

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Carlos Waldecir de Souza**

## **Identificação Automática de Itens não Conformes na Caixa de Vedação do Eixo na Tampa de Turbinas Hidráulicas.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais**

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Edival de Souza**  
**Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório**

Março de 2009

Itajubá – MG

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho á minha família pelo apoio, incentivo e motivação incondicional ao meu retorno à vida acadêmica.*

"Tantas vezes pensamos ter chegado... Tantas vezes é preciso ir além."

**(Fernando Pessoa)**

---

## **AGRADECIMENTOS**

. A DEUS por ter me concedido a oportunidade, saúde e coragem para realizar este trabalho.

. Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Edival de Souza, pela dedicação, competência, seriedade e orientação na realização deste trabalho e também pelo apoio e incentivo ao meu retorno à vida acadêmica.

. Ao Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório por toda ajuda e co-orientação durante a realização deste trabalho.

. A Manaus Energia S.A pela recepção e apoio recebido dos colaboradores da Gerência da Administração e aos amigos da Manutenção e Operação.

. A SMAR Equipamentos Industriais pelo apoio e assessoramento no desenvolvimento desse trabalho.

. Aos membros e professores que fazem parte do Centro de Referência de Tecnologias da Informação (CRTI).

. A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse concluído.

---

# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
SUMÁRIO.....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS. ....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Aspectos Gerais. ....	10
1.2 Objetivo. ....	10
1.3 Justificativa. ....	11
1.4 Estrutura do Trabalho. ....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
2.1 Manutenção .....	13
2.2 Automação.....	16
2.3 A Tecnologia OPC .....	22
2.4 Sistema de Diagnóstico Automático (SDA).....	27
2.5 Estatística Aplicada a Engenharia .....	32
2.6 Usina hidrelétrica.....	40
3. VEDAÇÃO do EIXO na TAMPA de TURBINAS HIDRÁULICAS KAPLAN .....	47
3.1 Definição: Identificação do Sistema de Vedação .....	49
3.2 Medição: Aquisição de Dados .....	61
3.3 Análise: Análise dos Dados .....	68
3.4 Implementação: Identificação Automática de Itens não Conforme .....	77
3.5 Controle: Melhoria contínua.....	97
4. CONCLUSÃO.....	98
4.1 Conclusão .....	98
4.2 Recomendações para Futuros Trabalhos .....	99
Referências Bibliográficas.....	100

---

## RESUMO

A turbina hidráulica tipo Kaplan possui um sistema de vedação junto ao eixo da máquina e próximo à parte superior do rotor da turbina que tem por finalidade evitar que a água da caixa espiral passe para fora da tampa da turbina. Se isso vier a ocorrer provocará grandes transtornos a Usina, por ser uma região onde se tem instalados equipamentos de medição, proteção e ainda se encontra o mancal guia inferior da turbina no qual se a água penetrar é preciso realizar a troca de todo o óleo lubrificante. Pouco se sabe sobre esse sistema, são poucas as informações e documentos disponíveis, o que se sabe é que ao longo dos anos esse sistema de vedação do eixo tem sido um ponto vulnerável, com alto índice de falhas, levando a indisponibilidade da máquina por um longo período de tempo. Nesta dissertação é proposto um sistema de auxílio e melhoria à qualidade de manutenção, onde através de monitoramento de variáveis e do conceito de Variabilidade faz-se o uso da ferramenta de Gráfico de Controle para identificar o desempenho estatístico do processo através da aplicação das regras de Western Electric. Um software é elaborado para em tempo real e de forma automática identificar um defeito em um de seus equipamentos e gerar uma mensagem de alerta, podendo-se assim evitar o desgaste prematuro de materiais e equipamentos reduzindo o índice de falha do mesmo. Esse trabalho foi elaborado através de uma experiência prática, realizada nas instalações de uma usina hidrelétrica, sendo o seu desenvolvimento executado através da adaptação e utilização da ferramenta DMAIC, uma ferramenta utilizada na implantação de melhorias na qualidade de um processo.

**Palavras chaves:** Vedação do eixo na tampa de turbinas hidráulicas Kaplan, Manutenção, Automação, Gráficos de Controle e Regras de Western Electric.

## ABSTRACT

The Kaplan type hydraulic turbine has a system of fencing along the axis of the machine and near the top of the turbine rotor which aims to prevent the water from the box spiral pass out of the lid of the turbine. If this were to occur will cause major disruptions to plant, to be a region where they have installed equipment for measurement, protection, and is still the bottom of the turbine guide bearing which penetrate the water must be undertaken to return the entire lubricating oil. Little is known about this system; there are few information and documents available, which we know is that over the years that the shaft sealing system has been a vulnerable point, with high rate of failures, leading to unavailability of the machine by a long period of time. This thesis is proposed a system of aid and improves the quality of maintenance, where through monitoring of variables and the concept of variability is the use of the tool of the Control Chart to identify the statistical performance of the process through the application of Western Electric. Software is developed for real time and automatically identify a defect in one of its equipment and create an alert, it can prevent premature wear of materials and equipment by reducing the rate of failure of it. This work was developed through practical experience, held at the premises of a hydroelectric power plant, being implemented through the development of adaptation and use of DMAIC tool, a tool used in the implementation of improvements in the quality of a process.

**Keywords:** Shaft seal on the cover of hydraulic turbines Kaplan, Maintenance, Automation, Control Charts and Rules for Western Electric.

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Arquitetura de uma rede fieldbus	19
Figura 2.2 - Representação de um gráfico de controle típico	35
Figura 2.3 - Pontos fora dos limites de controle	35
Figura 2.4 - Seqüência de pontos consecutivos	36
Figura 2.5 - Periodicidade de pontos	36
Figura 2.6 - Tendências de ponto	37
Figura 2.7 – Limites de controle de 3 desvios padrão	38
Figura 2.8 – Ilustração de uma Usina Hidrelétrica	40
Figura 2.9 – Princípios de funcionamento em turbinas hidráulicas	41
Figura 2.10 – Turbina Pelton	43
Figura 2.11- Corte Transversal unidade geradora com turbina Bulbo	44
Figura 2.12- Exemplo de turbina tipo Francis	45
Figura 2.13 - Exemplo de uma turbina tipo Kaplan	46
Figura 3.1 – Visão geral de um rotor tipo Kaplan	49
Figura 3.2 – Vedador de eixo tipo Labirinto	50
Figura 3.3 – Vedador de eixo tipo Gaxeta	50
Figura 3.4 - Pista Deslizante (anel de desgaste)	51
Figura 3.5 – Segmento dos Anéis de carvão	52
Figura 3.6 - Motobombas AK e AL	54
Figura 3.7 - Diagrama do circuito de Água de Selagem da Usina Hidrelétrica de Balbina	55
Figura 3.8 - Elementos da caixa de vedação	56
Figura 3.9 - Arquitetura simples de uma rede para aquisição de dados	61
Figura 3.10 - DFI 302 (fabricante Smar Equipamentos Industriais)	62
Figura 3.11 - Transmissores conectados na máquina. (a) Transmissor superior de temperatura da água do poço de drenagem da turbina. (b) Transmissor inferior: pressão diferencial	65
Figura 3.12 - Sonda de temperatura a ser instalada na máquina	65

---

Figura 3.13 – Transmissores conectados na máquina. (a) Transmissor da direita: pressão água de vedação. (b) Transmissor à esquerda: nível de água no poço de drenagem da turbina	66
Figura 3.14 – Sensor de nível instalado no poço de drenagem da turbina	67
Figura 3.15 – Tampa superior de poço da turbina	77
Figura 3.16 – Tela da função monitora4	80
Figura 3.17 – Tela da função monitoraPAV	81
Figura 3.18 – Tela da função monitoraTAPT	82
Figura 3.19 – Tela da função monitoraNAPT	83
Figura 3.20 – Telas de alarmes desenvolvidas para teste	84
Figura 3.21 – Amostragem realizada para um tempo de 15 minutos	86
Figura 3.22 – Gráfico de controle obtido para <i>pav</i> em 15 minutos	87
Figura 3.23 – Gráfico de controle obtido para <i>tapt</i> em 15 minutos	88
Figura 3.24 – Tela visualizando mensagem de alerta	89
Figura 3.25 – Gráfico de controle obtido para <i>napt</i> em 15 minutos	90
Figura 3.26 – Gráficos para os valores amostrados em 1 hora	91
Figura 3.27 – Valores obtidos para <i>pav</i> em uma amostragem de 1 hora	91
Figura 3.28 – Valores obtidos para <i>tapt</i> em uma amostragem de 1 hora	92
Figura 3.29 – Valores obtidos para <i>napt</i> em uma amostragem de 1 hora	92
Figura 3.30 – Gráficos obtidos para a amostragem de 3 horas	93
Figura 3.31 – Valores obtidos para <i>pav</i> em uma amostragem de 3 horas	94
Figura 3.32 – Valores obtidos para <i>tapt</i> em uma amostragem de 3 horas	95
Figura 3.33 – Valores obtidos para <i>napt</i> em uma amostragem de 3 horas	96

---

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.**

Controle Estatístico de Processo (**CEP**)

Controlador Lógico Programável (**CLP**)

Distributed Component Object Model (**DCOM**)

High Speed Ethernet (**HSE**)

Identificação do Dispositivo (**ID**)

Internet Protocol (**IP**)

Agendador do Link Ativo (**LAS**)

Linha Central (**LC**)

Limite Inferior de Controle (**LIC**)

Limite Superior de Controle (**LSC**)

Object Linking and Embedding (**OLE**)

Olé for Process Control (**OPC**)

Interconexão de Sistemas Abertos (**OSI**, Open Systems Interconnection)

Sistemas para Diagnóstico Automático (**SDA**)

Sistema Distribuído de Controle (**SDC**)

Transmission Control Protocol (**TCP**)

Tecnologia de Informação (**TI**)

---

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Aspectos Gerais.

Toda atividade humana de uma forma ou de outra é voltada para a sua própria sobrevivência, e nas empresas não acontece diferente. Nos dias de hoje, a atividade de manutenção exige um trabalho de equipe, o assessoramento de especialistas, o registro de informações e a gestão de todo esse processo.

De um modo geral, o desenvolvimento de estudos relativos ao desgaste de máquinas e equipamentos, a motivação e qualificação de pessoal, o desenvolvimento de ferramentas de apoio a tomadas de decisões vem enriquecendo as técnicas de gestão da manutenção. Porém é preciso enfatizar que os sistemas falham. Não existe um único modo de operação e manutenção que previna ou elimine todas as falhas em um processo.

Fundamentado nestas idéias um processo de desenvolvimento de uma melhoria na qualidade de manutenção é iniciado na usina hidrelétrica de Balbina (AM), que começa a modernizar seus equipamentos em busca de maior qualidade, disponibilidade e confiabilidade de seus equipamentos.

A usina possui turbinas hidráulicas tipo Kaplan as quais possuem um sistema de vedação junto ao eixo da máquina e próximo à parte superior do rotor da turbina que tem por finalidade evitar que a água da caixa espiral passe para fora da tampa da turbina. Esse sistema de vedação do eixo tem sido um ponto vulnerável, com alto índice de falhas, provocando o alagamento do poço da turbina. Isto ocorrendo provoca uma série de transtornos indesejáveis por ser uma área onde se localizam vários instrumentos de medição e proteção. Ainda se ocorrer a entrada de água no mancal guia inferior da turbina é preciso parar a máquina por um longo período e realizar a troca do óleo causando grande prejuízo econômico.

### 1.2 Objetivo.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de identificação automático de itens não conforme na caixa de vedação do eixo na tampa da turbina hidráulica na usina hidrelétrica de Balbina. Para isto foram instalados modernos equipamentos digitais para a aquisição e monitoração de dados das principais variáveis do processo. A partir de uma base de dados e após uma análise dos dados foi possível obter informações da dinâmica do

processo. Através da implementação de um software para realizar testes em tempo real e de forma automática foi desenvolvido um sistema que faz o uso da ferramenta de Gráficos de Controle para identificar o desempenho estatístico do processo, através da aplicação das regras de Western Electric.

## 1.3 Justificativa.

O sistema de vedação do eixo na tampa de uma turbina hidráulica é uma constante fonte de geração de problemas de manutenção em uma usina hidrelétrica, sendo de suma importância para o bom desempenho do trabalho da turbina, envolvendo em suas manutenções, elevado valor econômico e longo período de parada de máquina provocando um alto índice de indisponibilidade de máquina.

Pouco se conhece sobre esse processo, sobre sua dinâmica e praticamente não se tem nenhuma manutenção até que o mesmo venha a falhar. Também são poucas as referências bibliográficas disponíveis para pesquisa e estudo. Assim esse trabalho visa a colaborar com o desenvolvimento e qualificação de pessoal na implantação de novas tecnologias e elaboração de planos de manutenção mais detalhados para o Sistema de Vedação, buscando sempre a elevação do grau de disponibilidade e confiabilidade desse sistema.

## 1.4 Estrutura do Trabalho.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 introduz uma revisão sobre conceitos e definições básicas utilizados neste trabalho nas áreas de Manutenção, Automação, Sistema de Comunicação OPC, Estatística, Sistema de Diagnóstico Automático e apresenta um breve resumo de uma Usina Hidrelétrica; o capítulo 3 descreve o processo de vedação do eixo na tampa de uma turbina hidráulica tipo Kaplan, sendo realizado um estudo e desenvolvimento da implementação de uma melhoria em sua manutenção na usina hidrelétrica de Balbina (AM); o capítulo 4 apresenta a conclusão dos resultados obtidos e as propostas para realização de futuros trabalhos.

---

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem a finalidade de apresentar trabalhos correlatos de outros pesquisadores que possam contribuir com a dissertação em questão, porém não foi possível encontrar trabalhos que abordassem assuntos diretamente relacionados com esta dissertação. Para servir de apoio para o desenvolvimento desta, alguns tópicos essenciais encontrados em trabalhos de pesquisa e uma breve abordagem sobre conceitos e definições encontrados na literatura sobre diversas áreas de estudo serão mostrados.

### **Trabalho de Pesquisa**

Maru (2003) apresenta um trabalho onde se trata de um estudo experimental das respostas de desgaste e de atrito em um sistema deslizante lubrificado. A presença de lubrificante na interface de contato em camadas com espessura até mesmo de ordem molecular é capaz de alterar as respostas tribológicas do sistema e o atrito no deslizamento é um dos problemas de grande importância prática. No estudo tribológico de sistemas deslizantes lubrificados, as variáveis, sejam elas materiais, operacionais ou sistêmicas, devem provocar alterações no desempenho da lubrificação na interface de contato, o que, conseqüentemente, influencia as respostas de desgaste e atrito. Entre tais variáveis, podem ser citados:

- . O carregamento mecânico (carga, velocidade, temperatura, dinâmica do movimento).
- . As propriedades dos materiais, o acabamento superficial do par e as características do lubrificante.

### **Conceitos e Definições**

Na realização deste trabalho alguns conceitos e definições foram fundamentais para o desenvolvimento do mesmo e podem ser encontrados e aplicados em diversas áreas de estudo como: Manutenção, Automação, Comunicação OPC, Sistema de Diagnóstico Automático e Estatística. A seguir é feita uma breve revisão desses conceitos e definições encontrados na literatura e também uma descrição resumida de uma Usina Hidrelétrica.

---

### 2.1 Manutenção

De forma mais abrangente, o termo manutenção engloba os conceitos de prevenção (manter) e correção (restabelecer). Manutenção pode ser definida como o conjunto de conhecimentos, técnicas e habilidades, cuja aplicação tem por objetivo único garantir o bom desempenho e disponibilidade de sistemas ao longo de toda a sua vida útil planejada.

Segundo GCOI-SCM (1998), as seguintes definições básicas para a diferenciação entre falha e defeito em manutenção de equipamentos em relação a sua função requerida, ou seja, o conjunto de condições de funcionamento para o qual o equipamento foi projetado, fabricado ou instalado, será mostrado a seguir:

**FALHA** é toda alteração física ou química no estado de funcionamento de um equipamento que impede o desempenho de sua função requerida e o leva invariavelmente à indisponibilidade.

**DEFEITO** é toda alteração física ou química no estado de funcionamento de um equipamento que não o impede de desempenhar sua função requerida, podendo o mesmo operar com restrições.

Por vezes verifica-se que, entre o pessoal de manutenção, ainda existe alguma confusão quanto à nomenclatura utilizada para definir os tipos de manutenção. Os nomes podem até variar, mas o conceito deve estar bem compreendido. A firme conceituação permite a escolha do tipo mais conveniente de manutenção para um determinado equipamento, instalação ou sistema. Considera-se bastante adequada a seguinte classificação em função dos tipos de manutenção praticada: **Corretiva, Preventiva, Preditiva e a Detectiva.**

### Manutenção Corretiva

Baseia-se na atuação em um determinado equipamento para correção de falha ou quando o mesmo não apresenta o rendimento esperado. Neste tipo de manutenção as máquinas e outros equipamentos da planta industrial não são revisados e não são feitos grandes reparos até que o equipamento falhe em sua operação.

A manutenção corretiva pode ser dividida em duas classes:

**1. Manutenção Corretiva Não Planejada:** correção da falha de maneira aleatória, ou seja, é a correção da falha ou desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. Esse tipo de manutenção implica em altos custos, pois causa perdas de produção e a extensão dos danos aos equipamentos é maior.

**2. Manutenção Corretiva Planejada:** é a correção que se faz em função de um acompanhamento preditivo, detectivo ou até pela decisão gerencial de se operar até a falha.

### Manutenção Preventiva

Os programas de manutenção preventiva são gerenciados pelo tempo de operação de uma determinada máquina/equipamento obedecendo a um planejamento baseado em intervalos definidos de tempo e na estatística de falhas da máquina. Uma máquina nova tem uma alta probabilidade de falha no momento em que vai iniciar sua operação devido a problemas de instalação e durante as primeiras semanas de operação. Após este período inicial a probabilidade de falha é relativamente baixa por um período prolongado de tempo. Após este período normal de vida da máquina, a probabilidade de falha aumenta abruptamente com o tempo transcorrido, em função dos desgastes normais de sua operação. Um dos segredos de uma boa prevenção está na determinação dos intervalos de tempo. Se os intervalos forem menores que o necessário, implica em paradas e troca de peças desnecessárias. Conforme Almeida (2008) a manutenção preventiva tem grande aplicação em instalações ou equipamentos, cuja falha pode provocar catástrofes ou riscos ao meio ambiente, em sistemas complexos e/ou de operação contínua em locais onde não é possível fazer inspeção preditiva/detectiva.

### Manutenção Preditiva

É um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não de intervenção. Permite que os equipamentos operem por mais tempo e a intervenção ocorra com base em dados e informações. De acordo com Almeida (2008), em programas de manutenção preditiva, o modo específico de falha pode ser identificado antes da falha. Portanto, as peças corretas para reparo, ferramentas e habilidades da mão-de-obra podem estar disponíveis para corrigir o problema da máquina antes da ocorrência de falha catastrófica. Na

manutenção preditiva pode-se programar a realização do reparo para o momento de menor impacto sobre a produção.

### **Manutenção Detectiva**

É a atuação efetuada em sistemas de proteção ou comando buscando detectar falha oculta ou não perceptível ao pessoal de operação e manutenção. Um exemplo clássico é o circuito que comanda a entrada de um gerador em um hospital. Se houver falta de energia e o circuito tiver uma falha, o gerador não entra. Por isso, este circuito é testado/acionado de tempos em tempos, para verificar sua funcionalidade. À medida que aumenta a utilidade de instrumentação de comando, controle e automação nas indústrias, maior é a necessidade de manutenção detectiva, para garantir a confiabilidade dos sistemas e da planta. Esse tipo de manutenção é relativamente novo e, por isso mesmo, muito pouco mencionado no Brasil.

---

### 2.2 Automação

Com a evolução da tecnologia da informação onde cada vez mais os componentes possuem maiores poderes de armazenamento e processamento, aliado com uma redução de custo sobre os equipamentos, tem-se hoje em dia uma forte presença de dados e informações no comércio, nos bancos, nos meios de transporte, em nossas próprias residências e principalmente nas indústrias. Com esta grande diversificação de informações e aplicações, atualmente os fornecedores de tecnologias estão se adaptando a novas normas e padrões visando buscar uma maior relação entre eles e seus clientes obtendo um ganho comum a todos. Nas indústrias, no segmento de controle de processos, a instalação e manutenção de sistemas de controle tradicionais implicam em altos custos de projeto e equipamento, além de custos com os cabos de conexão destes equipamentos à unidade central de controle. De forma a minimizar estes custos e aumentar a operacionalidade de uma aplicação introduziu-se o conceito de rede para interligar os vários equipamentos de uma aplicação. A utilização de redes em aplicações industriais prevê um significativo avanço nas seguintes áreas:

1. Custos de instalação
2. Procedimentos de manutenção
3. Opções de upgrades
4. Informação de controle de qualidade

A opção pelo uso de sistemas de controle baseados em redes, requer um estudo para determinar qual o tipo de rede que possui as maiores vantagens ao usuário final, que deve buscar uma plataforma de aplicação compatível com o maior número de equipamentos possíveis. Surge daí a opção pela utilização de arquiteturas de sistemas abertos permitindo ao usuário encontrar mais de um fabricante para a solução de seus problemas. Redes industriais são padronizadas sobre três níveis de hierarquias cada qual responsável pela conexão de diferentes tipos de equipamentos com suas próprias características de informação. O nível mais alto, nível de informação da rede, é destinado a um computador central que processa o escalonamento da produção da planta e permite operações de monitoramento estatístico da planta sendo implementado, geralmente, por softwares gerenciais. O padrão Ethernet operando com o protocolo Transmission Control Protocol (**TCP**) e Internet Protocol (**IP**) é o mais comumente utilizado neste nível. O nível intermediário, nível de controle da rede, é a rede central localizada na planta incorporando Controlador Lógico Programável (**CLP**),

---

Sistema Distribuído de Controle (**SDC**) e computadores. A informação deve trafegar neste nível em tempo real para garantir a atualização dos dados nos softwares que realizam a supervisão da aplicação. O nível mais baixo, nível de controle discreto, se refere geralmente às ligações físicas da rede ou o nível de entrada e saídas (**I/O**). Este nível de rede conecta os equipamentos de baixo nível entre as partes físicas e de controle. Neste nível encontram-se os sensores discretos, contadores e blocos de I/O.

As redes de equipamentos são classificadas pelo tipo de equipamento conectado a elas e o tipo de dados que trafega pela rede. Os dados podem ser bits, bytes ou blocos. As redes com dados em formato de bits transmitem sinais discretos contendo simples condições liga/desliga (**ON/OFF**). As redes com dados no formato de byte podem conter pacotes de informações discretas e/ou analógicas e as redes com dados em formato de bloco são capazes de transmitir pacotes de informação de tamanhos variáveis. Assim, classificam-se as redes quanto ao tipo de equipamento e os dados que ela transporta como:

- 1. Rede sensorbus** - dados no formato de bits
- 2. Rede devicebus** - dados no formato de bytes
- 3. Rede fieldbus** - dados no formato de pacotes de mensagens

A rede sensorbus conecta equipamentos simples e pequenos diretamente à rede. Os equipamentos deste tipo de rede necessitam de comunicação rápida em níveis discretos e são tipicamente sensores e atuadores de baixo custo. Estas redes não almejam cobrir grandes distâncias, sua principal preocupação é manter os custos de conexão tão baixos quanto for possível.

A rede devicebus preenche o espaço entre redes sensorbus e fieldbus e pode cobrir distâncias de até 500 m. Os equipamentos conectados a esta rede terão mais pontos discretos, alguns dados analógicos ou uma mistura de ambos. Esta rede tem os mesmos requisitos de transferência rápida de dados da rede de sensorbus, mas consegue gerenciar mais equipamentos e dados.

A rede fieldbus interliga os equipamentos de I/O mais inteligentes e pode cobrir distâncias maiores. Os equipamentos acoplados à rede possuem inteligência para desempenhar funções específicas de controle, controle de fluxo de informações e processos. A rede deve ser capaz de comunicar-se por vários tipos de dados (discreto, analógico, parâmetros, programas e informações do usuário).

---

Para este trabalho focaremos a seguir em informações básicas para que um engenheiro/projetista possa detalhar um projeto com a tecnologia FOUNDATION FIELDBUS, desde o desenho da arquitetura do sistema de controle até a sua conexão com os softwares de informação de processo.

Segundo Berge (2002) a tecnologia Foundation Fieldbus consiste em um protocolo de comunicação serial digital bidirecional onde equipamentos conectados a rede desempenham a função de emissor e receptor de dados realizando funções de controle e monitoração de processo e estações de operação através de softwares supervisores. Os dispositivos de campo (transmissores, posicionadores, etc...) agora com processadores embarcados desempenham funções de controle resultando assim em um controle distribuído. Então basicamente Foundation Fieldbus é uma rede local para automação e instrumentação de controle de processos com a capacidade de distribuir o controle no campo. É um protocolo complexo, porém o conhecimento completo de como a tecnologia funciona internamente não é fundamental para o seu uso, a sua aplicação ocorre de tal forma a ser transparente aos usuários, entretanto, no desenvolvimento de projetos que utilizam essa tecnologia exige treinamento por parte dos projetistas para sua configuração e aplicação.

Ao contrário dos protocolos de rede proprietárias o Fieldbus não pertence a nenhuma empresa, é controlada pela FIELDBUS FOUNDATION que é uma organização não lucrativa que consiste em mais de 100 dos principais fornecedores e usuários de controle e instrumentação do mundo.

Uma rede fieldbus admite dois níveis físicos em sua arquitetura. O nível H1 e o nível High Speed Ethernet (**HSE**). O primeiro opera com velocidade de 31,25 Kbit/s e efetua a conexão entre os equipamentos encontrados no chão de fábrica (atuadores, sensores e dispositivos de entrada e saída I/O). O nível superior ao H1, conhecido como HSE, opera a uma taxa de 100 Mbits/s, e é quem liga o nível H1 às estações de operação, aos controladores mais rápidos como Controlador Lógico Programável (**CLP**) além de permitir a conexão entre diferentes níveis H1. Há um dispositivo responsável pela ligação entre os dois níveis H1 e HSE que é conhecido como Linking Device e desempenha o papel de ponte entre os mesmos. A figura 2.1 mostra a arquitetura de uma rede fieldbus.

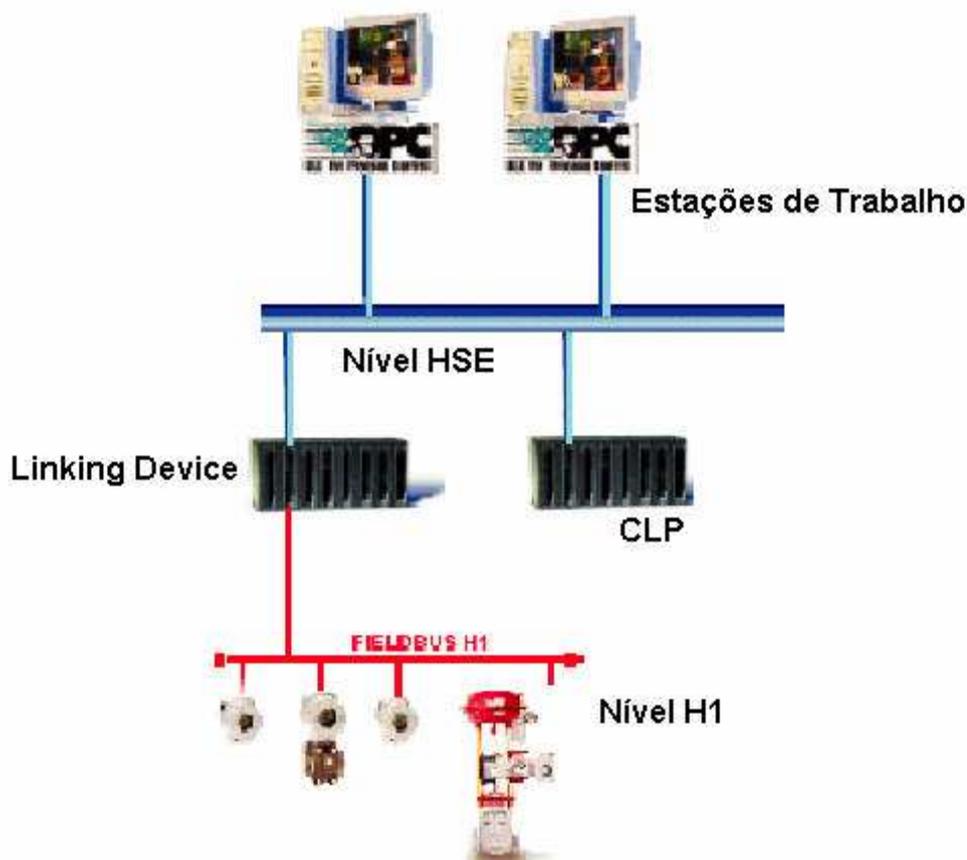


Figura 2.1 - Arquitetura de uma rede fieldbus

Em uma rede fieldbus, Blocos Funcionais representam as funções de automação básicas, que serão executadas em aplicações de automação. Cada bloco funcional processa parâmetros de entrada, de acordo com um algoritmo específico e um conjunto interno de parâmetros de controle. Eles produzem parâmetros de saída, que estão disponíveis para uso dentro da mesma aplicação de bloco funcional, ou em outras aplicações de bloco funcional. São fundamentais para implementar a distribuição das funções de controle ao longo dos equipamentos em campo, como por exemplo, um integrador, uma entrada ou saída analógica, uma entrada ou saída discreta, etc. Por essa razão a tecnologia é também chamada de tecnologia orientada a blocos.

A Foundation Fieldbus definiu um conjunto básico de parâmetros usados por qualquer bloco, chamados parâmetros universais e definidas também como classes de blocos, por exemplo, blocos de entrada, de saída, de controle e de cálculo, sendo que cada uma destas classes tem um grupo de parâmetros padrão. Assim, atualmente existe uma série de blocos

---

dentro da biblioteca padrão da tecnologia tornando possível que fabricantes adicionem funcionalidades aos blocos já existentes ou mesmo desenvolvam novos blocos. Estas opções estão previstas em norma.

