



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UMA
CALDEIRA FLAMOTUBULAR A GLP, COM FOCO NOS
CONTROLES DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E PRODUÇÃO DE
VAPOR**

Evaldo Alves Silva Junior

Araxá, Julho de 2015

Evaldo Alves Silva Junior

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE
UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR A GLP, COM FOCO NOS
CONTROLES DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E PRODUÇÃO
DE VAPOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação Industrial.

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Linhares

Araxá, Julho de 2015

Evaldo Alves Silva Junior

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE
UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR A GLP, COM FOCO NOS
CONTROLES DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E PRODUÇÃO
DE VAPOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação Industrial.

Data de aprovação: ____/ ____/ ____

Banca Examinadora:

Alexandre Dias Linhares - Orientador
Engenheiro Mecânico Especialista em Automação de Processos Contínuos; Mestre em Engenharia de Materiais; Professor do CEFET MG – Unidade Araxá

Mac Kinley Ferreira Cardoso
Engenheiro Mecânico e Engenheiro Eletricista – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)

Domingos Sávio de Resende
Engenheiro Eletricista; Especialista em Automação de Processos Contínuos; Doutor em Engenharia de Materiais; Professor do CEFET MG – Unidade Araxá.

Araxá, Julho de 2015

À minha esposa Priscila, pelo apoio e amor incondicionais.

Aos meus pais, pelos ensinamentos que me acompanharão por toda a vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas oportunidades nos dadas nesta vida.

A todos os professores do CEFET-MG / Campus Araxá, pelo conhecimento que nos foi passado.

Ao meu Orientador Professor Alexandre Linhares pelas certas observações e constante apoio técnico em todo o Trabalho.

A todos àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

Muito Obrigado.

*“O maior inimigo do conhecimento não é a
ignorância, mas sim a ilusão do
conhecimento.”*

Stephen Hawking

RESUMO

Controlar ou monitorar uma caldeira são atividades de grande importância, por se tratar de um equipamento que trabalha com altos valores de temperatura e pressão (utilizando combustíveis altamente inflamáveis), além de utilizar água tratada como insumo principal. Nada mais justificável então, do que se criarem métodos de controle efetivos, dedicados a este tipo de equipamento. É de suma importância que a automação aplicada ao sistema forneça segurança operacional para a caldeira, ou seja, garanta a falha segura. Não menos importante, deve-se salientar que um controle efetivo do processo de queima e evaporação influenciará benéficamente na economia de combustível do queimador, bem como reduzirá o desperdício de água tratada, recurso tão valioso quanto economicamente caro. Com base no exposto, o trabalho consiste no estudo e aplicação de técnicas adequadas de controle e automação em uma caldeira, cujo combustível é o gás liquefeito de petróleo (glp), com foco nos controles de combustível e de produção de vapor da caldeira.

Palavras Chave

Caldeiras, Controle, Consumo de combustível, Historiador.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da Máquina de Heron.....	13
Figura 2 – Representação esquemática de uma termoelétrica.....	14
Figura 3 - Exemplo de caldeira flamotubular.....	18
Figura 4 – Representação esquemática de uma caldeira flamotubular.....	19
Figura 5 - Representação esquemática de uma caldeira flamotubular vertical.....	20
Figura 6 – Exemplo de caldeira flamotubular horizontal.....	21
Figura 7 – Representação esquemática da caldeira Cornuália.....	21
Figura 8 – Representação esquemática da caldeira Lancaster.....	22
Figura 9 – Representação esquemática da caldeira tipo Escocesa.....	23
Figura 10 - Exemplo de caldeira aquatubular.....	24
Figura 11 – Representação esquemática de uma caldeira aquatubular.....	25
Figura 12 – Representação esquemática de uma caldeira aquatubular de tubos retos ...	26
Figura 13 – Representação esquemática de uma caldeira aquatubular de tubos curvos	27
Figura 14 - Exemplo de caldeira aquatubular compacta.....	28
Figura 15 – Representação esquemática – caldeira aquatubular de circulação forçada.	29
Figura 16 – Válvula de segurança (alívio de pressão) para caldeiras.....	31
Figura 17 – Manômetro instalado em caldeira.....	31
Figura 18 - Bomba d'água para alimentação de caldeira.....	32
Figura 19 - Válvula de fundo de caldeira.....	32
Figura 20 - Visor e transmissor de nível utilizados em caldeiras.....	33
Figura 21 - Placa de identificação de caldeira.....	34
Figura 22 - Tubulão superior de uma caldeira aquatubular com elevada incrustação de lama.....	35
Figura 23 - Processo de corrosão localizada na carcaça de uma caldeira flamotubular.	36
Figura 24 - Válvula de regulação de vapor de uma turbina com deposição de sais provenientes de arrastes.....	36
Figura 25 - Explosão de caldeira em Skikida, Argélia - 2004.....	37
Figura 26 - Calibração de uma válvula de segurança.....	38
Figura 27 - Inspeção por ultrassom em serpentina de superaquecedor de vapor.....	39
Figura 28 - Chave de nível modelo <i>Soliphant</i> ®.....	43
Figura 29 - Transmissor de nível ultrassônico FMU 40®, da Endress + Hauser.....	45
Figura 30 - Representação esquemática de um manômetro com tubo de bourdon.....	46
Figura 31 - Manômetro de tubo em "U".....	47
Figura 32 - Representação esquemática de uma célula capacitiva.....	48
Figura 33 - Transmissor de pressão LD301®, da SMAR.....	49
Figura 34 - Exemplo de pressostato com sistema de comutação por mola.....	50
Figura 35 - Pressostato PN3094®, da IFM.....	51
Figura 36 - Representação esquemática de medidor de vazão eletromagnético.....	53
Figura 37 - Medidor de vazão tipo eletromagnético ADMAG-AXR®, da YOKOGAWA.....	54
Figura 38 - Representação esquemática do medidor de vazão tipo ultrassom.....	55
Figura 39 - Medidor de vazão <i>Prosonic Flow</i> ®, da ENDRESS + HAUSER.....	56
Figura 40 - Termopares diversos.....	57
Figura 41 - Tipos de cabos de compensação para termopares.....	58
Figura 42 - Termoresistências tipo Pt-100.....	59
Figura 43 - Exemplos de termistores.....	60
Figura 44 - Transmissor de temperatura IPAQ-L®, da INOR.....	61

Figura 45 - Sensores indutivos SENSE	62
Figura 46 - Sensores magnéticos WEG	63
Figura 47 - Válvula tipo guilhotina	65
Figura 48 - Válvula tipo borboleta	65
Figura 49 - Atuador pneumático linear	66
Figura 50 - Atuador pneumático Rotativo	66
Figura 51 - Representação esquemática - atuadores simples ação	67
Figura 52 - Representação esquemática de atuador de dupla ação.....	67
Figura 53 - Válvula direcional duplo solenoide	68
Figura 54 - Primeiro CLP, com a equipe que o desenvolveu	70
Figura 55 - Painel de acionamento - lógica a relés.....	71
Figura 56 - Diagrama em blocos típico de um CLP	71
Figura 57 - Exemplo de lógica <i>Ladder</i>	73
Figura 58 - Sistemas SCADA baseados em telemetria	75
Figura 59 - Tela de um sistema supervisório atual.....	75
Figura 60 - Arquitetura típica de um <i>software</i> historiador	76
Figura 61 - Janela de tendências de um historiador.....	77
Figura 62 - Pirâmide da Automação.....	78
Figura 63 - Meio físico da rede ASi®	79
Figura 64 - Meio físico da rede <i>Devicenet</i> ®	79
Figura 65 - Meio físico da rede <i>Profibus DP</i> ®	80
Figura 66 - Exemplo de rede <i>Hart</i> ®.....	80
Figura 67 - Exemplo de controle manual	82
Figura 68 - Resposta de um controle "liga-desliga"	83
Figura 69 - Resposta de um controlador com ação proporcional	84
Figura 70 - Resposta da variável de processo para um controlador proporcional (P)....	85
Figura 71 - Resposta da variável de processo para um controlador proporcional + integral (PI).....	86
Figura 72 - Resposta da variável de processo a um controlador proporcional + derivativo (PD)	87
Figura 73 - Resposta de um controlador proporcional + integral + derivativo (PID)	88
Figura 74 - Diagrama em blocos - arquitetura <i>feedback</i>	89
Figura 75 - Exemplo de controle por antecipação - <i>feedforward</i>	90
Figura 76 - Exemplo de controle em cascata.....	91
Figura 77 - CLP instalado.....	93
Figura 78 - Tela inicial do <i>software RSLogix 5000</i> ®.....	95
Figura 79 - Diagrama do controle de Pressão da Caldeira	96
Figura 80 - Trecho da lógica contendo escalonamento da vazão de glp em função da demanda de vapor.....	97
Figura 81 - Trecho da lógica que calcula o <i>setpoint</i> externo para alimentar a FIC-03 ..	99
Figura 82 - Medidor <i>Proline Promass P</i> ®, da <i>Endress and Hauser</i>	99
Figura 83 - Queimador modelo G70 - <i>Wheishaupt</i>	100
Figura 84 - Servo motor e curvas de ajuste de combustão	100
Figura 85 - Representação esquemática do acionamento do servomotor.....	101
Figura 86 - Servomotor com potenciômetro acoplado e transdutor	102
Figura 87 - Trecho da lógica contendo o cálculo de histerese para o servomotor	103
Figura 88 - Relés para acionamento do servomotor	103
Figura 89 - Trecho da lógica para abertura do servomotor	104
Figura 90 - Trecho da lógica para fechamento do servomotor.....	104
Figura 91 - Arquitetura do controle de nível a três elementos	105

Figura 92 - Tendência do comportamento da pressão da caldeira	107
Figura 93 - Tendência do comportamento do nível da caldeira	107
Figura 94 - Dados estatísticos obtidos com a ferramenta " <i>Statistics</i> "	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas da caldeira estudada	92
Tabela 2 - Características técnicas do CLP utilizado	94

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 CALDEIRAS.....	17
3.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES	18
3.1.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES.....	23
3.1.3 SEGURANÇA EM CALDEIRAS	30
3.2 INSTRUMENTAÇÃO	40
3.2.1 DEFINIÇÕES GERAIS	40
3.2.2 SENSORES E TRANSMISSORES DE NÍVEL.....	41
3.2.3 SENSORES E TRANSMISSORES DE PRESSÃO	45
3.2.4 SENSORES E TRANSMISSORES DE VAZÃO.....	51
3.2.5 SENSORES E TRANSMISSORES DE TEMPERATURA	56
3.2.6 SENSORES E TRANSMISSORES DE POSIÇÃO.....	61
3.2.7 VÁLVULAS DE CONTROLE.....	64
3.3 CONTROLE AUTOMÁTICO	69
3.3.1 FERRAMENTAS DE CONTROLE	69
3.3.2 CONTROLE DE PROCESSOS	81
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	92
4.1 CARACTERÍSTICAS DA CALDEIRA ESTUDADA	92
4.2 CARACTERÍSTICAS DO CLP UTILIZADO	93
4.3 DISPOSITIVOS E MÉTODOS ENVOLVIDOS NO CONTROLE DE PRESSÃO	95
4.3.1 ARQUITETURA DO CONTROLE DE PRESSÃO.....	95
4.3.2 O CONTROLE DE COMBUSTÃO	100
4.3 DISPOSITIVOS E MÉTODOS ENVOLVIDOS NO CONTROLE DE NÍVEL	105
5 RESULTADOS	106
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	108
7 CONCLUSÃO.....	110
8 REFERÊNCIAS	112

1 INTRODUÇÃO

Heron de Alexandria desenhou, por volta do século I d.c., a “eolípila”, também denominada “Máquina de Heron” (figura 1), que seria a primeira máquina térmica documentada.

[...] O invento que o tornou famoso consiste em uma esfera oca, na qual estão presos dois tubos recurvados. Fervendo a água contida na esfera, o vapor escapa pelos tubos, e a esfera gira rapidamente como resultado da lei agora chamada de ação e reação. Trata-se de um processo primitivo de converter a energia do vapor em movimento, e o aparelho pode ser chamado máquina a vapor. (BANNWART; MESQUITA NETO; DEDINI; CARAM, ca. 1993)

Figura 1 – Representação da Máquina de Heron



Fonte: http://3.bp.blogspot.com/-5OewERYYMZ0/Ur9N_mQnx3I/AAAAAAAAABaY/0TKuw6cusgQ/s1600/Aeolopito.gif – Acessado em 04/06/2015

Embora de grande importância, tal máquina não chegou a realizar nenhum trabalho útil com o seu movimento. Apenas no século XVIII, com a Revolução Industrial, o vapor passou a ser utilizado como força motriz, substituindo a força do homem e de animais, alavancando o desenvolvimento da tecnologia mundial.

Hoje, a geração de vapor é uma importante operação industrial, presente em uma vasta gama de processos, como geração de energia elétrica, indústrias de papel e celulose, usinas de açúcar e álcool, navegação marítima, etc. As agroindústrias, em geral, são grandes consumidoras de vapor em seus processos de transformação de matérias-primas em produtos industrializados (ROCCO & MORABITO, 2012).

No Brasil, o vapor industrial geralmente é produzido por caldeiras que podem funcionar com óleo, carvão, biomassas ou gases inflamáveis. “As caldeiras movidas a biomassas são as mais utilizadas e consomem diversos tipos de materiais vegetais, entre os mais comuns estão o bagaço de cana-de-açúcar, o cavaco de madeira, a lenha e a palha de arroz” (ROCCO & MORABITO, 2012). Neste âmbito, pode-se destacar a geração de energia através de termoelétricas (figura 2), que são alternativas sustentáveis para a produção de energia elétrica.

Figura 2 – Representação esquemática de uma termoelétrica



Fonte: http://www.prysmianclub.com.br/revista/PClub_21/materias/imagens/alt_foto7.jpg

- Acesso em 05/07/2015

Uma caldeira é um equipamento que trabalha com altos valores de temperatura e pressão, utilizando combustíveis com alto poder de combustão. Portanto, faz-se necessário o frequente e correto monitoramento de suas variáveis, bem como o controle adequado destas, a fim de se garantir o perfeito funcionamento e segurança operacional deste equipamento.

Não se pode deixar de mencionar que, por ser um equipamento que pode consumir combustíveis não renováveis, e que consome água tratada como insumo principal, é de suma importância que o controle automático atue corretamente, prevenindo o desperdício na combustão e na evaporação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar técnicas de controle em uma caldeira flamotubular, utilizando ferramentas de controle não convencionais (controle cascata, *feedforward*) e avaliando o desempenho das variáveis controladas (produção de vapor e consumo de combustível).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 – Descrever o funcionamento de uma caldeira flamotubular que utiliza como combustível o GLP (gás liquefeito de petróleo);

2.2.2 – Aplicar e descrever as técnicas de controle utilizadas para o controle da caldeira, focadas no controle de combustível e de produção de vapor;

2.2.3 – Demonstrar os resultados obtidos com a implementação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CALDEIRAS

Por definição da Norma Regulamentadora nº13, temos que:

Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares. (NR-13, 1978)

Uma caldeira é um equipamento destinado a produzir vapor d'água a partir da queima de um determinado tipo de combustível. Sua montagem é feita de forma a permitir a troca de calor entre os gases quentes provenientes da queima e a água, principal insumo da caldeira. Esta água é então evaporada, assumindo o estado de vapor, e este será distribuído para os processos seguintes.

Cada caldeira possui suas próprias características físicas, de modo a atender melhor o tipo de aplicação a qual foi destinada, levando em consideração os valores de pressão e temperatura necessários ao vapor produzido. Porém, podemos traçar algumas generalidades entre os diversos tipos de caldeiras.

Segundo BEGA (2003, p.35), “uma caldeira é composta de dois sistemas básicos separados. Um é o sistema vapor-água, também chamado lado de água da caldeira, e o outro é o sistema combustível-ar-gás da combustão, também chamado de lado de fogo da caldeira”.

Para o sistema denominado lado de água da caldeira, a sua entrada é a água, que recebe o calor proveniente da combustão através de um condutor de metal, e é aquecida, deixando o sistema na forma de vapor. No sistema lado de fogo da caldeira, as suas entradas são o combustível a ser queimado e o ar de combustão. Postos a se misturarem corretamente antes da câmara de combustão, ao atingirem esta última são queimados, fazendo com que haja a transformação da energia química do combustível em energia

térmica, ou simplesmente, calor. Este último deixa este sistema em direção ao lado de água da caldeira, para a geração do vapor.

Em relação ao sistema de troca de calor, uma caldeira pode ser classificada como flamotubular ou aquatubular. Podemos descrevê-las da seguinte maneira:

- **Caldeira flamotubular:** caldeira em que os gases quentes provenientes da combustão passam por tubos metálicos dispostos como uma serpentina, envoltos pela água que será aquecida;
- **Caldeira aquatubular:** neste tipo de caldeira, é a água que circula no interior dos tubos metálicos (em geral de menores diâmetros e em maior número do que na flamotubular), tendo os gases da combustão ao seu redor.

3.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

A figura 3 nos mostra um exemplo de caldeira flamotubular. Neste tipo de caldeira, os gases resultantes da queima do combustível são direcionados para circularem nas partes internas dos tubos de troca de calor, tubos estes que estão envolvidos com a água que irá se transformar em vapor. Como estes tubos estão totalmente submersos na água, a troca de calor se dá por toda a sua superfície externa.

