

## **SISTEMA ESPECIALISTA BASEADO EM REGRAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO NA OPERAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS**

**Antonio Almeida Silva, [almeida@dem.ufcg.edu.br](mailto:almeida@dem.ufcg.edu.br)<sup>1</sup>**

**Diego Charles da Silva Basilio, [diegocharles.basilio@yahoo.com.br](mailto:diegocharles.basilio@yahoo.com.br)<sup>1</sup>**

**Marcos Antonio da Silva Irmão, [marcos.silva@univasf.edu.br](mailto:marcos.silva@univasf.edu.br)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, Bloco BJ, Bodocongó, 58429-900 – Campina Grande – PB

<sup>2</sup> Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Av. Antonio Carlos Magalhães, 510, Santo Antônio, 48902-300 – Juazeiro – BA

**Resumo:** *Este trabalho tem como objetivo apresentar um Sistema Especialista (SE) baseado em regras de análise de vibração para auxílio à tomada de decisão, visando o monitoramento e diagnóstico de falhas, durante a operação e manutenção de bombas centrífugas. Para o desenvolvimento do SE foi adotada a arquitetura Cliente/Servidor com a utilização de tecnologias para web applications, que o torna de fácil manutenção e utilização. Possui uma interface que pode ser acessada através de um navegador de internet, onde o operador, com um login e uma senha, dispõe de acesso restrito a um conjunto de ferramentas que possibilita, em tempo real, verificar o estado operacional do equipamento. Leituras obtidas com o auxílio de um sistema aquisição de dados acoplado ao SE, permitem a visualização gráfica dos níveis vibratórios de operação, espectros e gráficos de tendência, bem como a manutenção de uma base de dados do histórico de operação e intervenções como recursos que complementam o processo de tomada de decisão. O SE possui ainda um motor de inferência que dispõe de um pacote de regras expansível sob a forma de recomendações, baseadas em critérios de severidade de vibração em níveis global (domínio do tempo) e espectral (domínio da frequência). As recomendações podem ser obtidas através de consulta ao histórico de operação, análise de arquivos de dados ou de logs gerados pelo sistema de monitoramento. Para avaliação do SE foram realizados testes numa bancada didática, com os quais foi possível constatar que este pode se tornar uma ferramenta útil no auxílio às tarefas de monitoramento e diagnóstico de falhas em sistemas de bombeamento.*

**Palavras-chave:** *Sistema Especialista, Monitoramento e diagnóstico de falhas, Análise de Vibração, Bombas Centrífugas.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A análise da vibração pode ser utilizada como uma técnica bastante confiável para se determinar a condição operacional de um sistema de bombeamento. Após se conhecer os parâmetros do sistema através de padrões de vibração (linha de base ou referência), pode-se monitorar a taxa de aumento da vibração (tendência) para determinar a estabilidade operacional do sistema de bombeamento. Um aumento significativo na vibração significa que o sistema mudou sua condição operacional, e poderá estar sujeita a uma intervenção visando seu retorno à condição inicial de funcionamento.

O estabelecimento de modelos e regras a partir de parâmetros vibratórios possibilita o diagnóstico de operação, e tal diagnóstico visa permitir a previsão de panes ou funcionamento precário da máquina e, assim, contribuir decisivamente para a otimização de novos projetos e das atividades de manutenção. Atualmente já existem várias cartas e gráficos de severidade de vibração adotados por fabricantes e especialistas em análise de vibrações de máquinas rotativas, porém todo este conhecimento ainda não se encontra consolidado para equipamentos e componentes específicos, como é o caso de bombas centrífugas.

A aplicação de tais modelos e regras em um sistema computacional que ofereça uma interface amigável, disponibilidade de acesso remoto e um conjunto de ferramentas para monitoramento e processamento dos sinais que são obtidos a partir de um sistema de aquisição próprio ou coletores, pode tornar-se uma ferramenta adequada e prática no que diz respeito à detecção e o diagnóstico de falhas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Arquitetura do SE

A arquitetura de sistemas Cliente/Servidor possibilita a um terminal Cliente a obtenção de informações execução de aplicativos hospedados em outra máquina – o Servidor, desta forma reduz-se a carga de processamento no Cliente e centraliza a aplicação em uma única máquina facilitando as tarefas instalação e manutenção do aplicativo. Os aplicativos *web based* são desenvolvidos baseados nesta arquitetura, onde, se utilizando um navegador de internet, que por meio do protocolo HTTP pertencente à arquitetura de comunicação TCP/IP, o usuário acessa aos recursos do aplicativo hospedado em um servidor web.

O modelo de desenvolvimento de software escolhido foi o de divisão em camadas, o MVC (*Model View Controller*), que permite uma boa separação entre a lógica, os dados e a interface do sistema, conforme apresentado na Figura 1.

