

LUCIANA PAULA REGGIANI

Nota final
9,4 (nove e quatro)


22/01/04

INSTRUMENTAÇÃO PARA AUTOMAÇÃO
DO GRUPO TURBINA GERADOR
DE UMA USINA HIDRELÉTRICA

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Graduação em Engenharia
Mecânica - Automação e Sistemas

São Paulo

2003

LUCIANA PAULA REGGIANI

**INSTRUMENTAÇÃO PARA AUTOMAÇÃO
DO GRUPO TURBINA GERADOR
DE UMA USINA HIDRELÉTRICA**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Graduação em Engenharia
Mecânica - Automação e Sistemas

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. José Antonio Jardini

São Paulo
2003

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010986

1362652

FICHA CATALOGRÁFICA

TF-03
R263i

Reggiani, Luciana Paula
Instrumentação para automação do grupo turbina gerador
de uma usina hidrelétrica / Luciana Paula Reggiani. -- São Paulo,
2003.
92p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1. Usinas hidrelétricas 2. Casa de força (Automação;
Instrumentação) 3. Instrumentação I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e
de Sistemas Mecânicos II. t.

Dedico este trabalho à Escola Politécnica da USP e a todos os docentes, amigos e familiares que tanto me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. José Antonio Jardim

Ao meu colega José Roberto Zanirato Maia

A todos da Voith Siemens Hydro que colaboraram com este trabalho

A todos amigos que me incentivaram e me apoiaram

A meus pais e aos meus irmãos

RESUMO

Este trabalho preocupou-se em estudar os diversos fatores que levam à escolha da instrumentação mais adequada para a automação do grupo turbina gerador de uma usina hidrelétrica. É apresentado inicialmente um estudo sobre o funcionamento de uma usina hidrelétrica, em especial do grupo turbina gerador. Apresenta também uma análise sobre a automação de uma usina hidrelétrica e seus principais componentes. Mas o foco principal do trabalho é a análise das necessidades de medição para a automação do grupo e a pesquisa de diversos instrumentos existentes com suas respectivas características técnicas. Com isto, caminhou-se na escolha da instrumentação mais eficiente para tal função, tendo como resultado uma tabela que relaciona a necessidade de medição, o instrumento mais indicado e o local de instalação do instrumento. Por fim, este trabalho tem a pretensão de se tornar uma base atual e futura na escolha de sensores para a automação de usinas hidrelétricas.

ABSTRACT

This report presents the study of the several factors that have to be taken into consideration in the selection of the most efficient instrumentation for the automation of the group turbine-generator of a hydroelectric power plant. First, it is presented a study of the power plant operation, especially of the group turbine-generator. It also presents an analysis of the power plant automation and its main components. But the main focus of this report is the analysis of the measurement needs for the automation of the group, and the research of several instruments and their technical characteristics, so that the most appropriate instrumentation can be chosen. The result of this work is a table that relates each measurement need with the most suitable instrument and its place of installation. This text aims to become a basis for the selection of instruments for hydroelectric power plant automation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. Introdução.....	1
2. Aproveitamento hidráulico.....	2
2.1. Um pouco de história.....	2
2.2. Tecnologias de Aproveitamento.....	3
3. Usina Hidrelétrica.....	5
3.1. Introdução.....	5
3.2. Subsistemas do Grupo Turbina Francis-Gerador.....	6
3.2.1. Conduto forçado, Válvula, Comportas e Caixa Espiral.....	7
3.2.2. Turbina.....	8
3.2.3. Mancais e Eixo.....	12
3.2.4. Regulador de Velocidade – Servomotores.....	13
3.2.5. Gerador.....	17
3.2.6. Regulador de Tensão.....	22
3.2.7. Sistemas Auxiliares.....	23
4. Automação em uma Usina Hidrelétrica.....	24
5. Medições necessárias para a automação do grupo turbina gerador...28	
5.1. Introdução.....	28
5.2. Grandezas a serem medidas.....	29
5.3. Locais de instrumentação.....	34

6. Instrumentação existente.....	40
6.1. Pressão.....	40
6.1.1. Elementos de coluna de líquidos.....	41
6.1.2. Elementos elásticos.....	42
6.1.3. Manômetros de tensão.....	44
6.1.4. Magnético.....	46
6.1.5. De capacitância.....	47
6.1.6. Piezoelétrico.....	48
6.2. Vazão.....	49
6.2.1. Medidores de pressão diferencial.....	49
6.2.2. Medidores de área variável.....	50
6.2.3. Medidores de deslocamento positivo.....	52
6.2.4. Medidores de massa.....	53
6.2.5. Magnético.....	54
6.2.6. Ultrasônico.....	55
6.3. Temperatura.....	56
6.3.1. Sistema termométrico de enchimento.....	57
6.3.2. Termômetro bimetálico.....	58
6.3.3. Termômetros de resistência.....	59
6.3.4. Pares termoelétricos.....	60
6.3.5. Pirômetro de radiação.....	61
6.4. Nível.....	63
6.4.1. Indicadores visuais.....	63
6.4.2. Bóias (flutuadores).....	64
6.4.3. Condutividade elétrica.....	65
6.4.4. Deslocamento.....	66
6.4.5. Pressão hidrostática.....	66
6.4.6. Capacitância elétrica.....	67

6.4.7. Radiação.....	68
6.5. Posição	69
6.5.1. Tipo Mecânico.....	69
6.5.2. Sensor de proximidade magnética.....	70
6.5.3. Detector de limite indutivo.....	70
6.5.4. Detector de limite capacitivo.....	71
6.5.5. Detector de limite óptico.....	71
6.5.6. Detector de limite ultrasônico.....	73
7. Instrumentação aplicada ao grupo turbina gerador.....	74
7.1. Introdução.....	74
7.2. Escolha dos instrumentos.....	75
7.3. Instrumento para cada aplicação.....	75
8. Profibus PA.....	89
9. Conclusão.....	91
10. Lista de Referências.....	92

LISTA DE FIGURAS

- Fig.2.1 - Turbinas hidráulicas: Pelton, Kaplan e Francis
- Fig. 2.2 - Planta da Usina Hidrelétrica de Itaipu
- Fig.3.1 – Grupo turbina-gerador
- Fig.3.2 – Conduto forçado
- Fig. 3.3 - Vertedouro
- Fig 3.4 – Válvula Esférica
- Fig.3.5 – Válvula Borboleta
- Fig.3.6 – Caixa Espiral
- Fig.3.7 - Pré-distribuidor
- Fig.3.8 – Distribuidor
- Fig.3.9 – Palhetas do distribuidor
- Fig.3.10 - Rotor Francis de Itaipu
- Fig.3.11 - Constituição Básica do Regulador de Velocidade
- Fig.3.12 – Sensor de posição do servomotor
- Fig.3.13 – Sensor de rotação
- Fig.3.14– Esquema de controle dos servomotores
- Fig. 3.15 - Painei do regulador de velocidade
- Fig.3.16 – Gráfico abertura e velocidade X tempo.
- Fig. 3.17 – Componentes de um gerador
- Fig.3.18 – Princípio da indução magnética
- Fig.3.19 – Fluxo magnético no gerador
- Fig.3.20 – Partes ativas do gerador
- Fig. 4.1 - Hierarquia de um Sistema Digital de Supervisão e Controle
- Fig. 4.2 - Esquema da automação de um equipamento

Fig.4.3 – Exemplo de tela de controle remoto de uma usina hidrelétrica

Fig. 6.1 - manômetro em I

Fig. 6.2 - manômetro em U

Fig. 6.3 - manômetro de Bourdon

Fig. 6.4 - manômetro de diafragma

Fig. 6.5 - Exemplo de extensômetros

Fig. 6.6 - Leitura com ponte de Wheatstone

Fig. 6.7 - LVDT

Fig. 6.8 - Medição capacitiva por membrana

Fig. 6.9 - Transdutor Piezoelétrico

Fig. 6.10 - Medidor de pressão diferencial

Fig. 6.11 - Medidor de área variável

Fig. 6.12 - Medidor de deslocamento positivo tipo rotor de aletas

Fig. 6.13 - Medidor de massa tipo turbina

Fig. 6.14 - Medidor magnético de vazão

Fig. 6.15 - Medidor Ultrasônico

Fig. 6.16 - Junção Termopar

Fig. 6.17 - Pirômetro de radiação

Fig. 6.18 - Indicador visual

Fig. 6.19 - Medidor de nível por condutividade elétrica

Fig. 6.20 - Medição por deslocamento

Fig. 6.21 - Medição por pressão hidrostática

Fig. 6.22 - Tipos de relês acionados mecanicamente

Fig. 8.1 - Configuração do Profibus PA

Fig. 8.2 - Arquitetura do controle com a utilização de Profibus PA

LISTA DE TABELAS

Tab. 5.1 - Necessidades de Medição e seus locais

Tab. 7.1 - Comparação entre os sensores na aplicação ao grupo

Tab. 7.2 - Indicação do melhor instrumento e sua localização para cada medição do grupo

1. Introdução

A demanda por energia elétrica tem sido cada vez maior, tanto no país como em todo o globo. No Brasil, 90% de toda a eletricidade é gerada por usinas hidrelétricas, que representam nossa principal fornecedora nesta área.

Por isso, cada vez mais estudos e desenvolvimentos são feitos para o aprimoramento do projeto, construção, instalação e manutenção de usinas hidrelétricas, visando a diminuição de seu custo e do tempo de implementação.

A automação das usinas permite redução de custo da manutenção da usina, permitindo a otimização da mão de obra, prevenções de problemas e manutenção, menor tempo de máquina parada, entre muitas outras vantagens.

Esta área também vem sendo muito desenvolvida, para permitir um controle cada vez mais eficiente, seguro e barato. Mas são poucos os textos que cobrem este assunto e muitos fatores e acontecimentos acabam nem sendo registrados.

Isto motivou a realização deste trabalho, que agora é uma base para a escolha de uma instrumentação eficiente, de menor custo possível e com a menor possibilidade de falhas, para a automação do grupo turbina gerador.

2. Aproveitamento hidráulico

2.1. Um pouco de história

O uso da energia hidráulica foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico, particularmente para bombeamento de água e moagem de grãos. Entre as características energéticas mais importantes, destacam-se as seguintes: disponibilidade de recursos, facilidade de aproveitamento e, principalmente, seu caráter renovável.

A energia hidráulica é proveniente da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, através da evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre. Ao contrário das demais fontes renováveis, já representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias devidamente consolidadas. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica para mais de 30 países e representa cerca de 20% de toda a eletricidade gerada no mundo.

No Brasil, água e energia têm uma forte e histórica interdependência, de forma que a contribuição da energia hidráulica ao desenvolvimento econômico do país tem sido expressiva. Seja no atendimento das diversas demandas da economia, atividades industriais, agrícolas, comerciais e de serviços, ou da própria sociedade, melhorando o conforto das habitações e a qualidade de vida das pessoas. Também desempenha papel importante na integração e desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos e industriais.

A participação da energia hidráulica na matriz energética nacional é da ordem de 42% (da mesma ordem do petróleo), gerando cerca de 90% de toda a eletricidade produzida no país (capacidade instalada em 2003 é cerca de 70 GW).

Apesar da tendência de aumento de outras fontes, devido a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e os avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil, devido principalmente a seu baixo custo por kWh fornecido. Embora os

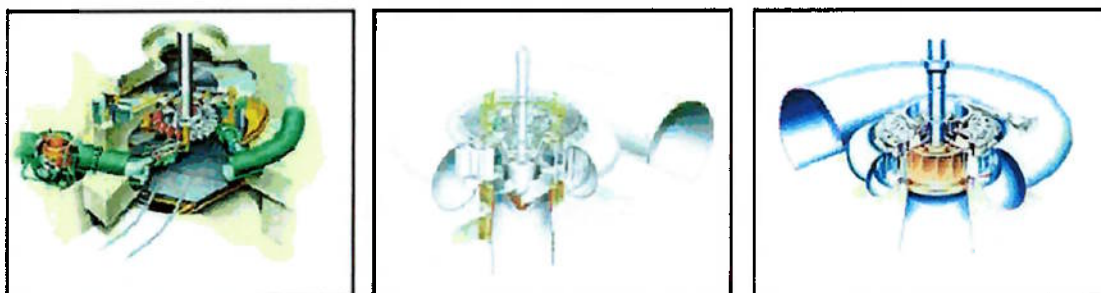
maiores potenciais remanescentes estejam localizados em regiões com fortes restrições ambientais e distantes dos principais centros consumidores (afluentes da margem direita do Rio Amazonas), estima-se que, nos próximos anos, pelo menos 50% da necessidade de expansão da capacidade de geração seja de origem hídrica.

2.2. Tecnologias de Aproveitamento

Com exceção de pequenos aproveitamentos diretos da energia hidráulica para bombeamento de água, moagem de grãos e outras atividades similares, o aproveitamento da energia hidráulica é feito através do uso de turbinas hidráulicas, devidamente acopladas a um gerador de corrente elétrica. Com eficiência que pode chegar a mais de 95%, as turbinas hidráulicas são atualmente as formas mais eficientes de conversão de energia primária em energia secundária.

As turbinas hidráulicas apresentam uma grande variedade de formas e tamanhos. O modelo mais utilizado é a Francis adequada para quedas médias (50 a 200 m), porém, que se adapta tanto a locais com baixa queda, quanto a locais de alta queda. Como trabalha totalmente submersa, seu eixo pode ser horizontal ou vertical.

Entre outros modelos de turbinas hidráulicas, destacam-se a Kaplan, adequada a locais de baixa queda (10 m a 70 m), a Pelton, mais apropriado a locais de elevada queda (200 m a 1.500 m) e a Bulbo, apropriada para baixas quedas e vazões. A Figura 2.1 apresenta um esquema das turbinas hidráulicas nos modelos citados.



Fonte GE, 2000.

Fig.2.1 - Turbinas hidráulicas: Pelton, Kaplan e Francis respectivamente.

Em relação às usinas hidrelétricas, os seguintes aspectos podem ser usados em sua classificação:

- altura efetiva da queda d'água;
- capacidade ou potência instalada;
- tipo de turbina empregada;
- localização, tipo de barragem, reservatório etc.

Contudo, esses fatores são interdependentes. Geralmente, a altura da queda determina os demais e uma combinação entre esta e a capacidade instalada determina o tipo de planta e instalação. Não há limites muito precisos para a classificação do tipo de queda e, portanto, os valores variam entre fontes e autores.

Em instalações de média queda, a maioria dos projetos hidrelétricos brasileiros, os principais componentes da construção civil são a tomada d'água, as obras de proteção contra enchentes e o conduto hidráulico. As turbinas mais utilizadas são do tipo Francis, com velocidades de rotação entre 500 rpm e 750 rpm.

Um exemplo é a Usina Hidrelétrica de Itaipu (fig. 2.2), a maior hidrelétrica em operação no mundo. Com uma potência instalada, por enquanto, de 12.600 MW (18 unidades geradoras de 700 MW, rotação cerca de 90 rpm), Itaipu é responsável atualmente por cerca de 15% de toda energia elétrica consumida no Brasil. Atualmente, estão sendo instaladas mais duas unidades geradoras, o que aumentará sua capacidade nominal para 14.000 MW.

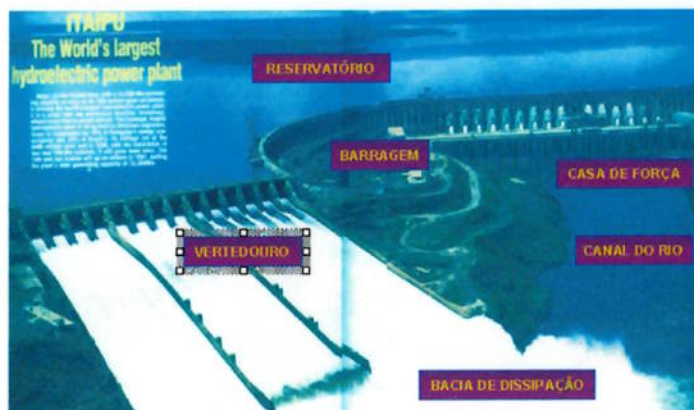


Fig. 2.2 - Planta da Usina Hidrelétrica de Itaipu

3. Usina Hidrelétrica

3.1. Introdução

Basicamente, uma usina hidrelétrica compõe-se das seguintes partes:

- barragem;
- sistemas de captação e adução de água;
- casa de força;
- vertedouro
- eclusas (para navegação)
- subestação elevadora
- serviços auxiliares

Cada parte se constitui em um conjunto de obras e instalações projetadas harmoniosamente para operar, com eficiência, em conjunto.

A água captada no lago formado pela barragem é conduzida até a casa de força através de canais, túneis e/ou condutos metálicos. Após passar pela turbina hidráulica, na casa de força, a água é restituída ao leito natural do rio, através do tubo de sucção.

Dessa forma, a potência hidráulica é transformada em potência mecânica quando a água passa pela turbina, fazendo com que esta gire, e, no gerador, que também gira acoplado mecanicamente à turbina, a potência mecânica é transformada em potência elétrica.

A energia assim gerada é levada através de cabos ou barras condutoras dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão elevada para adequada condução através de linhas de transmissão até os centros de consumo. Daí,

através de transformadores abaixadores, a energia tem sua tensão abaixada a níveis adequados para utilização pelos consumidores.

A maior vantagem das usinas hidrelétricas é a transformação limpa do recurso energético natural. Não há resíduos poluentes e há baixo custo da geração de energia, já que o principal insumo energético, a água do rio, está inserida à usina.

3.2. Subsistemas do grupo turbina Francis-Gerador

O grupo turbina Francis e Gerador (fig.3.1) ficam alocados na casa de força da Usina Hidrelétrica. Este conjunto representa o equipamento eletro-mecânico que faz a conversão da energia.

Apesar de ter uma concepção simples, esse grupo é complexo e conta com diversos componentes e portanto, foram divididos em subsistemas, que serão detalhados a seguir:

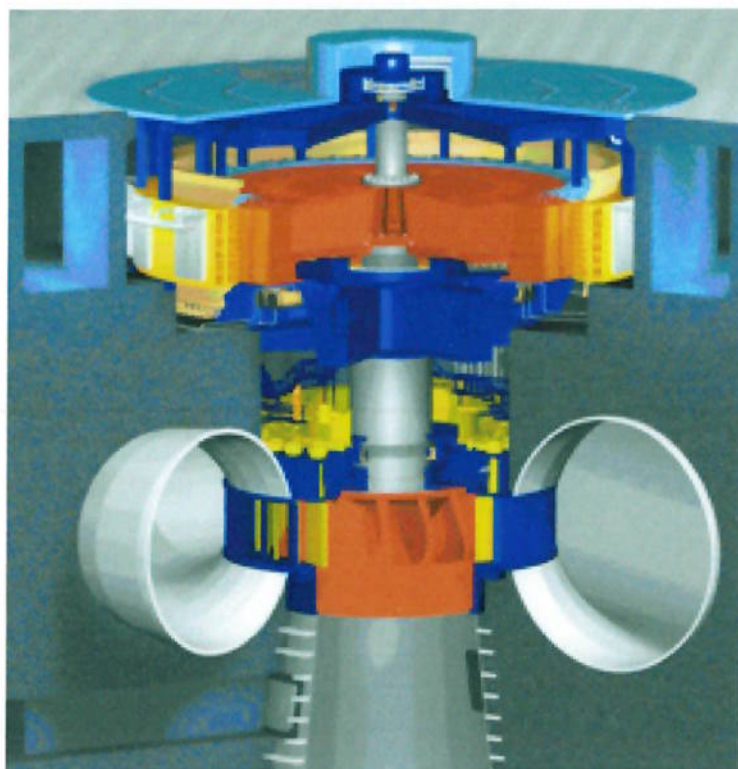


Fig.3.1 – Grupo turbina-gerador

3.2.1. Conduto forçado, Válvula, Comportas e Caixa espiral

Depois de construída a barragem, a água do rio só tem duas formas de continuar seu fluxo, ou pelo conduto forçado ou pelo vertedouro. O conduto forçado (fig.3.2) leva a água da montante a passar pela turbina e o tubo de sucção leva a água da turbina à jusante. O tubo de sucção normalmente é construído de revestimento metálico até a velocidade da água estar a 6m/s e após isso é construído no concreto.

