ALTAE 2013
CONGRESO INTERNACIONAL EN ALTA TENSIÓN Y AISLAMIENTO ELÉCTRICO
Del 2 al 5 de diciembre de 2013
La Habana, Cuba

IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS EM ALTA TENSÃO

Vilmar Domingos da Silva Neto[1]. João Paulo Abreu Vieira[2]. Jandecy Cabral Leite[3]. Raimundo Edney dos Santos Azevedo[4].

[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – (IFAM).vilmar.neto@ifam.edu.br. Avenida Sete de Setembro Nº1975.Centro. CEP: 69020-120. Manaus – Amazonas – Brasil. +55 92 3621 6764.
[2]Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, CEAMAZON.
Parque de Ciência e Tecnologia Guamá - Avenida Perimetral da Ciência, km 01. Prédio 01, 2º Andar. Universidade Federal do Pará (UFPA). jpavieira@ufpa.br. Guamá. 66075-970 - Belém, PA – Brasil. Telefone: +55 91 3321-8921.
[3]Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia (ITEGAM). jandecy.cabral@itegam.org.br. Praça Francisco Pereira da Silva, nº 149. Bola da Suframa. Distrito Industrial. CEP 69073-270. Telefones: +55 92 3248-2646 e +55 92 3584-6145.
[4]Instituto Nokia de Tecnologia (INDT). edney.azevedo@indt.org.brAvenida Torquato Tapajós Nº7200. Bairro: Colônia Terra Nova. CEP: 69093-415. Manaus – Amazonas – Brasil. +55 92 2126 1124.

RESUMO. Este artigo apresenta o desenvolvimento e implantação de um sistema de monitoração on-line para os Geradores Hidráulicos da Eletrobrás-Amazonas Energia S/A. Estes geradores Hidráulicos são grandes máquinas rotativas de 250 MVA de potência ativa, onde a constante avaliação dos seus parâmetros físicos é crítica. No Estado do Amazonas a Eletrobrás-Amazonas Energia S/A, opera com cinco geradores hidráulicos que fazem parte do seu sistema de transmissão. Este sistema foi concebido a partir da necessidade de dotar as equipes de operação e manutenção, de ferramentas de apoio à manutenção preditiva para serem utilizadas num equipamento de grande importância para os sistemas de transmissão da empresa. A metodologia consiste num sistema desenvolvido composto por uma parte de *hardware*, que são os sensores, medidores, transmissores, fontes, os condicionadores de sinal, computadores, placas de aquisição de dados, placas seriais, dispositivos de aquisição distribuídos, etc; e uma parte de *software*, que são os Módulos Servidores de Aquisição e Banco de Dados, Módulo Cliente e Módulo de Diagnóstico. A arquitetura do sistema é do tipo cliente/servidor, utilizando-se a rede intranet da Eletrobrás-Amazonas Energia S/A para transmissão dos dados. O módulo de auxilio ao diagnóstico é baseado em lógica *fuzzy* e utiliza as informações dos eventos registrados em banco de dados, podendo ser utilizado como uma ferramenta de auxílio à manutenção preditiva pelas equipes de operação e manutenção. O resultado obtido foi um sistema com as características de ser simples, confiável e de baixo custo quando comparado com os sistemas de monitoração comerciais, geralmente importados.

***Palavras-Chave* - Gerador Elétrico, Monitoração de Vibração e Sistema Inteligente.**

ABSTRACT. This article presents the development and implementation of a online monitoring system for Hydraulic GeneratorsEletrobrás-Amazonas Energia S/A. These hydraulic generators are large rotating machinery 250 MVA active where the constant evaluation of its physical parameters is critical. In the State of Amazonas, Eletrobrás-Amazonas Energia S/A operates with five hydraulic generators that are part of its transmission system. This system was conceived from the need to provide teams of operation and maintenance of tools to support predictive maintenance for use in very important for transmission systems of the company. The method or system developed is comprised of a hardware part, which are the sensors, gauges, transducers, sources, signal conditioners, computers, data acquisition boards, boards serial distributed acquisition devices, etc; and a software, part which are the servers Acquisition Modules and Database Module, Client and Diagnostic Module. The system architecture is client/server, using the intranet network of Eletrobrás-Amazonas Energia S/A for data transmission. The aid module to diagnosis is based on fuzzy logic and uses the information of the events recorded in the database and can be used as a tool for the predictive maintenance for the operating and maintenance teams. The result was a system with the characteristics of being simple, reliable and low cost compared with commercial monitoring systems, usually imported.

***Key-words* - Electric Generator, Vibration Monitoring, Smart System.**

1. INTRODUÇÃO

Dentro do 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, aumenta cada vez mais a importância da manutenção preditiva, implementando-se procedimentos que visam diminuir as paradas 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 obter prejuízos consideráveis por necessitarem de um fornecimento contínuo de energia. Dessa forma, com a aplicação de manutenção preditiva, há um aumento na eficiência e confiabilidade do sistema elétrico, pois passa a ser possível a previsão das paradas para manutenção das máquinas [1]. Por outro lado, existirão subsídios para o estudo detalhado da causa de um problema ocorrido. O presente artigo tem como finalidade apresentar soluções de apoio à manutenção preditiva, de forma a possibilitar a monitoração contínua e remota de compensadores síncronos. Utilizaram-se basicamente sensores de vibração, proximidade, pressão, temperatura, medidores de potência, condicionadores de sinal desenvolvidos para este trabalho, microcomputadores, placas de aquisição de dados, módulos em *software* desenvolvidos. Os sistemas especialistas podem ser adaptados para a condição de monitoramento, interpretação dos dados da máquina, devido à capacidade de identificar processos de raciocínios sistemáticos [2]. Apesar da utilização de computadores para a manipulação de dados de vibração, a interpretação dos espectros de vibração e diagnóstico de falhas da máquina, geralmente tem permanecido a trabalho de especialistas altamente treinados [3]. A dificuldade de construção de uma base de conhecimento de especialistas humanos e implementação de sistema pericial para uma ampla gama de possíveis falhas é um inconveniente comum de sistemas de inteligência artificial [2] e [4].