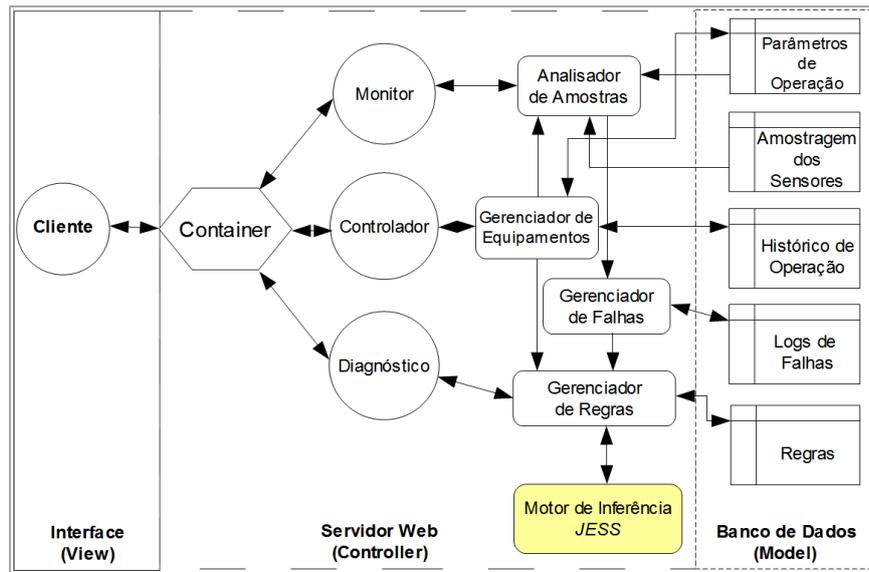


Figura 1 - Diagrama de interação do SE

Em um esquema convencional de monitoramento o protótipo do SE receberia dados de um servidor conectado ao *joinbox* através de uma interface de aquisição desenvolvida utilizando-se a tecnologia da National Instruments – NI LabView, conforme apresentado na Figura 2.

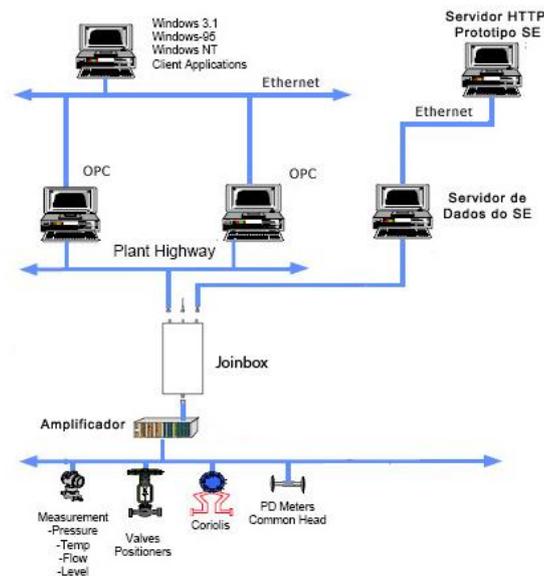


Figura 2 - Comunicação do SE com o sistema de monitoramento da planta.

## 2.2. Módulo Controlador

A tecnologia JEE (Java Enterprise Edition) foi utilizada para a concepção da lógica do servidor responsável pelo tratamento de solicitações do aplicativo cliente e acesso ao banco de dados (Deitel, 2005). O SE está basicamente dividido em 3 módulos: o Controlador, o Monitor e o Diagnóstico. Todo o sistema é hospedado em um Servidor Web Apache Tomcat, um Container Web para execução de aplicações em JEE. A Figura 1 apresenta um esquema de como as camadas do SE interagem entre si.

O módulo Controlador possui os métodos para inserção e alteração de informações no banco de dados pelo usuário do SE, tais informações são necessárias para a configuração do sistema, catálogo de equipamentos, gestão do histórico de operação e administração de usuários. Para o desenvolvimento do banco de dados utilizou-se o MySQL um SGDB (Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados).