A configuração de uma rede objetivando a criação do sistema de controle de um processo é feita com o uso de um programa configurador. Este programa é geralmente instalado na estação de operação do sistema. O programa se comunica com os equipamentos do nível H1 da rede através de uma interface Foundation Fieldbus ou de um Linking Device. No programa configurador, o usuário deve configurar a rede assim como a estratégia de controle e os dispositivos presentes na rede. Esta ferramenta permite a criação de estratégias em modo off-line, ou seja, as informações são armazenadas em uma base de dados e não nos instrumentos. A idéia é que, em um momento inicial, o estágio de desenvolvimento de uma solução de controle para um processo e a configuração seja off-line para que, depois de pronta, seja carregada em um procedimento conhecido como **Download**, onde as informações serão armazenadas nos instrumentos. A partir daí, a ferramenta também permite fazer alterações em modo on-line. Por razões de segurança, somente algumas alterações podem ser realizadas em modo on-line como mudanças de parâmetros. Alterações mais consideráveis só podem ser realizadas off-line e depois carregadas novamente.

Para finalizar vamos ver algumas vantagens presentes na tecnologia de redes Foundation Fieldbus, para os sistemas de controle da atualidade. Entre os principais, temos:

**Redução de Hardware:** As funções de controle dos sistemas são desempenhadas pelos blocos funcionais dentro de cada dispositivo. Isto reduz o número de componentes como: entradas e saídas, elementos de controle como cartões, gabinetes, etc.

**Qualidade e Quantidade de Informação:** Estas redes possuem formato que permite que os equipamentos possam ser conectados a um barramento compartilhado onde a informação é transmitida de forma digital. Isto reduz os custos de cabeamento das aplicações tradicionais, onde se faz necessário um cabo para cada variável transmitida e permite maior quantidade de dados a serem transmitidos. Além disso, as características da comunicação digital possibilitam uma maior qualidade das informações contidas na rede.

**Interoperabilidade:** O Foundation Fieldbus é um protocolo aberto, todos os fabricantes certificados pela Fieldbus Foundation podem fornecer equipamentos que serão capazes de se comunicar com qualquer outro dentro de uma rede desta mesma tecnologia.

**Controle distribuído:** Devido à eletrônica embarcada nos equipamentos, as tarefas podem ser divididas tornando os sistemas mais simples e eficiente.

**Diagnóstico:** A inteligência de cada instrumento Foundation Fieldbus aumenta a disponibilidade e a segurança operacional reduzindo os custos de manutenção da rede.

**Redundância:** A rede proporciona imunidade a falhas que possam ocorrer com alguns de seus equipamentos ou em sua estrutura. Isto é possível, pois a rede pode ser instalada de modo a operar com redundância de equipamentos, cabeamento, etc.

---

### 2.3 A Tecnologia OPC

A comunicação entre os dispositivos de chão de fábrica e os sistemas de automação e informação utiliza o padrão OLE for Process Control (**OPC**) sendo este um padrão de comunicação baseado em tecnologia “Object Linking and Embedding” (**OLE**) / “Distributed Component Object Model” (**DCOM**) da Microsoft para acessos aos dados de tempo real. A seguir temos um resumo das tecnologias OLE e DCOM:

**OLE:** A tecnologia OLE foi desenvolvida pela Microsoft em meados de 1990, para suprir a necessidade de se integrar diferentes aplicações dentro da plataforma Windows, de forma a solucionar os problemas de desempenho e confiabilidade do até então utilizado padrão “Dynamic Data Exchange” (**DDE**).

**DCOM:** Como uma continuação da tecnologia OLE, o DCOM surgiu junto com o sistema operacional Windows NT e foi logo aceito pela indústria. Basicamente, o DCOM é um conjunto de definições para permitir a implementação de aplicações distribuídas em uma arquitetura cliente-servidor. Desta forma, um cliente pode acessar diferentes servidores ao mesmo tempo e um servidor pode disponibilizar suas funcionalidades para diferentes clientes ao mesmo tempo. Através da definição de interfaces, o DCOM permite que objetos sejam instanciados de forma distribuída e seus serviços e métodos (funções) sejam acessíveis por diferentes programas.

Um grupo de empresas sem fins lucrativos foi formado com o objetivo de desenvolver esse padrão sendo gerenciado pela organização OPC Foundation, a qual possui um site na internet ([www.opcfoundation.org](http://www.opcfoundation.org)). Basicamente o padrão OPC estabelece as regras para que sejam desenvolvidos sistemas com interfaces padrões para comunicação dos dispositivos de campo (CLP, sensores, balanças, etc...) com sistemas de monitoração, supervisão e gerenciamento.

O principal objetivo do grupo foi a de atender as necessidades da indústria, através do aprimoramento e ampliação da especificação OPC. Estas especificações estão em constantes desenvolvimento e atualização, sendo que as últimas versões podem ser obtidas através do site da OPC Foundation. Estas especificações têm a finalidade de orientar os desenvolvedores para a implementação das aplicações cliente e servidor. Em principio, os usuários finais não precisam conhecer a fundo as especificações, sendo suficiente conhecer os aspectos práticos para a utilização do padrão, o que veremos a seguir.

### 1. Plataforma Windows ou não?

Basicamente, o padrão OPC é nativo da plataforma Windows. Dentro desta plataforma, existem variações para as versões do Windows (CE, 9X, NT, 2000 e XP), mas para todas estas é possível a comunicação OPC. A especificação OPC para XML facilita a integração de plataformas não-Windows para a comunicação OPC.

### 2. Cliente ou Servidor OPC?

As aplicações e produtos existentes no mercado pode ser somente um cliente, um servidor ou ambos, isto varia de caso a caso. Normalmente, os produtos para monitoração de dados (sistemas supervisórios, etc...) são clientes OPC. Já os produtos que fazem à comunicação direta com os dispositivos de campo utilizando protocolos proprietários são servidores OPC. Cada produto pode incorporar as duas funcionalidades, sendo o mais comum que uma aplicação normalmente cliente possa ser servidor, e não o contrário.

### 3. Número de Clientes x Número de Servidores

O número de servidores OPC necessários para uma determinada aplicação irá depender do produto a ser utilizado. Normalmente, os fabricantes de dispositivos de campo (CLP, dispositivos inteligentes, etc...) fornecem um servidor OPC capaz de comunicar com todos os protocolos dos seus produtos de linha. Este servidor é um software para o ambiente Windows que é executado em um microcomputador. Ou seja, um servidor OPC de um fabricante permite que diversos drivers de comunicação sejam configurados para diversas redes de acordo com o produto. Neste caso, o servidor funciona como um único servidor OPC, capaz de comunicar com diversos clientes OPC sendo executados na mesma máquina ou em máquinas remotas. Existem servidores OPC de terceiros que permitem que sejam configurados drivers de comunicação para diversas redes e protocolos de diferentes fabricantes, ou seja, um único produto poderá servir dados de diferentes fabricantes.

Cada cliente OPC pode conectar-se a diferentes servidores, os quais podem estar processando na mesma máquina ou remotamente em máquinas diferentes. Portanto, qualquer produto que funcione como cliente OPC poderá se comunicar com qualquer servidor OPC de qualquer fabricante.

### 4. Formato de Dados OPC (*Time Stamp* e *Qualidade*)

Pela especificação do padrão, todo servidor de dados deve enviar o dado OPC no formato apresentado a seguir:

---

- **Valor do dado:** Todos os tipos de dados definidos pela interface DCOM são suportados.

- **Time Stamp:** Esta informação é fornecida pelo servidor através da leitura do time stamp dos dispositivos de campo ou por geração interna.

- **Informação de estado:** São reservados 2 bytes para codificação do estado do dado fornecido pelo servidor. Por enquanto, apenas o uso do byte menos significativo foi definido.

Dois bits definem a qualidade do dado que pode ser:

- **Good** – Dado válido;
- **Bad** – No caso de perda do *link* de comunicação com o dispositivo de campo, por exemplo;
- **Uncertain** – No caso de existir o link de comunicação, mas o dispositivo de campo estiver fora de operação.

### 5. Configuração dos dados OPC no Cliente

Considerando o caso mais comum que consiste nos servidores de dados OPC os clientes podem definir basicamente as seguintes configurações:

#### 5.1 Criação de grupos e itens OPC

Basicamente, todos os dados OPC são chamados de itens. Cada item pode ser de um tipo diferente de dado compatível com a especificação OPC. Os diversos itens são organizados em grupos OPC, os quais definem as principais características de leitura dos itens (Taxa de Atualização, Estado Ativo/Inativo, Banda Morta, Leitura Síncrona/Assíncrona).

#### 5.2 Leitura Síncrona ou Assíncrona:

Para um determinado grupo OPC pode ser definido se a leitura dos dados é feita de forma síncrona, a qual depende de uma confirmação de execução antes de uma nova leitura, ou assíncrona, a qual não depende da confirmação. Normalmente é utilizada a leitura assíncrona, a qual garante um melhor desempenho.

#### 5.3 Leitura de dados direto do dispositivo:

A partir da versão 2.0 da especificação para servidor de dados, é possível fazer a seleção no cliente OPC para leitura dos dados da memória do servidor ou diretamente do dispositivo de campo.

### **5.4 Estado Ativo/Inativo:**

Cada item ou grupo pode ter o seu estado alterado pelo cliente para Ativo, habilitando a comunicação do mesmo, ou Inativo.

### **5.5 Leitura Cíclica ou por Mudança de Estado:**

O cliente OPC pode definir se os dados do servidor serão lidos de forma cíclica ou por mudança (transição) de estado. Na leitura cíclica, o cliente faz a requisição de leitura regularmente, independentemente se os dados sofreram alteração de valor ou não. No caso de leitura por mudança de estado, o servidor fica responsável por enviar para os clientes os itens que sofrerem alteração de seu estado (qualidade do dado) ou quando o valor do item de um determinado grupo ultrapassar o valor da banda morta.

### **5.6 Banda Morta:**

É utilizado para definir os valores limites de transição para os itens de um determinado grupo, para os quais o servidor fará o envio para os clientes quando a alteração dos valores dos itens estiver fora da banda especificada.

## **6. Escrita de dados OPC**

A escrita de dados OPC funciona de forma independente da leitura. Assim como na leitura, a escrita pode ser síncrona ou assíncrona. Entretanto, os comandos de escrita são executados imediatamente pelo servidor, sendo enviados diretamente para os dispositivos de campo.

## **7. Comunicação de Blocos de Dados**

O padrão OPC permite a comunicação de blocos de dados (vetores) entre o servidor e os clientes. Isto representa uma grande otimização, pois as informações de time stamp e estado do dado são tratados e fornecidos apenas uma vez para um conjunto de dados, neste caso, cada item é configurado como um bloco de dados.

## **8. Redundância com OPC**

As especificações do padrão OPC não fazem menção à utilização de servidores redundantes. Entretanto, cada cliente OPC pode implementar facilmente um mecanismo para conexão simultânea em mais de um servidor, verificação do estado do servidor e ativação/desativação dos grupos para o servidor que estiver funcionando. Esta solução é encontrada apenas em alguns produtos, não sendo regra geral a disponibilização deste recurso para a maioria dos produtos de mercado.

### 9. Desempenho da comunicação OPC

Em linhas gerais, o desempenho da comunicação OPC se aproxima do desempenho apresentado por sistemas que utilizam drivers de comunicação específico e otimizado. Normalmente, os drivers específicos possuem um ótimo desempenho após serem devidamente depurados e aperfeiçoados. Como um servidor OPC nada mais é do que uma camada de software a mais para implementar as interfaces padrões e os mecanismos de comunicação com o cliente, é de se esperar que o desempenho do mesmo só seja afetado em relação a comunicação com o cliente e não com o dispositivo de campo. No caso da comunicação com o dispositivo de campo, cada fornecedor pode implementar o driver e o protocolo que melhor se ajuste à necessidade do dispositivo e da rede de comunicação. Desta forma, o desempenho do servidor OPC está mais relacionado à capacidade dos recursos de hardware da máquina que executa a aplicação do servidor do que propriamente do driver específico, como os recursos de hardware estão cada vez mais poderosos em relação à capacidade de processamento e memória isto não tem se mostrado como um problema real. Os dados necessários para animações de telas sinópticas, janelas de operação de equipamentos, relatórios, etc, normalmente podem ser lidos sob demanda, de forma que somente quando o objeto estiver selecionado, será ativado o grupo OPC no servidor para leitura dos dados. Quando o objeto não estiver selecionado, o grupo OPC ficará desativado, fazendo com os dados não sejam lidos e melhorando o desempenho da comunicação.

---

### 2.4 Sistemas de Diagnóstico Automático (SDA)

De acordo com (Azevedo, 2005; Souza, 2005; Martins, 2005) visando garantir altos índices de disponibilidade e confiabilidade de equipamentos, através da redução do número de falhas e o gerenciamento de suas severidades, os profissionais de manutenção contam basicamente com três estratégias para determinar a melhor oportunidade de realizar uma intervenção de manutenção, já bem conhecidas: corretiva, preventiva e preditiva.

Dentre as três estratégias citadas anteriormente, destaca-se a manutenção preditiva, que consiste na medição freqüente de grandezas físicas, consideradas representativas do comportamento do equipamento, para através da análise dessas, emitir um laudo sobre a sua condição operacional, sugerindo a melhor oportunidade para realizar a intervenção no equipamento ou grupo de equipamentos. Para facilitar o entendimento, pode-se afirmar que o processo de emissão desse laudo compreende basicamente quatro etapas:

1. Identificações do modo de falha que estão ocorrendo;
2. Localização da falha;
3. Avaliação da sua extensão;
4. Estimativa da vida útil remanescente do equipamento ou componente.

Nos processos tradicionais de manutenção preditiva, todas essas etapas são realizadas manualmente. De forma alternativa, sistemas que automatizam esse processo (totalmente ou em parte) são chamados de Sistemas para Diagnóstico Automático (SDA). A seleção, implantação, operação e manutenção de um SDA não é tarefa simples, exigindo em cada etapa, cuidados para que o resultado fornecido pelo sistema, após a sua implantação, esteja dentro do especificado inicialmente. Para isso é necessário utilizar ferramentas e estratégias apropriadas, em cada etapa, de forma a maximizar o sucesso na execução de cada uma delas.

O sistema de monitoração é uma das ferramentas básicas para a implantação de estratégias preditiva de manutenção e esse sistema deve prover informações das grandezas físicas, medidas nas várias condições de operação dos equipamentos ou processo, sem interferir no seu funcionamento, podendo ser classificado sob a ótica do tipo de instalação dos sensores (permanente ou móvel), ou ainda ser classificado pela estratégia de aquisição de dados a que são submetidos (“contínua/on-line” ou “periódica/off-line”).

Atualmente, os sistemas de monitoração de aplicação “contínua/on-line” freqüentemente trabalham de forma integrada com os sistemas de supervisão e controle, ou

---

“Sistemas Supervisórios” das plantas industriais, tendo, individualmente, requisitos para aquisição de dados e funções totalmente distintas um do outro. O principal objetivo que se deseja atingir com essa integração é a obtenção “contínua” de dados de operação e das grandezas de variação lenta, normalmente disponível nos “Sistemas Supervisórios” (temperaturas, níveis, valores de posição, pressões estáticas, etc.).

Tais sistemas, mais avançados, recebem as informações do Sistema de Monitoração e através da utilização de softwares inteligentes, podem gerenciar um “Banco de Conhecimentos”, onde as informações obtidas a partir de vários parâmetros físicos são cruzadas e integradas, de onde sairá um resultado mais próximo daquele que se deseja.

Algumas vezes, conceitos como Conhecimento, Informação e Dado são usados indistintamente, sendo necessário diferenciá-los para evitar possíveis mal entendidos. As definições abaixo foram propostas por Wurman (1989) e Markkula (1999):

- **Dados** são fatos que não tem significado próprio formam um conjunto discreto, objetivo sobre determinados eventos. Não dizem nada sobre sua própria importância ou irrelevância, mas constituem um material importante para a criação de Informação.

- **Informação** é um dado ao qual se atribuiu ou adicionou um significado. Pode ser descrita como uma mensagem, usualmente na forma de um documento ou alguma forma audível ou visível de comunicação. Informação tem o poder de mudar a forma de como se percebe algo, de interferir no seu julgamento e comportamento.

- **Conhecimento** é algo que as pessoas podem aplicar em suas vidas, é Informação combinada com experiência, contexto, interpretação e reflexão. É uma forma altamente valiosa de Informação e que está pronta para ser aplicada em decisões e ações.

O objetivo primário da utilização desses sistemas está na detecção automática de falhas incipientes, ou seja, detecção precoce de falhas, sua identificação, localização e estimativa do grau de severidade. Portanto, o sistema cujo funcionamento precisa, necessariamente, de interação com o usuário, através de perguntas ou outro tipo de intervenção que necessite da presença local ou remota do mesmo, também não é considerado como pertencente à classe do SDA.

A principal característica de um SDA é poder tratar grandes quantidades de dados gerados pelos sistemas de monitoração, de formas sistemáticas, freqüentes e automáticas, além de otimizar o processo de armazenamento de dados/informações durante longos

períodos de operação (meses ou anos). Outra característica importantíssima embutida na concepção desses sistemas é sua característica intrínseca de ao longo do tempo de utilização cada vez precisar menos da interferência do usuário. Isso se dá pelo fato de existirem ferramentas e mecanismos de retenção e aprimoramento do conhecimento registrado nesses sistemas. Assim utilizando as ferramentas de gerenciamento de conhecimento os membros da equipe de manutenção podem corrigir, inserir, retirar e refinar o conteúdo existente no seu Banco de Conhecimentos. Com o aumento da “experiência” inserida no sistema, seus resultados (saídas) vão se tornando mais e mais confiáveis ao longo do tempo, necessitando cada vez menos da interferência do corpo técnico da empresa.

A característica de limitação desse tipo de sistema, assim como de qualquer tipo de sistema de monitoração tradicionalmente utilizado, se apresenta quando lidamos com falhas de evolução instantânea ou catastrófica. Para isso, os “Sistemas de Proteção”, com limites de alarme fixos e bem estabelecidos, devem ser considerados como principal opção. Os princípios de operação, assim como características técnicas necessárias relativas à aquisição, comunicação e processamento dos dados de cada um desses sistemas são fundamentalmente diferentes e não devem ser confundidos. Basicamente, o SDA tem a função de informar a ocorrência de falhas, quando essas ainda estão em seu início de formação, enquanto que os sistemas de proteção devem agir no momento em que uma situação inaceitável de operação ocorre.

A implantação de um SDA deve considerar, principalmente, os seguintes fatores para maximizar o sucesso de sua aplicação:

### **1. Instalações físicas existentes na planta:**

Deverão ser avaliadas as condições de evolução tecnológica dos sistemas e instalações existentes, de forma a minimizar os custos de instalação do sistema. Não só os aspectos de infra-estrutura de hardware local deverão ser avaliados, mas também a infra-estrutura da empresa, como um todo. Plantas industriais onde seus Sistemas de Supervisão, Controle e Proteção sejam digitais apresentarão melhores condições de integração com o SDA.

### **2. Estrutura de Gestão de Dados e Informações da empresa:**

Uma infra-estrutura de Gestão de Dados e Informações seja ela da própria empresa ou de serviços terceirizados, deverá ser planejada nos casos em que não existir. Depois de instalado o sistema, seus benefícios só aparecerão se o seu refinamento for sistematizado e

freqüente, principalmente nos primeiros 06 (seis) meses após sua instalação. Profissionais, com conhecimento suficiente sobre a operação e manutenção dos equipamentos, são elementos importantíssimos para a aceleração do retorno dos benefícios. A atualização do Banco de Conhecimento do sistema, através de informações realimentadas do campo (manutenções executadas, ocorrências verificadas, etc.) é fundamental para seu sucesso em longo prazo.

### **3. Interação entre fornecedor e cliente:**

A existência, na empresa proprietária ou concessionária da Instalação Industrial onde vai ser instalado o sistema, do conhecimento sobre os equipamentos é de suma importância durante o período de customização do sistema, normalmente executada, em conjunto, pelo fornecedor do SDA e o cliente. O fator “Conhecimento” é sempre decisivo para a redução dos custos e do tempo de instalação.

### **4. Metodologia para aquisição do conhecimento:**

Deverá ser selecionada, previamente ao início dos trabalhos de instalação, uma metodologia para modelagem e aquisição do “Conhecimento” que será adicionado ao sistema, visando à aplicação específica. A aquisição de “Conhecimento” é uma tarefa que exige esforço e tempo da equipe, mas dela dependerá a qualidade dos diagnósticos executados durante a operação do sistema.

### **5. Definição das grandezas monitoradas:**

A definição das grandezas a serem monitoradas, assim como a utilização e aproveitamento das que já o são, deverá ser executada tendo em vista critérios de atendimento não somente técnicos, mas econômicos. Uma forma de abordagem que apresenta bons resultados é utilizar o critério de monitorar minimamente as grandezas físicas que são indicativas dos problemas mais importantes que ocorrem naquele equipamento. A importância do problema poderá estar baseada em um critério de gravidade da falha, importância para o processo produtivo, custo do reparo do equipamento ou segurança pura e simplesmente. Normalmente uma combinação de um ou mais desses fatores é utilizada. É importante englobar na definição dos parâmetros que serão monitorados, alguns parâmetros de equipamentos que compõem os sistemas auxiliares. A partir dessa escolha inicial, com a utilização do Sistema, outras necessidades irão certamente surgir, e poderão ser adicionadas posteriormente.

### **6. Cuidados com o desempenho dos Sistemas:**

Desnecessário se faz reforçar a importância dos cuidados com a especificação dos sensores e suas fixações, sistemas de condicionamento e aquisição de dados, assim como adequação dos sistemas de comunicação e interfaces com os demais sistemas da planta industrial e com o usuário final. Deles dependerá o desempenho operacional do SDA e seu sucesso como ferramenta de apoio à manutenção

### **7. Implicações inerentes à detecção precoce:**

A função de detectar, de forma precoce, a existência de falhas nos equipamentos requer alguns cuidados no estabelecimento dos valores que deverão ser utilizados como referência (equipamento em bom estado), assim como a definição dos limites de detecção (máximos e mínimos), onde são necessários valores específicos para as várias condições de operação dos equipamentos (pontos de operação). É importante, nesse ponto, diferenciar as grandezas que têm valores de normalidade dependente da condição de operação do equipamento (grandezas de limites relativos), daquelas cuja variação não tem uma relação direta com o ponto de operação do mesmo (grandezas de limites absolutos). O estabelecimento desses limites, durante a parametrização dos sistemas deverá ser compatibilizado com os limites fixos de alarme existente no Sistema de Supervisão, Controle e Proteção da instalação industrial. Inadequações ou incoerências no estabelecimento de tais valores poderão gerar incômodos tais como excesso de eventos ou alarmes falsos e eventos não detectados.

Alguns aspectos relativos à política de Tecnologia de Informação (**TI**) da empresa devem ser observados, tais como: segurança de acesso à rede corporativa da empresa, ou mesmo o uso indevido do microcomputador para outras funções menos nobres, entre outros. Para isso, a implantação do sistema deverá seguir as diretrizes traçadas pela área de TI de cada empresa. No que se refere à segurança intrínseca necessária ao seu uso, os sistemas incorporam controle de níveis de acesso ao usuário, com senhas, permitindo acesso local e remoto, desde que autorizado, para as equipes de engenharia de manutenção, operação e equipe de manutenção em campo.

---

### 2.5 Estatística Aplicada a Engenharia

Em muitas indústrias modernas em que se pratica a manutenção preditiva um especialista utiliza-se de uma pré-análise para determinar se um determinado equipamento necessita de uma intervenção para a reparação de algum item não conforme, esta pré-análise normalmente é definida por valores limites. Esses valores limites são divididos em duas categorias:

1. **Alerta** (quando um equipamento está em uma condição anormal).
2. **Alarme** (quando o equipamento inicia um processo de falha terminal).

As definições para esses valores podem variar de equipamento para equipamento, devendo ser definido a partir de uma condição de operação tomada como referência, não apenas em cada início de operação, mas também, a comparação deste último com o histórico total do equipamento. Portanto, em equipamentos onde não existe um histórico de dados para realizar uma análise de comportamento ou tendência é preciso primeiramente obter essa base de dados para cada equipamento. É preciso coletar, analisar e interpretar os dados de uma forma a relacioná-los com o objetivo de estudo proposto. Para a utilização de qualquer método é necessário e imprescindível que as decisões sejam baseadas em fatos. Assim, para se converter dados em fatos utilizam-se os conceitos da área de estatística para o gerenciamento de processos tanto em sua operação como manutenção. De acordo com (Montgomery, 2003; Douglas, 2003) o campo da estatística lida com a coleta, apresentação, análise e o uso de dados para tomar decisões e resolver problemas. Métodos estatísticos são usados para nos ajudar a entender a **variabilidade**. Por variabilidade, queremos dizer que sucessivas observações de um sistema ou fenômeno não produzem exatamente o mesmo resultado. O julgamento estatístico pode nos dar uma maneira útil para incorporar essa variabilidade em nossos processos de tomada de decisão. Podemos descrever numericamente as características dos dados, podendo caracterizar a localização ou tendência central dos dados através da média aritmética comum. Quase sempre pensamos em nossos dados como sendo uma amostra, referir-nos-emos à média aritmética como a média da amostra. Se as  $n$  observações em uma amostra forem denotadas por  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , então, a média da amostra será dada por:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

Equação 2.1 – Média de um conjunto de amostras.

Embora a média da amostra seja útil, ela não transmite toda a informação acerca de uma amostra de dados. A variabilidade nos dados pode ser descrita pela variância ou o desvio padrão da amostra. Se  $x_1, x_2, \dots, x_n$  for uma amostra de  $n$  observações, então desvio padrão da amostra será dada por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Equação 2.2 – Desvio Padrão de um conjunto de amostras.

Um processo de produção tem de ser estável e capaz de operar com pouca variabilidade ao redor de sua dimensão nominal. O Controle Estatístico de Processo (CEP) em tempo real é um método poderoso para encontrar a estabilidade de um processo através da redução de sua variabilidade sendo um conjunto de ferramentas para resolver problemas, e que podem ser aplicadas a qualquer processo. As ferramentas mais importantes de CEP são:

- Histograma
- Gráfico de Pareto
- Diagrama de causa e efeito
- Diagrama de defeito-concentração
- Diagrama de dispersão
- Folha de verificação
- Gráfico de controle

O gráfico de controle é a mais poderosa das ferramentas de CEP, e por ser utilizado neste trabalho, a seguir veremos alguns conceitos.

De acordo com (Montgomery, 2003; Douglas, 2003) em qualquer processo de produção, independente de tão bem projetado ou cuidadosamente mantido ele seja, certa quantidade de variabilidade inerente ou natural sempre existirá. Essa variabilidade natural ou

---

“ruído de fundo” é o efeito cumulativo de muitas causas pequenas, essencialmente inevitáveis. No âmbito de controle estatístico, essa variabilidade natural é frequentemente chamada de um sistema estável de **causas casuais**. Um processo que esteja operando somente com causas casuais de variação presente é dito estar sob controle estatístico. Outros tipos de variabilidade podem estar presentes na saída de um processo. Tal variabilidade é geralmente grande quando comparada com o ruído de fundo, representando um nível inaceitável de desempenho de processo. Referimo-nos a essas fontes de variabilidade como **causas atribuídas**. Um processo que esteja operando na presença de causas atribuídas é dito estar fora de controle estatístico. O gráfico de controle é uma técnica de monitoração on-line do processo usada para detectar a ocorrência de causas atribuídas de modo que uma investigação do processo e uma ação corretiva possam vir a ser empreendida. Também podem ser usados para estimar parâmetros de um processo de produção e através desta informação determinar a capacidade do processo atingir as especificações. Finalmente, lembre-se que o objetivo final de CEP é a eliminação ou redução tanto quanto possível da variabilidade no processo. Um gráfico típico de controle é uma disposição gráfica de uma característica da qualidade ou de uma variável de processo que foi medida ou calculada a partir de uma amostra selecionada em intervalos periódicos.

O gráfico contém uma linha central (**LC**), que representa o valor médio da característica da qualidade ou variável correspondendo ao estado sob controle. Duas outras linhas horizontais, chamadas de limite superior de controle (**LSC**) e de limite inferior de controle (**LIC**), são também mostradas no gráfico. Esses limites de controle são escolhidos de modo que, se o processo estiver sob controle, aproximadamente todo o ponto da amostra cairão entre eles. A figura 2.2 representa um gráfico de controle típico.

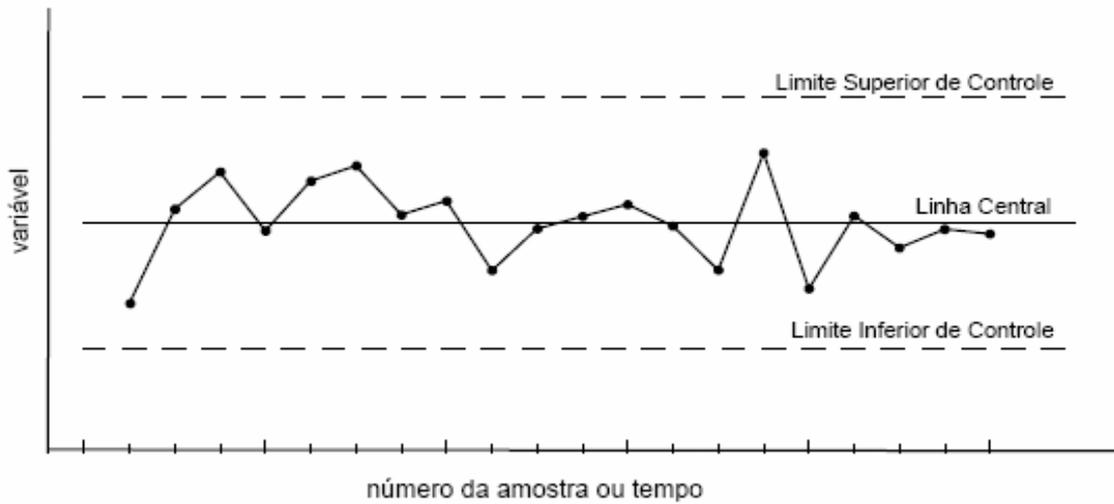


Figura 2.2 - Representação de um gráfico de controle típico.