Figura 3 - Exemplo de caldeira flamotubular

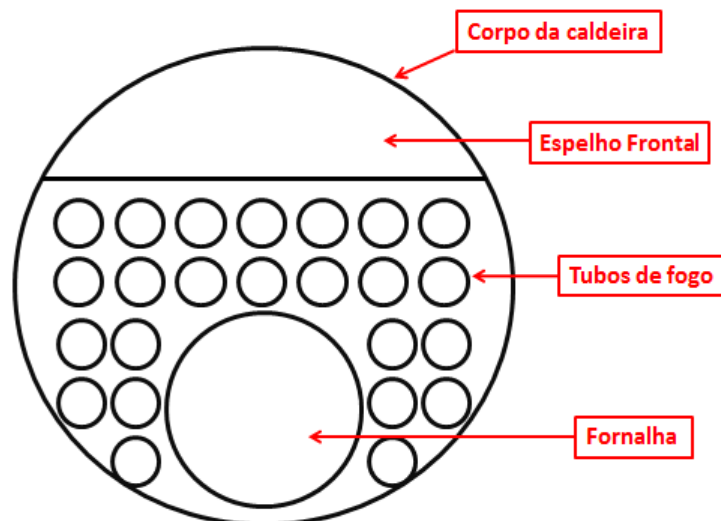


Fonte: <http://www.solucoesindustriais.com.br> – Acessado em 04/06/2015

Em geral, as caldeiras flamotubulares são utilizadas em aplicações de pequeno porte, com pressões de trabalho de até 15 Kgf/cm² e produção de vapor de até 15000 kg/h; porém, já existem fabricantes, como a *Benecke*, que produzem caldeiras flamotubulares que podem chegar a 30 Kgf/cm² de pressão de trabalho e produção de vapor de 30000kg/h.

Apesar de termos inúmeros fabricantes de caldeiras deste tipo, e consequentemente vários modelos destas caldeiras, existem algumas partes principais, comuns a qualquer caldeira flamotubular, como mostra a figura 4:

Figura 4 – Representação esquemática de uma caldeira flamotubular



Fonte: Autoria própria.

- **Corpo da caldeira, casco ou carcaça:** construído, em geral, de chapas de aço carbono curvadas e soldadas. Suas dimensões estão inerentemente ligadas à capacidade de produção de vapor da caldeira;
- **Espelhos:** são chapas planas cortadas do mesmo diâmetro interno do corpo da caldeira, soldadas na parte interna frontal e traseira da caldeira. Possuem furos onde os tubos de fogo são instalados;
- **Tubos de fogo ou de fumaça:** são os tubos responsáveis pela absorção de calor proveniente dos gases de combustão. Realizam a troca térmica com a água que está ao seu redor, transformando-a em vapor.
- **Fornalha ou tubo fornalha:** é a câmara de queima da caldeira, que recebe a chama do queimador e direciona os gases quentes da combustão aos tubos de fogo.

Como vantagens das caldeiras flamotubulares, em geral, podemos destacar:

- Compacta, portanto há um custo de instalação mais baixo;
- Atendem bem a variações rápidas na demanda de vapor;
- Bastante robustas.

Em contrapartida, existem algumas desvantagens:

- Pressão máxima de trabalho menor em relação à aquatubular;
- Baixo rendimento térmico;
- Partida lenta, em função da necessidade de se aquecer todo o volume de água.

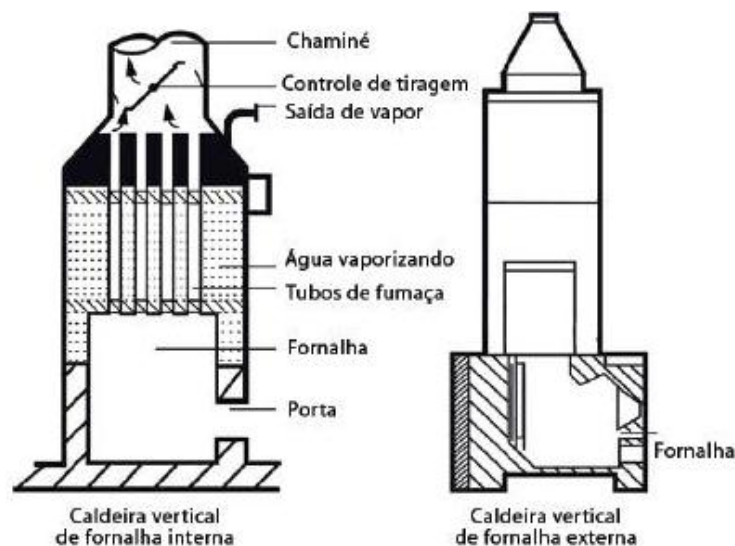
Podemos ainda, classificar as caldeiras flamotubulares em dois grupos, quanto à disposição de seus tubos: **caldeira de tubos verticais ou horizontais**.

Caldeira flamotubular de tubos verticais

Nestas caldeiras, sua construção é feita de tal forma que os tubos de fogo são dispostos verticalmente no corpo da caldeira, fechado nas extremidades pelos espelhos. A fornalha fica no corpo cilíndrico logo abaixo do espelho inferior. Os gases de combustão provenientes da queima sobem através dos tubos, aquecendo e vaporizando a água que está em volta deles.

Podem ter fornalhas externas ou internas, como mostra a figura 5, dependendo do tipo de combustível a ser utilizado.

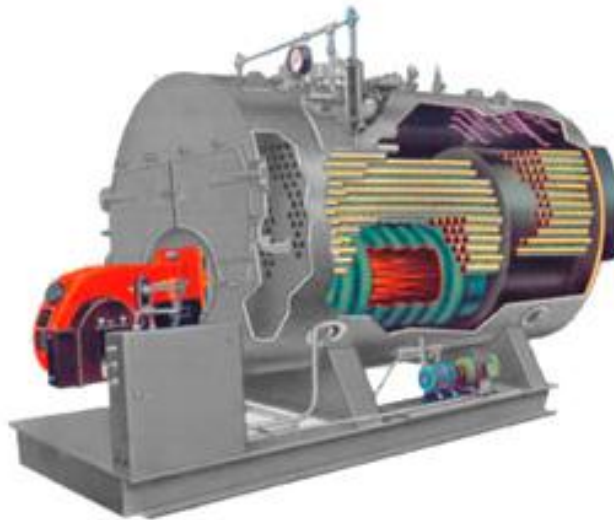
Figura 5 - Representação esquemática de uma caldeira flamotubular vertical



Caldeira flamotubular de tubos horizontais

Já neste tipo de caldeiras (exemplo na figura 6), os tubos de fogo são dispostos horizontalmente no corpo da caldeira, também fechado nas extremidades pelos espelhos. A fornalha fica no corpo cilíndrico logo abaixo do espelho frontal. Os gases de combustão provenientes da queima do combustível passam pela fornalha e são direcionados aos tubos de fogo, onde trocarão calor com a água a ser aquecida.

Figura 6 – Exemplo de caldeira flamotubular horizontal

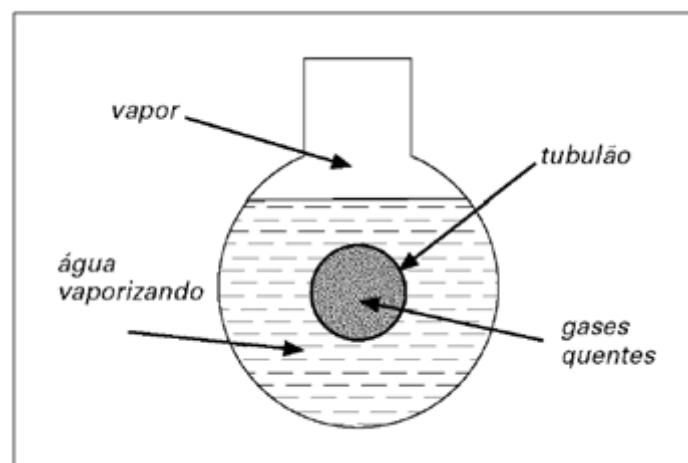


Fonte: <http://www.ctamaquinas.com.br> – Acessado em 04/06/2015

Existem alguns tipos diferentes de caldeiras flamotubulares horizontais, dos quais podemos citar como principais:

1. Caldeira Cornuália, vista na figura 7:

Figura 7 – Representação esquemática da caldeira Cornuália



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAALekAD/caldeiras-flamotubulares> – Acessado em 04/06/2015

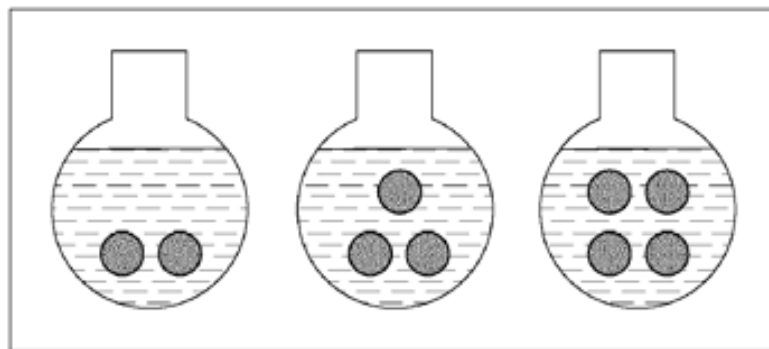
A caldeira Cornuália é um dos primeiros modelos desenvolvidos, constituída apenas de um tubo horizontal que direciona os gases da fornalha para a saída de gases quentes.

Características principais:

- Pressão máxima de operação: 10 Kgf/cm²;
- Taxa de vaporização específica: 12 a 14 quilos de vapor por metro quadrado (vapor/m²);
- Área de troca térmica: máximo de 100 m².

2. Caldeira Lancaster, demonstrada na figura 8:

Figura 8 – Representação esquemática da caldeira Lancaster



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAALEkAD/caldeiras-flamotubulares> –
Acessado em 04/06/2015

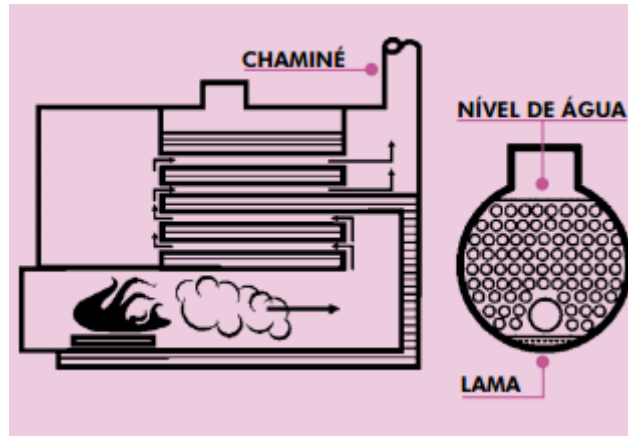
A caldeira Lancaster possui construção muito similar à Cornuália, porém é constituída de dois a quatro tubos internos, permitindo uma maior área de troca térmica.

Características principais:

- Pressão máxima de operação: 10 Kgf/cm²;
- Taxa de vaporização específica: 15 a 18 quilos de vapor por metro quadrado (vapor/m²);
- Área de troca térmica: 120 a 140 m².

3. Caldeira Escocesa:

Figura 9 – Representação esquemática da caldeira tipo Escocesa



Fonte: http://engmadeira.yolasite.com/resources/Caldeiras_texto.pdf - Acessado em 04/06/2015

A caldeira Escocesa (acima, figura 9) foi criada basicamente para o uso marítimo, e é o modelo de caldeira industrial mais difundido do mundo. Geralmente destinada a queima de óleo ou gás. É multitubular, ou seja, possui vários tubos de fogo, o que aumenta significativamente a área da superfície de troca térmica.

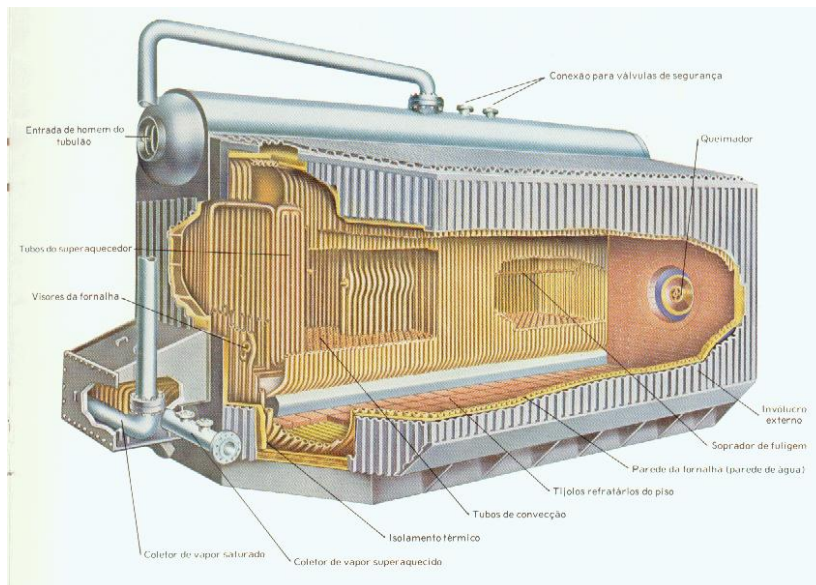
Características principais:

- Pressão máxima de trabalho: 18 Kgf/cm²;
- Taxa de vaporização específica: 30 a 35 quilos de vapor por metro quadrado (vapor/m²).

3.1.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES

A seguir, na figura 10, temos um exemplo de caldeira aquatubular. Nestas caldeiras, a água é que percorre os tubos internos, que por sua vez são envolvidos pelos gases quentes provenientes da combustão.

Figura 10 - Exemplo de caldeira aquatubular

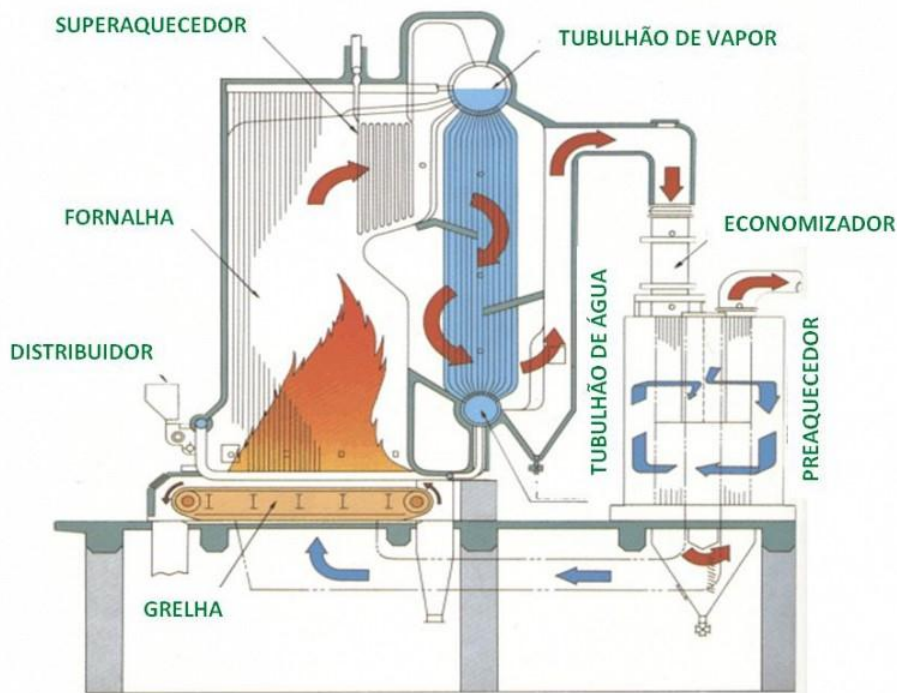


Fonte: <http://www.solucoesindustriais.com.br> - Acessado em 04/06/2015

Este tipo de caldeira é utilizado para aplicações de grande porte, com pressões de trabalho de até 100 Kgf/cm² e produção de vapor de até 120000 kg/h. De acordo com MARQUES (2005, p.3), podemos destacar elementos principais, alguns destes vistos na figura 11, comuns a qualquer caldeira deste tipo:

- **Tubulão superior ou tambor de vapor:** elemento da caldeira onde é injetada a água de alimentação e de onde se retira o vapor produzido;
- **Tubulão inferior ou tambor de lama:** elemento da caldeira onde se acumula água líquida, juntamente com os sólidos em suspensão na água que são decantados ali;
- **Tubos ascendentes (*risers*):** conjunto de tubos que faz a ligação entre os tubulões da caldeira, por eles circulam a mistura de água e vapor no sentido do tubulão inferior para o superior.
- **Tubos descendentes (*dowcomers*):** também fazem a ligação entre os tubulões da caldeira, porém neste caso, o sentido de fluxo do fluido é inverso. Este conjunto de tubos conduz a água líquida do tubulão superior para o inferior.
- **Fornalha:** elemento da caldeira que onde ocorre a combustão, fornece a energia necessária ao processo de vaporização da água e superaquecimento do vapor;

Figura 11 – Representação esquemática de uma caldeira aquatubular



Fonte: <http://www.vetorial.ind.br> - Acessado em 04/06/2015

Caldeiras aquatubulares que possuam apenas estes primeiros elementos são raras, pois, devido à necessidade de aumento na eficiência da caldeira, e um consequente uso eficiente dos insumos da mesma, outros elementos complementares são amplamente utilizados. Podemos destacá-los:

- **Superaquecedor:** eleva a temperatura do vapor, secando-o;
- **Pré-aquecedor de ar:** utilizado para aquecer o ar da combustão antes da queima, geralmente aproveitando a saída dos gases quentes da caldeira;
- **Economizador:** pré aquece a água de alimentação da caldeira, geralmente aproveitando também a saída dos gases quentes da caldeira;
- **Bomba de circulação forçada:** mantém a circulação da água e do vapor no interior dos tubos da caldeira.

Como vantagens das caldeiras aquatubulares, em geral, podemos destacar:

- Maior pressão de trabalho e maior taxa de produção de vapor por área de troca de calor;
- Partida rápida em função do menor volume de água nos tubos;
- A sua vida útil pode chegar até a 30 anos.

