

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE
VIBRAÇÃO EM UNIDADES GERADORAS DA UHE – BALBINA COMO
FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

VILMAR DOMINGOS DA SILVA NETO

DM:037/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VILMAR DOMINGOS DA SILVA NETO

AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE
VIBRAÇÃO EM UNIDADES GERADORAS DA UHE – BALBINA COMO
FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

DM 037/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VILMAR DOMINGOS DA SILVA NETO

**AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE
VIBRAÇÃO EM UNIDADES GERADORAS DA UHE – BALBINA COMO
FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

**UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação
(CIP) Sistema de Bibliotecas da UFPA

Silva Neto, Vilmar Domingos, 1984-

Avaliação da implementação do sistema de monitoração de vibração em unidades geradoras da uhe balbina como ferramenta de manutenção preditiva / Vilmar Domingos Silva Neto. - 2015.

Orientador: Joo Paulo Abreu Vieira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2015.

1. Usinas hidrelétricas - manutenção. 2.
Manutenção produtiva total. I. Título.

CDD 22. ed. 621.312134

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

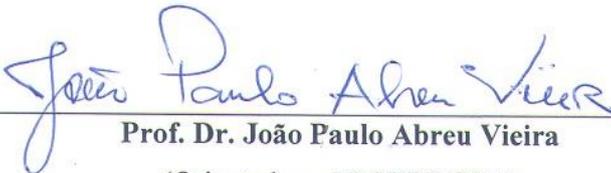
**“AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE
VIBRAÇÃO EM UNIDADES GERADORAS DA UHE - BALBINA COMO
FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA”**

AUTOR: VILMAR DOMINGOS DA SILVA NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 30/10/2015

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira

(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



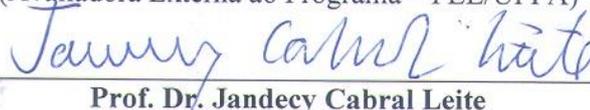
Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof.ª Dr.ª Carminda Célia Moura de Moura Carvalho

(Avaliadora Externa ao Programa – FEE/UFPA)



Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

(Avaliador Externo – ITEGAM)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

“Seja conduzido pelos seus sonhos e não empurrado pelos seus problemas”.

DEDICATÓRIA

A DEUS, por estar intimamente presente em minha vida, me iluminando em todos os momentos, concebendo o dom da vida, e guiando os meus caminhos.

À minha família, pelo apoio incondicional, amor, carinho e amizade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por existir e ser essencial em minha vida, por ser minha fortaleza, autor do meu destino, meu guia, meu socorro, pois nenhum obstáculo é grande demais quando confiamos em Deus.

Agradeço a minha família que é meu maior patrimônio, meus pais, Aildo e Vânia, pelo amor, carinho e total apoio nas minhas decisões durante todos os dias da minha vida. Aos meus irmãos e irmãs: Philippe, Augusto, Melissa e Soraya, pelo amor, amizade, companheirismo, confiança e principalmente por ser uma família.

À minha amiga Iraides e sua família, pelo apoio e intensa ajuda durante a elaboração deste trabalho, mesmo passando por momentos extremamente difíceis.

À minha amiga Priscilla pelo empenho na ajuda a mim prestada, não medindo esforços, e embarcando nesse objetivo tão importante.

Aos professores, Dr João Paulo Abreu Vieira, Dr Ubiratan Holanda Bezerra e Dr Jandecy Cabral Leite, pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos acadêmicos, pelo apoio nas orientações deste trabalho, suporte, dedicação, empenho, contribuições, paciência e principalmente pela confiança em mim depositada.

A Manaus Energia S/A, pelo apoio, parceria e total acesso as informações necessárias à execução deste trabalho.

Ao Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia pela oportunidade, apoio e todo suporte técnico necessário para o desenvolvimento desta dissertação, em especial à Tereza Rodrigues Felipe por sempre estimular a conclusão deste trabalho com sua ajuda e amizade.

Enfim a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, e por fazerem parte da minha vida.

RESUMO

Como o mercado de energia elétrica está cada vez mais competitivo, a automação da manutenção tem se tornado uma necessidade intrínseca para aumentar a eficiência global, do ponto de vista econômico, de usinas hidrelétricas. Esta dissertação de mestrado apresenta uma avaliação da implementação de um sistema de manutenção preditiva de máquinas elétricas (SIMME) em unidades geradoras da UHE-Balbina, localizada no estado do Amazonas, Brasil. O sistema foi implantado para detectar falhas ou defeitos como base na condição operacional das unidades geradoras da usina hídrica. Além disso, o sistema sugere a intervenção da manutenção e ações de emergências quando necessárias. Os resultados mostram que a implementação do sistema SIMME melhorou o desempenho econômico da usina hidrelétrica.

Palavras chave: Manutenção Preditiva, Máquinas Elétricas, Monitoração de Vibração, Diagnósticos.

ABSTRACT

As the development of the electrical power market, the maintenance automation has become an intrinsic need to increase the overall economic efficiency of hydropower plants. This dissertation presents an assessment of the implementation of a predictive maintenance system of electrical machines (SIMME) on Balbina hydroelectric power plant in Amazonas, Brazil. The system was elaborated to predict defects, failures or bad operational states of machines of the hydroelectric plant and suggest maintenance intervention and operational emergency actions. The results show that the SIMME improved the economic performance of the hydropower plant.

Key words: Predictive Maintenance, Electrical Machine, Vibration Monitoring, Diagnostics.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	micrômetros
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AC	Alternating Current
CONF	Confiabilidade
DC	<i>Direct Current</i>
DF	Deslocamento Final
DI	Deslocamento Inicial
DISP	Disponibilidade
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FTD	Ponto Inicial de Detecção de Falha
GB	Giga-Byte
Hz	Hertz (Unidade de Frequência)
IEPE	<i>Integrated Electronic Piezoelectronic</i>
IHM	Interface Homem Máquina
INDI	Indisponibilidade
ISO	International Organization for Standardization
kHz	Kilo Hertz
km	Kilômetro
Lacen	Laboratório Central da Eletronorte
m/s	Metros Por Segundo
m/s^2	Metros Por Segundo ao Quadrado
MHz	Mega Hertz
mm/s	Milímetros Por Segundo
MPF	Modos Potenciais de Falhas
mV	miliVolts
mV/g	miliVolts Por Gravidade
MVA	Mega Volts Amper
MW	Mega Watts
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
$^{\circ}\text{C}$	Graus Centígrados (Unidade de Medida de Temperatura)

PCI	Placa de Circuito Impresso
PF	Ponto de Falha
PMP	Programa de Prevenção Preditiva
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPM	Rotações Por Segundos
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
S/A	Sociedade/Anônima
SIMME	Sistema de Monitoramento de Máquinas Elétricas
SQL	<i>Structured Query Language</i>
TC	Transformador de Corrente
TMEF	Tempo Médio Entre Falhas
TMPR	Tempo Médio Entre Reparos
TP	Transformador de Potência
TPM	Manutenção Produtiva Total
TXFO	Taxa de Falhas de Observadas
UGH	Unidade Geradora Hidrelétrica
UHE	Usina HidroElétrica
VDC	<i>Voltage Direct Current</i>
VF	Valor Final
VI	Valor Inicial
VI	<i>Virtual Instrument</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista aérea da UHE-Balbina.	22
Figura 1.2 Geradores do tipo Umbrella da UHE-Balbina.	22
Figura 2.1 Carta de severidade.	39
Figura 3.1 Instrumentação Virtual.	42
Figura 3.2 Posição dos sensores de vibração.	44
Figura 3.3 Acelerômetro modelo 784A.	45
Figura 3.4 Sensor de proximidade ao lado do anel coletor.	45
Figura 3.5 Sensor de referência instalado no poço da turbina.	46
Figura 3.6 Circuito para um canal.	51
Figura 3.7 Montagem do condicionador.	51
Figura 3.8 Condicionador de 10 canais.	51
Figura 3.9 Montagem do condicionador.	51
Figura 3. 10 Diagrama do Condicionador.	52
Figura 3.11 Medidor de potência Simeas P.	53
Figura 3.12 Transmissor de pressão instalado.	53
Figura 3.13 Local da instalação do transmissor de pressão.	53
Figura 3.14 Sensor indutivo analógico - Anel coletor.	54
Figura 3.15 Sensor de referência no poço da turbina.	54
Figura 3.16 Vista frontal/traseira do painel do computador de aquisição.	55
Figura 3.17 Laços principais do Módulo de Aquisição.	56
Figura 3. 18 Conversão para sinais de vibração.	57
Figura 3.19 Funções do Aplicativo.	58
Figura 4.1 Tela inicial do Módulo Cliente.	62
Figura 4.2 Seleção dos servidores e banco de dados.	63
Figura 4.3 Senha de acesso aos Servidores.	63
Figura 4.4 Configuração dos canais de Vibração.	64
Figura 4.5 Configuração dos canais de Temperatura.	64
Figura 4.6 Configuração dos canais de Pressão.	65
Figura 4.7 Configuração do Sistema.	65
Figura 4.8 Usuário não cadastrado.	66

Figura 4.9 Cadastro de usuários.....	66
Figura 4.10 Legenda dos Pontos Monitorados.	67
Figura 4.11 Mensagem aguardando amostra dos sinais de vibração.....	68
Figura 4.12 Gráfico dos Sinais de vibração.....	68
Figura 4.13 Pergunta sobre o armazenamento das amostras no banco de dados.	69
Figura 4.14 Tela de Registro dos Eventos.	69
Figura 4.15 Tela de pesquisa dos eventos.	70
Figura 4.16 Gráficos do evento selecionado.....	70
Figura 4.17 Tela da leitura das amostras.	71
Figura 4.18 Seleção das Amostras.....	71
Figura 4. 19 Visualização das Amostras.....	71
Figura 4.20 Gráfico dos registros periódicos de um canal de vibração.....	72
Figura 4. 21a Relatório de eventos.	73
Figura 4. 22b Relatório de eventos.	74
Figura 5.1 Árvore de Perdas Operacionais no ano de 2013.....	76
Figura 5.2 Configuração dos canais de vibração.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Tipos de manutenção (ALMEIDA, 1994).	27
Quadro 2.2 Técnicas de Manutenção Preditiva (BARONI, 2002).	32
Quadro 2.3 Parâmetros passíveis de medição em manutenção preditiva (YA' CUBSOHN, 1983).	33
Quadro 2.4 Severidade de vibração definida pela NBR 10082 para as diversas classes de máquinas.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Ilustra os níveis vibratórios estabelecidos com os respectivos alarmes.....	78
Tabela 5.2 Relatório vibração SIMME.....	79
Tabela 5.3 Severidade de vibração segundo a norma ISO – UHE Balbina.....	80
Tabela 5.4 Indicadores dos Resultados de manutenção antes da implantação 2012.	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 Indicadores dos Resultados de manutenção antes da implantação 2012...	81
Gráfico 5.2 Indicadores dos Resultados de manutenção após a implantação 2013.....	81

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTO	21
1.2 HISTÓRICO DA UHE-BALBINA	22
1.3 OBJETIVO GERAL	23
1.3.1 Objetivos específicos	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
CAPÍTULO 2: DEFERÊNCIAS SOBRE MANUTENÇÃO E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	25
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO	26
2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA	29
2.3.1 Principais técnicas de manutenção preditiva	32
2.3.2 Periodicidade das medições	34
2.3.3 Sistemas Especialistas	35
2.4 MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES	35
2.4.1 Nível global de vibração	35
2.4.1.1 Definição do ALARM e TRIP para um sinal de vibração	36
2.4.1.2 Velocidade eficaz de vibração ou velocidade RMS	37
2.4.1.3 Norma ISO 2372, VDI2056 e B54675	38
2.4.2 Sensores	40
2.4.3 Falhas do Sistema Turbina-Gerador	40
CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS da UHE-BALBINA	41
3.1 INTRODUÇÃO	41
3.2 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL	42
3.3 GRANDEZAS PARA MONITORAÇÃO DO GERADOR HIDRÁULICO	43
3.4 DESCRIÇÃO DO HARDWARE	43
3.4.1 Vibração	43
3.4.2 Acelerômetros	44
3.4.3 Medição de Vibração	46

3.5 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	47
3.6 RECURSOS FORNECIDOS	47
3.7 SENSORES INDUTIVOS – TECNOLOGIA	48
3.8 TIPOS: FLUSH OU NÃO-FLUSH	48
3.9 SENSORES UTILIZADOS NA UHE BALBINA	49
3.10 RELAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTO E O SINAL DE SAÍDA	49
3.11 CONECTORES PARA OS SENSORES DE PROXIMIDADE	50
3.12 CONDICIONADOR DE SINAL	50
3.13 POTÊNCIA ATIVA	52
3.14 ROTAÇÃO	54
3.15 PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	54
3.16 COMPUTADORES	55
3.17 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE	55
3.17.1 Módulo Servidor de Aquisição	55
3.17.2 Modos de armazenamento das informações no banco de dados	59
3.17.3 Módulo Servidor de Banco de Dados	59
CAPÍTULO 4: DESCRIÇÃO DO APLICATIVO SIMME	62
4.1 DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS CLIENTE	62
4.2 MENUS	63
4.2.1 Menu Servidor	63
4.2.2 Menu Configuração	63
4.2.3 Menu Exibir	67
4.2.4 Menu Imprimir	72
4.3 RELATÓRIOS	72
4.4 EMISSÃO DE MENSAGEM ELETRÔNICA	73
<i>CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	75
5.1 TÉCNICAS DE COLETA DE DADOS	75
5.2 CUSTOMIZAÇÃO DE PERDAS	76
5.3 CARACTERIZAÇÃO	77

5.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	77
5.4.1 Análise de vibração relatório	78
5.5 IMPLANTAÇÃO DE UM PROGRAMA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA (PMP)	80
5.5.1 Índices após a Implantação do PMP	80
5.6 CUSTOMIZAÇÃO DOS ÍNDICES	82
<i>CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO</i>	84
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	86
<i>ANEXOS</i>	90

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Atualmente, a competição no mercado energético exige soluções que visem aumentar a eficiência e a qualidade da energia elétrica produzida pelas usinas hidrelétricas. Em decorrência dessa competição, as grandes companhias de geração hidrelétrica tiveram que adotar uma nova postura para satisfazer os clientes, no sentido de obter maior participação no mercado e, por conseguinte, melhores resultados.

No Brasil, atualmente, cerca de 75% da energia elétrica produzida tem como fonte as usinas hidrelétricas (UHEs). Considerando a importância dessas unidades para o setor elétrico, o monitoramento das condições de máquinas elétricas tem recebido uma considerável atenção nos últimos anos. Muitas técnicas de monitoramento para detecção de defeitos vêm sendo propostas. Tais técnicas incluem a medição de tensão e corrente estatórica, medição da distância entre rotor e estator (entreferro), densidade de fluxo magnético, vibração, torque de saída e temperatura externa e interna, dentre outros (LIANG *et al.*, 2003).

No atual cenário do sistema elétrico nacional, em que o consumo de energia elétrica aumenta dia a dia, necessitando-se de novos e urgentes investimentos em geração e transmissão de energia elétrica, é cada vez maior a importância da manutenção preditiva. Esse tipo de manutenção visa diminuir as interrupções desnecessárias de máquinas geradoras de energia elétrica e equipamentos de transmissão. A interrupção do fornecimento de energia elétrica causada por falhas em equipamentos de geração ou transmissão de energia elétrica afeta não somente os consumidores domésticos, mas principalmente os setores industriais de serviços e de desenvolvimento tecnológico, que podem sofrer prejuízos consideráveis por necessitarem do fornecimento contínuo de energia elétrica. Dessa forma, com a aplicação de manutenção preditiva, há um aumento na eficiência e confiabilidade do sistema elétrico.

Um sistema confiável de monitoramento proporciona alguns benefícios, como por exemplo, redução do número de falhas, redução do número de interrupções não programadas para manutenção, diminuição do tempo para reparos, redução dos custos de manutenção e operação, aumento da vida útil dos componentes, etc. (RIPPER, 2001). Estas razões possibilitam o surgimento e o desenvolvimento de novos métodos de diagnóstico de falhas em máquinas rotativas.

1.2 HISTÓRICO DA UHE-BALBINA

A usina hidrelétrica de Balbina foi inaugurada no final da década de 1980, está instalada no distrito de Balbina, pertencente ao município de Presidente Figueiredo, no estado do Amazonas, sob jurisdição da Manaus Energia S/A, localizada a 180 km da cidade de Manaus, no rio Uatumã, um dos afluentes do rio Amazonas. A Figura 1.1 apresenta uma vista aérea da referida usina.

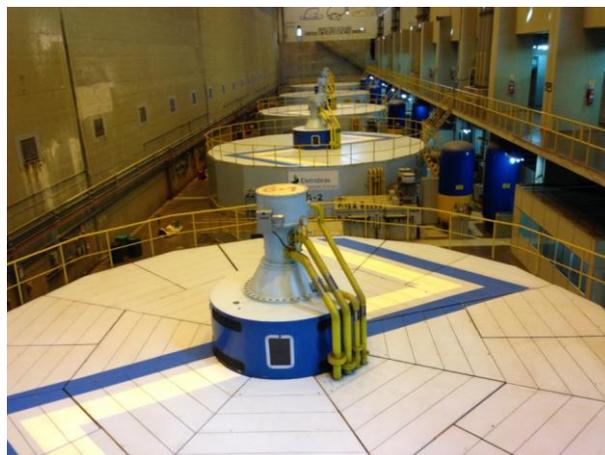
Figura 1.1 Vista aérea da UHE-Balbina.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2012.

A usina possui capacidade de geração de 250 MW de energia elétrica, sendo que são 5 geradores 50 MW cada. Os geradores são do tipo Umbrella de baixa rotação (105,88 rpm), capacidade nominal de 55,5 MVA e tensão nominal de 13,8 kV, e são numeradas de 1 a 5, como observado na Figura 1.2.

Figura 1.2 Geradores do tipo Umbrella da UHE-Balbina.



Fonte: Autor, 2013.

1.3 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como finalidade apresentar uma avaliação da implementação de um sistema de monitoração e análise de vibração em unidades de geradores hídricos para suporte à manutenção preditiva.

1.3.1 Objetivos específicos

- Caracterizar as fases de implementação, envolvendo: operação contínua e de modo confiável à produção de energia, minimização de danos e perdas em sua produção de energia, eliminação de paradas não programadas, produção e fornecimento de energia de qualidade, monitorar o deslocamento relativo em mancais de deslizamento de máquinas rotativas de baixa e alta velocidade gerada pelo uso contínuo de trabalho;
- Análise e verificação de vibrações nos mancais na parte inferior e superior do eixo da turbina;
- Apresentar a importância do sistema como apoio à manutenção preditiva, utilizando-se basicamente sensores de vibração, proximidade, pressão, temperatura, medidores de potência, condicionadores de sinal, microcomputadores, placas de aquisição de dados, módulos em software, como ferramenta de otimização da manutenção preditiva das máquinas elétricas da Manaus Energia S/A;
- Comparar o cenário anterior e posterior à implementação do sistema de monitoramento de máquinas elétricas.