Entretanto um ponto que caia fora dos limites de controle é interpretado como evidência de que o processo está fora de controle, necessitando-se de investigação e ação corretiva para encontrar e eliminar a causa atribuída ou causas responsáveis para esse comportamento. Mesmo que todos os pontos estejam dentro dos limites de controle, se eles se comportarem de maneira sistemática ou não aleatória, então isso é uma indicação de que o processo está fora de controle. Métodos planejados para encontrar seqüências ou padrões não aleatórios podem ser aplicados aos gráficos de controle como uma ajuda na detecção de condições fora de controle. Encontrar os pontos fora dos limites de controle é uma tarefa fácil, mas identificar configurações não-aleatórias é uma tarefa que gera muitas dúvidas. Padrões de referência relativos às configurações não-aleatórias foram estabelecidos para facilitar a detecção de variações relativas a causas atribuídas. Esses padrões foram elaborados através de regras estatísticas relativamente simples. Exemplos:

### 1. Pontos fora dos limites de controle

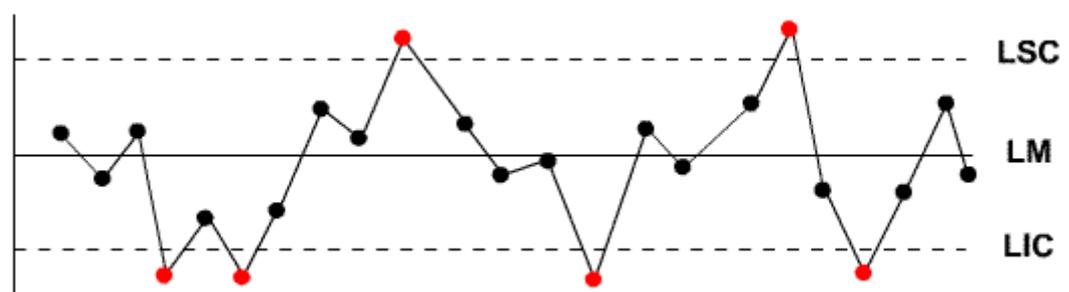


Figura 2.3 - Pontos fora dos limites de controle

É uma das formas mais evidentes da falta de controle estatístico de um processo. Neste caso, as causas especiais podem estar relacionadas a dados gerados por procedimentos incorretos de coleta de dados ou equipamentos descalibrados.

## 2. Seqüência

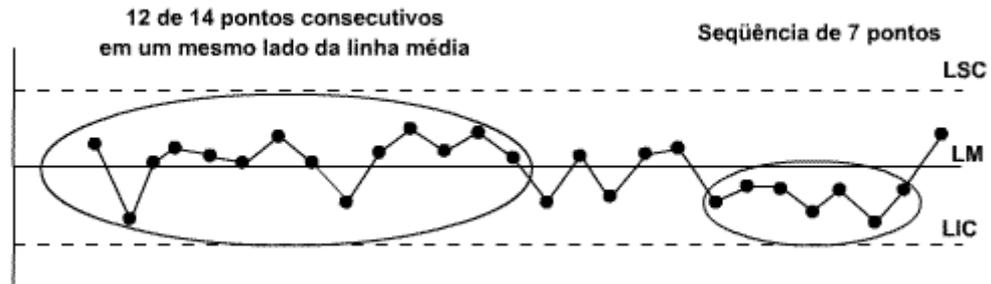


Figura 2.4 - Seqüência de pontos consecutivos

O principal padrão de seqüência é quando 7 ou mais pontos consecutivos aparecem em apenas um dos lados, abaixo ou acima, da linha média. Geralmente, as seqüências estão relacionadas a mudanças significativas no processo, causadas por matéria-prima, mudanças de equipamentos, alterações de procedimentos operacionais, etc.

## 3. Periodicidade

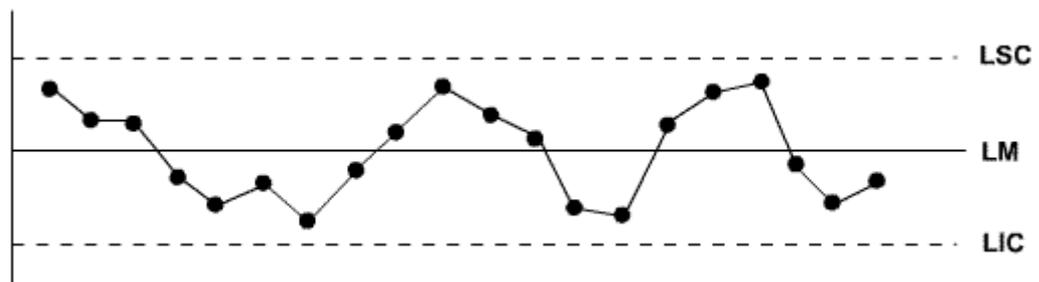


Figura 2.5 - Periodicidade de pontos

A periodicidade é uma configuração detectável em longo prazo. Os pontos são distribuídos no gráfico como uma curva que apresenta uma tendência alternada para cima e para baixo. Essa variação pode ser associada, por exemplo, à rotatividade de operadores.

#### 4. Tendências

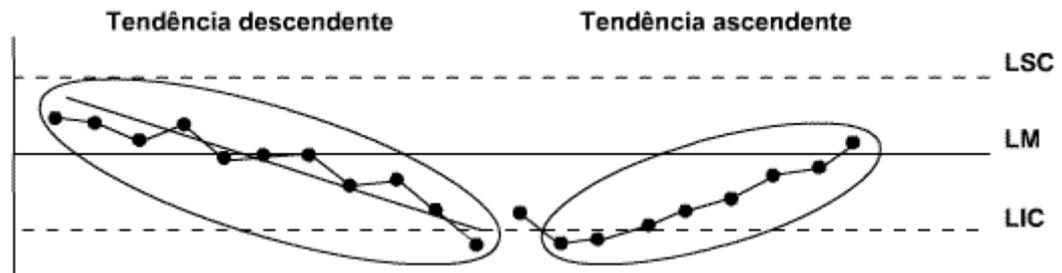


Figura 2.6 - Tendências de ponto

Uma tendência pode ser detectada por 7 ou mais pontos, ascendentes ou descendentes. Algumas causas dessa configuração são: desgaste de ferramentas, mudança nas condições ambientais (temperatura, umidade, pressão, etc).

Outro ponto a ser observado é que esses padrões não serão regras para todos os processos, pois, em um determinado processo, 7 pontos consecutivos podem ser considerados normais.

De acordo com (Montgomery, 2003; Douglas, 2003) pode-se ter um modelo geral para um gráfico de controle. Faça  $W$  ser uma estatística da amostra que mede alguma característica da qualidade de interesse, e suponha que a média de  $W$  seja  $\mu$  e o desvio padrão de  $W$  seja  $\sigma$ . Então a LC, o LSC e o LIC se tornam:

$$\text{LSC} = \mu + k\sigma$$

$$\text{LC} = \mu$$

$$\text{LIC} = \mu - k\sigma$$

Onde  $k$  é a “distância” dos limites de controle a partir da linha central, expressa em unidades de desvio-padrão. Uma escolha comum é  $k = 3$ . Essa teoria geral de gráficos de controle foi primeiro proposto pelo Dr. Walter A. Shewhart e os gráficos de controle desenvolvidos de acordo com esses princípios são frequentemente chamados de **gráficos de controle de Shewhart**.

Se a característica tiver uma distribuição normal, então 99,73% das observações estarão entre  $\mu + 3\sigma$  e  $\mu - 3\sigma$ , ou seja, a probabilidade de um ponto cair fora dos limites de controle é igual a 0,27%, conforme ilustra a figura 2.14.

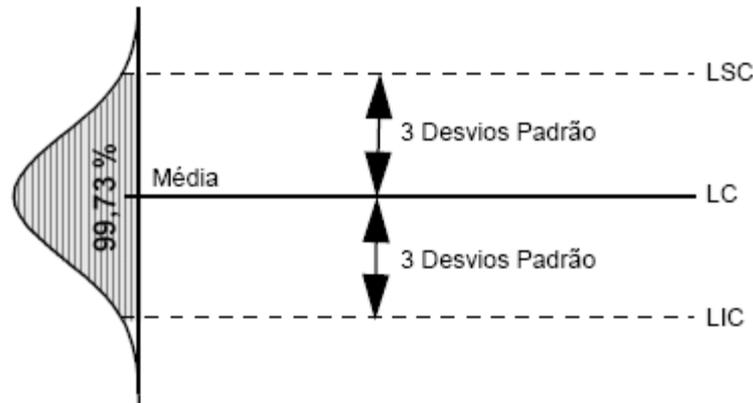


Figura 2.7 - Limites de controle de 3 desvios padrão

Em muitas aplicações o gráfico de controle é usado para monitoração on-line de processo, ou seja, dados da amostra são coletados e usados para construir o gráfico de controle, porém devemos lembrar que a maioria dos processos não opera em um estado de controle estatístico, portanto, o uso rotineiro e cauteloso dos gráficos de controle identificará causa atribuídas. Ainda de acordo com (Montgomery, 2003; Douglas, 2003) há no mínimo, cinco razões para a popularidade dos gráficos de controle.

**1. Gráficos de controle são uma técnica comprovada para melhoria da produtividade.** Reduz a perda ou o retrabalho, que são os principais destruidores da produtividade em qualquer operação.

**2. Gráficos de controle são efetivos na prevenção de defeitos.** Ajuda a manter o processo sob controle desde o início evitando produção de unidades com defeitos.

**3. Gráficos de controle previnem ajustes desnecessários no processo.** Distinção entre ruído de fundo e variação anormal.

**4. Gráficos de controle fornecem informação sobre diagnóstico.** Frequentemente, o padrão de comportamento dos pontos em um gráfico de controle conterà informação que tem um valor de diagnóstico para um engenheiro ou operador experiente.

**5. Gráficos de controle fornecem informação sobre a capacidade de processo.** Fornece informação sobre o valor de importantes parâmetros de processo e sua estabilidade ao longo do tempo.

Um gráfico de controle pode indicar uma condição de fora de controle quando um ou mais pontos caírem além dos limites de controle, ou quando os pontos plotados exibirem

---

algum padrão não aleatório de comportamento, o problema é reconhecer esse padrão de comportamento. A habilidade para interpretar um padrão particular de comportamento em termos de causas atribuídas requer experiência e conhecimento do processo. Ou seja, temos não somente de conhecer os princípios estatísticos de gráficos de controle, mas também temos de ter um bom conhecimento do processo.

De acordo com (Montgomery, 2003; Douglas, 2003), o Western Electric Handbook (1956) sugere um conjunto de regras de decisão para detectar padrões não aleatórios de comportamentos nos gráficos de controle. Especialmente, as regras Western Electric concluiriam que o processo estaria fora de controle se:

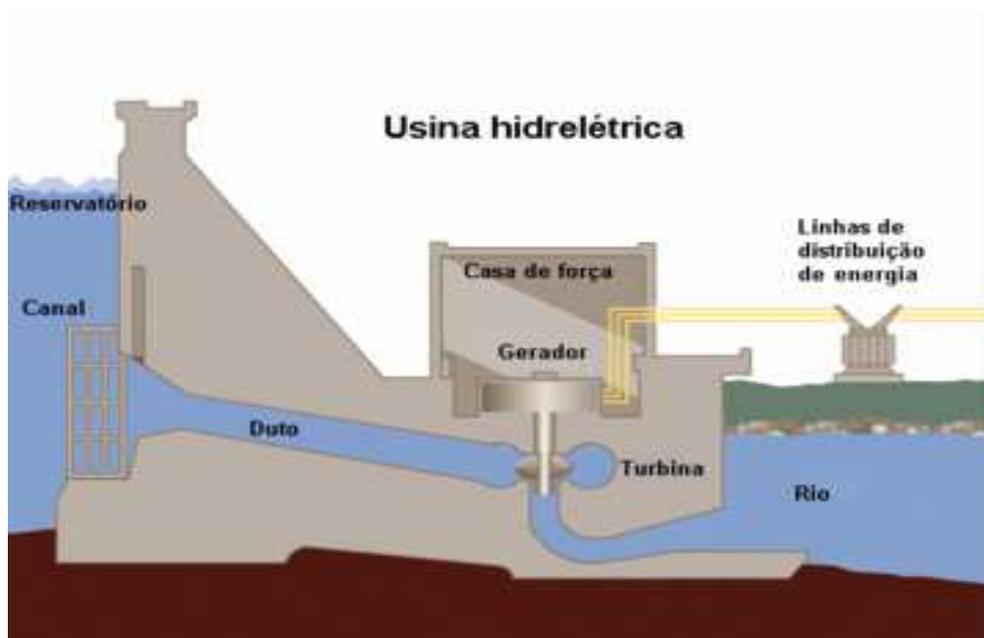
- 1. Um ponto cair fora dos limites de 3 sigmas.**
- 2. Dois de três pontos consecutivos caírem além do limite de 2 sigmas.**
- 3. Quatro de cinco pontos consecutivos caírem a uma distância de 1 sigma ou além da linha central.**
- 4. Oito pontos consecutivos caírem em um lado da linha central.**

Na prática, essas regras são muitas efetivas para aumentar a sensibilidade dos gráficos de controle. As regras 2 e 3 se aplicam a um lado da linha central de cada vez. Ou seja, um ponto acima do limite superior de 2 sigmas, seguido imediatamente por um ponto abaixo do limite inferior de 2 sigmas não sinalizariam um alarme de fora de controle.

### 2.6 Usina hidrelétrica

Uma usina hidrelétrica é um agrupamento de equipamentos e componentes que tem a função de transformar a energia potencial hidráulica de um rio ou uma represa, em energia elétrica. Segundo (Schreiber, 1978; Souza, 1983) é composta de (ver figura 2.8):

- Barragem (reservatório): onde é represada a água do rio para promover principalmente a queda d'água;
- Tomada D'água (Canal): onde faz a distribuição da água para as diversas máquinas;
- Conduto: que direciona a água até a Turbina;
- Casa de Máquina ou Casa de Força onde ficam:
  - Turbina: que transforma a energia cinética de movimento da água em energia mecânica de rotação para acionar o Gerador;
  - Gerador: transforma a energia mecânica proveniente da turbina em energia elétrica;
  - Outros componentes como regulador de velocidade, regulador de tensão, serviços auxiliares e outros;
- Canal de Restituição de Água;
- Cada uma destas estruturas ou componentes acima, por sua vez, são compostos de vários equipamentos e periféricos para o funcionamento global da usina.



2.8 Figura – Ilustração do perfil de uma Usina Hidrelétrica

## TURBINAS HIDRÁULICAS

As **turbinas hidráulicas** são projetadas para transformar a energia cinética de um fluxo de água, em energia mecânica. São acopladas a um gerador elétrico, o qual é conectado à rede de energia. As turbinas hidráulicas dividem-se em diversos tipos, sendo quatro tipos principais: Pelton, Bulbo, Francis, Kaplan. Cada um destes tipos é adaptado para funcionar em usinas com uma determinada faixa de altura de queda e vazão de água. Em todos os tipos há alguns princípios de funcionamento comuns. Veja o esquema mostrado na figura 2.9.

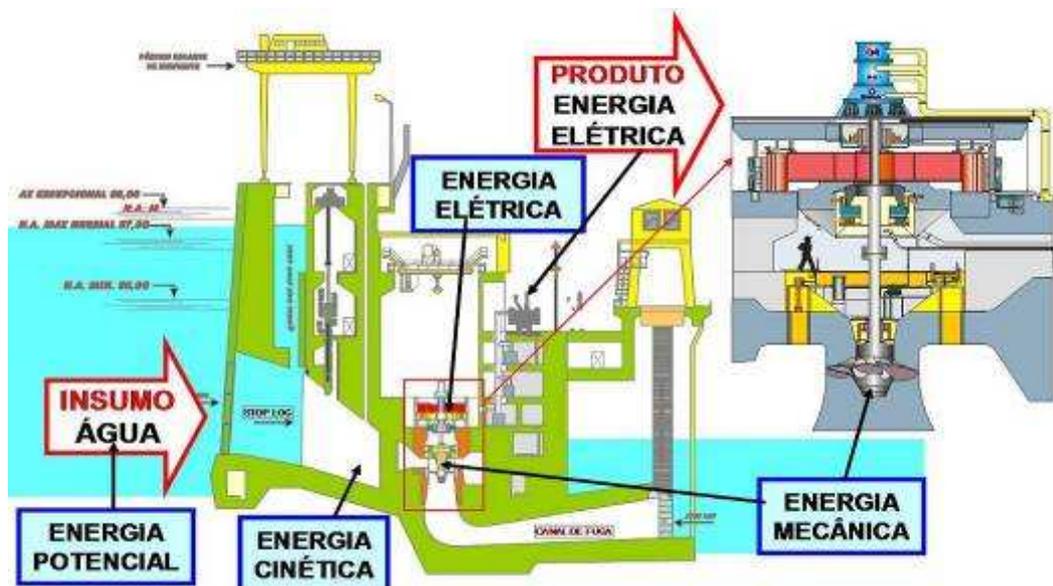


Figura 2.9 – Princípios de funcionamento em turbinas hidráulicas.

A água entra pela tomada de água à montante da usina hidrelétrica que está a um nível mais elevado e é levada através de um conduto forçado até a entrada da turbina passando por um sistema de palhetas guias móveis que controlam a vazão volumétrica fornecida à turbina. Para aumentar a potência, as palhetas se abrem e para diminuir se fecham. Após passar por este mecanismo a água chega ao rotor da turbina, ao deixar o rotor um duto chamado tubo de sucção conduz a água até a parte de jusante da casa de força (no nível mais baixo). As turbinas Pelton têm um princípio um pouco diferente (impulsão), pois primeiramente a pressão é transformada em energia cinética, em um bocal, onde o fluxo de água é acelerado até uma alta velocidade e em seguida choca-se com as pás da turbina imprimindo-lhe rotação e torque. As turbinas hidráulicas podem ser montadas com o eixo no sentido vertical ou horizontal. Os esforços oriundos do peso próprio e da operação da máquina

---

são suportados axialmente por mancais de escora e contra-escora e radialmente por mancais de guia, sendo que o arranjo e quantidade de mancais podem variar em cada projeto.

O projeto de uma turbina hidráulica é específico para cada usina hidrelétrica. Isto se deve ao fato de que a seleção de uma turbina hidráulica é baseada na queda e vazão disponível no local onde a turbina será instalada, o que resultará em máquinas com rotações, diâmetros e potências diferentes, resultando em projetos quase que exclusivos para cada Usina.

Uma turbina é constituída basicamente por seis partes: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, tampa da turbina, rotor/eixo e tubo de sucção.

### **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. 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. Pré-distribuidor**

A finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuidor. É composta de dois anéis superiores, entre os quais é montado um conjunto de palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, otimizando sua influência na perda de carga e turbulência no escoamento. É uma parte sem movimento, soldada à caixa espiral e fabricada com chapas ou placas de aço carbono.

### **3. Distribuidor**

O distribuidor é composto de uma série de palhetas móveis, acionadas por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina (sem contato com a água). Todas as palhetas têm o seu movimento conjugado, isto é, todas se movem ao mesmo tempo e de maneira igual. O distribuidor controla a potência da turbina, pois regula a 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.

### 4. Tampa da Turbina

Tampa de turbina é o elemento atravessado pelo eixo, que suporta os elementos de vedação e protege o rotor pela parte superior (superior vertical), ou anterior (turbina horizontal). Depois dos conjuntos rotor/eixo e pré-distribuidor / caixa espiral, a tampa da turbina constitui a peça mais importante da turbina, seja em sua função, seja em custo.

### 5. Rotor e eixo

O rotor da turbina é onde ocorre a conversão da potência hidráulica em potência mecânica no eixo da turbina.

### 6. Tubo de sucção

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 na jusante.

## Turbina Pelton

São adequadas para operar entre quedas de 350 m até 1100 m, sendo por isto muito mais comum em países montanhosos. Este modelo de turbina opera com velocidades de rotação maiores que os outros, e tem o rotor de característica bastante distinta. Os jatos de água ao se chocarem com as "conchas" do rotor geram o impulso. Dependendo da potência que se queira gerar podem ser acionados os 6 bocais simultaneamente, ou apenas cinco, quatro, etc... O número normal de bocais varia de dois a seis, igualmente espaçados angularmente para garantir um balanceamento dinâmico do rotor. Um dos maiores problemas destas turbinas, devido à alta velocidade com que a água se choca com o rotor, é a erosão provocada pelo efeito abrasivo da areia misturada com a água, comum em rios de montanhas. A turbina pelton, devido a possibilidade de acionamento independente nos diferentes bocais, tem uma curva geral de eficiência plana, que lhe garante boa performance em diversas condições de operação. A figura 2.10 ilustra uma turbina Pelton.



Figura 2.10 Turbina Pelton.

### Turbina Bulbo

A unidade geradora tipo Bulbo é composta por uma turbina hidráulica Kaplan de eixo horizontal acoplada a um gerador síncrono também horizontal que se encontra dentro de uma cápsula metálica estanque (bulbo) totalmente imersa no fluxo hidráulico. Operam em quedas abaixo de 20 metros. Como o fluxo é axial, ou seja, paralelo ao eixo, as passagens hidráulicas das unidades Bulbo são mais simples e o comprimento da passagem hidráulica é mais curto do que as das unidades de eixo vertical. Tais características são importantes em usinas de baixa queda, pois minimizam as perdas de energia. Outra vantagem das unidades Bulbo é a sua capacidade de operar como descarregador de vazão (vertedouro de fundo), operando sem carga e permitindo um escoamento de até 70% da vazão nominal, obtendo-se maior segurança à passagem da cheia de projeto, bem como possibilitando o escoamento de sedimentos depositados próximos à tomada d'água. Apesar de requerer dispositivos especiais, na montagem das unidades Bulbo, é possível obter maior rapidez de montagem em relação às unidades de eixo vertical. A montagem se desenvolve de modo independente entre turbina e gerador, podendo seguir em paralelo durante grande parte do tempo, devido ao acesso independente para o recinto do gerador e o recinto da turbina, logo a jusante. A figura 2.11 ilustra o tipo de uma turbina Bulbo.

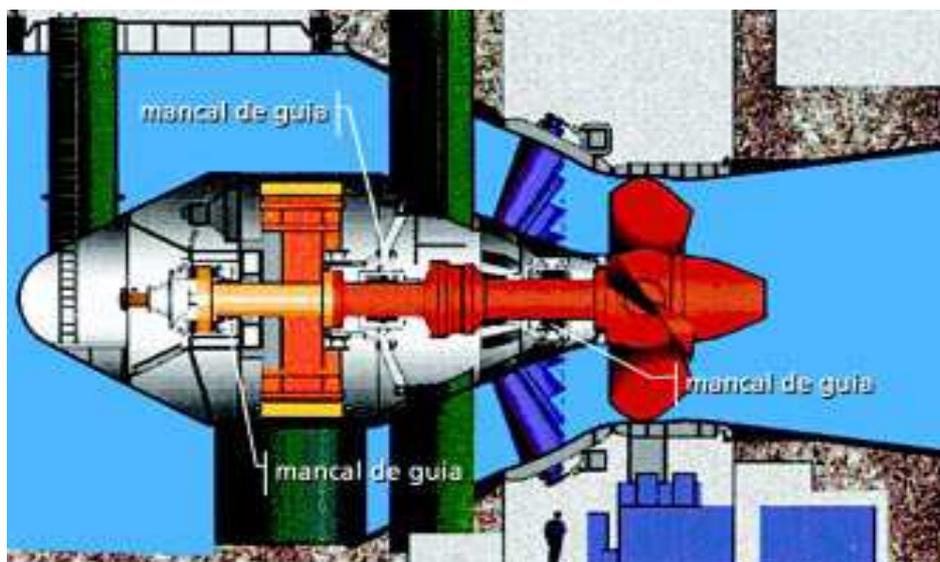


Figura 2.11 - Corte transversal unidade geradora utilizando turbina Bulbo.

### Turbina Francis

São turbinas de reação porque o escoamento na zona da roda se processa a uma pressão inferior á pressão atmosférica. Esta turbina é caracterizada por ter uma roda formada por uma coroa de aletas fixas, as quais constituem uma série de canais hidráulicos que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direção axial. A entrada na turbina ocorre simultaneamente por múltiplas comportas de admissão dispostas ao redor da roda, e o trabalho exerce-se sobre todas as aletas ao mesmo tempo para fazer rodar a turbina e o gerador. Os outros componentes desta turbina são os câmaras de entrada, a qual pode ser aberta ou fechada com uma forma espiral, o distribuidor constituído por uma roda de aletas fixa ou móveis que regulam o caudal e o tubo de saída da água. Esta turbina utiliza-se em quedas úteis de 40 metros até 400 metros, e possuem uma grande adaptabilidade a diferentes quedas. A figura 2.12 ilustra uma turbina Francis.

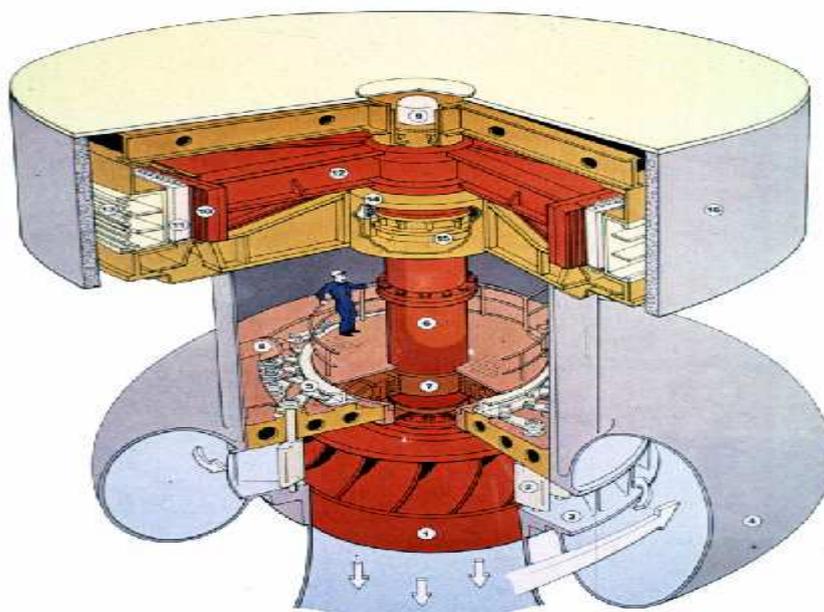


Figura 2.12 – Exemplo de uma turbina tipo Francis

### Turbina Kaplan

São turbinas de reação adequadas para operar entre quedas até 60 m. A única diferença entre as turbinas Kaplan e a Francis é o rotor. Este se assemelha a um propulsor de navio (similar a uma hélice). Se as pás são fixas diz-se que a turbina é do tipo Hélice. Se as pás são móveis os que permite variar o ângulo de ataque por meio de um mecanismo de orientação que é controlado pelo regulador da turbina, diz-se que a turbina é do tipo Kaplan. Um servomotor montado normalmente dentro do cubo do rotor, é responsável pela variação do ângulo de inclinação das pás. O óleo é injetado por um sistema de bombeamento localizado fora da turbina, e conduzido até o rotor por um conjunto de tubulações rotativas que passam por dentro do eixo. O acionamento das pás é conjugado ao das palhetas do distribuidor, de modo que para uma determinada abertura do distribuidor, corresponde um determinado valor de inclinação das pás do rotor. Isso confere uma grande capacidade de regulação. As Kaplan também apresentam bom rendimento em uma ampla faixa de operação. A figura 2.13 ilustra uma turbina Kaplan.

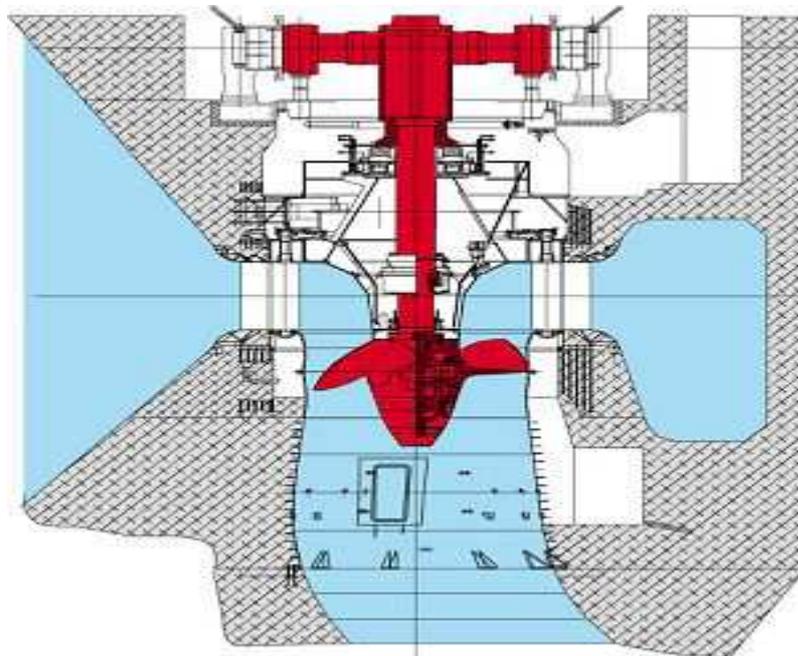


Figura 2.13 – Exemplo de uma turbina Kaplan

### **3. VEDAÇÃO do EIXO na TAMPA de TURBINAS HIDRÁULICAS KAPLAN**

Este trabalho teve a sua parte prática desenvolvida na empresa Manaus Energia S.A. sendo esta responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para o atendimento à cidade de Manaus, capital do estado do Amazonas. Dentro de seu parque gerador está a usina hidrelétrica de Balbina situada no rio Uatumã no município de Presidente Figueiredo a 200 km de Manaus, com uma potência nominal instalada de 250 mega watts com cinco unidades geradoras de 50 mega watts cada.

As turbinas hidráulicas são projetadas para transformar a energia hidráulica em energia mecânica e sua eficiência é medida pela fração da energia total da fonte primária (no caso a água) que é convertida em energia útil (no caso potência de eixo). As principais causas da "perda" de energia nas turbinas são:

1. Perdas hidráulicas: a água tem que deixar a turbina com certa velocidade e esta quantidade de energia cinética não pode ser aproveitada pela turbina.
2. Perdas mecânicas: são originadas por atrito nas partes móveis da turbina e calor perdido pelo aquecimento dos mancais.

Uma das grandes preocupações em turbinas hidráulicas é reduzir ao máximo a fuga de água entre o eixo e a tampa da turbina evitando perda de rendimento hidráulico e invasão de água bruta no poço de drenagem da turbina.

A turbina hidráulica tipo Kaplan possui um sistema de vedação junto ao eixo da máquina e próximo à parte superior do rotor da turbina que tem por finalidade evitar que a água da caixa espiral passe para fora da tampa da turbina. Esse sistema de vedação será alvo de estudo e análise para a implantação de uma melhoria de auxílio a manutenção e para isso uma metodologia de ações ordenadas será executada.