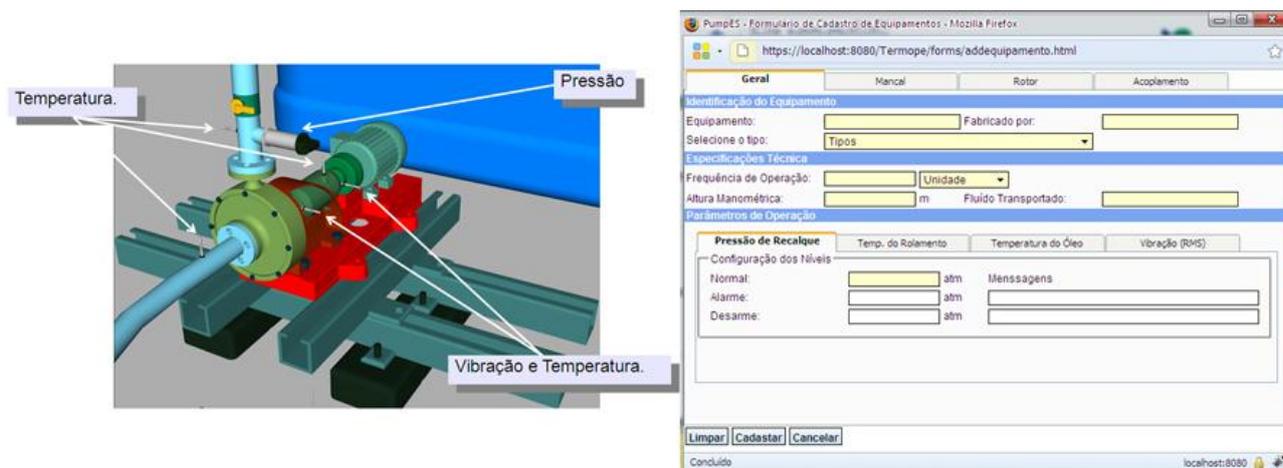
### 2.2.1. Cadastro de Equipamentos

Para possibilitar ao SE o reconhecimento de diversos tipos de bombas centrífugas, este dispõe de um gerenciador de equipamentos responsável pela manipulação do cadastro de equipamentos.

Além de possibilitar o reconhecimento do equipamento para monitoramento e diagnóstico, os dados armazenados funcionam como um catálogo de componentes, pois informações como tipo de rolamento, rotor e mancal são especificados durante o cadastramento, desta forma em caso de falha ou defeito a identificação do componente a ser substituído poderá ser feita através de uma consulta aos dados do equipamento.

O SE possui uma interface para cadastro de dois tipos de bombas: bomba centrífuga vertical e bomba centrífuga horizontal; através desta interface é possível a parametrização dos limites de operação nos níveis: normal, alarme e desarme; especificações como a frequência de operação, número de elementos rolantes e tipo dos rolamentos, quantidade de pás do rotor entre outras informações que serão utilizadas durante o processo de geração de diagnóstico.

O SE foi concebido inicialmente contendo uma rota básica de monitoramento com sensores de vibração localizados nos mancais próximo ao motor (PM) e próximo ao rotor (PR) nas direções horizontal (x) e vertical (y), bem como sensores de medidas de temperatura do óleo no suporte do mancal e nos rolamentos (PM e PR), temperatura de entrada e saída do fluido e medidas de pressão de recalque. Podemos observar na Figura 3(a) o esquema de monitoramento e na Figura 3(b) o formulário para cadastro de equipamentos.



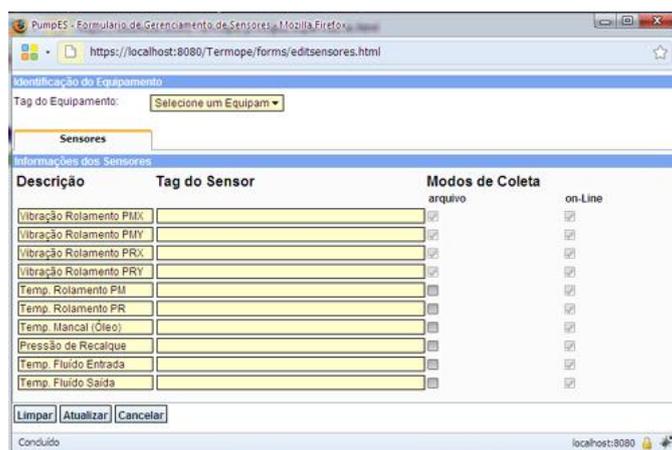
(a)

(b)

**Figura 3 - Esquema de medição baseado no modelo de monitoramento do SE (a), Formulário para Cadastro de Equipamentos (b).**

### 2.2.2. Alteração do Cadastro de Sensores

O SE permite dois modos de entrada de dados para verificação do estado operacional dos equipamentos: o *on-line* que corresponde à leitura em banco de dados alimentado por um sistema de aquisição e o *off-line* alimentado por arquivos no padrão ASCII, a partir de um formulário de dados. Na Figura 4 podemos observar a interface para configuração dos sensores, no estágio atual o SE ainda não possibilita alterar as configurações deste modelo de monitoramento, apenas por questões de adaptação a planta de simulação e testes, porém o SE permite a alteração da Tag do Sensor, e esta Tag é utilizada para identificar o sensor por toda a interface do sistema.



**Figura 4 - Formulário para gerenciamento dos sensores.**

A configuração dos sensores é de fundamental importância, pois através da sua descrição e da Tag o usuário do sistema poderá identificá-lo ao resgatar o histórico, solicitar inferências e visualização gráfica das amostras.