Também é apresentada no decorrer desta dissertação a arquitetura básica de um sistema de aquisição de dados, desde os sensores utilizados até o software aplicativo e a comunicação através da rede Intranet. Para o desenvolvimento dos softwares aplicativos efetuado pelo Lacen, foi utilizada a linguagem gráfica LABVIEW, da National Instruments. Dentre os vários recursos do LABVIEW, destacam-se:

- Programas de controle e comunicação (drivers) com diversos tipos de dispositivos de aquisição de dados, tais como placas de aquisição de dados (placas ADA), placas de comunicação serial e módulos de aquisição distribuídos;
- Uma grande variedade de ferramentas de análise dos sinais adquiridos, tais como análise no tempo e na frequência, filtros digitais, gráficos, comparadores, interface com banco de dados, armazenamento de informações, emissão de relatórios, comunicação e transferência de

dados através de modem, redes de computadores e internet, ferramentas para a construção de telas de interface com o operador dentre outras;

- A arquitetura é do tipo Cliente/Servidor, utilizando-se o protocolo TCP/IP (TCP - Transmission Control Protocol e IP - Internet Protocol), permitindo assim enviar informações a distância via rede.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Em relação à organização, esta dissertação encontra-se estruturada de acordo com os 6 capítulos a seguir:

O Capítulo 1 apresenta uma introdução sobre a importância do tema abordado, a motivação para a realização deste trabalho, um breve histórico e descrição da UHE-Balbina, bem como os objetivos do trabalho

O Capítulo 2 faz uma abordagem sobre manutenção e análise de vibração, com destaque para principais técnicas de manutenção preditiva e níveis de vibração, e respectiva normatização. Também são descritas as principais falhas nos Geradores Hidráulicos.

O Capítulo 3 apresenta a descrição da implementação e funcionamento do sistema de monitoração de máquinas elétricas UHE-Balbina, instrumentação virtual e respectivas características (hardware e software), grandezas para monitoração do gerador hidráulico.

O Capítulo 4 descreve as interfaces do aplicativo do sistema de monitoração de máquinas elétricas, mostrando-se suas telas, seus diversos menus, suas possibilidades de análise e seus relatórios.

O Capítulo 5 faz uma contextualização do tema, procura-se destacar a caracterização da pesquisa e da sua área de atuação, a definição das variáveis de pesquisa, o instrumento de coletas de dados, sua análise e interpretação. Também apresenta uma análise de vibração através do relatório do sistema de monitoramento de máquinas elétricas.

O Capítulo 6 descreve as conclusões do trabalho com base na análise dos resultados. Também apresenta sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2: DEFERÊNCIAS SOBRE MANUTENÇÃO E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo Arato (2004), a manutenção é definida como um conjunto de ações que permitem manter ou restabelecer um bem a um estado operacional específico ou, ainda, assegurar um determinado serviço.

De acordo com Xenos (1998), define-se manutenção como a combinação de ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual, possa desempenhar uma função requerida.

A manutenção está sempre tomando novos rumos e caminhando cada vez mais próxima da operação. Mudanças profundas têm-se apresentado na última década nos mercados, eles estão sendo marcados por conceitos como: globalização, redução de custos e melhoria da qualidade de serviços. Atualmente a gestão é integrada aos objetivos estratégicos da empresa, tendo a produção como foco principal.

No mercado de energia elétrica, em nível nacional, tem-se assistido à desregulamentação do setor, a concessão de serviços, a geração como atividade de risco comercial, competição de preços e a constituição de entidades reguladoras com capacidade técnica e legal para o controle da atividade.

Logicamente estas ações estão motivando o mercado para a competição, redução de preços, com qualidade e continuidade. O impacto desse novo ambiente atinge todos os setores das empresas, incluindo a atividade de manutenção.

Quando se fala de manutenção, muitas vezes o entendimento não é inteiramente adequado, pois esta atividade adquiriu uma grande importância no cenário industrial, e para tal, foram providenciadas implementações significativas a essas atividades. Nesse novo cenário, a manutenção passa a ser uma atividade estratégica que possibilita a plena confiabilidade do funcionamento de determinado processo industrial.

A mudança de mentalidade de manutenção corretiva para a manutenção preventiva, incorporando técnicas de manutenção preditiva, vem ganhando força nos sistemas modernos de manutenção no Brasil. Hoje já é visível o crescimento do interesse de empresas e profissionais ligados aos serviços de manutenção, em busca da utilização das técnicas de manutenção preditiva, tais como termografia, análise de vibração, dentre outras que poderão ser vistas a seguir.

Atualmente a técnica de manutenção deve ser necessariamente desenvolvida sob a estratégia de redução dos tempos de intervenção nos equipamentos, buscando obter o menor tempo de indisponibilidade para o serviço.

2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

A manutenção é executada nas empresas como uma combinação de diversas atividades. Essas atividades podem ser classificadas através de duas abordagens: atividades proativas e atividades reativas. As atividades proativas são aquelas executadas antes das falhas ocorrerem, desenvolvendo ações que antecipem sua ocorrência para não permitir o estado de falha do equipamento. Já as atividades reativas atuam após a ocorrência da falha do equipamento, desenvolvendo ações para restabelecer a disponibilidade do equipamento (MOUBRAY, 1997).

Existem alguns tipos de manutenção mostrados a seguir no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 Tipos de manutenção (ALMEIDA, 1994).

Manutenção							
Preventiva					Corretiva		
Rotina	Inspeção	Sistemática	Preditiva		Seletiva		
Efetuada com o equipamento em operação.	Acompanhamento do estado do equipamento usando sentidos humanos.	Baseada na duração do funcionamento Tempo calendário	Efetuada em função do estado do material		Efetuada após o término da vida útil	Efetuada após defeito e/ou falha do equipamento ou componente	
			Estatístico	Acompanhamento		Programável	Não-Programável
Equipamento Energizado ou Desligado							

- **Manutenção corretiva:**

A manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida (PALLEROSI, 2007).

Pode ser classificada como não planejada ou planejada. A manutenção corretiva não planejada é realizada logo em seguida da ocorrência de uma pane, ocorrendo perda da função do equipamento. Já a manutenção corretiva planejada é utilizada para os equipamentos que não são monitorados (run to fail), ou seja, para os equipamentos que não possuem nenhum tipo de atividade de manutenção programada (PALLEROSI, 2007).

Pode ser usada também em atividades decorrentes da manutenção preditiva. No ponto de vista do sistema produtivo como um todo, pode ser considerado o tipo de manutenção de custo mais elevado devido a sua ocorrência imprevisível e por causar a parada do processo produtivo gerando custos para produção. Não é uma atividade totalmente descartada de uso, exatamente por existirem falhas aleatórias nos equipamentos e, portanto, ser uma atividade importante na rotina da manutenção (BELMONTE & SCANDELARI, 2006).

- **Manutenção preventiva:**

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, a manutenção preventiva é uma intervenção no equipamento baseada em intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos, que tem por objetivo a eliminação ou a prevenção da falha antes de sua ocorrência.

A determinação do tempo tem por objetivo intervir no equipamento em um tempo menor do que o da ocorrência da falha. As atividades executadas durante uma manutenção preventiva são atividades planejadas de acordo com critérios estudados para a característica individual do equipamento, podendo variar entre: verificações gerais do estado de conservação de um equipamento, troca de componentes com vida definida, limpeza do equipamento e seu local de instalação, ajustes e identificação de possíveis desgastes. O objetivo desse tipo de manutenção é antecipar a falha do equipamento, instalação ou sistema de produção, o que implica em paradas da planta, consideradas desnecessárias, porém devem ser levados em conta os benefícios gerados por essas intervenções (PALLEROSI, 2007). Esse tipo de manutenção é muito praticado quando a falha gera uma grande perda de produção ou é um risco de segurança ao meio ambiente.

- **Manutenção preditiva:**

Segundo a norma NBR 5462 (1994), *apud* Pallerosi (2007), a manutenção preditiva é a atividade que "permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados

ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a Manutenção Preventiva e diminuir a Manutenção Corretiva". Pode-se dizer que é baseada nos mesmos objetivos da manutenção preventiva, de antecipar a ocorrência da falha, porém a diferença é que a manutenção preditiva só realiza uma intervenção no equipamento quando detecta, através de técnicas de análises, a potencialidade da falha.

A manutenção preditiva pode ser definida como a atividade de acompanhamento de determinados parâmetros do equipamento que indicam seu desempenho, de forma sistemática, com o objetivo de identificar o exato momento de intervenção do equipamento (KARDEC & CARVALHO, 2002). Esse tipo de manutenção, quando possível, é o mais eficiente, pois permite que o equipamento só pare de operar quando realmente é necessário que isto ocorra, evitando assim “paradas desnecessárias” realizadas pela manutenção preventiva (SLACK *et al.*, 2002). A monitoração do equipamento vai depender de suas características e da identificação das possíveis falhas. Existem diversas técnicas que podem ser empregadas e são realizadas por meio de equipamentos (sensores, analisadores, monitores). Quando uma falha potencial é identificada, a intervenção realizada no equipamento pode ser considerada como uma manutenção corretiva planejada, pois a sua ocorrência já era esperada em algum dado momento.

2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA

O objetivo da manutenção preditiva não é eliminar os níveis de manutenção preventiva ou corretiva, mas minimizá-los de forma prática, técnica e objetiva, por meio do acompanhamento e/ou monitorização de parâmetros, com uso de instrumentação adequada.

Tendo em vista os aspectos mencionados pode-se tecer alguns comentários sobre a manutenção preditiva e refletir sobre as vantagens e aplicações. O alto investimento inicial pode levar a conclusão de que introduzir a manutenção preditiva é dispendioso e, portanto não oferece compensação, optando-se por deixar a situação como está aplicando-se os recursos apenas em máquinas e equipamentos. Os estudos mais detalhados mostram, contudo, que a manutenção preditiva apresenta resultados tão bons que hoje é considerada como atividade produtiva e a principal técnica para levantamentos de parâmetros para ação de manutenção preventiva nos equipamentos (VAN HORENBEEK & PINTELON, 2013).

Conforme Traore *et al.* (2015), dentre as vantagens oferecidas pela manutenção preditiva, pode-se citar:

- Intervenções corretivas programadas que custam menos e evitam perdas de produção;

- Diminuição de problemas porque as máquinas e equipamentos são mantidos dentro de suas conformidades e parâmetros recomendados;
- Aperfeiçoa a manutenção, de forma a diminuir, em alguns casos até eliminar, a necessidade de equipamentos reservas e estoque de peças sobressalentes;
- Oferece dados seguros sobre a frequência e modo das falhas e dos componentes envolvidos, dando margem para um melhor dimensionamento do almoxarifado e da política de materiais e sobressalentes;
- Incentiva e fornece dados para a procura de fornecedores de peças e componentes de melhor qualidade;
- A operação tem conhecimento periódico da situação das máquinas e equipamentos, passando a se envolver e participar da manutenção, reduzindo “as surpresas” e as consequências de reparos urgentes com baixa qualidade;
- De maneira geral, a introdução da manutenção preditiva tem proporcionado uma redução de 15% a 20% do custo, quando comparada com a manutenção clássica;
- Um dos objetivos da manutenção preditiva é detectar defeitos intermediários e orientar a tomada de decisão e as ações, antes que o processo degenerativo conduza o equipamento a um defeito “paralisador”, isto é, a falha.

O termo associado à manutenção preditiva é “predizer”. Esse é o principal objetivo da manutenção preditiva: predizer ou prevenir as falhas nos equipamentos por meio do acompanhamento de diversos parâmetros, permitindo a operação contínua pelo maior tempo possível. Ou seja, a manutenção preditiva privilegia a disponibilidade à medida que, em princípio, não deve promover intervenções nos equipamentos em operação. A manutenção preditiva consiste na técnica de monitoramento da tendência e modo de falha de um equipamento, ou seu componente, pelo acompanhamento de parâmetros indicativos de sua condição. Portanto, alguns indicadores importantes tais como: temperatura, pressão, vibração, vazão, ruídos, vazamentos, desgastes e corrosão servem como subsídios à antecipação das falhas em equipamentos (TRAORE *et al.*, 2015).

Segundo Mirshawka (1991), podemos definir manutenção preditiva segundo dois conceitos ou ‘filosofias’:

- Manutenção Condicional (filosofia europeia) - Manutenção preventiva subordinada a um acontecimento pré-determinado revelador do estado de degradação do material;
- Manutenção Preditiva ou Previsiva (filosofia americana) - Tipo especial de manutenção condicional que permite reajustar as previsões de manutenção por meio da análise da

tendência evolutiva do funcionamento não adequado detectado no equipamento e da estimativa do tempo possível de continuar a utilizá-lo antes da falha. Esta estimativa ocorre a partir da análise periódica do estado do equipamento pelos métodos e técnicas preditivas. Portanto a manutenção preditiva é efetuada em função do estado do material, Baroni (2002), por sua vez, define manutenção preditiva como “qualquer atividade de monitoramento que seja capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências, emissão de diagnóstico e a tomada de decisão”. A ideia básica é, independentemente da técnica empregada, utilizar-se de critérios científicos para coletar, registrar e estudar os dados, com o objetivo de se obter uma decisão gerencial. É imprescindível eliminar o “eu acho que”.

Logo, segundo Sousa (2009), pode-se afirmar que a manutenção preditiva consiste basicamente, em:

- Escolha dos equipamentos a serem monitorados;
- Determinação dos parâmetros e quadro de variação;
- Escolha da metodologia e instrumentação adequadas;
- Utilização de sistemas avançados de planejamento, programação e controle da manutenção;
- Coleta de dados para observação e detecção do defeito em desenvolvimento com:
 - ✓ Equipamento em funcionamento;
 - ✓ Mínima interferência no processo produtivo.
- Coleta dos dados que possibilitem:
 - ✓ Diagnóstico;
 - ✓ Análise da tendência.
- Registros sistemáticos dos parâmetros selecionados;
- Análises periódicas das variações destes parâmetros;
- Diagnósticos destas variações com a predição da natureza, modo e momento de falha;
- Utilização de metodologia e instrumentação de monitorações adequadas para detectar o que muda, isto é, a causa e efeitos dos defeitos intermediários;
- Acumular experiência sobre:
 - ✓ Escolha dos equipamentos produtivos que necessitam de manutenção preditiva;
 - ✓ Determinação dos parâmetros a serem acompanhados;
 - ✓ Controle e análise do quadro de variação desses parâmetros;
 - ✓ Diagnóstico do estado do equipamento com base nesta análise.

- Desenvolver um sistema de informações rápido e eficiente que forneça dados históricos sobre os equipamentos submetidos ao acompanhamento preditivo tais como:
 - ✓ Banco de dados completos das ocorrências: tipos de defeito ou falha, componentes que falharam e os afetados, etc;
 - ✓ Uso de recursos de informática;
 - ✓ Programas especialistas de predição e análise de tendências.

2.3.1 Principais técnicas de manutenção preditiva

Em termos práticos, uma técnica de manutenção preditiva, em princípio, deve atender aos seguintes requisitos:

- Permitir a coleta de dados com o equipamento em funcionamento, com o mínimo de interferência possível no processo de produção;
- Permitir a coleta dos dados que possibilitem a análise de tendência. Poderíamos classificar as técnicas de manutenção preditiva pela grandeza medida – vibração, temperatura, corrente elétrica, etc, ou pelo defeito – vazamento, corrosão, baixa isolamento etc. Poderíamos ainda classificá-las pela aplicabilidade – caixas de engrenagens, sistemas hidráulicos, máquinas elétricas etc. Apenas para efeito de estudo, classifica-se as técnicas mais importantes em famílias de especialização, quadro 2.2 (BARONI, 2002).

Quadro 2.2 Técnicas de Manutenção Preditiva (BARONI, 2002).

Radiações Ionizantes Raios X e Gamagrafia	Energia Acústica Ultrassom e Emissão acústica
Energia Eletromagnética Partículas magnéticas Correntes parasíticas	Fenômenos de Viscosidade Líquidos penetrantes
Inspeção Visual Endoscopia ou Boroscopia	Análise de Vibrações Nível global, Espectro de vibrações, Pulso de choque
Deteccção de Vazamentos	
Análise de óleos lubrificantes ou isolantes Viscosidade, Número de neutralização (acidez ou basicidade), Teor de água, Insolúveis, Contagem de partículas, Metais por espectrometria por infravermelho, Cromatografia gasosa, Tensão interfacial, Rigidez dielétrica, Ponto de fulgor	Análise de Temperatura – Termometria Temperatura convencional Indicadores de temperatura Pirometria de radiação Termografia
Ferrografia	Verificação de Geometria

Ferrografia quantitativa Ferrografia analítica	Metrologia convencional Alinhamento de máquinas rotativas
Ensaio Elétrico Corrente, Tensão, Isolação, Perdas dielétricas, Rigidez dielétrica, Espectro de corrente ou tensão	Forças Células de carga, Teste de pressão, Teste hidrostático, Teste de vácuo, Detecção de trincas

Em princípio, podemos classificar qualquer técnica de manutenção preditiva como sendo um ensaio não destrutivo. Afinal nada é destruído na máquina, apenas medimos seus parâmetros - temperatura ou vibração, por exemplo. As técnicas do quadro 2.2 são capazes de detectar eventuais defeitos ou falhas de funcionamento sem a necessidade de interrupção do processo produtivo e de modo que a intervenção corretiva possa ser programada com antecedência suficiente, proporcionando os seguintes benefícios:

- Aumento da segurança e da disponibilidade dos equipamentos, com redução dos riscos de acidentes e interrupções inesperadas da produção;
- Eliminação da troca prematura de componentes com vida útil remanescente ainda significativa;
- Redução dos prazos e custos das intervenções, pelo conhecimento antecipado dos defeitos a serem corrigidos;
- Aumento da vida útil das máquinas e componentes pela melhoria das condições de instalação e operação.

A análise estatística dos dados coletados pela manutenção preditiva permite ainda:

- Identificar equipamentos com problemas crônicos e orientar a sua correção;
- Avaliar a eficácia e a quantidade dos serviços corretivos e propor programas de treinamento e a adoção de novas tecnologias, visando o seu aprimoramento.

Outro dado de grande relevância é a monitoração de vibração, que é muito importante para avaliar a saúde de uma máquina e isso contribui bastante para prever e impedir falhas nos equipamentos industriais (LU & HWANG, 2012).

O quadro 2.3, a seguir, exemplifica alguns parâmetros passíveis de serem medidos em manutenção preditiva.

Quadro 2.3 Parâmetros passíveis de medição em manutenção preditiva (YA' CUBSOHN, 1983).

Parâmetro a ser medido	Natureza da falha ou defeito a ser detectado
Amplitude de deslocamento da vibração	Desbalanceamento, desalinhamento, falta de rigidez, acoplamento defeituoso, correias frouxas ou gastas, eixos deformados, desajustes, turbulência

Parâmetro a ser medido	Natureza da falha ou defeito a ser detectado
Amplitude de velocidade da vibração	Mancais ou engrenagens deterioradas
Amplitude de aceleração da vibração	Estado mecânico dos rolamentos, atrito excessivo entre os componentes, falta de lubrificação, instabilidade do filme de óleo em mancais de deslizamento
Frequência da vibração	Dado complementar à medição de qualquer característica da vibração, indispensável na determinação de qualquer problema detectado
Fase da vibração	Desbalanceamento dinâmico, folga excessiva, partes frouxas ou soltas
Nível de ruído	Rolamentos ou engrenagens deterioradas, desgastes, cavitação, turbulência, aumento do atrito
Fugas	Deterioramento de selos, juntas e gaxetas, perdas de pressão
Espessura	Corrosão ou erosão em tanques e tubulações
Temperatura	Lubrificação inadequada, aumento do atrito, sobrecarga, desalinhamento de mancais, produção excessiva de calor em componentes elétricos
Pressão	Deterioramento de rotores, bloqueio de tubulações, válvulas travadas

2.3.2 Periodicidade das medições

A frequência das medições pode ser estabelecida considerando-se alguns fatores:

- Medição normal ou de rotina, que é determinada em função de alguns fatores: experiência acumulada sobre falhos anteriores e históricos do equipamento; frequência de manutenção já estabelecida; existência de monitores que garantam o controle permanente da máquina; recomendação do fabricante da máquina.
- Medição excepcional ou especial, que é determinada em função de alguns fatores: iminência de falhas ou mudança nas características físicas do equipamento que exijam um controle maior de seu funcionamento; modificações nas condições de serviço ou sobrecarga do equipamento; falta de informações sobre o histórico do equipamento; verificações efetuadas antes e depois de um reparo com o propósito de determinar níveis de comparação para futuras medições.