Em contrapartida, existem algumas desvantagens:

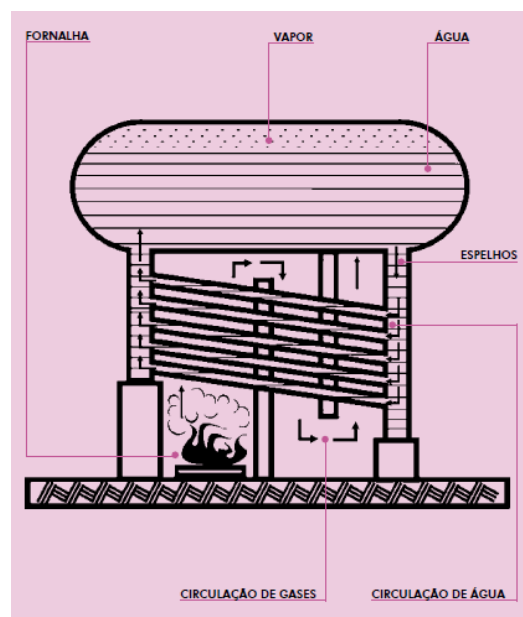
- Custo de instalação bem mais alto;
- Construção mais complexa;
- Exige tratamento de água mais cuidadoso.

Podemos classificar as caldeiras aquatubulares, dividindo-as em quatro grandes grupos: **caldeiras aquatubulares de tubos retos, caldeiras aquatubulares de tubos curvos, caldeiras aquatubulares de circulação forçada e caldeiras aquatubulares compactas.**

Caldeiras aquatubulares de tubos retos

Nestas caldeiras, os tubos de transmissão de calor, que contém a água em seu interior, são dispostos retos e paralelos entre si, interligados a uma câmara coletora conectada fisicamente ao tubulão superior, como está exemplificado na figura 12.

Figura 12 – Representação esquemática de uma caldeira aquatubular de tubos retos



Fonte: http://engmadeira.yolasite.com/resources/Caldeiras_texto.pdf - Acessado em 05/06/2015

Esta configuração de caldeira aquatubular foi uma das primeiras concepções para a indústria, operam com pressões de trabalho de até 45 Kgf/cm² e podem suprir uma demanda de vapor de até 30000 kg/h.

Principais vantagens deste tipo de caldeira aquatubular:

- Facilidade de substituição dos tubos, inspeção e limpeza;
- Não necessitam de chaminés elevadas ou de tiragem forçada.

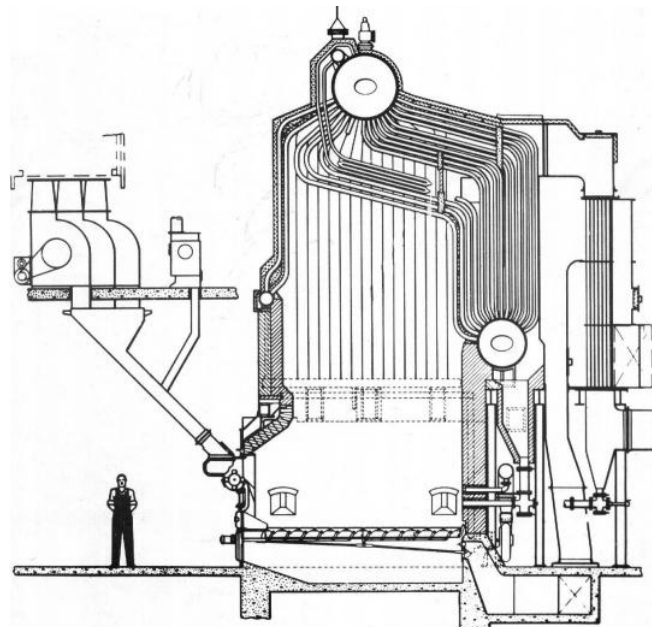
Desvantagens:

- Baixa taxa de vaporização específica;
- Grande quantidade de material refratário, conseqüentemente necessita de um rigoroso processo de aquecimento.

Caldeiras aquatubulares de tubos curvos

Este tipo de configuração, visualizado na figura 13, possui capacidade de produção de vapor ilimitada. Um arranjo deste tipo pode apresentar de três a cinco tubulões, aumentando a capacidade de geração de vapor. Os tubos por onde circula a água a ser aquecida são curvos e de diâmetro reduzido, favorecendo a troca térmica. Também neste modelo, foi acrescentada uma série de tubos denominada “parede de água”, utilizada tanto para proteger a parede de material refratário da caldeira, quanto para aumentar a capacidade de produção de vapor.

Figura 13 – Representação esquemática de uma caldeira aquatubular de tubos curvos



Fonte: <http://www.essel.com.br/cursos/material/03/Ap17.pdf> - Acessado em 05/06/2015

Principais vantagens deste tipo de configuração:

- Alta taxa de vaporização específica, na faixa de 30 kg de vapor por metro quadrado (vapor/m²) até 50 Kg de vapor por metro quadrado (vapor/m²);
- Fácil manutenção e limpeza;
- Rápida entrada em regime.

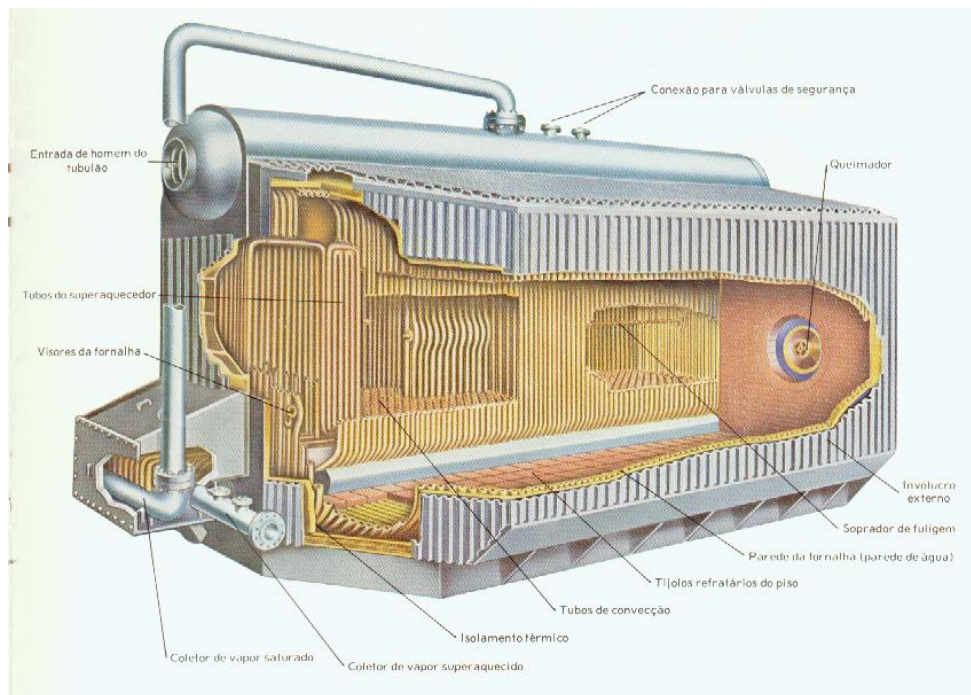
Desvantagens:

- Exige um controle especial da água de alimentação da caldeira.

Caldeiras aquatubulares compactas

Como pode ser visualizado na figura 14, este modelo também utiliza tubos curvos em sua configuração interna, porém são caldeiras mais compactas, com capacidade de produção de vapor em torno de 30000 Kg/h. São apropriadas para instalação em locais com espaço físico reduzido.

Figura 14 - Exemplo de caldeira aquatubular compacta



Fonte: <http://www.solucoesindustriais.com.br> - Acessado em 04/06/2015

Principal vantagem deste tipo de configuração:

- Espaço físico necessário para a instalação reduzido, portanto há um custo menor de instalação;

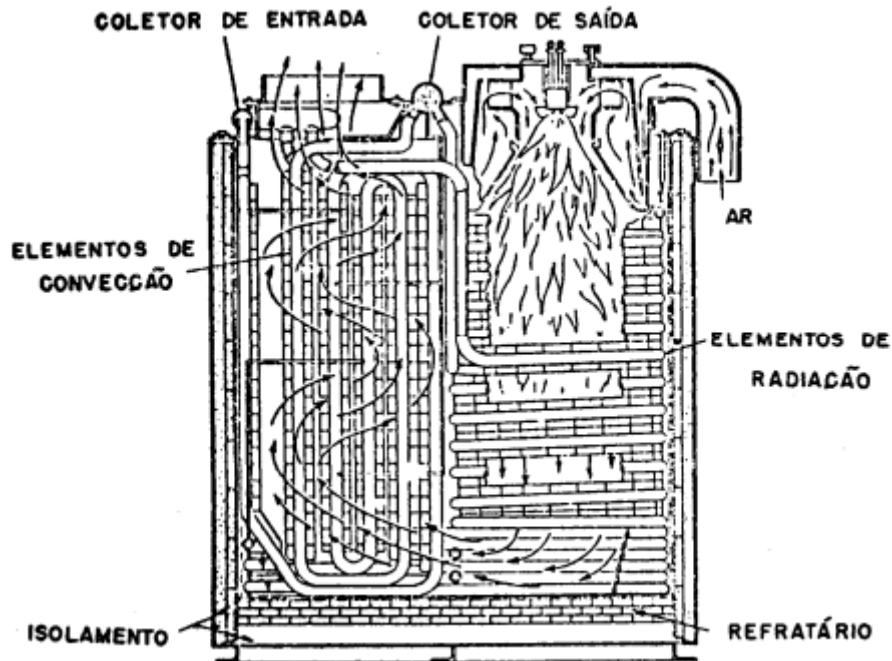
Desvantagem:

- Capacidade de produção de vapor limitada.

Caldeiras aquatubulares de circulação forçada

A circulação da água no interior dos tubos da caldeira se dá pela diferença de densidade entre a água e o vapor gerado, de maneira natural. Porém, fatores como a incrustação nos tubos podem prejudicar esta circulação. Para tal, adotou-se o uso de uma bomba de alimentação para garantir a circulação de água. Com isso, pôde-se reduzir o diâmetro dos tubos e aumentar o circuito formado por estes, dispendo-os como uma serpentina, favorecendo a troca térmica.

Figura 15 – Representação esquemática – caldeira aquatubular de circulação forçada



Fonte: MARTINELLI JR, 2008, p.32

3.1.3 SEGURANÇA EM CALDEIRAS

Aspectos gerais na NR-13

Uma caldeira é um equipamento que trabalha com altos valores de temperatura e pressão, portanto faz-se necessário dispender uma atenção especial quanto a sua utilização, manutenção e instalação. Neste contexto, a Norma regulamentadora nº13 (NR-13) estabelece condições para a instalação, operação e manutenção de caldeiras e vasos de pressão.

Como definições gerais da norma (NR-13, 1978), temos:

- **Caldeiras a vapor:** “equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refeedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo.” - Item 13.4.1.1;
- **Profissional habilitado:** “aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento da operação e da manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras, vasos de pressão e tubulações, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País.” - Item 13.3.2;
- **Pressão Máxima de Trabalho Permitida - PMTP ou Pressão Máxima de Trabalho Admissível – PMTA:** “é o maior valor de pressão a que um equipamento pode ser submetido continuamente, de acordo com o código de projeto, a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais.”, (NR-13, p.19).

Qualquer caldeira instalada no Brasil deve seguir as diretrizes estabelecidas pela NR-13. Dentre estas diretrizes, podemos destacar, segundo o item 13.4.1.3, que as caldeiras devem ser dotadas de:

- **Válvula de segurança (figura 16) com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior a PMTA;**

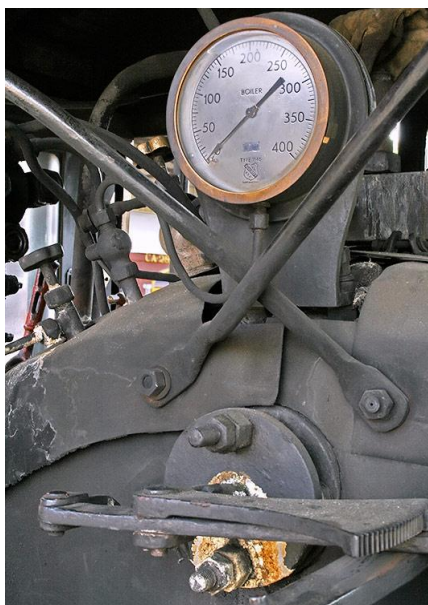
Figura 16 – Válvula de segurança (alívio de pressão) para caldeiras



Fonte: www.kcal.com.br – Acesso em: 07/06/2015

- **Instrumento que indique a pressão do vapor acumulado (figura 17);**

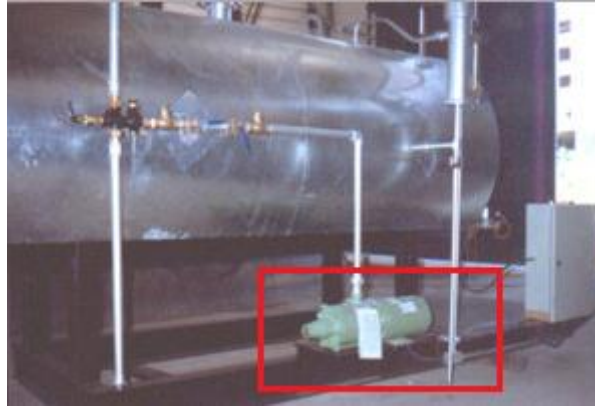
Figura 17 – Manômetro instalado em caldeira



Fonte: <http://arnaldopereira.fot.br/gallery/arquitetura/> – Acesso em: 07/06/2015

- Injetor ou outro meio de alimentação de água (figura 18), independente do sistema principal, em caldeiras de combustível sólido não atomizado ou com queima em suspensão;

Figura 18 - Bomba d'água para alimentação de caldeira



Fonte: Adaptado de <http://westequipamentos.com.br/> – Acesso em: 07/06/2015

- Sistema de drenagem rápida de água (figura 19), em caldeiras de recuperação de álcalis;

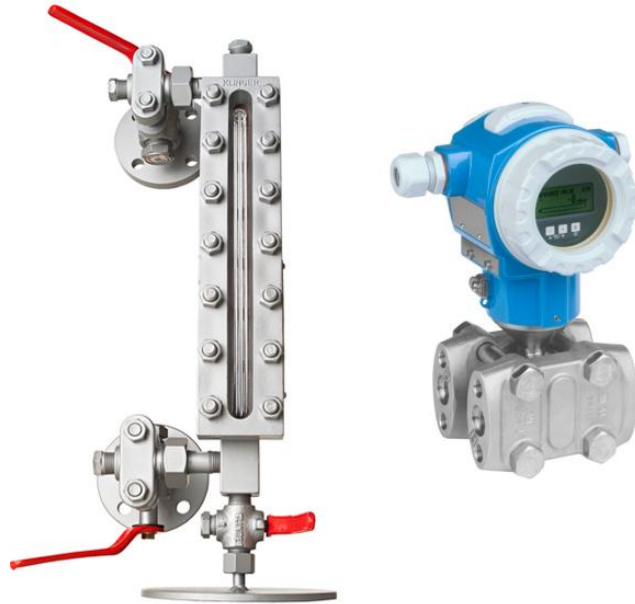
Figura 19 - Válvula de fundo de caldeira



Fonte: <http://www.wburger.com.br/> – Acesso em: 07/06/2015

- **Sistema automático de indicação de nível da água com intertravamento para evitar o superaquecimento por alimentação deficiente.**

Figura 20 - Visor e transmissor de nível utilizados em caldeiras



Fonte: Adaptados de <http://www.kcal.com.br/> e <http://www.us.endress.com/> - Acesso em: 07/06/2015

Toda caldeira deve possuir, fixada em seu corpo e em local visível, placa de identificação indelével (figura 21), constando, no mínimo, as seguintes informações:

- **Fabricante;**
- **Número de ordem dado pelo fabricante da caldeira;**
- **Ano de fabricação;**
- **Pressão máxima de trabalho admissível;**
- **Pressão de teste hidrostático;**
- **Capacidade de produção de vapor;**
- **Área de superfície de aquecimento;**
- **Código de projeto e ano de edição.**

Figura 21 - Placa de identificação de caldeira



Fonte: TARGET, 2015, p.27

Além das informações da placa, a caldeira deve possuir, em local visível, a sua categoria (de acordo com o item 13.5.1.5 da norma), que é uma classificação baseada na sua pressão de operação e volume internos.

No local de instalação da caldeira também deve haver o “Prontuário da Caldeira”, que contém informações importantes como dados de fabricação, diagramas mecânicos e elétricos, dados dos dispositivos de segurança, etc; além do “Registro de Segurança”, “Projeto de Instalação”, “Projetos de Alteração ou Reparo” e “Relatórios de Inspeção”, sendo todos estes documentos descritos no item 13.5.1.6 da norma, que também cita as ações em caso de extravio, mudança de local de instalação da caldeira, além de outras situações que necessitem de adequação.

Segurança na Operação e Manutenção de Caldeiras

Na Operação

De acordo com o item 13.4.3.1 da NR-13 (1978, rev. 2014), toda caldeira deve possuir o seu manual de operação, em língua portuguesa, sempre atualizado e disponível em local de fácil acesso.

Tal manual deve conter os procedimentos básicos de operação da caldeira, como procedimento de partidas e paradas, procedimentos operacionais de rotina, procedimentos em caso de emergência e os procedimentos gerais de segurança, saúde e preservação do meio ambiente.