### 2.3. Módulo de Diagnóstico

O módulo de Diagnóstico é responsável pelo gerenciamento das regras do SE. Para implementação do módulo de diagnóstico utilizou-se o JESS (*Java Expert System Shell*) uma linguagem interpretada, caracterizada por sua extensibilidade, ou seja, possibilidade de adição de recursos escritos na linguagem Java e por possuir um motor de inferência que utiliza um *Rete Algorithm* (Friedman-Hill, 2003) um algoritmo eficiente para o desenvolvimento de sistemas baseados em regras de produção.

As regras de diagnóstico foram elaboradas a partir de técnicas conhecidas de análise a nível global e espectral dos sinais de vibração, e consistem em um conjunto de recomendações sobre o estado vibratório de equipamentos rotativos e bombas centrífugas do tipo vertical e horizontal. Na Tabela apresenta-se um critério para análise global de diversos tipos de bombas centrífugas e na Tabela outro critério para análise do espectro de velocidades em várias faixas de frequência (Instronic, 2000).

**Tabela 1 - Níveis globais de vibração de alarme e atenção para diversos tipos de bombas centrífugas**

Equipamento	Nível de Alarme Global (NAG) – mm/s	Nível de atenção (mm/s)
Bombas Centrífugas Verticais - Altura de 4 a 6 metros	16,25	11,38
Bombas Centrífugas Verticais - Altura de 2,5 a 4 metros	13,50	9,45
Bombas Centrífugas Verticais - Altura de 1,5 a 2,5 metros	11,00	7,70
Bombas Centrífugas Verticais - Altura de até 1,5 metros	8,25	5,78
Bomba centrífuga de aplicação geral, horizontal, diretamente acoplada ou bombas centrífugas de alimentação de água quente	8,25	5,78
Bomba centrífuga hidráulica	5,50	3,85

**Tabela 2 - Divisão do espectro de velocidade em faixas de frequência (Instronic, 2000).**

Banda de frequência	Limite Inferior da Banda	Limite superior da Banda	Alarme
1	1% F <sub>máx</sub>	1,2 x RPS	90% NAG
2	1,2 x RPS	2,2 x RPS	40% NAG
3	2,2 x RPS	FPP - 1,2 x RPS	35% NAG
4	FPP - 1,2 x RPS	FPP + 1,2 x RPS	60% NAG
5	FPP + 1,2 x RPS	50% F <sub>máx</sub>	35% NAG
6	50% F <sub>máx</sub>	100% F <sub>máx</sub>	20% NAG

Através da ativação do motor de inferência este módulo retorna um diagnóstico em formato de texto sob a forma de recomendações sobre o estado de vibração do equipamento.

## 2.4. Módulo de Monitoramento

Este módulo atende exclusivamente a solicitações do painel de monitoramento, onde a cada solicitação é realizada a análise das amostras disponíveis no Servidor de Dados. O monitoramento age nas camadas 1, 2 e 3 do modelo de camadas apresentados na Figura 5, a seguir, o que torna o monitoramento parte do processo de diagnóstico. Para tornar a aplicação web responsiva, reduzir a latência e o uso da largura de banda utilizou-se o AJAX (*Assynchronous Java Script and XML*), pois com esta tecnologia é possível transferir via HTTP sob marcação em XML dados sem informação de apresentação, ou seja, sem marcação HTML e CSS. No lado cliente estes dados são processados para apresentação.

## 3. O DIAGNÓSTICO

Como dito anteriormente o processo de diagnóstico inicia-se ainda durante o processamento da amostra e este segue o modelo de camadas apresentado na Figura 5. Este modelo possibilita acoplar o SE a qualquer meio de aquisição de dados, pois independe da forma de aquisição por atuar a partir dos valores numéricos disponibilizados pelos coletores/ Servidor Dados de aquisição.

1. Processamento da amostra
2. Monitoração de condição
3. Avaliação do estado
4. Recomendação e prognóstico

Figura 5 - Camadas de diagnóstico do SE.

### 3.1. Processamento da Amostra

Esta camada atua realizando cálculos de RMS e valores de pico nas amostras de vibração, a partir de informações como a taxa de amostragem e tamanho da amostra. Estes valores são armazenados em uma tabela específica do banco de dados para a realização da monitoração de condição.

### 3.2. Monitoração de Condição

A monitoração de condição é realizada por meio de comparações dos valores de RMS obtidos pelo processamento da amostra com os parâmetros de operação específicos do equipamento sob monitoramento ou sob avaliação por meio do diagnóstico *off-line*, caso sejam identificados valores acima dos limites normais o monitor de condição realizará o registro de um *log* de operação no banco de dados.

### 3.3. Avaliação do estado ou condição

Na avaliação do estado do equipamento o *log* de operação gravado pelo monitor de condição é sinalizado, esta sinalização consiste em uma classificação numérica das leituras de acordo com os níveis de operação e são utilizadas pelas interfaces de monitoramento, diagnóstico e consulta ao histórico de operação para escolha do formato de apresentação dos dados. Na Figura 6 podemos verificar as formas de apresentação baseadas na sinalização do *log*.