O vertedouro (fig.3.3) é composto por comportas, que permitem ou não a liberação da água da montante sem ser pelo conduto forçado e com isto controla o nível da montante do rio.



Fig.3.2 – Conduto forçado



Fig. 3.3 - Vertedouro

Uma válvula de bloqueio ou uma comporta é colocada antes da caixa espiral, para bloquear completamente a passagem de água para as máquinas se houver algum problema. Apesar de raro isso ser necessário, a válvula é projetada de forma a suportar toda a carga d'água, incluindo o Golpe de Ariete. A válvula pode ser válvula esférica (fig.3.4) ou borboleta (fig.3.5), dependendo das características do rio.



Fig 3.4 – Válvula Esférica



Fig.3.5 – Válvula Borboleta

3.2.2. Turbina

3.2.2.1. Caixa Espiral e pré-distribuidor

A caixa espiral é responsável por trazer a água do conduto forçado ao rotor da turbina. A seção da caixa espiral vai diminuindo, forçando a água a entrar no rotor a uma certa vazão. A figura 3.6 mostra a vista superior da caixa espiral sendo montada na usina. Antes da montagem da caixa espiral são concretados berços que servirão de apoio para esta. Ao centro será posicionado o rotor da turbina

As virolas da caixa espiral são as diferentes seções que compõem esta. Cada virola é fabricada separadamente e depois são soldadas umas nas outras. Entre a caixa espiral e o rotor fica o pré-distribuidor e o distribuidor. O pré-distribuidor é composto por palhetas fixas, com um certo ângulo de inclinação, que direcionam a água na entrada do rotor. A foto 3.7 foi tirada de dentro da caixa espiral de Itaipu, e mostra bem as palhetas e as virolas mencionadas acima.

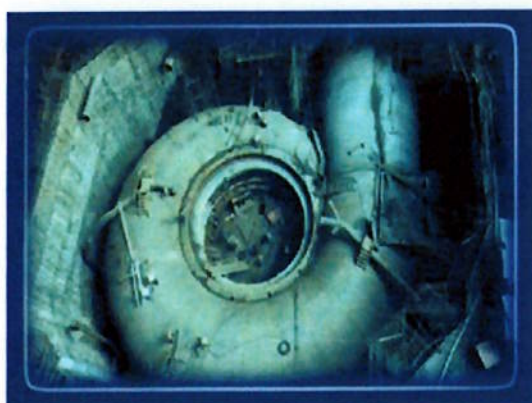


Fig.3.6 – Caixa Espiral



Fig.3.7 - Pré-distribuidor

3.2.2.2. Distribuidor

Após o pré-distribuidor, encontra-se o distribuidor. Composto por palhetas móveis, o distribuidor é responsável pelo controle da quantidade de água que entra no rotor da turbina. As palhetas podem se fechar completamente ou se abrir em até uns 30° e sua abertura ou fechamento é controlado por servomotores.

Na maioria dos casos são 24 palhetas e o movimento de todas são iguais e simultâneos. Para tanto todas são controladas pelo mesmo aro de regulação. O aro de regulação é um aro que gira controlado pelos servomotores. Normalmente são utilizados apenas dois servomotores, mas existem casos, dependendo do tamanho da turbina, que se coloca um servomotor para cada palheta. No caso de dois servomotores, cada palheta é fixada no aro de regulação por uma alavanca de modo que quando o aro gira, as palhetas se movem. A figura abaixo (fig.3.8) mostra a vista superior do aro de regulação (em verde), os dois servomotores estão à direita e as alavancas e palhetas à esquerda.

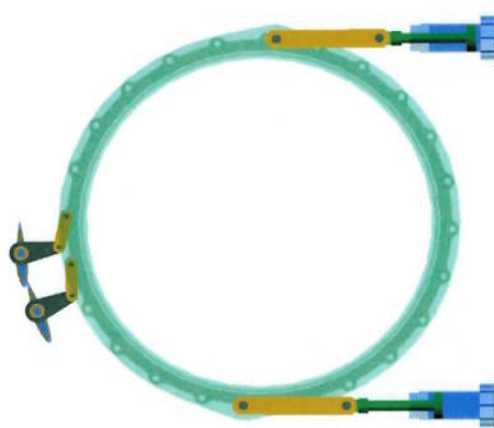


Fig.3.8 – Distribuidor

Na figura abaixo (fig.3.9) tem-se a vista frontal do conjunto. O cinza nas extremidades é a caixa espiral, o azul escuro junto desta é o pré-distribuidor e o amarelo ao lado deste é o distribuidor. Pode-se ver cada palheta amarela e sua haste. A haste passa por furos na tampa da turbina (parte azul escura em volta do eixo).

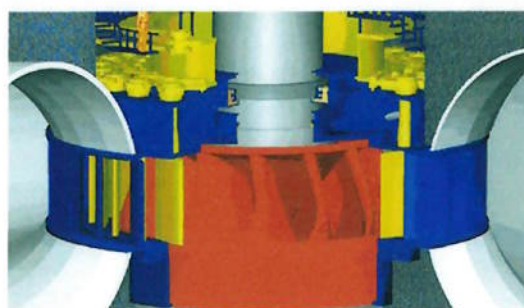


Fig.3.9 – Palhetas do distribuidor

Nas palhetas são colocados pinos de ruptura. Os pinos de ruptura são pinos de segurança que rompem e deixam a palheta com movimento livre. Por exemplo, se um tronco de árvore ficar preso entre as palhetas e o servomotor tentar fechá-las, o pino irá romper e as palhetas não serão danificadas.

E nos servomotores são colocadas travas mecânicas que impedem o movimento do pistão enquanto a máquina está parada.

3.2.2.3. Rotor da turbina

O rotor da turbina (fig. 3.10) é a parte responsável pela transformação de energia hidráulica em energia mecânica, pois a partir da força da água nas pás do rotor, ele gira e faz com que o eixo e o gerador girem também. Os rotores de uma turbina podem ser Francis, Kaplan, Pelton ou Bulbo, dependendo das características do rio, como já mencionado.



Fig.3.10 - Rotor Francis de Itaipu

3.2.2.4. Tampa da turbina

A tampa da turbina é projetada de forma a suportar toda a pressão da água passando pelo rotor. Para tanto sua seção transversal deve ter um formato que apresenta alta rigidez e pouca inércia. Na tampa da turbina é necessário existir vedação e drenagem da água vazada da câmara do rotor.

3.2.3. Mancais e Eixo

Os mancais realizam o apoio de todo o conjunto turbina-gerador. Os mancais guia realizam esforço na horizontal e os mancais escora realizam esforços na vertical, para máquinas de eixo vertical. A quantidade necessária de mancais guia (2 ou 3) é calculada a partir das características das máquinas. Normalmente é necessário apenas um mancal escora.

Os mancais podem situar-se na tampa da turbina e/ou em uma cruzeta, que é fixada no concreto e serve de apoio ao mancal. A cruzeta pode se localizar em qualquer ponto do eixo, normalmente entre a turbina e o gerador ou acima do gerador.

A cuba de óleo dos mancais fornecem o óleo necessário para que a parte girante não esteja diretamente em contato com a parte parada. Durante a partida/parada da máquina forma-se uma fina camada de óleo pressurizado no mancal escora, suficientemente forte para levantar a máquina (separar parte girante da fixa).

O óleo passa constantemente por filtros e trocadores de calor, o que o mantém limpo e em uma temperatura aceitável.

O eixo é responsável pela transmissão do movimento mecânico do rotor da turbina ao rotor do gerador. Na maioria das vezes são dois eixos, o da turbina e o do gerador, que são acoplados um ao outro.

O eixo normalmente é oco e no seu interior passa o sistema de aeração. O sistema de aeração é o sistema que inibe a cavitação e a formação de vórtices na água de saída do rotor da turbina equalizando pressões com injeção de ar.

Também no eixo há um sistema de vedação para bloquear a água da câmara do rotor da turbina.

3.2.4. Regulador de Velocidade – Servomotores

O regulador de velocidade é o responsável por manter a rotação da máquina. Para tanto, ele controla a movimentação das palhetas do distribuidor. Ele é composto por duas partes, a parte mecânica e a parte digital.

A parte mecânica amplifica o sinal que vem da parte digital e assim movimenta as palhetas do distribuidor. A parte digital é responsável por adquirir sinais de sensores, processá-los e gerar sinais para os atuadores da parte mecânica. Na figura abaixo (fig.3.11) a parte inferior é a mecânica e a superior é a digital.

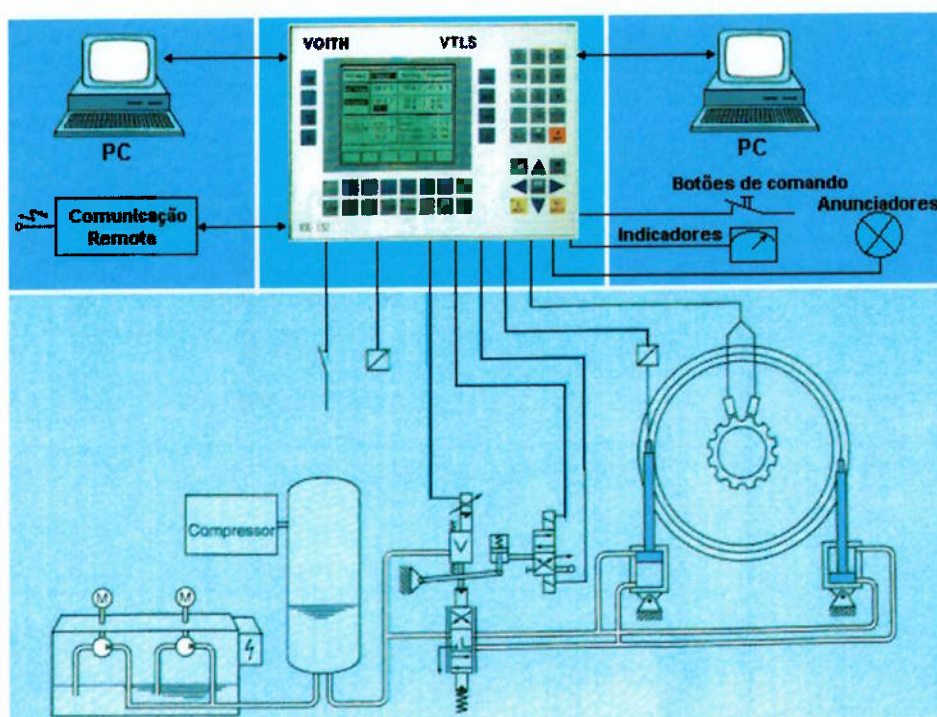


Fig.3.11 - Constituição Básica do Regulador de Velocidade

○ Parte Mecânica

A parte mecânica do regulador é composta basicamente do grupo de

bombeamento, do tanque de pressão ar-óleo, da válvula de controle, transdutores de posição, sondas de rotação, válvulas com diversas funções, instrumentação, sistema de ar comprimido e trocadores de calor. As bombas têm a função de gerar energia para a movimentação, que é armazenada no tanque de pressão ar-óleo, e liberada de uma forma controlada para os servomotores através das válvulas de controle ou servo-válvulas. O regulador recebe sinal de retorno do transdutor de posição das palhetas (fig.3.12) e da velocidade da máquina através de sondas de rotação (fig.3.13).



Fig.3.12 – Sensor de posição do servomotor

Fig.3.13 – Sensor de rotação

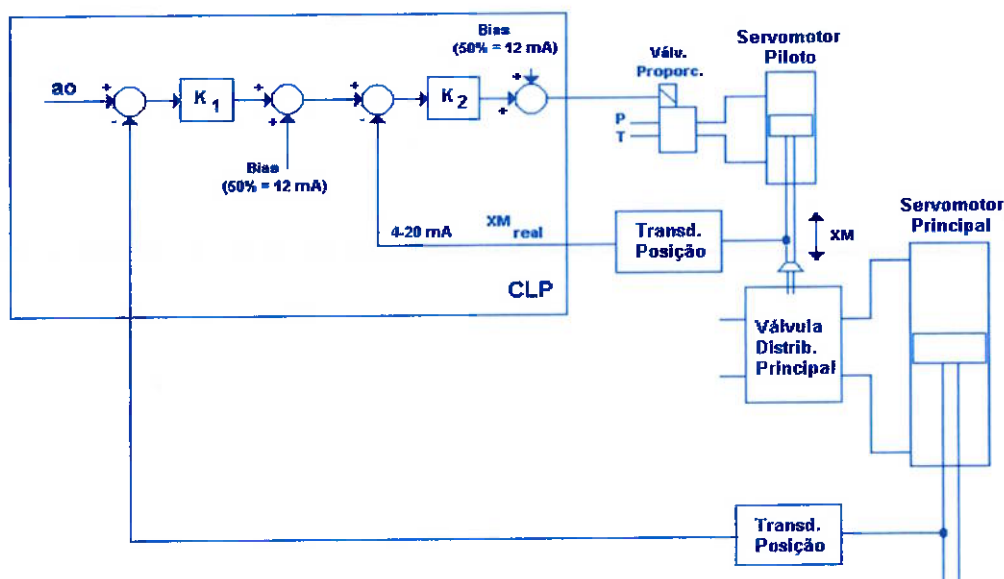


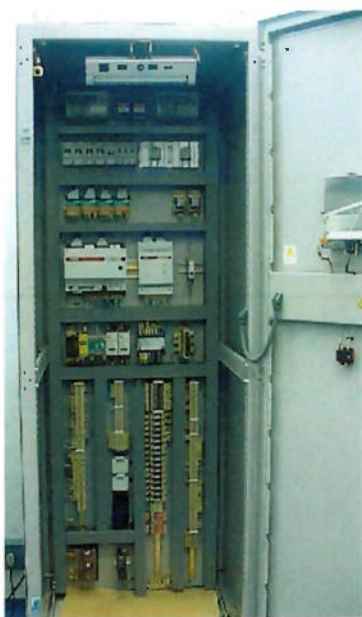
Fig.3.14– Esquema de controle dos servomotores

○ **Parte digital:**

Funções da parte digital do regulador de velocidade:

- Efetuar Partidas e Paradas Automáticas
- Contribuir para a estabilização do sistema através do seu estatismo
- Controlar a máquina através da Regulação de Velocidade, Abertura, Potência ou Nível d'água.
- Detectar quando a máquina passa de Rede Interligada para um Sistema Isolado, garantido as condições de estabilidade.
- Garantir as condições de segurança da máquina

O painel do regulador de velocidades (fig.3.15) recebe as entradas dos sensores (transdutores de posição) e geram saídas para os atuadores (válvula proporcional), representados na fig. 3.14.



O principal componente do painel é o CLP (controle lógico programável), que é programado de forma a gerar os sinais correspondentes. Os outros componentes do painel são responsáveis por transformar tensão e corrente, de forma a adaptar a tensão de 125Vcc que vem do painel de controle ao 24V que é suportado pelo CLP. Os transformadores de tensão podem ser relês ou opto acopladores. Também são necessários conversores A/D e D/A.

O CLP possui entradas e saídas digitais e analógicas. Ele é programado por lista de instruções e o software é chamado de PG4.

Fig. 3.15 - Painel do regulador de velocidade

Os principais sinais que chegam ao CLP são do sensor de rotação, que mede a rotação da máquina, do transdutor de potência, que mede a potência que está sendo gerada pelo gerador e do transdutor angular de posição, que mede a abertura do distribuidor.

O sincronoscópio é um instrumento que compara a frequência da rede com a frequência do gerador. Somente quando os dois estiverem na mesma frequência é que o gerador pode ser conectado à rede (fechar o disjuntor).

Quando o disjuntor é fechado, a regulação pára de ser de regulação por velocidade e passa a ser regulação por potência. A potência da máquina operando deverá ser escolhida pelo cliente, isto é, ele só vai gerar a quantidade de energia que ele quiser (que ele conseguiu vender).

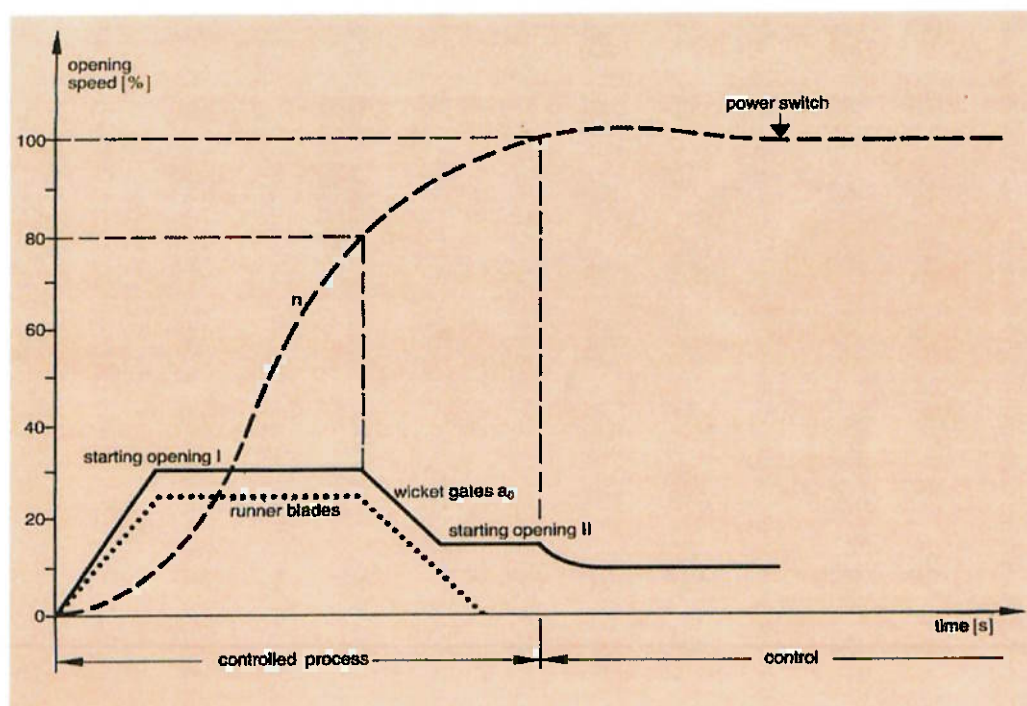


Fig.3.16 – Gráfico abertura e velocidade X tempo.

No gráfico acima (fig.3.16) se pode ver a seqüência de abertura do distribuidor e da velocidade de rotação da máquina até o momento da partida. A linha contínua representa a abertura do distribuidor. Primeiramente abre-se o

distribuidor até a abertura de partida 1 e mantêm-na até que a rotação da máquina atinja 80% da rotação desejada. Após isso a abertura é levada para a abertura de partida 2, menor que a 1 para que a rotação se estabilize no 100% ao invés de continuar crescendo.

Esse processo faz com que a máquina atinja a rotação de 100% mais rapidamente. Chegando à rotação de 100%, a abertura diminui para a abertura de marcha em vazio e o sincronoscópio dá o sinal de mesma frequência que a rede. Assim o disjuntor pode ser fechado e o gerador conectado à rede. A abertura então cresce até a abertura mínima com disjuntor fechado e a regulação da abertura passa a ser função da potência desejada.

A regulação por potência tem por princípio regular o distribuidor de forma que o grupo gere a potência desejada, definida pelo cliente. É importante lembrar que a potência da rede varia conforme a carga ligada nela varia, e que conforme a potência gerada varia, a rotação das máquinas também variam, já que $P=T \cdot w$.