Comprovadamente, a utilização da análise de vibração possibilita que esta modalidade de manutenção se apresente como um eficiente programa de controle de funcionamento de máquinas.

2.3.3 Sistemas Especialistas

Os especialistas são responsáveis por diagnósticos sobre o estado de funcionamento de máquinas. Geralmente possuem um vasto conhecimento em construção e projetos de máquinas, onde dominam os procedimentos de reparos e funcionamento dos equipamentos.

Eles são instruídos para o monitoramento de máquinas ou supervisão da instrumentação que as mesmas utilizam.

A categoria do conhecimento do comportamento físico do equipamento adota uma variedade de conceitos provenientes da estática, dinâmica, cinética, comportamento mecânico dos materiais, dinâmica dos fluidos, transferência de calor, matemática, dinâmica de rotores, entre outras que venham contribuir para o entendimento de funcionamento da máquina em estudo.

2.4 MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES

Determinados parâmetros, como tensão mecânica, deslocamento, aceleração, velocidade, frequência e amortecimento, os quais podem ser medidos por transdutores, caracterizam as vibrações mecânicas.

Há diversos tipos de sensores para mensurar vibrações: sensores de deslocamento, sensores de velocidade, acelerômetros, sensores de fase e de frequência.

Para selecionar qual tipo de sensor que se deve utilizar, é preciso analisar diversos fatores, sendo que os fundamentais são a faixa de frequência que será medida e o tipo de análise que se vai fazer com os dados coletados (MUSZYNSKA, 1995). Vale ressaltar que o rotor é a principal fonte de vibração da máquina rotativa.

2.4.1 Nível global de vibração

É um dos métodos mais simples e bastante utilizado para efetuar o acompanhamento ou até mesmo o controle da vibração. Trata-se da monitoração de um valor global medidos em pontos críticos da máquina, sendo que o principal ponto de medição são os mancais. Esse valor é um sinal de resposta da estrutura devido às fontes excitadoras proveniente da dinâmica do funcionamento do equipamento, logo, ele representará a medida do seu estado.

Existem dois métodos utilizados para o cálculo da severidade de vibração em máquinas rotativas que são objeto de normatização por organizações internacionais, que possibilita fazer

comparações com máquinas semelhantes. O primeiro método utiliza medidas de vibrações absolutas em partes estacionárias do equipamento. O outro método utiliza a medida de deslocamento do eixo como critério de avaliação da condição de funcionamento do equipamento. A escolha do tipo de método que se deve adotar depende do tipo e complexidade do equipamento, faixa de frequência que se deseja a análise, fontes e frequências de ruído, velocidade de operação, fundação onde a mesma está montada e tipos de mancais.

O acompanhamento e monitoração utilizando valores de severidade podem ser feitos de duas maneiras: a primeira pode-se acompanhar e comparar a magnitude das severidades medidas utilizando tabelas confeccionadas por órgão de normatização internacionais, onde a base de dados foi obtida pela análise estatística de vários casos e máquinas semelhantes. O segundo critério leva em consideração a variação local do valor medido, isto é, uma mudança do valor se comparado com medidas anteriores realizadas durante a operação do equipamento. Geralmente são definidos quatro níveis de severidade para classificar a condição do equipamento. Segundo a norma ISO esses níveis são: Nível A - Boas condições; Nível B - Aceitável para operação continuada; Nível C - Limite tolerável; Nível D - Não permissível.

2.4.1.1 Definição do ALARM e TRIP para um sinal de vibração

Para longos tempos de operação de equipamentos “chaves” na cadeia produtiva ou de alto custo de manutenção é conveniente definir valores de ALARM e TRIP relacionados a magnitudes de severidade de vibração. Desta maneira, níveis de ALARM e TRIP podem ser estabelecidos para os equipamentos somente utilizando os valores de severidade globais. A definição desses valores, conforme citado anteriormente, podem ser feitos por análise de tabelas normatizadas ou pela dinâmica da mudança da magnitude de vibração medida.

Segundo a norma ISO 7919-2, o nível de alarme e trip são respectivamente:

- **ALARM:** proporciona uma advertência que um determinado valor definido de vibração está alcançando ou uma mudança significativa na magnitude do mesmo, quando isto ocorrer, uma ação remediadora é necessária. Em geral se uma situação de alarme ocorrer o equipamento pode continuar em operação por um determinado período enquanto que a investigação é conduzida para identificar a razão para a mudança da severidade de vibração e definir qualquer ação reparadora.
- **TRIP:** Especifica a magnitude de vibração máxima que nunca deve ser ultrapassada durante a operação da máquina, pois, causará danos a mesma. Se o valor do TRIP for

excedido, imediatamente ações devem ser tomadas para diminuir o nível da severidade de vibração, ou a máquina deve ser retirada de operação imediatamente.

O valor definido para o ALARM pode ser consideravelmente maior ou menor para diferentes máquinas. A norma ISO recomenda que os valores de ALARM devam ser 25% maior que o valor do limite superior da zona B. Se os valores admissíveis de severidade são baixos, o valor do ALARM pode ser definido abaixo da zona C.

Os valores para o TRIP também possui diferenças para as máquinas e não é possível obter uma norma precisa para os valores absolutos de TRIP. Em geral o valor do TRIP se encontra dentro da zona C ou D, conforme quadro 2.4.

Outra maneira de se estabelecer níveis de ALARM e TRIP é utilizando o critério da variação dinâmica dos valores globais. O nível de ALARM, para um monitoramento periódico, pode ser estabelecido por um valor quando houver uma variação significativa da severidade de vibração, podendo ser indicativo que uma possível falha irá ocorrer. Em geral, define-se uma variação da ordem de 3dB em relação ao nível anterior, ou seja, se $X(i)$ for o valor da severidade na inspeção atual, e $X(i-1)$ for o valor obtido na inspeção anterior, então considerará alarme conforme equação 2.1 (ARATO, 2004):

$$20 \log_{10} \left(\frac{X_i}{X_{i-1}} \right) \geq 3 \quad (2.1)$$

Uma variação de 3dB entre medidas consecutivas é um indicativo de um avanço rápido da falha e o período de monitoramento deve ser reduzido visando a gestão da manutenção e a não-quebra do equipamento. Apesar das normas e outras regras de monitoração e definição de níveis de ALMARM e TRIP, pode-se também obter tais valores específicos para cada equipamento através de históricos e análises estatísticas dos dados de monitoração referente aos mesmos de forma a tornar o diagnóstico mais fidedigno para o equipamento em questão.

2.4.1.2 Velocidade eficaz de vibração ou velocidade RMS

A velocidade RMS para um sinal contínuo pode ser calculada pela equação 2.2:

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 \cdot dt} \quad (2.2)$$

Onde:

v_{ef} : velocidade eficaz de vibração ou velocidade RMS; T: Período; $v(t)$: sinal de vibração adquirido.

O parâmetro a ser medido é a velocidade de vibração absoluta sobre as partes fixas das máquinas, preferencialmente os mancais. Para um sinal discreto a equação 2.2 é utilizada bloco a bloco e ponto a ponto do bloco. Após obter a velocidade RMS de cada bloco calcula-se a média nas equações 2.3 e 2.4. Tem-se então:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{NPB} \cdot \sum_0^{NPB} v(t)^2} \cdot \frac{1}{TA} \quad (2.3)$$

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{NPB} \cdot \sum_0^{NPB} v(t)^2} \quad (2.4)$$

Onde:

TA: taxa de aquisição; NPB: número de pontos por bloco.

O parâmetro a ser medido é a velocidade de vibração absoluta sobre as partes fixas da máquina, preferencialmente os mancais. Neste caso, o valor global escolhido como unidade de medida para indicação da severidade de vibração, o valor eficaz da velocidade, ou simplesmente velocidade RMS (v_{ef}) não é representado por uma escala de valores única. Isto se deve a grande diversidade de formas, massa, montagem e condições operacionais dos equipamentos, o que acarreta valores da velocidade RMS diferentes para níveis de severidade aceitáveis (ARATO, 2004). Devido a essa variedade de equipamentos os mesmos são subdivididos em classes em algumas normas que serão descritas a seguir.

2.4.1.3 Norma ISO 2372, VDI2056 e B54675

A VDI2056 é uma norma alemã. A norma ISO 2372 é baseada na VDI2056, ambas dividem as máquinas nas seguintes classes:

- Classe I – máquinas pequenas, com acionamento por motor elétrico diretamente acoplado, potência máxima de 15kW.
- Classe II – máquinas médias, do tipo Classe I, com potência maior que 15kW, até 75kW. Motores ou máquinas montadas rigidamente até 300kW.
- Classe III – Máquinas motrizes grandes e outras máquinas grandes (>75kW), com massas rotativas montadas sobre fundações rígidas e pesadas.

• Classe IV – máquinas do tipo Classe III, montadas sobre fundações relativamente flexíveis.

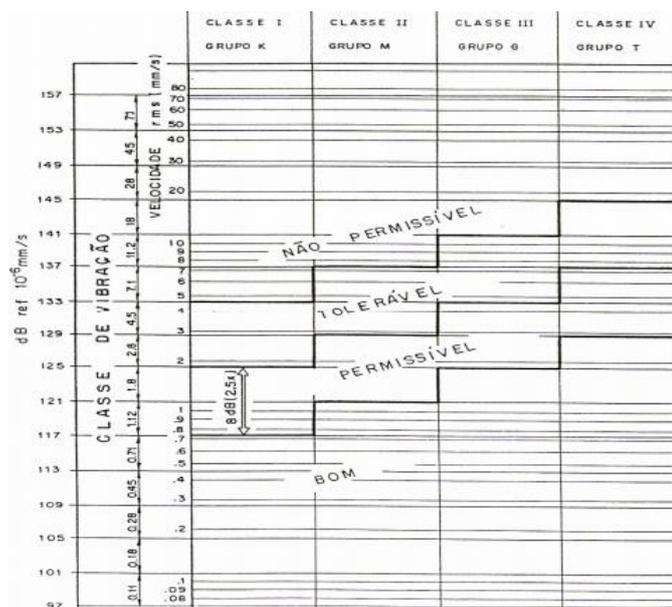
O quadro 2.4 apresenta a escala publicada na NBR 10082, baseada na norma ISO 2372/74, segundo a qual a severidade de vibração é classificada em faixas.

Quadro 2.4 Severidade de vibração definida pela NBR 10082 para as diversas classes de máquinas.

Velocidade RMS (mm/s)	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71	B	B	A	A
1,12				
1,8	C	B	B	B
2,8				
4,5	D	C	C	B
7,1				
11,2	D	D	D	C
18				
28	D	D	D	D
45				

Os limites propostos pela ISO 2372, VDI2056 e B54675 são dados pela carta de severidade, figura 2.1 a seguir.

Figura 2.1 Carta de severidade.



Fonte: Normas ISO 2372, VDI2056 e B54675, 2013.

2.4.2 Sensores

Conforme a Norma ISO (International Standards Organization) 7919, a grandeza mais empregada para medir vibração no eixo é o deslocamento, o qual pode ser medido de forma absoluta e relativa. Os mancais guias ou de escora são pontos de medição de vibração. Outra fonte é o núcleo do extrator.

2.4.3 Falhas do Sistema Turbina-Gerador

Analisando-se as vibrações, pode-se monitorar continuamente a condição de máquinas elétricas rotativas e detectar falhas que comprometam seu funcionamento. Alguns problemas que podem ser detectados serão descritos a seguir.

- Desbalanceamento: ocorre quando há uma distribuição de massas desigual ao longo do eixo do centro de massa do rotor;
- Desalinhamento: falha bastante comum e inerente ao acoplamento entre dois eixos em uma máquina. Pode ser angular ou linear;
- Excentricidade: resultado de desalinhamento ou desbalanceamento, produzindo vibrações radiais e axiais;
- Roçamento do rotor: ocasiona ruído sonoro e em altas frequências e surge quando o eixo rotativo entra em contato com partes estacionárias da máquina;
- Problemas em mancais de deslizamento: relacionam-se à lubrificação e folgas que aparecem na estrutura do mancal.

Além desses problemas de origem mecânica, podem surgir problemas de origem elétrica e devido às excitações hidráulicas (SCHEFFER & GIRDHAR, 2004).

CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS DA UHE-BALBINA

3.1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Monitoramento de Máquinas Elétricas (SIMME) foi desenvolvido pelo Laboratório Central da Eletronorte (Lacen) para as seguintes finalidades:

- Disponibilizar para a Manaus Energia S/A um Sistema de Monitoração on-line de Geradores Hidráulicos confiáveis, simples operação, baixo custo quando comparado com os sistemas comerciais disponíveis no mercado e com a interface homem-máquina elaborada de acordo com as necessidades das equipes de manutenção e operação;
- Disponibilizar informações continuamente, ativando alarmes e enviando mensagens eletrônicas;
- Reduzir os custos homem-hora de coleta de sinal, análise e emissão de relatórios por especialistas;
- Fornecer informações confiáveis para as equipes de operação/manutenção, através de medidas e análises de sinais;
- Registrar em banco de dados com eventos, tendências, gráficos, etc, de forma que fique registrado todo o histórico dos compensadores;
- Reunir o conhecimento das equipes distintas sobre o compensador num módulo inteligente de auxílio ao diagnóstico, fornecer indicações de defeitos a partir de informações em banco de dados.

O SIMME é composto das seguintes partes:

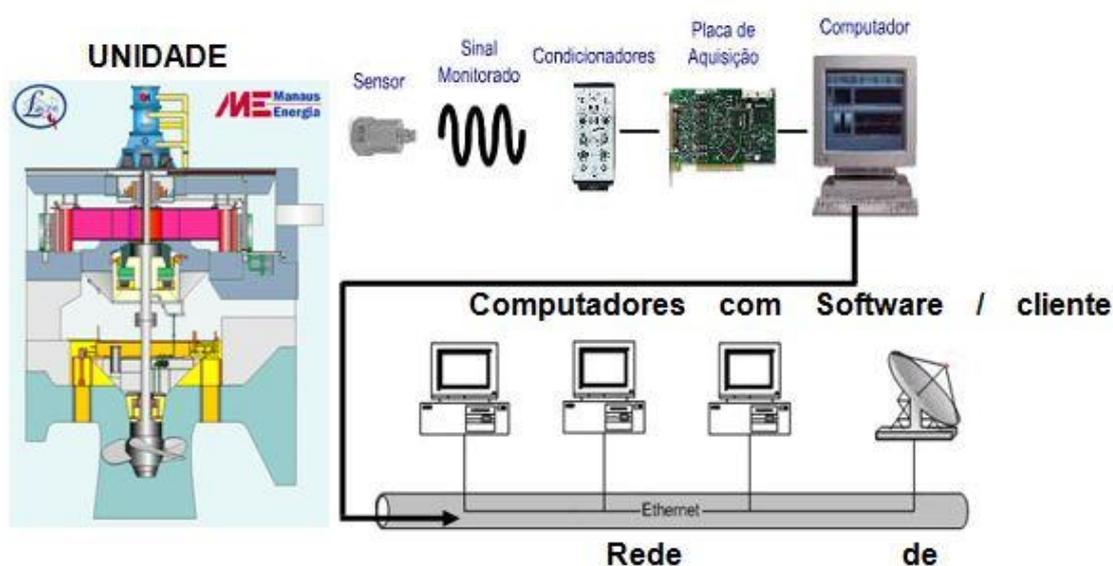
- **HARDWARE**
 - ✓ Fontes, sensores, transmissores e condicionadores de sinais;
 - ✓ Computadores de aquisição, banco de dados, placas de aquisição de dados, placas seriais, módulos Field-Point, cabos, etc.
- **SOFTWARE**
 - ✓ Módulo Servidor de Aquisição de Dados;
 - ✓ Servidor de Banco de Dados;
 - ✓ Módulo Inteligente de Auxílio ao Diagnóstico;
 - ✓ Módulo Cliente.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

A concepção do Sistema baseou-se no conceito de “Instrumentação Virtual” (National Instruments, 2002).

Desta forma, utiliza-se uma parte de hardware, tais como fontes sensores, transmissores e condicionadores de sinal para a coleta de sinais e dados das diversas grandezas monitoradas. Estes sinais são digitalizados por placas de aquisição de dados, tratados e analisados por aplicativos de software que substituem a instrumentação convencional, figura 3.1.

Figura 3.1 Instrumentação Virtual.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

A rede local da hidrelétrica consiste de um computador Servidor de Aquisição de Dados e um computador Servidor de Banco de Dados. No computador Servidor de Aquisição de Dados são recebidos os dados provenientes dos sensores localizados no gerador. Nele é executado o Módulo de Aquisição de Dados, que é um aplicativo que realiza a aquisição e análise dos sinais, gravação de eventos segundo determinadas regras, informações de tendências, transmissão dos sinais, envio de mensagens eletrônicas com informações do gerador, etc.

O Módulo Cliente pode ser instalado em qualquer computador localizado na rede intranet da Manaus Energia S/A. O Módulo Cliente permite a configuração do sistema por determinados usuários, recebe os sinais enviados pelo Servidor de Aquisição, emite alarmes, analisa sinais, emite relatórios, acessa o Servidor de Banco de Dados e executa o Módulo de Auxílio ao Diagnóstico, que é um programa que analisa os eventos registrados segundo as regras pré-estabelecidas pelos especialistas.

3.3 GRANDEZAS PARA MONITORAÇÃO DO GERADOR HIDRÁULICO

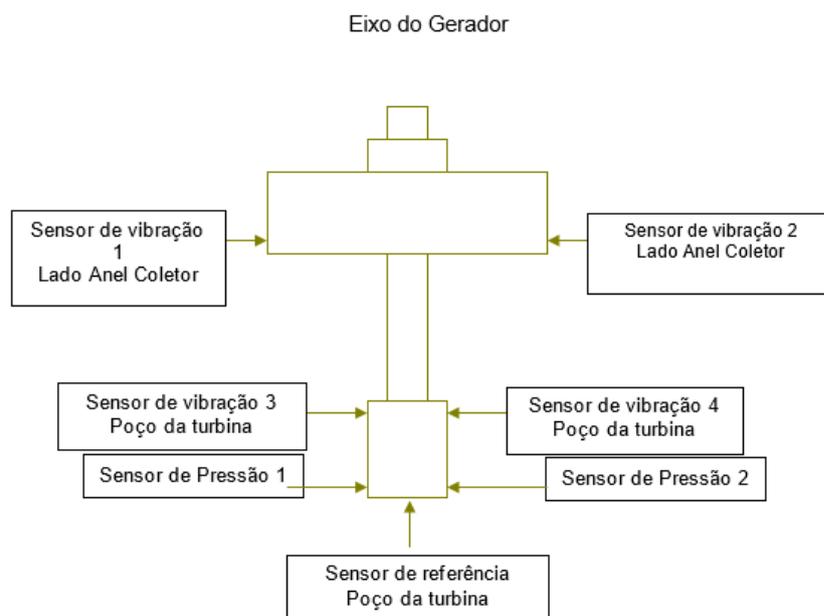
A respeito do gerador hidráulico há diversas grandezas mecânicas, elétricas e térmicas que podem ser monitoradas para verificação do estado operativo, avaliação do desempenho e de tendências. Definiram-se algumas grandezas para serem monitoradas inicialmente. Os valores relacionados com essas grandezas são medidos através de sensores e transdutores, resultando em formas de onda e medições simples que são condicionadas, digitalizadas, tratadas, analisadas e relacionadas entre si, fornecendo as informações necessárias para a avaliação dos equipamentos e possibilitando a emissão de diagnóstico. A vibração em diversos pontos da máquina é a principal grandeza mecânica medida, fornecendo informações essenciais para a manutenção preditiva. Com a vibração são medidas outras grandezas, mecânicas e elétricas, formando um conjunto de medidas que resultam em informações úteis para a manutenção e operação dos geradores. Sendo que cada unidade geradora constitui as seguintes partes de aquisição:

- 4 pontos de vibração relativa;
- 1 ponto de referência;
- 2 pontos de pressão;
- Potência gerada pela Unidade Geradora Hidrelétrica (UGH);
- Estado da excitação;
- Nível de montante.