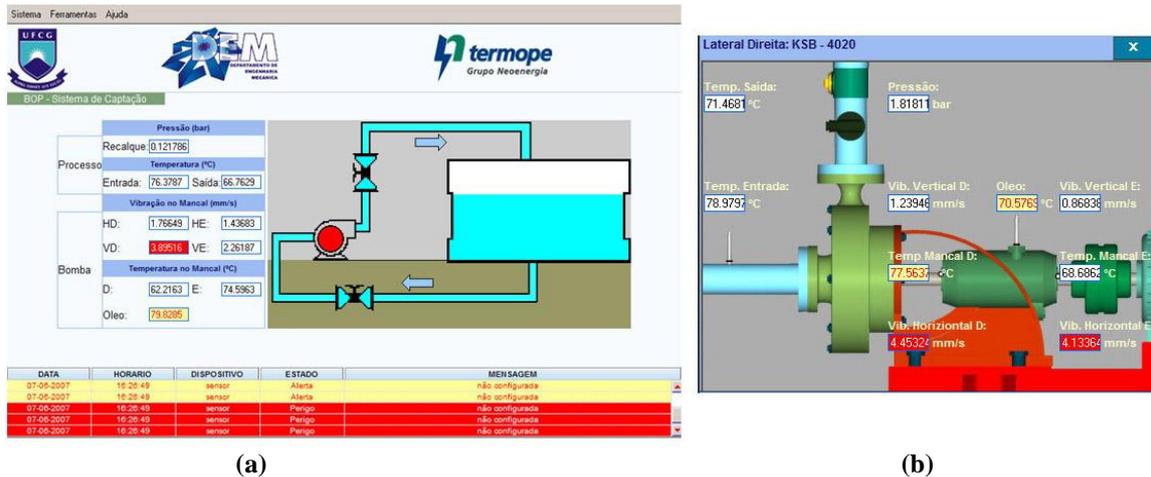


Figura 6 - Sinalização das leituras realizada no painel de monitoramento (a), e na janela de detalhes (b).

### 3.4. Recomendações e prognóstico

A última camada do processo de diagnóstico é responsável pela ativação do JESS. As recomendações são obtidas através do formulário de diagnóstico apresentado na Figura 7(b), este formulário pode ser acessado ao clicar com o mouse sobre um *log* de operação no painel de monitoramento - Figura 6(a), em uma linha de registro no formulário de consulta ao histórico de operação - Figura 7(a). O formulário de diagnóstico também será exibido como última janela do processo de avaliação das amostras em arquivo ao utilizar o recurso de diagnóstico *off-line*.

As regras específicas ao tipo de equipamento sob avaliação são carregadas para a memória do JESS juntamente com os dados armazenados no *log* de operação, em seguida é realizada a inferência.