Embora os sistemas artificialmente inteligentes tenham sido desenvolvidos para a análise de vibração, que foram desenvolvidos para um determinado componente da máquina particular, incluindo elementos de rolamentos [5] e transformadores [6] e [7].

Apresenta-se no decorrer da pesquisa 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 é utilizada a linguagem gráfica LabVIEW, da National Instruments [8]. 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 freqüência, 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 e muitas 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.

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 a utilização de um Módulo de Diagnóstico desenvolvido em lógica*fuzzy* que serve como ferramenta de manutenção preditiva [3] e [8]. Os aplicativos foram feitos em conjunto com os usuários, tanto por equipes de manutenção como por equipes de operação, tornando os mesmos personalizados e feitos de acordo com as necessidades das instalações. Como o desenvolvimento dos aplicativos em *software* e condicionadores de sinal é feito no Laboratório Central da Eletronorte (LACEN), o custo do sistema é basicamente do *hardware* instalado e o de Homem-Hora envolvido. O mesmo aplicativo poderá ser instalado em locais diferentes, e a manutenção do *software* terá custo reduzido, além do treinamento ser feito por profissionais da própria organização, onde justifica-se em apresentar soluções de apoio à manutenção preditiva, de forma a possibilitar a monitoração contínua e remota dos Geradores hidráulicos, utilizando basicamente sensores de vibração, proximidade, pressão, temperatura, medidores de potência, condicionadores de sinal desenvolvidos para este trabalho, microcomputadores, placas de aquisição de dados, módulos em *software* desenvolvidos no Laboratório Central e da rede de computadores (Intranet) da Eletrobrás-Amazonas Energia.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Gerador hidráulico

O Gerador hidráulico é projetado para transformar a energia mecânica (pressão) em energia cinética através do fluxo de água, em potência de eixo. Onde são

acopladas a um gerador elétrico, o qual é conectado à rede de energia. Seu funcionamento é muito simples: Aágua entra pela tomada de água (montante) da usina hidrelétrica, que está num nível mais elevado, é conduzida através de um conduto forçado até a entrada a turbina, passando por um sistema de palhetas guias móveis, que controlam a vazão volumétrica fornecida à turbina, após passar por este mecanismo, a água chega num duto chamado tubo de sucção que conduz a água até o nível mais baixo do rio (jusante).

A energia hidrelétrica é historicamente a mais importante fonte de energia elétricana no Brasil. As futuras usinas hidrelétricas em todo país possuem um alto impacto na sua construção. Novas técnicas e ferramentas de projetos modernos baseados em sistemas computacionais permitem aumentar a produção e diminuir as perdas em usinas hidrelétricas
existentes[9-10]. O maior potencial é em turbinas e geradores. A maioria dos geradores construídos antes de 1960 podem ser modificados e atualização em pelo menos 15% [11]. As áreas onde a maioria dos avanços têm ocorrido desde o tempo de construção, são : o isolamento da bobina do estator, a análise de refrigeração, térmicos e computacional ferramentas.

O Gerador hidráulico em estudo é montado com o eixo no sentido vertical, com mancais inferiores e superiores que suportam todo o peso das partes girantes da turbina.

2.1.1 Caixa Espiral

É uma tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Esta parte fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser removida ou modificada. O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina. A água distribui-se homogeneamente, através da caixa espiral construída em concreto. A concordância da caixa com o pré-distribuidor dar-se em ângulo de 216˚, medindo a partir do eixo transversal. A caixa foi provida de porta de visita e de taps de medição de pressão (medição Winter-Kennedy), de duas grelhas, uma para esgotamento e outra para tomada de água de resfriamento [12].

É fabricada com chapas de aço carbono, soldadas em segmentos. A caixa espiral conecta-se ao conduto forçado na secção de entrada, e ao pré-distribuidor na secção de saída.

2.1.2 Pré-Distribuidor e Distribuidor

A finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuidor. É composta de dois anéis superiores, entre os quais são montados um conjunto de 15 palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, para não gerar perda de carga e não provocar turbulência no escoamento.

E uma parte sem movimento, soldada à caixa espiral fabricada com chapas ou placas de aço carbono. Já o distribuidor é constituído de tampa superior externa em forma de caixão, fortemente nervurada, dividido em
quatro partes unidas por ligações aparafusadas, e de tampa inferior, também construída em quatro partes.

Nessas tampas, há 24 furos, onde estão alojados os munhões das palhetas moveis. A partir da tampa inferior, desenvolve-se a cinta superior que, por sua vez une-se a cinta inferior. O distribuidor é acionado por meio de dois servo-motores e um mecanismo constituído de anel de regulação e conjunto de bielas e manivelas. A proteção de segurança é feita por meio de parafusos de ruptura a tração .Os mancais dos munhões da palheta são revestidos com faixas de teflon [13 -14]. As características principais do distribuidor são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características do distribuidor

Diâmetro de furação	7.200 mm
Altura	2.163 mm
Número de palhetas móveis	24
Altura total da palheta	3.652 mm
Largura da palheta	1.003,5 m