3.4 DESCRIÇÃO DO HARDWARE

3.4.1 Vibração

São monitorados quatro pontos de vibração relativa no plano vertical, em cada mancal das extremidades (lado anel coletor e mancal inferior), um ponto de referência, dois pontos de pressão no poço da turbina, conforme visto na figura 3.2. A medição nos pontos laterais está relacionada com o monitoramento do afrouxamento dos pacotes de chapa do núcleo estatórico ou desgaste dos mancais no eixo do rotor.

Figura 3.2 Posição dos sensores de vibração.

3.4.2 Acelerômetros

Definiu-se que os sensores de vibração utilizados seriam acelerômetros do tipo IEPE (Integrated Electronic Piezoelectric), industriais e de uso geral. Os acelerômetros do tipo IEPE possuem no seu interior um circuito eletrônico que fornece uma saída de tensão de baixa impedância da ordem de mV em função da aceleração da vibração. Por ser do tipo industrial, o acelerômetro escolhido caracteriza-se por ser robusto, de baixo custo e ter uma sensibilidade em mV/g com uma tolerância de até $\pm 20\%$ do seu valor nominal. Antes de serem instalados, os acelerômetros são calibrados no Laboratório Central da Eletronorte, que é credenciado pelo Inmetro para esse tipo de calibração. Com este procedimento é determinado o valor sensibilidade do acelerômetro relativa a 15 Hz, que é a velocidade de rotação nominal do gerador hidráulico. O valor da sensibilidade do acelerômetro levantado após sua calibração é utilizado na configuração do software do SIMME, compensando assim as diferenças em relação ao seu valor nominal. O acelerômetro escolhido foi o modelo 784A fabricado pela Wilcoxon, por ter uma boa relação custo/benefício (catálogo do acelerômetro Wilcoxon tipo 784A), figura 3.3.

Figura 3.3 Acelerômetro modelo 784A.



Fonte: MEGGITT, 2013.

Os acelerômetros são fixados com parafusos ou colados nas partes metálicas externas dos mancais e das laterais, figura 3.4, em locais previamente escolhidos através de medições com analisadores portáteis de vibração. No caso dos mancais, os pontos escolhidos são os que apresentam um maior deslocamento pico-a-pico na frequência de rotação do gerador representando mais fielmente o deslocamento do eixo. Nas laterais foram escolhidos dois pontos em cada lado, dispostos simetricamente em relação a um plano vertical ao eixo, passando pela parte inferior e superior do gerador, figura 3.5. As vibrações dos pontos escolhidos já eram medidas periodicamente em deslocamento pico-a-pico através de coletores portáteis de vibração, existindo assim um histórico de medições e tendências que foi aproveitado na análise dos sinais pelo sistema de monitoração contínuo do SIMME.

Figura 3.4 Sensor de proximidade ao lado do anel coletor.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 3.5 Sensor de referência instalado no poço da turbina.



Fonte: Autor, 2013.

3.4.3 Medição de Vibração

Com objetivo de avaliação do comportamento dinâmico e das condições mecânicas dos hidro geradores, foram instalados sensores de vibração do tipo proximidade em locais estratégicos conforme descritos abaixo.

- **Mancal Guia do Gerador:** 2 transdutores de proximidade defasados de 90°, montados radialmente ao eixo;
- **Mancal Guia da Turbina:** 2 transdutores de proximidade defasados de 90°, montados radialmente ao eixo;
- **Medição de Rotação e Ângulo de Fase:** O monitoramento da rotação e do ângulo de fase é de caráter contínuo, sendo instalado em cada unidade geradora um sensor de proximidade com os respectivos acessórios e condicionadores. A referência de fase é obtida através de um ressalto por uso de uma “pastilha” a ser fixada no eixo. Todos os sinais de oscilação de eixo são referenciados a este sinal de fase. O ângulo de fase é calculado no sistema para cada ponto de vibração a ser exibido em gráficos;
- **Medição de Pressão:** A medição de pressão é adquirida nos seguintes locais: um na tampa da turbina e outro no tubo de sucção. Em cada um destes locais, em cada máquina, foi instalado um sensor de pressão;
- **Medição de Potência:** Para a medição da potência foi utilizado um módulo medidor de potência da SIEMENS, que tem uma entrada de corrente e outra de tensão fornecendo a partir destas informações valores potência ativa e reativa;

- **Medição de outras variáveis:** Para auxiliar a análise dos dados de vibração, as seguintes variáveis das unidades geradoras foram monitoradas continuamente: nível de montante, nível de jusante e estado da unidade excitada/não excitada.

Alguns dos sensores utilizados possuem saída na forma de corrente elétrica, necessitando assim do condicionamento do seu sinal para ser digitalizado pela placa.

3.5 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O sistema realiza a monitoração contínua das grandezas anteriormente descritas. Após a aquisição de cada sinal de vibração no tempo, o sistema disponibiliza o espectro de frequência dos mesmos, exibindo-os em gráficos. Todos os dados adquiridos são transmitidos através da rede de computadores para os sistemas cliente que podem ser instalados em diversas localidades da empresa. Os dados podem ser armazenados em banco de dados na ocorrência de algum evento. Os eventos caracterizam-se pela ultrapassagem dos limites pré-estabelecidos pelos valores medidos. As faixas dos limites se estendem entre normal, permissível e crítico. Todos estes limites podem ser configurados e alterados pelo usuário no computador que contém o software servidor quanto no computador que contém o software cliente, o qual encontra-se num ponto distante do equipamento que está sendo monitorado. Todas as informações de configuração encontram-se armazenadas em banco de dados.

Os sinais são armazenados em banco de dados SQL, de três maneiras diferentes: através de ocorrência de eventos, onde são armazenados as formas de onda no tempo dos pontos de vibração e os valores globais; periodicamente segundo um intervalo de tempo determinado pelo usuário. Nesta situação são armazenados os valores globais de todos os pontos. Além disso, ainda podem ser armazenadas amostras dos sinais solicitadas pelo usuário. Toda a configuração do sistema é armazenada no banco de dados e poderá ser alterada pelo usuário através do programa cliente, ou mesmo diretamente no servidor.

3.6 RECURSOS FORNECIDOS

- Arquitetura cliente/servidor;
- Monitoração remota e on-line;
- Armazenamento de informações em banco de dados;
- Cadastro de usuários;
- Controle de acesso;

- Níveis de permissão;
- Alteração local e remota da configuração do sistema;
- Armazenamento de eventos ocorridos;
- Armazenamento de amostras;
- Visualização das órbitas dos sinais de vibração;
- Envio de e-mail de eventos;
- Curva de tendência;
- Emissão de relatórios.

3.7 SENSORES INDUTIVOS – TECNOLOGIA

Um sensor indutivo utiliza a bobina de um oscilador para gerar um campo magnético na parte frontal do sensor. Com a aproximação do alvo metálico aumenta a corrente no oscilador, aumentando assim o fluxo de corrente. A variação na corrente é convertida num sinal analógico linear através do controlador analógico.

Considerações sobre sua aplicação:

- Pode ser utilizado em ambientes industriais;
- Boa resolução (pode-se medir em μm);
- Baixo custo;
- Utilizado para medir distâncias curtas;
- Necessita de um alvo metálico;
- Saídas em tensão ou corrente.

3.8 TIPOS: FLUSH OU NÃO-FLUSH

Na montagem tipo flush (ou blindado) o encapsulamento metálico continua até a face.

- O campo é estabelecido a partir da sua face;
- Pode ser montado com sua face próxima do suporte metálico;
- Faixa de sensibilidade mais curta comparado ao de montagem não-flush.

Na montagem não-flush, o encapsulamento termina antes da face.

- Necessita de uma área livre em volta da face;
- O fluxo magnético aparece em volta da face;
- Maior faixa de sensibilidade comparado com o tipo flush.

3.9 SENSORES UTILIZADOS NA UHE BALBINA

Na UHE Balbina foram utilizados um sensor de referência e quatro sensores de posição. O sensor de referência foi do tipo (sensor indutivo, fabricante Balluff, modelo BES-516-325-G-E5-Y-S4), que é um sensor do tipo indutivo on-off, enquanto que os sensores de proximidade para medição de deslocamento do eixo foram do tipo indutivo analógico linear (sensor indutivo, fabricante Balluff, modelo BAW M12MI-UAC20B-S04G) – saída em tensão ou o (sensor indutivo, fabricante Balluff, modelo BAW M18MI-ICC50B-S04G – saída em corrente). Na parte superior (gerador) foram instalados os sensores de 12 mm de diâmetro. Na parte inferior (guia da turbina) utilizam-se sensores idênticos ao da parte superior. Na eventualidade de algum problema de fixação, instalam-se os de 18 mm de diâmetro, com saída em corrente.

3.10 RELAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTO E O SINAL DE SAÍDA

Foi relacionado o valor da tensão medida pela placa de aquisição com o deslocamento real do eixo. Como os sensores de deslocamento não são exatamente iguais, foi necessário aumentar a curva de cada sensor para inserir os dados de calibração na tela de configuração do SIMME. Obteve-se a equação do tipo $D = AV + B$, onde D é o deslocamento que precisamos definir, V representa a tensão medida através da placa de aquisição e A (constante de multiplicação) e B (constante de soma) são parâmetros que devem ser configurados.

SAÍDA DE TENSÃO:

DESLOCAMENTO (mm)	TENSÃO (V)
DI – Valor Inicial Desloc. – 1 mm	VI – Valor Inicial de Tensão – 3,57 V
DF – Valor Final Desloc. – 1,5 mm	VF – Valor Final de Tensão – 7,22 V

$$\frac{D - DI}{DF - DI} = \frac{V - VI}{VF - VI} \quad \therefore \frac{D - 1}{1,5 - 1} = \frac{V - 3,57}{7,22 - 3,57} \quad \therefore \frac{D - 1}{0,5} = \frac{V - 3,57}{3,65}$$

$$3,65D - 3,65 = 0,5V - 1,785 \quad \therefore D = \frac{0,5V + 1,865}{3,65} \quad \therefore D = 0,137V + 0,511$$

SAÍDA DE CORRENTE:

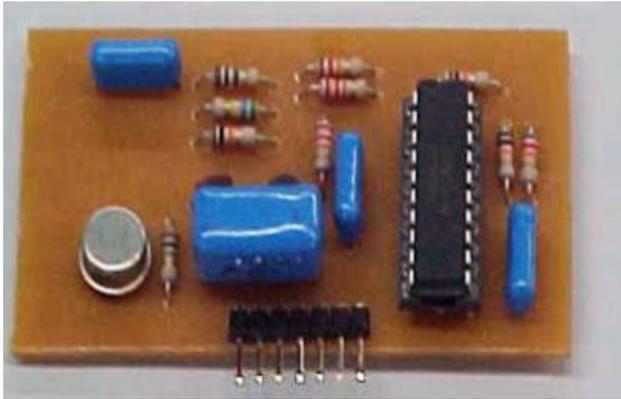
Os sensores com saída de corrente seguem o mesmo procedimento, com a corrente sendo transformada em tensão (porque o que a placa de aquisição mede é tensão) através de um resistor, geralmente de 250Ω . Desta forma, os sensores com saída de 4 a 20 mA passam a medir de 1 a 5 V. As equações são configuradas da mesma forma.

3.11 CONECTORES PARA OS SENSORES DE PROXIMIDADE

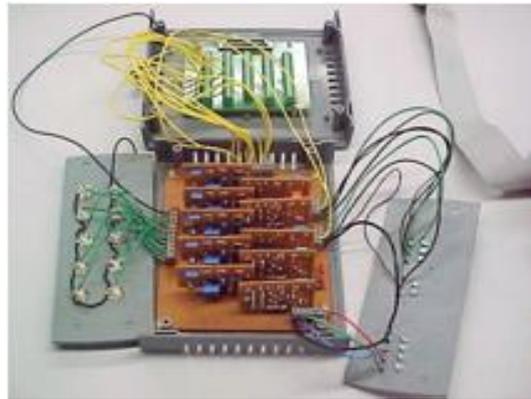
Foram utilizados sensores de proximidades do tipo RKTS 4 – 185 5m da Lumberg.

3.12 CONDICIONADOR DE SINAL

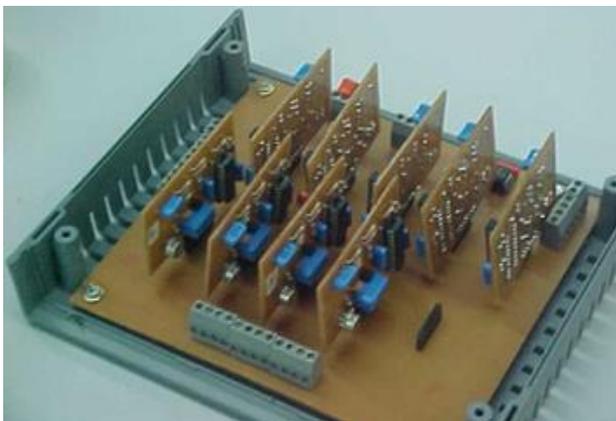
O condicionador desenvolvido possui 10 canais, montados individualmente em placas independentes conforme mostram as figuras de 3.6 a 3.9, de forma a serem facilmente substituídos em caso de defeito ou da necessidade de se alterarem parâmetros, tais como ganhos e frequências de corte. Cada canal alimenta o acelerômetro, recebe o sinal de tensão da resposta do acelerômetro ao estímulo da vibração, retira o nível DC do sinal, amplifica e filtra o sinal e conecta com a placa de aquisição de dados. Foi utilizado o acelerômetro tipo IEPE, o qual é alimentado com uma fonte de 24 VDC através de um Diodo de Corrente Constante de 2,4 mA. Quando alimentado, o nível DC no acelerômetro é da ordem de 12 ± 2 VDC. O sinal de saída do acelerômetro é um sinal de tensão AC da ordem de mV superposto a um sinal DC resultante da sua polarização. O nível DC do sinal é retirado e o sinal AC resultante é amplificado 100 vezes, passando posteriormente por um filtro passa-baixas de 4ª ordem do tipo Butterworth, cuja finalidade é eliminar a possibilidade de “aliasing” (sub-amostragem) na digitalização do sinal. Escolheu-se o filtro Butterworth por apresentar uma resposta plana e um valor mais aproximado do valor real da medida, e de 4ª ordem para terem um corte abrupto (LABVIEW, 2001).

Figura 3.6 Circuito para um canal.

Fonte: Autor, 2013.

Figura 3.7 Montagem do condicionador.

Fonte: Autor, 2013.

Figura 3.8 Condicionador de 10 canais.

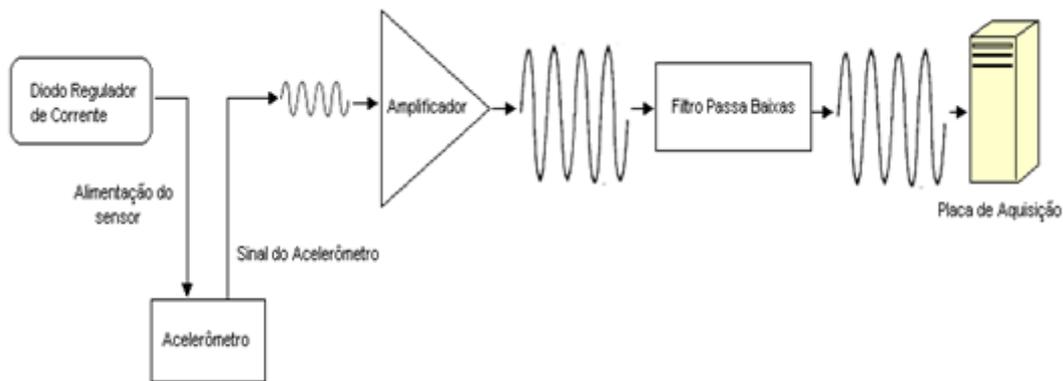
Fonte: Autor, 2013.

Figura 3.9 Montagem do condicionador.

Fonte: Autor, 2013.

Os condicionadores desenvolvidos foram testados no laboratório, utilizando-se um sistema composto por um gerador de sinais, um amplificador e um shaker excitador de vibração, de forma que o condicionador pudesse ser testado com uma vibração semelhante a encontrada no gerador hidráulico, em frequência e amplitude. O resultado da medição foi comparado com um conjunto de condicionador de vibração e acelerômetro de fabricação Brüel & Kjaer, com excelentes resultados. Também se elevou a frequência do sinal de forma que o filtro passa-baixas fosse testado para que fosse evitado a sub-amostragem.

O condicionador de sinais é alimentado por uma fonte de tensão convencional de 24 VDC, por uma de +5 VDC e por uma de -5VDC, todas com o seu ponto comum interligados, conforme mostra figura 3.10.

Figura 3. 10 Diagrama do Condicionador.

Fonte: Autor, 2013.

3.13 POTÊNCIA ATIVA

Para a medição da potência trifásica ativa, utilizou-se um medidor de potência tipo Simeas P de fabricação Siemens, figura 3.11. Este tipo de medidor recebe as entradas de corrente e tensão diretamente a partir dos TC's (transformadores de corrente) e TP's (transformadores de potencial) de medição de potência da máquina e fornece uma grande quantidade de informações, tipo potências, correntes, tensões, harmônicos, fator de potência, etc. No caso do gerador, utilizaram-se apenas os valores medidos das potências ativa trifásicas que são informações úteis para se estabelecer um diagnóstico para possíveis defeitos mecânicos, através da relação entre os valores de vibração e temperatura medidos e a potência de operação da máquina.

O medidor Simeas P utiliza comunicação serial RS-485 e o protocolo Modbus. Para permitir a sua comunicação com o software de aquisição de dados, desenvolveu-se no Lacen um VI (Virtual Instrument) em LabView para a comunicação em Modbus, a partir de uma biblioteca para Modbus.

Utilizou-se a segunda porta RS-485 da placa serial que foi utilizada para a medição de temperatura para a conexão entre o Simeas P e o computador servidor de aquisição.

Figura 3.11 Medidor de potência Simeas P.



Fonte: Autor, 2013.

Para a medição da pressão utilizou-se um transmissor de pressão de fabricação Jumo tipo 4341, com as seguintes características:

- Faixa de pressão: -1 a 1 bar;
- Saída: 4 a 20 mA;
- Alimentação: 24 VDC, através da mesma fonte que alimenta os acelerômetros.

O sinal de corrente de saída passa por um resistor de precisão de 250 Ω instalado dentro do condicionador de sinal dos acelerômetros. A tensão resultante sobre este resistor vai para a placa de aquisição de dados no servidor de aquisição. Este transmissor foi instalado na mesma linha em que está instalado o medidor de pressão que gera sinais de comando, controle e medição, figuras 3.12 e 3.13.

Figura 3.12 Transmissor de pressão instalado.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 3.13 Local da instalação do transmissor de pressão.



Fonte: Autor, 2013.