3.2.5. Gerador e Sistema de excitação

3.2.5.1. Gerador

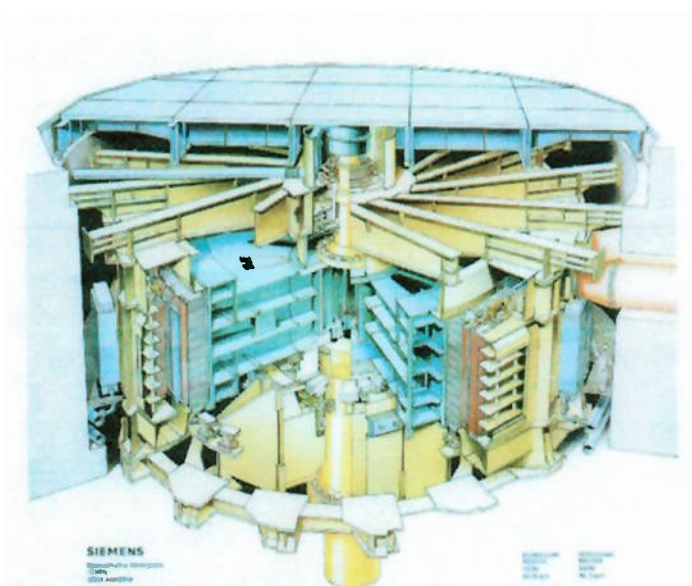


Fig. 3.17 – Componentes de um gerador

Em um gerador de tensão elétrica o princípio de funcionamento se baseia no eletromagnetismo, nomeadamente na indução magnética, como se representa na figura seguinte (fig.3.18).

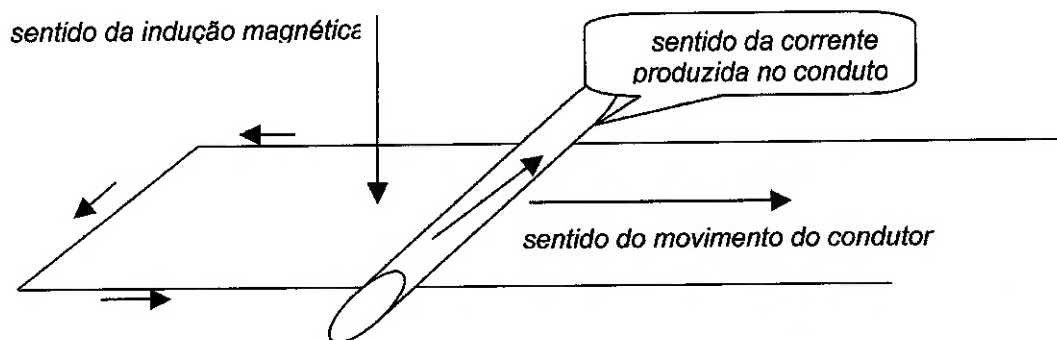


Fig.3.18 – Princípio da indução magnética

Nesta figura mostra-se um par de carris sobre os quais rola um condutor no sentido indicado. O conjunto está mergulhado num campo magnético. Pelo fato de o condutor estar em movimento nestas condições, surge nele uma corrente com o sentido indicado.

No exemplo apresentado, o campo magnético é fixo e é o condutor que se move, no entanto, também é possível obter corrente mantendo o condutor fixo e deslocando o campo magnético. É o que acontece nos grandes alternadores, em que é rotativa a parte da máquina onde se produz o campo magnético e é fixa a parte onde se produz a corrente elétrica. Esta disposição tem a ver com as altas tensões e correntes produzidas, pois é mais fácil recolhê-las numa parte fixa que numa parte móvel.

É com base neste funcionamento que se constroem os geradores eletromagnéticos, naturalmente com muito mais condutores (fig.3.19).

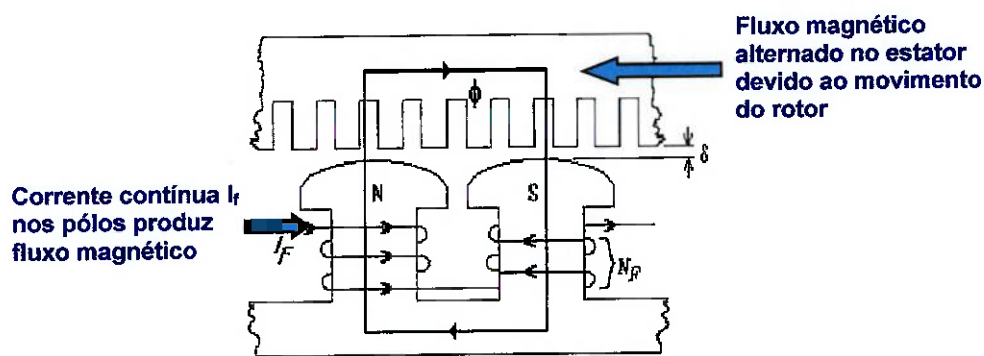


Fig.3.19 – Fluxo magnético no gerador

A tensão é induzida no enrolamento do estator pela reação ao fluxo magnético variável e a corrente no enrolamento do estator depende da carga conectada. Como resultado a potência mecânica no eixo produzido pela turbina, menos as perdas no gerador são transformados em potência elétrica nos terminais do gerador (princípio da conversão eletromecânica de energia).

A frequência é o número de ciclos por segundo que se repete a onda completa, a frequência do gerador deve ser igual à frequência da rede.

Para a partida ou parada do equipamento, uma fina camada de óleo pressurizado é formada entre o mancal escora e o gerador para apoiar o conjunto.

Componentes das partes ativas do gerador (fig.3.20):

Enrolamento do Estator: Circuito elétrico onde são induzidas as tensões e correntes (quando conectado à carga) devido ao campo magnético variável produzido pelo enrolamento de campo. Constituído pelos dois materiais de maior custo (isolação e cobre) e consumidor intensivo de mão-de-obra, representa aproximadamente 23% do custo total da máquina.

Enrolamento de Campo (Pólos): Também denominado indutor, constitui o circuito elétrico onde é injetado a corrente de excitação que produz o campo magnético da máquina. Formado por tiras de cobre soldadas, resultando numa bobina retangular

com um número de espiras compatível com o sistema de excitação. O pólo completo com núcleo e enrolamentos representa aproximadamente 22 % do custo total da máquina, além de ser o maior consumidor de mão-de-obra, aprox. 23 % do total de horas.

Núcleo do Estator: Principal função é constituir um caminho de baixa resistência para o fluxo magnético no estator. Na circunferência interna são estampadas as ranhuras onde é alojado o enrolamento do estator. Ao longo do comprimento do núcleo são distribuídos dutos radiais, para o fluxo de ar de resfriamento do estator.

Núcleo do Pólo: Constitui o circuito magnético do rotor juntamente com a coroa do rotor ou eixo. Principais partes: Sapata polar: além de dar forma ao entreferro, suporta o esforço centrífugo da massa de cobre do enrolamento de campo, aloja o enrolamento amortecedor e corpo polar e aloja o enrolamento de campo.

Entreferro: Espaço entre estator e rotor onde ocorre efetivamente a conversão eletromecânica de energia. Ponto de maior resistência (relutância) do circuito magnético, onde é consumida a maior parte da energia que magnetiza a máquina.

Coroa do Rotor: Chapas laminadas de alta resistência mecânica empilhadas normalmente de forma sobreposta fixadas radialmente ao rotor por contração térmica e tangencialmente por um conjunto de cunhas tangenciais e radiais.

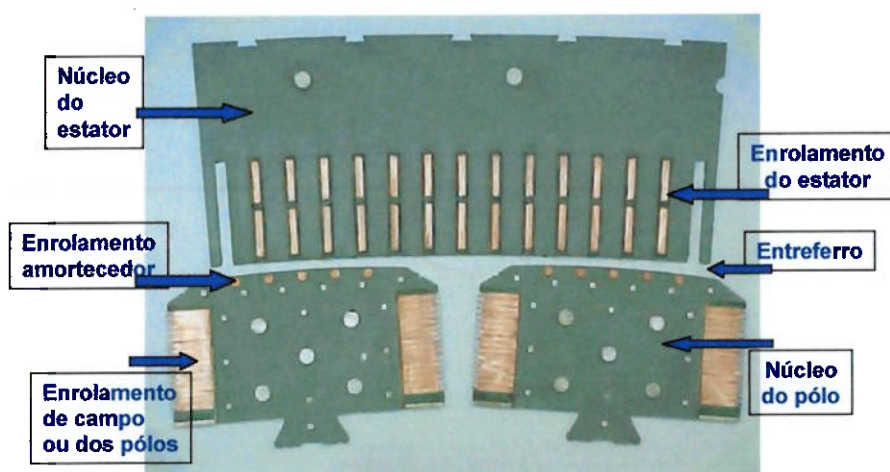


Fig.3.20 – Partes ativas do gerador

Cilindros de freios: ficam ou na carcaça do gerador ou presos no próprio concreto. Normalmente são seis cilindros responsáveis pelo sistema de levantamento e frenagem do gerador. O levantamento é necessário para que se possa fazer a manutenção dos mancais e a frenagem para segurar a inércia do rotor.

3.2.5.2. Sistema de excitação

O sistema de excitação é o sistema que excita a máquina para que esta possa ser ligada à rede. A tensão gerada pelo gerador é regulada através da corrente que passa pelo rotor. O sincronoscópio compara a tensão da rede com a do grupo e se a diferença for zero o disjuntor pode ser fechado. O esquema abaixo (fig.3.21) mostra com mais detalhes o processo do sistema de excitação:

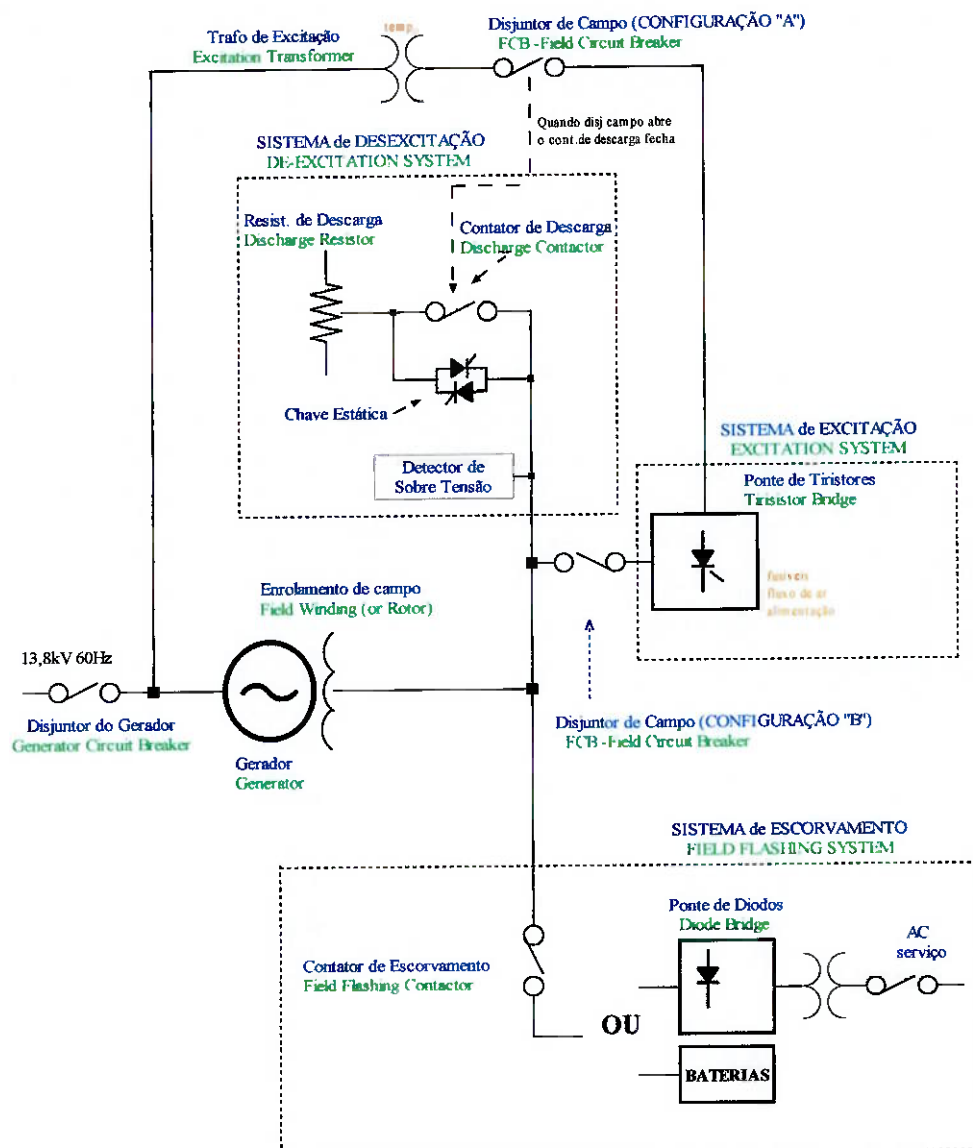


Fig.3.21 – Esquema do Sistema de Excitação

3.2.6. Regulador de Tensão

O regulador de tensão faz parte do sistema de excitação, cuja função é regular a tensão de saída do gerador no valor nominal ou na faixa de tensão permitida.

Isto é necessário toda vez que ocorre uma variação na carga da rede (dos consumidores), ou seja, acrescentando ou retirando demanda de potência (energia) haverá conseqüente alteração na tensão de saída do gerador, reduzindo ou aumentando, respectivamente.

Esta função é adquirida quando os circuitos eletrônicos detectam esta variação de tensão e, atuando no gate dos tiristores, varia a corrente contínua da saída da ponte tiristorizada, corrente esta que circula pelo campo do gerador (rotor).

Essa regulação é feita continuamente, com um tempo de resposta muito pequeno, principalmente nos modernos reguladores estáticos, e com instrumentação própria.

3.2.7. Sistemas Auxiliares

Muitos são os sistemas auxiliares à usina. Indica-se aqui apenas os auxiliares ao grupo turbina gerador:

- Sistema de filtragem de água
- Sistema de resfriamento do ar
- Sistema Anti-Incêndio
- Sistema de aquecimento de máquina parada
- Sistema de Iluminação e tomadas

A utilidade destes será detalhada mais a frente, durante a discussão das grandezas medidas nos subsistemas.

4. Automação em uma Usina Hidrelétrica

A automação é uma ferramenta que permite que equipamentos funcionem com uma certa independência, isto é, com uma menor interferência do homem. Em uma usina hidrelétrica a automação permite que todo equipamento seja controlado por apenas alguns computadores. E ainda, esses computadores podem estar a quilômetros de distância (fig.4.1 e fig.4.2).

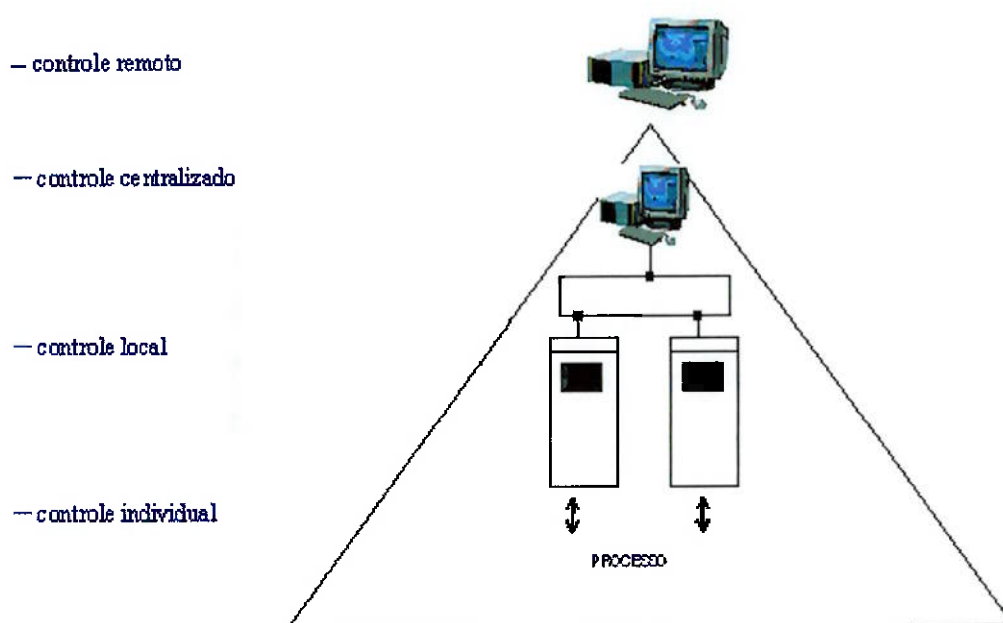


Fig. 4.1 - Hierarquia de um Sistema Digital de Supervisão e Controle

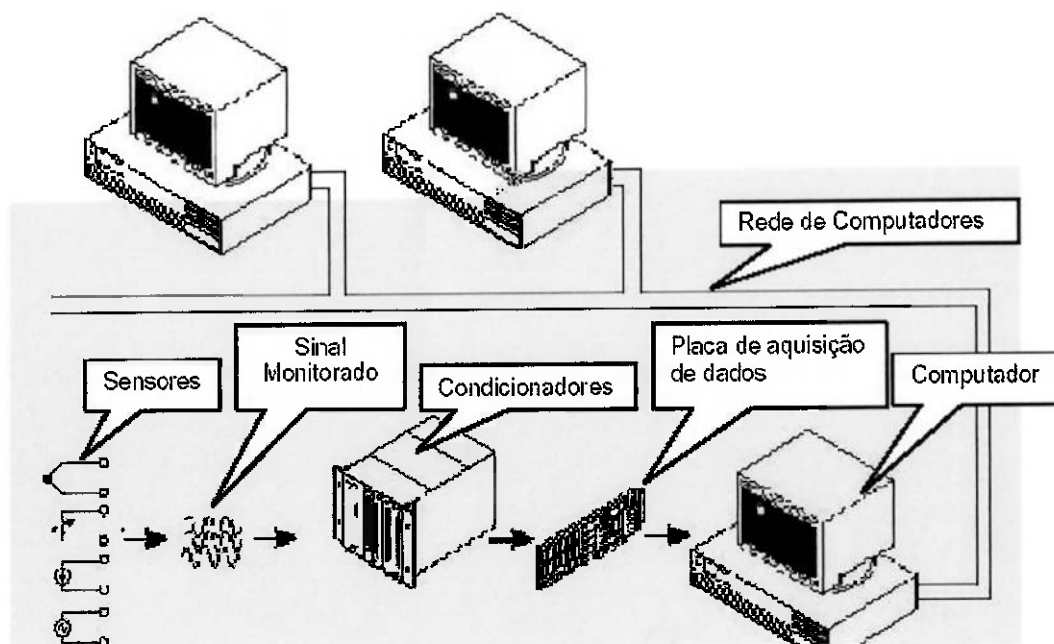


Fig. 4.2 - Esquema da automação de um equipamento

As vantagens da automação são muitas. Entre elas estão:

- otimização da utilização da mão-de-obra de operação e manutenção,
- redução dos tempos de máquina parada,
- permite ganhos incrementais para se viabilizar um projeto de modernização
- disponibilização de informação on-line e históricas sobre o funcionamento de um equipamento ou sistema (monitoramento),
- redução de estoques de partes e peças (padronização),
- respostas mais rápidas das solicitações do sistema elétrico, o que melhora a regulação e principalmente a proteção.