2.1.3 Rotor e Eixo

O rotor possui cinco pás de aço cromo-níquel (16/4) montadas em tubo de aço fundido (ASTM643GR.A). No interior do cubo, está montado um mecanismo e o servo-motor de acionamento das pás. Na parte inferior do cubo, está montada uma ogiva, construída em chapa de aço, e, na parte superior, está acoplado o eixo da turbina. Os eixos da turbina e o intermediário foram construídos em aço forjado, provido de flanges de acoplamento. O flange superior do eixo intermediário é acoplado ao rotor do gerador. Esses eixos são vazados, permitindo a passagem da tubulação Kaplan que alimenta o servo motor das pás. O cabeçote Kaplan está montado em um suporte colocado acima da cruzeta superior do gerador. A vedação do eixo é do tipo plano, constituída basicamente de uma peça deslizante, de aço inoxidável, em contato com anéis de carvão. Durante a operação da turbina, essa junta é alimentada continuamente por água centrifugada, a 100 microns, para permitir a limpeza e o resfriamento das partes deslizantes. Por ocasião das paradas, é aplicada a junta de vedação inflável, pressurizada pela tubulação de alimentação d'água da junta de serviço. A drenagem das fugas de água de selagem e infiltrações pelas tampas são coletadas no fundo das tampas internas e bombeadas para o canal de fuga. O bombeamento e feito por meio de duas bombas (uma reserva), comandadas por chaves de nível [15].

2.1.4 Tubo de Sucção

A parte blindada do tubo de sucção foi construída com chapas de aço, fortemente nervuradas, e providas de porta de visitas. Por essa porta monta-se a plataforma de inspeção, a qual permite a verificação das cintas e

das pás da turbina.Na parte superior do cone foi, soldada a cinta inferior do rotor. A blindagem estende- se até a seção na qual a velocidade da água atinge cerca de 7m/s. O cotovelo do tubo de sucção e de concreto, com pilar central provido de blindagem no nariz. Duto de saída da água, geralmente com diâmetrofinal maior que o inicial, desacelera o fluxo da água após esta ter passado pela turbina, devolvendo-a ao rio parte jusante da casa de força.

2.2 Gerador Elétrico

É constituído essencialmente por um motor síncrono, dividido em duas partes, a saber: o estator, formado por um conjunto de enrolamentos de campo em analogía com máquinas C.C, e o rotor, sistema rígido que gira em torno de um eixo apoiado em mancais inferiores e superiores fixos na base do motor, no qual é alimentado em corrente elétrica, induzida em seus anéis coletores acessíveis pela parte externa da máquina, em acordo com a Lei de Lenz, exerce forças contrárias à rotação da turbina, produzindo energia elétrica na saída do conjunto de rolamento do estator conforme mostra a Figura 1 do Gerador Hidráulico de 250 MVA localizado na UHE Balbina [16] e [17].

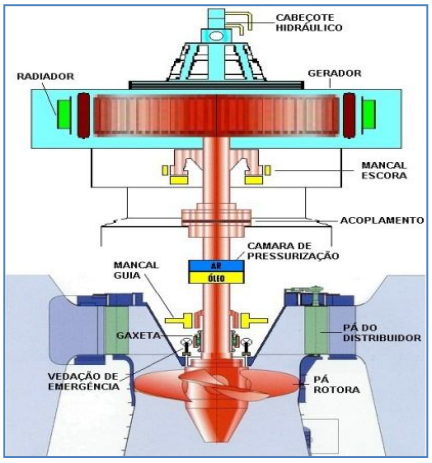

Figura 1 - Gerador Hidráulico de 250MVA localizado na UHE Balbina.

A Figura 1 apresenta o Gerador Hidráulico de 250 MVA de fabricação Kaplan instalado no Município de Presidente Figueiredo, distrito de Balbina, sob jurisdição da Eletrobrás-AmazonasEnergia S/A. Sendo formado pela sua característica elétrica de saída, de13,8Kv, derivando esta tensão para o transformador elevador e transformado em 230KV, e conduzindo através da linha de transmissão a Manaus. Todos os conjuntos de excitação, regulação e frenagem atuam
no enrolamento de campo da máquina. Graças a este sistema, o Gerador Hidráulico tem a possibilidade de operar excitado, permitindo a geração da potência ativa para o sistema, dentro de limites de capacidade da máquina. Em linhas gerais, o fornecimento e a absorção de potência ativa destinam-se às seguintes finalidades:

aumentar o limite de transferência de potência entre áreas, controlar o perfil de tensão em regime normal de operação e controlar o regime de tensão em regime transitório [17].Os geradores elétricos devem ser considerados como umafonte de potência ativa, pois sua principal função é gerar tensão durante períodos de necessidades [18].

2.2.1 Descrição do Gerador Elétrico

Gerador hidráulico [19] e [20] de eixo vertical, providos de respectivos reguladores eletro-hidráulicos e demais equipamentos e acessório periféricos a seguir:

• Estator: O estator consiste na estrutura, núcleo e enrolamentos.

• Estrutura: Sua estrutura é fabricada através de chapas de aço carbono soldadas em segmentos e conectada a parte interna e externa do gerador.