3.14 ROTAÇÃO

A medição de rotação do gerador foi implementada através da instalação de um sensor de proximidade indutivo analógico ao lado do sensor indutivo que fornece informações para o comando, controle e medição do gerador. As características do sensor são:

- Faixa de medição: 0 a 8 mm;
- Saída: 0 a 10 mA;
- Alimentação: 24 VDC.

Instalou-se separadamente um sensor para a medição da rotação do Gerador para que não ocorra nenhum risco de interferência do sistema de monitoração nos sinais de comando e controle. O sensor indutivo gera oito pulsos a cada rotação completa do Gerador, desta forma um sinal de 120 Hz recebido do sensor corresponde a uma rotação de 15 Hz (105,88 rpm), que é a rotação nominal do gerador. O sinal de corrente enviado pelo sensor vai para um resistor de aproximadamente 500 Ω localizado no interior do condicionador para acelerômetros, e daí em forma de tensão para a placa de aquisição de dados. O sinal de pulsos é convertido na informação de rotação do gerador. O sensor está instalado na extremidade localizada no poço da turbina, figuras 3.14 e 3.15.

Figura 3.14 Sensor indutivo analógico - Anel coletor.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 3.15 Sensor de referência no poço da turbina.



Fonte: Autor, 2013.

3.15 PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Utilizou-se uma placa de aquisição de dados tipo NI 6023E de fabricação National Instruments. Trata-se de uma placa de uso geral e de baixo custo, com as seguintes características: 16 entradas analógicas a 200 kS/s, 12 bits de resolução, 4 faixas de ganho para sinais analógicos, 8 linhas digitais de entrada/saída, *Driver*: NI-DAQ da National Instruments,

Barramento PCI. Através dela são digitalizados os sinais analógicos de vibração, pressão e rotação. Os sinais são tratados no aplicativo Módulo Servidor de Aquisição.

3.16 COMPUTADORES

Os computadores servidores de aquisição são do tipo comercial, de boa qualidade, equipados com processadores Pentium 4, 256 MB de memória RAM, HD de 40 GB, placas de vídeo e de rede off-board. São alimentados através de No-breaks de 1300 W, podendo ser alimentados através de inversores conectados nos bancos de baterias do Gerador. Optou-se por computadores comerciais, por serem de menor custo que os computadores industriais e de manutenção mais fácil. Além disso, os computadores ficam em ambientes climatizados protegidos dentro de armários com chave, figura 3.16.

Figura 3.16 Vista frontal/traseira do painel do computador de aquisição.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013.

3.17 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

3.17.1 Módulo Servidor de Aquisição

O módulo servidor de aquisição foi desenvolvido na linguagem gráfica LabVIEW da National Instruments. Dentre os vários recursos do LabVIEW, destacam-se:

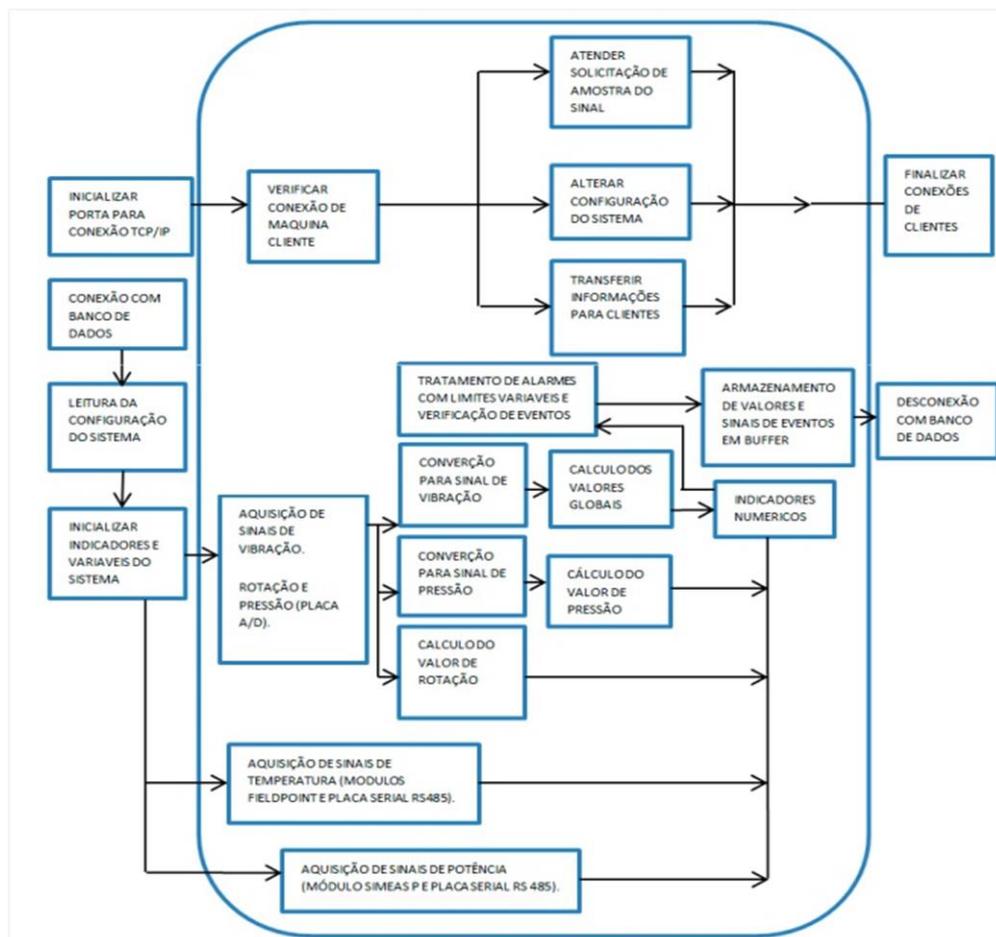
- Programas de controle e comunicação (drivers) com diversos tipos de dispositivos de aquisição de dados, tais como placas de aquisição de dados (placas ADA), placas de comunicação serial e módulo de aquisição distribuída;

- Uma grande variedade de ferramentas de análise dos sinais adquiridos, tais como análise no tempo e na frequência, funções matemáticas, filtros digitais, gráficos, comparadores, interface com banco de dados, armazenamento de informações, emissão de relatórios, comunicação e transferência de dados através de modem, redes de computadores e internet, ferramentas para a construção de telas de interface com o operador;
- Facilidade e rapidez de programação quando comparado com as linguagens de programação tradicionais;
- Possibilidade de utilização dos módulos escritos em outras linguagens de programação;
- Disponibilização de suporte pelo fabricante para o esclarecimento das dúvidas.

A arquitetura do módulo de aquisição é um aplicativo do tipo Cliente/Servidor, utilizando-se o protocolo TCP/IP, permitindo assim enviar informações à distância via intranet. Os diagramas a seguir ilustram o funcionamento do aplicativo. A figura 3.17 mostra os laços principais do aplicativo.

Figura 3.17 Laços principais do Módulo de Aquisição.

Fonte:



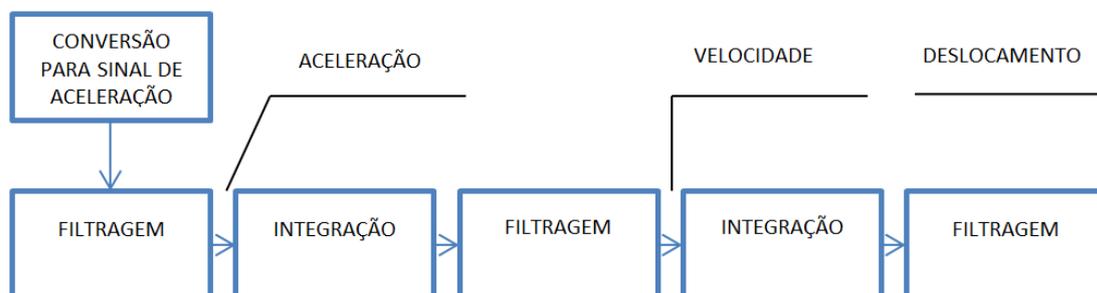
Manaus Energia S/A, 2013.

Ao iniciar o aplicativo, é estabelecida uma conexão com o banco de dados, que executa no Servidor de Banco de Dados. É lida a configuração do sistema e inicializados os indicadores e as variáveis do sistema com informações provenientes em tabelas do banco de dados. Ao mesmo tempo é inicializada a porta de comunicação TCP/IP.

Após isto, o programa permanece continuamente realizando a aquisição dos sinais de vibração, temperatura, pressão, rotação e potência. Os sinais de tensão provenientes do condicionador de sinal dos acelerômetros, do condicionador de pressão e de rotação são convertidos em valores numéricos de vibração, pressão e rotação; após são tratados os alarmes e verificados os eventos. Os eventos são armazenados em buffers e enviados ao banco de dados. Ao mesmo tempo, são transmitidas informações aos módulos clientes que solicitaram, transmitidas formas de onda, e alteradas as configurações, se necessário.

Como os sinais transmitidos pelos acelerômetros são de aceleração da vibração, o mesmo é integrado uma vez para obter-se o sinal de velocidade; após é integrado novamente para a obtenção do sinal de deslocamento. O sinal, tanto de aceleração, velocidade e deslocamento, é fornecido em RMS, Pico e Pico a Pico. Os valores globais em pico a pico dos sinais de deslocamento são utilizados para os alarmes e mostrados pelos indicadores na tela principal do aplicativo. Entre uma integração e outra é necessário utilizar-se um filtro passa-banda, para que sejam retiradas as componentes de baixa frequência do sinal, de forma a possibilitar que a operação de integração ocorra normalmente. Durante os testes com os integradores, verificou-se que, apesar de ser retirado o nível DC na entrada dos mesmos, aparecia um nível DC na saída, o qual contribuía para a saturação do módulo integrador seguinte. Desta forma, foi necessário a colocação de filtros passa-banda antes e depois de cada módulo integrador, conforme mostra figura 3.18.

Figura 3. 18 Conversão para sinais de vibração.



Fonte: Autor, 2013.

A seguir são mostradas as diversas funções disponibilizadas pelo aplicativo, figura 3.19, que podem rodar a qualquer momento. São elas:

- Cadastro de Usuário;
- Alteração da Configuração do Servidor;
- Verificação da Configuração do Servidor;
- Legenda dos pontos monitorados;
- Gráficos dos sinais no tempo e na frequência;
- Curva de tendência;
- Leitura dos registros de amostras;
- Leitura dos registros de eventos;
- Envio de mensagem eletrônica de eventos;
- Emissão de relatório;
- Gravação dos sinais em banco de dados;
- Gravação de registros periódicos em banco de dados;
- Gravação dos sinais do buffer em banco de dados;
- Teste de conexão com banco de dados.

Figura 3.19 Funções do Aplicativo.



Fonte: Autor, 2013.

Finalmente, ao encerrar o aplicativo, são desfeitas as conexões com o banco de dados e os módulos clientes.

3.17.2 Modos de armazenamento das informações no banco de dados

As informações (medidas globais e formas de onda) são gravadas no banco de três maneiras diferentes:

- Modo de gravação de amostras: podem ser gravadas os valores globais das medidas e amostras do sinal após solicitado pelo usuário, através do Módulo Cliente;
- Modo de gravação de eventos: são gravadas as medidas globais de todos os canais e as formas de onda dos canais de vibração em que ocorreram eventos. Ocorre um evento quando as medidas globais ultrapassarem o limite de alarme definido para cada canal. Para que não ocorram gravações sucessivas, define-se um limite variável que é alterado automaticamente a cada ocorrência de um evento, segundo um valor percentual proporcional ao limite de alarme variável, funcionando como uma “janela” em torno do nível medido;
- Modo de gravação periódica: são gravados os níveis globais de todos os canais, periodicamente, com o valor do período definido pelo usuário. A partir dessas medidas são traçadas as curvas de tendências.

3.17.3 Módulo Servidor de Banco de Dados

Desenvolveu-se um banco de dados em MS SQL, que trabalha em conjunto com o módulo servidor de aquisição. As etapas para definição do banco foram as seguintes:

- Levantamento dos dados a serem armazenados no banco;
- Identificação das tabelas necessárias para o sistema;
- Estudo do melhor modo de armazenamento dos dados em função do seu tipo (texto, numérico, ponto flutuante, formas de onda, etc).

São armazenados os valores numéricos globais dos pontos de vibração, valores de temperatura, pressão, potência ativa e também informação da rotação do gerador. São também disponibilizadas tabelas para armazenar as formas de onda dos pontos de vibração. Após ser analisada a necessidade do sistema para com o banco de dados, definiu-se que o banco deveria ser desenvolvido utilizando-se o Microsoft SQL Server 2000, onde foram desenvolvidas as seguintes tabelas:

Tabela Canal

Esta tabela é destinada ao armazenamento das informações de configuração do sistema e dos pontos monitorados. Estas informações são editadas através de uma tela de configuração, onde o usuário pode inserir ou mesmo alterar os seguintes dados: sigla e descrição do ponto monitorado, valores máximos de escala, valores críticos e alarmes para eventos, valores de sensibilidade dos acelerômetros e outros dados de configuração.

Tabela Diagnóstico

Esta tabela é destinada ao armazenamento dos valores globais de todas as grandezas monitoradas pelo sistema. Os dados podem ser armazenados nesta tabela de três maneiras diferentes: periodicamente (os dados são armazenados em um intervalo de tempo em minutos estipulado pelo usuário), por eventos (os dados são armazenados quando ocorre um evento) e por amostras (os dados são armazenados quando o usuário solicita uma amostra).

Tabela Evento

Esta tabela é destinada ao armazenamento de ocorrência de eventos do sistema SIMME. Um evento ocorre quando o valor global de um dos pontos monitorados ultrapassa o limite de alarme estipulado pelo usuário. Nesta tabela deverão ficar armazenadas as informações de data e hora de início do evento e em quais pontos ocorreram estes eventos

Tabela Vibração

Esta tabela é destinada ao armazenamento das formas de onda dos pontos de vibração. Estes sinais podem ser armazenados de duas maneiras: através de um evento no canal, onde são armazenados sinais antes e depois do evento, podendo assim se ter uma ideia da variação do comportamento do sinal neste ponto; outra maneira é através de armazenamento de amostras.

Tabela Usuário

Esta tabela é destinada ao armazenamento dos dados dos usuários cadastrados para acesso ao sistema. São armazenados dados como matrícula, nome e mensagem eletrônica. A cada usuário são atribuídas permissões para: ter acesso ou não ao sistema, para alterar ou não a

configuração do sistema, para receber ou não e-mails de comunicação de eventos registrados pelo sistema e, também, permissão para excluir registros do banco de dados.

Módulo Cliente

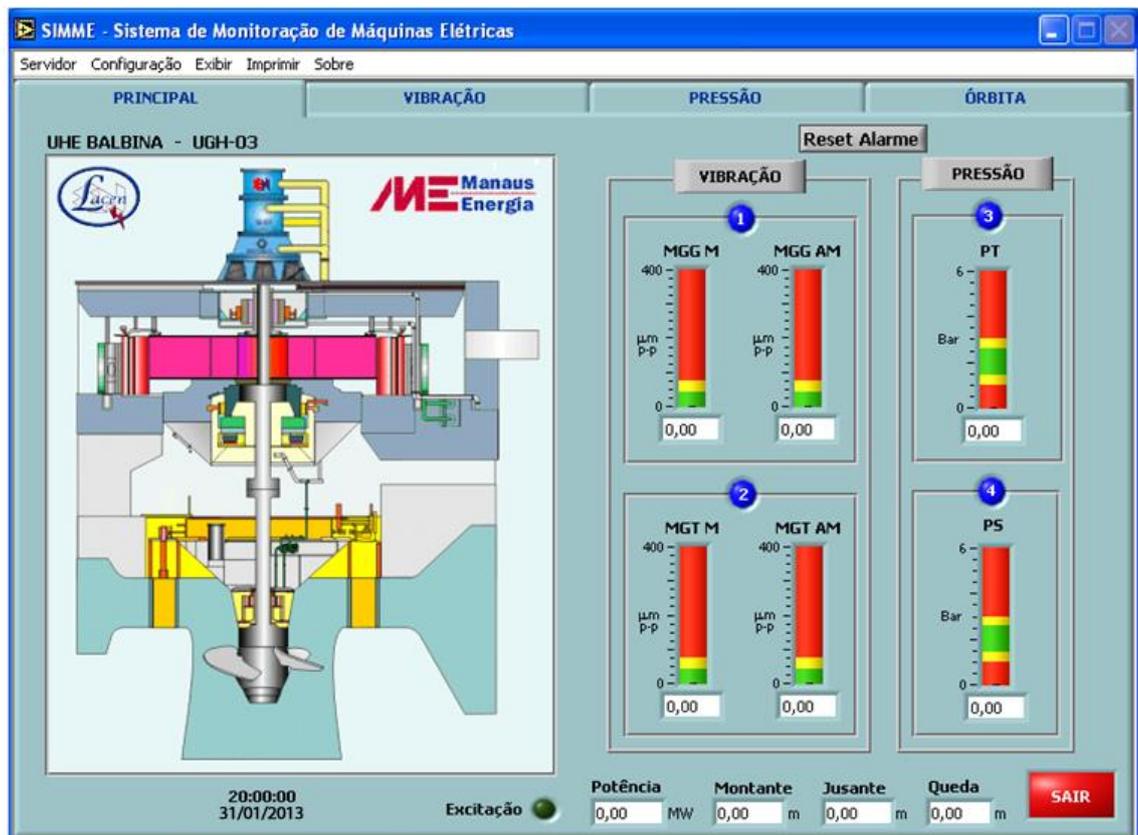
O módulo cliente foi desenvolvido com a finalidade de ser a interface entre o usuário e os módulos servidores de aquisição e banco de dados, possibilitando o recebimento dos valores das medidas e das formas de ondas enviadas pelo Servidor de aquisição, e também o recebimento das amostras, eventos e informações das tendências das grandezas monitoradas. Através dele a configuração do sistema pode ser lida e/ou editada; pode ser feita a inclusão dos usuários com seus privilégios; a visualização e a análise dos sinais; informação dos alarmes; emissão de relatórios e outras funções. O módulo cliente recebe as informações dos valores globais das variáveis e as formas de onda de aceleração proveniente dos acelerômetros. As formas de onda e as medidas de velocidade e deslocamento são obtidas com a integração e análise dos sinais de aceleração.

CAPÍTULO 4: DESCRIÇÃO DO APLICATIVO SIMME

4.1 DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS CLIENTE

O aplicativo SIMME inicia com uma tela com as seguintes informações: um desenho esquemático do rotor do gerador hidráulico contendo a identificação do gerador que está sendo monitorado, as informações de potência ativa trifásica, data e hora do servidor de aquisição; quatro indicadores sendo: tela principal, vibração, pressão e órbita do deslocamento pico a pico da vibração medidos em micrometros. Cada indicador tem a identificação da variável correspondente, e três faixas coloridas, identificando os valores normais, de alarme e críticos (verde, amarelo e vermelho respectivamente), conforme mostra figura 4.1.

Figura 4.1 Tela inicial do Módulo Cliente.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

4.2 MENUS

4.2.1 Menu Servidor

O menu “Servidor” está relacionado com a conexão e desconexão do programa cliente com o banco de dados do respectivo gerador hidráulico. Utiliza os seguintes comandos: “Conectar”, “Desconectar” e “Sair”. O comando sair encerra o programa. Mostra-se na figura 4.2 a seleção do servidor.

Figura 4.2 Seleção dos servidores e banco de dados.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Figura 4.3 Senha de acesso aos Servidores.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

A conexão com o servidor é realizada mediante uma permissão de acesso, que depende de identificação e senha do usuário, figura 4.3. Para possibilitar o acesso ao servidor de outro gerador, é necessário inicialmente desconectar o servidor acessado, e depois conectar ao seguinte.