Para fazer a automação de uma usina hidrelétrica é necessário:

- definir o grau de automatização desejado;
- diagnosticar cada equipamento e sistema da usina, avaliando a viabilidade de modernizá-los ou substituí-los;
- avaliar diferentes alternativas e níveis de automatização, definindo a alternativa técnico-econômica mais atrativa;
- buscar soluções que integrem reguladores, controle e proteção, utilizando, de maneira ótima, as sinergias entre os sistemas;
- avaliar a qualidade da instrumentação, alimentação CA e CC, ambiente de instalação, infra-estrutura, etc;
- desenvolver, em conjunto com fornecedores parceiros, o escopo da automatização, dividindo riscos e responsabilidades;
- envolver as diversas áreas interessadas (produção, operação, manutenção, engenharia, etc.), buscando ouvir suas necessidades específicas.

O Controle Individual é um controle de geração por equipamento ou sistema da unidade geradora, isto é, turbina/gerador, mancais, unidade hidráulica (regulador e válvula), comporta de tomada d'água, RV, RT, proteção, entre outros. Quando varias unidades operam com a mesma geração obedecendo ao mesmo sinal denomina-se Controle Conjunto.

O Controle Local é por unidade funcional da usina, isto é, unidade geradora, serviços auxiliares, vertedouro, tomada d'água e subestação. Também pode ser para unidades de aquisição e controle com CLPs e acessórios, como processamento de lógicas e intertravamentos, controle de seqüências, comunicação com o controle centralizado, etc.

No Controle Centralizado há interface homem-máquina em toda instalação através de ferramentas de engenharia e configuração do sistema. O controle é responsável por gerenciar a base de dados, criar relatórios, compilar dados históricos

e comunicar-se com os outros sistemas.

E por último o Controle Remoto. Esse controle consegue concentrar a operação de uma ou mais usinas em uma localidade distante.

A interface homem-máquina (fig.4.3) é resumida aos dados significativos de cada usina (estados dos equipamentos de manobra e das máquinas, principais grandezas elétricas, alarmes agrupados, eventos). Ele faz previsões e cálculos estatísticos, distribuição de carga, despacho econômico, hidrologia e gerenciamento de manutenções.

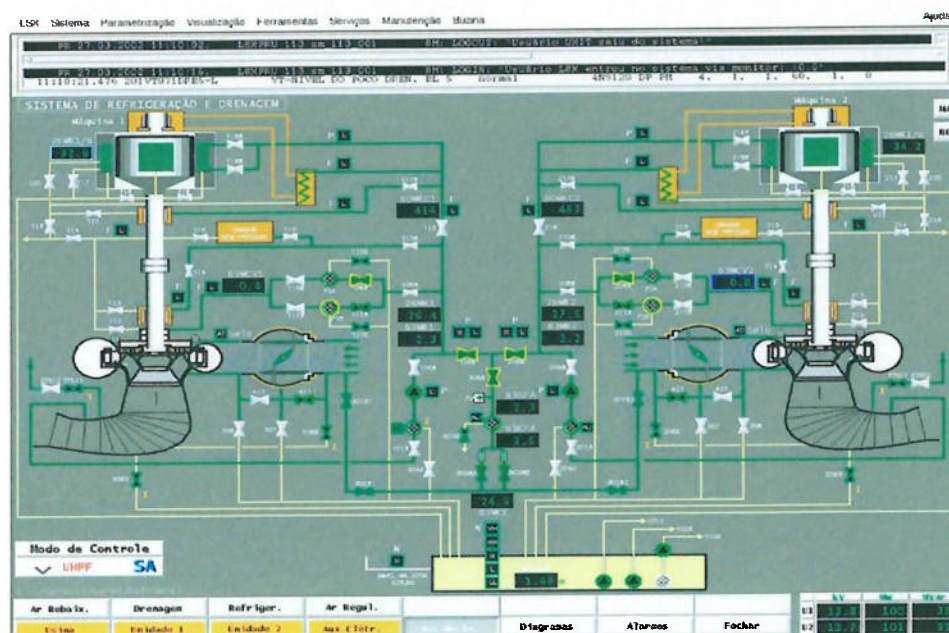


Fig.4.3 – Exemplo de tela de controle remoto de uma usina hidrelétrica

5. Medições necessárias para a automação do grupo turbina gerador

5.1. Introdução

Para efetuar a automação da usina hidrelétrica é necessário, primeiramente, definir quais processos e quais grandezas se deve medir e/ou controlar, localmente e/ou remotamente.

Isto feito, faz-se um estudo dos dispositivos existentes para cada aplicação e uma avaliação de quais teriam melhor desempenho em um dado processo.

Pode-se chamar isto de instrumentação; a ciência de adaptação de dispositivos e técnicas de medição, indicação, ajuste e controle de equipamentos e processos.

A escolha do instrumentos é delicada e deve-se considerar diversos fatores; tais como: exatidão do instrumento, probabilidade de falhas, vida útil, compatibilidade com o processo (material, temperatura, pressão), velocidade de operação, facilidade de leitura, necessidade de manutenção e custo.

O sensor é um instrumento que detecta ou mede uma condição ou propriedade, e grava, indica, ou responde à informação recebida. Eles têm a função de converter um estímulo em um sinal mensurável. O estímulo pode ser mecânico, térmico, eletromagnético, acústico ou químico.

Um sensor ideal teria zero de massa pois assim o sensor não iria variar a energia ou a temperatura do processo. Teria também um tamanho igual a zero pois assim poderíamos aplicá-lo em qualquer posição. Seria ideal também ter um sensor com rigidez infinita pois assim não há deformação, gerando uma maior linearidade na resposta e possibilitando resposta em frequência infinita. E finalmente, seria um sensor que não consumisse energia, pois assim não consumiria energia do processo; mas isso seria impossível pois um sensor se baseia na transformação de energia, portanto deve consumir alguma energia.

Neste capítulo do trabalho será feito exatamente o descrito acima, primeiro uma breve análise sobre as necessidades de medição, seguida de uma tabela mais

detalhada de cada ponto a ser medido. Nos próximos capítulos é feito um estudo dos tipos de instrumentos existentes para medir as grandezas escolhidas e as vantagens e desvantagens que cada tipo apresenta na aplicação no grupo turbina gerador. Com isto, será possível tomar a decisão de qual instrumento é o mais indicado para cada local.

É importante ressaltar que neste trabalho será estudado apenas o grupo turbina Francis gerador.

5.2. Grandezas a serem medida

Para a automação do grupo turbina Francis gerador é necessário fazer diversas medições, mas apesar de serem muitos os pontos, as grandezas a serem medidas não são muito variadas. Para distingui-las foi feita uma breve análise das necessidades de medição em cada subsistema descrito neste trabalho.

- **Conduto forçado, Válvula, Comportas e Tubo de Sucção**

O sistema de acionamento de abertura e fechamento da válvula ou da comporta é realizado por uma unidade hidráulica. A unidade hidráulica é composta, principalmente, por bombas hidráulicas e seus respectivos motores, válvulas, sensores e filtros. Os sensores da unidade devem controlar a força hidráulica que será aplicada no pistão, a posição do pistão, a necessidade de troca dos filtros, a quantidade de óleo no reservatório e certificar-se que as bombas estão ligadas. Para tanto é necessário medir a pressão, a vazão e o nível do óleo e a posição do pistão.

No Tubo de Sucção é preciso medir a pressão e o nível da água, para supervisão da operação da máquina como compensador de reativos síncrono.

- Caixa Espiral e pré-distribuidor

Para calcular a eficiência da turbina é necessário saber a energia hidráulica de entrada que será transformada em energia mecânica. Para tanto é necessário saber a pressão e vazão da água turbinada. E essas são as duas grandezas que serão medidas na caixa espiral.

- Distribuidor

Um sensor de fim de curso deve ser colocado no aro de regulação para garantir que o distribuidor está fechado, e em cada palheta para verificar se os pinos de ruptura estão quebrados.

No caso de alguma falha mecânica dos equipamentos fecha-se o distribuidor. O sinal de distribuidor fechado, vindo do sensor de fim de curso, manda abrir o disjuntor da rede. Se a máquina continuasse ligada à rede sem receber água ela passaria a ser uma consumidora de energia, ao invés de uma geradora.

- Rotor da turbina

O rotor de uma turbina Francis não contém partes móveis, pois suas pás são todas soldadas; e a rotação da turbina será medida diretamente no eixo. Portanto não é necessário medir nenhuma grandeza no rotor.

- Tampa da turbina

A água que fica na câmara do rotor tende a vazar para a tampa. Enquanto a máquina está girando um ejetor e um labirinto tiram a água vazada.

Quando a máquina está parada, mesmo com o distribuidor fechado, haverá água

na câmara do rotor, porque a máquina está afogada. Para não vazar essa água coloca-se uma tubulação de ar e uma válvula de vedação. Nesta tubulação deve-se medir a pressão do ar e um sensor de posição para saber se a válvula de vedação está acionada ou não. Para a drenagem da água que vaza na tampa da turbina é necessário um sensor de nível que, quando acionado, ligará a bomba.

o Eixo

No eixo da turbina é necessário vedar a água que está na câmara do rotor e, para tanto, utiliza-se um sistema de vedação de água pressurizada. Neste sistema deve haver medição de pressão e vazão.

Também no eixo, um pêndulo é acoplado para detecção de sobrevelocidade do grupo turbina gerador. O sinal desse pêndulo deve ser monitorado e em caso de sobrevelocidade deve-se parar a máquina.

Deve-se medir, também, a oscilação do eixo (vibração), tanto da turbina quanto do gerador, o que é feito através de um sensor de proximidade para medição de deslocamento radial.

o Mancais guia, escora e combinado

Os mancais são umas das partes mais delicadas em medição, pois o mancal é fixo e está constantemente em contato com o eixo girante, sofrendo atrito, além de suportar todas as forças axiais e radiais do conjunto.

Todo um sistema hidráulico está por detrás dos mancais: bombas, motores, filtros e trocadores de calor. O óleo do sistema hidráulico diminui o atrito entre as partes parada e girante e mantém a temperatura destas em níveis aceitáveis. Portanto deve-se medir a vazão, temperatura, pressão e nível do óleo em diversos pontos dos mancais.

No sistema de levantamento para partida e parada da máquina deve-se medir a

pressão do óleo injetado entre o mancal e o gerador.

Um sistema de refrigeração de água também é necessário para o resfriamento do óleo através dos trocadores de calor e neste sistema também se deve colocar medidor de vazão, temperatura e sistema de filtragem.

Um detalhe importante que deve ser levado em conta é a evaporação do óleo nos mancais. O vapor do óleo pode prejudicar o bom funcionamento do grupo todo e, portanto coloca-se um exaustor e seu respectivo motor elétrico.

○ Regulador de Velocidade – Servomotores

Na própria descrição do regulador são mencionadas algumas grandezas medidas pelo sistema: deslocamento, posição angular, rotação, frequência e potência.

O servomotor também é acionado por uma unidade hidráulica, portanto, como já foi mencionado, as grandezas vazão, pressão, temperatura e nível do óleo também serão medidas. O óleo vazado dos servomotores cai em um tanque de infiltração, que fica na tampa da turbina, e deve ser drenado com uma bomba e portanto uma medição de nível que liga automaticamente a bomba é necessária.

No servomotor há um sensor linear de posição que mede o deslocamento do pistão, que representa o grau de abertura das palhetas. Essa medição também pode ser feita no aro de regulação.

○ Gerador

No gerador deve-se monitorar a vibração da máquina e a temperatura do enrolamento e do núcleo.

O sistema de levantamento do cilindro de freio é feito hidráulicamente e deve-se medir a pressão do óleo e a posição da máquina, para certificar-se que esta levantou antes de começar a girar.

No sistema de frenagem o acionamento é feito pneumaticamente, portanto é preciso medir a pressão do ar e os fins de curso em cada cilindro para saber se o freio foi aplicado.

- Sistema de excitação

Neste sistema a única grandeza que deve ser medida é a tensão, como se pode ver pela própria descrição de seu funcionamento.

- Outros

Outras necessidades do conjunto turbina/gerador são sistemas de segurança e acesso, tais como sistema anti-incêndio, que necessita de medição de temperatura, sistema de iluminação e tomadas e sistema de aquecimento durante a máquina parada, que evita a condensação da umidade interna.

5.3. Locais de instrumentação

Com esse breve estudo pôde-se constatar quais são as grandezas que serão largamente mensuradas no grupo; que são:

- Pressão
- Vazão
- Temperatura
- Nível
- Posição

E as grandezas medidas em pequena escala, muitos casos apenas uma só vez, são:

- Tensão
- Potência
- Frequência
- Velocidade (ou aceleração)
- Deslocamento

Agora, após discussão generalizada das necessidades de medições nos subsistemas apresenta-se, mais detalhadamente, a localização exata de cada medição e seu motivo (tab.5.1), levando em conta apenas as grandezas mais medidas nomeadas acima.

Subsistema	Grandeza	Local	Motivo da Medição
1. Conduto forçado, Válvulas, Comportas e Caixa Espiral			
a) Caixa Espiral	Pressão	Entrada da Caixa Espiral	Mede a pressão na água da caixa espiral
	Vazão	Entrada da Caixa Espiral	Mede a vazão da água que entra para o rotor
b) Tubo de sucção	Pressão	Tubo de sucção	Mede pressão positiva, negativa ou vácuo
2. Turbina			
a) Pré-distribuidor			
b) Distribuidor	Posição	Servomotores	Verifica trava do distribuidor inserida
	Posição	Palhetas	Verifica pino rompido
	Posição	Aro de regulação	Garante distribuidor fechado
c) Rotor da Turbina			
d) Tampa da turbina	nível	Reservatório de óleo infiltrado na tampa da turbina	Limita o nível do óleo e liga as bombas
	nível	Tampa interna da turbina	Verifica e limita o nível de água e liga as bombas

3. Mancais e Eixo			
a) mancal	Temperatura	Segmento	Mede e limita a temperatura do segmento
	Temperatura	Cuba de óleo	Mede a temperatura do óleo
	Nível	Cuba de óleo	Mede o nível do óleo
- Sistema de Circulação e Resfriamento do Óleo	Temperatura	Tubulação de entrada e de saída de óleo do trocador de calor	Mede a temperatura do óleo
	Vazão	Tubulação de saída de óleo do trocador de calor	Mede a vazão do óleo
	Pressão	Tubulação de óleo	Limita a pressão do óleo e transfere bomba
	Pressão	Filtro dúplex da unidade hidráulica	Detecta o filtro sujo
	Vazão	Tubulação de saída de água do trocador de calor	Mede a vazão de água
	Temperatura	Tubulação de entrada e de saída de água do trocador de calor	Mede a temperatura da água
- Sistema de Injeção de Óleo a Alta Pressão do Mancal de Escora	Pressão	Tubulação de óleo de alta pressão	Mede a pressão do óleo

c) Eixo	Posição	Pêndulo elétrico	Verifica pêndulo atuado
	Posição	Pêndulo hidráulico	Verifica pêndulo atuado
	Posição	Válvulas de aeração	Verifica válvulas abertas
- Sistema de Água Filtrada da Vedação Principal do Eixo	Pressão	Tubulação de água após o filtro	Limita a pressão de água
	Fluxo	Tubulação de água após o filtro	Mede a vazão de água
	Temperatura	Vedação do eixo por água pressurizada	Mede a temperatura da água
5. Gerador			
a) Gerador	Temperatura	Enrolamento do estator	Mede a temperatura do enrolamento
	Temperatura	Núcleo do estator	Mede a temperatura do núcleo
- Sistema de Frenagem e levantamento	Pressão	Reservatório de ar de frenagem	Mede a pressão de ar
	Posição	Macaco	Verifica freios aplicados
	Pressão	Tubulação de óleo de levantamento	Mede a pressão de óleo
	Posição	Painel de levantamento	Verifica o levantamento
- Acesso ao Gerador	Posição	Porta do poço do gerador	Indicação de porta aberta

7. Sistemas Auxiliares			
a) Sistema de Filtragem de água de resfriamento	Pressão	Tubulação de água antes do filtro	Mede pressão de água
	Temperatura	Tubulação de água antes do filtro	Mede temperatura de água
	Pressão	Filtro	Indica filtro sujo
	Temperatura	Tubulação de água após o filtro	Mede temperatura da água
	Vazão	Tubulação de água após o filtro	Mede vazão da água
Sistema de Resfriamento do Ar	Vazão	Tubulação principal de saída de água dos trocadores de calor do gerador	Mede vazão de água
	Temperatura	Lado do ar quente dos trocadores de calor do gerador	Mede a temperatura do ar
	Temperatura	Lado do ar frio dos trocadores de calor do gerador	Mede a temperatura do ar

Sistema Anti-Incêndio	Temperatura	Interno ao poço do gerador, ao lado dos trocadores de calor	Mede a temperatura interna
Sistema de Aquecimento para Máquina Parada	Temperatura	Interno ao poço do gerador, acima dos trocadores de calor ar-água	Mede a temperatura interna
Sistema de Iluminação e Tomadas			

Tab. 5.1 - Necessidades de Medição e seus locais

6. Instrumentação existente

Neste capítulo serão estudados os principais instrumentos existentes atualmente para medição de pressão, vazão, temperatura, nível e posição. Para cada um será apresentado o princípio físico de funcionamento, aplicação, formas de leitura, vantagens, desvantagens, entre outras características. Com base neste estudo será feita a escolha do instrumento para cada aplicação da tabela 1.

6.1. Pressão

Pressão é uma força exercida contra uma determinada área superficial. A pressão pode ser medida em termos de força aplicada a uma área ou em termos de altura da coluna de um dado líquido, mantida pela pressão, onde o valor da pressão é igual à altura multiplicada pela densidade do líquido.

Pressão atmosférica é a força exercida sobre uma unidade de área da superfície da terra, pelo peso da atmosfera. Os dispositivos de medição de pressão na indústria e em processos de fabricação apresentam a diferença entre a pressão de um fluido em um recipiente fechado e da atmosfera. Se a pressão encontrada for superior à da atmosfera, a diferença é chamada de pressão manométrica.

Os principais tipos de medição de pressão podem ser divididos em:

Transdutor de pressão mecânico

- **Elementos de coluna de líquidos**
- **Elementos elásticos**

Transdutores de pressão elétricos

- **Manômetros de tensão**
- **Magnético**
- **De capacitância**
- **Piezoelétrico**

6.1.1. Elementos de coluna de líquidos

Os medidores de pressão por coluna líquida baseiam-se no princípio de que a pressão hidrostática exercida por um líquido na parte inferior de uma coluna é diretamente proporcional à altura do líquido da coluna.

Existem vários tipos de colunas que são utilizadas nestes medidores, dos quais serão mencionados 2: manômetro em I e manômetro em U.

Nos manômetros em I (fig. 6.1) o valor da pressão é obtido medindo diretamente o comprimento da coluna de líquido necessário para equilibrar a pressão que se quer medir. O tubo é aberto na extremidade superior, que está em contato com a atmosfera, pelo que, este dispositivo lê pressões relativas. Nota-se ainda, que o reservatório inferior tem um diâmetro muito superior ao do tubo, pelo que o seu nível não é praticamente afetado pela subida e descida do líquido no tubo. Conseqüentemente a escala é linear. Este tipo de manômetro tem a vantagem de apresentar grande confiança ao utilizador, por estar sempre calibrado, uma vez que utiliza diretamente um princípio da Física. Os manômetros em U (fig. 6.2), podem ser utilizados para medir pressões relativas e pressões diferenciais.