Possui uma tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Esta parte fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser removida ou modificada. O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina.
Possui um pré-distribuidor que direciona a água para a entrada do distribuidor, que compõe dois anéis superiores, entre os quais são montados um conjunto de 18a24 palhetas fixas, com perfil hidrodinámico de baixo arrasto, para não gerar perda de carga e não
provocar turbulência no escoamento. Sendo esta parte sem movimento, soldada à caixa espiral e fabricada com chapas ou placas de aço carbono.
Seu distribuidor é composto de uma série de 18 a 24 palhetas móveis, acionadas por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina (sem contato com a água). Todas as palhetas tem o seu movimento conjugado, isto é, todas se movem ao mesmo tempo e de maneira igual.
O acionamento é feito por um ou dois pistões hidráulicos que operam numa faixa de pressão de 20 bar nas mais antigas, até 140 bar nos modelos mais novos.
O distribuidor controla a potência da turbina pois regula vazão da água. É um sistema que pode ser operado manualmente ou em modo automático, tornando o controle da turbina praticamente isento de interferência do operador.
O duto de saída da água, geralmente com diâmetro final maior que o inicial, desacelera o fluxo da água após esta ter passado pela turbina, devolvendo-a ao rio parte jusante da casa de força.
É constituído essencialmente por um motor síncrono, dividido em duas partes, a saber: o estator, formado por um conjunto de enrolamentos de campo em analogia com máquinas C.C, e o rotor, sistema rígido que gira em torno de um eixo apoiado em mancais inferiores e superiores fixos na base do motor.
Na parte superior do gerador estão os anéis coletores, onde há duas aberturas de acesso: uma na parte frontal

e traseira para as escovas e os terminais de fase e neutro.
• Núcleo do estator: O núcleo é maciço em aço silício de grão orientado de alta permeabilidade com baixas perdas específicas. Seu peso é de 900 toneladas.
Enrolamento de Armaduras: A bobina consiste de barras ROEBEL transpostas (duas por ranhura), cada uma delas possuindo sua própria camada de isolação continuamente envolvida. Os envolventes são dispostos na forma de um espiral em torno de um cone com um pequeno ângulo de abertura para reducir o fluxo nas extremidades.
Cada barra consiste de tranças de cobre transpostas de acordo com o sistema ROEBEL ao longo de toda a extensão do núcleo para minimizar o máximo possível as perdas adicionais provocadas pelo campo transversal da ranhura.
As tranças de cobre (fios) são isoladas uma das outras por um revestimento à base de tecido de vidro impregnado com resina epóxi. O isolamento de cada fio de cobre é testado durante a fabricação. As barras são continuamente isoladas (classe F) ao longo de toda sua extensão, de acordo com processo THERMALASTIC, usando fitas micáceas impregnadas com resina de epóxi sob vácuo e pressão. Durante a fabricação as barras são secadas a vácuo e depois polimerizadas num aparelho de calibragem.

Para se evitar descarga ou corona, as regiões das barras embutidas nas ranhuras são então revestidas com tinta condutiva, e o complemento da barra com tinta semi-condutiva.
As duas barras em cada ranhura são separadas por um espaçador isolante e presas na posição por cunhas de fechamento com seção trapezoidal (o comprimento de cada cunha igual a dois pacotes de laminação). Em cada extremidade do núcleo, os envolventes são amarrados juntos, porém espaçados por calços isolantes envoltos em feltro de tergal impregnados com resina de epóxi que endurece à temperatura ambiente.
Todo o conjunto é amarrado em volta de anéis de vidro interconectados por fortes calços de modo a formar um bloco rígido. Este bloco é juntado às chapas de aperto por apoios de aço austenístico. Juntas especiais permitem o deslocamento desse bloco devido à dilatação das barras. As cabeças do enrolamento são soldadas juntas e isoladas por meio de epóxi que endurece com a temperatura do ar ambiente.
Nove RTD's (Resistance Temperature Detectors) são localizados no meio e nas extremidades do núcleo para medir a temperatura dos enrolamentos durante a operação. Os mesmos se acham dentro dos espaçadores isolantes entre as barras.

2.3 Necessidade de Monitoração On-line

A Eletrobrás-Amazonas Energia possui atualmente 5 geradores hidráulicos, distribuídos da seguinte forma: Sistema de transmissãoBalbina – Manaus: cinco unidades de 250 MVA localizadosna Vila de Balbina, Município de PresidenteFigueiredo-AM.

São, portanto, máquinas importantes nos Sistemas da Manaus Energia, e a falta temporária delas podem ocasionar problemas de estabilidade e diminuição da potência transmitida, com conseqüente diminuição de receita para a Manaus Energia e diminuição da potência transmitida para Manaus. Existe ainda o problema das multas aplicadas pela agência reguladora (ANEEL), em caso de paradas não programadas, ocasionando grandes perdas, conforme demonstrado na Arvore de Perdas, mostrada na Figura3. Nesta figura mostra-se olevantamento das perdas com e sem interrupção de carga durante o ano de 1999, obtidas a partir da implantação da Manutenção ProdutivaTotal (TPM) na Regional de Comercialização do Amazonas. As maiores perdas foram do tipo P2, que são as paradas planejadas sem interrupção de carga.
Na ocasião, constatou-se que a instalação de um sistema de monitoração on-line poderia contribuir com dois dos mais importantes objetivos do TPM, que são a Quebra Zero e a redução das perdas, no sentido que o sistema poderia eliminar as paradas não planejadas e permitir um melhor planejamento das paradas planejadas, como mostra a Figura 3.

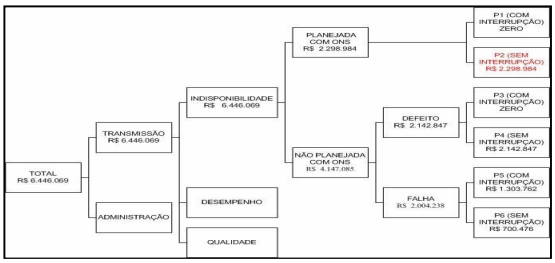

Figura 3 - Arvore de Perdas Operacionais no ano de 2007.