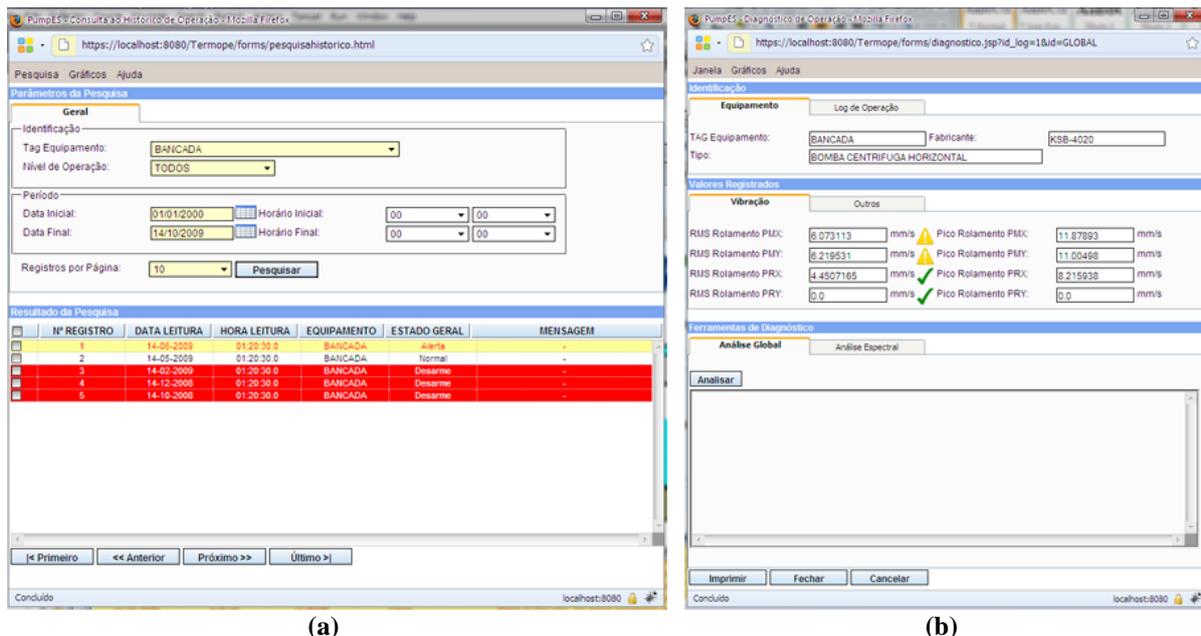


Figura 7 - Formulário de consulta ao histórico de operação (a), e formulário de diagnóstico (b).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para verificação do comportamento do SE foram utilizadas amostras de sinais de vibração coletados numa bancada de testes com um coletor da CSI, em várias situações de falhas simuladas (desbalanceamento, folga na base, falta de óleo no mancal, etc.) e submetidas ao diagnóstico *off-line*. A Figura 8 mostra a bancada de testes instalada no Laboratório de Hidráulica da UAEM/UFCEG. Nesta utiliza-se uma bomba centrífuga radial, com acionamento por motor elétrico de 2 CV de potência, operando a 1750 rpm. O sistema tem uma capacidade de bombeamento de até 20 m<sup>3</sup>/h para uma altura manométrica de 1 m, podendo chegar a 20 m de coluna de líquido. O sistema opera bombeando água no qual está acoplado a um reservatório com capacidade de 1.000 litros em modo contínuo de recirculação (Silva et al, 2007). É importante lembrar que o equipamento deve estar previamente cadastrado no banco de dados e seus níveis de operação devidamente parametrizados.



Figura 8 - Bancada de testes utilizada para simulação de falhas.

#### 4.1. Estudo de Caso: Desbalanceamento

Uma amostra coletada com o equipamento simulando desbalanceamento foi submetida ao SE. O resultado da análise exibido pelo formulário de diagnóstico encontra-se na Figura 9, onde pode-se verificar na seção “Valores Registrados” a sinalização de anormalidades nos níveis de vibração medido pelos sensores nos pontos PMx e PMy.

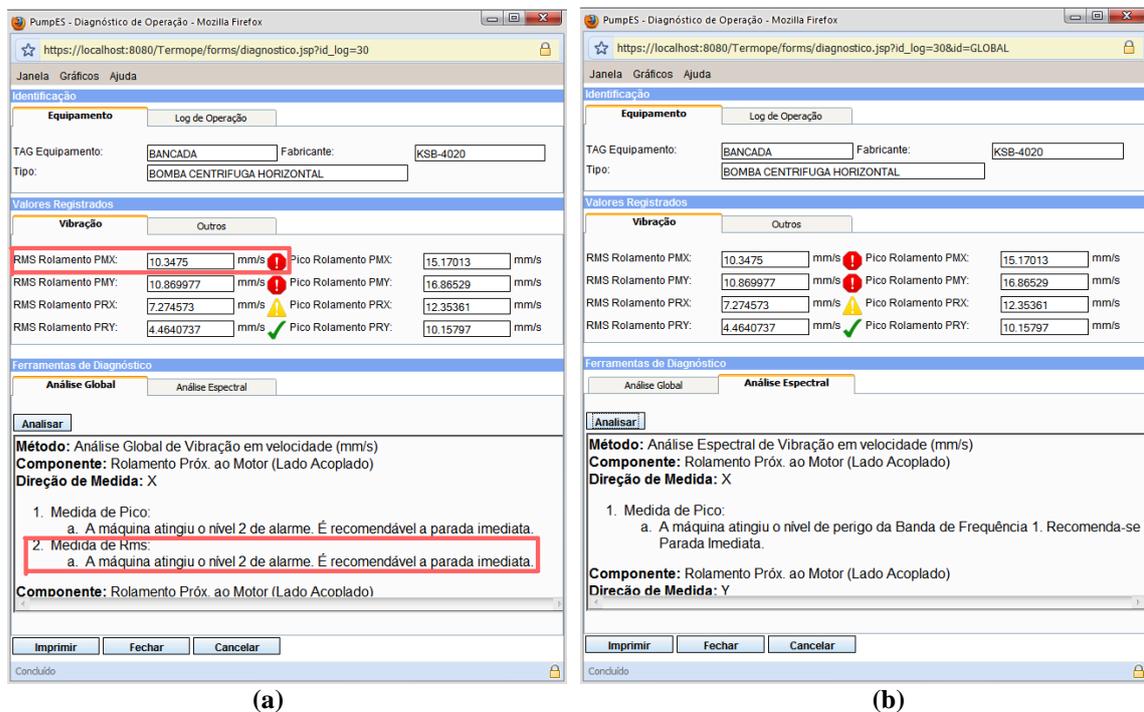


Figura 9 - Formulários de Diagnóstico.