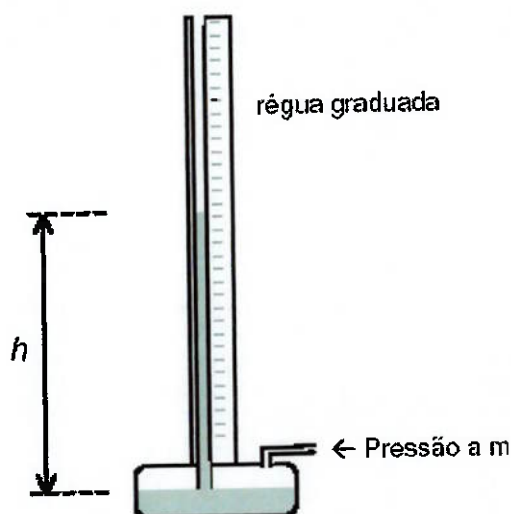


Fig. 6.1 - manômetro em I

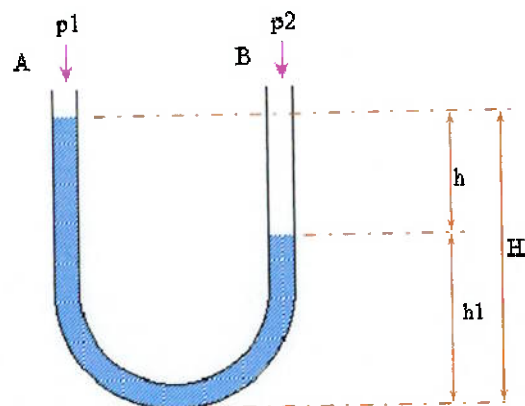


Fig. 6.2 - manômetro em U

Devido à sua fragilidade e à gama de medida pouco elevada este tipo de manômetro, bem como o da seção anterior, não são utilizados em aplicações industriais. São, no entanto utilizados com muita frequência em laboratórios, como padrão para aferição de sensores de pressão de outros tipos.

6.1.2. Elementos elásticos

Os elementos elásticos são mais robustos, pequenos, de operação simples e sem problemas de manutenção, o que os torna mais adaptável ao uso industrial. O funcionamento desses elementos seguem a lei de Hooke, a qual estabelece que a deformação é proporcional ao esforço, ou seja, que a deflexão do elemento elástico, o movimento resultante são proporcionais à pressão aplicada.

Também existem vários tipos de elementos elásticos usados em medidores de pressão. Serão explicados aqui o manômetro de Bourdon, o manômetro de diafragma e o de fole.

O manômetro de Bourdon (fig. 6.3), também conhecido como tubo de Bourdon, pode assumir vários aspectos. Na sua configuração clássica é constituído por um tubo

em forma de C, fechado em uma das extremidades e com seção aproximadamente elíptica. Quando se aplica pressão ao seu interior o tubo deforma-se.

A repetibilidade destes dispositivos é melhor do que 0.1% do máximo de escala. Podem ser construídos para uma gama de pressões muito ampla, desde pressões máximas de frações de atmosfera até pressões máximas de 500 kg/cm².

Nos indicadores de pressão clássicos e nos indicadores locais o movimento do extremo do tubo é comunicado a um ponteiro indicador. Para pressões baixas e para aumentar a sensibilidade do Bourdon este é por vezes construído em espiral ou então em hélice.

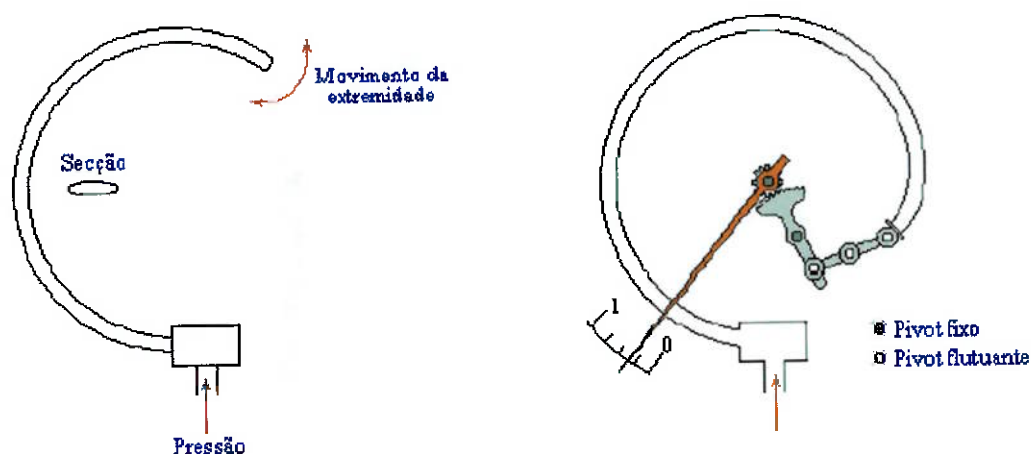


Fig. 6.3 - manômetro de Bourdon

O manômetro de diafragma (fig. 6.4) é constituído por um disco, fixo pela periferia, ao qual se aplica a pressão em um dos lados. A força resultante exercida sobre a superfície do disco provoca a sua deformação, que é medida por qualquer dos métodos utilizados com o Bourdon. Neste caso é muito freqüente, para medir a deformação da membrana, a utilização do método da capacidade variável.



Fig. 6.4 - manômetro de diafragma

O elemento de pressão fole (sanfona) é mais sensível do que os tipos Bourdon ou diafragma. A sanfona com molas opostas é usada para faixas de pressão baixas ou médias. Neste instrumento uma sanfona de metal é suportada por uma mola interna e ligada à fonte de pressão. A pressão comprime a sanfona, forçando seu fundo contra a força de oposição da mola. Uma haste que repousa no fundo da sanfona transmite o movimento vertical ao braço do ponteiro indicador ou registrador.

Os transdutores de elemento elástico são muito usados, principalmente, como indicadores locais de pressão, pois não há um modo de transmissão de sinal já que sua medição é feita mecanicamente.

6.1.3. Manômetros de tensão

O medidor de tensão é provavelmente o mais conhecido sensor de força. Ele converte uma força aplicada em resistência elétrica. Para entender seu funcionamento considere um certo comprimento de um fio condutor. Se ele for esticado, seu comprimento irá aumentar, e sua área irá diminuir, assim sua estrutura molecular estará afetada pela força. Portanto a força aplicada alterará a resistividade do

condutor, que pode ser facilmente medida.

O problema é que, sem um projeto apropriado, a variação de temperatura pode introduzir erros quase tão grandes quanto a própria medida da variável. É preciso levar em consideração o coeficiente de temperatura do material do extensômetro (fio condutor) e das forças produzidas pela expansão térmica. A força pode ser medida usando a ponte de Wheatstone, o que minimiza os erros de temperatura.

Muitas são as configurações possíveis com os extensômetros, muitas vezes com combinações de dois, três ou quatro extensômetros. A figura 6.5 abaixo apresenta um exemplo com 4 extensômetros, onde os extensômetros da zona exterior destinam-se à medida de tensão radial e os interiores à medida da tensão tangencial. Os extensômetros são ligados em ponte de Wheatstone (fig. 6.6), sendo os exteriores os dos ramos R1 e R3 e os interiores os dos ramos R2 e R4. Com esta montagem, que tem quatro extensômetros ativos, aumenta-se a sensibilidade da ponte de Wheatstone e cancela-se o efeito da temperatura sobre os extensômetros.

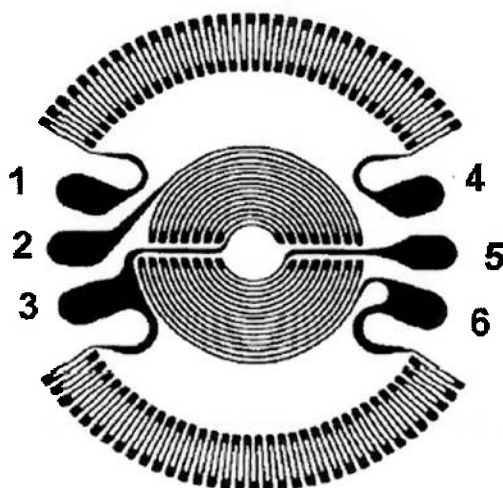


Fig. 6.5 - Exemplo de extensômetros

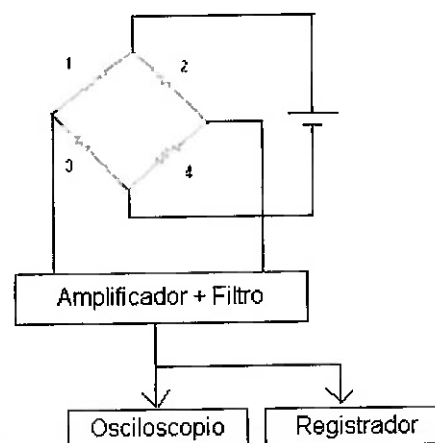


Fig. 6.6 - Leitura com ponte de Wheatstone

6.1.4. Magnético

Um tipo de transdutor de pressão magnético é o transdutor diferencial linear variável (TDLV, ou LVDT) (fig. 6.7). Trata-se de um transdutor eletromecânico que produz uma saída elétrica proporcional ao deslocamento de um núcleo magnético no interior de um transformador diferencial.

O transformador diferencial é constituído de três bobinas igualmente espaçadas em um formato de enrolamento cilíndrico. O núcleo magnético em forma de uma haste acha-se colocado axialmente dentro do conjunto das bobinas, e é ele que fornece a linha de movimento do fluxo magnético de ligação das bobinas. Quando o núcleo é deslocado da posição central, a voltagem induzida no enrolamento secundário aumenta e diminui a voltagem induzida no enrolamento principal. Portanto o sinal de saída é diretamente proporcional e linear com a voltagem diferencial produzida pela posição do núcleo.

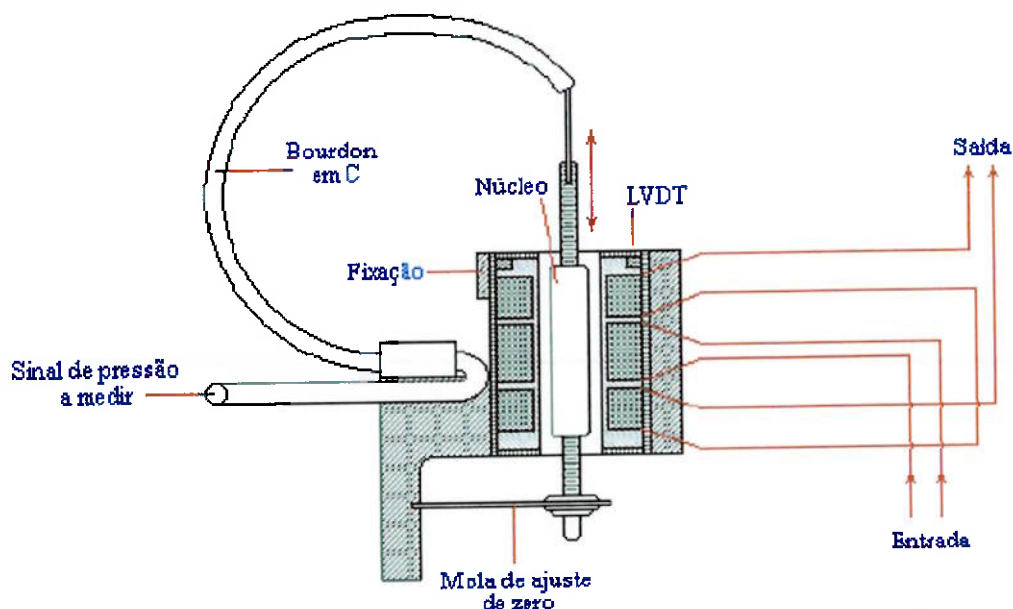


Fig. 6.7 - LVDT

Este tipo de sensor apresenta uma resolução contínua, um elevado sinal de saída, e histerese baixa. A sua principal restrição é que as impurezas do fluido afetam sua precisão. Na figura acima se pode notar que se as impurezas ficarem depositadas no final do arco, a medida da pressão será errônea.

6.1.5. De capacitância

O transdutor de pressão capacitivo se baseia no seguinte princípio: quando dois condutores, ou placas, separados por material dielétrico, modificarem suas distâncias relativas, a capacitância entre eles se modificará.

Um método muito utilizado para a medição por capacitância é por deformação de uma membrana (fig. 6.8), que consiste em formar um condensador com uma das armaduras ligadas à membrana. A deformação da membrana provoca uma variação na capacidade do condensador, que é transformada numa variação de um sinal elétrico (tensão ou corrente).

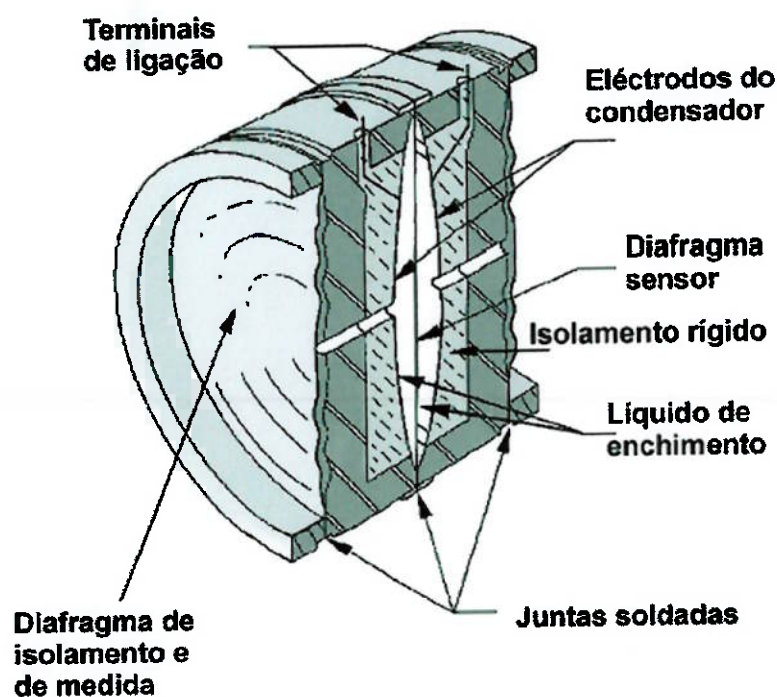


Fig. 6.8 - Medição capacitiva por membrana

As vantagens de um transdutor de pressão capacitivo são: frequência de resposta excelente, construção simples, compacto, relativamente barato, resolução contínua e não é afetado pelo tipo de fluido. Mas ele possui elevada impedância de entrada e é sensível a variações de temperatura, mas os erros podem ser minimizados por sistemas de compensação.

6.1.6. Piezoelétrico

O elemento piezoelétrico é feito com material cristalino assimétrico, como o titanato de bário, o quartzo ou a turmalina. Esses materiais produzem um potencial elétrico ao serem submetidos a uma força de tensão ou alongamento. Este é o princípio de funcionamento dos transdutores de pressão piezoelétricos (fig. 6.9).

A maior parte dos transdutores piezoelétricos utilizam o quartzo como material piezoelétrico, devido à sua grande estabilidade, poder ser utilizado a temperaturas elevadas e às suas características variarem pouco com a temperatura.

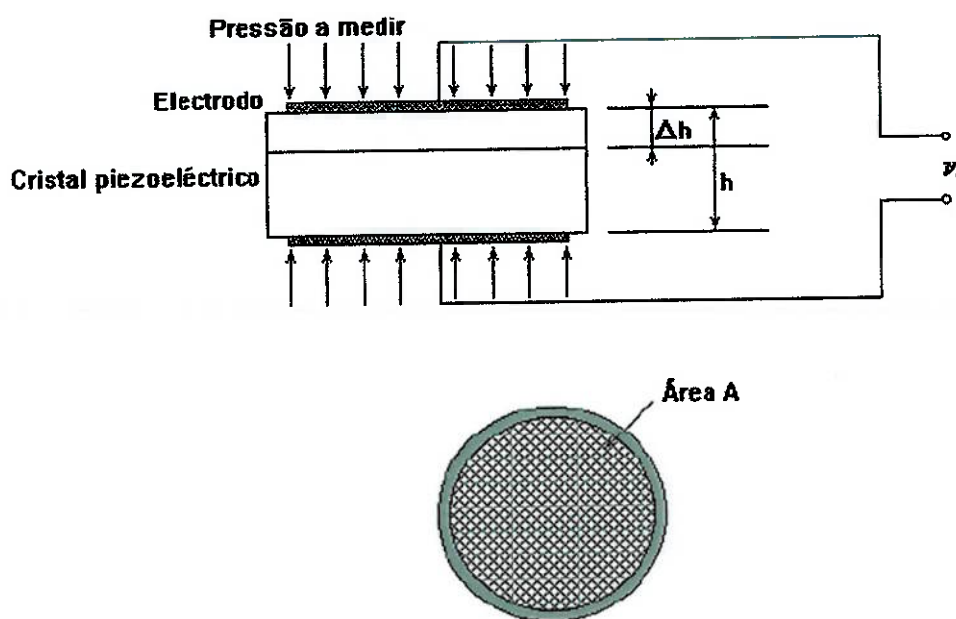


Fig. 6.9 - Transdutor Piezoelétrico

6.2. Vazão (ou fluxo)

Fluxo nada mais é que um fluido em movimento. Os medidores de fluxo são empregados para medir a quantidade de fluido em movimento em um processo.

Fluido escoando em dutos, ou em tubos, sempre apresentam uma queda de pressão ao longo do tubo, na direção do fluxo. A queda de pressão é devida à fricção entre as partículas do fluido e as paredes do tubo, portanto a vazão também pode ser medida por diferencial de pressão.

Os principais tipos de medidores de fluxo são:

- **Medidores de pressão diferencial**
- **Medidores de área variável**
- **Medidores de deslocamento positivo**
- **Medidores de massa**
- **Magnético**
- **Ultrasônico**

6.2.1. Medidores de pressão diferencial

O funcionamento deste sensor se baseia na pressão diferencial que se forma junto de uma restrição na linha de fluxo e que varia com a quantidade que escoar pelo tubo (fig 6.10). A restrição provoca um aumento na velocidade, resultando em uma queda de pressão e produzindo uma pressão diferencial. A quantidade de fluxo na linha de escoamento é proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial.

Este medidor é composto das seguintes partes: elemento primário, que é a restrição na linha de fluxo com a finalidade de produzir a pressão diferencial (ou

depressão), um elemento secundário (chamado manômetro) que, mede a pressão diferencial, e uma tubulação para ligar o elemento primário ao secundário. O elemento secundário pode ser conectado diretamente a um indicador, um registrador ou um controlador.

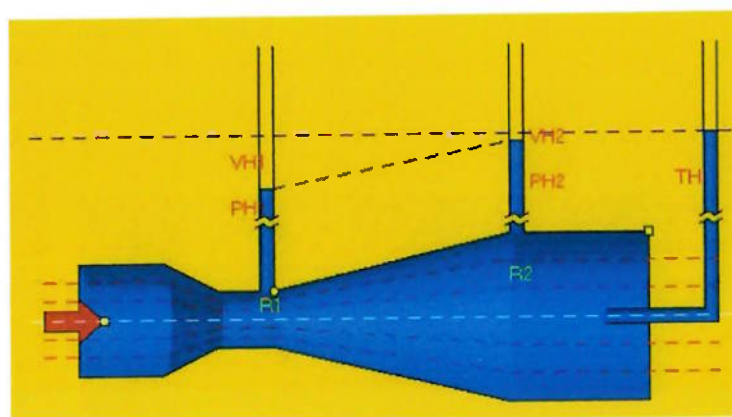


Fig. 6.10 - Medidor de pressão diferencial

Alguns fatores podem afetar na exatidão da medida, tais como uma instalação defeituosa, erros nas ligações das tomadas do orifício, impurezas no tubo de faixa de trabalho, descargas em demasia do fluido, asperezas do tubo, escoamento turbulento ou pulsante ou uma seção reta de tubo insuficiente.

Tem com vantagens a leitura direta do volume escoado, calibração muito boa para uso em controle automático, adaptável para transmissão remota e dispositivo de registro, indicação e totalização, baixo custo e fácil de operar, instalar e manter.

6.2.2. Medidores de área variável

Nestes instrumentos a vazão é deduzida da modificação da área de um orifício na linha de escoamento e com uma pressão diferencial constante. Os principais tipos de medidores de área variável são o rotâmetro e os tipos de cilindro e pistão. O tipo cilindro e pistão é indicado principalmente para líquidos corrosivos, portanto não será tratado em detalhes aqui.