## Metodologia Utilizada

Com a proposta de elaborar uma ação de melhoria na qualidade de manutenção de um processo, podem-se realizar ações ordenadas e em seqüências com o objetivo de identificar fontes de variação do processo.

Na década de 80, a Motorola promoveu o desenvolvimento de uma metodologia com o objetivo de melhorar a qualidade de seus produtos, surgindo então a metodologia “Seis Sigma”. A metodologia Seis Sigma utiliza-se de uma ferramenta chamada DMAIC que é o acróstico que representa: Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar. De acordo com (Pande, 2001) o DMAIC é uma ferramenta que tem por finalidade identificar, quantificar e minimizar as fontes de variação de um processo, assim como sustentar e melhorar o desempenho deste processo após seu aperfeiçoamento.

Com base nesta definição é possível adaptar essa ferramenta para utilização da mesma no sistema de melhoria de qualidade da manutenção proposto por este trabalho. Esses procedimentos podem ser realizados em cinco etapas, são elas:

**DEFINIR:** conhecer o processo, identificar seus principais componentes/equipamentos e suas funções, identificar o modo que esses equipamentos podem vir a falhar e no caso de falha qual a sua causa e o seu efeito sobre o processo.

**MEDIR:** identificar os pontos importantes a serem monitorados no processo, definir os equipamentos para leitura e aquisição de dados, fazer a conexão desses equipamentos com o processo.

**ANALISAR:** analisar os dados obtidos, através de uma ferramenta de análise (gráficos de controle, por exemplo) para visualizar as tendências do processo, o seu comportamento dinâmico, estabelecer padrões de valores das variáveis para bom desempenho do processo.

**IMPLEMENTAR:** criar, estabelecer, programar ações de melhoria e auxílio na manutenção do processo utilizando os conhecimentos obtidos anteriormente e compartilhar essas ações e informações com toda a equipe de manutenção.

**CONTROLAR:** corrigir problemas, quando necessário, estabelecer revisões para manter o bom desempenho das ações e do processo, ampliar, fortalecer as informações e conhecimentos nas ações do sistema a medida que se adquire mais experiência com o conhecimento do processo. O sistema é contínuo sempre com implantação de novas melhorias, ampliação da base de dados e verificação de sua autenticidade, aumentando assim o grau de qualidade e confiabilidade da operação e manutenção para o processo.

---

### 3.1 Definição: Identificação do Sistema de Vedação

#### O Sistema caixa de vedação

O sistema de vedação ou vedador do eixo (caixa de vedação) é um órgão da turbina hidráulica tipo kaplan destinado a evitar a passagem de água da câmara onde fica o rotor da turbina, para o interior do poço acima da tampa da turbina. A necessidade de existir tal órgão deve-se ao fato da existência do furo na tampa da turbina para permitir que o eixo da turbina passe e seja acoplado ao rotor, veja figura 3.1.

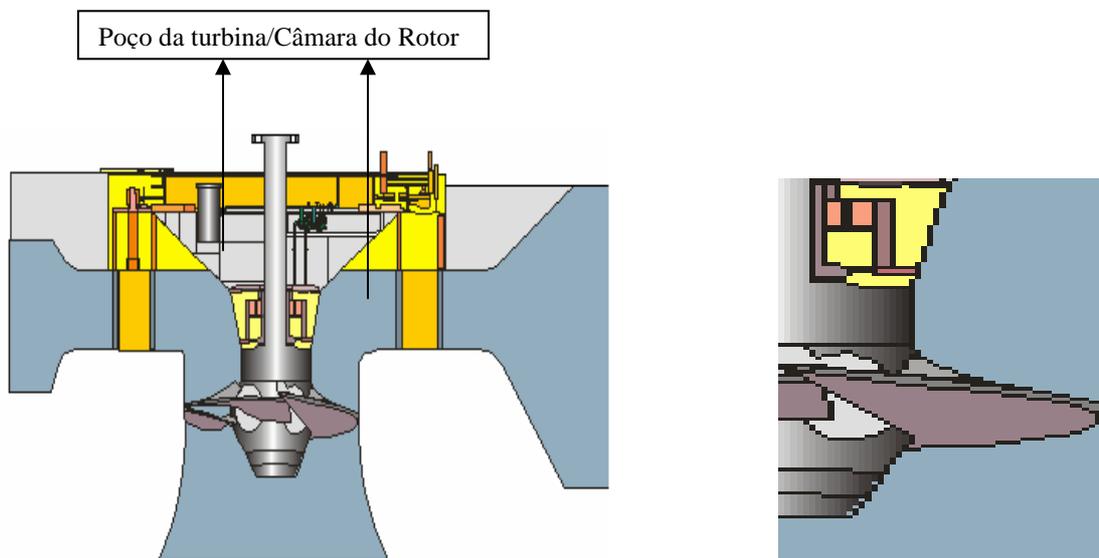


Figura 3.1 – Rotor tipo Kaplan.

Os tipos mais comuns de caixas de vedação usadas são:

**1. Labirinto:** a vedação se dá pela queda progressiva da pressão da água em função da mudança da direção do escoamento à medida que a água passa pelas várias câmaras que formam o labirinto. Nestas câmaras, a água tende a ficar retida e, quando em giro o efeito centrífugo faz com que água vinda da câmara do rotor seja direcionada às câmaras do labirinto ajudando a melhorar mais a eficiência da vedação. A vantagem deste tipo de vedação é não estar sujeito a desgaste, pois a geometria construtiva evita o efeito do atrito entre as

partes fixas e as partes girantes conforme mostra a figura 3.2. A desvantagem deste sistema é que a eficiência tende a diminuir quando a máquina encontra-se parada.

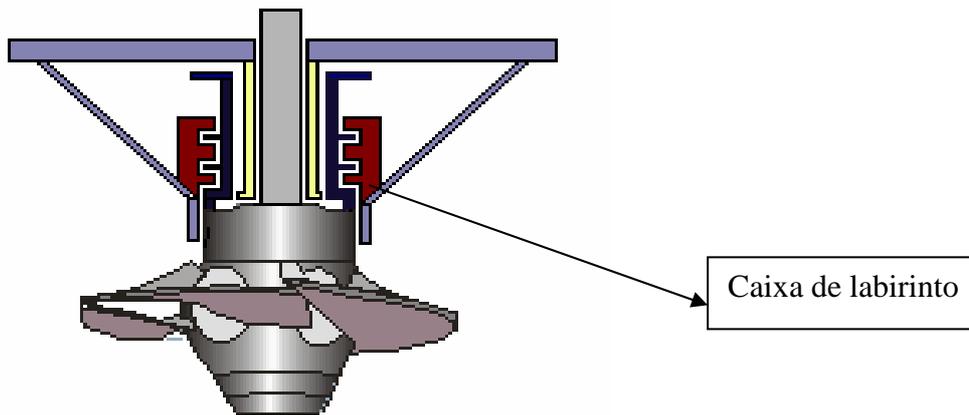


Figura 3.2 – Vedador de eixo tipo Labirinto.

**2. Caixa de gaxeta:** a vedação por gaxeta dá-se pela eliminação da folga entre a tampa e o eixo através da interposição de um elemento vedante “gaxeta”, para isso monta-se uma luva de desgaste na periferia do eixo e uma caixa de gaxeta na tampa da turbina. A vantagem deste sistema é que a sua manutenção é simples, todavia a principal desvantagem é que por ser um sistema que trabalha com atrito as intervenções para manutenção tendem a ser mais frequentes do que os outros tipos de caixas de vedação ver figura 3.3.

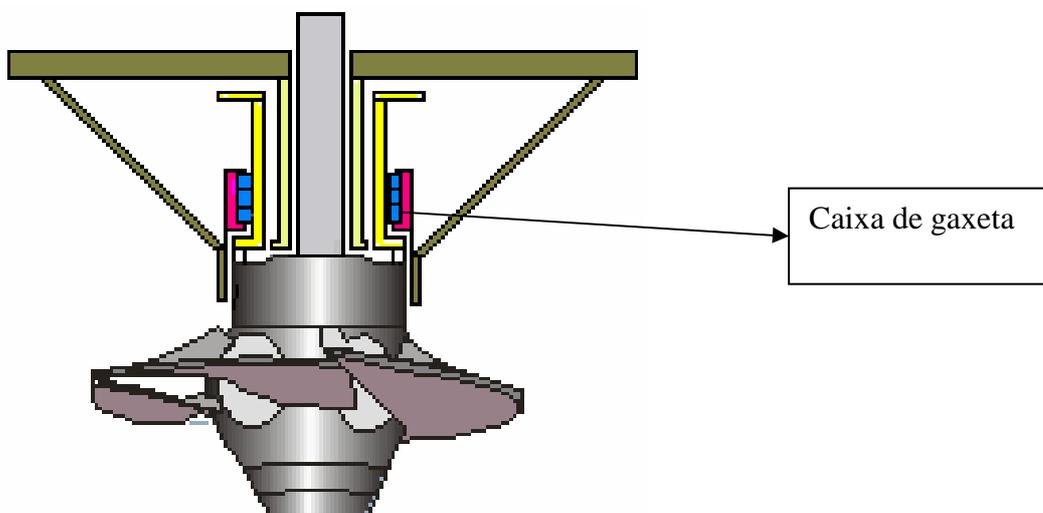


Figura 3.3 – Vedador de eixo tipo gaxeta.

**3. Vedador de segmentos carbônicos** – é um sistema cuja ação da vedação se dá por efeito combinado dos seguintes elementos:

- . Pressão de água provida de uma fonte externa a máquina cuja pressão é superior pressão de entrada do rotor;
- . Pressão de um conjunto de molas montadas sobre um suporte de anéis segmentos de carvão;
- . Pela ação dos segmentos de carvão sobre uma pista de desgaste;
- . Pela ação da própria água vindo do tubo de sucção a qual se quer evitar sua passagem para o poço da turbina.

Este tipo de vedador será o centro deste estudo por ser o sistema de vedação de eixo montado nas máquinas da UHE de Balbina..

Os equipamentos que compõem a caixa de vedação do eixo da tampa da turbina são: Junta Carbônica, Junta de Manutenção e sistema de drenagem do poço da turbina.

### 1. Junta Carbônica (Vedação Deslizante)

A Junta Carbônica é constituída por: Anel de desgaste, Anéis de carvão e Sistema de água de bloqueio (vedação).

**Anel de Desgaste:** O anel de desgaste é um anel de aço-carbono fixado a flange do eixo sendo a parte móvel do sistema. É denominado de deslizante ou de desgaste porque desliza pressionado sobre os anéis de carvão, sofrendo desgaste. A figura 3.4 demonstra a pista deslizante.

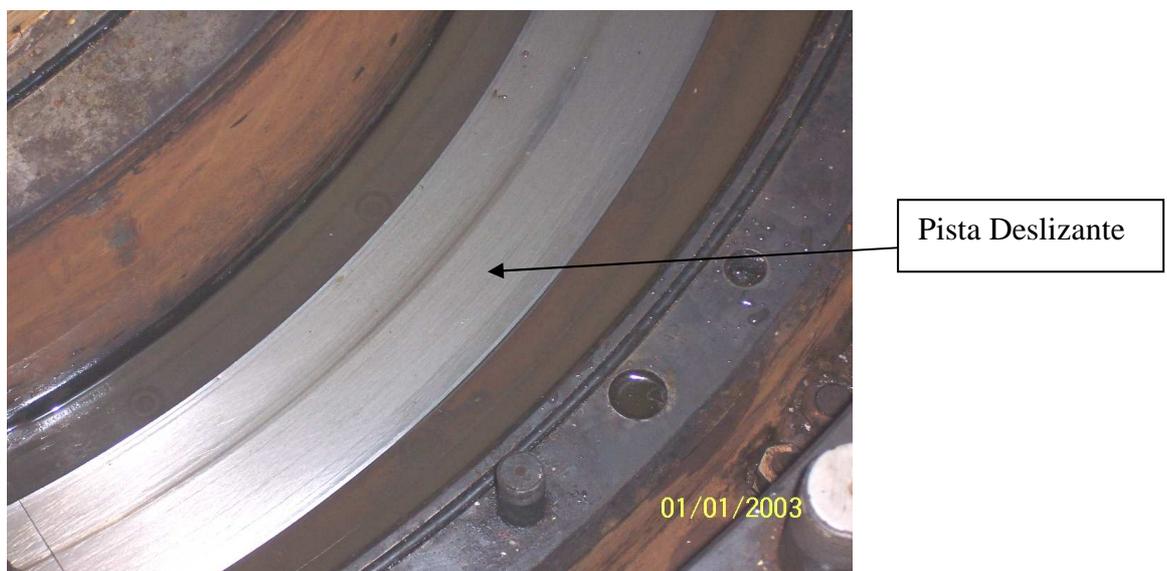


Figura 3.4 – Pista Deslizante (anel de desgaste)

**Anéis de Carvão:** São dois anéis formados por segmentos de carvão justapostos e espaçados um do outro. Seu suporte é uma peça em bronze fixada à estrutura da turbina. Possui um sistema de molas com duas finalidades, pressionar os anéis de carvão sobre o anel de desgaste e proteger a Junta Carbônica na manobra de levantamento da máquina. Existem encostos mecânicos que evitam qualquer movimento dos anéis de carvão. A figura 3.5 visualiza os anéis de carvão em seu suporte.

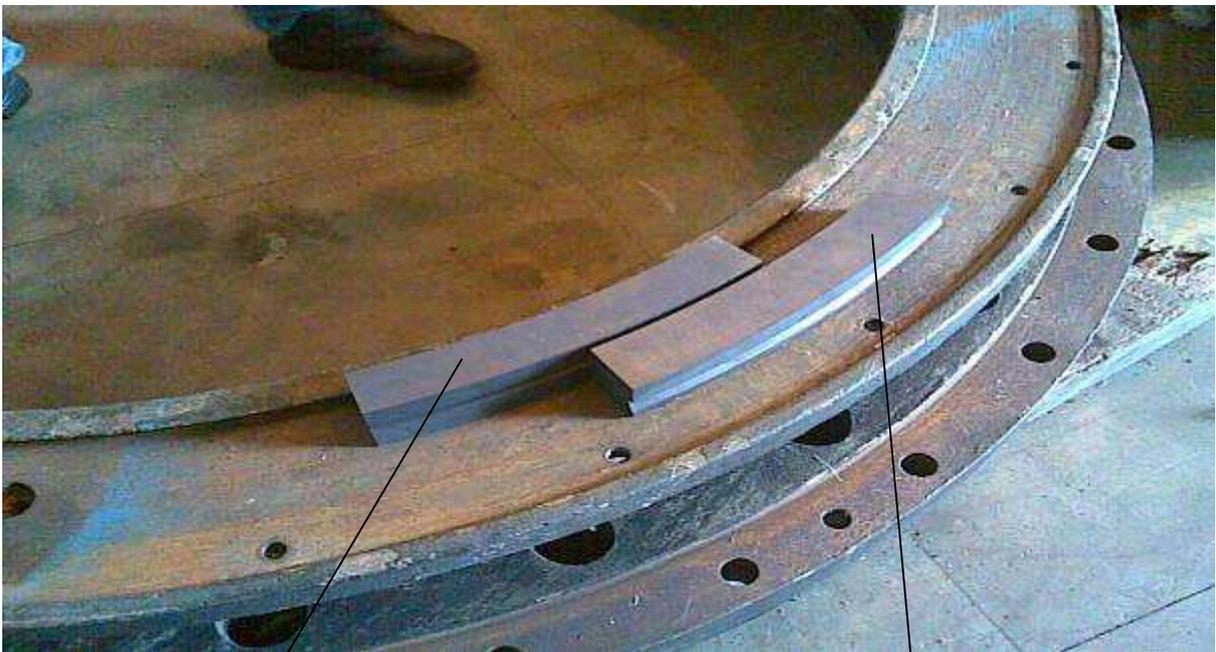


Figura 3.5 – Segmento dos Anéis de carvão.

Segmento interno

Segmento externo

Características da Junta de carvão.

Diâmetro médio	1420 mm
Segmentos internos	16 unid.
Segmentos externos	16 unid.
Seção do segmento	50 x 50 (mm <sup>2</sup> )
Superfície do atrito	4461 cm <sup>2</sup>

---

Velocidade de rotação nominal	11,15 m/s
Velocidade de disparo	28,99 m/s
Pressão específica sobre a junta	0,415 bar

## Características das Molas.

Diâmetro da mola	55 mm
Diâmetro do arame	7 mm
Número total de espiras	9,5
Número de espiras úteis	8,5
Altura da mola	172 mm
Altura da colocação em serviço	117 mm
Número total de molas	16 unid.

**Sistema de Água de Bloqueio:** O sistema é constituído por um reservatório de água limpa, equipamentos de segurança (um fluxostato, um pressostato), válvulas para manobras e tubulações. A água vem de uma tubulação de tomada de água do reservatório e é injetada no espaço entre os dois anéis de carvão e deve ser constante, mesmo com a máquina parada, para garantir a vedação na tampa da turbina. Após passar pela junta carbônica é conduzida para o poço de drenagem da tampa da turbina.

Valores para água de bloqueio.

Vazão máxima	2 l/s
Pressão máxima	5 bar

### 2. Junta para Manutenção (Junta inflável)

É utilizada para a manutenção da Junta carbônica ou quando a máquina estiver parada por longo tempo. É composta por uma borracha toroidal, que quando aplicada, é inflada radialmente contra a cuba do mancal de guia da turbina impedindo que a água do caracol passe para a caixa de Junta Carbônica. O sistema de água de pressurização da Junta de Manutenção é o mesmo sistema de água de bloqueio para a Junta Carbônica.

### 3. Sistema de Drenagem da Tampa da Turbina.

O sistema de drenagem do poço da tampa da turbina é composto de duas motobomba denominadas de AK e AL ( Motor: 3CV, 3380 RPM, 380 VCA, 5,8 AMP – Bomba: Heromod SHQ= 9 m<sup>3</sup>/h, H=24,3m) que operam independentemente da unidade geradora, e sob a opção de manual e automático e sua partida é comandada pela sonda de nível existente dentro do poço da turbina. Nível mínimo de drenagem desliga as duas motobomba, nível baixo liga a primeira motobomba, nível alto liga a segunda motobomba e o nível muito alto provoca a parada da máquina por defeito mecânico. A figura 3.6 demonstra a motobomba AK e AL.



Figura 3.6 – Motobomba AK e AL

Um diagrama esquemático visualiza a posição dos equipamentos da caixa de vedação do processo de água de selagem da usina hidrelétrica de Balbina, é mostrado na figura 3.7.

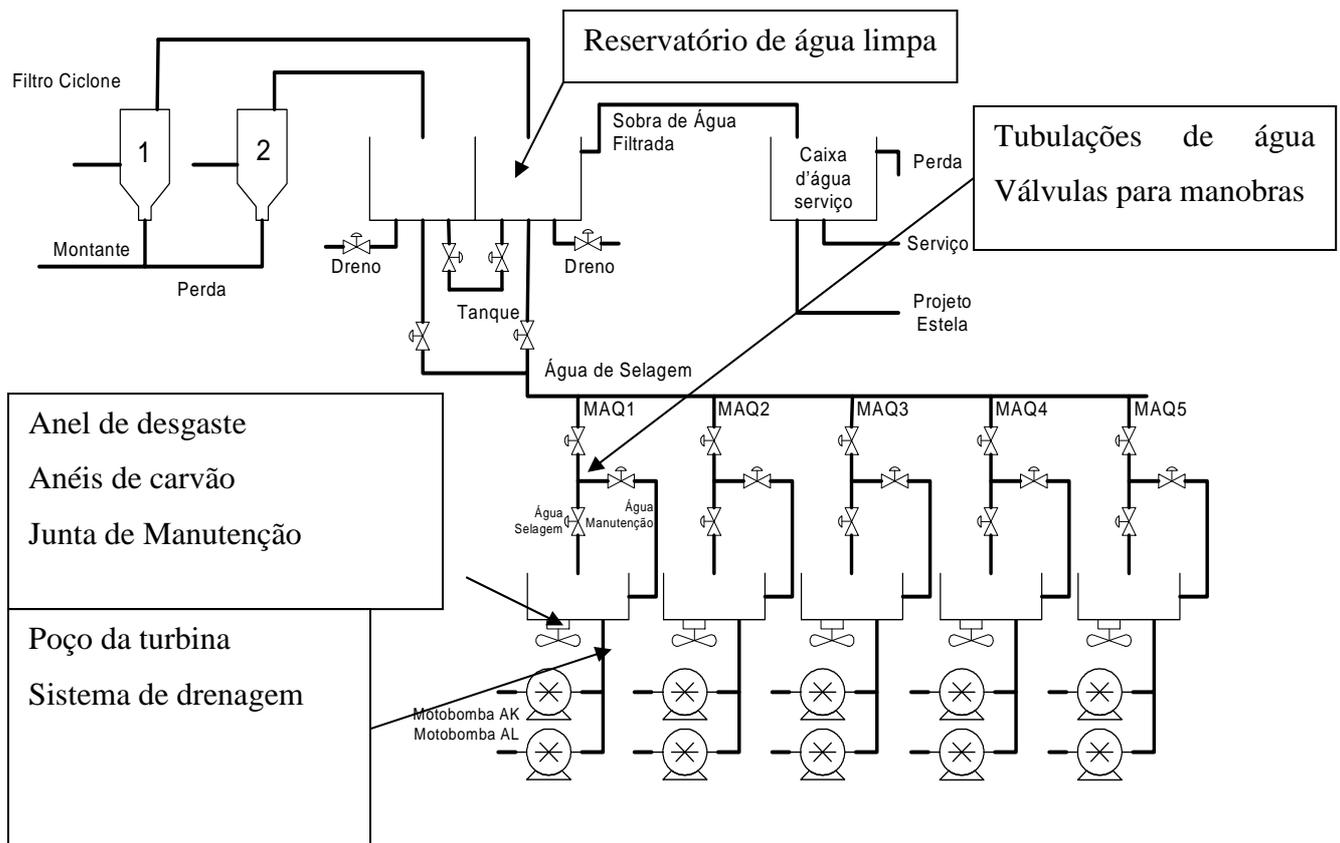


Figura 3.7 – Diagrama do circuito de Água de Selagem da Usina Hidrelétrica de Balbina.

## O Funcionamento

O tipo de caixa de vedação utilizado na usina hidrelétrica de Balbina é o vedador de segmentos carbônicos, ou seja, é um sistema cuja ação da vedação se dá por efeito combinado dos seguintes elementos:

1. pressão de água provida de uma fonte externa a máquina cuja pressão é superior à pressão de entrada do rotor.
2. pressão de um conjunto de molas montadas sobre um suporte de anéis de segmentos de carvão.
3. ação dos segmentos de carvão sobre uma pista de desgaste.
4. ação da própria água vindo do tubo de sucção a qual se quer evitar sua passagem para o poço da turbina.

A Figura 3.8 ilustra os elementos constituintes da caixa de vedação do eixo da turbina da usina hidrelétrica de Balbina e o funcionamento do sistema de vedação do eixo.

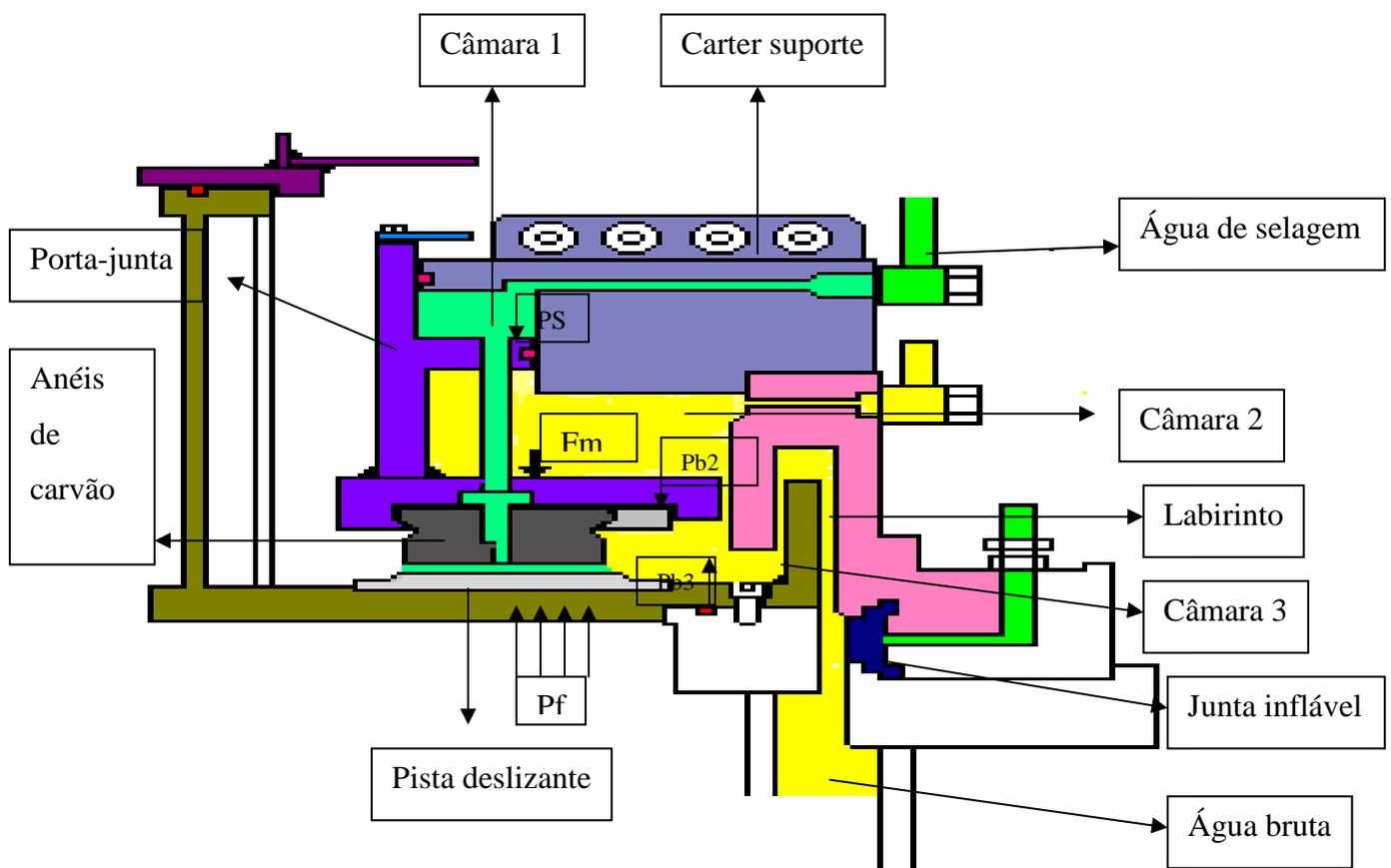


Figura 3.8 – Elementos da caixa de vedação.

---

A água de selagem proveniente dos tanques instalados na Montante da usina é conduzida a quatro pontos de entrada do Carter suporte e então é distribuída uniformemente à câmara (1) da porta-junta, onde nesta região esta água proporciona o esforço ( $P_s$ ), que ajuda a impelir a porta-junta contra a pista de desgaste. A pressão da água de selagem nesta câmara deve ser sempre 0,3 bar acima da pressão da água bruta.

Seguindo o fluxo, parte da água de selagem deixa a câmara (1), atinge os segmentos de carvão, onde o perfil interno destes permite com que a água de selagem se distribua entre os segmentos de carvão e a pista de desgaste criando-se um filme que tem por finalidade impedir a penetração de água bruta entre a pista e tais segmentos carbônicos. Se isso ocorrer colocará em risco a vida útil destas peças de carvão, haja vista que na água bruta normalmente há sólidos em suspensão e o contato destes sólidos com o carvão produz desgaste por abrasão. Uma outra função deste filme hidráulico é o arrefecimento do anel de desgaste, pois, o atrito severo do carvão contra este anel provocaria a queima deste último. Ao se fazer análise de esforços sobre porta-junta, o filme hidráulico gera um esforço ( $P_f$ ), que age em sentido contrário ao esforço ( $P_s$ ), tendendo a empurrar a porta-junta para cima.

A água bruta vinda do tubo de sucção desempenha um importante papel na eficiência da selagem, como se vê na análise dos esforços da água bruta sobre a porta-junta, percebe-se que existe uma força ( $P_{b3}$ ) agindo de baixo para cima na região inferior da porta-junta, câmara (3), empurrando a porta-junta para cima. No entanto, uma parcela desta água passa através do espaço entre o labirinto e a porta-junta indo preencher a câmara (2) resultando assim num esforço ( $P_{b2}$ ) agindo no sentido de cima para baixo. Em intensidade o valor de  $P_{b2}$  é maior que  $P_{b3}$ , isso se deve ao fato de que a área da superfície superior da porta-junta, onde se situa a câmara (2), é maior que superfície inferior, câmara (3). Um dos pontos positivos do projeto deste sistema de selagem foi fazer com que a água bruta que teoricamente seria algo indesejável, tornou-se um elemento que ajuda na selagem da turbina.

Uma característica do comportamento dinâmico da turbina Kaplan é que a mesma possui deslocamento axial devido ao efeito de flutuação da mesma, todavia, este movimento interfere significativamente na eficiência do sistema de vedação do eixo. Em determinadas situações como transitórios (partida, parada e rejeição de carga) as forças atuantes no porta-junta tendem a desequilibrar-se, o que resulta na entrada excessiva de água no poço da turbina. A fim de evitar esta ocorrência, são montados uns quantitativos de dezesseis (16)

---

molares distribuídas ao longo da circunferência da porta-junta, câmara (2), de modo que cada uma destas molas esteja atuando com uma força de compressão ( $F_m$ ) na direção de cada par de segmentos de carvão, empurrando a porta-junta contra o anel de desgaste.

Caso o sistema de vedação do eixo venha a falhar em serviço e dependendo do volume de água a entrar no poço de drenagem da turbina, faz-se necessário uma parada de emergência da máquina para conter entrada de água para o interior do poço da turbina. Existe a junta de emergência que se infla pela ação da água de selagem, para tanto, a equipe de manutenção/operação, antes de aplicar tal junta, deverá esperar que a máquina pare totalmente, pois caso seja aplicada tal junta com a máquina ainda rodando esta será rasgada pelo efeito cisalhante do eixo sobre a borracha constituinte da junta.

Cabe à equipe de manutenção/operação o acompanhamento em primeiro grau do desempenho do sistema de vedação do eixo, a partir do tempo de drenagem da moto bomba AK ou AL, cujo valor depende da potência e da peculiaridade de cada máquina, e ainda o monitoramento do tempo médio em repouso da bomba. Antes de qualquer análise conclusiva, devem-se comutar as bombas e cronometrar o tempo de repouso e trabalho das mesmas e observar a pressão de recalque, através no manômetro situado no poço da turbina.