A água de alimentação da caldeira deve ser tratada continuamente, para garantir sua pureza e evitar danos nos componentes internos da caldeira. Segundo TROVIT (2015), o tratamento da água de alimentação de caldeiras tem os seguintes objetivos:

- **Evitar a formação de incrustações (figura 22):** causadas pelo acúmulo de sais e sólidos pesados, após a evaporação da água;

Figura 22 - Tubulão superior de uma caldeira aquatubular com elevada incrustação de lama



Fonte: TROVIT, 2015

- **Evitar os processos corrosivos (figura 23):** processos de reação, principalmente entre o oxigênio presente na água e os metais estruturais da caldeira;

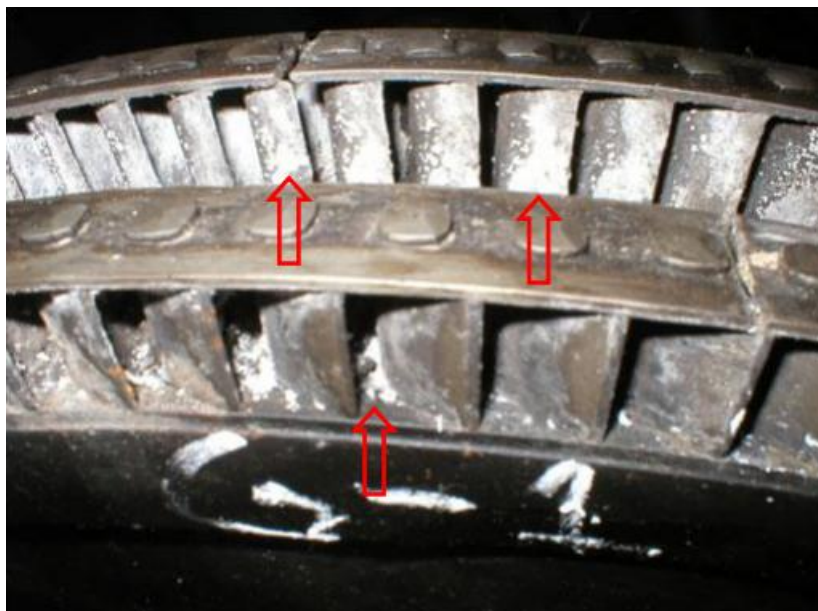
Figura 23 - Processo de corrosão localizada na carcaça de uma caldeira flamotubular



Fonte: TROVIT, 2015

- **Eliminar as ocorrências de arrastes de água (figura 24):** o arraste é definido como a introdução de água líquida na linha de vapor, podendo gerar abrasão e/ou incrustação de sólidos nos componentes mecânicos instalados na tubulação de vapor;

Figura 24 - Válvula de regulação de vapor de uma turbina com deposição de sais provenientes de arrastes



Fonte: TROVIT, 2015

Para a operação segura de caldeiras, a NR-13 também regulamenta que qualquer caldeira deve estar sob operação e controle de um Operador de Caldeira, devidamente habilitado, treinado e qualificado. É função do Operador de Caldeira garantir o tratamento contínuo da água de alimentação, monitorando a dosagem de produtos químicos para seu tratamento e garantindo as operações de descarga de fundo da caldeira, que têm como objetivo eliminar o material pesado presente na água.

Também é função do Operador de Caldeira supervisionar o funcionamento da caldeira como um todo, com a devida atenção e seriedade necessárias, realizando as verificações diárias e garantindo a segurança operacional da caldeira.

O operador deve estar sempre pronto para tomar as medidas necessárias para garantir que a caldeira trabalhe nas condições normais de operação, mantendo os parâmetros de pressão, nível e temperatura estáveis. Mas também deve estar atento para realizar os procedimentos de emergência, em casos extremos, para evitar que acidentes, como o da figura 25 (abaixo) aconteçam.

Figura 25 - Explosão de caldeira em Skikida, Argélia - 2004



Fonte: <http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2013/08/caso-033-explosao-da-caldeira-de-skikda.html> - Acesso em 08/06/2015

Na Manutenção

De acordo com o item 13.3.9 da NR-13, “Os sistemas de controle e segurança das caldeiras e dos vasos de pressão devem ser submetidos à manutenção preventiva ou preditiva”, a fim de garantir a falha segura do equipamento, ou seja, no caso de algum parâmetro operacional sair da normalidade e atingir um nível que represente risco grave e eminente, os sistemas de segurança devem entrar em ação.

Por exemplo, para se controlar a pressão interna da caldeira, temos os transmissores de pressão analógicos, que aliados a um controlador automático, garantem a permanência do valor de pressão da caldeira em uma faixa segura. Porém, se acontecer alguma eventualidade e o controle automático falhar, a pressão interna da caldeira pode subir descontroladamente.

Para garantir que a pressão interna não ultrapasse a PMTA da caldeira, as válvulas de alívio de pressão (ou válvulas de segurança) devem atuar, abrindo o vapor para a atmosfera e despressurizando a caldeira. Como são equipamentos de extrema importância para a segurança ocupacional e operacional, tanto os transmissores de pressão quanto as válvulas de segurança devem ser calibradas periodicamente (exemplo na figura 26), sendo que o período de calibração desses instrumentos não pode ser superior ao período previsto para a inspeção de segurança periódica interna da caldeira, conforme o item 13.5.4.9.

Figura 26 - Calibração de uma válvula de segurança



Fonte: <http://i.ytimg.com/vi/TUIbjp8J-uU/hqdefault.jpg> - Acesso em 09/06/2015

Nas inspeções internas, são verificados vários itens relativos às condições físicas da caldeira, com destaque para corrosão, abrasão, desgaste, etc. São utilizadas técnicas inspeção variadas, como a medição da parede dos tubos de água ou de fogo (dependendo do tipo de caldeira) através de medidores por ultrassom, como mostra a figura 27.

Figura 27 - Inspeção por ultrassom em serpentina de superaquecedor de vapor



Fonte: <http://www.poliend.com.br/2011/blog/?p=1043> – Acesso em 09/06/2015

Tais medições podem nos dar uma estimativa muito importante quanto à vida útil dos componentes da caldeira. Fornece subsídios paramétricos para o correto planejamento de uma parada para manutenção, para substituição de componentes danificados.

A manutenção periódica em caldeiras, de maneira preditiva ou preventiva, é vital para o funcionamento da mesma, mas é ainda mais importante para a segurança, operacional e ocupacional. Muitas vezes, a necessidade de manutenção corretiva pode aparecer em uma hora em que não há nada que se possa fazer, por exemplo: seria possível realizar a manutenção corretiva em uma válvula de alívio de pressão que está travada, com a caldeira pressurizada a mais de 10 Kgf/cm² de pressão e com a temperatura do vapor em 180 °C?

Por isso, a manutenção em caldeiras deve ser focada na prevenção e predição, principalmente nos itens que garantem a segurança da caldeira.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

3.2.1 DEFINIÇÕES GERAIS

Instrumentação pode ser definida como a ciência que desenvolve e aplica técnicas de medição, indicação, registro e controle de qualquer tipo de processo, visando a sua otimização e eficiência.

A instrumentação está presente, por exemplo, em uma instalação elétrica, na simples medida de tensão elétrica de uma residência (220 V ou 110 V). Está presente no controle do sistema que está gerando essa tensão – seja, por exemplo, na medição da velocidade da turbina que gira devido à força da água em uma hidrelétrica, seja através da medição da pressão do vapor em uma termelétrica ou no controle das reações nucleares que ocorrem em uma usina nuclear. (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2012. p6.)

Apesar da imensa variedade de instrumentos industriais existentes, estes podem ser classificados basicamente em três grupos: Indicadores, Transmissores e Controladores:

- Indicadores: instrumentos que dispõem de indicador e/ou escala graduada, na qual se pode ler o valor da variável medida/controlada. (BEGA (Org.), 2006);
- Transmissores: instrumentos que detectam as variações na variável medida/controlada através do elemento primário e transmitem-na à distância. O elemento primário pode ou não ser parte integrante do transmissor. (BEGA (Org.), 2006);

- Controladores: instrumentos que comparam a variável medida/controlada com um valor desejado (*setpoint*) e exercem uma ação de correção na variável manipulada, função da diferença entre estes dois valores (erro ou *offset*) de sua equação de controle (controladores P, P+I, P+I+D). (BEGA (Org.), 2006);

A instrumentação trata das mais variadas grandezas físicas, dentre as quais podemos citar, sendo as mais utilizadas:

- Nível;
- Pressão;
- Vazão;
- Temperatura;
- Posição;

3.2.2 SENSORES E TRANSMISSORES DE NÍVEL

O nível é uma das grandezas mais necessárias às aplicações industriais. Sua utilização é muito abrangente, pode ser utilizado como medição direta da grandeza, ou para medição indireta de vazão.

Os sensores de nível medem a posição da superfície do fluido (ou sólido) sobre um ponto de referência, ou a altura indireta calculada através do peso que o fluido ou sólido exerce sobre um sensor. Atualmente, há uma enorme gama de sensores e transmissores de nível, cada qual melhor projetado para certo tipo de aplicação.

Em função da evolução tecnológica, do aumento dos custos das matérias-primas e materiais intermediários e novas exigências de precisão nas medições realizadas, nos últimos anos foram desenvolvidos diversos tipos de instrumentos de medição de nível, com precisão chegando a $\pm 0,5$ mm. (BEGA (Org.), 2006. p143)

Especificar qual tipo de medidor irá ser utilizado no processo, depende de muitos fatores, como:

- Tipo de princípio de medição a ser utilizado;
- Densidade do material (fixa ou variável);
- Tipo de ambiente industrial (corrosivo, abrasivo, sanitário);
- Custo despendido para a instalação, entre outros.

Chaves de Nível

As chaves de nível podem ser utilizadas tanto para medição de nível em meios sólidos quanto em líquidos. Possibilitam indicação do nível quando este atinge um patamar fixo. Para o caso de medidores com haste inserida no material a ser medido (contato direto), este patamar depende diretamente do comprimento da haste do sensor, porém também existem chaves de nível por ultrassom, sem contato direto com o meio, que permitem que o patamar de nível seja programável. Basicamente, os tipos de chaves de nível mais comuns são:

- Por eletrodos metálicos, para líquidos condutores de eletricidade;
- Por diapasão vibratório, para líquidos e sólidos, independentemente da condutividade do material;
- Por ultrassom, sem contato direto com o meio a ser medido.

Para exemplificar, podemos descrever o funcionamento da chave de nível *Soliphant*® (figura 28), da fabricante *Endress + Hauser*.

Este modelo de medidor funciona da seguinte maneira: a unidade eletrônica do medidor utiliza um piezoelétrico para excitar o diapasão vibratório do medidor, gerando uma frequência de ressonância característica. Quando o meio a ser medido cobre o diapasão, ocorrem mudanças de amplitude de vibração do mesmo (a vibração é amortecida). A unidade eletrônica deste sensor compara a amplitude real de vibração com o valor da amplitude da frequência de ressonância característica, e consegue distinguir se o diapasão está vibrando livremente ou se está coberto pelo meio.

Figura 28 - Chave de nível modelo Soliphant®

Modelo para sólidos



Modelo para líquidos



Fonte: <http://www.br.endress.com/pt/Medi%C3%A7%C3%A3o/level-measurement?filter.page=3> – Acesso em 14/06/2015

Desta forma, após “sentir” a influência do meio no diapasão vibratório, a unidade eletrônica fornece como sinal de saída uma saída à relé, como um contato seco, de modo que o usuário pode escolher a tensão que fornecerá de sinal para o seu controlador, ou para qualquer outro dispositivo.

Medidores de Nível Tipo Ultrassom

Estes medidores (exemplo na figura 29), que não têm contato com o material a ser medido, podem ser usados tanto para a medição contínua de nível quanto podem atuar como sensores de nível pré-determinado (chave de nível). O ultrassom é uma onda sonora cuja frequência de oscilação é maior do que aquela sensível pelo ouvido humano (acima de 20 kHz). A unidade eletrônica presente no sensor de nível excita um material piezoelétrico, de modo a produzir ondas de ultrassom direcionadas à superfície a ser medida.

Quando a onda de ultrassom gerada incide sobre a superfície do material, há uma reflexão de grande parte da mesma (a intensidade depende do meio), no sentido contrário, fazendo com que uma onda refletida retorne à fonte de emissão. Na face do instrumento, há um sensor que detecta a chegada da onda refletida. Desta forma, o instrumento mede o tempo gasto entre a transmissão da onda e a recepção da mesma.

A velocidade do som é a base para a medição através desta técnica. Esta constante é utilizada na equação 1, a seguir:

$$D = \frac{c \times t}{2} \quad (1)$$

Onde:

- D é a distância entre a face do sensor e a superfície do material;
- c é a constante da velocidade do som;
- t é o tempo entre a transmissão e a recepção da onda.

Como o instrumento armazena a distância da face ao fundo do tanque a ser medido (valor inserido pelo usuário), o nível do material é obtido através da equação 2:

$$L = E - D \quad (2)$$

Onde:

- L é o nível do material;
- E é a distância da face do instrumento ao fundo do tanque;
- D é distância calculada pelo instrumento, da face ao material.

Em alguns instrumentos, é utilizado um sensor de temperatura integrado, para compensar as mudanças na velocidade do som causadas pelas variações de temperatura do meio.

A unidade eletrônica do instrumento também é responsável por converter o nível medido em um sinal de saída analógico para comunicação com um controlador/indicador, ou em um sinal digital, dependendo do instrumento.

Figura 29 - Transmissor de nível ultrassônico FMU 40®, da Endress + Hauser



Fonte: <http://www.br.endress.com/pt/Medi%C3%A7%C3%A3o/level-measurement?filter.page=5> – Acesso em 14/06/2015

3.2.3 SENSORES E TRANSMISSORES DE PRESSÃO

A pressão também aparece como uma das variáveis primordiais às aplicações industriais. Também pode ser usada como medição direta da grandeza, ou para medição indireta de nível. Por definição, pressão é uma grandeza física que representa a ação de uma ou mais forças sobre um determinado espaço, ou resumidamente, força aplicada dividida pela área de aplicação da mesma, como demonstrado na equação 3:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Onde:

- P é a pressão resultante;
- F é a força aplicada;
- A é a área de aplicação da força;

A unidade para pressão no SI é Pa, ou pascal, que representa a ação de 01 Newton em uma área de 01 m².

Em geral, os sensores e transmissores de pressão “sentem” a pressão do processo através da deformação conhecida de alguns materiais, tidos como os elementos sensores. O elemento sensor mais utilizado é a célula capacitiva, que detalharemos mais a frente. A grande variedade de instrumentos para a medição de pressão permite ao

usuário escolher e especificar o instrumento mais adequado ao seu processo, de acordo com as suas necessidades, e levando em conta fatores como:

- Tipo de material a ser medido (fluido, sólido, corrosivo ou abrasivo);
- Tipo de ambiente industrial (corrosivo, abrasivo, sanitário);
- Custo despendido para a instalação, entre outros.

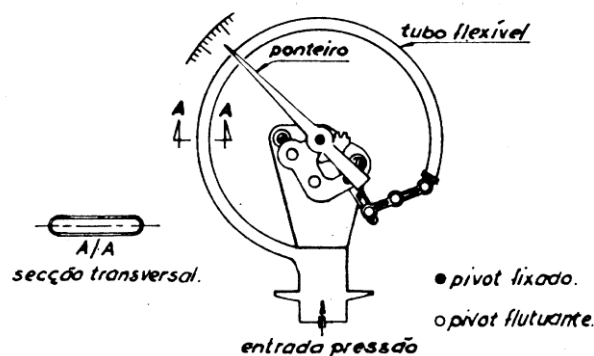
Manômetro Tipo Bourdon

É um dos indicadores locais de pressão mais utilizados industrialmente, tanto para pressões mais baixas quanto para altas pressões. Consiste de um tubo de seção oval, disposto na forma de um arco de circunferência, tendo uma extremidade fechada, sendo que a outra está aberta à pressão a ser medida. Com a pressão do processo agindo no interior do tubo, este tende a formar uma seção circular, resultando em um movimento em sua extremidade fechada.

Através de uma engrenagem, este movimento é transmitido a um ponteiro que irá indicar um valor de pressão, calibrado em uma escala de pressão padrão.

Para cada faixa de pressão a ser medida, o material interno do manômetro (vide figura 30) irá ser alterado, para fornecer a deformação elástica necessária ao movimento do ponteiro.

Figura 30 - Representação esquemática de um manômetro com tubo de bourdon



Fonte: http://www.eq.uc.pt/~lferreira/BIBL_SEM/global/bourdon/imagens/inicio.gif –

Acesso em 14/06/2015

O **manômetro de tubo em “U”** é o instrumento de medição de pressão mais simples e, conseqüentemente, o de custo mais baixo, utilizado principalmente para medir pressões mais baixas. É constituído de um tubo de material transparente, dobrado em formato de “U” (figura 31) contendo certa quantidade de líquido (água, álcool, mercúrio, etc.), fixado a uma base com escala graduada calibrada.

A quantidade de líquido presente no manômetro iguala as alturas das colunas de líquido dos dois lados do “U” no ponto 0 (zero) da escala de medição, quando as pressões aplicadas nos dois lados do instrumento são iguais. Quando a pressão diferencial é diferente de zero, ou seja, há uma diferença de pressão entre as tomadas de leitura, a altura da coluna de líquido é alterada, de modo que em um dos lados do manômetro a altura da coluna sobe e no outro a altura da coluna desce.

Figura 31 - Manômetro de tubo em "U"



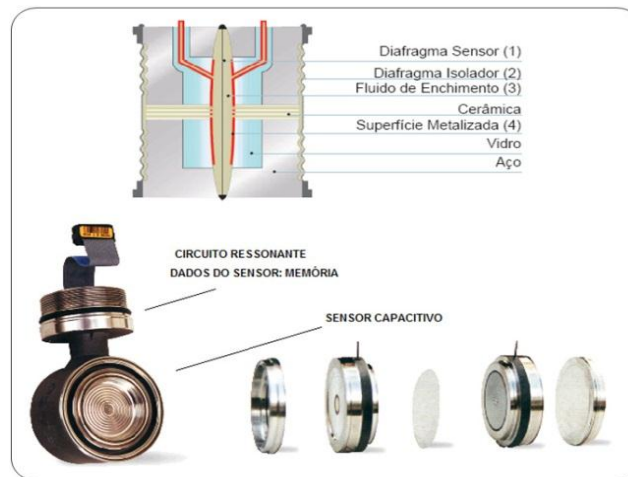
Fonte: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/liquid-column-pressure-gauge-11846-5086789.jpg – Acesso em 14/06/2015

O valor da pressão diferencial é a soma das diferenças dos dois lados referentes ao ponto zero. Por exemplo, se em um dos lados a coluna de líquido está abaixo do zero, no ponto $-300 \text{ mmH}_2\text{O}$ e no outro lado a coluna está acima do zero, no ponto $+300 \text{ mmH}_2\text{O}$; a pressão diferencial total da medida é $600 \text{ mmH}_2\text{O}$.