O rotâmetro (fig. 6.11) possui um flutuador colocado dentro de um tubo de diâmetro variável. Este tubo está rosqueado ou provido de flanges para a montagem em posição vertical, diretamente na linha de escoamento do fluido. A extremidade de diâmetro menor está na parte inferior, que é a entrada do fluido. A folga, ou espaço anular, entre o flutuador e o diâmetro interno que aumenta na extensão do tubo, forma um orifício de área variável. O flutuador alcança uma posição de equilíbrio que é proporcional ao escoamento quando a força ascendente do fluido, passando pelo espaço anular, torna-se igual à força descendente do flutuador. A vazão pode ser lida diretamente da posição do flutuador no fluido, em uma escala graduada regularmente no próprio tubo, ou ao lado dele. O movimento do flutuador pode também ser transferido a um sistema que atua um ponteiro indicador, um registrador ou um transmissor-receptor.

Vantagens:

- Flexibilidade para todos os tipos de fluidos e simplicidade na disposição do encanamento de ligação
- Perda de pressão permanente constante e pequena
- Fácil limpeza e manutenção
- Custo baixo para tubos com diâmetro inferior a 15cm.

Limitações:

- Exatidão afetada pela formação de depósitos no tubo ou flutuador, exigindo limpezas freqüentes.
- Estrutura muito delicada.



Fig. 6.11 - Medidor de área variável

6.2.3. Medidores de deslocamento positivo

São diversos tipos de medidores por deslocamento positivo e todos determinam o escoamento volumétrico e registram o volume total escoado. Eles são exatos e simples. Estes instrumentos permitem que seja interrompida definitivamente a passagem do fluido, depois de ter sido medida uma determinada e desejada quantidade.

São diversos tipos de instrumentos que usam este princípio. O tipo rotor de aletas possui o formato de um tambor fechado com um eixo ao qual está preso o rotor que gira dentro do corpo do medidor (fig.6.12). O eixo está montado fora da linha central do tambor. O rotor é formado, geralmente, por quatro aletas que, por meio de molas, se adaptam às paredes do corpo do medidor. O líquido penetrando na câmara produz uma pressão contra as aletas, forçando o rotor a girar. Um contador de giro ligado ao eixo do rotor indica o volume escoando, que é proporcional às rotações do eixo.

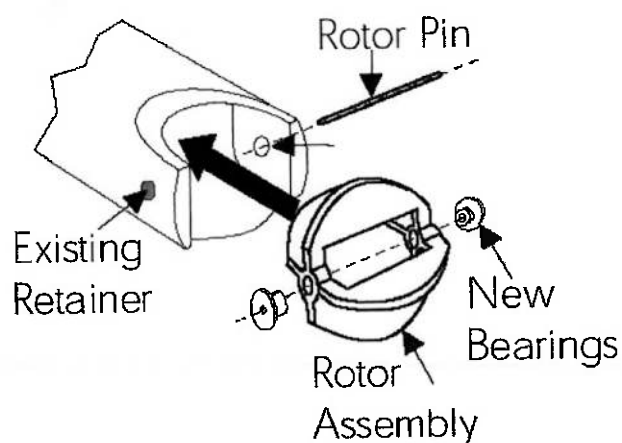


Fig. 6.12 - Medidor de deslocamento positivo tipo rotor de aletas

Estes instrumentos são mais usados para medir volume de líquidos, já que mantêm registrado a quantidade de água que passa pelo instrumento.

6.2.4. Medidores de massa

Existem duas categorias de medidores em massa: o medidor de escoamento de massa, no qual a reação do elemento sensor é proporcional à taxa de escoamento verdadeiro de massa, e o medidor de escoamento de massa no qual é medida a taxa de escoamento volumétrico. Neste caso a medida é convertida em escoamento de massa, compensando quaisquer propriedades físicas do material em escoamento e as condições do ambiente.

Os medidores de escoamento direto se baseiam no princípio de medição do momento transversal do movimento do fluido.

Um exemplo destes medidores é o medidor de turbina, onde o número de voltas das lâminas da turbina

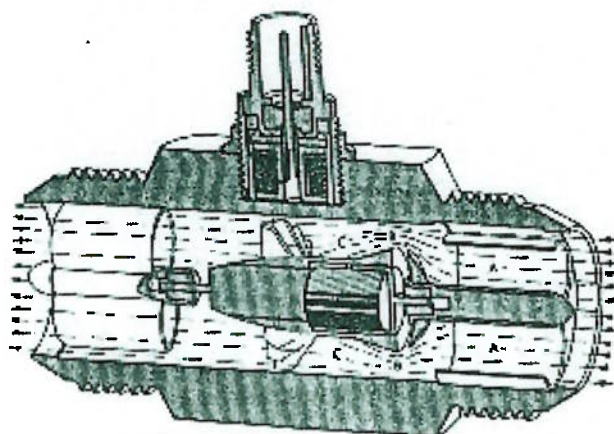


Fig. 6.13 - Medidor de massa tipo turbina

por unidade de tempo é proporcional ao fluxo. Um circuito magnético é encaixado no corpo do rotor para medir a passagem da lâmina. Cada vez que uma lâmina da turbina passa pelo pólo do sensor do circuito magnético, gera-se um pulso de tensão no terminal de saída. A frequência deste pulso será proporcional à velocidade de escoamento do fluido.

Vantagens:

- Elevada exatidão na taxa de vazão na linearidade e na repetição das medidas
- Rápida velocidade de resposta
- Faixa de escoamento muito larga
- Exatidão não afetada pelo formato da tubulação adjacente
- Aparelho simples e robusto
- Podem ser operados em faixas de temperatura e pressão bem amplas
- Pode medir a vazão nos dois sentidos do tubo

6.2.5. Magnético

O transmissor opera como os geradores elétricos, baseado no princípio da lei de Faraday da indução magnética. A lei estabelece que, quando um condutor em movimento corta as linhas de força de um campo magnético, uma voltagem é induzida no condutor.

Com passagem de um fluido ligeiramente condutivo através de um campo eletromagnético (B), é gerada uma força eletromotriz (e) medida por eletrodos posicionados nas paredes do tubo (fig. 6.14).

O transmissor magnético consta de um tubo de metal não magnetizado (por onde passa o líquido) parafusado na linha de escoamento; de um par de eletrodos nas paredes do tubo e em contato com o líquido escoando; e de um eletroímã montado na parte de fora do tubo, em uma câmara protetora.

O conduto deve ser de vidro ou de algum material não condutor. Os eletrodos na superfície interna do conduto fazem contato direto com o fluido.

A tensão de saída é muito baixa, e um campo magnético alternado é usado para amplificar e eliminar problemas de polarização. Um circuito especial é necessário para separar a saída relativa ao fluxo de outros sinais.

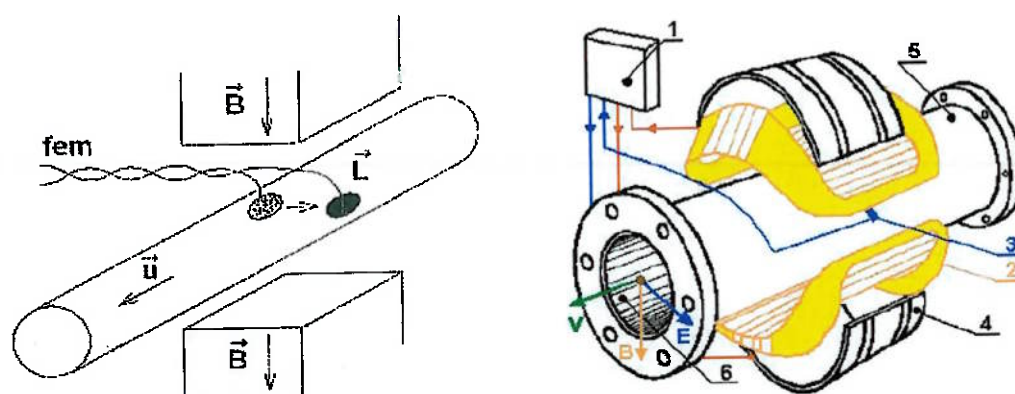


Fig. 6.14 - Medidor magnético de vazão

6.2.6. Ultrasônico

Este tipo de medidor se baseia no tempo de propagação de ondas acústicas e no efeito Doppler. Uma onda acústica é emitida por um emissor e recebida pelo receptor. Relacionando a posição de emissão e recebimento do sinal e o tempo entre esses dois eventos é possível medir a velocidade do fluido.

Este tipo de medição tem um custo muito alto, porém é muito preciso e não exige nenhuma alteração na tubulação ou perda de carga do sistema.

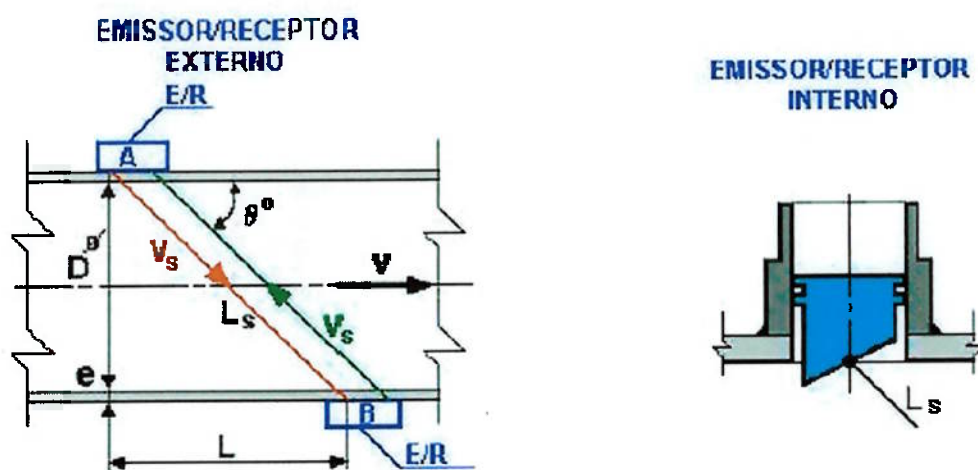


Fig. 6.15 - Medidor Ultrasônico

6.3. Temperatura

O conceito de temperatura é complexo, difícil de definir em termos simples. O efeito da temperatura num corpo é avaliado pelo movimento vibracional de seus átomos e/ou moléculas; quanto maior a agitação interna, maior a temperatura, e maior é o “potencial” de transferir essa “energia cinética” para outro corpo, de menor energia vibracional, ou seja, de menor temperatura.

Assim, pode-se pensar em temperatura como sendo o potencial que causa o fluxo de calor de um ponto de mais alta temperatura para um ponto de mais baixa temperatura. Essa taxa de calor transferido é função da diferença de temperatura.

As primeiras medições de temperatura registradas que se tem conhecimento foram realizadas por Galileu, a partir de um termoscópio, termômetro cujo princípio físico era a expansão do ar; na ocasião, sua “escala” estava dividida em “graus de calor”.

Depois disso, diversos métodos e configurações foram criadas para a medição da temperatura.

Os sistemas de medição com contato requerem a existência de duas condições básicas: contato físico do termômetro com o corpo sob medida, e, ocorrência de equilíbrio térmico entre o termômetro e o corpo sob medida. Destas duas condições básicas vem a definição de que um termômetro na maioria dos casos mede a sua própria temperatura.

A distinção entre sensor de temperatura e termômetro é muito importante, mas é comum empregar-se o termo termômetro para qualquer dispositivo de medição de temperatura.

Os sensores de temperatura são os dispositivos mais comuns para medição de temperatura e dependem sempre das propriedades de algum material em particular (gases, líquidos, metais e ligas) para suas indicações de temperatura. Dependem de propriedades tais como coeficiente de expansão, resistência elétrica, potência termoelétrica ou velocidade do som. Todo sensor de temperatura possui uma calibração, que é dependente do material do qual o sensor é feito, da pureza deste material e, algumas vezes, do passado metalúrgico deste material. Sensores de

temperatura que se baseiam em propriedades de materiais nunca apresentam uma relação linear entre estas propriedades e valores de temperatura.

Os termômetros absolutos, diferentemente dos sensores de temperatura, não se baseiam em propriedades de materiais, mas sim em leis físicas, representáveis por equações matemáticas. Nestas equações não aparece nenhum termo dependente de propriedades do material do qual o termômetro é constituído. Um exemplo de termômetro absoluto é o termômetro de radiação (lei de StefanBoltzmann $R = kT^4$). Conceitos como estabilidade não se aplicam aos termômetros absolutos, exceto pelos seus circuitos eletrônicos de leitura, os quais são calibrados de maneira independente do sensor.

Os principais tipos de sensores de temperatura são:

- **Sistema termométrico de enchimento**
- **Termômetro bimetalico**
- **Termômetros de resistência**
- **Pares termoeletricos**
- **Pirômetro de radiação**

6.3.1. Sistema termométrico de enchimento

Um sensor com sistema termométrico de enchimento poderia ser um sistema baseado na dilatação de um líquido (termômetro convencional de Hg); o próximo passo é definir uma “escala de temperatura”, onde números maiores indiquem temperaturas maiores. Caso essa relação dilatação (ou comprimento) da coluna de líquido (em mm, por exemplo) x temperatura, seja linear, o desenho da escala fica facilitado, bem como o equacionamento matemático. É claro que se escolhe um

líquido que tenha um comportamento homogêneo ao longo da faixa de temperatura utilizada.

A seguir, são escolhidos dois pontos de referência; os mais comuns são: ponto de fusão normal do gelo ($0,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) e ponto de ebulição ($100,000^{\circ}\text{C}$) normal da água.

Desta maneira, se L_g é o comprimento da coluna de líquido correspondente ao ponto de fusão normal do gelo e L_v é o comprimento da coluna correspondente ao ponto de ebulição normal da água, e se a relação comprimento da coluna de líquido versus temperatura for linear, pode-se escrever uma equação de reta, $T = aL + b$, onde, T é a temperatura, L é o comprimento da coluna, a é o coeficiente angular e b é a ordenada em relação à origem.

A maneira de desenvolver um termômetro a gás é semelhante ao caso do termômetro baseado na dilatação de um líquido; no caso do termômetro a gás a volume constante, obtém-se a temperatura em função da pressão P_g no ponto do gelo e da pressão P_g no ponto de vapor, resultando uma equação semelhante à anterior, só que em termos da pressão versus temperatura.

6.3.2. Termômetro bimetalico

Este instrumento baseia-se no fato de que dois metais diferentes modificam as suas dimensões de maneira desigual ao variar a temperatura. O termômetro bimetalico industrial consiste de lâminas justapostas de dois ou mais metais, formando uma só peça e usualmente de forma helicoidal. Variando a temperatura da lâmina, cada metal que a compõe expande ou se contrai, desigualmente, fazendo com que a lâmina se enrole ou se desenrole. Uma extremidade da hélice está fixa e a outra ligada a um ponteiro que pode girar livremente, apontando a nova temperatura em uma escala circular graduada.

As vantagens são: relativamente barato, construção robusta, leitura direta, não exige equipamento adicional ou fonte externa de energia. Desvantagens: indicação apenas local, não muito exato, pequena faixa de operação.

6.3.3. Termômetros de resistência

Em princípio, todo material cuja resistência elétrica muda de maneira significativa e repetitiva em resposta a mudanças de temperatura poderia ser considerado como termômetros de resistência. Serão considerados aqui apenas termômetros de resistência de metal, que têm sua resistência aumentada com o aumento da temperatura a que estão submetidos. Os termômetros de resistência mais comuns são os de platina (também chamados de PT100).

Os termômetros de resistência são conectados a instrumentos indicadores por meio de cabos de ligação, com a diferença de que empregam cabos comuns de cobre, ao invés de cabos de compensação, que são bem mais caros.

Termômetros de resistência de platina são os sensores de temperatura mais precisos que existem e dentro de certas limitações impostas pelo valor máximo de temperatura que suportam, devem ser especificados quando baixas tolerâncias e alta estabilidade são necessárias.

Vantagens:

- Possuem duas classes de precisão, alta e baixa
- Boa estabilidade e repetibilidade
- Com ligação adequada, não existe limitação para distância de operação.
- A leitura é fácil, podendo ir direto ao PLC
- Dispensa o uso de fios e cabos de extensão e compensação para ligação sendo necessário somente fios de cobre comuns.
- Se adequadamente protegido permite a utilização em qualquer ambiente.
- Curva de resistência x temperatura mais linear
- Menos influenciada por ruídos elétrico

Desvantagens:

- São mais caros, se escolhido a classe de precisão alta
- Menores faixas de temperatura
- Deterioram-se com mais facilidade, caso se ultrapasse a temperatura máxima de utilização.
- É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura estabilizada para a correta indicação e assim possui um tempo de resposta mais alto.

Uma nova tecnologia foi desenvolvida recentemente, na qual vários (16) termômetros de resistência são diretamente associados a um indicador multiponto, que já estabelece os contatos que limitam os valores das variáveis em máximos e mínimos (alto e baixo).

6.3.4. Pares termoeletricos

Um termopar é um sensor de temperatura simples, que consiste de dois materiais diferentes em contato térmico. Este contato, chamado de junção (fig. 6.16), pode ser feito enrolando os fios, soldando-os ou brasando-os. Quando este conjunto é submetido a um gradiente de temperatura observa-se a presença de uma tensão termoeletrica na outra extremidade. Este efeito foi descrito por Seebeck.

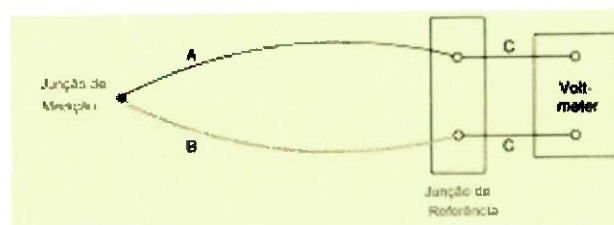


Fig. 6.16 - Junção Termopar

O efeito termoelétrico ocorre sempre que um termopar é fabricado com dois metais diferentes, no entanto, um grande número de materiais são indicados para termopares.

Em princípio, os materiais são selecionados para: ter estabilidade a longo prazo a altas temperaturas, ser compatível com a instrumentação disponível, baixo custo e máxima sensibilidade na faixa de operação.

É importante lembrar que a sensibilidade S de um termopar não é constante; a tensão de saída é uma função não linear da diferença de temperatura das juntas ($T_1 - T_2$). A sensibilidade S é função da temperatura e pode ser encontrada em tabelas para os materiais mais usados. A relação entre temperaturas e valores de tensão também está apresentada em tabelas de calibração, existentes para todos os tipos de termopares de uso industrial.

É um meio barato, simples, versátil, durável, mas menos preciso de se obter leituras de temperatura. Apresentam flexibilidade mecânica e podem ser montados numa grande variedade de espaços.

Mas, termopares por si só não fornecem nenhuma leitura de temperatura, eles precisam ser conectados a um instrumento de leitura. Para tanto, são utilizados cabos especiais, denominados cabos de compensação, que são cabos de ligas especiais que reproduzem, dentro de certos limites de temperatura, as mesmas propriedades das ligas que constituem os termopares. Para cada tipo de termopar existe um tipo de cabo de compensação a ser usado e isto encarece bastante o sistema.

6.3.5. Pirômetro de radiação

Com o aumento da temperatura, fica difícil medi-la com detectores de temperatura por resistência, termistores ou termopares. Portanto foi se desenvolvendo cada vez mais a pirometria. Com os princípios da radiação, pode-se desenvolver métodos de medição de temperatura sem contato com o corpo a ser medido. Com isto, eliminou-se problemas de estabilidade e falhas por insolação que acontecem com os outros métodos a altas temperaturas.