Tendo em vista os resultados, a Manaus Energia decidiu pela monitoração on-line dos geradores hidráulicos, utilizando-se de recursos humanos e materiais do seu laboratório central (LACEN) e das regionais envolvidas, aproveitando e colocando em prática, dessa forma, o conhecimento do seu pessoal. Buscou-se então o desenvolvimento e a implantação de um sistema de monitoração confiável, de baixo custo, de fácil operação e que disponibilizasse informações contínuas para profissionais localizados em qualquer lugar da Empresa. A expectativa desta implantação é fazer com que haja uma melhor eficiência da máquina de forma a se ter um mínimo de paradas programadas, evitando-se ao máximo o desligamento fora de programação. Tudo isso, de forma a garantir também um aumento da vida útil da máquina em decorrência de melhor manutenibilidade devido ao acompanhamento contínuo das condições operacionais do equipamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos aplicados ao estudo

consistem num sistema desenvolvido chamado SIMME dos quais foram analisados com os seguintes objetivos na Etapa I:

• Disponibilizar para a Eletrobrás-Amazonas Os procedimentos metodológicos aplicados ao estudo Energia um Sistema de Monitoração on-line de Geradores Hidráulicos que fosse confiável, simples de operar, de baixo custo, quando comparado com os sistemas comerciais disponíveis no mercado e com a interface HM (homem-máquina) elaborada de acordó com as necessidades das equipes de manutenção e operação da Eletronorte.
• Disponibilizar informações continuamente, ativando alarmes e enviando mensagen por mensagem eletrônica a determinadas pessoas.
• Reduzir os custos de viagens e Homem-Hora de coleta de sinal, análise e emissão de relatórios por especialistas.
• Fornecer informações úteis para as equipes de operação e de manutenção da Eletronorte, 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 de equipes distintas sobre o compensador num módulo inteligente de auxílio ao diagnóstico, que fornecesse indicações de defeitos a partir de informações guardadas em banco de dados.
• Aproveitar de forma prática os investimentos realizados pela Eletronorte em treinamentos e em cursos de especialização e pós-graduação nas áreasde engenharia elétrica, mecânica e informática, resultando na concepção e implementação de um produto de grande utilidade na empresa.

Etapa II – Descrição do projeto do software:

a) Hardware
• Fontes, sensores, transmissores e condicionadores de sinal.
• Computadores de aquisição e de banco de dados, placas de aquisição de dados, placas seriais, módulos Field-Point, cabos, etc.

b) Software
• Módulo Servidor de Aquisição de Dados
• Módulo Servidor de Banco de Dados
• Módulo Inteligente deAuxílio ao Diagnóstico
• Módulo Cliente

c) Instrumentação Virtual
A concepção do Sistema baseou-se no conceito de "Instrumentação Virtual" [3]. 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 4). Esses aplicativos rodam em computadores PC convencionais, de boa qualidade.

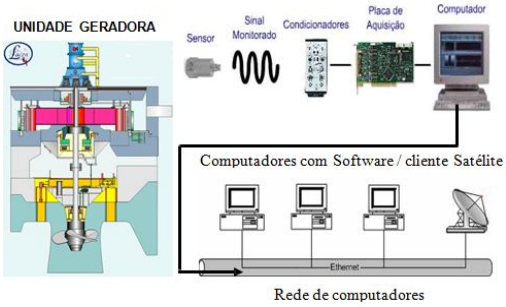

Figura 4 - Instrumentação Virtual

4. Resultados e Discussões

4.1 O aplicativo SIMME
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 micrômetros. 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). A Figura 5 mostra a tela inicial do módulo do cliente.

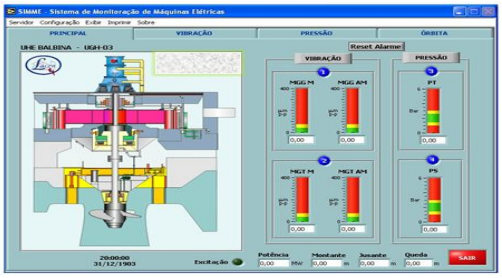
Figura 5 - Tela inicial do Módulo Cliente

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 6) a seleção do gerador UHE 03 (gerador no 3 da UHE - Balbina). A conexão com o servidor é realizada mediante uma permissão de acesso, que depende de identificação e senha do usuário (Figura 7). Para posibilitar o acesso ao servidor de outro Gerador, é necessário inicialmente desconectar o servidor acessado, e depois conectar ao seguinte como mostra as Figura 6 e 7.

Figura 6 - Seleção dos servidores e banco de dados
Figura 7- Senha de acesso aos Servidores

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 8, 9, 10, 11) 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.

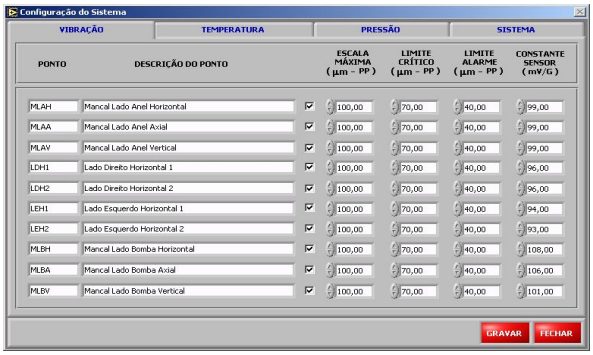

Figura 8 - Configuração dos canais de Vibração.