4.2.2 Menu Configuração

O menu “Configuração” está relacionado com as configurações do sistema SIMME e com o cadastro de usuários. A configuração do sistema está definida no banco de dados correspondente do Gerador. O comando “Verificar Configuração”, figuras 4.4 a 4.7, permite aos usuários apenas a verificação da configuração. O comando “Alterar Configuração” permite aos usuários credenciados alteração da configuração. O credenciamento de usuários é feito por uma única conta de administrador.

Figura 4.4 Configuração dos canais de Vibração.

PONTO	DESCRIÇÃO DO PONTO		ESCALA MÁXIMA (µm - PP)	LIMITE CRÍTICO (µm - PP)	LIMITE ALARME (µm - PP)	CONSTANTE SENSOR (mV/G)
MLAH	Mancal Lado Anel Horizontal	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	99,00
MLAA	Mancal Lado Anel Axial	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	99,00
MLAV	Mancal Lado Anel Vertical	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	99,00
LDH1	Lado Direito Horizontal 1	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	96,00
LDH2	Lado Direito Horizontal 2	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	96,00
LEH1	Lado Esquerdo Horizontal 1	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	94,00
LEH2	Lado Esquerdo Horizontal 2	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	93,00
MLBH	Mancal Lado Bomba Horizontal	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	108,00
MLBA	Mancal Lado Bomba Axial	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	106,00
MLBV	Mancal Lado Bomba Vertical	<input checked="" type="checkbox"/>	100,00	70,00	40,00	101,00

Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Figura 4.5 Configuração dos canais de Temperatura.

PONTO	DESCRIÇÃO DO PONTO		ESCALA MÁXIMA (°C)	LIMITE CRÍTICO (°C)	LIMITE ALARME (°C)
TAER	Temperatura Água Entrada Refrigeração	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	120,00	100,00
THER	Temperatura Hidrogênio Entrada Refrigeração	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	120,00	100,00
THSR	Temperatura Hidrogênio Saida Refrigeração	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	120,00	100,00
TBEA87	Temperatura Barras Estator Lado Anel Ranhura 87	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	120,00	101,00
TBEA96	Temperatura Barras Estator Lado Anel Ranhura 96	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	120,00	101,00
TBEA105	Temperatura Barras Estator Lado Anel Ranhura 105	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	110,00	101,00
TMLB	Temperatura Mancal Lado Bomba	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	120,00	100,00
TMLA	Temperatura Mancal Lado Anel	<input checked="" type="checkbox"/>	150,00	120,00	100,00

Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Figura 4.6 Configuração dos canais de Pressão.

Configuração do Sistema

VIBRAÇÃO TEMPERATURA **PRESSÃO** SISTEMA

PONTO DE PRESSÃO
(Valores em BAR)

Ponto: PH2

Descrição do Ponto: Pressão de Hidrogênio de Refrigeração

Escala Máxima: 4,00

Limite Crítico Superior: 3,00

Limite Alarme Superior: 2,50

Limite Alarme Inferior: 1,50

Limite Crítico Inferior: 1,00

Constante de Multiplicação: 1,00

Constante de Soma: -1,00

Pressão: 0,00

GRAVAR FECHAR

Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Figura 4.7 Configuração do Sistema.

Configuração do Sistema

VIBRAÇÃO TEMPERATURA **PRESSÃO** SISTEMA

CONFIGURAÇÃO DO FILTRO **CONFIGURAÇÕES GERAIS**

Topologia: Butterworth

Tipo de Filtro: Bandpass

Ordem do Filtro: 5

Freqüência Inferior: 5,00 Hz

Freqüência Superior: 100,00 Hz

Ripple: 1,00

Atenuação: 60,00

Número de Amostras para Aquisição: 4000

Taxa de Amostragem da Aquisição: 2000

Constante Gravitacional: 10,00 m/s²

Intervalo de Gravação dos Valores para Curva de Tendência: 60 min

Percentual de Elevação e Redução dos Limites Variáveis: 10,00 %

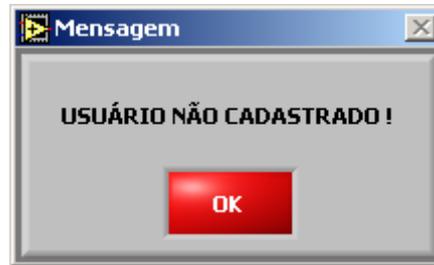
Intervalo de Verificação de Conexão com o Banco de Dados: 50 min

GRAVAR FECHAR

Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Caso o usuário não seja cadastrado para alterar a configuração do sistema, aparece uma mensagem de “Usuário não cadastrado”, figura 4.8.

Figura 4.8 Usuário não cadastrado.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013;
Lacen, 2013.

Comando “Cadastro de Usuários”: Através dele, o administrador inclui novos endereços e concede privilégios, tais como: permissão para acessar o sistema, permissão para receber mensagem eletrônica do sistema e permissão para alterar a configuração e permissão para a exclusão de registros do banco de dados, figura 4.9.

Figura 4.9 Cadastro de usuários.

A screenshot of a software window titled "Cadastro de Usuários". The window contains several input fields and a set of icons. The fields are: "Matrícula" with the value "admin"; "Senha" with "*****"; "Nome" with "Administrador do Sistema"; "Local" with "Lacen - DEIV"; "Email" with "andersons@eln.gov.br"; and "Telefone" with "210 8230". To the right of the "Senha" field is a tooltip that says "Permissão para receber emails" and contains five icons: a checkmark, a padlock, an 'X', a trash can, and a refresh symbol. At the bottom of the window, there are navigation buttons (back, forward, etc.), a page indicator showing "1 de 8", and a large red button labeled "FECHAR".

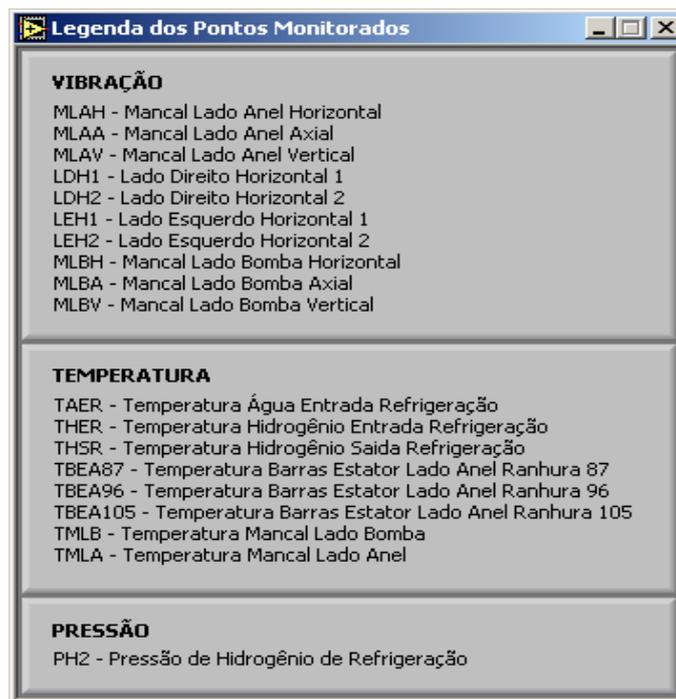
Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

4.2.3 Menu Exibir

O menu “Exibir” contém os comandos “Legenda dos Pontos Monitorados”, “Gráfico de Análise dos Sinais”, “Eventos Ocorridos”, “Amostras Armazenadas” e “Curva de Tendência”.

O comando “Legenda dos Pontos Monitorados” exibe o nome completo dos canais monitorados, os quais normalmente aparecem abreviados nas telas, figura 3.10.

Figura 4.10 Legenda dos Pontos Monitorados.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

O comando “Gráfico de análise dos Sinais” abre uma tela de visualização dos sinais dos canais de vibração, tanto no tempo como no espectro de frequências. Os sinais de vibração podem ser visualizados em aceleração, velocidade ou deslocamento nas unidades correspondentes (mm/s^2 , mm/s e μm) e medidos nas amplitudes RMS, pico e pico a pico. Durante a análise, podem ser modificadas as configurações dos filtros.

Para evitar congestionamento da rede intranet, o usuário solicita amostras das formas de onda que são enviadas pelo Módulo de Aquisição que responde enviando as formas de onda dos sinais no tempo, os quais são analisados no programa cliente, figuras 3.11 e 3.12. O programa elabora um relatório que pode ser salvo e/ou impresso.

Figura 4.11 Mensagem aguardando amostra dos sinais de vibração.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

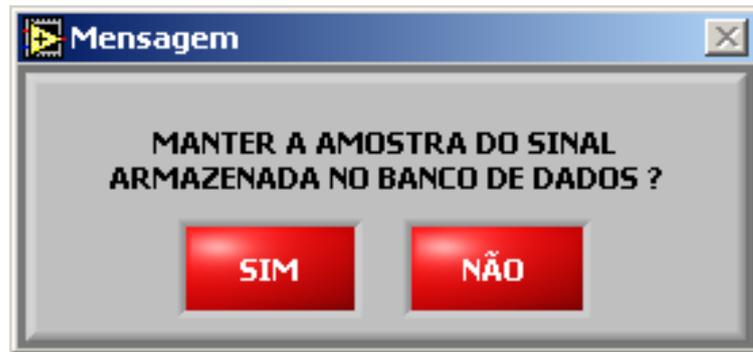
Figura 4.12 Gráfico dos Sinais de vibração.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Ao fechar a tela dos gráficos, o programa mostra uma mensagem perguntando se o usuário deseja manter ou não os gráficos no banco de dados, figura 4.13.

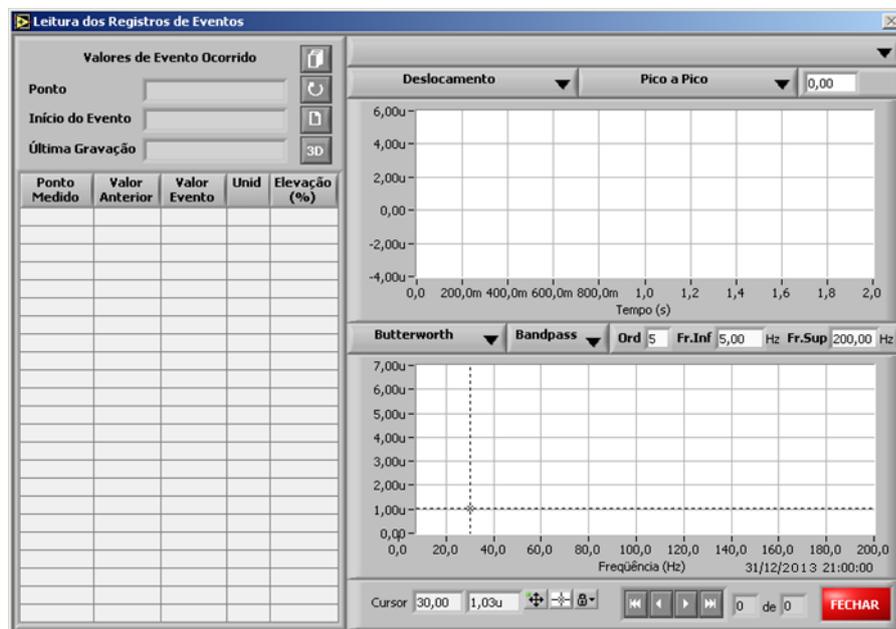
Figura 4.13 Pergunta sobre o armazenamento das amostras no banco de dados.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

O comando “Eventos Ocorridos” abre uma tela de “Leitura dos Registros dos Eventos”, figura 4.14, que mostra uma tabela com as informações dos eventos e os gráficos correspondentes, segundo a estratégia de gravação de eventos. São armazenadas as formas de onda anteriores ao evento e uma amostra posterior ao evento, de forma que o usuário tenha todo o histórico do evento, possibilitando uma análise. O programa elabora um relatório que pode ser salvo e/ou impresso.

Figura 4.14 Tela de Registro dos Eventos.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Os dados que serão apresentados na figura 4.15 foram selecionados entre todos os eventos registrados.

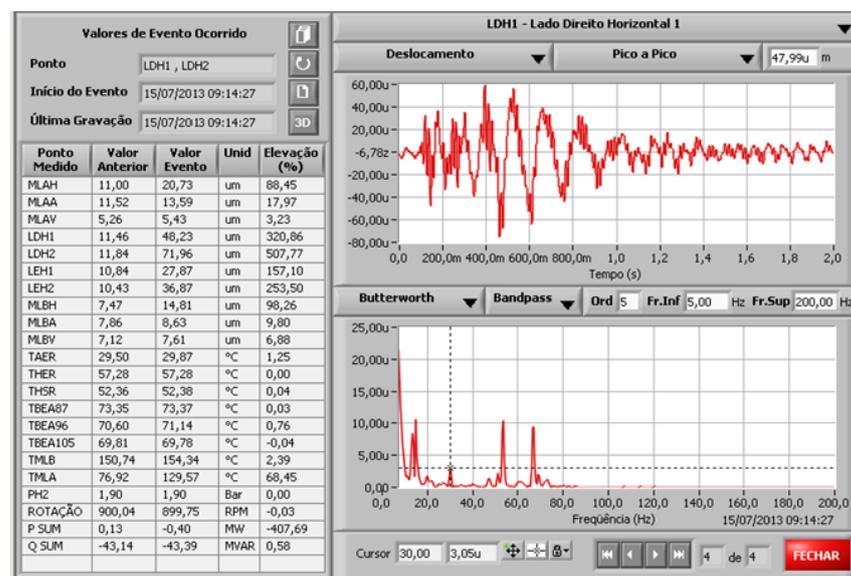
Figura 4.15 Tela de pesquisa dos eventos.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Após o evento ter sido selecionado, é mostrado na tela de registro de eventos, figura 4.16. Podem ser visualizadas as sequências dos sinais, desde antes da ocorrência até o final da mesma.

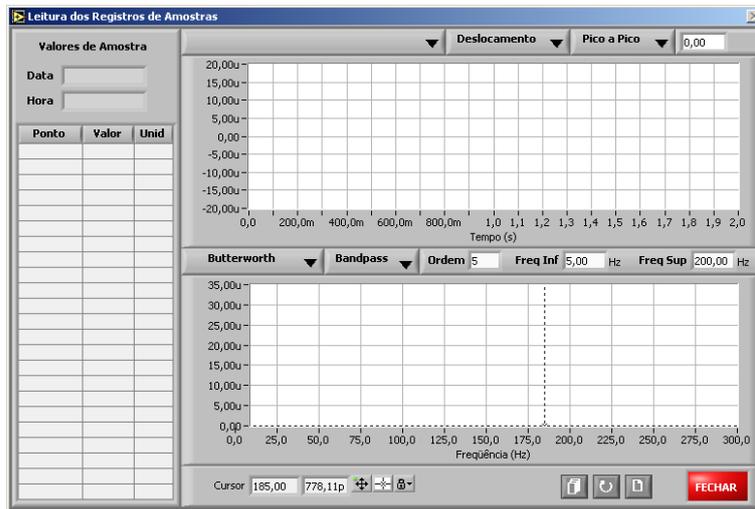
Figura 4.16 Gráficos do evento selecionado.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

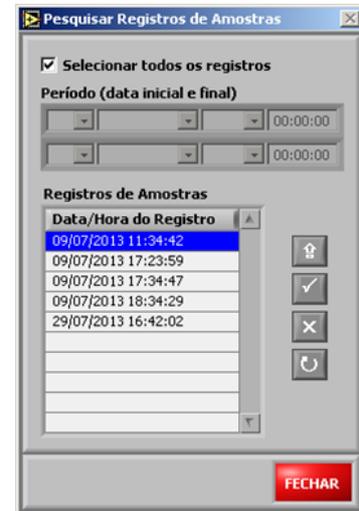
O comando “leitura dos registros das amostras” abre uma tela, figura 4.17, em que são selecionadas as amostras, figura 4.18, que serão visualizadas em forma de tabela e gráficos, figura 4.19. O programa elabora um relatório que pode ser salvo e/ou impresso.

Figura 4.17 Tela da leitura das amostras.



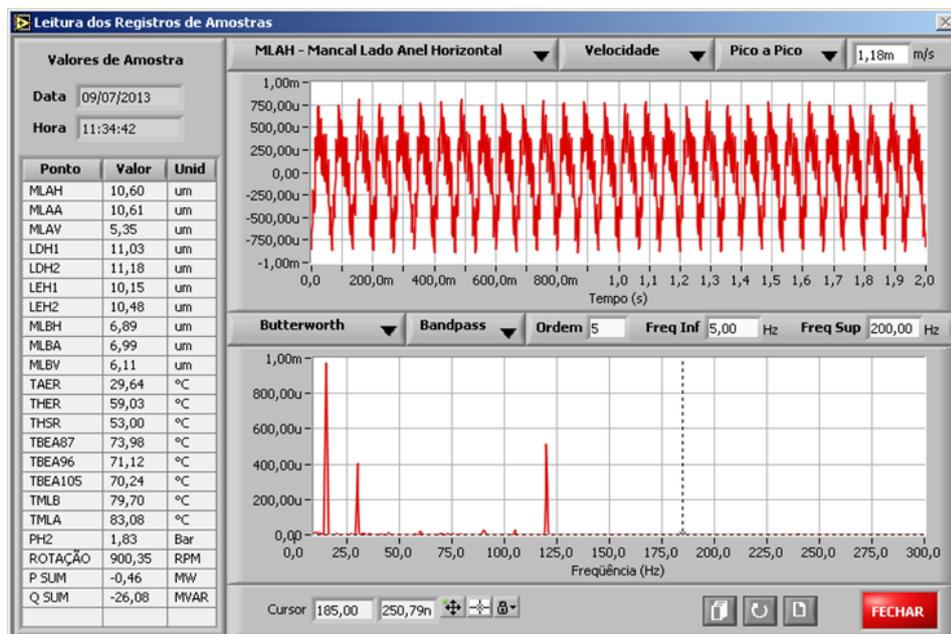
Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Figura 4.18 Seleção das Amostras.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Figura 4.19 Visualização das Amostras.

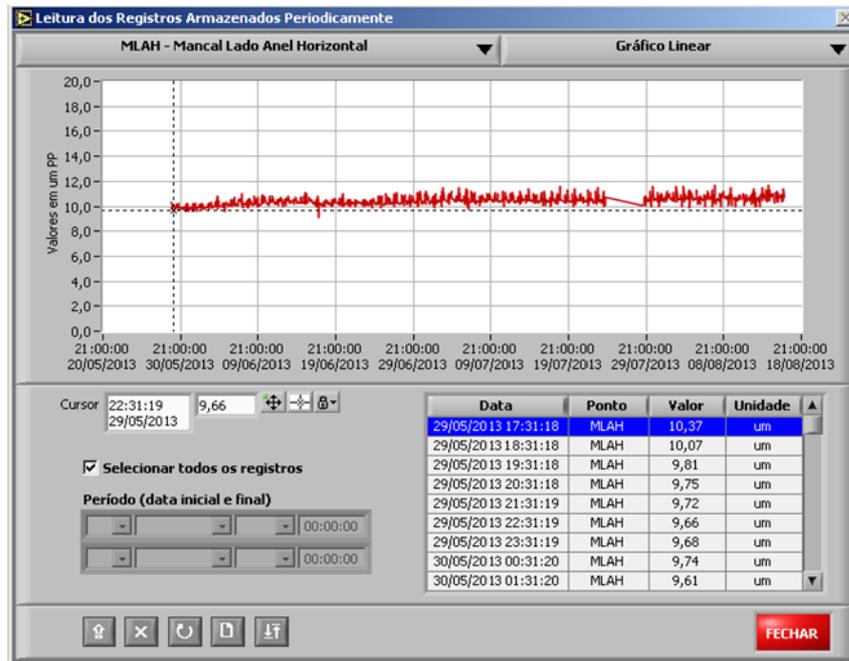


Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

O comando “Curva de Tendência” abre uma tela de Leitura dos Registros Armazenados Periodicamente, figuras 4.20, de forma a termos uma curva de tendência para todas as variáveis.

