61 (7) (2015) 929–941.
- [5] M. Valipour, Comparison of surface irrigation simulation models: full hydrodynamic, zero inertia, kinematic wave, *J. Agric. Sci.* 4 (12) (2012) 68–74.
- [6] V.C. do Nascimento, G. Lambert-Torres, C.I.A. Costa, L.E. Borges da Silva, Control model for distributed generation and network automation for microgrids operation, *Electr. Power Syst. Res.* 127 (2015) 151–159.
- [7] O. Duque-Perez, L.-A. Garcia-Escudero, D. Morinigo-Sotelo, P.-E. Gardel, M. Perez-Alonso, Analysis of fault signatures for the diagnosis of induction motors fed by voltage source inverters using ANOVA and additive models, *Electr. Power Syst. Res.* 121 (2015) 1–13.
- [8] V.C.M.N. Leite, J.G. Borges da Silva, G.F.C. Veloso, L.E. Borges da Silva, G. Lambert-Torres, Detection of localized bearing faults in induction machines by spectral kurtosis and envelope analysis of stator current, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 62 (3) (2015) 1855–1865.
- [9] S.S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat, D.A. Khaburi, ANN based fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn, *Electr. Power Syst. Res.* 125 (2015) 67–82.
- [10] O.O. Ogidi, P.S. Barendse, M.A. Khan, Fault diagnosis and condition monitoring of axial-flux permanent magnet wind generators, *Electr. Power Syst. Res.* 136 (2015) 1–7.

- [11] J. Sottile, F.C. Trutt, A.W. Leedy, Condition monitoring of brushless three-phase synchronous generators with stator winding or rotor circuit deterioration, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 42 (5) (2006) 1209–1215.
- [12] A.A.A. Esmine, G. Lambert-Torres, Application of particle swarm optimization to optimal power systems, *Int. J. Innov. Comput. Inform. Control* 8 (3A) (2012) 1705–1716.
- [13] A.J.M. Cardoso, *Diagnostics of Three Phase Induction Motor Faults*, Coimbra Editora, Coimbra, Portugal, 1991.
- [14] L.E.L. Bonaldi, J.G. Oliveira, G. Borges da Silva, L.E. Lambert-Torres, Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors, in: Rui Araujo (Ed.), *Induction Motors—Modelling and Control*, InTech, Croatia, 2012, pp. 487–520, <http://dx.doi.org/10.5772/48045>, ISBN 978-953-51-0843-6.
- [15] M.H. Benbouzid, A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 47 (5) (2000) 984–993.
- [16] I. Albizu, I. Zamora, A.J. Mazon, A. Tapia, Techniques for online diagnosis of stator shorted turns in induction motors, *Electr. Power Compon. Syst.* 34 (2006) 97–114.
- [17] R.J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, D. Morinigo-Sotelo, O. Duque-Perez, R.A. Osornio-Rios, M.A. Ibarra-Manzano, Rotor unbalance and broken rotor bar detection in inverter-fed induction motors at start-up and steady-state regimes by high-resolution spectral analysis, *Electr. Power Syst. Res.* 133 (2016) 142–148.
- [18] K. Yahia, A.J.M. Cardoso, A. Ghoggal, S.E. Zouzou, Induction motor broken rotor bars diagnosis through the discrete wavelet transform of the instantaneous reactive power signal under time-varying load conditions, *Electr. Power Compon. Syst.* 42 (2014) 682–692.
- [19] S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso, Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the Extended Park's Vector Approach, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 37 (5) (2001) 1227–1233.
- [20] L.M.R. Oliveira, A.J.M. Cardoso, S.M.A. Cruz, Power transformers winding fault diagnosis by the on-load exciting current Extended Park's Vector Approach, *Electr. Power Syst. Res.* 81 (2011) 1206–1214.
- [21] N. Feki, G. Clerc, Ph. Velez, Gear and motor fault modeling and detection based on motor current analysis, *Electr. Power Syst. Res.* 95 (2013) 28–37.
- [22] H. Penrose, *Electrical Motor Diagnostics for Generators Part 3: Analysis*, ALL-TEST Pro, 2005.
- [23] T. Ilamparithi, S. Nandi, J. Subramanian, A disassembly-free offline detection and condition monitoring technique for eccentricity faults in salient-pole synchronous machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 51 (2) (2015) 1505–1515.
- [24] W. Yucai, L. Yonggang, Diagnosis of short circuit faults within turbogenerator excitation winding based on the expected electromotive force method, *IEEE Trans. Energy Convers.* 31 (2) (2016) 706–713.
- [25] J.C. Urresty, J.R. Riba, L. Romeral, Diagnosis of interturn faults in PMSMs operating under nonstationary conditions by applying order tracking filtering, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 28 (1) (2013) 507–515.
- [26] J.R.R. Ruiz, A.G. Espinosa, L. Romeral, J. Cusidó, Demagnetization diagnosis in permanent magnetic synchronous motors under non-stationary speed conditions, *Electr. Power Syst. Res.* 80 (2010) 1277–1285.
- [27] 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>. (Accessed 22 January 2015).
- [28] Suape Energy—Structure. <http://www.suapeenergia.com.br/estrutura.html>. (Accessed 25 September 2015).