Sensores de pressão por célula capacitiva

Este método de medição é o mais utilizado atualmente nos transmissores de pressão, concebido como alternativa aos medidores puramente mecânicos antes utilizados. A constituição detalhada deste dispositivo pode ser vista abaixo, na figura 32:

Figura 32 - Representação esquemática de uma célula capacitiva



Fonte: http://www.smar.com/images/index53_fig02.jpg – Acesso em 14/06/2015

A célula é construída de forma similar a um capacitor, com duas placas condutoras fixas isoladas por um fluido dielétrico entre elas. Inserido neste fluido, existe um diafragma sensor separando os dois lados da célula, formando dois capacitores de igual capacitância. Este diafragma é feito de material facilmente deformável e conectado aos lados de alta e baixa pressão (H e L, respectivamente) do sensor, por meio de capilares preenchidos com um tipo de óleo silicone. Conectados aos capilares, no lado externo, existem diafragmas mais resistentes, que estão em contato direto com o processo.

Quando as pressões aplicadas nos dois lados da câmara *High* (H) e *Low* (L), ou lado de alta e lado de baixa pressão, são iguais, não há diferença de pressão entre elas, portanto não há deformação do diafragma sensor e as capacitâncias permanecem iguais. É o valor zero de pressão. Quando uma pressão se difere da outra, o diafragma sensor se deforma gerando capacitâncias diferentes entre os lados internos do sensor.

A diferença entre as capacitâncias internas do elemento sensor é proporcional à aplicação das pressões nas câmaras de alta e baixa pressão. A unidade eletrônica do

instrumento processa a diferença entre as capacitâncias e “traduz” este sinal elétrico de baixa potência em um sinal elétrico de saída, como 4 a 20 mA, por exemplo, para comunicação com um controlador.

O LD301® da SMAR, (figura 33), é um exemplo de instrumento que utiliza a célula capacitiva. Tal transmissor pode ser utilizado como medidor direto da grandeza, com saída 4-20 mA, ou como controlador de uma válvula de controle, por exemplo, dependendo da aplicação. Através do protocolo de comunicação digital HART®, podem ser transmitidas outras variáveis do processo, como temperatura, por exemplo.

Figura 33 - Transmissor de pressão LD301®, da SMAR



Fonte: http://www.smar.com/marketing/files/pictures/LD/ld301_6.jpg – Acesso em 14/06/2015

Pressostatos

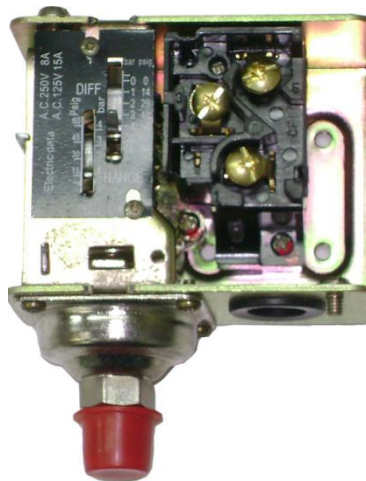
Além da medida analógica de pressão para monitoramento contínuo, existem instrumentos que podem ser atuar como pressostatos, que é o termo utilizado para definir que o instrumento apenas atua quando a pressão ultrapassar um valor pré-determinado.

Tais instrumentos são em geral utilizados para intertravamentos de segurança ou para sinalizar pré-requisitos operacionais. Por exemplo, um dado equipamento só pode ser

ligado quando a pressão interna de um tanque exceder um limite definido. Os pressostatos podem então ser definidos como sensores de pressão que possuem apenas saídas a relé, e comutam seus estados (NA ou NF) de acordo com o *setpoint* de pressão programada.

Utilizam em geral, um mecanismo mecânico de atuação constituído por um dispositivo de metal condutor elétrico sustentado por uma mola, que sofre a ação da pressão do processo (figura 34). Quando a pressão do processo atinge um valor suficientemente alto para comprimir a mola, esta por sua vez transmite o movimento mecânico para o dispositivo condutor elétrico, de maneira que este feche os contatos elétricos do pressostato. Para se ajustar o setpoint de pressão desejado, a mola deve ser comprimida ou relaxada.

Figura 34 - Exemplo de pressostato com sistema de comutação por mola



Fonte: http://www.gianni-rs.com.br/images/fullscreen/pressostato_diferencial.jpg – Acesso em 14/06/2015

Alguns pressostatos, que também podem ser transmissores de pressão concomitantemente, utilizam o princípio da célula capacitiva para a medição da pressão, como é o caso do transmissor PN3094 (figura 35), da IFM.

Figura 35 - Pressostato PN3094®, da IFM



Fonte: http://ifm-electronic.be/img/nf_pn7090~lg.jpg – Acesso em 14/06/2015

3.2.4 SENSORES E TRANSMISSORES DE VAZÃO

Entre as variáveis mais frequentemente medidas, a vazão é a que requer os recursos tecnológicos mais diversos para a realização de medidores e transmissores. A medição de vazão encontra importantes aplicações no transporte de fluidos (oleodutos, gasodutos), nos serviços públicos (abastecimento, saneamento) e na indústria em geral, para controle de relação, bateladas, balanços de massas, contribuindo para a qualidade e a otimização de processos. (BEGA (Org.), 2006. p49.)

A vazão é uma grandeza física que representa a quantidade de volume de um fluido que escoar em um determinado condutor por unidade de tempo. As unidades para vazão volumétrica no SI são m^3/s (metros cúbicos por segundo), mas as unidades mais usuais na indústria são m^3/h (metros cúbicos por hora) e l/min (litros por minuto). Já as

unidades para vazão mássica no SI são Kg/s (quilogramas por segundo), sendo que as mais usuais na indústria são Kg/h (quilogramas por hora) e t/h (toneladas por hora).

A equação 4 a seguir demonstra o cálculo da vazão em uma área de seção transversal:

$$Q = v.A \quad (4)$$

Onde:

- Q é vazão calculada;
- v é a velocidade de escoamento do fluido;
- A é área da seção por onde o fluido escoar;

A medição de vazão é aplicada onde se necessita conhecer o volume de fluidos utilizados em certo processo. Pode ser utilizado para mensurar insumos dosados em uma reação, volume de fluido de saída produzido em uma planta, até para questões de segurança, como garantir que haja água de resfriamento em um forno.

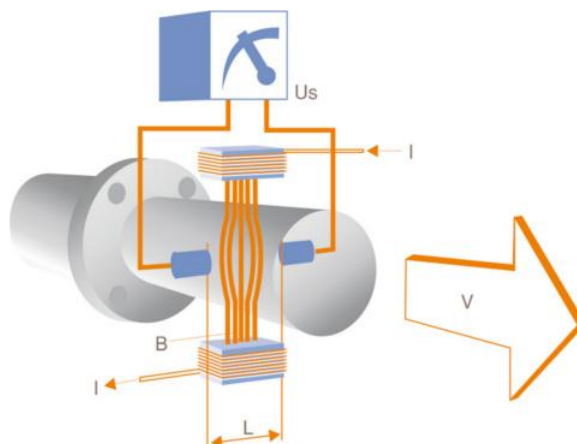
Existem diversos princípios físicos utilizados para a medição de vazão, bem como há uma grande variedade de instrumentos para tal finalidade. Novamente, é importante salientar que especificar corretamente o instrumento para a aplicação no processo é vital para o perfeito funcionamento deste. Alguns pontos merecem destaque:

- Tipo de material a ser medido (percentual de sólidos, Ph, condutividade);
- Tipo de ambiente industrial (corrosivo, abrasivo, sanitário);
- Custo despendido para a instalação, entre outros.

Medidores de vazão eletromagnéticos

Estes medidores utilizam a Lei de Faraday como princípio de medição. Tal lei diz que quando um objeto condutor se move em um campo magnético, uma força eletromotriz (f.e.m) induzida é gerada em suas extremidades. Tal f.e.m. é proporcional à intensidade do campo magnético, ao seu comprimento e à velocidade de deslocamento, como demonstrado na figura 36.

Figura 36 - Representação esquemática de medidor de vazão eletromagnético



Fonte: http://www.mecatronicaatual.com.br/files/image/vazao_figura_01_2_.jpg – Acesso em 14/06/2015

De acordo com a Lei de Faraday, a f.e.m. induzida no medidor é expressa pela equação 5, abaixo:

$$E = Bxdxv \quad (5)$$

Onde:

- E é f.e.m. induzida;
- B é a densidade do fluxo magnético;
- d = diâmetro interno do medidor;
- v = velocidade do fluido.

Como o campo magnético gerado pelo medidor e o diâmetro interno do tubo são fixos, a f.e.m. induzida se torna diretamente proporcional à velocidade de escoamento do fluido.

Como já foi demonstrado na equação 4, de posse da velocidade fica simples calcular a vazão, uma vez que a área do condutor de escoamento do fluido é fixa. A unidade eletrônica do medidor processa a f.e.m. induzida e converte este sinal em um sinal de saída, como 4 a 20 mA, por exemplo. Este medidor é um dos mais versáteis para aplicações industriais. A figura 37 mostra o medidor de vazão eletromagnético da YOKOGAWA.

Figura 37 - Medidor de vazão tipo eletromagnético ADMAG-AXR®, da YOKOGAWA



Fonte: http://www.yokogawa.com.br/uploads/images/AXR-F_01.jpg – Acesso em 14/06/2015

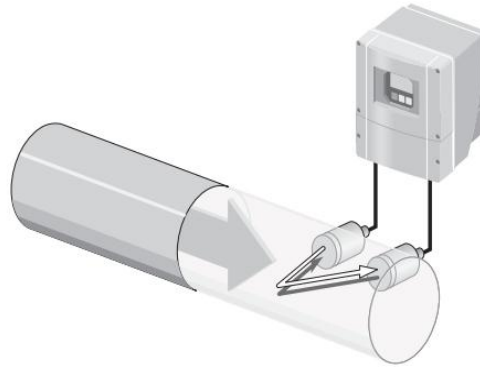
Qualquer medidor deste tipo possui perda de carga equivalente a um trecho reto de tubulação, uma vez que ele não restringe o diâmetro da mesma. Fatores como densidade e viscosidade do fluido não o afetam diretamente, porém deve-se ficar atento à condutividade mínima exigida por cada fabricante, para que o instrumento funcione corretamente.

Medidores de vazão ultrassônicos

Estes medidores utilizam o princípio físico do eco (conforme figura 38) para realizar a medição de vazão de um fluido. Neste caso, um material piezoelétrico localizado em uma sonda é utilizado para emitir uma onda de ultrassom (acima de 20 KHz) na tubulação cuja vazão deve ser medida. Outra sonda de ultrassom posicionada no mesmo

lado da primeira detecta a chegada da onda e mensura o tempo em que esta se chocou com o outro lado da tubulação e retornou.

Figura 38 - Representação esquemática do medidor de vazão tipo



Fonte: <https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/0223/000/03/TI057DEN.pdf> – Acesso em 14/06/2015

Quando a tubulação está com o fluido em repouso, o tempo de trânsito da onda é constante, dependendo apenas do material do fluido. Quando há vazão, este tempo de trânsito é variável, pois, no sentido de fluxo do fluido a velocidade de trânsito é maior, e no sentido contrário ao fluxo esta velocidade é menor.

Esta diferença entre a velocidade de propagação da onda, e conseqüentemente entre o tempo de trânsito, é proporcional à velocidade do fluxo. A unidade eletrônica deste tipo de transmissor interpreta os tempos de trânsito da onda e calcula a velocidade do escoamento do fluido. De posse deste valor, uma vez que a área da tubulação é fixa, fica simples calcular a vazão na tubulação, através da equação 4, demonstrada anteriormente. Este tipo de medidor utiliza uma tecnologia recente, e apresenta grandes vantagens, por exemplo:

- Pode ser instalado de maneira não intrusiva ao processo;
- Pode ser utilizado para medir fluidos que não são condutivos (uma alternativa ao medidor eletromagnético);
- Pode ser utilizado em tubulações de até 80”.

A figura 39 (a seguir) mostra o medidor por ultrassom não intrusivo da Endress+Hauser, o *Prosonic Flow*®:

Figura 39 - Medidor de vazão *Prosonic Flow*®, da ENDRESS + HAUSER



Fonte: <http://www.endress.com/en> – Acesso em 14/06/2015

3.2.5 SENSORES E TRANSMISSORES DE TEMPERATURA

Junto com a pressão, a vazão e o nível, a temperatura é uma das principais variáveis de processo. Sua medição e controle são de fundamental importância numa vasta gama de aplicações, que abrange desde processos físicos e químicos até a proteção de equipamentos. (BEGA (Org.) 2006. p207.)

Mensurar a temperatura de um processo é crucial, tanto para garantir a efetividade de processos, como reações químicas, por exemplo, quanto para assegurar a segurança operacional de equipamentos, através de sensores de temperatura para alarmes de temperatura excessiva, etc.

Em geral, sensores de temperatura são constituídos de materiais específicos, que sofrem dilatação ou respondem fisicamente de alguma forma a variações de temperatura. Basicamente, temos três tipos de sensores de temperatura diretos: termopares, termistores e termoresistências:

Termopares

São sensores de temperatura constituídos de pares de fios bimetálicos, ou seja, utilizam dois fios de materiais metálicos diferentes, como platina e ródio, por exemplo. Tais fios são soldados em suas pontas, formando o que chamamos de “junta fria”. Esta junta, quando submetida à certa temperatura, excita em seus condutores, uma tensão da ordem de milivolts, proporcional à variação da temperatura.

Cada termopar (figura 40) possui uma escala de medição característica, proveniente de seus metais de construção; pois para cada par de metais, uma escala de medição será mais propícia a identificar a variação de tensão induzida em seus fios.

Tipos e escalas dos termopares mais comuns:

- Termopar tipo K (cromo e alumínio): 0 °C a 1250 °C;
- Termopar tipo B (platina e ródio): 800 °C a 1700 °C;
- Termopar tipo S (platina e ródio): 0 °C a 1450 °C.

Figura 40 - Termopares diversos



Fonte: <http://www.pirometrica.com.br/imagens/produtos/termopares/21.jpg> – Acesso em 14/06/2015

Para cada aplicação em determinado tipo de processo, deve-se especificar o material correto para escala de medição, bem como o material de revestimento para o elemento sensor. Neste caso, cada termopar pode necessitar de proteções específicas, como bainha de porcelana, de isolamento mineral ou mesmo em aço inox, pois como são sensores em geral intrusivos ao processo, tais proteções influenciam diretamente na vida útil dos mesmos, protegendo-os de atmosferas oxidantes, abrasivas, etc.

O sinal de tensão gerado pelos sensores de temperatura é muito baixo, da ordem de milivolts, então, para se levar este sinal com confiabilidade a um transmissor, lançamos mão do uso de cabos de compensação (vide figura 41) para tal. Estes cabos são construídos com material específico para cada tipo de termopar, de maneira a minimizar a queda de tensão nos mesmos, para que o sinal que representa a temperatura real do processo seja reproduzido fielmente para transmissão.

Quadro de identificação de cabos de compensação:

Figura 41 - Tipos de cabos de compensação para termopares

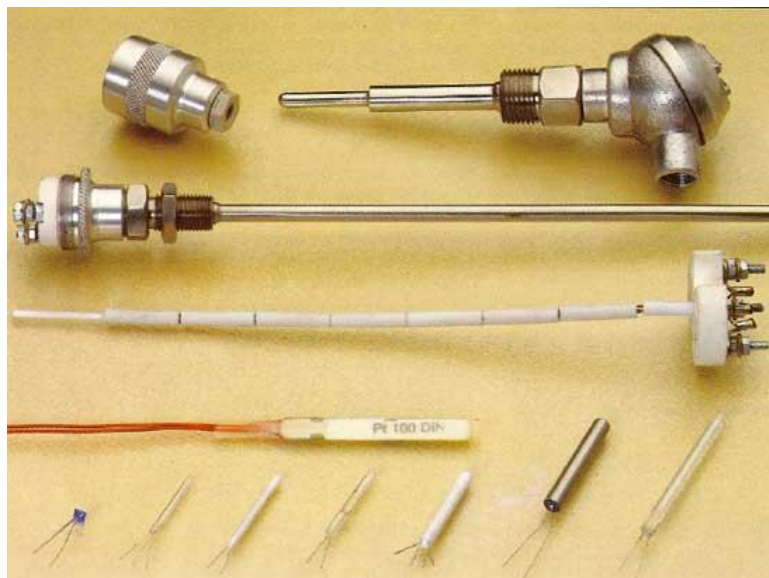
CORES PARA CABOS DE EXTENSÃO					
TC	CONDUTORES		ANSI	DIN 43710	IEC 584-3
	+	-			
J	FERRO Fe (magnético)	CONSTANTAN Cu-Ni			
K	CROMEL Ni-Cr	ALUMEL Ni-Al (MAGNÉTICO)			
T	COBRE Cu	CONSTANTAN Cu-Ni			
E	CROMEL Ni-Cr	CONSTANTAN Cu-Ni			
N	NICROSSIL Ni-Cr-Si	NISIL Ni-Si-Mg		CÓDIGO ANSI	
R	PLATINA- RHODIO Pt 13% Rh	PLATINA Pt			
S	PLATINA- RHODIO Pt 10% Rh	PLATINA Pt			
B	PLATINA- RHODIO Pt 30% Rh	PLATINA- RHODIO Pt 5% Rh			

Fonte: <http://www.cr-resistencias.com.br/imagens/produtos/cores.jpg> – Acesso em 14/06/2015

Termoresistências

São sensores de temperatura constituídos de metais que alteram sua resistência elétrica em função da temperatura. Em geral, possuem escalas menores em relação aos termopares, devidos aos materiais utilizados. O principal tipo de termoresistência utilizada industrialmente é o Pt-100 (figura 42), cujo nome se dá por ter o valor de resistência padronizada de 100 Ω a 0 °C.