Nestes instrumentos a determinação da temperatura é feita pela avaliação da quantidade e características da energia radiante que um corpo emite (fig. 6.17). Este processo utiliza a lei de energia radiante de Stefan-Boltzman. Esta lei estabelece que a intensidade da energia radiante emitida pela superfície de um corpo negro, aumenta em proporção à quarta potência da temperatura absoluta do corpo. Para corpos não negros é aplicado um fator de correção.

Eles são indicados para medir a temperatura de superfícies quentes, em uma fornalha por exemplo, de objetos em movimento, ou quando as condições de montagem ou atmosfera não permitem o uso de pares termoeletricos, mas são muito mais caros.

Dois métodos de radiação são muito explorados. O primeiro, descrito como pirometria ótica, compara o brilho da luz radiante do corpo a ser medido com um padrão. O segundo usa um sensor de fótons e calcula a densidade do fluxo, que varia com a temperatura da superfície do corpo.

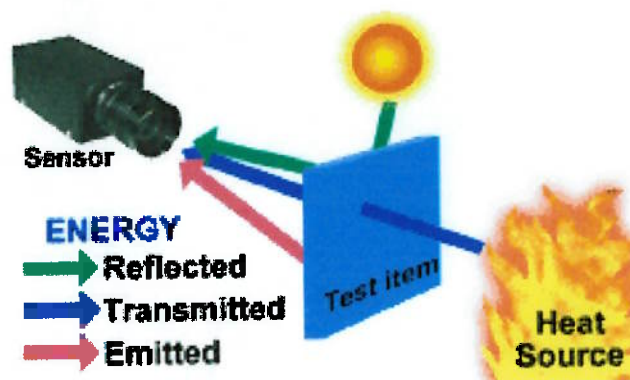


Fig. 6.17 - Pirômetro de radiação

6.4. Nível

Nível é a altura de um líquido ou de um sólido, contidos em um recipiente, sendo a medição feita a partir de uma referência ou de uma linha base. A determinação do nível permite o cálculo do volume ou do peso de um líquido ou de sólidos. O nível de líquidos pode ser determinado por métodos diretos ou indiretos.

Os métodos diretos incluem:

- **Indicadores visuais**
- **Bóias (flutuadores)**
- **Condutividade elétrica**

E os métodos indiretos incluem:

- **Deslocamento**
- **Pressão hidrostática**
- **Capacitância elétrica**
- **Radiação**

6.4.1. Indicadores visuais

É indicado para líquidos limpos onde o processo não exija temperatura elevada. É constituído, basicamente, de um tubo de vidro protegido contra choques acidentais e por uma canaleta de metal, sendo que a fixação da canaleta é feita por pressão na

própria porca do vidro, assegurando rigidez e simplicidade na montagem e dispensando o uso de braçadeiras (fig. 6.18).

Este é um dos mais antigos e simples métodos de medição contínua de nível de líquido dentro de tanques ou reservatórios. O visor e indicador de vidro consiste essencialmente de um tubo transparente de vidro colocado no tanque ou reservatório, de tal forma que a altura do líquido do tubo seja igual ao nível do líquido no reservatório (princípio dos vasos comunicantes).



Fig. 6.18 - Indicador visual

6.4.2. Bóias (flutuadores)

Este indicador determina a posição da superfície do líquido em um recipiente. O princípio de funcionamento de baseia nas mudanças de altura de uma bóia colocada na superfície de um líquido, com as modificações de nível do líquido. Os movimentos do flutuador podem ser convertidos por intermédio de um dispositivo mecânico para operar uma chave de ligação, válvulas solenóides, válvulas mecânicas, transmissores elétricos, etc.

Este tipo de medidor é empregado, principalmente, em tanques abertos, poços e reservatórios, e com algumas adaptações ele também pode medir o nível da interface entre dois líquidos diferentes.

Vantagens:

- Fácil instalação, operação e calibração
- Não são afetados pela presença de espuma, gases/vapores, mistura de líquidos ou variações de características do fluido como viscosidade, constante dielétrica ou condutividade
- Flutuador de fácil acesso para limpeza
- Baixo custo

Desvantagens:

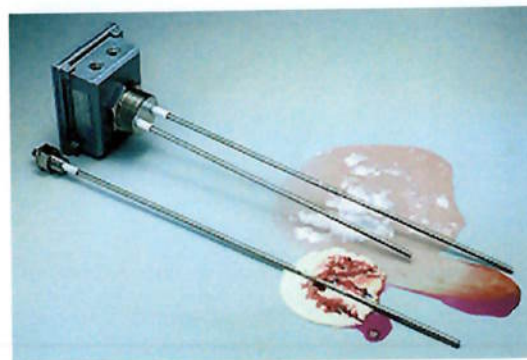
- Estreita faixa de operação
- Flutuador deve ser limpo com frequência
- Erros e travamentos por escoamento rápido, superfície em agitação ou sólidos no líquido.

6.4.3. Condutividade elétrica

Nestes instrumentos, eletrodos são dispostos nas alturas onde se deseja controlar os níveis do líquido, no reservatório. O líquido, atingindo o eletrodo terra e o eletrodo de atuação, fecha o circuito pela sua própria condutividade, acionando um circuito elétrico que por sua vez comuta o relé de saída (fig. 6.19). A sensibilidade do detector é ajustável em função da condutividade do líquido a ser controlado. É uma das chaves mais utilizadas em todos os segmentos industriais.

Vantagens:

- Simples
- Faixa de nível sem limites
- Suporta altas temperaturas
- Custo relativamente baixo



Desvantagens/ Limitações:

- Não pode ser empregado em líquidos não condutores

Fig. 6.19 - Medidor de nível por condutividade elétrica

6.4.4. Deslocamento

O seu funcionamento baseia-se no princípio de Arquimedes. É composto por deslocadores fixados em um cabo que por sua vez está acoplado a uma mola ligada a haste de um núcleo magnético (fig. 6.20).

Na posição de repouso, (tanque vazio), a mola está esticada pelo peso dos deslocadores, pois a única força exercida neles é da gravidade. Quando o nível sobe, começa a existir a força de empuxo no deslocador, fazendo que a mola se contraia, empurrando o núcleo magnético até o ponto de acionamento.

O ímã, ao se movimentar, pressiona a alavanca do microinterruptor que abre ou fecha os contatos.

A chave de nível tipo deslocador é o tipo mais popular de controlador de nível sem indicador. Tem um bom desempenho em qualquer tipo de líquido, é muito usada em processos onde a temperatura e pressão são elevadas e pode ser instalada em tanques grandes ou reservatórios com agitação ou turbulência, sem que haja alteração no ponto de alarme e também pode medir o nível da interface entre dois líquidos diferentes. Mas deve ser limpo constantemente para remover os sólidos que se depositam e impedir corrosão.



Fig. 6.20 - Medição por deslocamento

6.4.5. Pressão hidrostática

Estes instrumentos são utilizados em aplicações onde é necessário monitorar o nível de líquido continuamente. Eles determinam o nível do líquido em um recipiente por inferência, pela medição da pressão hidrostática na qual a altura do nível é igual à pressão resultante da altura hidrostática dividida pela densidade do líquido, independente do volume do líquido (fig. 6.21). Existem diferentes métodos de

medição da pressão do líquido, entre eles os medidores diferencial de pressão e a caixa de diafragma.

O método de pressão estática é o método mais comum de medir nível em tanques fechados, sob pressão ou vácuo. Eles não possuem partes móveis e não são afetados por turbulência, espuma, gases/vapores ou por variações de determinadas características do fluido como constante dielétrica ou condutividade. São simples, de baixo custo, permitem medição de líquidos viscosos, produtos químicos e alimentícios e alcança pontos de difícil acesso e instalação.

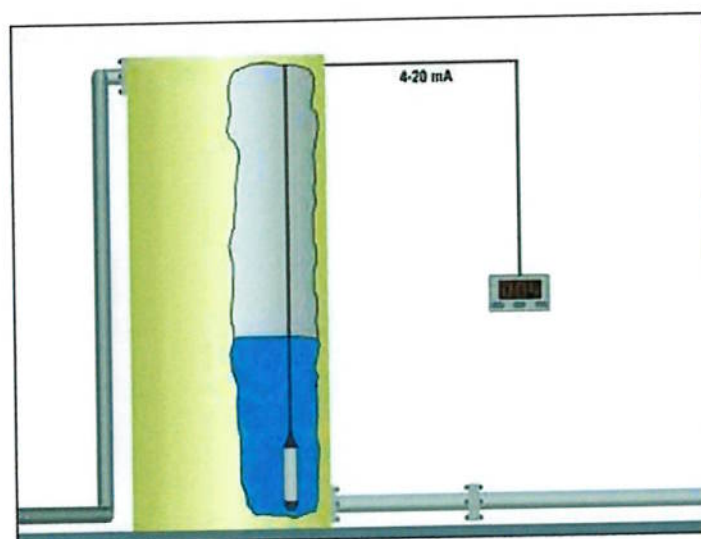


Fig. 6.21 - Medição por pressão hidrostática

6.4.6. Capacitância elétrica

Nestes sensores, uma sonda, haste ou cabo, e a parede metálica do reservatório formam um capacitor. Se o espaçamento entre ambos estiver preenchido somente com ar, cuja constante dielétrica é igual a 1, a capacitância do circuito será pequena. Mas se a sonda for, ao menos parcialmente, coberta com o fluido, cuja constante dielétrica é acima de 2, a capacitância aumentará e o relé será acionado.

As chaves de nível por capacitância elétrica podem ser usadas para detectar nível

mínimo ou máximo. Por ser um equipamento compacto (sonda e unidade eletrônica conjugada), além de ter seu custo bastante reduzido, é também muito versátil e de fácil instalação em praticamente qualquer tipo de processo.

6.4.7. Radiação

Esses medidores são baseados no princípio de que o número de raios gama penetrando em uma camada líquida varia com a espessura da camada líquida. Os raios gama produzidos por uma fonte penetram na camada líquida em quantidade menor à medida que a espessura da camada aumenta. A radiação passa pelo tanque e é detectada por um contador Geiger ou por células de ionização. A corrente de saída das células está calibrada em termos de nível de líquido.

Deve-se tomar medidas de proteção aos que se acham expostos à radiação dos componentes radioativos. Entretanto, os instrumentos de medição de nível com fontes radioativas permitem resolver problemas difíceis de níveis em que as conexões físicas de dentro para fora do tanque são proibidas, quando a limpeza é difícil, quando sólidos arrastados produzem leituras errôneas, quando são usados líquidos corrosivos, viscosos ou formadores de espumas ou quando devem ser mantidas as condições sanitárias, como a esterilidade.

6.5. Posição (fim de curso)

Por meio destes indicadores de limite detectam-se certas posições de partes de máquinas ou outras unidades de trabalhos. Normalmente, os elementos fim de curso tem um contato NA e um NF (normalmente aberto e normalmente fechado). São interruptores que são acionados pela própria peça monitorada. Há diversos tipos e tamanhos, conforme a aplicação. Os principais tipos são:

- **Tipo Mecânico**
- **Sensor de proximidade magnética**
- **Detector de limite indutivo**
- **Detector de limite capacitivo**
- **Detector de limite óptico**
- **Detector de limite ultrasônico**

6.5.1. Tipo Mecânico

As chaves de posição do tipo mecânicas são as mais simples e mais baratas chaves fim de curso. Seu funcionamento parte do princípio que a própria peça a ser monitorada aciona o relê de posição através de seu movimento. Muitos são os tipos e as configurações possíveis para as chaves tipo mecânicas (fig. 6.22). Por exemplo, se é necessário saber a posição máxima e mínima de um pistão é só colocar um relê mecânico no comprimento máximo e mínimo do pistão, e garantir uma geometria mecânica de acionamento do relê com o próprio pistão.

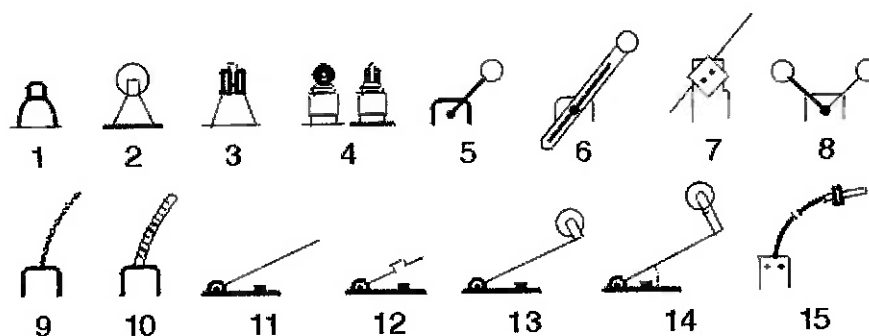


Fig. 6.22 - Tipos de relês acionados mecanicamente

6.5.2.Sensor de proximidade magnética

Esses elementos são especialmente vantajosos quando se necessita montagem de chaves fim de curso convencionais, ou quando são solicitadas sob condições ambientais diversas (poeira, umidade, cavaco, etc). Construtivamente trata-se de dois contatos colocados no interior de uma ampola, colocada num invólucro que posteriormente é preenchido com resina sintética, servido assim base para o conjunto.

Funcionamento: ao aproximar-se um ímã permanente ou uma bobina alimentada com corrente continua deste invólucro, o campo magnético atravessa a ampola, fazendo com que as duas laminas em seu interior se juntem, estabelecendo um contato elétrico. Removendo-se o campo magnético, o contato é imediatamente desfeito.

6.5.3.Detector de limite indutivo

Em máquinas freqüentemente são necessárias a detecção de partes moveis ou objetos, assim como tarefas de contagem, que não possibilitam o uso de chaves fim de curso convencionais por não possuírem força, peso ou dureza suficientes. Para

estes casos, podem ser empregados os detectores indutivos, constituídos por um circuito oscilador, um circuito de disparo e um circuito amplificador.

Funcionamento: o oscilador gera, através de uma bobina, um campo magnético alternado, e se um corpo metálico for colocado nas proximidades, serão produzidas correntes parasitas, absorvendo energia do oscilador. Em virtude disto, a tensão do oscilador cai, acionando o circuito disparador que emite sinal. Posteriormente este sinal é amplificado para compatibilizá-lo com a carga a ser comandada.

6.5.4.Detector de limite capacitivo

Os sensores capacitivos têm a forma de atuação semelhante aos sensores indutivos. Possuem um oscilador que nos tipos usuais, não oscila permanentemente como nos sensores indutivos.

Funcionamento: o princípio de funcionamento é a alteração do dielétrico entre as armaduras de um capacitor, pois ao aproximar um corpo da área ativa do sensor aumenta-se a capacitância por diminuição da distância entre o objeto e a superfície ativa do sensor. Se esta distância diminui até certo valor, começam a ocorrer oscilações. Esta oscilação atua sobre um disparador que envia um sinal para um amplificador que atua na carga.

Os sensores capacitivos reagem a todos os materiais (mesmo que não sejam metálicos). Podem igualmente detectar líquidos ou granulados, isto é significa que estão sujeitos a perturbação tais como poeiras cavacos etc.

6.5.5.Detector de limite óptico

O sensor óptico é capaz de detectar qualquer material que reflita, absorva ou desvie a luz, de forma que este componente é utilizado para detectar qualquer tipo de material. Por este motivo os sensores ópticos estão sendo cada dia mais utilizados em diferentes segmentos da indústria com grande eficiência e economia.

Funcionamento: baseia-se na existência de um sinal de luz vermelha ou infravermelha que deve, de alguma forma, atingir o elemento receptor. Este sinal luminoso é convertido em sinal elétrico e comparado com o valor pré-estabelecido para definir o estado de sensores.

O sinal de luz gerado pelo emissor do sensor óptico é modulado numa frequência determinada. Da mesma forma o receptor do sensor é acoplado a um filtro que somente considera válidos, sinais com a mesma frequência do emissor. Esse recurso é usado para sensores ópticos para minimizar os efeitos de possíveis interferências causadas por outras fontes luminosas que não seja a do emissor.

Existem diferentes formas de se utilizar o sensor ótico, as quais serão mencionadas abaixo:

- Sensor óptico por reflexão difusa: O emissor e o receptor se encontram em um mesmo invólucro. A luz gerada no emissor reflete de forma difusa sobre o objeto a ser sensoriado de tal forma que uma parcela dessa luz retorne ao sensor atingindo o receptor. Os sensores ópticos desse tipo de detecção não atingem grandes distancias (até 360mm), em função de que na reflexão difusa apenas uma pequena parcela da luz é refletida em direção ao receptor.

A luz refletida depende de alguma características do objeto, como a cor e o acabamento de superfície. Desta forma, objetos escuros, pequenos ou com superfícies altamente rugosa, podem não ser detectados.

- Sensor óptico retro – reflexão: São montados no mesmo invólucro o emissor e receptor e é necessário o auxílio de um espelho refletor para estabelecer uma barreira de luz entre os componentes óptico. Um objeto, ao interromper a barreira de luz, impede a chegada da mesma ao receptor, ativando o sensor.

A distância de acionamento destes sensores depende, além de suas próprias características, também da dimensão e qualidade do espelho refletor. Os espelhos refletores possibilitam médias distancias (de 4,5m) pelo fato de serem constituídos por micro pirâmides que formam um ângulo de 90° entre suas paredes.

- Barreira de luz: O emissor e o receptor encontram-se montados em invólucros separados, sendo necessário o alinhamento dos mesmos para colocar o sensor em

condições de operar. A luz originária do emissor atinge o receptor formando uma barreira de luz entre os componentes. A barreira ao ser interpretada, aciona o sensor. Esses sensores são apropriados para grandes distâncias.

6.5.6. Detector de limite ultrasônico

A operação do sensor ultrasônico é baseada na emissão e reflexão de ondas acústicas entre o objeto e um receptor. Normalmente o portador dessas ondas é o ar. O tempo de propagação de um som é medido e avaliado. O sensor ultrasônico transmite e emite seus sons não audíveis na frequência usual de 30 a 300Khz. Filtros dentro do sensor verifica o som recebido e atualiza o eco emitido pela onda do sensor. A velocidade de operação do sensor é limitada por uma frequência, em média, de 1Hz a 125Hz.

A maior vantagem deste sensor reside no fato de que pode detectar larga escala de diferentes materiais. A detecção é independente da forma cor ou material, menos lã, tecido, espuma, borracha e outros materiais que absorvem som.

7. Instrumentação aplicada ao grupo turbina gerador

7.1. Introdução

Neste momento já foi estudado e analisado:

- As necessidades de medição no grupo turbina gerador para sua automação
- As grandezas a serem medidas
- Os locais exatos de aplicação dos instrumentos (ambiente)
- As características de instrumentos existentes para as respectivas medições

Com isto pode-se tomar uma decisão concisa de qual instrumento é o mais indicado para cada aplicação do grupo turbina gerador, levando em conta os principais fatores:

- Precisão e Resolução
- Tamanho e Rigidez
- Adequação ao equipamento
- Condições do ambiente (temperatura, pressão, campo magnético, etc)
- Facilidade de leitura dos dados
- Custo

Em geral, sabemos que a instrumentação para o grupo turbina gerador deve se adaptar às seguintes características:

- Fluidos com impurezas e não condutores,
- Exposição à alta variação de temperatura, devido ao movimento do grupo,
- Presença de grande campo magnético, gerado no gerador,
- Não necessita alta precisão pois mede valores relativamente grandes
- Compras em lotes para redução de custo,

7.2. Escolha dos instrumentos

A tabela (tab.7.1) faz a comparação de todos os instrumentos mencionados, focando-se nas vantagens e desvantagens destes para a utilização no grupo turbina gerador.

Nela já está apresentada conclusões sobre a escolha dos instrumentos, sendo, praticamente, o resultado deste trabalho.

7.3. Instrumento para cada aplicação

Em seguida é apresentada a tabela que relaciona cada necessidade de medição com o instrumento mais indicado para tal aplicação e seu local de instalação (tab. 7.2).