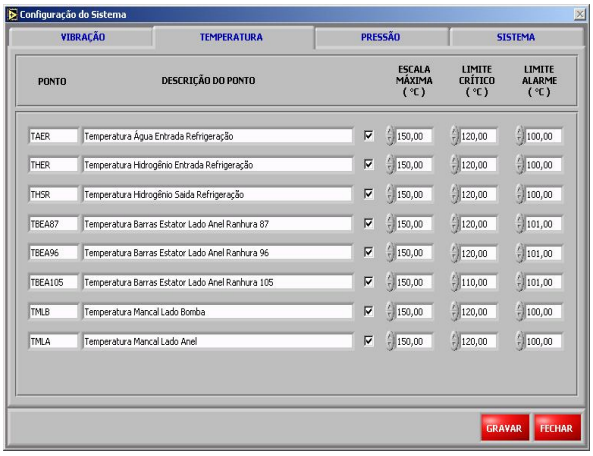

Figura 9 - Configuração dos canais de Temperatura

Figura 10 - Configuração dos canais de Pressão

Figura 11 - Configuração do Sistema

Caso o usuário não seja cadastrado para alterar a configuração do sistema, aparece uma mensagem de "Usuário não cadastrado" (Figura 12).

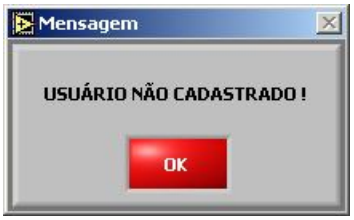

Figura 12 - Usuário não cadastrado

Comando "Cadastro de Usuários": Através dele, o administrador inclui novos endereços e concede deprivilégios, 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 13).

Figura 13 - Cadastro de usuários

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 abreviado nas telas (Figura 14).

Figura 14 - Legenda dos PontosMonitorados.

O comando “Gráfico de análise dos Sinais” abre uma tela de visualização dos gráficos dos sinais dos canais de vibração, tanto no tempo como no espectro de freqüências. Os sinais de vibração podem ser visualizados em aceleração, velocidade ou deslocamento nas unidades correspondentes (mm/s2, 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 enviandoasformas de onda dos sinais no tempo, os quais são analisados no programa cliente (Figuras 15e16). O programa elabora um relatório que pode ser salvo e/ou impresso.

Figura 15 - Mensagem aguardando amostra dos sinais de vibração

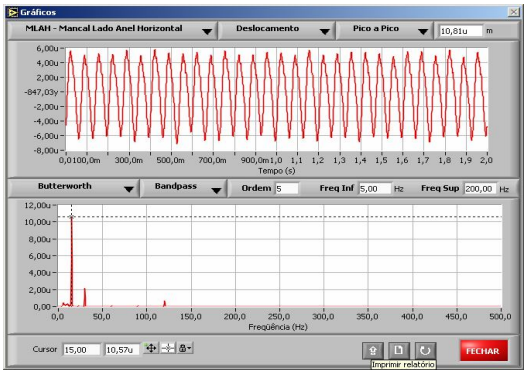

Figura 16 -Gráficodos Sinais de vibração

Ao fechar a tela dos gráficos, o programa mostra uma mensagem perguntando se o usuário deseja manterou não os gráficos no banco de dados (Figura 17).

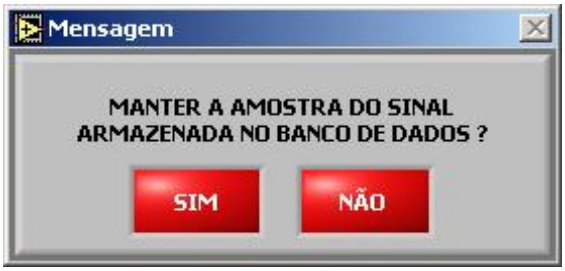

Figura 17 - Pergunta sobre o armazenamento das amostras no banco de dados

O comando “Eventos Ocorridos” abre uma tela de“LeiturasRegistros dos Eventos” (Figura 18) 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.

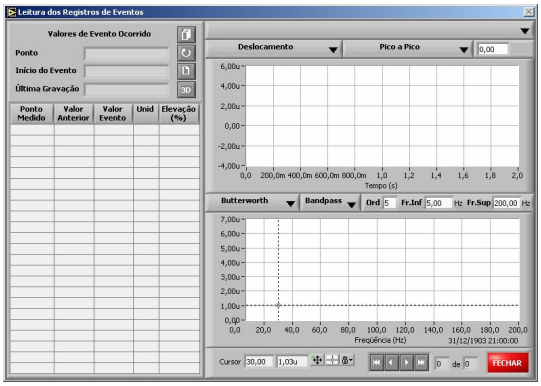

Figura 18 - Tela de Registro dos Eventos

Os dados que serão apresentados na Figura 19 são selecionados entre todos os eventos registrados.

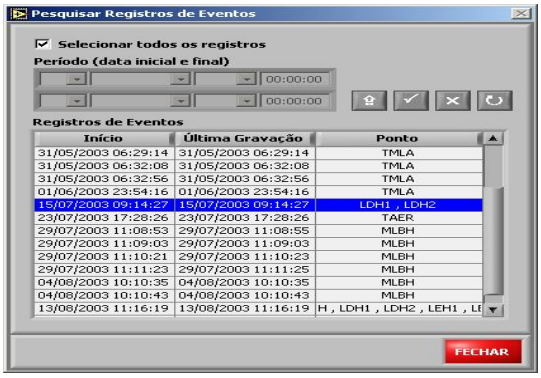

Figura 19 - Tela de pesquisa dos eventos

Após o evento ter sido selecionado, é mostrado na tela de registro de eventos (Figura 20). Podem ser visualizadasas sequências dos sinais, desde antes da ocorrência até o final da mesma.