Figura 42 - Termoresistências tipo Pt-100



Fonte: http://www.iope.com.br/IOPE_termoresistencia_Pt-100_definicao/termoresistencia.jpg – Acesso em 14/06/2015

Pode-se encontrar sensores Pt-100 que operam na faixa de -250 °C a 850 °C; sendo que, para temperaturas mais elevadas, deve-se consultar o fabricante com relação à precisão e vida útil do sensor. Os sensores tipo Pt-100 podem ser de dois, três ou até quatro fios, variando a precisão da medida em função do número de fios. Neste caso, o sensor a dois fios quase não é utilizado; o sensor a três fios é o mais utilizado e o sensor a quatro fios é o que apresenta maior precisão, sendo utilizado em aplicações mais específicas.

Termistores

São sensores constituídos de materiais semicondutores, geralmente óxidos de níquel, manganês, cobalto e outros (BEGA (Org.), 2006). Estes sensores apresentam grande variação de resistência elétrica em função da temperatura, podendo cobrir uma faixa de -100 °C a 300 °C.

A maioria dos termistores (figura 43) apresenta coeficiente negativo, sendo classificados como sensores NTC (*Negative Thermal Coefficient*); o que significa que a sua resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura. Porém também existem sensores do tipo PTC (*Positive Thermal Coefficient*), que têm característica oposta: aumentam a sua resistência elétrica com o aumento da temperatura.

Figura 43 - Exemplos de termistores



Fonte: http://www.cetronic.es/sqlcommerce/ficheros/dk_93/productos/643004009-1.jpg – Acesso em 14/06/2015

Estes tipos de sensores de temperatura são utilizados tipicamente para alarme de temperatura em veículos, para proteção de motores e semicondutores de potência em circuitos eletrônicos.

Transmissores de Temperatura

São transdutores que convertem a tensão gerada pelos termopares, ou a resistência percebida pelas termoresistências, em um sinal de saída padrão, para transmissão do

sinal. Geralmente estes sinais de saída podem ser 4 a 20 mA, 0 a 10 Vcc, ou mesmo saída em rede, como o protocolo HART® ou Profibus PA®.

Como exemplo de transmissor de temperatura podemos citar o IPAQ-L® (figura 44), da fabricante INOR:

Figura 44 - Transmissor de temperatura IPAQ-L®, da INOR



Fonte: <http://www.inor.com/products/image-products/IPAQ-LmA.jpg> – Acesso em 14/06/2015

3.2.6 SENSORES E TRANSMISSORES DE POSIÇÃO

Monitorar a posição de um objeto pode parecer não muito útil em situações corriqueiras, porém, em aplicações industriais, saber se um pistão atingiu o curso desejado, ou se uma caixa chegou à posição desejada para embalagem e expedição significam a diferença entre um trabalho bem realizado ou um total fracasso, com desperdício de tempo, dinheiro e matéria-prima.

Existem, no mercado, inúmeros tipos de sensores de posição, baseados nos mais diversos princípios de medição.

Sensores Indutivos

Este tipo de sensor detecta apenas materiais metálicos. Possui um circuito eletrônico interno, gerador de um campo eletromagnético oscilante de alta frequência na face do sensor.

Quando aproximamos um metal condutor elétrico à face do sensor, este metal adentra ao campo eletromagnético gerado e, pela lei da indutância, induz uma corrente elétrica (parasita) que extrai energia do circuito oscilante. Conseqüentemente, a amplitude de oscilação torna-se menor. Esta alteração na amplitude do campo é percebida pelo circuito eletrônico do sensor e convertida num sinal de saída digital, que irá sinalizar um estado para um controlador, por exemplo.

Há no mercado, sensores indutivos que geram um campo magnético de alcance fixo determinado pelo fabricante (figura 45), como 10 mm ou 15 mm, mas também existem sensores que podem ter seus campos ajustados dentro de uma faixa de ajuste, possibilitando um melhor ajuste de posição entre sensor e material a ser detectado.

Figura 45 - Sensores indutivos SENSE



**Fonte: http://www.sense.com.br/galeria/imagem/SENSOR_COMPACTA.png –
Acesso em 14/06/2015**

Embora só consigam perceber metais, estes sensores são amplamente utilizados em várias aplicações industriais, principalmente pelo baixo custo e facilidade de instalação.

Sensores Magnéticos

Estes sensores (exemplo na figura 46), de funcionamento relativamente simples, possuem um grande alcance de atuação, e em geral dimensões físicas muito reduzidas. São constituídos internamente de duas pequenas chapas de metal condutor elétrico, sendo que uma destas chapas é constituída de material ferromagnético (ferro, níquel, etc.). Quando um campo magnético (como um ímã permanente) é aproximado desta configuração, ele provoca a atração da chapa ferromagnética na direção da chapa oposta, fazendo com que haja contato entre as duas. Se uma corrente elétrica é aplicada em uma das chapas, conseqüentemente após o contato elétrico a outra chapa passará a permitir a passagem da corrente por ela também.

Desta forma, o sensor quando atuado permitirá a passagem da corrente elétrica de uma chapa a outra, conseqüentemente de um fio a outro, estes ligados fisicamente a estas chapas. Têm-se então um sinal de digital de saída, que poderá ser utilizado da melhor forma na etapa seguinte do sistema de controle.

Figura 46 - Sensores magnéticos WEG



Fonte: <http://ecatalog.weg.net/files/produtos/sensores-magneticos-G.jpg> – Acesso em 14/06/2015

3.2.7 VÁLVULAS DE CONTROLE

“A válvula de controle desempenha um papel muito importante no controle automático de processos industriais que dependem da correta distribuição e controle de líquidos, gases e vapores” (BEGA (Org.), 2006. p365).

Uma válvula de controle é um elemento essencial em controle de processos. Atua como elemento final de controle, ou seja, é o elemento que está em contato direto com o material do processo. Pode, dependendo da aplicação, atuar apenas para abertura ou fechamento total de uma tubulação (controle “*ON/OFF*”), ou como controle de abertura e fechamento proporcionais, para controles de vazão, nível, pressão, etc.

Podemos dividir uma válvula de controle basicamente em duas partes principais: corpo e atuador.

Corpo

É a parte que executará a relação de controle, que ficará em contato direto com o processo, permitindo ou restringindo a passagem do fluido pela tubulação. Seu dimensionamento deve ser realizado de maneira a ponderar as grandezas de temperatura, pressão e material do fluido (caráter ácido, básico ou neutro, sólidos em suspensão, etc.). Quanto ao corpo, podemos dividir as válvulas em dois grupos: de deslocamento linear e de deslocamento rotativo.

Válvulas de Deslocamento Linear: neste tipo de válvula, a peça que veda a passagem do fluido descreve um movimento retilíneo, acionada por uma haste deslizante, em direção ao fechamento da sede da válvula. Em geral são válvulas mais pesadas, e necessitam de maior espaço físico para instalação. A válvula guilhotina (figura 47) é a mais utilizada deste grupo.

Figura 47 - Válvula tipo guilhotina



Fonte: http://www.elan.ind.br/ELAN_arquivos/pop_up/valvula-guilhotina-WB.jpg– Acesso em 14/06/2015

Válvulas de Deslocamento Rotativo: já neste tipo de válvula, a peça que veda a passagem do fluido descreve um movimento rotativo em direção ao fechamento da sede. Em geral, essas válvulas possui menos peso que outros tipos de válvula e um custo inicial mais baixo. Uma das mais utilizadas deste grupo é a tipo borboleta, mostrada na figura 48.

Figura 48 - Válvula tipo borboleta



Fonte: <http://www.gavalvulas.com.br/images/borboleta.jpg> – Acesso em 14/06/2015

Atuador

O atuador é o elemento responsável por transmitir a força mecânica necessária ao movimento do corpo da válvula, sendo que podem ser **lineares** (figura 49) ou **rotativos** (figura 50) também. Seu dimensionamento é tão importante quanto o do corpo da válvula, sendo que é de suma importância dimensionar a força necessária para a movimentação do corpo, levando em conta as forças estáticas e dinâmicas atuantes no fluido. Os atuadores podem ser pneumáticos, hidráulicos ou elétricos.

Figura 49 - Atuador pneumático linear



Fonte: <http://cilindropneumatico.com/images/cilindro.jpg> – Acesso em 14/06/2015

Figura 50 - Atuador pneumático Rotativo

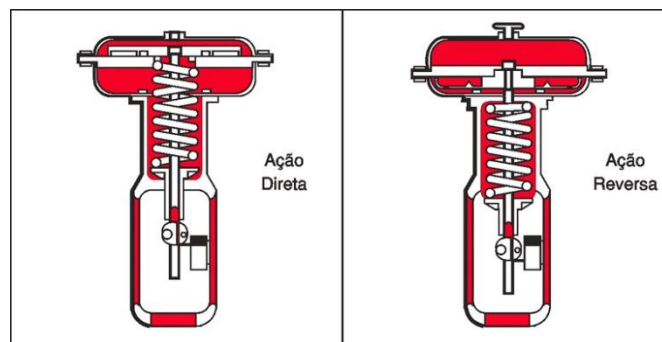


Fonte: http://ritepro.com.br/arquivos/imagens/98/550x550_s92_s93cover2-bleed_c9fe.jpg – Acesso em 14/06/2015

Um atuador também pode ser de **simples ação** (figura 51), quando há apenas uma tomada para injeção de pressão no mesmo e, desta maneira se subdividir em:

- Atuador de ação direta: a válvula de controle fecha com o aumento da pressão de ar e assume posição totalmente aberta em caso de corte no suprimento de ar de acionamento, por meio de uma mola interna ao atuador;
- Atuador de ação reversa: a válvula de controle abre com o aumento da pressão de ar e assume posição totalmente fechada em caso de corte no suprimento de ar de acionamento, por meio de uma mola interna ao atuador.

Figura 51 - Representação esquemática - atuadores simples ação



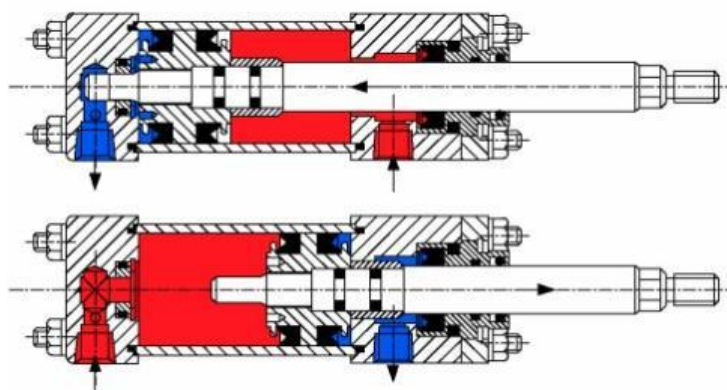
Fonte:

http://www.mecatronicaatual.com.br/files/image/MA30_Posicionadores_08_1_.jpg

– Acesso em 15/06/2015

Já o atuador de **dupla ação** (figura 52) depende do suprimento de ar para sua movimentação. No caso de corte do suprimento de ar a válvula de controle se manterá na última posição antes do corte.

Figura 52 - Representação esquemática de atuador de dupla ação



Fonte: PARKER, 2001

Válvula Solenoide Direcional

Estas válvulas são utilizadas para garantir o automatismo das válvulas em conjunto com os atuadores. Uma válvula direcional pode ser pilotada com ar comprimido ou mesmo com óleo hidráulico, dependendo da aplicação.

O acionamento da válvula solenoide direcional se dá através do acionamento de uma bobina solenoide envolvida no que chamamos de torre da válvula. Este solenoide nada mais é que fio condutor elétrico enrolado de tal forma a formar uma bobina. Quando a corrente elétrica percorre esta bobina, um campo eletromagnético é gerado. O êmbolo ferromagnético presente na torre é atraído devido às forças eletromagnéticas formadas ao redor da bobina, e o seu movimento acarreta na movimentação do carretel, parte principal desta válvula. É este carretel que permite, através de suas ranhuras radiais, a passagem do fluido (ar ou óleo) de um orifício a outro, fazendo com que o fluido chegue ao atuador e conseqüentemente movimento a válvula.

Na figura 53 temos um exemplo de válvula pneumática direcional 5/2 vias de duplo solenoide.

Figura 53 - Válvula direcional duplo solenoide



Fonte: <http://www.eletricawf.com.br/image/> – Acesso em 14/06/2015

3.3 CONTROLE AUTOMÁTICO

*Controlar um processo industrial significa, basicamente, manter os valores das variáveis de processo dentro de uma faixa aceitável para sua operação conveniente; mais ainda, buscar dentro de cada faixa, o valor ótimo para cada variável denominado valor desejado, ou **set-point**. (BEGA (Org.), 2006)*

Controlar um processo significa, muitas vezes, garantir a eficiência na utilização dos recursos e eficácia no alcance do objetivo. Garantir isto de forma automática traz uma tranquilidade aos operadores do processo, que podem direcionar o seu tempo de trabalho para a gestão macro do processo, buscando melhorias na utilização de insumos, na metodologia dos processos, etc.

Outro ponto importante referente ao controle automático é a questão da segurança operacional dos equipamentos. Controlar automaticamente também significa garantir que não haverá perdas materiais ou mesmo danos pessoais aos operadores. Neste ponto, os intertravamentos de segurança são primordiais, pois são eles que garantem que, se houver falha, esta falha será segura, sem causar danos periféricos.

Para um controle efetivo, também é de suma importância conhecer o processo em si, pois cada processo possui suas particularidades, e principalmente o tempo de atraso de um processo influi diretamente no tipo de controle do mesmo.

3.3.1 FERRAMENTAS DE CONTROLE

CLP's – Controladores Lógicos Programáveis

O Controlador Lógico Programável (CLP), ou do inglês, *Programmable Logic Controller* (PLC) é um equipamento industrial microprocessado, que foi concebido

inicialmente em 1968, com o nome de MODICON® (*Modular Digital Controller* – figura 54), a fim de substituir os grandes painéis de controle a relés utilizados anteriormente.

Figura 54 - Primeiro CLP, com a equipe que o desenvolveu



Fonte: <http://plc--training.com/wp-content/uploads/2014/01/modicon.png> – Acesso em 15/06/2015

Além da redução do espaço físico, o CLP trouxe outra grande vantagem no que diz respeito à flexibilidade na alteração da lógica de controle. Alterar a lógica de funcionamento de um processo ficou mais simples, com acesso via *software*, dispensando a necessidade de se desmontar e remontar um grande painel com significativa quantidade de relés (figura 55).

Figura 55 - Painel de acionamento - lógica a relés

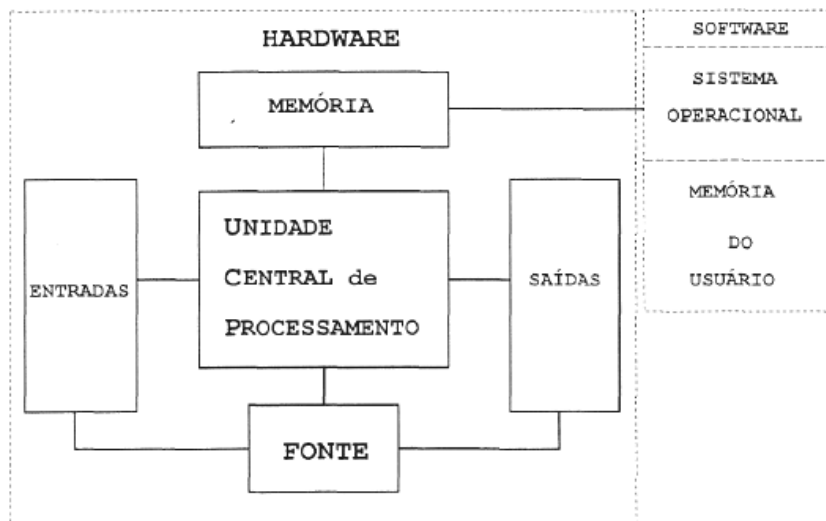


Fonte: <http://plc--training.com/wp-content/uploads/2014/01/modicon.png> – Acesso em 15/06/2015

Com o passar do tempo, os CLP's evoluíram muito, principalmente devido à evolução dos componentes eletrônicos, cada vez mais eficientes e compactos. Em virtude disto, hoje temos CLP's com processamento cada vez mais rápido e *hardware* cada mais flexível.

Podemos entender o funcionamento de um CLP através de um diagrama de blocos típico, visto na figura 56.

Figura 56 - Diagrama em blocos típico de um CLP



Fonte: KOPELVSKI, 2010

A **Unidade Central de Processamento (ou UCP)** é o “cérebro” do CLP. É nela que está o microprocessador responsável por todas as operações lógicas do controlador. A UCP busca os dados das entradas físicas do controlador, processa estes dados de acordo com o programa de usuário e aciona as saídas físicas do controlador, além de realizar operações de retenção, contagem, temporização, funções aritméticas, entre outros; conforme o modelo do controlador.

Os **Módulos de Entradas e Saídas** são as interfaces entre o CLP e o meio físico dos processos. São através destes módulos que o CLP consegue adquirir os dados de campo e interferir no processo, a fim de realizar as funções definidas no programa do usuário.

A **Fonte** fornece a alimentação elétrica do CLP, concebida de maneira a operar de forma segura e confiável, mantendo os níveis de tensão e corrente em patamares adequados ao correto funcionamento do CLP.

A unidade de **Memória** do CLP contém o programa operacional do próprio controlador, além de armazenar o programa de desenvolvimento do usuário. É importante salientar que, para os CLP's em geral, o nível de confiabilidade dos dispositivos eletrônicos, como a memória, é muito alto, principalmente em relação aos computadores de uso doméstico. Pois uma falha operacional de um CLP pode custar um preço alto, tanto no que tange a equipamentos físicos, quanto à vida humana.