##### 4.1.1. Análise Global

Ao pressionar o botão “Analisar” na guia “Análise Global” o módulo de diagnóstico efetua inferência nos valores aplicando as regras para análise global. Conforme destacado na Figura 9(a) obtem-se a recomendação de parada imediata devido ao alto nível de RMS medido no sensor no ponto PMx do equipamento, onde observa-se também que o valor RMS calculado foi sinalizado como nível crítico máximo representado pela exclamação em vermelho, esta sinalização é estabelecida pela comparação do RMS com os níveis de operação cadastrados no banco de dados, e este resultado confirma a coerência entre a recomendação dada pelas regras com a avaliação da condição dada pelos parâmetros de operação. O resultado da análise foi semelhante para os valores medidos no ponto PMy do equipamento.

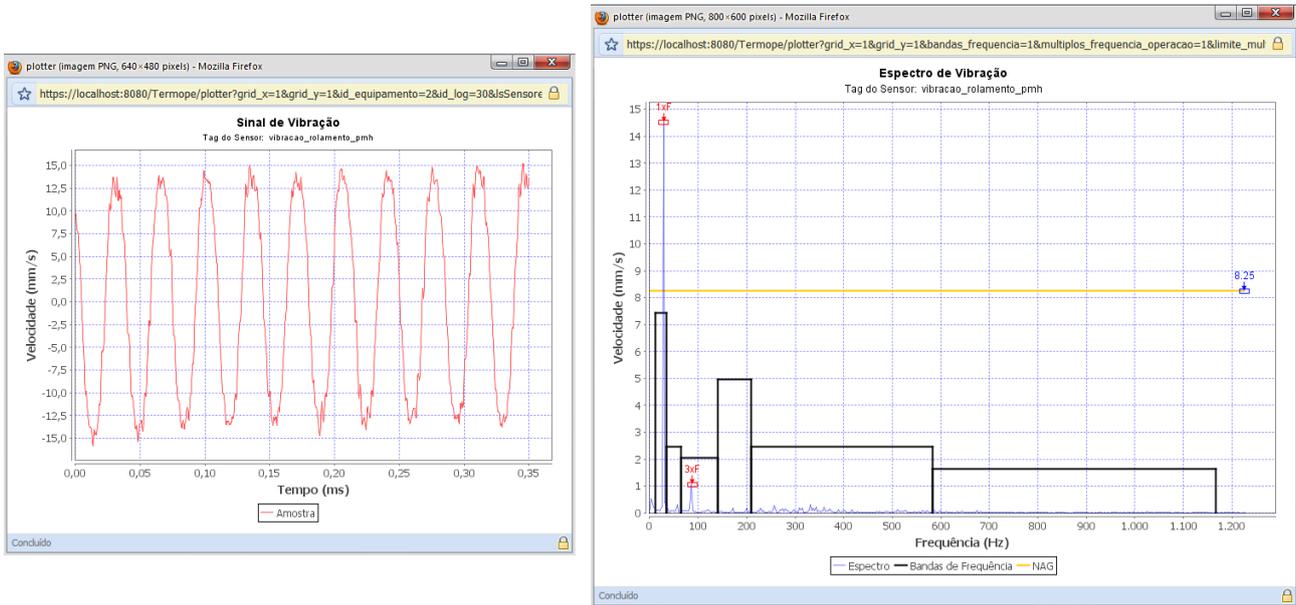
##### 4.1.2. Análise Espectral

Na guia “Análise Espectral” pode-se solicitar ao SE que utilize seu banco de regras de análise de espectro para verificar o estado de operação registrado, o resultado da análise pode ser observado na Figura 9(b). Ao identificar um nível de perigo na medida de pico de vibração na Banda de Frequência 1 do espectro o SE executa com sucesso mais uma etapa de identificação da falha.

### 4.1.3. Visualização Gráfica

O SE possui um motor gráfico que com auxílio de implementações de métodos matemáticos computacionais (FFT, Tendência, AVG), entre outros, possibilita a visualização dos dados sob a forma de gráficos no domínio do tempo e no domínio da frequência (espectros).

O Formulário de diagnóstico exibido na Figura 9 possui uma barra de menus com a opção “Gráficos” nesta podemos escolher entre as visualizações de Sinal Temporal, Espectro em Frequência e AVG. Os gráficos do Sinal Temporal e Espectro em Frequência para a amostra são exibidos na Figura 10.



(a) (b)  
**Figura 10 - Sinal Temporal (a), e Espectro em Frequência (b).**

Para o caso de desbalanceamento simulado a frequência característica é  $1xfr$ , onde  $fr$  representa a frequência de rotação (Hz) (Almeida et al., 2003). O motor gráfico do SE possibilita inúmeras opções de visualização e resolução, para a exibição do espectro da Figura 10(b), onde foram escolhidas as opções de visualização: Bandas de Frequência, Nível de Alarme Global e Múltiplos da Frequência de Operação.