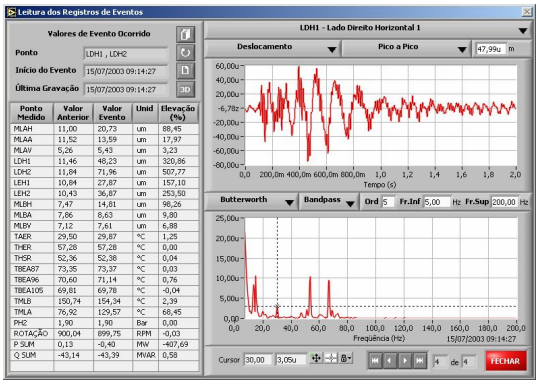

Figura 20 - Gráficos do evento selecionado

O comando “leitura dos Registros das Amostras” abre uma tela (Figura 21) em que são selecionadas as amostras (Figura 22), que serão visualizadas em forma de tabela e gráficos (Figura 23). O programa elabora um relatório que pode ser salvo ou impresso.

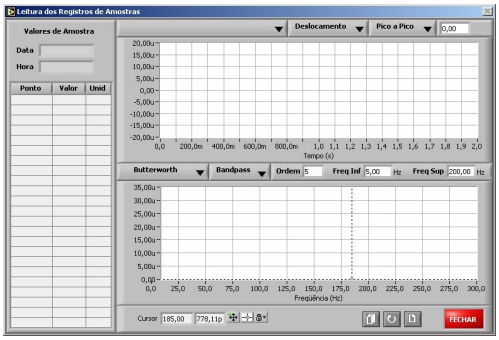

Figura 21 - Tela da leitura das amostras

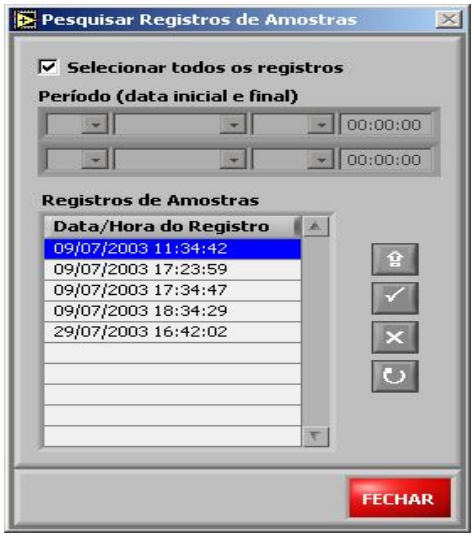

Figura 22- Seleção das amostras

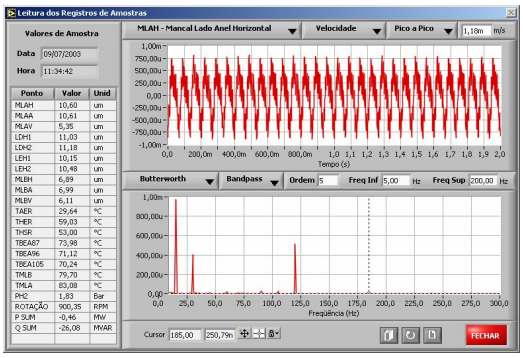

Figura 23 - Visualização das Amostras

O comando “Curva de Tendência” abre uma tela de Leitura dos Registros Armazenados Periodicamente (Figura 24 e 25), de forma a termos uma curva de tendência para todas as variáveis. O período de amostragem é definida 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.

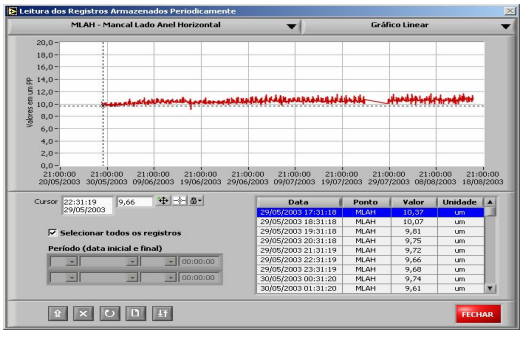

Figura 24 - Gráfico dos registros periódicos de um canal de vibração.

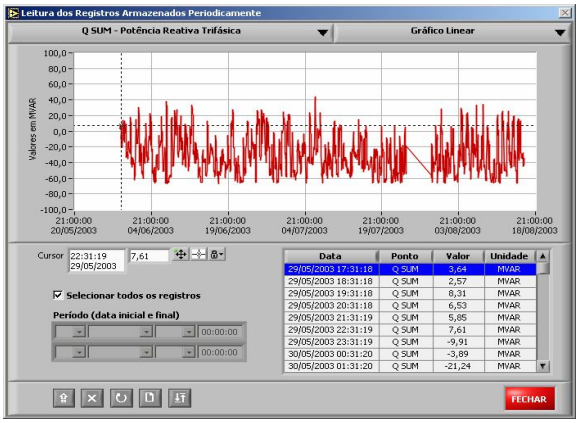

Figura 25 - Gráfico dos registros periódicos da potência reativa trifásica.

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 Freqüência.
- Relatório de Registro de Eventos.
- Relatório de Registro de Amostra.
- Relatório de Registros Periódicos.

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, relaciona as variáveis que 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 porcentual da variação, os valores ajustados para alarme e crítico. Os resultados são mostrados nas (Figura 26 e 27) e nas (Tabelas 2 e 3).