O CLP funciona realizando uma varredura em intervalos de tempo definidos (limitados pela capacidade do *hardware*), em que a cada intervalo de tempo (da ordem de milissegundos) as entradas são lidas, o programa de usuário é executado, as saídas são atualizadas, e um autodiagnóstico é realizado.

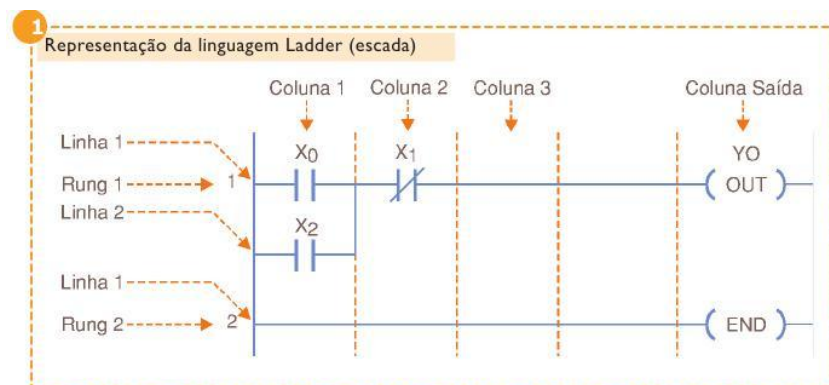
Se a varredura do CLP for interrompida, um dispositivo de segurança denominado *watch dog timer* (ou temporizador cão de guarda) é acionado, realizando a parada do processamento do controlador. Desta forma, garante-se que o controlador irá executar toda a varredura de operação sem problemas.

A programação de um CLP é feita via *software*, exclusivo para cada fabricante. As linguagens de programação que um CLP pode aceitar também dependerão do fabricante, porém, a norma IEC-61131-3 define cinco linguagens padrão para este tipo de programação:

- Lista de Instruções (IL);
- Texto estruturado (ST);
- Diagrama *Ladder* (LD);
- Diagrama de Blocos Funcionais (FBD);
- Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC).

Dentre estas, a linguagem mais utilizada é a *Ladder* (figura 57), devido à sua facilidade de entendimento e semelhança com as lógicas a relés físicos utilizadas antigamente.

Figura 57 - Exemplo de lógica *Ladder*



Fonte:

http://www.mecatronicaatual.com.br/files/image/figura_1_programacao_ladder.jpg -
Acesso em: 20/06/2015

Sistemas Supervisórios

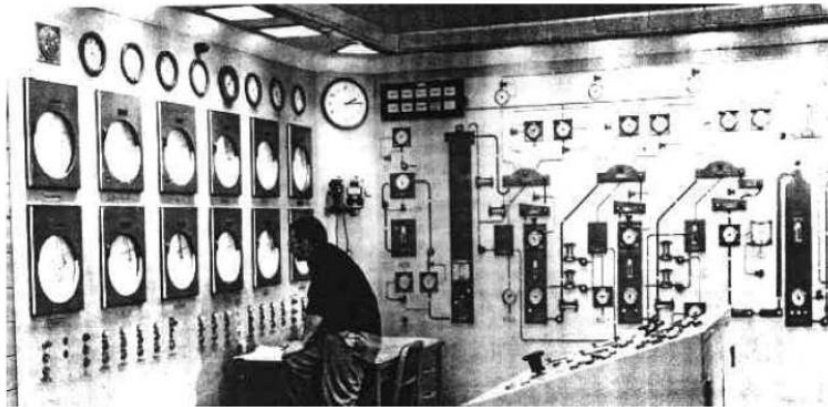
Um sistema supervisório pode ser definido como um sistema que monitora processos executados em uma planta industrial, a partir da visualização das variáveis de processo, bem como das ações tomadas pelo sistema de automação. (RANIERI, 2007)

Um sistema supervisório é muitas vezes denominado “Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados”, ou abreviadamente “SCADA”, que é uma referência a sua arquitetura. Uma arquitetura deste tipo utiliza um *software* instalado em um computador para supervisionar as variáveis de campo e um ou mais CLP’s, para coletar as variáveis e realizar as ações de comando.

Um sistema supervisório é concebido no intuito de auxiliar o usuário do mesmo na identificação do sistema como um todo, proporcionando tanto uma visão macro do processo, quanto um detalhamento das falhas e intertravamentos do mesmo. Trata-se de uma interface de elevado nível entre operador e processo, possibilitando ação e monitoramento em tempo real.

Os primeiros sistemas com arquitetura SCADA eram baseados em telemetria (figura 57), possuindo apenas lâmpadas e indicadores instalados em grandes painéis físicos (adaptado de SOUZA, 2014).

Figura 58 - Sistemas SCADA baseados em telemetria

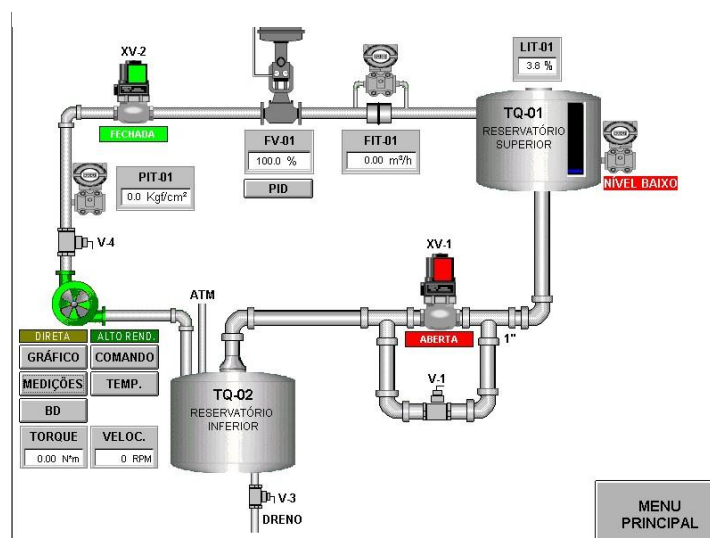


Fonte: SOUZA, 2014

Os sistemas SCADA atuais são bem mais evoluídos, desenvolvidos com *softwares*, o que possibilita uma maior flexibilidade nas alterações e maior rapidez na manutenção e desenvolvimento, visto que nos painéis antigos era preciso desmontar e montar os indicadores.

As telas de um supervisório atual são bem mais intuitivas (figura 59), com gráficos interativos que utilizam padrões de cores desenvolvidos para maior assimilação e entendimento do processo, bem como reduzem o tempo de percepção da falha pelo operador.

Figura 59 - Tela de um sistema supervisório atual



Fonte: <http://www.feg.unesp.br/~lamotriz/fig1.jpg> - Acesso em 17/06/2015

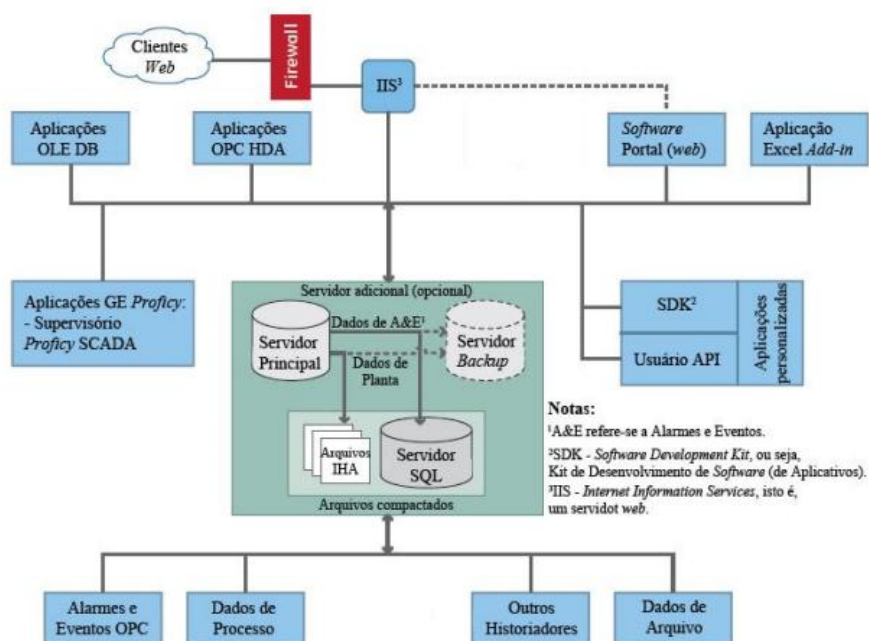
Outra funcionalidade interessante dos sistemas supervisório atuais é capacidade de comunicação com outras ferramentas, no intuito de sinalizar eventos, como a geração de relatórios em uma planilha do *Microsoft® Office Excel®*, o envio de um *email* para destinatários definidos, dentre outras.

Softwares Historiadores

Um *software* historiador é uma solução para o gerenciamento de informações de uma planta industrial. É um robusto sistema de banco de dados que coleta, arquiva e distribui grandes volumes de dados de chão de fábrica, de maneira extremamente rápida (adaptado de SILVESTRIN, 2012).

Na figura 59 podemos visualizar a arquitetura básica de um *software* historiador. Tal ferramenta requisita os dados da planta através de *drivers* específicos, como um servidor *OPC (Ole for Process Control)*, por exemplo. Os dados são armazenados em um servidor principal, que pode ou não ter um *backup*. Os “clientes” que necessitam das informações, como o sistema supervisório e outros *softwares*, buscam os dados no servidor para a sua utilização.

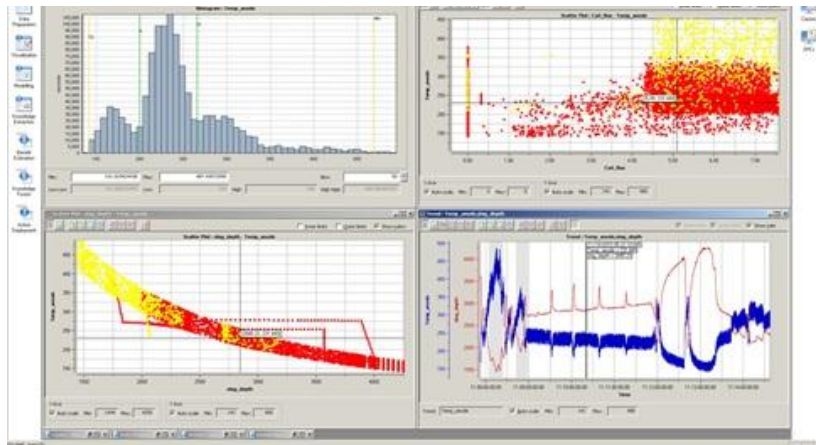
Figura 60 - Arquitetura típica de um *software* historiador



Fonte: SILVESTRIN, 2012

Os historiadores também possuem interfaces para visualização das variáveis. São janelas de tendências (figura 60), nas quais podem-se visualizar as variáveis de processo em tempo real e consultar os valores históricos das mesmas. Dependendo da infraestrutura despendida para o servidor do historiador, os dados históricos ficam salvos por meses, auxiliando na análise dos cenários de operação, bem como na análise de otimização da produção.

Figura 61 - Janela de tendências de um historiador



Fonte: <http://www.geautomation.com> - Acesso em 17/06/2015

Redes industriais

De todas as tecnologias associadas ao controle industrial, as redes de comunicação são as que sofreram maiores evoluções na última década, seguindo, aliás, a tendência global de evolução das comunicações que se tem vindo a sentir, praticamente em todos os ramos de atividade, desde as telecomunicações móveis, à Internet, à comunicação sem fios (wireless), etc. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2007)

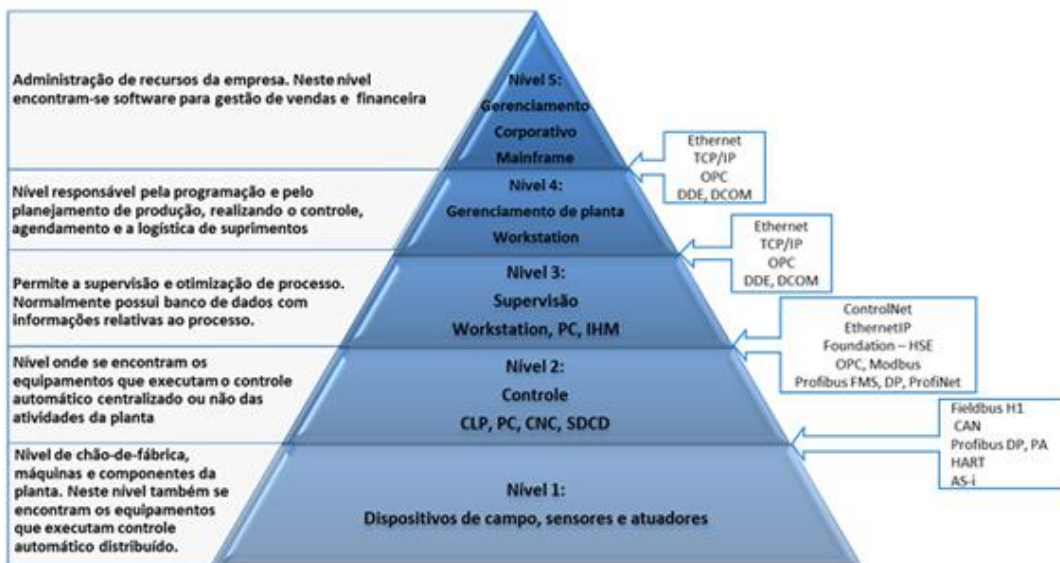
O nível de automatização dos dispositivos de campo tem evoluído cada vez mais, proporcionando um grau elevado de supervisão e controle de equipamentos, sensores,

etc. Devido à grande quantidade de informação que estes dispositivos passaram a fornecer, o meio físico de transmissão de dados precisou sofrer alterações para atender a esta demanda.

O uso das redes industriais possibilita uma maior confiabilidade de transmissão, bem como rapidez e flexibilidade na instalação; além de dispensar o uso de uma grande quantidade de cabos para transmitir o mesmo número de informações.

Existem vários tipos de redes industriais, baseadas em inúmeros protocolos de comunicação diferentes, cada qual mais adequado para certa aplicação. A figura 62 (abaixo), conhecida como “Pirâmide da Automação” demonstra esta variedade de redes e as suas aplicações nos diferentes níveis de automação.

Figura 62 - Pirâmide da Automação



Fonte: http://www.smar.com/images/index150_fig02.jpg - Acesso em 20/06/2015

As redes industriais de maior utilização são:

- **ASi® - Actuator Sensor Interface** – **figura 63**: rede de comunicação digital de pequeno porte (até 62 dispositivos escravos e máximo de 100 metros de cabo) e custo relativamente baixo, utilizada para transmitir dados digitais de relés, sensores, botoeiras, válvulas solenoides, etc. Muito utilizada em linhas de empacotamento e em ilhas de produção com grande quantidade de sinais discretos;

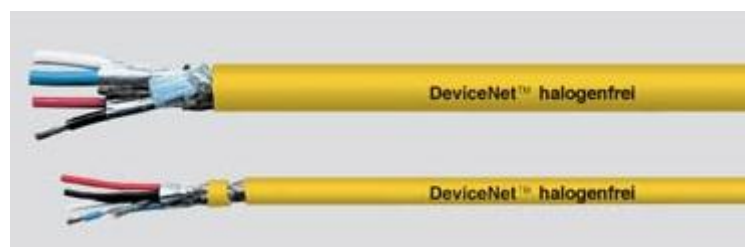
Figura 63 - Meio físico da rede ASi®
Cabo típico do barramento ASI



Fonte: http://images.slideplayer.com.br/1/14511/slides/slide_21.jpg - Acesso em 20/06/2015

- **Devicenet®** - **figura 64**: rede de comunicação digital projetada para sinais de dispositivos de campo, como inversores, sensores, etc. Comporta até 64 instrumentos, com o máximo de 500 metros de cabo, dependendo da taxa de transmissão demandada. Muito utilizada para rede de CCM's (Centros de Controle de Motores);

Figura 64 - Meio físico da rede Devicenet®



Fonte: <http://www.hitechcontrols.com/> - Acesso em 20/06/2015

- **Profibus® - figura 65:** rede de comunicação digital de grande porte que pode ser aplicada nos níveis de dispositivos de campo, com a **Profibus DP® (Distributed Peripheral)** ou **Profibus FMS® (Fieldbus Message Specification)**, sendo que para estes protocolos pode-se chegar a até 23 Km de cabos; e nos níveis de transmissão de dados, ligados ao controle de processos, com a **Profibus PA® (Process Automation)**, sendo que para este protocolo pode-se chegar a 1,9 Km de cabos. O número de dispositivos permitido é elevado, dependendo diretamente do tamanho da rede, pois pode-se segmentar a rede com até 32 dispositivos por segmento, até chegar ao comprimento total.

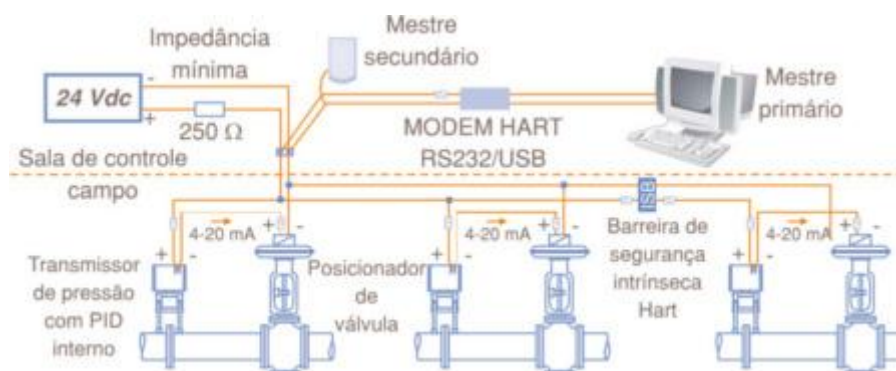
Figura 65 - Meio físico da rede Profibus DP®



Fonte: http://uk.farnell.com/productimages/standard/en_GB/42422201.jpg - Acesso em 20/06/2015

- **HART® - figura 66:** rede de comunicação digital de pequeno porte que utiliza o meio físico do padrão 4-20 mA para sobre escrever a informação digital. Utilizando a arquitetura de barramento, pode-se interligar até 15 dispositivos. Este tipo de rede é utilizado em pequenas aplicações, como malhas de controle simples, bem como para diagnósticos e leituras de variáveis secundárias de instrumentos de medição.