O período de amostragem é definido pelos usuários com autorização para modificar configurações. Os canais podem ser selecionados assim como o tipo de gráfico. O programa elabora um relatório que pode ser salvo e/ou impresso.

Figura 4.20 Gráfico dos registros periódicos de um canal de vibração.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

4.2.4 Menu Imprimir

Elabora um relatório que pode ser salvo e impresso dos valores medidos e dos valores dos alarmes.

4.3 RELATÓRIOS

São mostrados a seguir os diferentes tipos de relatórios emitidos pelo SIMME.

- Relatório de Valores dos Pontos Monitorados;
- Relatório de Sinais no Tempo e na Frequência;
- Relatório de Registro de Eventos;
- Relatório de Registro de Amostra;
- Relatório de Registros Periódicos.

4.4 EMISSÃO DE MENSAGEM ELETRÔNICA

O sistema SIMME elabora e envia mensagens eletrônicas quando ocorrem eventos, que são enviadas para pessoas definidas na configuração de usuários. Nesta mensagem consta as informações de data e hora do evento, são relacionadas as variáveis cujos valores ultrapassaram os limites de alarme e evento, os valores de potência ativa, reativa e rotação, e os valores das variáveis antes e depois do evento, informando o valor percentual da variação, os valores ajustados para alarme e crítico. Exemplos abaixo, figura 4.21a e 4.21b.

Figura 4. 21a Relatório de eventos.

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. – Manaus Energia S.A.						
UHE Balbina - Balbina - Am						
Monitoração de Geradores Hidráulico 03						
Informações de Eventos do Sistema SIMME						
Data do Evento:	3 de setembro de 2013					
Hora do Evento:	16:47:18					
Local do Evento:	UHE 03					
Potência Ativa:	50 MW					
Potência Reativa:	21,1 MV					
Rotação:	106,8 RPM					
Valores de Vibração - Deslocamento Pico a Pico (µm)						
Ponto	V.Anterior	V.Evento	Elevação	V.Alarme	V.Critico	Descrição do Ponto Monitorado
MLAH	10,62	54,51	413,50 %	40,00	70,00	Mancal Lado Anel Horizontal
MLAA	11,51	53,00	360,55 %	40,00	70,00	Mancal Lado Anel Axial
MLAV	5,79	55,76	863,11 %	40,00	70,00	Mancal Lado Anel Vertical
LDH1	11,41	55,82	389,24 %	40,00	70,00	Lado Direito Horizontal 1
LDH2	11,28	54,23	380,93 %	40,00	70,00	Lado Direito Horizontal 2
Valores de Temperatura (° Celsius)						
Ponto	V.Anterior	V.Evento	Elevação	V.Alarme	V.Critico	Descrição do Ponto Monitorado
TAER Refrigeração	31,15	31,29	0,46 %	350,00	650,00	Temperatura Água Entrada
TBEA87 Ranhura 96	76,54	76,54	0,00 %	350,00	650,00	Temperatura Barras Estator Lado Anel
TBEA96 Ranhura 96	76,30	76,28	-0,02%	350,00	650,00	Temperatura Barras Estator Lado Anel
TBEA105 Ranhura 105	72,77	72,79	0,02 %	350,00	650,00	Temperatura Barras Estator Lado Anel
TMLB	98,30	98,46	0,16%	900,00	950,00	Temperatura Mancal Lado Bomba
TMLA	93,41	93,14	-0,29%	900,00	950,00	Temperatura Mancal Lado Anel

Fonte: Manaus Energia S/A, 2013.

Figura 4. 22b Relatório de eventos.

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. – Manaus Energia S.A. UHE Balbina - Balbina - Am Monitoração de Geradores Hidráulico 03 Informações de Eventos do Sistema SIMME						
Data do Evento:	13 de novembro de 2013					
Hora do Evento:	15:58:16					
Local do Evento:	UHE 03					
Potência Ativa:	50 MW					
Potência Reativa:	21,1 MV					
Rotação:	106,8 RPM					
Valores de Vibração - Deslocamento Pico a Pico (μm)						
Ponto	V.Anterior	V.Evento	Elevação	V.Alarme	V.Critico	Descrição do Ponto Monitorado
MLAH	11,00	39,00	354,54 %	40,00	70,00	Mancal Lado Anel Horizontal
MLAA	12,03	37,11	308,47 %	40,00	70,00	Mancal Lado Anel Axial
MLAV	7,08	40,00	564,97 %	40,00	70,00	Mancal Lado Anel Vertical
LDH1	12,04	41,02	340,67 %	40,00	70,00	Lado Direito Horizontal 1
LDH2	9,05	39,50	436,46 %	40,00	70,00	Lado Direito Horizontal 2
Valores de Temperatura ($^{\circ}$ Celsius)						
Ponto	V.Anterior	V.Evento	Elevação	V.Alarme	V.Critico	Descrição do Ponto Monitorado
TAER Refrigeração	30,00	30,50	0,50 %	350,00	650,00	Temperatura Água Entrada
TBEA87 Ranhura 87	70,05	70,07	0,02 %	350,00	650,00	Temperatura Barras Estator Lado Anel
TBEA96 Ranhura 96	72,03	72,04	0,01 %	350,00	650,00	Temperatura Barras Estator Lado Anel
TBEA105 Ranhura 105	83,04	83,05	0,01 %	350,00	350,00	Temperatura Barras Estator Lado Anel
TMLB Bomba	90,30	90,47	0,17 %	350,00	350,00	Temperatura Mancal Lado Bomba
TMLA Anel	99,02	91,04	-0,02 %	350,00	350,00	Temperatura Mancal Lado Anel

Fonte: Manaus Energia S/A.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TÉCNICAS DE COLETA DE DADOS

O levantamento de dados foi realizado por meio dos seguintes instrumentos: Entrevista semi-estruturada, pesquisa documental e observação direta. Segundo Trivínos (1987), as entrevistas semi-estruturadas “são aquelas que partem de certos questionamentos básicos, apoiados em teorias e hipóteses que interessam à pesquisa e, em seguida, oferecem amplo campo de interrogativas, fruto de novas hipóteses que vão surgindo à medida que se recebem as respostas do informante.

As perguntas fundamentais que irão direcionar a entrevista devem ser resultado não só da teoria já investigada pelo entrevistador, mas também de toda a informação que ele já recolheu sobre o objeto da pesquisa. As vantagens das entrevistas sobre os demais instrumentos de coleta de dados é que se realizam de maneira exclusiva, seja com indivíduos ou com grupos, e permitem correções, esclarecimentos e adaptações que as tornam eficazes na obtenção das informações desejadas. Enquanto outros instrumentos permanecem imutáveis após saírem das mãos do pesquisador que elaborou, a entrevista é dinâmica e ganha vida ao se iniciar o diálogo entre o entrevistador e o entrevistado. De um modo geral, a entrevista é uma excelente técnica para se obter informações que estão “armazenadas” na memória das pessoas entrevistadas.

Fortolan (2001) afirma que é útil enfatizar que as perguntas fundamentais que constituem, em parte, a entrevista semi-estruturada, são resultados não somente da teoria que alimenta a ação do investigador, mas também de toda a informação que ele já recolheu sobre o fenômeno que interessa. As entrevistas semi-estruturadas foram realizadas com os profissionais das empresas participantes do estudo de caso proposto, em nível de coordenação e supervisão da área de manutenção elétrica, mecânica e instrumentação.

A pesquisa documental, segundo Gil (1994), é bastante semelhante à pesquisa bibliográfica, somente diferindo quanto à natureza das fontes, enquanto a bibliografia se baseia na contribuição de diversos autores sobre determinado assunto, a documental vale-se de materiais que ainda não receberam um tratamento analítico, podendo, ainda, serem reelaborados e adaptados de acordo com os objetivos da pesquisa. A pesquisa documental foi elaborada a partir de documentos e relatórios disponibilizados pela empresa participante do estudo de caso, bem como de documentos oficiais e relatórios de pesquisa disponibilizados por entidades de classe, reportagens de jornais e revistas, etc. A observação direta dos fatos dentro

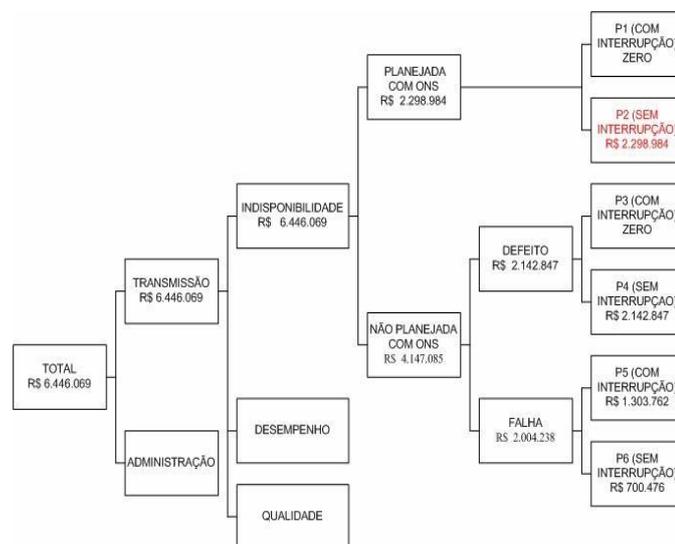
das empresas pesquisadas tem o objetivo de registrar o ambiente físico, o ambiente social e os fatos que ocorrem dentro do ambiente de trabalho e que se relacionam com problema de pesquisa. Embora a observação direta possa ser caracterizada como espontânea informal e não planejada, deve existir, por parte do pesquisador, um mínimo de controle na obtenção dos dados. Assim, a coleta dados deve ser seguida por um processo de análise e interpretação que lhe confere a sistematização e o controle requeridos dos procedimentos científicos.

A utilização das técnicas de entrevista semi-estruturada, análise documental e observação direta permitiram a síntese das informações, sua análise e interpretação de modo a encontrar as respostas necessárias para o atendimento dos objetivos propostos, ou seja, programar a manutenção preditiva com análise de vibração nos geradores e equipamentos auxiliares.

5.2 CUSTOMIZAÇÃO DE PERDAS

A Manaus Energia S/A possui atualmente 5 geradores hidráulicos como foi descrito. A falta temporária deles diminui a receita da Manaus Energia S/A. Existe ainda o problema das multas aplicadas pela agência reguladora (ANEEL) por paradas não programadas, as quais ocasionam grandes perdas de receita, conforme demonstrado na árvore de perdas, mostrada na figura 5.1. Nesta figura mostra-se o levantamento das perdas de receita com e sem interrupção de carga durante o ano de 2013, obtidas a partir da implantação do PMP. As maiores perdas foram do tipo P2, que são as paradas planejadas sem interrupção de carga.

Figura 5.1 Árvore de Perdas Operacionais no ano de 2013.



Fonte: Manaus Energia S/A, 2013.

Em função da árvore de perdas, constatou-se que a instalação de um sistema de monitoração on-line contribuiria para implantação do PMP e otimizaria o sistema, no sentido que o sistema poderia eliminar as paradas não planejadas e permitir um melhor planejamento das paradas planejadas.

5.3 CARACTERIZAÇÃO

A partir das observações oriundas do estudo de caso, que diagnosticou falhas constantes na operação dos geradores hidráulicos da UHE- Balbina, a metodologia analisada no presente trabalho foi aplicada, ilustrando o comparativo em dois estágios, o primeiro sem a implantação da manutenção preditiva, e o segundo com a implantação da manutenção preditiva em função do sistema SIMME.

5.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Segue na figura 5.2 a configuração dos canais de vibração com os respectivos limites de valores dos níveis de vibração. A tabela 5.1 a seguir, ilustra os níveis vibratórios estabelecidos com os respectivos alarmes.

Figura 5.2 Configuração dos canais de vibração.

PUNTO	DESCRIÇÃO DO PUNTO	ESCALA MÁXIMA (µm - PP)	LIMITE CRÍTICO (µm - PP)	LIMITE ALARME (µm - PP)	CONSTANTE SENSOR (mV/G)
MLAH	Mancal Lado Anel Horizontal	100,00	70,00	40,00	99,00
MLAA	Mancal Lado Anel Axial	100,00	70,00	40,00	99,00
MLAV	Mancal Lado Anel Vertical	100,00	70,00	40,00	99,00
LDH1	Lado Direito Horizontal 1	100,00	70,00	40,00	96,00
LDH2	Lado Direito Horizontal 2	100,00	70,00	40,00	96,00
LEH1	Lado Esquerdo Horizontal 1	100,00	70,00	40,00	94,00
LEH2	Lado Esquerdo Horizontal 2	100,00	70,00	40,00	93,00
MLBH	Mancal Lado Bomba Horizontal	100,00	70,00	40,00	108,00
MLBA	Mancal Lado Bomba Axial	100,00	70,00	40,00	106,00
MLBV	Mancal Lado Bomba Vertical	100,00	70,00	40,00	101,00

Fonte: Manaus Energia S/A, 2013; Lacen, 2013.

Tabela 5.1 Ilustra os níveis vibratórios (μm) estabelecidos com os respectivos alarmes.

<i>Vibração</i>	<i>Normal</i>	<i>Limite Permissível</i>	<i>Limite crítico</i>
	0 a 40	40 a 70	Acima de 70 μm
<i>Código</i>			

Fonte: Autor, 2013.

Futuramente estes níveis poderão ser alterados conforme a periodicidade desejada a se alcançar pelas curvas de tendências, análise espectral e distribuição de vibrações pelo período de análise do acompanhamento evolutivo das vibrações em função das intervenções que foram ou não efetuadas pela manutenção obedecendo rigorosamente ao plano de preditiva.

5.4.1 Análise de vibração relatório

Cenário 01 – Não havia nenhum tipo de acompanhamento de manutenção preditiva (níveis de vibração) antes de 2013, apenas a manutenção corretiva, e controle intuitivo pela equipe de manutenção, sem nenhuma concisão.

Cenário 02 - Neste cenário, mostram-se as medições de vibração através da implantação do SIMME durante o ano de 2013. Foram retirados os cinco maiores valores de vibração (μm) de cada mês, de cinco partes respectivamente: MLAH - Anel Horizontal, MLAA - Mancal Lado Anel Axial, MLAV - Mancal Lado Anel Vertical, LDH1 - Lado Direito Horizontal 1, LDH2 - Lado Direito Horizontal 2.

Nota-se que para MLAH – 71,67% durante o ano de 2013 não apresentou anormalidade, 28,33% apresentou limite permissível.

Nota-se que para MLAA – 91,67% não apresentou anormalidade, 8,33% apresentou limite permissível.

Nota-se que para MLAV – 90,00% não apresentou anormalidade, 10,00% apresentou limite permissível.

Nota-se que para LDH1 – 85,00% não apresentou anormalidade, 15,00% apresentou limite permissível.

Nota-se que para LDH2 – 88,34% não apresentou anormalidade, 11,66% apresentou limite permissível.

Nota-se que para todos os pontos de medição (MLAH, MLAA, MLAV, LDH1, LDH2). 82,50% não apresentou anormalidade, 17,50% apresentou limite permissível.

Os resultados obtidos no SIMME para este cenário estão apresentados respectivamente na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Relatório vibração SIMME, valores de vibração (μm).

Gerador 03	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
MLAH(μm)	38,13	39,90	51,58	38,00	33,12	38,00	34,27	37,70	40,00	39,80	34,80	38,93
MLAH(μm)	53,32	38,55	56,00	39,01	31,15	59,00	39,90	32,54	39,,69	39,90	38,34	52,10
MLAH(μm)	40,00	50,55	45,67	50,23	39,00	50,00	36,60	39,00	39,40	36,90	37,30	40,00
MLAH(μm)	51,50	51,55	48,67	37,63	36,90	37,18	35,40	53,30	38,00	32,46	39,90	50,00
MLAH(μm)	52,00	37,90	39,70	40,00	38,00	39,85	34,40	37,90	39,,60	39,00	38,98	55,00
MLAA(μm)	37,99	38,00	38,02	34,99	39,89	36,66	37,87	38,89	36,54	36,54	37,87	38,13
MLAA(μm)	37,77	36,88	37,98	36,88	39,43	37,34	38,65	36,76	40,00	40,00	38,98	53,32
MLAA(μm)	38,99	37,64	36,66	39,54	38,43	39,00	36,45	39,56	3,00	38,00	39,98	40,00
MLAA(μm)	52,88	39,88	35,57	37,78	37,45	36,45	36,87	39,76	36,80	39,00	38,87	51,50
MLAA(μm)	40,00	40,00	39,00	38,65	37,45	37,56	36,87	51,58	36,54	38,98	37,94	52,00
MLAV(μm)	55,89	37,45	36,45	38,45	39,45	57,98	36,45	56,00	38,76	37,98	37,49	36,90
MLAA(μm)	52,88	39,88	35,57	37,78	37,45	56,45	36,87	39,76	36,80	59,00	58,87	51,50
MLAV(μm)	38,88	37,88	37,54	36,87	38,89	38,45	37,56	48,67	36,45	39,77	38,56	39,89
MLAV(μm)	37,00	38,99	37,98	36,87	39,45	38,45	36,78	39,70	36,87	37,87	37,88	39,43
MLAV(μm)	38,77	39,56	33,98	36,98	36,34	37,56	34,27	37,89	36,87	35,22	40,00	38,43
LDH1(μm)	38,00	50,22	38,12	37,89	38,93	38,98	39,90	38,76	36,98	38,88	43,50	39,90
LDH1(μm)	39,01	52,45	39,56	36,89	52,10	38,87	36,60	38,76	37,89	37,00	34,27	38,55
LDH1(μm)	50,23	37,78	37,33	38,90	40,00	39,78	34,27	39,00	37,98	38,77	38,56	50,55
LDH1(μm)	37,63	38,88	34,45	39,00	50,00	38,45	39,90	36,45	38,98	35,22	37,88	51,55
LDH1(μm)	40,00	39,87	38,72	50,33	55,00	39,21	38,56	37,56	37,98	38,88	39,00	37,90
LDH2(μm)	38,99	36,54	37,34	40,55	37,89	39,45	37,88	37,54	35,83	37,56	36,45	37,56
LDH2(μm)	39,98	40,00	38,25	37,00	34,80	39,00	40,00	37,98	40,00	58,43	56,90	33,12
LDH2(μm)	34,35	3,00	33,79	39,67	32,58	38,70	43,50	33,98	37,23	39,22	39,75	31,15
LDH2(μm)	36,93	36,80	40,00	40,00	38,63	57,60	34,27	37,8	38,90	37,60	38,90	39,00
LDH2(μm)	38,60	38,00	52,00	53,19	40,00	38,90	59,90	40,00	39,90	38,80	34,34	36,90

Fonte: Autor, 2013; Manaus Energia S/A, 2013.

Considerando a rotação da turbina e levando em conta que se trata de uma máquina hidráulica montada sob fundações rígidas, a Norma ISO 7919-1:1996 recomenda o parâmetro

de vibração como mais apropriado para análise da oscilação relativa eixo-mancal, medida com transdutores do tipo indutivo sem contato.