### **Análise de causa e efeito de falha do Processo Caixa de Vedação**

Para esse sistema de vedação observa-se que, por ser um sistema que trabalha com água bruta, onde na sua constituição existem impurezas e elementos capazes de formarem depósitos de sujeiras, existe uma tendência de que com o decorrer do tempo tais depósitos venham a se acumular. Isso pode provocar corrosões, incrustações nas tubulações, impedimento do movimento axial da porta-junta, travamento das molas de compressão dos segmentos de carvão e entupimento das tubulações de água de selagem. Os segmentos carbônicos além do desgaste natural sofrem desgaste anormal devido à ação de impurezas da água bruta e também se a porta-junta ficar presa e soltar-se abruptamente, o choque deste com a pista de desgaste provocam a quebra dos carvões. O alagamento do poço da turbina provoca uma série de transtornos indesejáveis por ser uma área onde se localizam vários instrumentos de medição, proteção e ainda a entrada de água no mancal guia inferior da turbina empurra o óleo para fora do mancal. É preciso parar a máquina por um longo período e realizar a troca do óleo causando grande prejuízo econômico.

### Causa e efeito de falhas

Através de uma análise das possíveis causa e efeito das falhas nos equipamentos do Sistema de Vedação, tem-se:

#### 1. Causa e efeito de falha: Junta Carbônica.

##### **Anel de desgaste:**

Falha: Permitir o fluxo de água da câmara do rotor para o interior do poço da tampa da turbina.

Causa: Riscos, desgastes ou desnível não conforme na superfície da pista.

Efeito: Aumento excessivo do nível de água no poço sobrecarregando o sistema de drenagem.

##### **Anéis de Carvão:**

Falha: Juntamente com o anel de desgaste permitir o fluxo excessivo de água da câmara do rotor para o interior do poço da turbina.

Causa: Riscos, desgastes ou desnível não conforme na superfície dos anéis.

Quebra do carvão ou desalinhamento do suporte do carvão, devido a choques com a pista deslizante.

Efeito: Aumento excessivo do nível de água no poço sobrecarregando o sistema de drenagem.

##### **Sistema de água de bloqueio:**

Falha: Não fornecer a injeção de água limpa para os anéis de carvão.

Causa: Falta ou baixo nível de água no reservatório de água limpa.

Entupimento ou vazamentos nas tubulações.

Efeito: Aumento excessivo do fluxo de água bruta da câmara do rotor para o poço da tampa da turbina sobrecarregando o sistema de drenagem podendo levar a inundação do poço da tampa e conseqüentemente provocar a parada de máquina.

#### 2. Causa e efeito de falha: Junta de Manutenção

Falha: Quando for aplicado não impedir que a água da caixa espiral passe para a caixa da Junta Carbônica.

Causa: O sistema de pressurização não atuar ou rasgos em sua estrutura.

---

Efeito: Inundação do poço da turbina pela água bruta da caixa espiral.

### **3. Causa e efeito de falha: Sistema de drenagem da Tampa da Turbina.**

Falha: Não drenar a água do interior do poço da turbina para o sistema de drenagem da usina.

Causa: Não conformidade da motobomba, não conformidade da sonda de nível de água ou ainda água em excesso ultrapassando a capacidade de escoamento do sistema de drenagem.

Efeito: Inundação do poço da tampa da turbina e conseqüentemente parada de máquina.

### **4. Causa e efeito de falha: Porta-Junta e Molas compressoras.**

Falha: Não exercerem o movimento axial nas instabilidades da máquina.

Causa: Travamento devido às impurezas da água bruta, desgaste natural de suas partes mecânicas.

Efeito: Se travarem na posição alta pode permitir o fluxo excessivo de água bruta da câmara do rotor para o poço da turbina, se travar na posição baixa podem provocar o desgaste anormal dos anéis de carvão e ou pista deslizante e ainda no movimento brusco da turbina a sua queda pode provocar a quebra ou desalinhamento dos anéis de carvão.

### 3.2 Medição: Aquisição de Dados

Inicialmente a idéia para aquisição dos dados era através da conexão dos equipamentos foundation fieldbus em uma rede H1 já existente na empresa, porém após uma análise mais profunda decidiu-se em fazer uma pequena rede H1 independente do sistema existente. Além de preservar a rede existente, a nova rede H1 tem o propósito de pesquisa e desenvolvimento do processo de água de selagem e ainda o treinamento para o pessoal da área de automação da empresa. A arquitetura montada foi bem simples e é mostrada na figura 3.9.

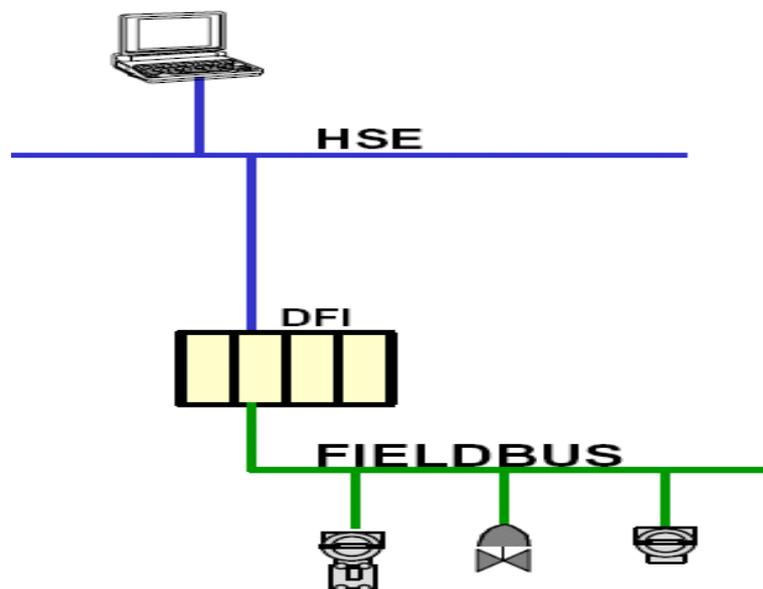


Figura 3.9 – Arquitetura simples de uma rede para aquisição de dados.

A rede local montada para pesquisa foi composta por transmissores foundation fieldbus, um computador pessoal e uma interface fieldbus. O computador utilizado foi um Pentium 4, 1.7 MHz, 512 MB de memória RAM, placa de rede Ethernet (Protocolo TCP/IP) e sistema operacional Windows 2000 no qual foi instalado o System Configurator (**Syscon**) que é um software especialmente desenvolvido para configurar, supervisionar e operar os produtos da linha Fieldbus da SMAR, através de um computador pessoal com uma interface Fieldbus. A interface física ou Fieldbus Universal Bridge (**DFI**) utilizada foi uma DFI302 também da Smar. A DFI302 é um equipamento indicado para pequenas e/ou grandes e complexas plantas. É um equipamento modular multifunção, montado em um backplane, conectado a um trilho DIN, onde todos os módulos são instalados, permite a integração de

estratégias de controle discreto e contínuo explorando o potencial do protocolo foundation fieldbus. Ele provê serviços de comunicação para controle de links, supervisão via OPC, configuração e manutenção usando OLE. A figura 3.10 ilustra uma DFI302.



Figura 3.10 – DFI 302 (fabricante Smar Equipamentos Industriais)

Após a montagem e instalação física da rede foi preciso configurar a DFI e esses procedimentos são executados de acordo com o manual do fabricante. Esses procedimentos não serão mostrados neste trabalho por serem característicos do equipamento Smar e não serem foco de estudo para esse trabalho.

---

### Identificação dos Pontos a serem monitorados.

De acordo com as observações no processo e informações recebidas da equipe de manutenção da usina foram determinados os principais pontos de monitoração dentro do sistema de água de selagem e vedação do eixo da tampa da turbina determinando os seguintes pontos e equipamentos a serem utilizados:

#### 1. Tanques de Armazenamento de Água de Selagem

Instrumento: Transmissor de Pressão Fieldbus

Objetivo: monitorar nível de água de selagem tanque 1 e tanque 2 de água limpa.

#### 2. Circuito de água de vedação

Instrumento 1: Transmissor de Pressão Fieldbus

Objetivo: monitorar a pressão de água de vedação do eixo da turbina.

Instrumento 2: Transmissor de Pressão Fieldbus (diferencial)

Objetivo: monitorar a pressão diferencial da água de vedação do eixo e pressão da água na câmara das molas..

Instrumento 3: Conversor de Corrente para Fieldbus

Objetivo: monitorar a vazão de água de vedação do eixo.

Instrumento 4: Transmissor de Temperatura Fieldbus

Objetivo: monitorar a temperatura da água de vedação do eixo na saída da junta carbônica junto ao poço da tampa da turbina.

#### 3. Circuito Junta de Manutenção

Instrumento: Transmissor de Pressão Fieldbus

Objetivo: monitorar a pressão da água que alimenta a Junta de Manutenção

#### 4. Poço de drenagem da tampa da turbina

Instrumento: Conversor de Corrente para Fieldbus

Objetivo: monitorar o nível de água do poço da tampa da turbina.

#### 5. Motobomba AK e AL

Instrumento: Transmissor de pressão Fieldbus

Objetivo: monitorar a pressão na saída das motobombas AK e AL.

---

### **Instalação dos equipamentos.**

Apesar de serem previstos para o monitoramento do circuito de água de selagem alguns pontos ainda não puderam ser instalados para essa etapa do trabalho, devido o envolvimento de vários fatores como: equipamentos comprados, mas ainda não disponíveis na empresa, fatores de instalação envolvendo mão de obra especializada e autorização de equipes de operação e manutenção, disposição física dos equipamentos, fatores de instalação que envolvia parada de máquina que não estava permitido no presente momento. Em virtude destes problemas, para fins de experiências práticas, foi feita uma seleção dos equipamentos disponíveis na empresa e dos pontos mais importantes do sistema os quais pudessem contribuir para o conhecimento da dinâmica do processo e também um melhor conhecimento de alguns pontos críticos para a manutenção. Os pontos selecionados foram somente quatro e eles serão objetos de estudo neste trabalho. São eles:

1. temperatura da água no poço de drenagem da turbina.
2. pressão diferencial entre água de vedação e a pressão da água na câmara das molas
3. pressão da água de vedação do eixo da turbina
4. nível da água no poço de drenagem da turbina.

Os equipamentos foram montados em um suporte padrão da empresa, instalados e conectados ao processo sem interferir na operação e manutenção normal dos equipamentos, foram realizados pela equipe de manutenção da empresa conforme normas e procedimentos internos para serviços de manutenção e instalação de equipamentos.

A seguir são ilustrados os equipamentos instalados no processo.

### 1. Temperatura da água do poço de drenagem da turbina

Para a medição da temperatura da água do poço foi utilizado um transmissor foundation fieldbus do tipo TT 302 fabricado pela SMAR Equipamentos Industriais e uma sonda de temperatura do tipo PT100. A figura 3.11 e 3.12 ilustra os equipamentos.



Figura 3.11 - Transmissores conectados na máquina. (a) Transmissor superior de temperatura da água do poço de drenagem da turbina. (b) Transmissor inferior: pressão diferencial.



Figura 3.12 - Sonda de temperatura a ser instalada na máquina.

### 2. Pressão diferencial entre água de vedação e a pressão da água na câmara das molas.

Para a medição da pressão diferencial entre a pressão da água de vedação e pressão da água na câmara das molas foi utilizado um transmissor foundation fieldbus do tipo LD 302D fabricado pela SMAR Equipamentos Industriais. A figura 3.11 ilustra esse equipamento.

### 3. Pressão da água de vedação.

Para a medição da pressão da água de vedação foi utilizado um transmissor foundation fieldbus do tipo LD 302 M fabricado pela SMAR Equipamentos Industriais. A figura 3.13 ilustra esse equipamento.



Figura 3.13 - Transmissores conectados na máquina. (a) Transmissor da direita: pressão água de vedação. (b) Transmissor à esquerda: nível de água no poço de drenagem da turbina.

### 4. Nível da água no poço de drenagem da turbina.

Para a medição do nível da água no poço de drenagem da turbina foi utilizado um transmissor foundation fieldbus do tipo IF 302 fabricado pela SMAR Equipamentos Industriais e uma sonda de nível. As figuras 3.13 e 3.14 ilustram esses equipamentos.

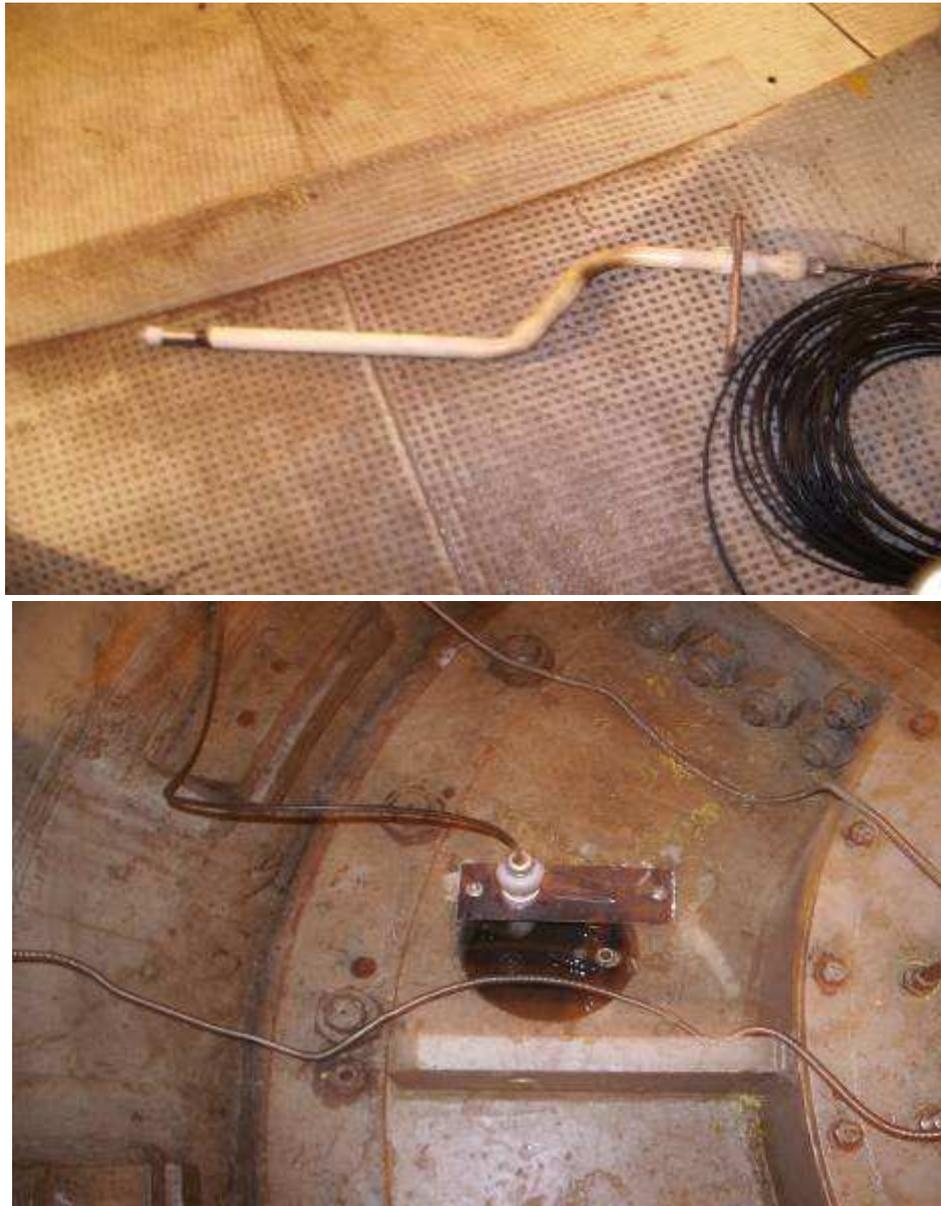


Figura 3.14 - Sensor de nível instalado no poço de drenagem da turbina.

---

### 3.3 Análise: Análise dos Dados

Através de uma versão especial de um software aplicativo da Smar chamado de Tag View foi possível monitorar e salvar os dados das variáveis monitoradas. O Tag View apenas salva os dados em arquivos tipo texto, mas não permite a análise e manipulação dos mesmos. Para poder analisar os dados foi utilizado o software Matlab versão 7.2.0.232.

O Matlab é um ambiente de computação técnico – científico para desenvolvimento de sistemas sofisticados que vem sendo muito utilizado por estudantes, professores, pesquisadores, engenheiros e profissionais de tecnologia da informação como ferramenta fundamental de pesquisa nas mais diversas áreas. Seu ambiente integra uma poderosa linguagem de programação de alto nível baseada em matrizes, ferramenta de depuração de programa, funções de tratamento numérico robusto e de alto desempenho, sofisticados recursos de geração de gráficos para visualização e análise de dados e interface com sistemas externos. Diversas bibliotecas de rotinas MATLAB (**TOOLBOX**), foram desenvolvidas por empresas especializadas para as mais diversas áreas de aplicações como estatística, controle, redes neurais, etc... Os dados foram amostrados com período de amostragem de um (1) segundo, e para as confecções dos gráficos foram adotados os seguintes padrões:

1.Temp - Descrição: Temperatura da água do poço de drenagem da turbina.

Unidade de Engenharia [UE]: Graus Celsius

Gráfico: Cor azul, escala 1: 6

2.Pdif - Descrição: Pressão diferencial (Pressão da água de vedação menos pressão da água da câmara das molas).

Unidade de Engenharia [UE]: Bar

Gráfico: Cor verde escuro, escala 1: 1

3.Pav - Descrição: Pressão água de vedação

Unidade de engenharia [UE]: Bar

Gráfico: Cor vermelha, escala 1: 1

4.Nível - Descrição: Nível de água do poço de drenagem da turbina.

Unidade de Engenharia [UE]: mmH<sub>2</sub>O

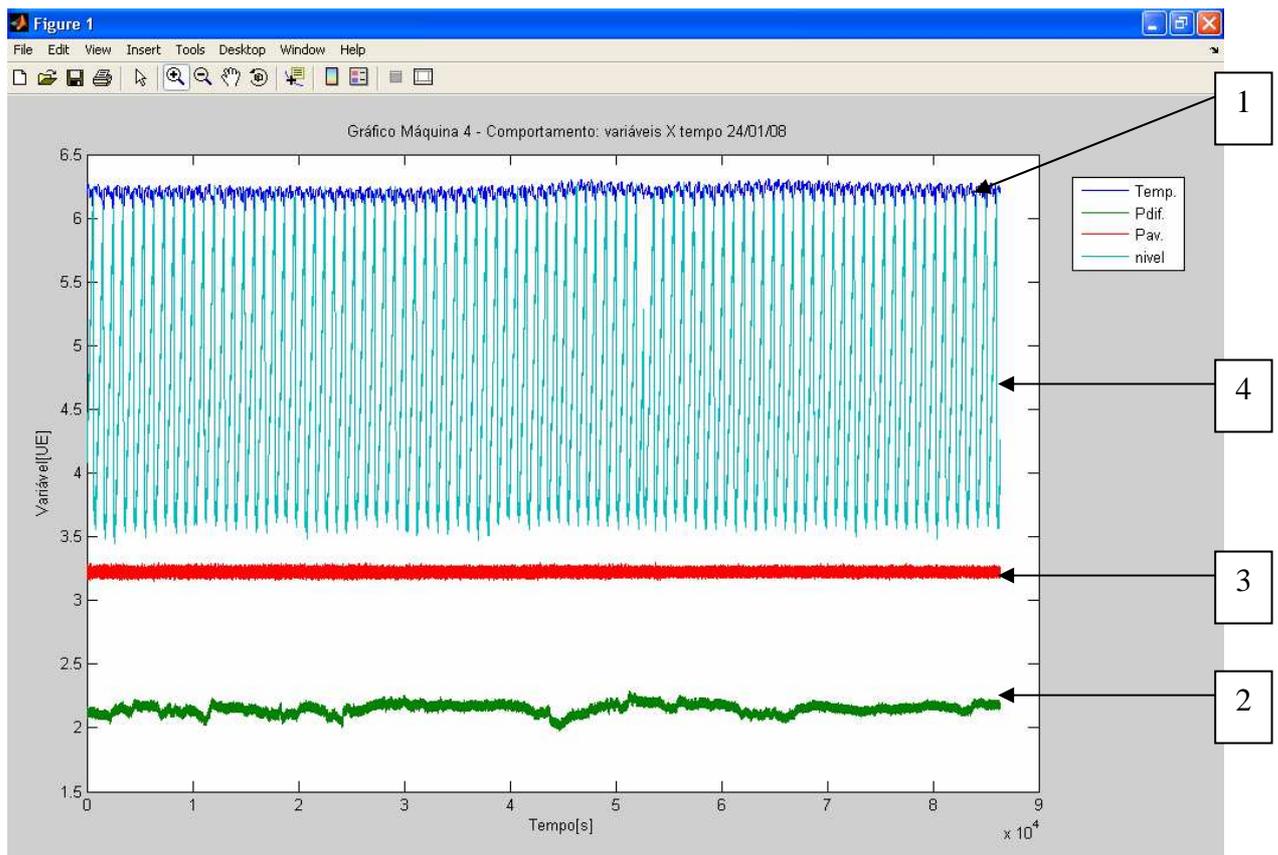
Gráfico: Cor verde claro, escala 1: 1

A seqüência de gráficos apresentados a seguir exibe um conjunto de dados coletados na máquina em campo e para cada gráfico tem-se 86400 amostras que correspondem a um dia inteiro de amostragem (00h00min às 23h59min). Para melhor visualização os valores de temperatura estão representados no gráfico através de uma normalização por seis, ou seja, seus valores estão divididos por seis.

Nessa etapa o objetivo principal é conhecer o processo de água de selagem através do comportamento das variáveis monitoradas identificando as informações que elas representam sobre o estado de operação dos equipamentos e suas funções.

Para cada gráfico podem-se encontrar duas situações distintas representando o estado de operação da máquina: máquina operando e máquina parada.

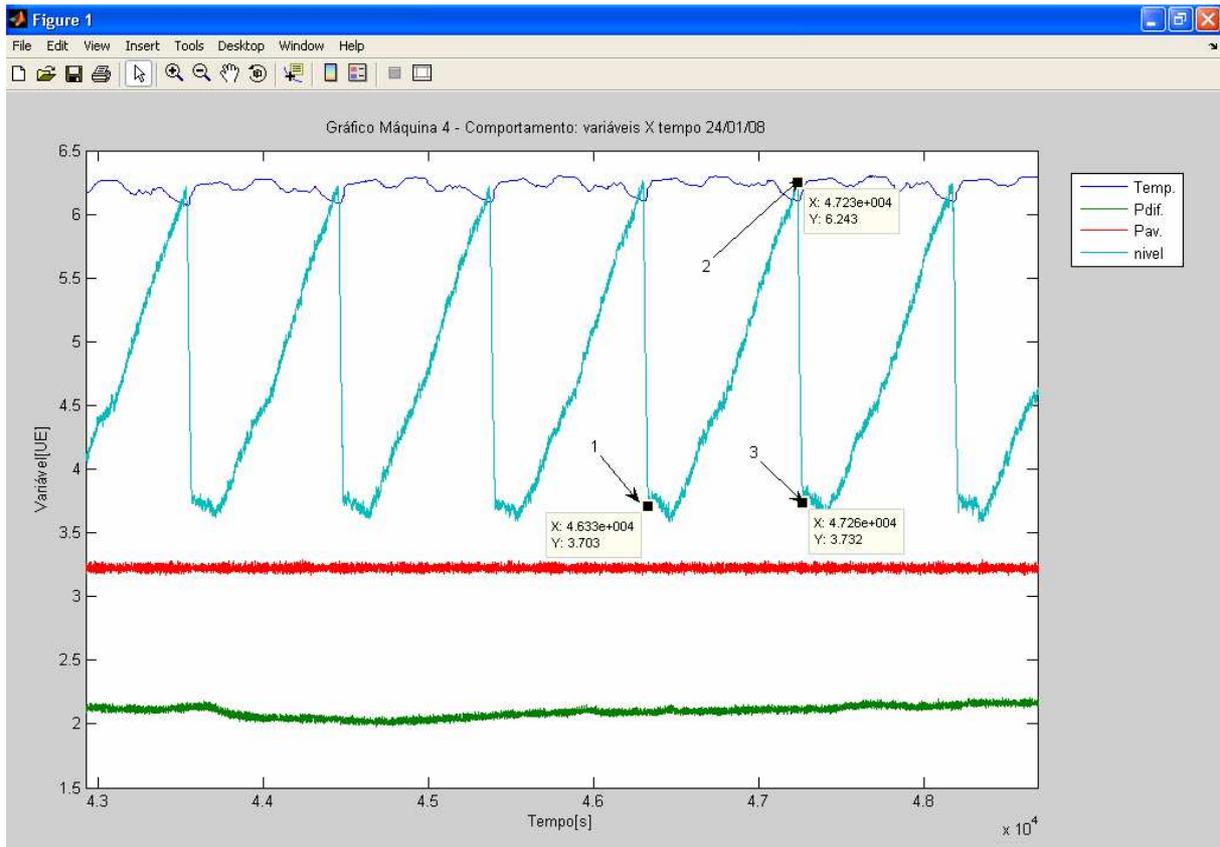
Gráfico 3.1



O gráfico 3.1 representa a operação normal da máquina sem interrupção, sem qualquer tipo de interferência extra em sua operação onde as variáveis estão estabilizadas,

mas não constantes e representam a estabilidade do processo. Detalhando um pouco mais o gráfico anterior diminuindo a janela do tempo obtém-se algumas informações.

**Gráfico 3.2**



Analisando o período correspondente aos pontos 1, 2 e 3 observa-se que:

1. O ciclo de trabalho no sistema de drenagem no poço da turbina inicia quando a motobomba entra em repouso no ponto 1, após ter sido operada, permanecendo em repouso até o ponto 2 e entra em operação do ponto 2 ao ponto 3. Em relação aos tempos tem-se tempo de bomba em operação estimado em torno de 40 [segundos] e tempo de bomba em repouso estimado de 15 [minutos].

2. A temperatura da água do poço indica que a água de selagem cumpre uma de suas funções que é a de resfriar o anel de desgaste. Com nível mínimo de água no poço apresenta uma temperatura mais elevada provocada pelo calor gerado no atrito entre os anéis

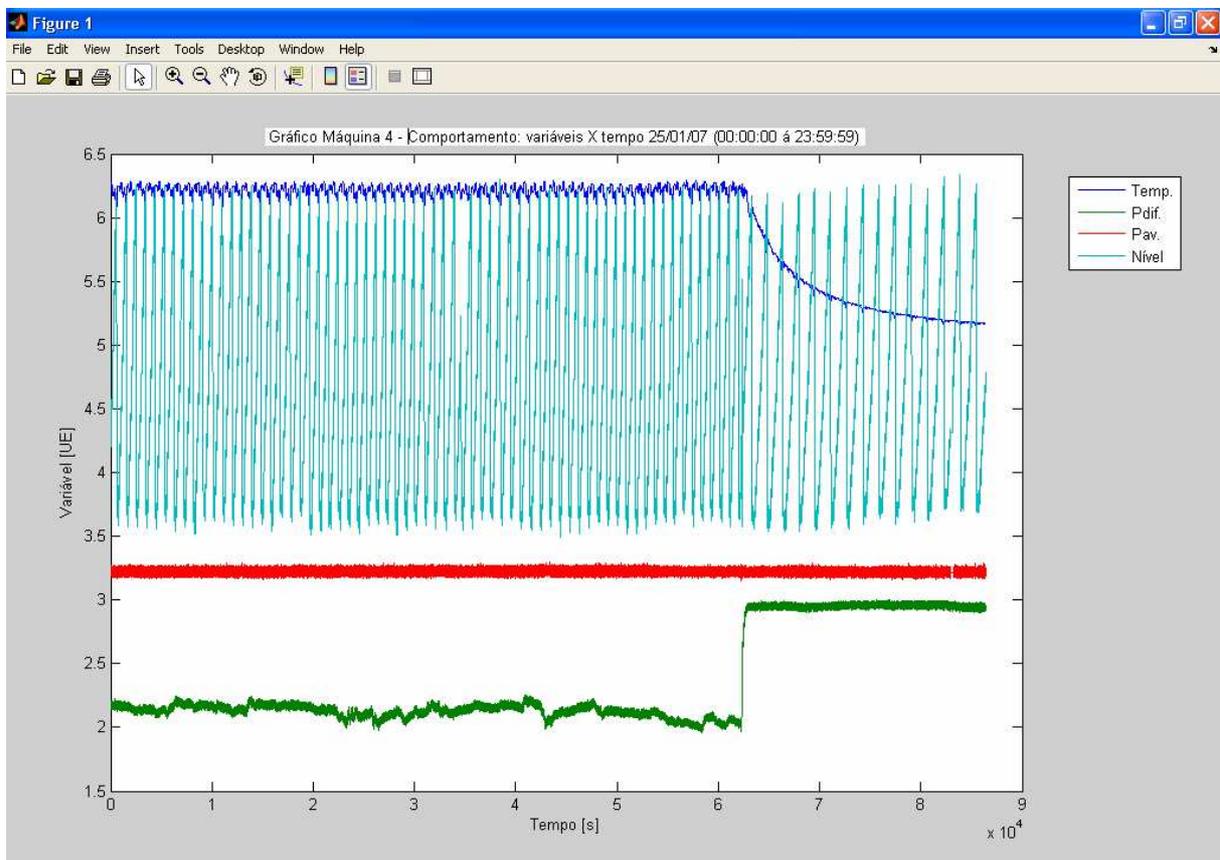
de carvão e a pista de desgaste e à medida que o nível de água aumenta a temperatura cai e assim o ciclo continua.

3. A pressão de água de vedação é estável, porém apresenta uma variação mais uniforme independente do ponto de operação da máquina.

4. A pressão na câmara das molas é estável, mas apresenta variações mais fortes sofrendo influências das condições de operação da máquina.