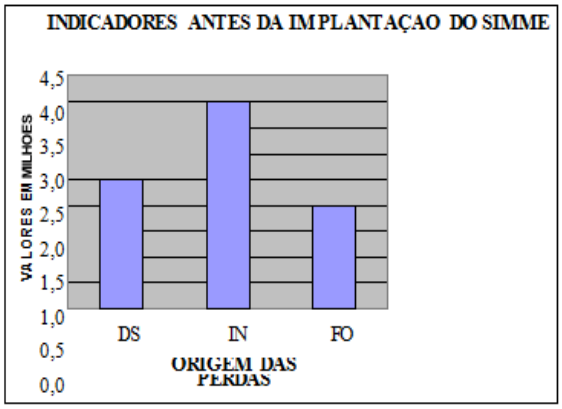

Figura 26 – Indicadores da implantação do SIMME

Tabela 2 – Indisponibilidade não planejada

INDISPONIBILIDADE NÃO PLANEJADA		
DEFEITOS SISTEMA	DS	R$ 2.142.847
INTERRUPÇAO	IN	R$ 4.147.085
FALHAS OPERACIONAIS	FO	R$ 2.004.238

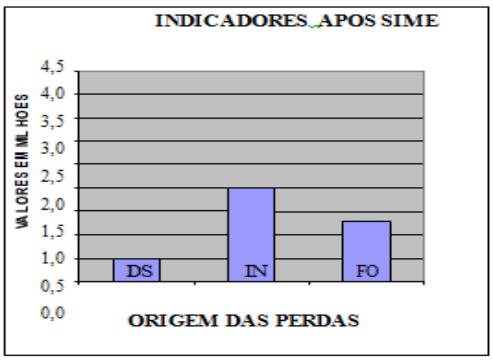

Figura 27 – Indicadores após SIMME

Tabela 3 – Indisponibilidade planejada

INDISPONIBILIDADE PLANEJADA		
Defeitos Sistema	DS	506.032
INterrupção	IN	2.298.984
Falhas Operacionais	FO	1.302,567

5. CONCLUSÕES

O Sistema SIMME já se encontra em operação em um dos cinco geradores hidráulicos da Eletrobrás-Amazonas Energia. Seu desempenho tem sido acompanhado pelo LACEN, e com bons resultados. Assim, as equipes de manutenção e operação estão sabendo a qualquer momento se os níveis de vibração, temperatura, etc, estão dentro das faixas normais. Esse acompanhamento é imprescindível para que o Módulo de Diagnóstico possa ser atualizado adequadamente.

Os problemas do sistema até agora apresentados relacionaram-se com a alimentação dos computadores, que é feita através de *no-breaks*, que apresentaram defeito. Está em estudo a alimentação dos mesmos através de inversores ligados diretamente aos bancos de baterías aumentando a confiabilidade.

Entre as melhorias que estão previstas no sistema, destacam-se: monitoração via internet, que encontra-se em operação adequadamente quando forem melhorados os sistemas de comunicação das subestações, aumentando a taxa de transmissão de dados. Já está funcionando a interface para edição das regras e configurações do Módulo de Diagnóstico. Todo o estudo feito para os geradores hidráulicos pode ser aproveitado na monitoração de outros equipamentos de transmissão e geração de energia elétrica, como hidrogeradores, motores a diesel, turbinas a gás, transformadores e reatores, etc.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa contou com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM. A Eletrobrás-Amazonas Energia S/A, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e as pertinentes contribuições do Instituto Tecnologia Galileo da Amazônia (ITEGAM) e da Universidade Federal do Pará (UFPA), pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

[1] Bramatti, N.; Sena A.; Vale J.M.; Desenvolvimento de sistema especialista para auxilio a manutenção preditiva em geradores hidráulicos, III SNCA - TT-032, 2003.

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

[3] Shaw, Ian S., Simões, Marcelo Godoy, "Controle e Modelagem Fuzzy", ed. Edgard Blucher – FAPESP,1999.

[3] Ebersbach, Stephan; Peng Zhongxiao. Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring. Expert Systems with Applications. Elsevier. Vol. 34.. p. 291–299. (2008).

[4] Rich, E., & Knight, K. Artificial intelligence (second ed.). USA: McGraw Hill. (1991).

[5] LabVIEW User Manual, National Instruments, Edição janeiro 2010.

[6] Li, B., Chow, M. Y., Tipsuwan, Y., & Hung, J. C. (2000). Neural network based motor rolling bearing fault diagnosis.IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47(5), 1060–1069.

[7] Islam, S. M., Wu, T., & Ledwich, G. (2000). A novel fuzzy logic approach to transformer fault diagnosis. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 7(2), 177–186.

[8] LabVIEW User Manual, National Instruments, Edição janeiro 2010.

[9] Wang, Z., Liu, Y., & Griffin, P. J. (1998). A combined ANN and expert system tool for transformer fault diagnosis. IEEE Transactions on Power Delivery, 13(4), 1224–1229.

[10] Verkningsgradsforbattringar i vattenkraftstationer, published by Elforsk. Report no 93:2, September 1993.

[11] Bolund B, Thorburn K, Sjo ¨stedt E, Eriksson M, Segergren E, Leijon M. Upgrading generators with new tools and high voltage technology. J Hydropower Dams 2004;11(3):104–8.

[12] IEEE guide for the rehabilitation of hydroelectric power plants. IEEE Std 1147, 1991.

[13] Liying Wang[a] Dehua Wei. The Optimum Structural Design for Spiral Case in Hydraulic Turbine. Elsevier. Procedia Engineering 15 p. 4874 – 4879 (2011).

[14] Liu da-kai. Turbine.beijing: China hydraulic power press, 1997.

15] Zheng yuan. Turbine.beijing: China hydraulic power press, 2007.

[16] Dejan Momcilovic[a]; Zoran Odanovic[a]; Radivoje Mitrovic[b] and Ivana Atanasovska[c]. Failure analysis of hydraulic turbine shaft. Elsevier. Engineering Failure Analysis Vol. 20. (2012).

[17] 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.

[18] The Measurement and Automation Catalog, National Instruments, 2012.

[19] Notice de Fonctionnement et D'Entretien, Generators Hydraulic, Sous- Stations UHE Balbina et Manaus, Alsthom Atlantique, 1982.

[20] Usina Hidréletrica de Balbina Memória Técnica 1997; Projeto Civil – EEC.