A seção cinco da norma ISO 7919 (ISO 7919-5:1996), utiliza a amplitude da oscilação relativa eixo-mancal para avaliar a severidade de vibração (S_{max}):

$S_{max} = S(V) + S(H)$, onde $S(V)$ e $S(H)$ são as oscilações medidas simultaneamente na direção vertical e horizontal do eixo, em um plano transversal o mais próximo possível do mancal. Para um grupo gerador com velocidade de rotação de até 200 RPM (3,38 Hz), são definidos os seguintes níveis, tabela 5.3:

Tabela 5.3 Severidade de vibração segundo a norma ISO – UHE Balbina.

Nível	Faixa em (μm)	Recomendações
A	Até 40	Nível esperado no comissionamento. Muito bom.
B	40 a 70	Faixa considerada boa. Aceitável para operação continuada sem restrições.
C	70 a 100	Faixa considerada insatisfatória para operação contínua. Aceitável para operação por períodos limitados. Deve ser revisada logo que se tenha oportunidade.
D	Acima de 100	Nível de vibração inaceitável. Nesta faixa se poderá induzir quebra.

Fonte: NORMA ISO 7919-2, 1996.

5.5 IMPLANTAÇÃO DE UM PROGRAMA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA (PMP)

Para melhor qualidade do nível de produção de energia, foi implantado o PMP em função das informações resultantes do SIMME, para sanar os índices de paradas dos geradores hidráulicos, procurando eliminar o número elevado de manutenções corretivas e otimizar a manutenção produtiva total. O programa foi iniciado em 2013.

5.5.1 Índices após a Implantação do PMP

Os gráficos 5.1 e 5.2 a seguir ilustram os índices respectivamente do cenário 01 e 02.

Gráfico 5.1 Indicadores dos Resultados de manutenção antes da implantação 2012.

Fonte: Autor, 2013; Manaus Energia S/A, 2013

Gráfico 5.2 Indicadores dos Resultados de manutenção após a implantação 2013.

Fonte: Autor, 2013; Manaus Energia S/A, 2013

Na situação inicial, em 2012, conforme demonstrado no gráfico 5.1, a maioria das intervenções registradas na UHE - Balbina eram do tipo corretivas, acompanhadas de manutenção preventiva e preditiva em níveis muito mais baixos, o que remete à constatação de que sem o sistema de monitoração implantado, em termos gerais, fazia-se apenas manutenções posteriores a eventos falhos.

Já na análise do gráfico 5.2, pode-se perceber pequeno crescimento na porcentagem de ações de manutenção preventiva, de 30% para 40%, a medida que a manutenção corretiva teve uma queda acentuada, passando para uma porcentagem de intervenções de um terço em relação

à situação inicial. No entanto, os maiores ganhos foram representados pelas intervenções do tipo preditiva, uma vez que apresentam benesses mais interessantes que os outros dois tipos de manutenção comparados. Este tipo de manutenção passou de pouco mais de 2% entre as intervenções registradas inicialmente em 2012, para uma representatividade de 40% aquando da implantação do sistema de monitoração, o que representa um crescimento de 20 vezes em relação à percentagem inicial.

Destarte, é possível se inferir que após a implantação do sistema de monitoração, houve relevante ganho do ponto de vista da eficiência das intervenções de manutenção efetuadas, atendendo à proposta do PMP.

Com a implantação do PMP, através do SIMME, as equipes de manutenção e operação ficaram informadas a qualquer momento sobre os níveis de vibração, temperatura, etc, verificando, se estão dentro das faixas normais de funcionamento, este acompanhamento é imprescindível para que o modulo de diagnóstico possa ser atualizado adequadamente.

5.6 CUSTOMIZAÇÃO DOS ÍNDICES

A tabela 5.4 ilustram respectivamente a customização por defeitos do sistema, interrupção, falhas operacionais. Diferença percentual de diminuição do cenário 01 para 02 são:

Defeitos do sistema – 76,39%; Interrupção – 44,56%; Falhas operacionais – 35,01%

Tabela 5.4 Indicadores dos Resultados de manutenção antes da implantação 2012.

	Indicadores antes da implantação do SIMME	Indicadores após da implantação do SIMME		
	Indisponibilidade não planejada	Indisponibilidade planejada	Economia após implantação do SIMME	Porcentagem (%)
Defeitos do sistema	R\$ 2.142.847	R\$ 506.032	R\$ 1.636.815	-76,39
Interrupção	R\$ 4.147.085	R\$ 2.298.984	R\$ 1.848.101	-44,56
Falhas Operacionais	R\$ 2.004.238	R\$ 1.302.567	R\$ 701.671	-35,01

Fonte: Autor, 2013; Manaus Energia S/A, 2013.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do PMP através da implantação do SIMME deste estudo de caso foram monitorados durante o período descrito na tabela 5.2. Com base neste estudo pode-se observar que:

- As principais vantagens deste sistema são: monitoração contínua de diversos parâmetros.
 - Visualização dos valores globais e análise das formas de onda das diversas variáveis ao mesmo tempo por diversos usuários distantes dos equipamentos.
 - Envio de mensagem eletrônica em caso de eventos.
 - Armazenamento de informações em bancos de dados.
 - Emissões de relatórios e análise do Módulo de Diagnóstico.
 - Utilização do SIMME como ferramenta de manutenção preditiva.
 - Aplicação do PMP.
 - O software desenvolvido é capaz de lidar conforme a base de dados da usina.
 - Redução de falhas das máquinas.
 - Redução do tempo de parada nas máquinas.
 - Aumento na produtividade e conseqüentemente nos lucros.
 - Aumento da disponibilidade e confiabilidade dos geradores elétricos.

Com as análises dos resultados e discussão dos fatos verificamos que é viável economicamente a implantação do sistema SIMME como ferramenta de manutenção preditiva aplicando o PMP como melhoria contínua da gestão de manutenção em qualquer Empresa de Geração de energia elétrica, verifica-se um aumento da manutenção autônoma, um aumento da manutenção preditiva e a diminuição da manutenção corretiva.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO

De acordo com os estudos abordados neste trabalho foi possível evidenciar que atualmente a técnica de “Análise de temperatura, Análise do óleo e da Análise de Vibração” aplicada à manutenção preditiva é indispensável para grandes empresas, isto por prover confiabilidade aos processos e equipamentos detectando problemas ainda em fase inicial, proporcionado para o setor de manutenção um bom planejamento das atividades nos equipamentos sem prejudicar o plano de produção da empresa. Promovendo assim o crescimento da mesma no que diz respeito ao atendimento de prazos, e conseqüentemente um aumento da satisfação do cliente.

Hoje para que os processos de transformação sejam cada vez mais eficazes um programa de manutenção preditiva é indispensável para um bom desempenho de qualquer processo, uma vez que o referido programa busca, acima de tudo, limitar ao mínimo possível as interrupções do fluxo produtivo oriundas de falhas nos equipamentos e instalações. Interrupções essas que poderiam ser evitadas caso sejam detectadas as causas antecipadamente, não esquecendo é claro, que para implementar este programa é necessário: Procedimentos; treinamento e acima de tudo comprometimento de todos que estão envolvidos.

Com base nas informações da análise de dados do estudo de caso, foi possível identificar a melhoria na árvore de perdas operacionais, depois da implantação do PMP, melhorando a produção de energia da planta.

Puderam-se evidenciar por meio dos relatórios do SIMME as análises em questão, precavendo os equipamentos (geradores elétricos) em estudo, de problemas que poderiam causar danos à empresa, problemas os quais são detectados precocemente pela análise de vibração, proporcionando assim uma intervenção programada sem prejudicar a produção de energia elétrica, provendo confiabilidade ao processo de geração de energia.

Comprova-se a solução de um problema em situação real da empresa, onde não existiam instrumentos (mecanismos) para efetuar a manutenção preventiva, apenas manutenção corretiva através da análise instintiva da equipe de manutenção, o que foi solucionado através da aplicação de um plano de manutenção preditiva através do SIMME, que possibilitou a análise de vibração, eliminando o problema de indisponibilidade do equipamento (gerador elétrico), pois não há necessidade de desligamento dos equipamentos para a execução das inspeções com a utilização das análises.

Os aplicativos foram feitos em conjunto com os usuários, tanto pelas equipes de manutenção, como pelas equipes de operação, tornando os mesmos personalizados, e feitos

de acordo com as necessidades das instalações. O custo do sistema foi basicamente o do *hardware* instalado, o aplicativo poderá ser instalado em locais diferentes, e a manutenção do *software* terá custo reduzido, além do treinamento ser feito por profissionais da própria Manaus Energia.

No presente trabalho, os ganhos com a ferramenta de manutenção preditiva, supramencionados puderam ser aferidos com base nas informações do estudo, a qual, ao longo do tempo, apresentava um número alto de ocorrências de manutenção corretiva, esta alta incidência de ocorrências de manutenção corretiva provocava interrupções em parte da produção de energia, acarretando prejuízos à empresa.

Após a implantação do programa, comprovou-se, através da melhoria dos indicadores de manutenção, a solução de um problema em situação real com a diminuição contínua da manutenção corretiva num período de um ano, portanto no aspecto econômico e financeiro e no aspecto de confiabilidades dos equipamentos (geradores elétricos), tornou-se viável adotar a implantação de um programa de manutenção preditiva na empresa Manaus Energia.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a otimização do sistema de monitoramento de máquinas elétricas como ferramenta de manutenção preditiva fazem-se algumas citações que poderão ser feitas em trabalhos futuros:

Comparação do sistema de monitoramento de máquinas elétricas com outros sistemas de monitoramento comercialmente vendáveis a fim de comprovar sua eficiência.

Implantação do sistema de monitoramento de máquinas elétricas via internet.

Desenvolvimento de interface para edição de regras e configurações.

Aproveitamento do sistema de monitoramento de máquinas elétricas para motores a diesel, turbinas a gás, transformadores e reatores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIAAN VAN HORENBEEK, LILIANE PINTELON. *A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. Reliability Engineering & System Safety, Volume 120, December 2013, Pages 39-50.*

ALMEIDA, MÁRCIO TADEU E GÓZ, RICARDO DAMIÃO SALES. Apostila do Curso de Vibrações em Motores. FUPAI, Itajubá, 1994.

ALMEIDA, M.T., “Manutenção Preditiva: *Confiabilidade e Qualidade*”. Curso de Análise de Vibrações I, Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 1999, Itajubá, MG. Disponível em: ALMEIDA, M. T.; GOZ, R. D. S. & ALMEIDA, F. R. V., “Curso de análise de vibração I”, FUPAI, Itajubá, 2007. ARATO, A. J., “*Manutenção preditiva usando análise de vibrações*”, Barueri, Editora Manole Ltda, 2004.

ARATO, ADYLES J. Manutenção preditiva usando análise de vibrações. Barueri, SP: Manole, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5462. Rio de Janeiro, 1994.

AURÉLIO BUARQUE DE HOLANDA FERREIRA e J.E.M.M. *Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa*; Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira, 1986.

BARONI, TARCÍSIO ET AL. Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, Editora Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.

BARONI, TARCÍSIO ET AL. Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, Editora Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.

BELMONTE, D. L.; SCANDELARI, L. Gestão do conhecimento: aplicabilidade prática na gestão da manutenção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2006. Disponível em: <http://www.pg.cefetpr.br/ppgep/Ebook/ARTIGOS2005/Ebook%202006_artigo%2054.pdf>. Acesso em: 22 mai 2008.

BRAMATTI, N.; SENA A.; VALE J.M.; Desenvolvimento de sistema especialista para auxílio a manutenção preditiva em geradores hidráulicos, III SNCA - TT-032, 2003.

FORTOLAN, Andréa M. C. Informática educativa trabalhando com portadores de condutas típicas. 2001. Dissertação (Engenharia da Produção), universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GIL, ANTONIO C. Como elaborar projetos de pesquisa. 3.ed. São Paulo. Atlas, 1991.

KARDEC, A.; CARVALHO, C. Gestão estratégica e terceirização. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

LABVIEW *User Manual*. (2015). Fonte: National Instruments Corporation: <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999b.pdf>

LIANG, B.; WNICKI, S.D. I.; BALL A. D, Asymmetrical Stator and rotor Faulty Detection Using vibration, Phase Current And Transient Speed Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(4), 857–869.2003.

MEGGITT. (04 de Jul de 2014). Economy, General Purpose Accelerometer. *Meggitt*. Fonte: <http://www.wilcoxon.com/prodpdf/784A.pdf>

MIRSHAWKA, VICTOR. *Manutenção Preditiva – Caminho para Zero Defeitos*, Ed. McGrawHill. São Paulo, 1991.

MOUBRAY, J., *Reliability-centered maintenance*. 2 ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

MOUBRAY, JOHN. *RCM – Reliability Centered Maintenance*. Ed. SQL Brasil - 2ª edição, 1999.

MUSZYNSKA, A. *Vibrational diagnostics of rotating machinery malfunctions*. *International Journal of Rotating Machinery*, v. 1, p. 237–266, 1995.

M. TRAORE, A. CHAMMAS, E. DUVIELLA. *Supervision and prognosis architecture based on dynamical classification method for the predictive maintenance of dynamical evolving systems*. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 136, April 2015, Pages 120-131.

NEMÉSIO SOUSA, JORGE. *Técnicas Preditivas de Manutenção Elétrica - 22º Engeman*. Apostila da disciplina de Manutenção de Equipamentos e Instalações Elétricas - Capítulo 2 -22º Engeman. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

NORMA ISO 10816-1, “Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements o non-rotating parts”. Part 1: general guidelines.” ISO, Suíça, 1995.

NORMA ISO 7919-5, “Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria”. Part 5: machine sets in hydraulic power generating and pumping plants. ISO, Suíça, 1997.

NORMA ISO 7919-2, “Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria”. Part 2: Large land-based steam turbine generator sets, ISO, Suíça, 1996.

NORMA ISO 7919-1, “Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria”. Part 1: general guidelines, ISO, Suíça, 1996.

PALLEROSI, C., *Confiabilidade, A quarta dimensão da qualidade*. Vol. *Mantenabilidade e Disponibilidade*. ReliaSoft Brasil, 2007.

RIPPER. Monitoração e Diagnóstico de Máquinas. [s.l.]: COPPETEC; UFRJ, 2001. (Apostila do Curso "Técnicas Modernas de Manutenção").

SALOMON DV. *Como fazer uma monografia: elementos de metodologia do trabalho científico*. 4a edição. Belo Horizonte: Interlivros; 1974.

SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Newnes, 2004.

SHAW, IAN S., SIMÕES, MARCELO GODOY, "Controle e Modelagem Fuzzy", ed. Edgard Blucher – FAPESP, 1999.

SILVA, E. L.; "O Provimento de Potência Reativa como um Serviço Ancilar", XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de energia Elétrica, outubro de 1999. <http://www.itaipu.gov.br/xvsnptee/xvsnptee/grupoix/gop01.pdf>

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. Administração da Produção. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

TAKAHASHI, Y & OSADA, T. Manutenção Produtiva Total. São Paulo: Instituto IMAM, 1993.

TAVARES, LOURIVAL AUGUSTO. Excelência da manutenção – estratégia para otimização e gerenciamento / Lourival Augusto Tavares; Posfácio Rogério Negri. Salvador, BA: Casa da Qualidade, 1996.

TRIVINOS, Augusto N. S. Introdução à pesquisa em ciências sociais. São Paulo. Atlas, 1994.

THURBIN, Patrick J. *Implementando a Organização Aprendiz*; São Paulo: IMAM, 1995.

VALE, J.M.A.; Desenvolvimento de Sistema Especialista para Auxílio a Manutenção Preditiva em Geradores hidráulicos; dissertação de Mestrado em Eng. Elétrica da UFPA aprovada em 26/03/2003.

WERKEMA, M.C.C. *As ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos*; Belo Horizonte: Ed de Desenvolvimento Gerencial, 1995.

W.L. LU, Y.M. HWANG. *Análise de um micro-gerador induzida por vibração com uma micro-mola e indução bobina helicoidal*. Microelectronics Reliability, Volume 52, Issue 1, January 2012, Pages 262-270.

XENOS, HARILAU GEORGIUS D'PHILIPPOS. The Measurement and Automation Catalog, National Instruments, 2002. Gerenciamento a Manutenção Produtiva. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.

YA'CUBSOHN, R.V. El Diagnostico de fallas por analisis vibratório. Editora Die Techik Ltda. São Paulo, 1983.

YIN, Robert K. *Case study research: design and methods*, 2. ed. Newbury Park: Sage, 1989.

ZACHARIAS, Oceano J. *ISO 9000:2000: conhecendo e Implementando: uma ferramenta de gestão empresarial*; São Paulo: O.J. Zacharias, 2001.

ANEXOS

A1 - Características gerais do Gerador hidráulico**A1.1 - Características Nominais**

➤ Turbina	
Tipo	Kaplan
Quantidade	05
➤ Potência	
Nominal (h = 21,72 m)	51,50 MW
Máxima (h máximo = 25,00 m)	58,20 MW
Mínima (h = 16,00 m)	17,20 MW
➤ Velocidade	
Síncrono	105,88 rpm
Específica (potência em KW)	512,40 rpm
Disparo	273,00 rpm
➤ Queda Líquida Operacional	
Nominal (5 grupos/N.A. montante = 50,00)	21,72 m
Máxima (1 grupos/N.A. montante = 50,00)	24,83 m
Mínima (5 grupos/N.A. montante = 46,00)	17,80 m
➤ Vazão de Queda	
Nominal	260 m ³ /s
Disparo	470 m ³ /s
Rendimento nominal	94,9 %
Efeito de enérgia (turbina+gerador)	11x10 ³ kN m ²
➤ Rotor	
Numero de pás	05
Material da pá	Aço inoxidável 17/4
Peso (rotor completo)	797,55 kN
Diâmetro do rotor	5 893 mm
Diâmetro do cubo	2 690 mm
➤ Eixo da Turbina	
Diâmetro	1 000 mm

Diâmetro do flange de acoplamento	1 700 mm
Comprimento	4,98 m
Peso	343,35 KN
➤ Eixo intermediário	
Diâmetro	1 000 mm
Diâmetro do flange de acoplamento	1 700 mm
Comprimento	3,55 m
Peso	235,44 KN
➤ Mancal-escora	
Tipo	Escora e guia combinado
Carga Máxima	11 x 10 ³ kN
Temperatura máxima do óleo	69 °C
Quantidade de Mancais-guia da turbina	2
➤ Pré-distribuidor	
Números de palhetas fixas	14 + 1
Diâmetro interno da circunferência das extremidades das palhetas	8 320 mm
Diâmetro externo da circunferência das extremidades das palhetas	9 380 mm
➤ Distribuidor	
Número de palhetas móveis	24
Altura das palhetas	2 163 mm
Diâmetro da circunferência do centro das munhões	7 200 mm
Número de servomotores do distribuidor	2
➤ Regulador de velocidade	
Tipo	Neyrpic Rapid 77
Pressão de trabalho	40 bar
➤ Gerador	
Tipo	síncrono
Quantidade	5
Potência	
Nominal (de placa – 80 °C)	55,5 MVA
Máxima	62,8 MVA

Tensão nominal de geração	13,8 kV
Fator de potencia nominal (cós 0)	0,90
Frequência	60 Hz
Máxima eficiência ponderada (cós 0 = 90)	97,28 %
Corrente nominal do estator	2.322 A
Classe de isolamento	F
Corrente nominal do campo	1.007 A / 1.044 A
Tensão nominal do campo	219 V / 212 V
Máxima elevação de temperatura permitida	120 °C
Velocidade de disparo	273 rpm
➤ Estator	
Diâmetro interno	8.965 / 8.950 mm
Peso	1.078 kN
➤ Rotor	
Diâmetro	8.943 mm/1.823 mm
Peso	1.833 kN / 1.823 kN
Número de polos	68
Fabricante	Vigesa/Jeumont

A1.2 - Diagrama geral do Gerador hidráulico