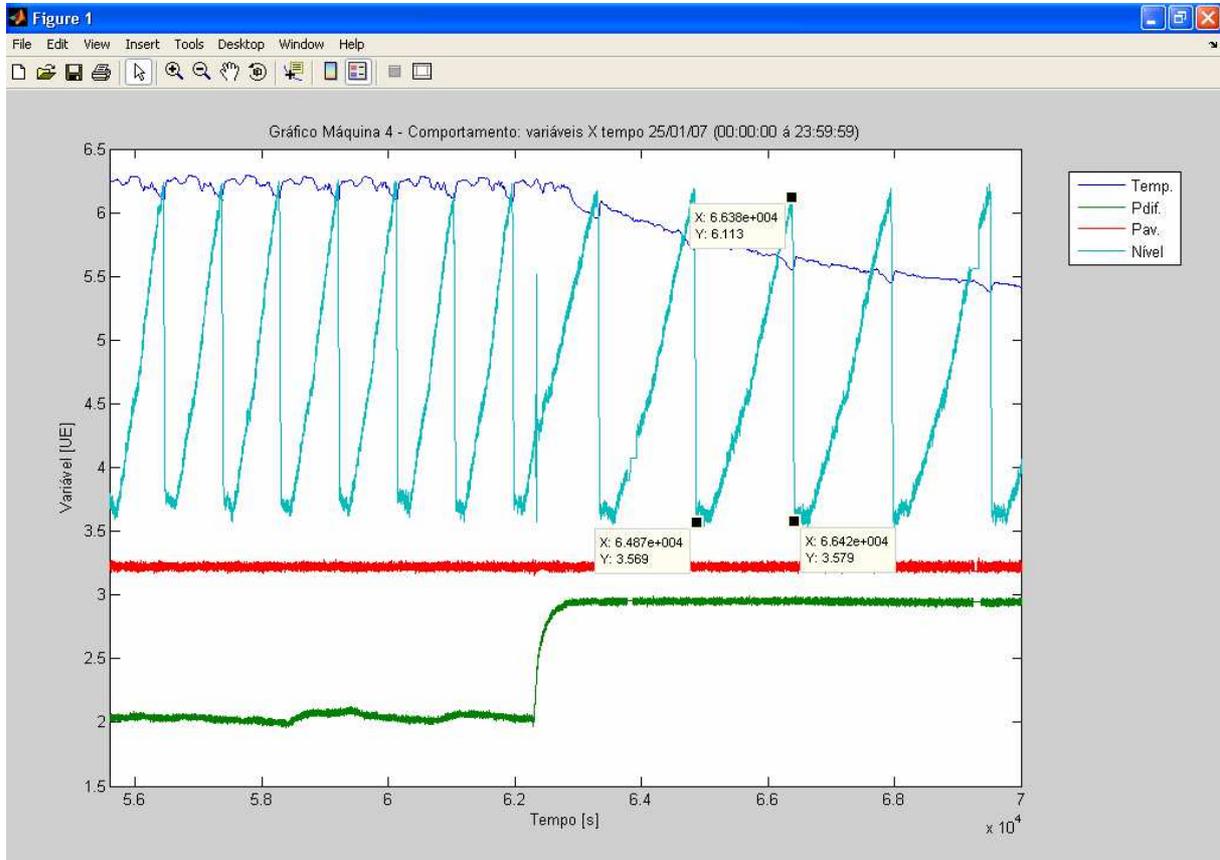
O gráfico 3.3 representa uma condição onde a máquina foi parada.

**Gráfico 3.3**



O gráfico 3.3 representa o momento em que a máquina foi parada, observe a queda no valor da temperatura da água no poço da turbina, a diminuição do ciclo de trabalho das bombas de drenagem e o novo valor da pressão na câmara das molas. Detalhando o gráfico 3.3 novamente diminuindo a janela de tempo e podem-se tirar algumas informações.

Gráfico 3.4

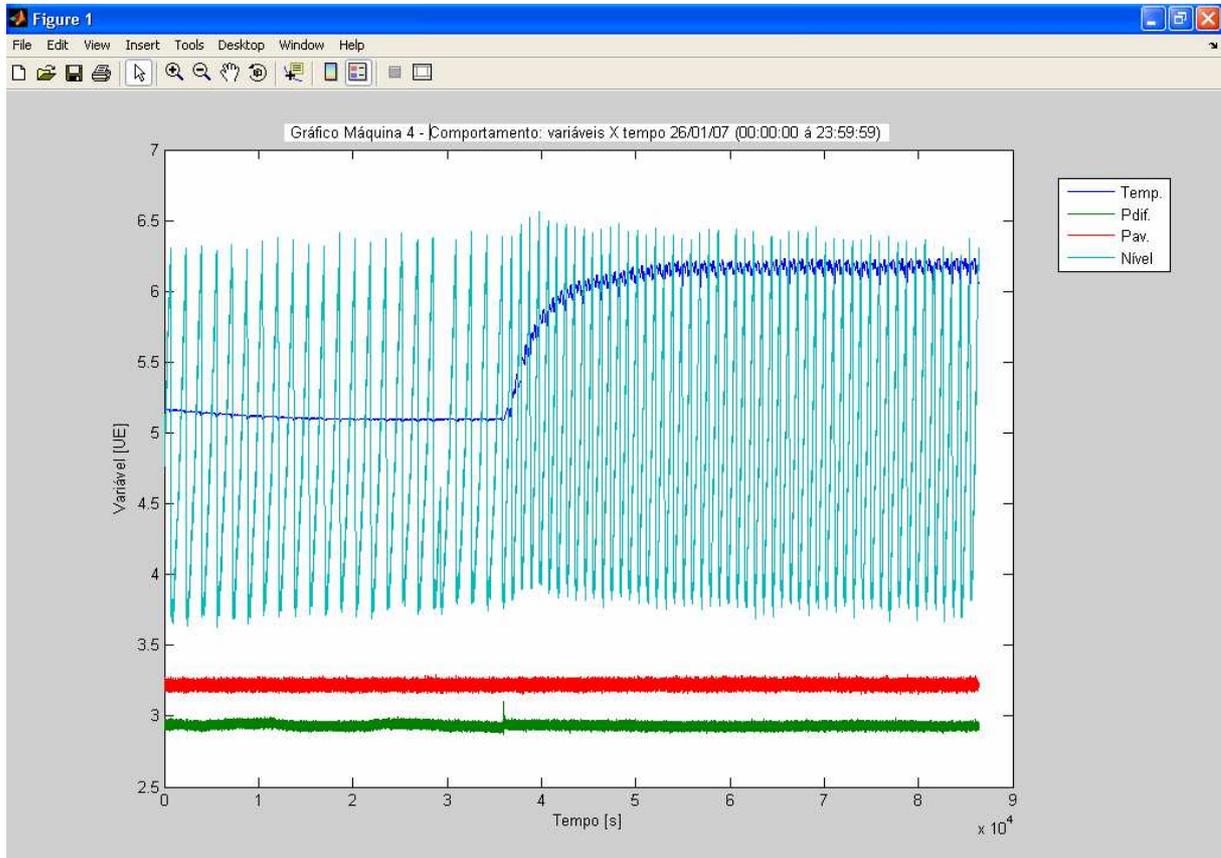


Observa-se que:

1. O ciclo de trabalho do sistema de drenagem tem uma frequência menor, agora com tempo de bomba em repouso estimado em torno de 25 minutos, porém o tempo de bomba em operação é o mesmo em torno de 40 segundos.
2. A temperatura da água do poço decresce rapidamente tendendo a estabilidade.
3. A pressão da água de vedação permanece inalterada.
4. A pressão na câmara das molas tende para um novo valor, porém agora está mais estável.

O gráfico 3.5 representa uma situação em que a máquina é colocada em operação.

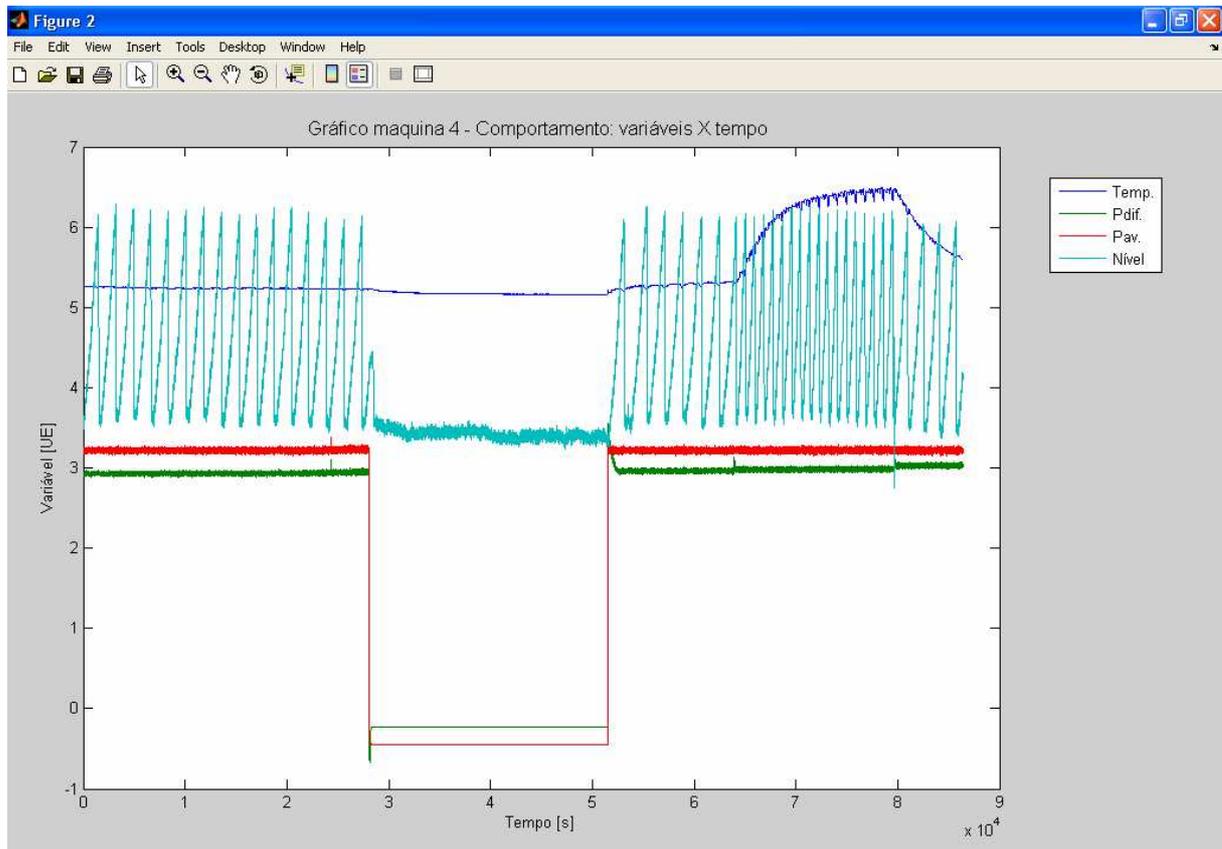
Gráfico 3.5



A temperatura da água no poço se eleva até que atinja uma estabilidade e a frequência do ciclo de trabalho da bomba aumenta.

O gráfico 3.6 representa uma situação especial onde a Junta de Manutenção foi aplicada.

**Gráfico 3.6**



O gráfico 3.6 representa a aplicação da Junta de Manutenção, observe que a máquina estava parada (uma das condições para aplicação da junta) e com a aplicação da Junta de Manutenção é bloqueado a passagem de água da câmara do rotor para o poço da turbina e a água de vedação é desviada para inflar a junta.

---

Com os dados analisados através do gráfico e com as informações do processo adquiridas até o momento podem-se concluir e comprovar algumas teorias sobre o processo como:

1. Realmente as condições de operação da máquina variam em situações transitórias coma partida, parada e rejeição de carga. Esses momentos são críticos para o desgaste dos equipamentos.

2. Quando a máquina opera em regime normal e estável apenas são observadas nas variáveis suas variações normais no processo, ou seja, as causas casuais.

3. A pressão de água de vedação ( $p_{av}$ ) se mantém constante e independente do estado de operação da máquina, o que já era esperado, pois seu valor é função do nível da água na caixa de água de selagem e tem seu valor amostrado em 3,22 [bar].

4. A pressão na câmara das molas é determinada pelas situações transitórias da máquina. Observe que para o período em que a máquina opera continuamente seu valor é relativamente estável sujeito a variabilidade normal do processo e esse valor é determinado geralmente na partida da máquina onde as peças mecânicas se ajustam. Quando a máquina é parada seu valor fica em função dos níveis da Jusante e Montante mais a pressão da água de vedação, ao ser reiniciada a operação da máquina esse valor pode ser alterado ou não por um valor significativo dependendo da condição de partida da máquina.

5. A temperatura da água do poço da turbina tem seu valor médio em torno de 37,08 [°C] para máquina operando. Tomando por base o período em que a máquina ficou parada por mais tempo para não sofrer influência do calor residual gerado com a máquina em operação, a temperatura média ambiente da água no poço da turbina tem seu valor em torno de 30,48[°C] para a máquina parada. A elevação de temperatura da água no poço da turbina entre a máquina operando e parada está relacionado com o calor gerado pelo atrito entre os anéis de carvão e o anel de desgaste.

6. O nível máximo e mínimo de água no poço da turbina é definido pela atuação da chave de nível existente no poço de drenagem da turbina, essa chave de nível é que comanda a partida da bomba de sucção para realizar a drenagem do poço. O tempo estimado de trabalho da bomba está em torno de 40 [s] com máquina parada ou não. O tempo de repouso em torno de 15 [minutos] para a máquina em operação e 25 [minutos] para máquina parada. Isso ocorre devido ao fluxo de água da câmara do rotor para o poço da turbina ser menor com máquina parada.

---

A análise do ciclo de trabalho da bomba é importante pelas informações que elas revelam do processo e que precisam ser investigadas para a detecção de um defeito, vejamos:

1. Tempo de trabalho abaixo da média: pode indicar algum tipo de anormalidade na sonda de nível (ajuste de nível, por exemplo) isso provoca um numero maior de partidas da bomba do que o necessário em um determinado tempo.

2. Tempo de trabalho acima da média: também pode indicar uma anormalidade na sonda de nível ou ainda defeitos na motobomba como perda da capacidade de sucção.

3. Tempo de repouso abaixo da média: pode indicar uma anormalidade na sonda de nível ou problemas com a junta de vedação (existe um fluxo de água maior para o poço de drenagem da turbina).

4. Tempo de repouso acima da média: também pode indicar problemas na sonda de nível, anormalidades no circuito de partida da motobomba e ainda a redução da vazão de água de bloqueio.

Visando a criação de um banco de dados para o sistema de água de selagem, as variáveis foram monitoradas e salvas por um período relativo a três meses diretamente da máquina. Esses dados adquiridos foram trabalhados na forma descrita no item anterior e foi possível durante esse tempo observar que o comportamento do processo não sofreu alterações tendo sido obtido sempre o mesmo modelo e os dados sempre estiveram estáveis apenas variando em função das requisições normais de operação do processo, ou seja, a sua variabilidade natural.

Após um tratamento nos dados, onde foram considerados os dados adquiridos somente para máquina em operação, calculou-se a média para os valores relativos a esse período considerando que a máquina operou em condições normais sem apresentar algum tipo de anormalidade, portanto, esses valores médios obtidos passaram a ser referência para um bom desempenho da máquina. Os valores obtidos foram:

1. Média da pressão da água de vedação: 3.2197 [bar]
2. Média da pressão na câmara das molas: 2.0851 [bar]
3. Média da temperatura da água do poço: 37.6261 [°C]
4. Média do nível de água no poço da turbina: 7.1266 [mmH<sub>2</sub>O]

### 3.4 Implementação: Identificação Automática de Itens não Conforme

Atualmente a única opção que se tem para detectar alguma anormalidade no sistema de água de selagem é através do monitoramento dos tempos de trabalho e repouso da bomba de sucção no poço de drenagem da turbina ou inspeção visual do fluxo de água no interior do poço através da escotilha localizada na tampa da turbina conforme mostra a figura 3.15. Ambas as condições dependem da presença física de um operador da usina ou membro da equipe de manutenção presente na tampa da turbina, realizando essa atividade de uma forma sistemática que venha a identificar alguma anormalidade.



Escotilha para observar fluxo de água no poço da turbina

Figura 3.15 – Tampa superior de poço da turbina.

Com o objetivo de identificar um defeito e prever uma falha no sistema de água de selagem de uma forma automática e em tempo real, agora de posse de referência de valores de bom desempenho da máquina e com as informações obtidas através das análises dos gráficos da dinâmica do processo, busca-se elaborar um programa de software no Matlab. Esse software utiliza conceitos de CEP e com o auxílio de uma Toolbox específica, que se beneficia da tecnologia OPC para adquirir dados em tempo real, e automaticamente em uma

---

determinada data realiza testes de CEP para identificar um suposto defeito nos componentes principais do processo de água de selagem. Em caso de identificação positiva, gera um alerta para a equipe de manutenção investigar o possível defeito.

Raciocina-se da seguinte forma para as variáveis monitoradas:

1. *pav*: a pressão de água de vedação é praticamente constante em todo o tempo sendo função do nível de água no reservatório independente da operação do sistema. Se esse valor vier a ser reduzido gradativamente além de sua variabilidade natural então esse processo de redução pode ser identificado na análise estatística programada e com isso indicar um possível defeito como nível baixo de água no reservatório, rompimento ou entupimento de tubulação ou alguma outra não conformidade, que deverá ser identificada pela equipe de manutenção.

2. *pacm*: Através desse parâmetro não foi possível nenhuma relação com seus valores a alguma não conformidade de operação da máquina, seu valor é dependente do resultado das ações de pressão na câmara das molas devido aos níveis de água na Jusante, Montante e a pressão de água de vedação e os estados transitórios da máquina.

3. *tapt*: A temperatura da água no poço da turbina é um parâmetro fundamental para a identificação de defeitos. Se a temperatura média da água no poço se elevar para um valor fora de sua variabilidade natural ao longo do tempo, além de indicar um desgaste prematuro nos anéis de carvão pode estar identificando um travamento da porta juntas ou das molas de compressão, situação em que deverá ser investigada pela equipe de manutenção.

4. *napt*: O nível de água no poço da turbina é um parâmetro que quando tem seu valor médio modificado além de sua variabilidade natural pode indicar um defeito na sonda de nível que aciona a bomba de sucção, no circuito de partida da moto bomba, na moto bomba ou ainda pode estar relacionada com alguma não conformidade do processo.

É importante ressaltar nesse momento que o objetivo dessa melhoria no sistema caixa de vedação é identificar um provável defeito em um dos equipamentos que compõem o sistema e com isso poder prever sua falha e a partir daí encaminhar uma mensagem de alerta para investigação do provável defeito pela equipe de manutenção. Se necessárias medidas de manutenção devem ser planejadas para que sejam efetuadas com o menor dano possível ao processo (inclusive financeiro). O objetivo não é detectar uma falha depois de sua ocorrência

---

ou evitá-la como se fosse um sistema de proteção, é apenas uma ferramenta para auxílio a equipe de manutenção detectar uma falha antes que ela venha a ocorrer.

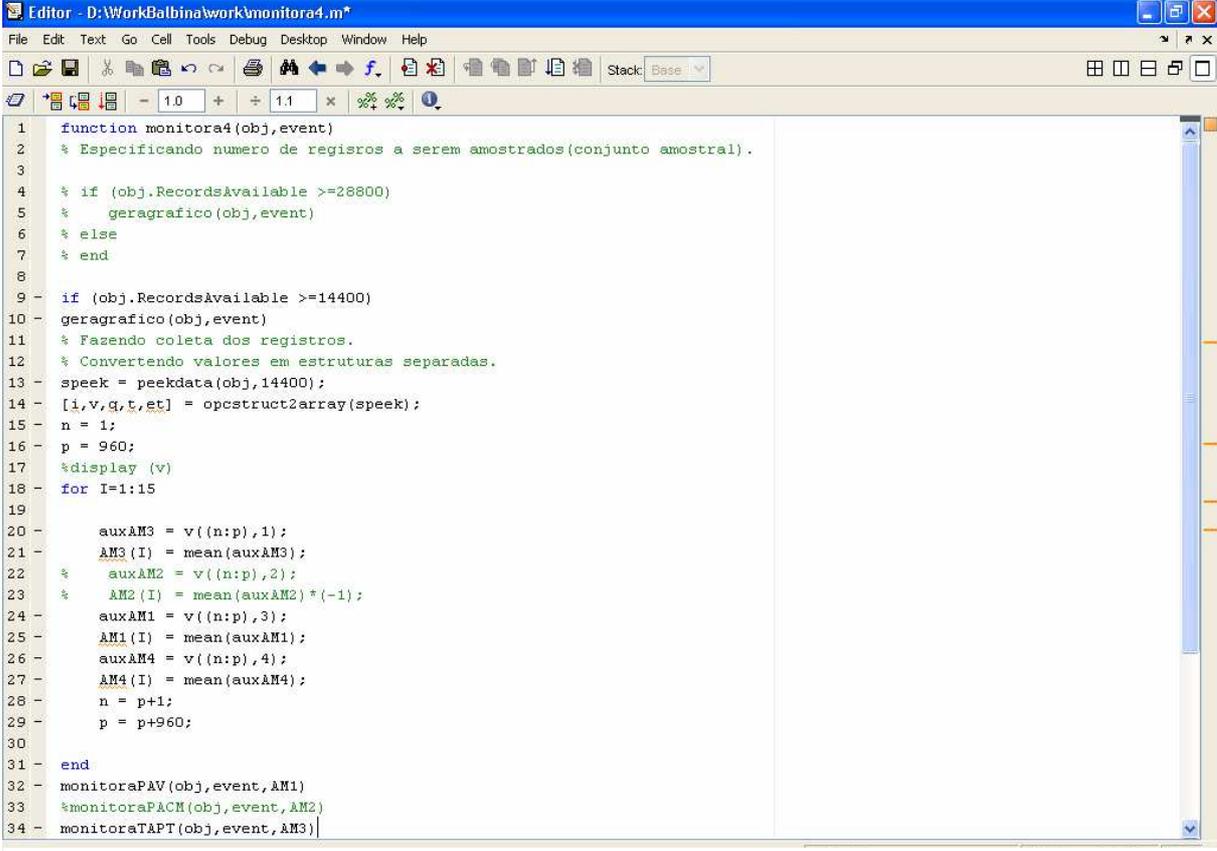
Um recurso que a OPC Toolbox disponibiliza ao usuário são as chamadas de rotinas (callbacks) as quais podem ser desenvolvidas no ambiente do Matlab para realizarem tarefas de análise de dados, geração de mensagens e outras enquanto o *opcda client* estiver conectado com o servidor. Enquanto o *opcda client* estiver conectado com o servidor eventos específicos como início, fim e o período de armazenamento de dados, mudança de estado dos dados, leitura e escrita assíncrona e outros ocorrem na comunicação. A OPC Toolbox permite a seleção de um desses eventos para que quando o mesmo ocorrer a toolbox executar a chamada de uma rotina (callback) para ser executada pelo Matlab e assim realizar o teste estatístico.

Agora o próximo passo é desenvolver as funções callbacks baseado no conjunto de regras de decisão para detectar padrões não aleatórios de comportamentos nos gráficos de controle, as regras Western Electric, juntamente com os conhecimentos adquiridos do processo pelo comportamento das variáveis *pav*, *tapt* e *napt*.

As seguintes funções foram desenvolvidas para realizar o objetivo da proposta:

### **1. Função monitora4**

Esta função ou callback é a rotina que deverá ser chamada pela OPC Toolbox no momento em que os dados começam a ser armazenados na memória ou em um disco especificado. O objetivo desta função é realizar a amostragem automaticamente em tempo pré-estabelecido dos dados a serem analisados, estruturar os dados para que possa ser trabalhado no Matlab e chamar outras quatro rotinas, uma para gerar o gráfico dos dados amostrados e as outras três para realizar o teste de controle estatístico com as variáveis lidas. A figura 3.16 ilustra essa função.



```

1 function monitora4(obj,event)
2 % Especificando numero de registros a serem amostrados(conjunto amostral).
3
4 % if (obj.RecordsAvailable >=28800)
5 %   geragrafico(obj,event)
6 % else
7 % end
8
9 - if (obj.RecordsAvailable >=14400)
10 - geragrafico(obj,event)
11 % Fazendo coleta dos registros.
12 % Convertendo valores em estruturas separadas.
13 - speak = peekdata(obj,14400);
14 - [i,v,g,t,et] = opcstruct2array(speak);
15 - n = 1;
16 - p = 960;
17 %display (v)
18 - for I=1:15
19
20 -     auxAM3 = v{(n:p),1};
21 -     AM3(I) = mean(auxAM3);
22 %     auxAM2 = v{(n:p),2};
23 %     AM2(I) = mean(auxAM2)*(-1);
24 -     auxAM1 = v{(n:p),3};
25 -     AM1(I) = mean(auxAM1);
26 -     auxAM4 = v{(n:p),4};
27 -     AM4(I) = mean(auxAM4);
28 -     n = p+1;
29 -     p = p+960;
30
31 - end
32 - monitoraPAV(obj,event,AM1)
33 %monitoraPACM(obj,event,AM2)
34 - monitoraTAPT(obj,event,AM3)

```

Figura 3.16 – Tela da função monitora4.

## 2. Função monitoraPAV

Esta função é chamada pela função monitora4 e tem como objetivo realizar o teste de controle estatístico para a pressão de água de vedação de acordo com as regras de Western Electric e utiliza como valor padrão de bom desempenho na máquina o valor médio encontrado durante o período de aquisição de dados. No caso da *pav* se as regras forem afetadas no lado positivo do gráfico de controle, ou seja, uma condição em que a regra seja afetada para um valor de pressão maior que a média isso pode ser uma condição normal do processo e então nenhum alarme ou mensagem deverá ser gerada. Se uma das regras for afetada para um valor abaixo da média então uma mensagem de alerta deverá ser gerada. A figura 3.17 ilustra essa função.

```

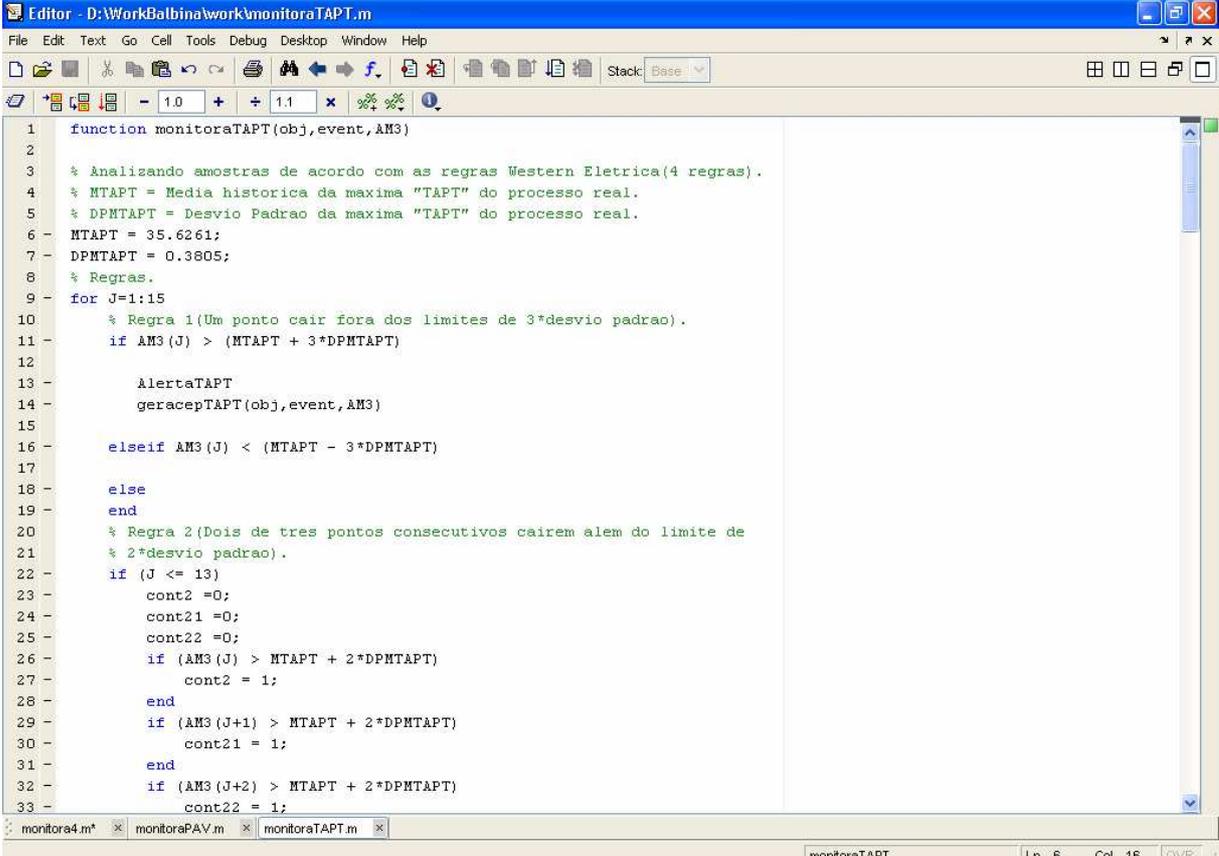
1 function monitoraPAV(obj,event,AM1)
2
3 % Analizando amostras de acordo com as regras Western Eletrica(4 regras).
4 % MPAV = Media historica da "VAR" do processo real.
5 % DPPAV = Desvio Padrao da MPAV do processo real.
6 MPAV = 3.2197;
7 DPMPAV = 0.0309;
8 % Regras.
9 for J=1:15
10 % Regra 1 (Um ponto cair fora dos limites de 3*desvio padrao).
11 if AM1(J) > (MPAV + 3*DPMPAV)
12
13 elseif AM1(J) < (MPAV - 3*DPMPAV)
14 AlertaPAV
15 geracepPAV(obj,event,AM1)
16 else
17 end
18 % Regra 2 (Dois de tres pontos consecutivos cairem alem do limite de
19 % 2*desvio padrao).
20 if (J <= 13)
21 cont2 =0;
22 cont21 =0;
23 cont22 =0;
24 if (AM1(J) > MPAV + 2*DPMPAV)
25 cont2 = 1;
26 end
27 if (AM1(J+1) > MPAV + 2*DPMPAV)
28 cont21 = 1;
29 end
30 if (AM1(J+2) > MPAV + 2*DPMPAV)
31 cont22 = 1;
32 end
33 smcont2 = (cont2 + cont21 +cont22);

```

Figura 3.17 – Tela da função *monitoraPAV*.