Pressão	Elementos de coluna de líquidos	Devido à sua fragilidade e à gama de medida pouco elevada deste tipo de manômetro, eles não são utilizados em aplicações industriais
	Elementos elásticos	São robustos, pequenos, de operação simples e sem problemas de manutenção. Para o grupo é muito importante ter em medidor robusto, pois há muita variação na carga quando liga/desliga bombas, troca de filtro, filtro sujo, etc. Devem ser usados no grupo como indicadores locais de pressão
	Manômetros de tensão	Atualmente, este tipo de sensor é dificilmente encontrado no mercado para as necessidades do grupo e, portanto, torna-se mais caro. Ele foi substituído pelo transdutor de capacitância, cuja sensibilidade é maior e a variação por temperatura pode ser mais facilmente controlada.
	Magnético	A sua principal restrição é que as impurezas do fluido afetam sua precisão. Isto faz com que ele não deva ser utilizado em diversas aplicações da usina hidrelétrica, nas quais se medem água suja e óleo sujo.
	De capacitância	Suas poucas desvantagens, que são elevada impedância de entrada e sensibilidade a variações de temperatura, podem ser facilmente contornadas e minimizadas com sistemas de compensação digital, fazendo com que este tipo de transdutor seja o mais indicado para o grupo.
	Piezoelétrico	Este instrumento não possui restrição de uso no grupo e é mais barato que o de capacitância, mas no mercado ele está disponível para faixas de medição de pressão fixas e nem sempre se adaptam à necessidade de medição de certo local. Quando a faixa necessária é encontrada em piezoelétrico, este deve ser utilizado.

Vazão	Medidores de pressão diferencial	Além das vantagens já mencionadas, este instrumento é bom pois tem fácil fabricação diferenciada e portanto pode ser encomendado no mercado para a perda de carga desejada. Ele não é muito preciso, mas é suficiente para a maioria das aplicações no grupo.
	Medidores de área variável	Este sensor não deve ser utilizado no grupo por ter uma estrutura muito delicada, normalmente vidro e as aplicações no grupo exigem um invólucro mais rígido, tanto para o transporte, como manuseio e instalação.. Além disso ele exige limpezas freqüentes e sua exatidão influenciada por impurezas
	Medidores de deslocamento positivo	Estes instrumentos apresentam uma perda de carga considerável ao sistema do grupo, além de terem uma vida útil menor, já que seu constante movimento irá causar desgaste mais rapidamente. Portanto, não devem ser aplicados ao grupo.
	Medidores de massa	Estes instrumentos são mais caros, não sendo vantajosa a sua utilização.
	Magnético	O medidor magnético só pode ser usado em líquidos condutivos, como por exemplo água limpa. Ele é mais preciso e mais barato que os de pressão diferencial para tubulações com grandes diâmetros.
	Ultrasônico	Este instrumento é muito preciso e confiável, mas também muito mais caro. É recomendável a compra de pelo menos um medidor ultrasônico para a aferição e testes dos outros instrumentos.

Temperatura	Sistema Termométrico de enchimento	Sua estrutura é muito delicada, além de medir pequenas faixas de temperatura. Não é recomendável o seu uso.
	Termômetro bimetalico	Apesar de não ser muito preciso este sensor apresenta diversas vantagens como já mencionado. Ele se aplica perfeitamente a diversas medições locais do grupo.
	Termômetros de resistência	No grupo, não é necessário ter a classe alta de precisão, portanto o custo é o mais baixo. Ele tem facilidade de leitura remota, e pode ir direto ao PLC. Este sensor é o mais indicado para as leituras remotas do grupo.
	Pares termoeletricos	Este instrumento é mais barato e menos preciso que os termômetros de resistência, mas é necessário o uso de cabos de compensação para a leitura remota, o que encarece o sistema. Portanto torna-se desvantajoso seu uso.
	Pirômetro de radiação	O pirômetro de radiação é muito caro e não deve ser utilizado.

Nível	Indicadores visuais	Ele deve ser usado o grupo somente para indicação local
	Bóias (flutuadores)	Este instrumento apresenta erros quando usado em líquidos sujos, com impurezas, ou em fluidos com grande agitação, e deve ser constantemente limpo. Portanto, ele seu uso é recomendável apenas na medição de líquidos limpos, filtrados e com pouca agitação.
	Condutividade elétrica	Muitos fluidos a ser avaliado no grupo são não condutores, o que impede o uso deste instrumento.
	Deslocamento	Normalmente as dimensões do medidor por deslocamento são grandes, o que impede sua alocação em várias instalações do grupo, além de exigir constante limpeza.
	Pressão hidrostática	Neste caso deve-se levar em conta um fator muito importante: a maior parte do grupo turbina gerador estará girando e muito dos líquidos que se quer medir o nível estarão em movimento centrífugo. É importante perceber que a medição de pressão hidrostática será errônea nestes casos.
	Capacitância elétrica	Além de detectar níveis de máximo e mínimo, ele também pode medir nível contínuo. Ele tem baixo custo, é muito versátil e de fácil instalação. É o mais indicado para leitura remota no grupo.
	Radiação	Muito caro, não sendo vantajosa sua utilização.

Posição	Mecânicos	A medição de posição no grupo deve ser toda feita por medidores mecânicos. Isto porque este é o modo mais barato, convencional e confiável que existe e no grupo é fácil de instalar . Os outros tipos são mais caros e, assim, usados em aplicações com alguma exigência específica, tais como contagem, dificuldade de instalação, medição em movimento, medição sem contato, etc.
	Sensor de proximidade magnética	A medição por sensor magnético pode ser errônea devido ao campo magnético presente dentro do grupo turbina gerador, já que este instrumento tem um invólucro frágil, que não consegue isolar o campo presente.
	Detetor de limite indutivo	Mesmo problema que o magnético.
	Detetor de limite capacitivo	Mais caro e muito sensível
	Detetor de limite óptico	Mais caro
	Detetor de limite ultrasônico	Muito caro

Tab. 7.1 - Comparação entre os sensores na aplicação ao grupo

Subsistema	Grandeza	Local	Motivo da Medição	Sensor Indicado	Observação
1. Conduto forçado, Válvulas, Comportas e Caixa Espiral					
a) Caixa Espiral	Pressão	Entrada da Caixa Espiral	Mede a pressão e a pressão diferencial na água da caixa espiral	Capacitivo ou Piezoresistivo	Usa o piezoresistivo se houver a faixa de pressão desejada
	Vazão	Entrada da Caixa Espiral	Mede a vazão da água que entra para o rotor	Pressão diferencial	Este é um caso específico, onde a obstrução pode ser feita pelas própria palhetas do distribuidor.
b) Tubo de sucção	Pressão	Tubo de sucção	Mede pressão positiva, negativa ou vácuo	Capacitivo ou Piezoresistivo	

2. Turbina						
a) Pré-distribuidor						
b) Distribuidor	Posição	Servomotores	Verifica trava do distribuidor inserida	Mecânico		
	Posição	Palhetas	Verifica pino rompido	Mecânico		
	Posição	Aro de regulação	Garante distribuidor fechado	Mecânico		
c) Rotor da Turbina						
d) Tampa da turbina	nível	Reservatório de óleo infiltrado na tampa da turbina	Limita o nível do óleo e liga as bombas	Capacitivo		
	nível	Tampa interna da turbina	Verifica e limita o nível de água e liga as bombas	Capacitivo		

3. Mancais e Eixo					
a) mancal	Temperatura	Segmento do mancal	Mede e limita a temperatura do segmento	Termômetro de resistência	
	Temperatura	Cuba de óleo do mancal	Mede a temperatura do óleo	Termômetro de resistência	
	Nível	Cuba de óleo do mancal	Mede o nível do óleo	Capacitivo	
- Sistema de Circulação e Resfriamento do Óleo	Temperatura	Tubulação de entrada e de saída de óleo do trocador de calor	Mede a temperatura do óleo	Termômetro de resistência	
	Vazão	Tubulação de saída de óleo do trocador de calor	Mede a vazão do óleo	Pressão Diferencial	

	Pressão	Tubulação de óleo do mancal	Limita a pressão do óleo e transfere bomba	Elemento Elástico	
	Pressão	Filtro duplex da unidade hidráulica	Detecta o filtro sujo	Elemento Elástico	
	Vazão	Tubulação de saída de água do trocador de calor do mancal	Mede a vazão de água	Pressão Diferencial	
	Temperatura	Tubulação de entrada e de saída de água do trocador de calor do mancal	Mede a temperatura da água	Termômetro de resistência	
- Sistema de Injeção de Óleo a Alta Pressão do Mancal de Escora	Pressão	Tubulação de óleo de alta pressão do mancal	Mede a pressão do óleo	Elemento Elástico	

c) Eixo	Posição	Pêndulo elétrico	Verifica pêndulo atuado	Mecânico	
	Posição	Pêndulo hidráulico	Verifica pêndulo atuado	Mecânico	
	Posição	Válvulas de aeração	Verifica válvulas abertas	Mecânico	
- Sistema de Água Filtrada da Vedação Principal do Eixo	Pressão	Tubulação de água após o filtro	Limita a pressão de água	Elemento Elástico	
	Temperatura	Vedação do eixo por água pressurizada	Mede a temperatura da água	Termômetro de resistência	
	Fluxo	Tubulação de água após o filtro	Mede a vazão de água	Pressão Diferencial	

5. Gerador						
a) Gerador	Temperatura	Enrolamento do estator	Mede a temperatura do enrolamento	Termômetro de resistência		
	Temperatura	Núcleo do estator	Mede a temperatura do núcleo	Termômetro de resistência		
- Sistema de Frenagem/levantamen	Pressão	Reservatório de ar de frenagem	Mede a pressão de ar	Elemento Elástico		
	Posição	Macaco	Verifica freios aplicados	Mecânico		
	Pressão	Tubulação de óleo de levantamento	Mede a pressão de óleo	Elemento Elástico		
	Posição	Painel de levantamento	Verifica o levantamento	Mecânico		
- Acesso ao Gerador	Posição	Porta do poço do gerador	Indicação de porta aberta	Mecânico		

7. Sistemas Auxiliares						
Sistema de Filtragem de água de resfriamento	Pressão	Tubulação de água antes do filtro	Mede pressão de água	Elemento Elástico		
	Temperatura	Tubulação de água antes do filtro	Mede temperatura de água	Termômetro de resistência		
	Pressão	Filtro	Indica filtro sujo	Elemento Elástico		
	Temperatura	Tubulação de água após o filtro	Mede temperatura da água	Termômetro de resistência		
	Vazão	Tubulação de água após o filtro	Mede vazão da água	Pressão Diferencial		
Sistema de Resfriamento do Ar	Vazão	Tubulação principal de saída de água dos	Mede vazão de água	Magnético		Tubo com grande diâmetro

	Temperatura	Lado do ar quente dos trocadores de calor do gerador	Mede a temperatura do ar	Termômetro de resistência	
	Temperatura	Lado do ar frio dos trocadores de calor do gerador	Mede a temperatura do ar	Termômetro de resistência	
Sistema Anti-Incêndio	Temperatura	Interno ao poço do gerador, ao lado dos trocadores de calor	Mede a temperatura interna		
Sistema de Aquecimento para Máquina Parada	Temperatura	Interno ao poço do gerador, acima dos trocadores de calor	Mede a temperatura interna	Termômetro de resistência	
Sistema de Iluminação e Tomadas					

Tab. 7.2 - Indicação do melhor instrumento e sua localização para cada medição do grupo

8. Profibus PA

O Profibus PA é uma tecnologia para o recebimento dos sinais da instrumentação. Nesta tecnologia, cada instrumento é ligado diretamente a um controle local (fig. 8.1), diferentemente da tecnologia mais usada atualmente nas usinas hidrelétricas, na qual todos os sensores de campo são ligados em série e então ligados ao painel local.

Com esta configuração (fig. 8.2), é possível dar um tratamento personalizado aos sinais de cada sensor e pode-se usar os chamados sensores “inteligentes” para a leitura e análise direta de seu sinal.

Existem vantagens potenciais da utilização desta tecnologia, onde poderia-se resumir nas vantagens de funcionalidades (transmissão de informações confiáveis, tratamento de status das variáveis, sistema de segurança em caso de falha, equipamentos com capacidades de auto-diagnose, rangeabilidade dos equipamentos, alta resolução nas medições, etc) e benefícios econômicos pertinentes as instalações (redução de até 40% em alguns casos em relação aos sistemas convencionais), custos de manutenção (redução de até 25% em alguns casos em relação aos sistemas convencionais) e menor tempo de Startups.

O estudo mais detalhado do Profibus PA é algo importante para o desenvolvimento da instrumentação e automação de uma usina hidrelétrica, e fica como sugestão para trabalhos futuros. E para o estudo do Profibus PA pode-se usar como base, este trabalho, para a seleção de sensores que permitam tratamento de sinais, assim como suas características técnicas e de leitura.

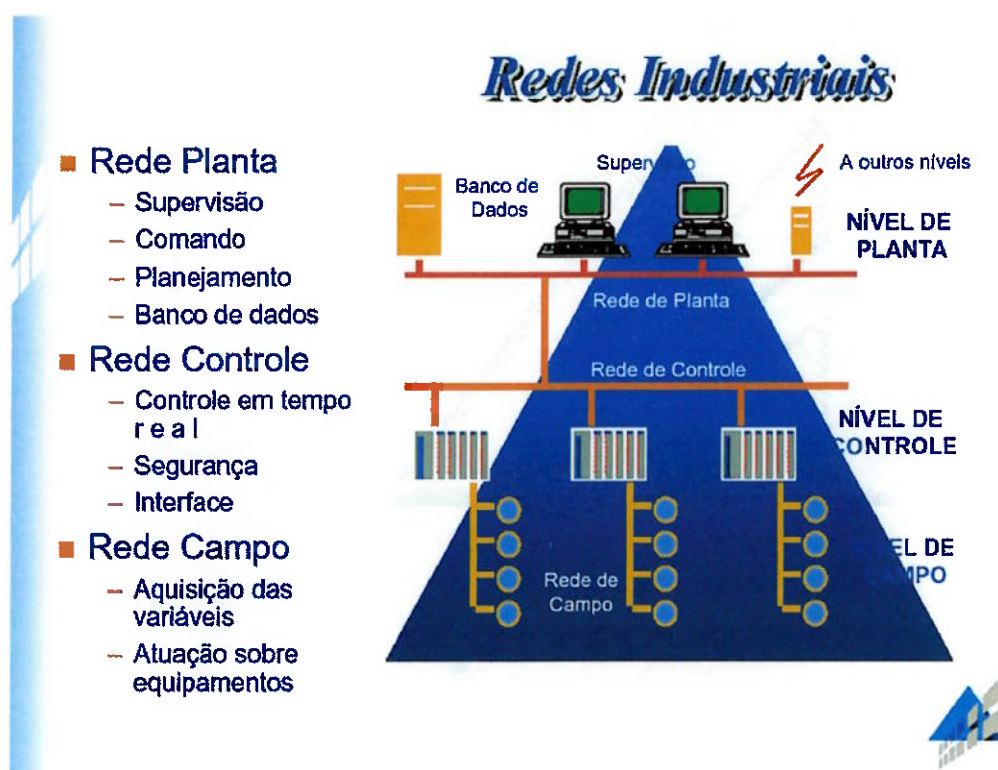


Fig. 8.1 - Configuração do Profibus PA

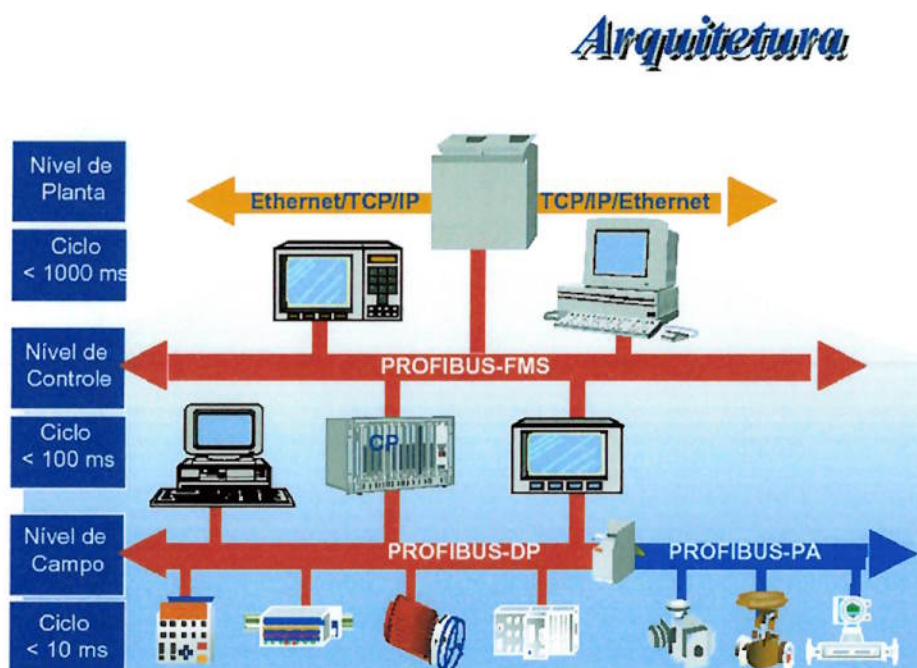


Fig. 8.2 - Arquitetura do controle com a utilização de Profibus PA

9. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo analisar os fatores envolvidos na escolha da instrumentação para automação do grupo turbina gerador de uma usina hidrelétrica.

Pode-se concluir que são diversos os fatores que devem ser levados em conta, desde o funcionamento de toda a usina hidrelétrica, até o funcionamento dos diversos tipos de instrumentos existentes, passando pelas necessidades de medição e análise das grandezas medidas.

Todos estes fatores foram aqui analisados, permitindo um resultado embasado e conciso na indicação dos sensores mais indicados para cada medição do grupo turbina gerador.

O presente trabalho pode ser uma boa base para:

- Futura escolha de sensores para o grupo turbina gerador
- Entendimento de falhas de instrumentos
- Desenvolvimento de novos sensores
- Desenvolvimentos na automação com Profibus PA
- Estudos sobre instrumentação e automação
- Estudo sobre o funcionamento de uma usina hidrelétrica

10. Lista de Referências

- [1] ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.
- [2] Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos, Uma Introdução ao Estudo, Gilio Aluísio Simões, 2000
- [3] Manual de Instrumentação, Elonka, Stephen e Parsos, Alonzo. Volume 1, Sistemas de Medição
- [4] – Abrahão, Eric Moraes. Metodologia para automação de pequenas centrais hidrelétricas. Dissertação de mestrado, EFEI, Itajubá, dezembro de 1999.
- [5] ISA. *Industrial temperature handbook*.
- [6] Introdução a Instrumentação Biomédica, Transdutores de fluxo, Procad, ufpb/ufba/ufma/ufpa
- [7] Sensores de Nível e Capacidade.ppt , Prof. Uwimana, Eugène e Acadêmicos:. Barros e Valente, Universidade Católica Dom Bosco, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Curso de Engenharia de Computação
- [8] Instrumentação I – Apontamentos – Gustavo da Silva – Ano Lectivo 2001/2002 – Aulas T12/13/14
- [9] http://www.furnas.com.br/portug/institucional/func_hidroelee.htm
- [10] <http://www.itaipu.gov.br>
- [11] <http://vhdintra.voith.de>
- [12] <http://www.ufrgs.br/lmm/mec017/termomdiversos.htm>
- [13] <http://www.levelcontrol.com.br/visortub127.htm>
- [14] <http://www.terravista.pt/nazare/5586/Sensores.htm>
- [15] www.endress.com
- [16] <http://www.altus.com.br/Eventos/Altuspartners/Altuspartners2001>