Pode-se observar precisamente uma marca de grande amplitude que coincide com o múltiplo da frequência de operação que corresponde a  $1xfr$ , e este resultado confirma a ocorrência de desbalanceamento da máquina.

## 5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um sistema especialista baseado em regras de análise de vibração para auxílio à tomada de decisão na operação de bombas centrífugas alcançou seu objetivo inicial de proporcionar uma ferramenta eficiente nos processos de monitoramento, análise e recomendação sobre o estado de operação do equipamento. Para os testes de simulação realizados, e o seu banco de regras e análise dos gráficos gerados, os resultados se mostraram coerentes com as técnicas de análise de vibração aplicadas.

A utilização das tecnologias para desenvolvimento para *web* possibilitou o desenvolvimento de uma interface rica e portátil, capaz de disponibilizar um conjunto de ferramentas de fácil utilização e manutenção. Numa fase posterior pretende-se aplicar o SE em situações reais de funcionamento para consolidar as regras já implementadas e gerar novas regras de diagnósticos e prognósticos.

Os resultados confirmam a potencialidade do sistema em tornar-se uma ferramenta indispensável para auxílio à tomada de decisão, especialmente num ambiente onde se faz necessário acompanhar uma planta composta de várias máquinas operando em regime e condições diferenciadas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro ao projeto de P&D 0007 (Termopernambuco – ANEEL) por meio da Fundação Parque Tecnológico da Paraíba - PaqTcPB através dos auxílios financeiros concedidos para melhoria da infra-estrutura dos Laboratórios de Mecânica Computacional da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – UFCG e bolsas de pesquisa.

## **7. REFERÊNCIAS**

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.082, 1985, “Vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 a 12000 rpm”.
- Almeida, M.T.; Vale; F.R., 2003, “Análise de vibrações no conjunto motor-bomba centrífuga”. Instituto MTA.
- Arato Jr., A., 2004, “Manutenção Preditiva Usando Análise de Vibrações”, Barueri, SP: Manole.
- Deitel, H.M.; Paul J., 2005, “Java™ Como programar”. 6a edição. São Paulo: Pearson, p. 1110.
- Friedman-Hill, E., 2003, “Jess in Action: Rule-based Systems in Java”, Manning Publication.
- Crane, D.; Pascarello, E.; James, D., 2007, “Ajax em Ação”, São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall.
- Instronic, 2000, “Apostilha de Treinamento Avançado - Introdução à tecnologia de vibração”. Instrumentos de Testes Ltda.
- Silva, A.A., 2007, “Desenvolvimento de Sistema Especialista para o Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Bombas de Água de Alimentação de Uma Usina Termoeletrica”, Relatórios Técnicos Nº 9, 11 e 12, UFCG.

## **8. Direitos Autorais**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **RULE-BASED EXPERT SYSTEM IN VIBRATION ANALYSIS FOR DECISION SUPPORT ABOUT CENTRIFUGAL PUMPS OPERATION**

**Antonio Almeida Silva, [almeida@dem.ufcg.edu.br](mailto:almeida@dem.ufcg.edu.br)<sup>1</sup>**

**Diego Charles da Silva Basilio, [diegocharles.basilio@yahoo.com.br](mailto:diegocharles.basilio@yahoo.com.br)<sup>1</sup>**

**Marcos Antonio da Silva Irmão, [marcos.silva@univasf.edu.br](mailto:marcos.silva@univasf.edu.br)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, Bloco BJ, Bodocongó, 58429-900 – Campina Grande – PB

<sup>2</sup> Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Av. Antonio Carlos Magalhães, 510, Santo Antônio, 48902-300 – Juazeiro – BA

**Abstract:** *The purpose of this work is to present a rule-based expert system (ES) in vibration analysis for monitoring and fails diagnose about centrifugal pumps operation. For ES development went adopted the Client/Server software architecture with use of the web applications technologies, that they make possible the easy maintenance and use, its interface can be had access through an Internet navigator. Your tools set access is restricted by login and user password and making possible to visualize and to analyze the equipment operation state. Samples gotten acquired with the aid of a data acquisition system connected to ES, can be visualized in graphical operation vibratory levels, graphs of trend, specters and the maintenance of the database operation description is resources that complement the decision taking process. The ES has a expandable rules package in recommendations format about global(time domain) and spectral (frequency domain) vibrational analysis. To SE efficiency verify, tests went realized using samples of an equipment of tests with which it was possible to evidence that ES it can becomes a useful tool for monitoring and fails diagnose tasks assistance.*

**Keywords:** *Expert System, Monitoring and fails dianogse, Vibration Analysis, Centrifugal Pumps.*

### **1. RESPONSIBILITY NOTICE**

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.