### 3. Função *monitoraTAPT*.

Esta função é chamada pela função *monitora4* e tem como objetivo realizar o teste de controle estatístico para a temperatura da água no poço da turbina de acordo com as regras de Western Electric e utiliza como valor padrão de bom desempenho na máquina o valor médio encontrado durante o período de aquisição de dados. No caso da *tapt* se as regras forem afetadas no lado negativo do gráfico de controle, ou seja, uma condição em que a regra seja afetada para um valor da temperatura menor que a média isso pode ser uma condição normal do processo e então nenhum alarme ou mensagem deverá ser gerada. Se uma das regras for afetada para um valor acima da média então uma mensagem de alerta deve ser gerada. A figura 3.18 ilustra essa função.

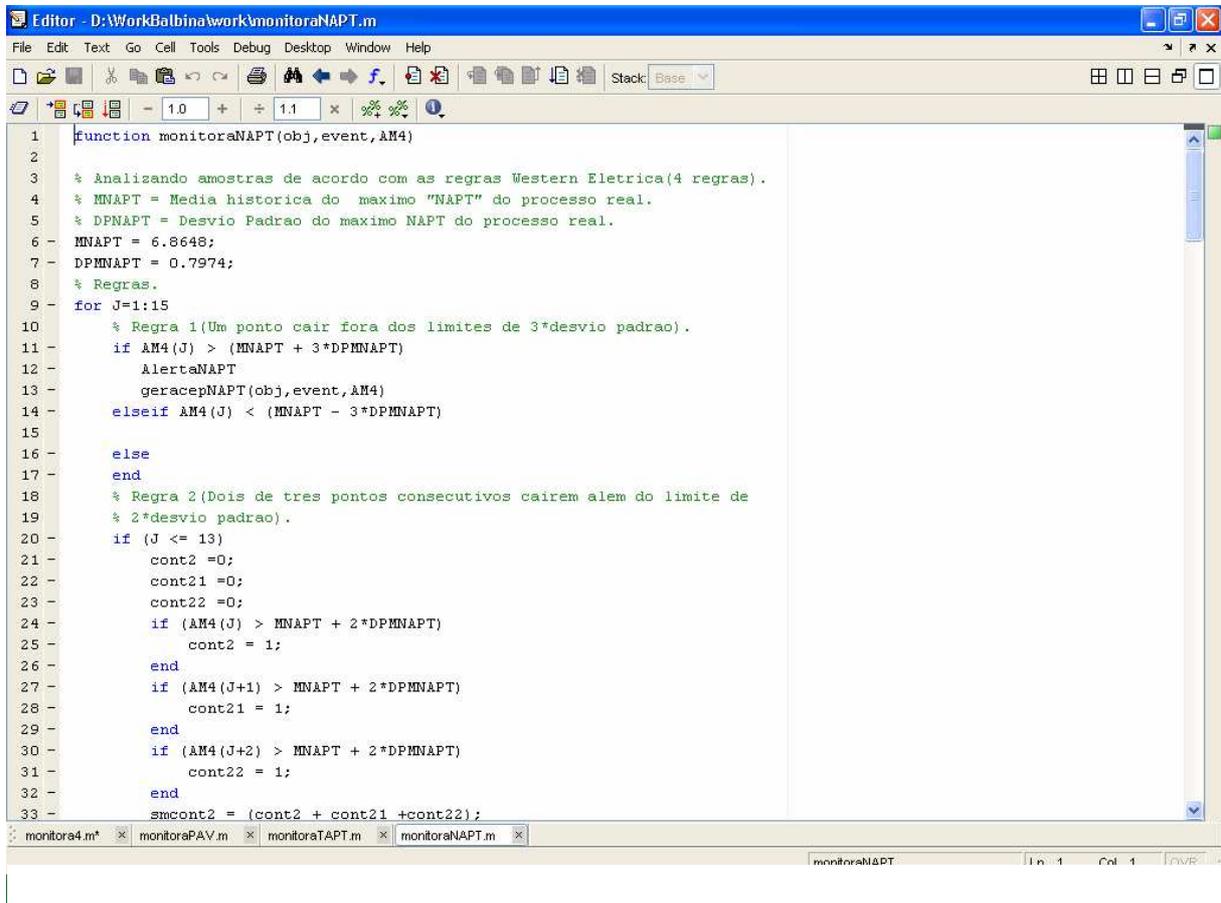


```
1 function monitoraTAPT(obj,event,AM3)
2
3 % Analizando amostras de acordo com as regras Western Eletrica(4 regras).
4 % MTAPT = Media historica da maxima "TAPT" do processo real.
5 % DPMTAPT = Desvio Padrao da maxima "TAPT" do processo real.
6 MTAPT = 35.6261;
7 DPMTAPT = 0.3805;
8 % Regras.
9 for J=1:15
10 % Regra 1 (Um ponto cair fora dos limites de 3*desvio padrao).
11 if AM3(J) > (MTAPT + 3*DPMTAPT)
12
13     AlertaTAPT
14     geracepTAPT(obj,event,AM3)
15
16 elseif AM3(J) < (MTAPT - 3*DPMTAPT)
17
18 else
19 end
20 % Regra 2 (Dois de tres pontos consecutivos cairem alem do limite de
21 % 2*desvio padrao).
22 if (J <= 13)
23     cont2 = 0;
24     cont21 = 0;
25     cont22 = 0;
26     if (AM3(J) > MTAPT + 2*DPMTAPT)
27         cont2 = 1;
28     end
29     if (AM3(J+1) > MTAPT + 2*DPMTAPT)
30         cont21 = 1;
31     end
32     if (AM3(J+2) > MTAPT + 2*DPMTAPT)
33         cont22 = 1;
```

Figura 3.18 – Tela da função *monitoraTAPT*.

#### 4. Função *monitoraNAPT*

Essa função segue o mesmo padrão das anteriores, porém agora é preciso considerar os dois lados da regra para o gráfico de controle, pois existem condições em que as duas situações podem ocorrer estatisticamente e cada uma representar uma situação de não conformidade diferente no processo. Se a regra for afetada do lado positivo valores maiores que a média pode significar um problema na sonda de nível (pode estar isolada, por exemplo, e não iniciar a partida da bomba). Se a regra for afetada do lado negativo valores menores que a média pode significar, por exemplo, que a bomba pode estar trabalhando além de seu tempo normal (por um motivo qualquer não esteja desligando). A figura 3.19 ilustra essa função.



```
1 function monitoraNAPT(obj,event,AM4)
2
3 % Analizando amostras de acordo com as regras Western Eletrica(4 regras).
4 % MNAPT = Media historica do maximo "NAPT" do processo real.
5 % DPMNAPT = Desvio Padrao do maximo NAPT do processo real.
6 MNAPT = 6.8648;
7 DPMNAPT = 0.7974;
8 % Regras.
9 for J=1:15
10 % Regra 1 (Um ponto cair fora dos limites de 3*desvio padrao).
11 if AM4(J) > (MNAPT + 3*DPMNAPT)
12     AlertaNAPT
13     geracepNAPT(obj,event,AM4)
14 elseif AM4(J) < (MNAPT - 3*DPMNAPT)
15
16 else
17 end
18 % Regra 2 (Dois de tres pontos consecutivos cairem alem do limite de
19 % 2*desvio padrao).
20 if (J <= 13)
21     cont2 =0;
22     cont21 =0;
23     cont22 =0;
24     if (AM4(J) > MNAPT + 2*DPMNAPT)
25         cont2 = 1;
26     end
27     if (AM4(J+1) > MNAPT + 2*DPMNAPT)
28         cont21 = 1;
29     end
30     if (AM4(J+2) > MNAPT + 2*DPMNAPT)
31         cont22 = 1;
32     end
33     smcont2 = (cont2 + cont21 +cont22);
```

Figura 3.19 – Tela da função *monitoraNAPT*.

## 5. Telas de Alarmes ou Mensagens

Telas de alarmes ou mensagens podem ser desenvolvidas e quando for chamado pelas respectivas funções de teste, ao ser afetado alguma das regras, podem ser enviadas para a equipe de manutenção ou pessoa responsável desde que sistema esteja conectado em uma rede local. Como exemplo e com a finalidade de uso para teste foi desenvolvido três telas de alarmes conforme ilustra a figura 3.20.

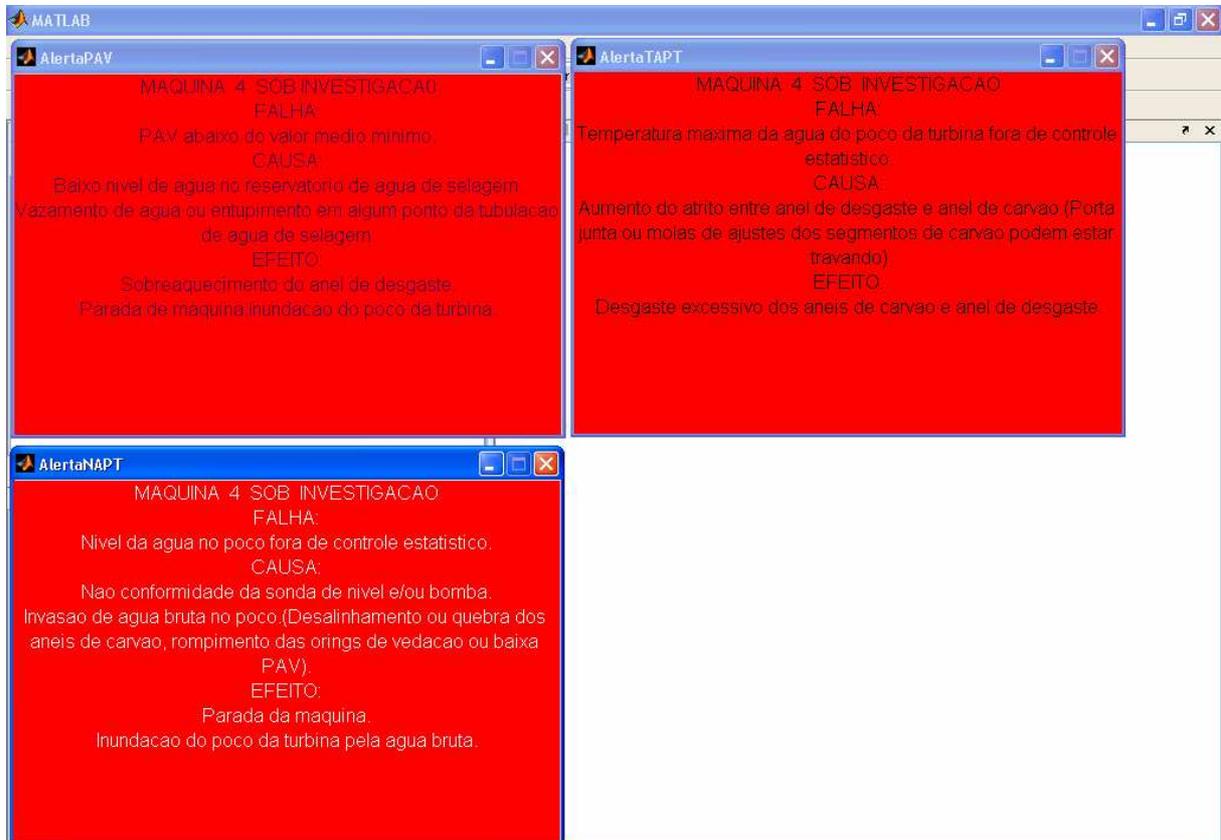


Figura 3.20 – Telas de alarmes desenvolvidas para teste.

---

As rotinas desenvolvidas foram testadas na máquina em operação através da rede local, os equipamentos de campo estavam conectados com o processo, os dados monitorados pela DFI 302 que possui o servidor OLE Server da Smar, a OPC Toolbox adquirindo os valores dos dados e as rotinas de teste sendo executadas no software Matlab de acordo com a configuração utilizada. A DFI foi configurada para realizar a atualização dos dados a cada segundo e a OPC Toolbox pode ser configurada para a chamada da realização do teste estatístico em tempos pré-definidos. A idéia principal é definida da seguinte forma: Uma amostragem é feita pelo programa a cada 15 minutos, por exemplo, então desse conjunto amostral são retiradas 15 amostras divididas em intervalos iguais, esses valores são testados automaticamente com base nas quatro regras de Western Electric e dos valores médios considerados de bom desempenho. Se as regras foram cumpridas nada é feito, se alguma regra é afetada um alarme e ou uma mensagem é enviada a equipe ou pessoa responsável pela manutenção.

Para os testes realizados foi desenvolvida uma rotina para gerar as telas de valores amostrados e a tela de resultado do teste estatístico apenas para análise didática, e a seguinte convenção foi adotada no gráfico de controle estatístico:

- . Quadrado representa o valor da média.
- . Circulo representa o valor para o desvio padrão.
- . Sinal de '+' representa o ponto amostrado.

A seguir alguns resultados obtidos com o teste:

### 1. Teste realizado para amostragem de 15 minutos.

A tela de amostragem representa o comportamento das variáveis, é apenas para efeito didático, como visto anteriormente para 15 minutos representa um ciclo de trabalho do sistema de drenagem.

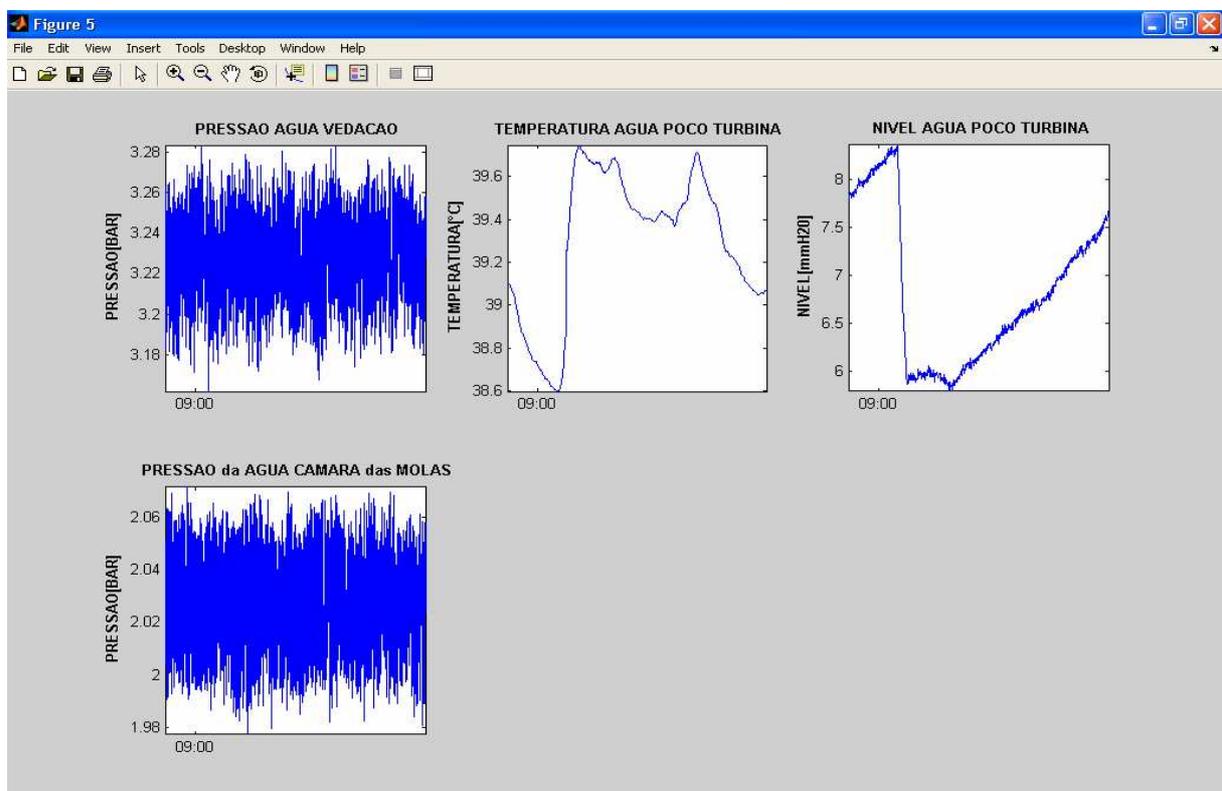


Figura 3.21 – Amostragem realizada para um tempo de 15 minutos.

Para os valores de  $p_{av}$  foi obtido o gráfico de controle representado na figura 3.22 em que os valores encontrados se aproximam bastante ao valor de bom desempenho, sendo assim nenhuma mensagem de alerta foi gerada.

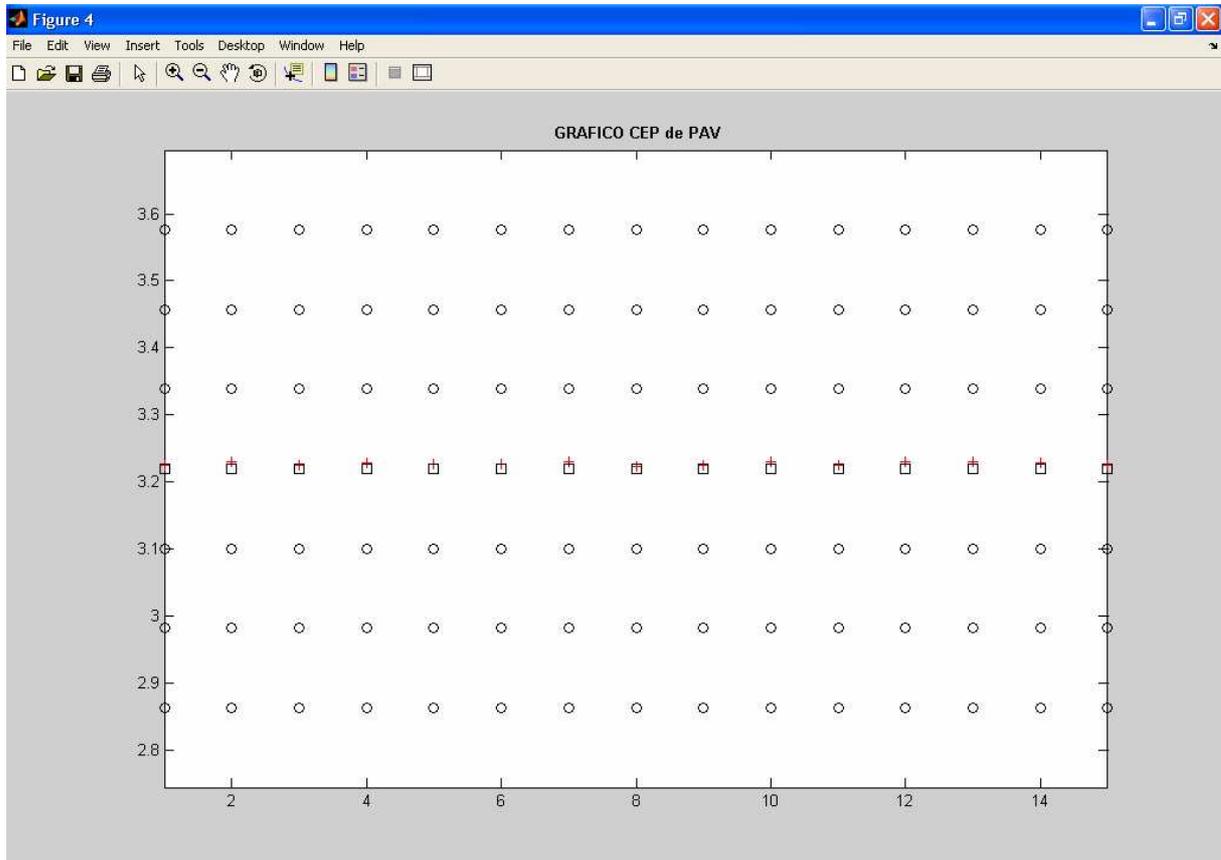


Figura 3.22 – Gráfico de controle obtido para *pav* em 15 minutos.

Para os valores de *tapt* foi obtido o gráfico de controle representado na figura 3.23 em que os valores encontram-se fora do controle estatístico relativo ao valor de bom desempenho, sendo assim gerada uma mensagem de alerta, conforme mostrado na figura 3.24.

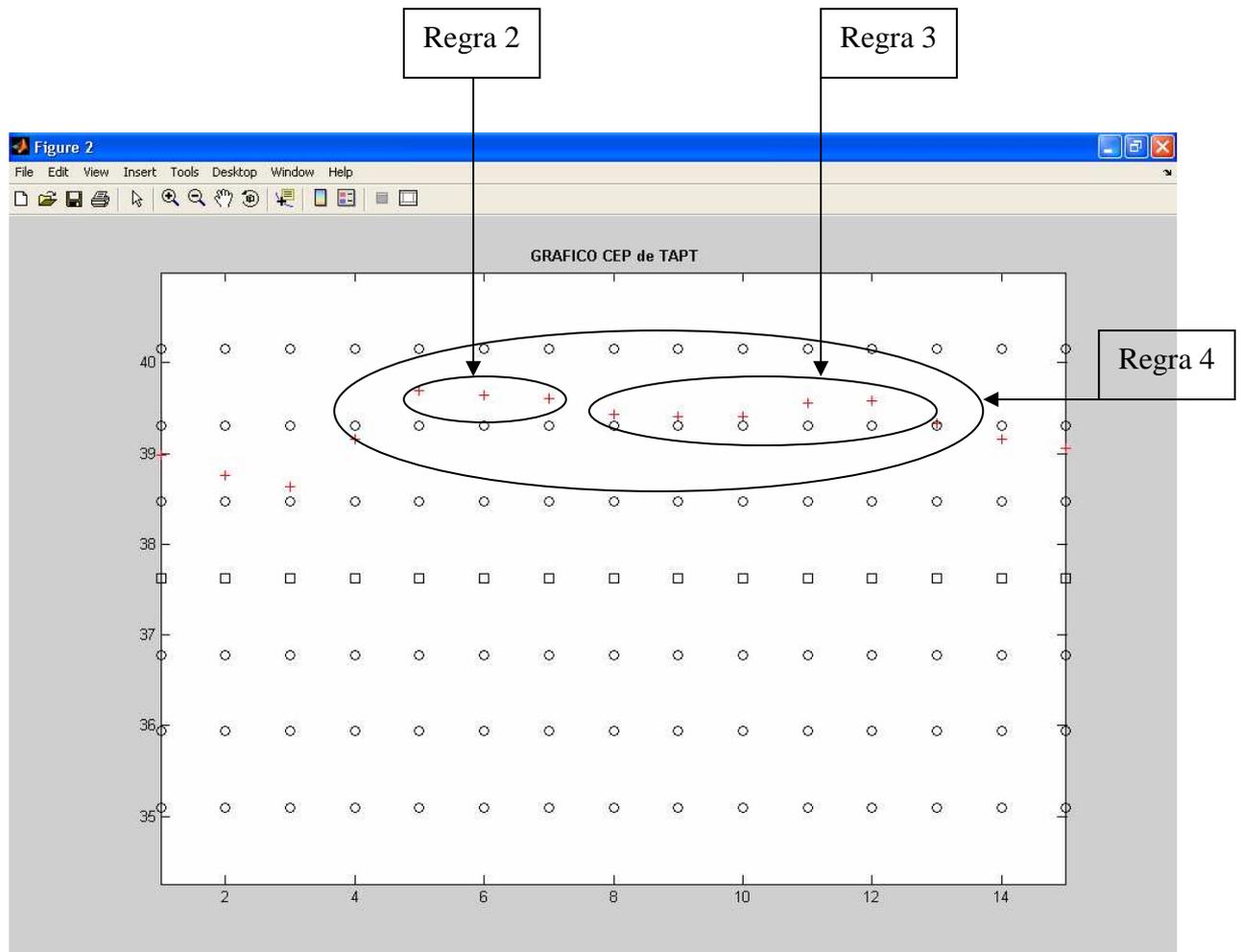


Figura 3.23 – Gráfico de controle obtido para *tapt* em 15 minutos.

Relembrando as regras para o controle estatístico de Western Electric, o sistema está fora de controle estatístico se:

- 1. Um ponto cair fora dos limites de 3 sigmas.**
- 2. Dois de três pontos consecutivos caírem além do limite de 2 sigmas.**
- 3. Quatro de cinco pontos consecutivos caírem a uma distancia de 1 sigma ou além da linha central.**
- 4. Oito pontos consecutivos caírem em um lado da linha central.**

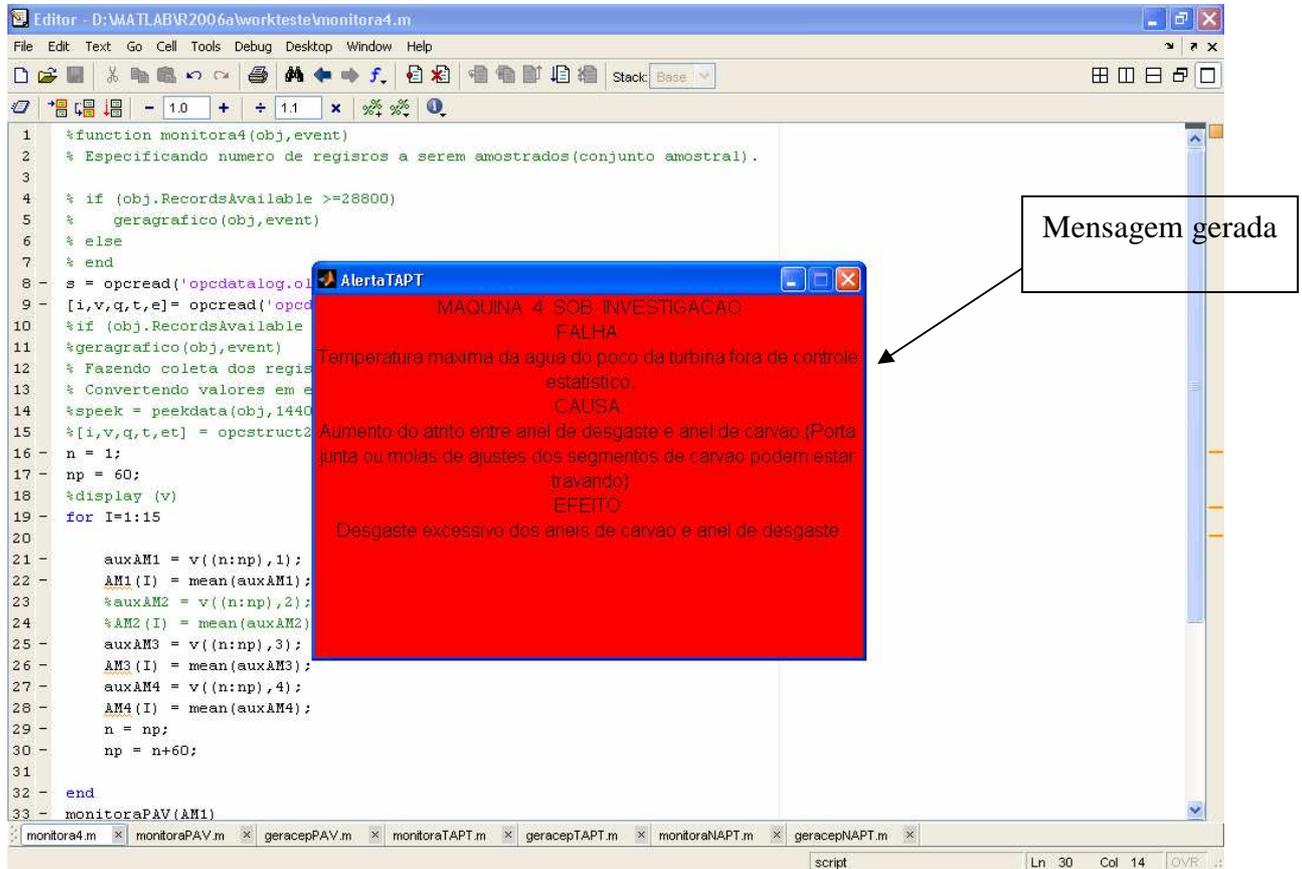


Figura 3.24 – Tela visualizando mensagem de alerta.

Para os valores de *napt* foi obtido o gráfico de controle representado na figura 3.25. Os valores encontram-se fora do controle estatístico relativo ao valor de bom desempenho, porém, nesse caso nenhuma mensagem de alerta deve ser gerada, pois para o nível de água no poço da turbina essa é uma condição normal do processo para um intervalo de 15 minutos.

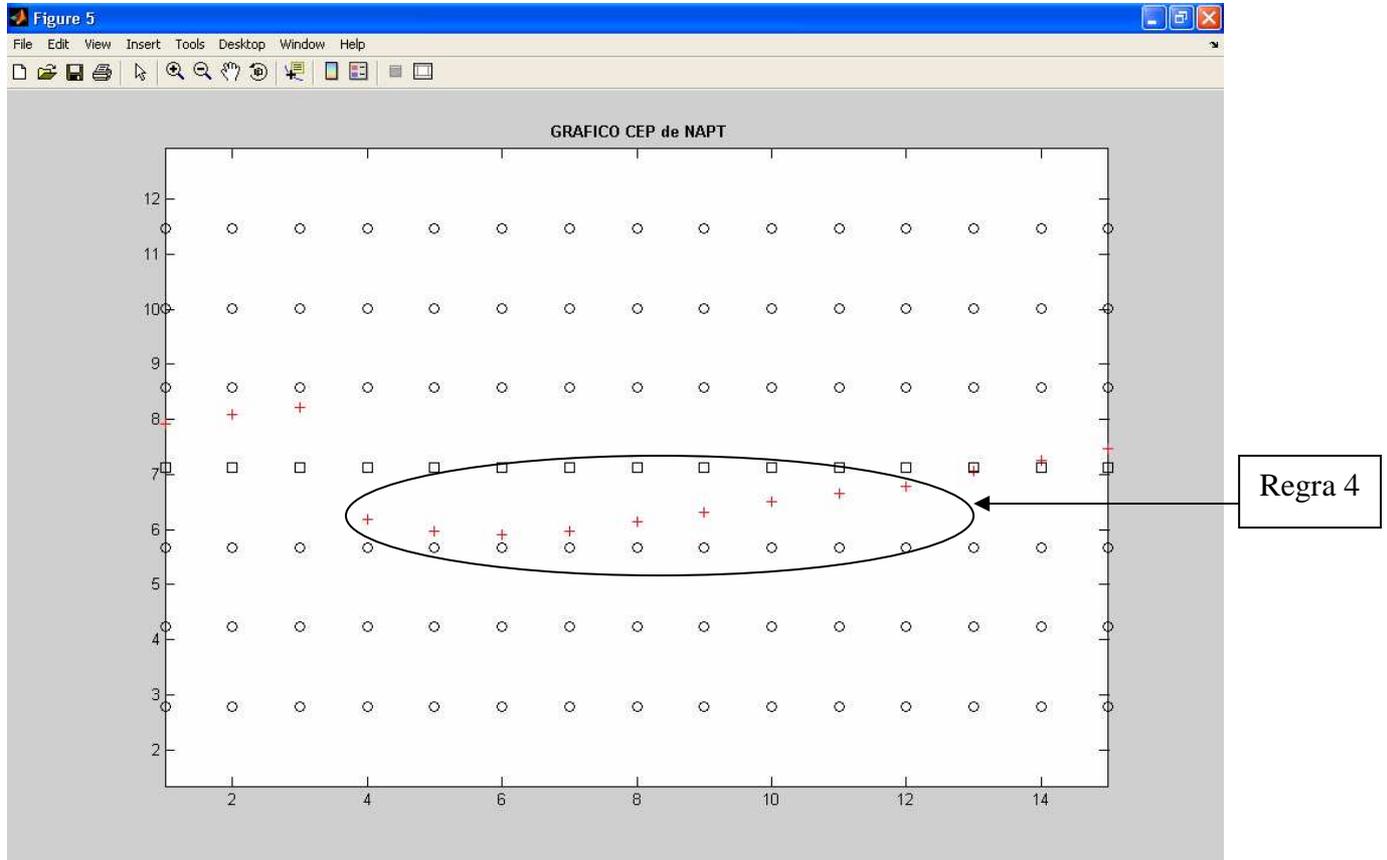


Figura 3.25 – Gráfico de controle obtido para *napt* em 15 minutos.

## 2. Teste realizado para amostragem de 1 hora.

Para o teste de uma hora deve-se ter uma amostragem a cada 4 minutos e para cada intervalo é calculada a média de seus respectivos valores e então realizado o teste de controle estatístico para cada variável. Os resultados obtidos estão representados nas figuras a seguir:

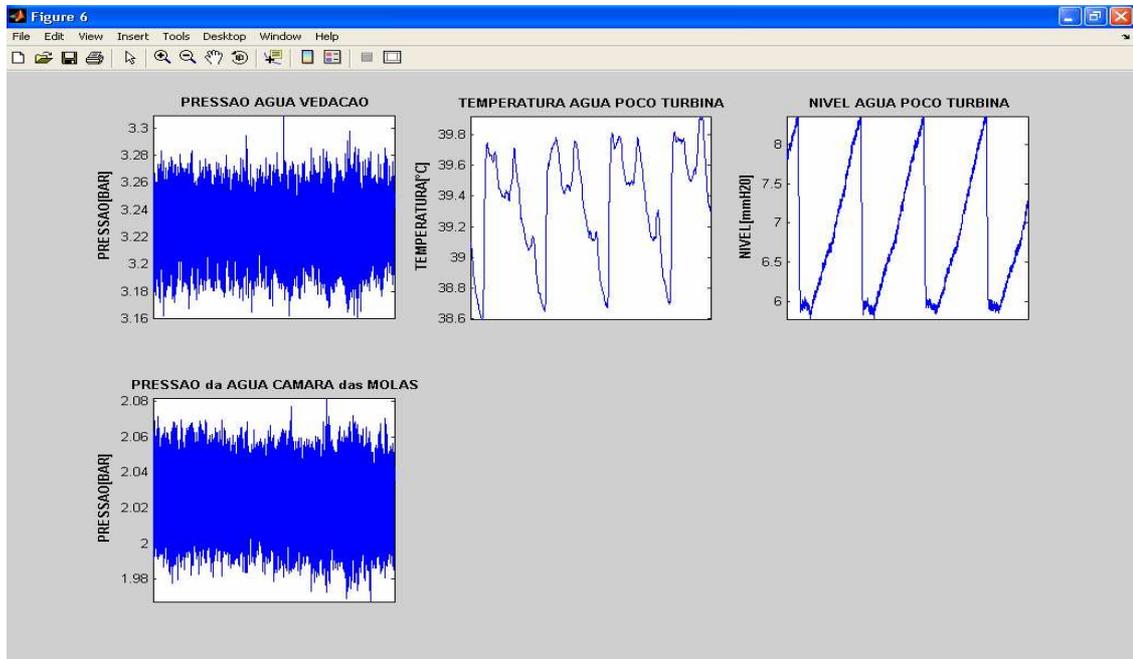


Figura 3.26 – Gráficos para os valores amostrados em 1 hora.



Figura 3.27 – Valores obtidos para *pav* em uma amostragem de 1 hora.

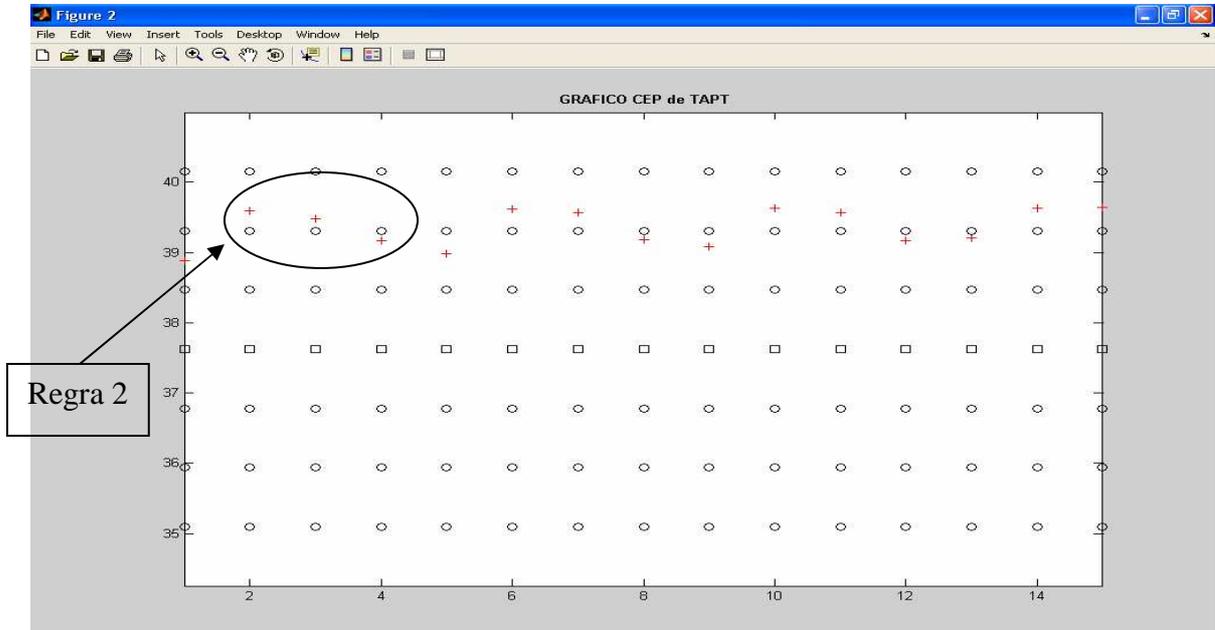


Figura 3.28 – Valores obtidos para *tapt* em uma amostragem de 1 hora.

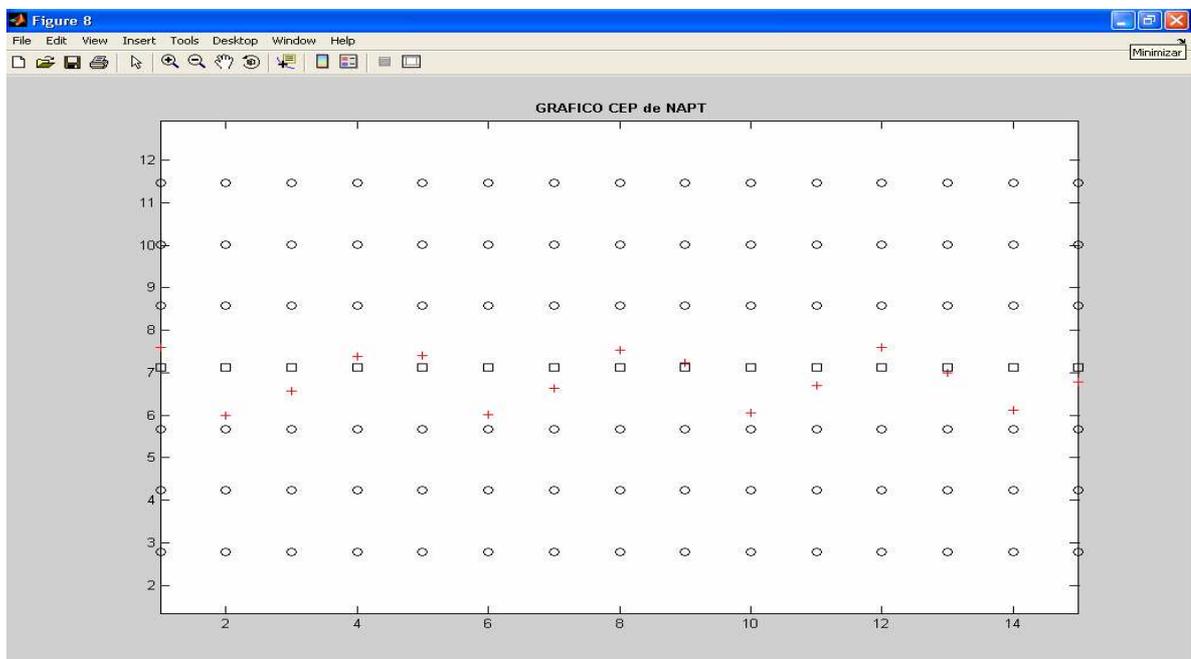


Figura 3.29 – Valores obtidos para *napt* em uma amostragem de 1 hora.

### 3. Teste realizado para amostragem de 3 horas.

Para o teste de 3 horas uma amostragem é feita a cada 12 minutos e para cada intervalo é calculada a média de seus respectivos valores e então realizado o teste de controle estatístico para cada variável. Os resultados obtidos estão representados nas figuras a seguir. A figura 3.30 representa a tela de amostragem para o período de três horas.

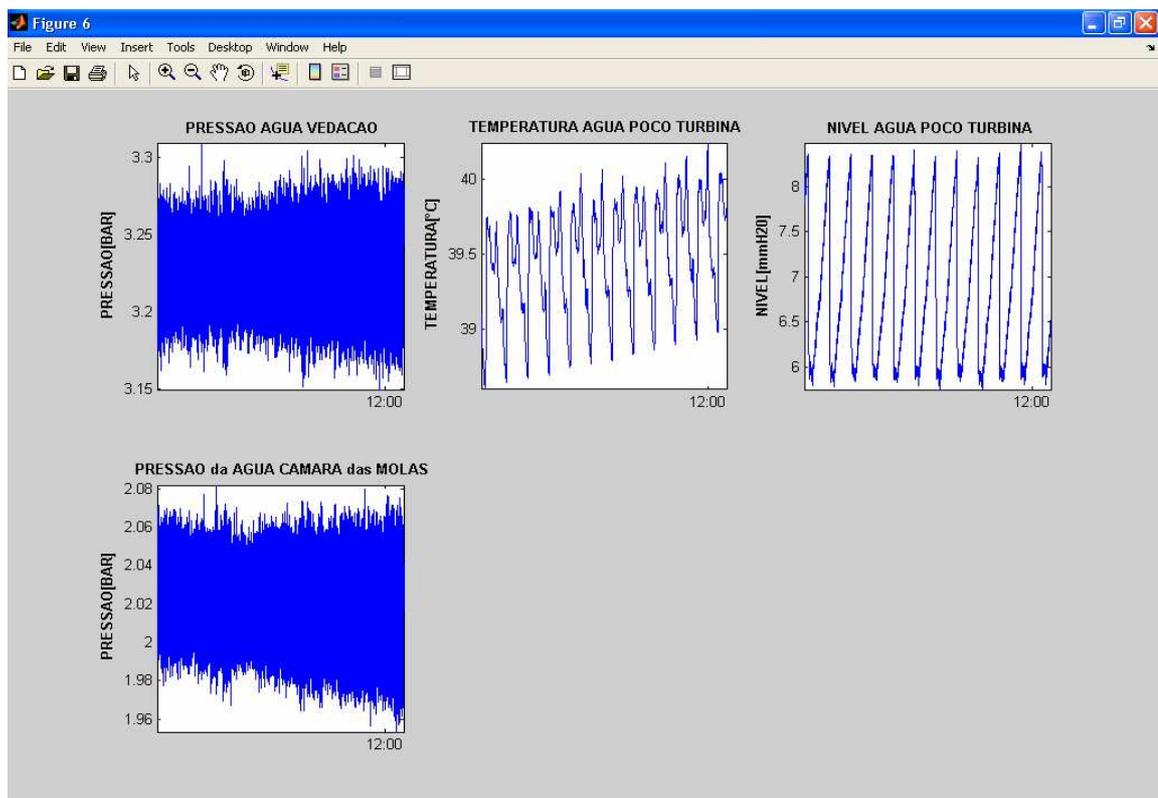


Figura 3.30 – Gráficos obtidos para a amostragem de 3 horas.

A figura 3.31 representa os valores obtidos para  $pav$  em uma amostragem de 3 horas.

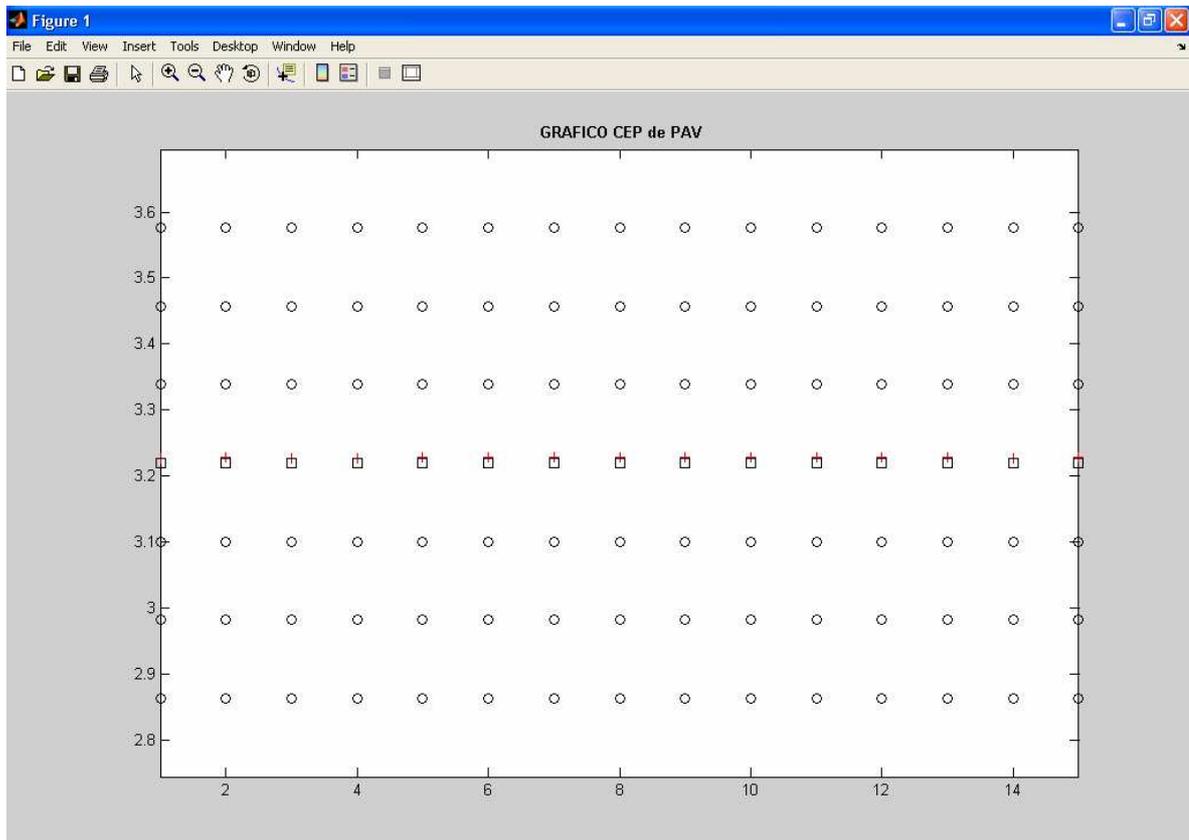


Figura 3.31 – Valores obtidos para  $pav$  em uma amostragem de 3 horas.

Os valores de  $pav$  obtidos no teste estão estável e praticamente constantes no processo apenas variando em função de sua variabilidade natural, comprovando o que já era esperado e observado anteriormente, pois, a  $pav$  é independente do ponto de operação da máquina. Por outro lado isto é importante para a validação do teste, pois se em algum momento ao longo do tempo alguma anormalidade for verificada, existe grande probabilidade de se encontrar um defeito no sistema e prever a ocorrência de uma falha mais severa para o mesmo.

A figura 3.32 mostra o resultado obtido no teste para a *tapt* observa-se que as regras de controle estatístico estão sendo constantemente afetadas e isso identifica que em um determinado momento passado ocorreu algum evento que está provocando o aumento de temperatura da água no poço da turbina, ou seja, uma variabilidade forçada. Se por exemplo esse sistema estivesse sendo executado anteriormente, poderia ter sido detectado o instante em que ocorreu essa variabilidade forçada e a partir daí ser investigada e acompanhada pela equipe de manutenção para tentar corrigi-la ou mesmo amenizá-la ou ainda identificar um novo ponto de operação do processo que esta provocando essa situação.

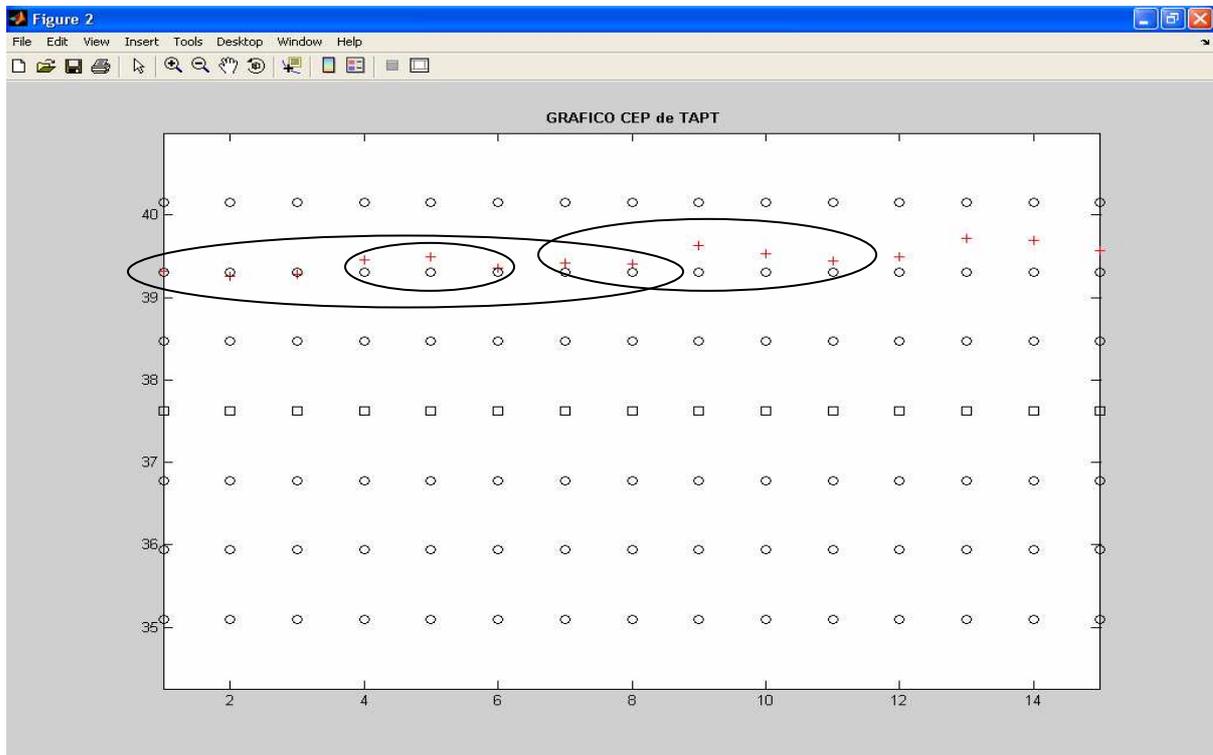


Figura 3.32 – Valores obtidos para *tapt* em uma amostragem de 3 horas.

A geração de uma mensagem de alerta para essa situação encontrada de elevação da temperatura da água do poço é muito importante porque permite a equipe de manutenção investigar a causa geradora desse fato. Se for preciso uma intervenção no processo é possível então planejá-la de forma que se possam evitar maiores transtornos, evitar desgaste de material e planejar o tempo de parada de máquina. Se por exemplo for detectada que as

molhas estão travadas estrategicamente é muito mais interessante realizar a manutenção nas mesmas do que deixar desgastar prematuramente a junta carbônica e ainda ter o desempenho da máquina comprometido. É grande o prejuízo econômico que pode vir a ocorrer se for preciso realizar a troca completa da junta carbônica, conforme já foi analisado.

A figura 3.33 mostra os resultados obtidos para *napt* em uma amostragem de 3 horas. Tem-se que para um período maior que o ciclo de trabalho o resultado obtido está de acordo com os parâmetros de bom desempenho e dentro do controle estatístico, ficando a observação da geração de um falso alarme quando a amostragem for realizada dentro do ciclo de trabalho do sistema de drenagem.

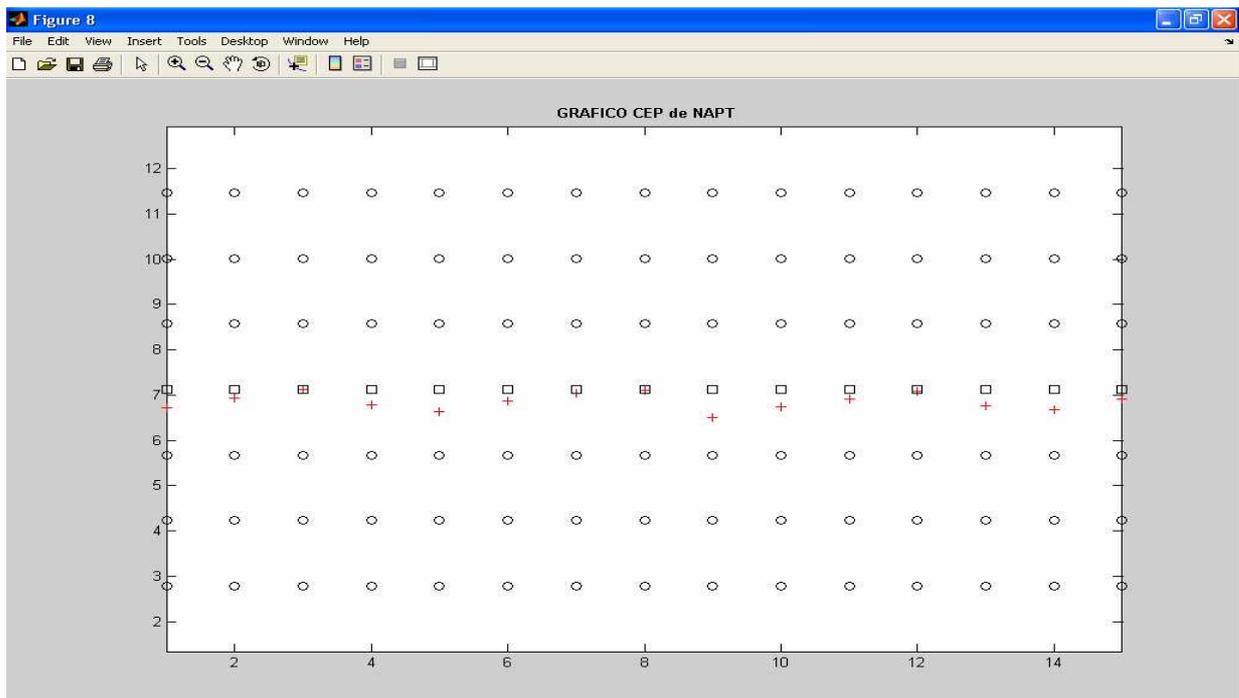


Figura 3.33 – Valores obtidos para *napt* em uma amostragem de 3 horas.

### **3.5 Controle: Melhoria contínua**

Finalmente, testes com períodos de amostragens maiores deverão ser executados e um plano de controle deve ser estipulado para monitorar a capacidade do sistema ao longo do tempo para que o processo seja previsível e consistente. Por fim, com a filosofia de sempre buscar o melhor desempenho possível, o sistema deve ser aperfeiçoado através de interações e treinamento dos colaboradores, ampliação da base de dados e da base de conhecimentos, tornando-se ainda mais eficiente sendo uma melhoria importante na manutenção do sistema de água de selagem aumentando assim o grau de confiabilidade e qualidade do sistema.

---

## 4. CONCLUSÃO

### 4.1 Conclusão

O processo de melhoria em uma planta industrial não é um processo estático e nem ao acaso. Primeiramente é preciso conhecer em que ponto se encontra, saber aonde se quer chegar e obter conhecimentos de como chegar. Não são etapas simples de se cumprir, além de investimentos materiais, tecnológicos, treinamento de colaboradores é preciso dedicação e comprometimento. É fundamental a conscientização de todos que toda mudança gera desconforto e resistência, sendo assim resultados positivos podem não vir de maneira imediata.

Os equipamentos utilizados para o desenvolvimento que realizaram a conexão com o processo e aquisição de dados corresponderam plenamente e de forma excelente com os propósitos que aqui foram submetidos.

O Matlab comprovou o seu desempenho para a execução das rotinas de teste com êxito e através da OPC Toolbox comprovou de forma eficiente os benefícios inegáveis da comunicação OPC. Uma observação deve ser feita com relação à aplicação do Matlab em casos que seja preciso a criação e utilização de grande base de dados, devendo neste caso ser utilizados algum software específico.

Para a monitoração do sistema por períodos mais elevados é recomendável que o computador utilizado seja substituído por um com maiores recursos de processamento e de capacidade de memória.

A utilização do gráfico de controle é uma maneira eficiente de examinar a variabilidade em um processo ao longo do tempo com o objetivo de detectar defeitos e prever uma falha.

O sistema da Caixa de Vedação no eixo da tampa da turbina também é um processo que deve ser monitorado ao longo do tempo e a priorização das variáveis monitoradas devem ser observadas através do entendimento das relações entre as causas e os efeitos do processo e as fontes de variabilidade. Como exemplo, podemos citar que a variável monitorada (pressão da água na câmara das molas) para a aplicação proposta não teve efeito nenhum.

---

O sistema de identificação de itens não conformes, que se tratou neste trabalho, se constituiu de um passo a mais à monitoração pura e simples, porém de grande valor prático. Agora passa a se ter fatos e dados sendo analisados automaticamente para a detecção de defeitos no processo de vedação do eixo, sem necessitar da presença do fator humano no poço da turbina evitando transtornos operacionais.

### **4.2 Recomendações para Futuros Trabalhos**

Realizar a monitoração em novos pontos do processo como, por exemplo, vazão de água de vedação e condição do estado de desgaste do material dos anéis de carvão. Além de gerar novas informações para o processo permitirão estudos mais avançados sobre o tipo de material que deve ser utilizado na composição nos anéis de carvão e de que maneira o controle da pressão de água de vedação pode influenciar no desgaste desse material.

Após a criação de um banco de conhecimento e de um banco de dados confiáveis do processo, realizar pesquisas e estudos para o desenvolvimento de um sistema SDA que possa analisar o desempenho da máquina por investigação direta das variáveis em tempo real e adequá-lo como uma ferramenta de Gestão em manutenção preditiva. O sistema além da determinação de diagnósticos de defeitos deverá prever a falha e seu grau de severidade, estimar o tempo de trabalho do equipamento até que a falha efetivamente ocorra, dando assim suporte e informações no auxílio de elaboração de planos de manutenção e operação dos equipamentos.

---

### Referências Bibliográficas

**MARU**, Márcia Marie. Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

**ALMEIDA**, Marcio Tadeu. Manutenção Preditiva: Benefícios e Lucratividade. MTA.

<http://www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf>.

(Acesso Março, 2008)

**Grupo Coordenador de Operação Interligada / Subcomitê de Manutenção (GCOI/SCM)**

Manual do usuário do sistema estatístico de manutenção. Rio de Janeiro, 1998.

**Nunes**, Enon Laércio. Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)

Análise de implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

**OLIVEIRA**, Thiago Mikail de. Manutenção Preditiva de Motores de corrente contínua com ênfase em Motor Current Signature Analysis (MCSA). Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007.

**Pande**, P.S., **Neuman**, R.P., **Cavanagh**, R.R., Estratégia Seis Sigma.

Ed. Qualitymark, 2001.

**BERGE**, J. Fieldbus for Process Control: Engineering, Operation and Maintenance. ISA, 2002.

**SMAR** Equipamentos Industriais. Manual de Blocos Funcionais. Sertãozinho, 2004.

---

**SMAR** Equipamentos Industriais. Como implementar projetos com Foundation Fieldbus. Documento interno da Smar. Sertãozinho, 2001.

**VERMAAS**, Luiz L.G.; **FRANCO**, Lúcia R. H. R. Redes Industriais. Apostila de treinamento. FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento a Indústria. Itajubá, 2005.

Documentação do site **OPC Foundation**.

<http://www.Opcfoundation.org>.

**FONSECA**, Marcos de Oliveira; Comunicação OPC – Uma abordagem prática. VI Seminário de Automação de Processos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Vitória, 2002.

**HELP** online do software **MATLAB**, versão 7.2.0.232. The Math Works.

**WURMAN**, R. S. Information Anxiety: What to do when information doesn't tell you what you need to know. New York, 1999.

**MARKKULA**, M. The impact of intranet based knowledge Management on software Development. Federation of European Software Measurement Associations – FESMA99. Holanda, 1999.

**AZEVEDO**, Hélio R.T.de; **SOUZA**, Sanderson P.S.de; **MARTINS**, Fábio R.S.; Sistema para Diagnóstico Automático de Falhas: Dificuldades e soluções para obtenção de resultados. Trabalho apresentado no XX Congresso Brasileiro de Manutenção. Belo Horizonte, 2005.

**MONTGOMERY**, Douglas C.; **RUNGER**, George C.; Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2003.

**SCHRIBER**, G.P. Usinas Hidrelétricas. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1978.

---

**SOUZA, Z; FUCHS, R.D.; SANTOS , A. H. M.** Centrais Hidro e Termoeletricas. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1983.

**INSTRUÇÃO TÉCNICA DE OPERAÇÃO:** Juntas de Vedação do Eixo das Máquinas / UHE-Balbina. Documento interno: Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.