Figura 66 - Exemplo de rede Hart®



Fonte: http://www.mecatronicaatual.com.br/files/image/hart_figura_02_5_.jpg - Acesso em 20/06/2015

Seja qual for o protocolo de rede industrial a ser utilizado, a sua implantação ainda trará mais benefícios em relação ao uso de cabos e transmissão analógica. Haverão ganhos na redução do espaço físico, velocidade e confiabilidade de transmissão, e no diagnóstico integrado de equipamentos.

3.3.2 CONTROLE DE PROCESSOS

Apesar da contínua modernização dos processos de fabricação e manufatura, a maioria das leis e princípios de medição e controle de processos industriais se conserva intacta até os dias atuais (BEGA (Org.), 2006)

Embora as ferramentas tenham evoluído, pois os sensores e controladores saíram de uma era analógica para a era digital, os princípios do controle automático de processos se conservam até os dias atuais, mantendo os mesmos objetivos de antes.

Manter um processo sob controle significa manter as suas variáveis, no mínimo, dentro de uma tolerância definida para a operação correta da planta. Porém, o controle automático deve buscar sempre o valor desejado, ou *set-point*, que é o valor ótimo para o processo. O controle automático está diretamente aliado à eficiência e à eficácia do processo industrial. É ele quem previne as instabilidades, monitora e exhibe as variáveis e age de forma assertiva a fim de corrigir os desvios no processo.

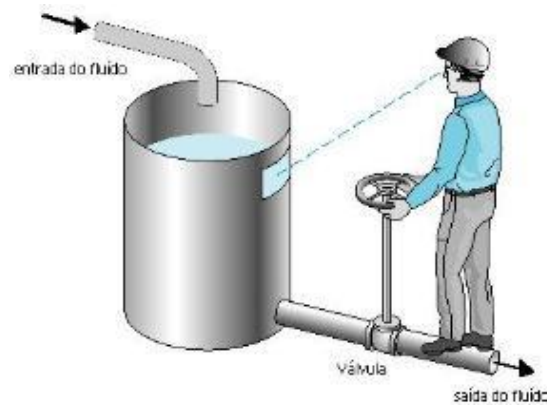
Realizar o controle de um processo pode ser feito de várias formas, as quais iremos detalhar a seguir.

Controle manual

Um processo pode ser controlado manualmente através da ação de um operador (figura 67), porém, neste caso, o processo estará sujeito à subjetividade do ser humano. Cada pessoa tem o seu nível de percepção e tempo de reação inerentes a ela, e as pessoas se

diferem muito entre si. Tendo isto em vista, é quase impossível garantir que as ações de controle serão efetuadas sempre no tempo correto, e da maneira correta.

Figura 67 - Exemplo de controle manual



Fonte: <http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAAs2EAE-0.jpg> - Acesso em 20/06/2015

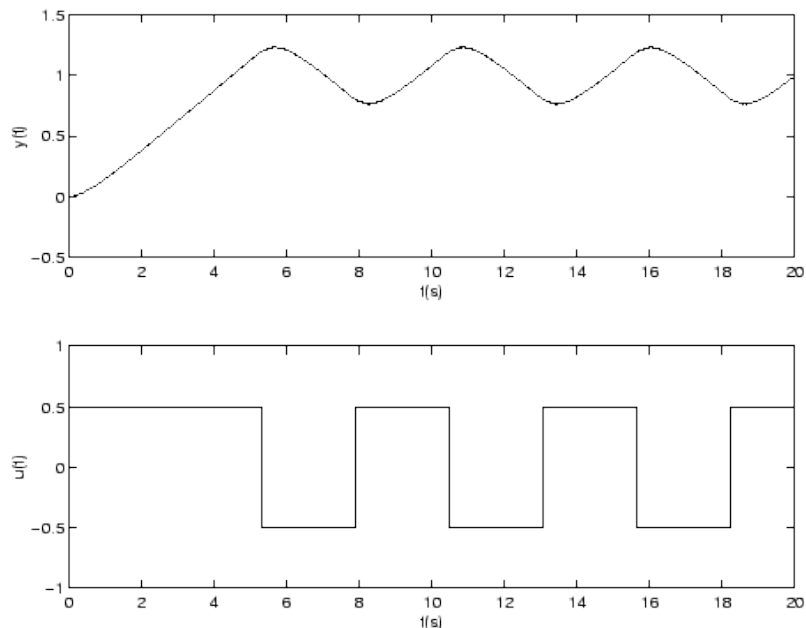
Na figura 67, a função do operador é observar a variável de processo (nível do tanque) ou **PV** (*Process Variable*), compará-la mentalmente com o ponto desejado, que é o **SP** (*Set-Point*) do processo e corrigir a vazão de saída de água, que é a variável manipulada, ou **MV** (*Manipulated Variable*) do processo, para fazer com que o **PV** chegue ao valor de **SP**.

Portanto, é possível sim que haja um controle manual de um processo, porém, apenas em situações de extrema necessidade, como na atuação emergencial em caso de falha no controle automático, ou em um processo de produção muito simples de um produto. Para fins de lucratividade com produção em maior escala, implementar um controle manual é inviável.

Controle automático tipo “ON-OFF” ou “liga-desliga”

Em um controle tipo “liga-desliga”, a oscilação em torno do *set-point* é inevitável. A ação de controle neste método leva a variável manipulada ao seu valor máximo ou mínimo toda vez que a variável de processo ultrapassa ou fica abaixo do ponto desejado, conforme a figura 68.

Figura 68 - Resposta de um controle "liga-desliga"



Fonte: <http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/img82.gif> - Acesso em 21/06/2015

Portanto, neste tipo de controle, além da histerese inerente ao controlador e dos atrasos relativos ao sistema de medição do processo, o próprio método de correção do controle automático acrescenta erros ao processo. Por exemplo, se o processo demonstrado na figura 68 representar um controle de nível em que $y(t)$ é a variável de processo e $u(t)$ representa a variável manipulada (a vazão de água de alimentação, por exemplo); pode-se perceber claramente a flutuação da variável de processo em virtude do tipo de controle adotado. A válvula de controle ou está totalmente aberta ou está totalmente fechada, portanto ou há vazão máxima na entrada do tanque ou vazão nenhuma.

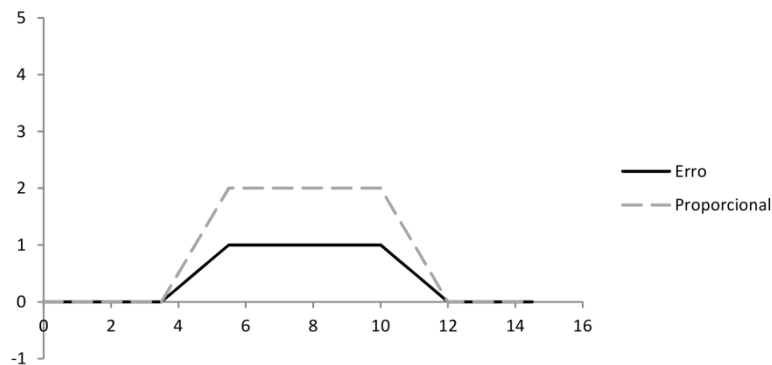
Um controle deste tipo só deve ser usado em aplicações simples, onde não há a necessidade de precisão no controle, nem de um bom desempenho ao longo do tempo, como em um controle de enchimento de uma caixa d'água através de uma boia. Em geral, é um sistema simples e de baixo custo de implantação, porém pode elevar o custo de manutenção devido ao elevado desgaste dos componentes do elemento final de controle, principalmente se for em uma aplicação industrial, em que o número de operações deste elemento é elevado, operando ininterruptamente durante todo o dia.

Controle automático tipo PID

Controle Proporcional

Em um controlador proporcional, a saída do controlador é proporcional ao valor do erro no tempo t (diferença entre o **SP** e **PV**). Neste tipo de controle há um ganho **K**, denominado ganho proporcional, que atua na variável manipulada, como mostra a figura 69.

Figura 69 - Resposta de um controlador com ação proporcional



Fonte: http://greenfield-br.com/img/PID/5_Circuito_Analogico_PID/Grafico_Proporcional.png - Acesso em 20/06/2015

Se o erro varia, a variável manipulada também irá variar, multiplicada pelo ganho **K**, como define a equação 6, abaixo:

$$u(t) = K_p \times e(t) \quad (6)$$

Onde:

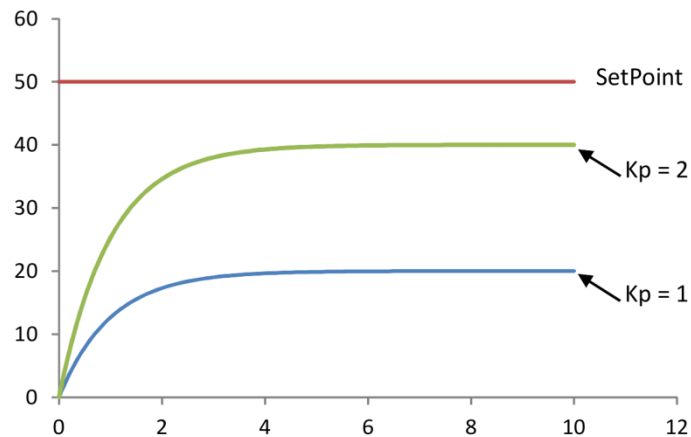
$u(t)$ = sinal de saída do controlador;

K_p = ganho proporcional;

$e(t)$ = erro (SP - PV).

Um controlador puramente proporcional não consegue obter erro igual a zero, ou seja, a variável de processo não consegue se manter no valor desejado, pois não há elementos dinâmicos para o controlador. A ação de controle não varia quando o erro está fixo, varia quando o erro varia também. Isto faz com que a variável de processo se estabilize sempre em um valor diferente do valor desejado, como mostra a figura 70.

Figura 70 - Resposta da variável de processo para um controlador proporcional (P)



Fonte: http://greenfield-br.com/img/PID/2_Controlador_P/Grafico_Kp.png - Acesso em 21/06/2015

Controle Proporcional - Integral

Um controlador puramente integral não possui efeito prático, pois se fosse concebido dessa maneira, a ação de controle não traria o processo ao valor desejado em um tempo factível. A ação puramente integral possui tempo de resposta muito lento, o que implica em um tempo de estabilização muito longo.

Portanto, adota-se o uso do controlador proporcional aliado ao integral, com o intuito de levar o erro de regime permanente a zero. Abaixo temos a equação 7, que representa esta ação:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau)) \quad (7)$$

Onde:

$u(t)$ = sinal de saída do controlador PI;

K_p = ganho proporcional;

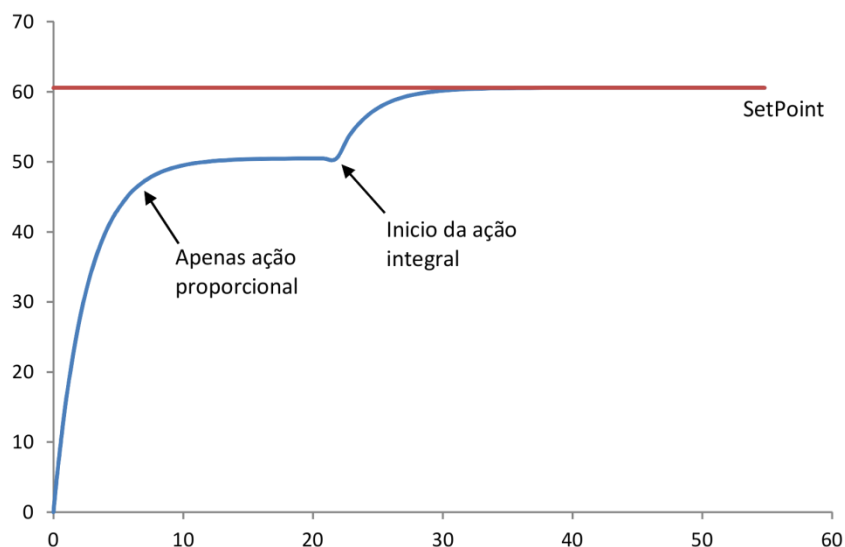
$e(t)$ = erro (SP - PV);

$\frac{1}{Ti} =$ ganho integral;

$\int_0^t e(\tau)d(\tau) =$ integral do erro com o passar do tempo.

Quando o processo varia e surge um erro $e(t)$, a ação proporcional do controlador atua rapidamente, modificando a variável manipulada proporcionalmente ao erro. Quando a variável de processo tende a se estabilizar com um valor de erro constante, a ação integral começa a influenciar no controle (figura 71), agindo sobre o erro, com o passar do tempo. A ação da integral só irá cessar quando o valor do erro for igual a zero.

Figura 71 – Resposta da variável de processo para um controlador proporcional + integral (PI)



Fonte: <http://greenfield-br.com/pid/index.php/topic,53.0.html> - Acesso em 21/06/2015

Controle Proporcional - Derivativo

Um controlador puramente derivativo não existe, ele está inerentemente ligado ao controlador proporcional, caracterizando o controle **PD** (Proporcional + Derivativo). A saída de um controle derivativo está ligada à derivada do erro, como demonstrado na equação 8, a seguir:

$$u(t) = K_p(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (8)$$

Onde:

$u(t)$ = sinal de saída do controlador PD;

K_p = ganho proporcional;

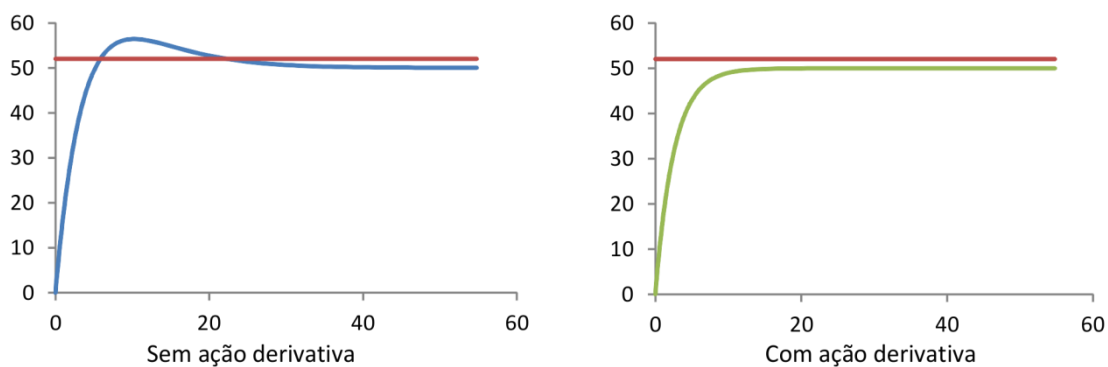
$e(t)$ = erro (SP - PV);

T_d = ganho derivativo;

$\frac{de(t)}{dt}$ = derivada do erro no tempo.

Neste tipo de controle, a ação derivativa age toda vez que a derivada do erro não for constante, ou seja, se há perturbações no processo e a variação do erro assume valores diferentes no tempo, a ação derivativa age para compensar essas oscilações (figura 72). Se a variação do erro mantém-se constante, a ação derivativa se mantém em zero, pois a derivada de uma constante é igual a zero.

Figura 72 - Resposta da variável de processo a um controlador proporcional + derivativo (PD)



Fonte: <http://greenfield-br.com/pid/index.php/topic,52.0.html> - Acesso em 21/06/2015

Controle Proporcional – Integral - Derivativo

Um controlador proporcional mais integral mais derivativo combina as três ações já definidas anteriormente. A saída deste controlador é uma junção da velocidade de

resposta da ação proporcional, da prevenção a oscilações bruscas da ação derivativa, e da eliminação do erro da ação integral, como mostra a equação 9:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (9)$$

Onde:

$u(t)$ = sinal de saída do controlador PD;

K_p = ganho proporcional;

$e(t)$ = erro (SP - PV);

$\frac{1}{T_i}$ = ganho integral;

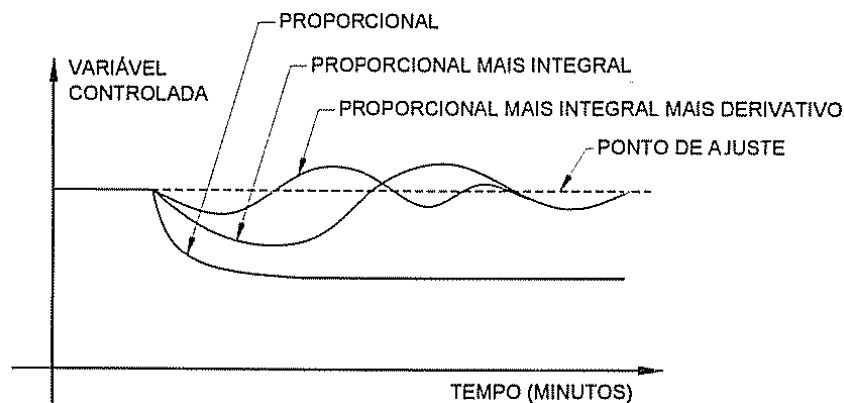
$\int_0^t e(\tau) d(\tau)$ = integral do erro com o passar do tempo;

T_d = ganho derivativo;

$\frac{de(t)}{dt}$ = derivada do erro no tempo.

Teoricamente, o **PID** apresenta melhores resultados relativos ao controle do processo (figura 73) do que os demais (**PI e PD**), porém, esta é a ação de controle mais complexa de se ajustar. Deve-se atentar para qual tipo de processo está em estudo, pois, na prática, nem sempre a combinação destas três ações será benéfica ao controle.

Figura 73 - Resposta de um controlador proporcional + integral + derivativo (PID)

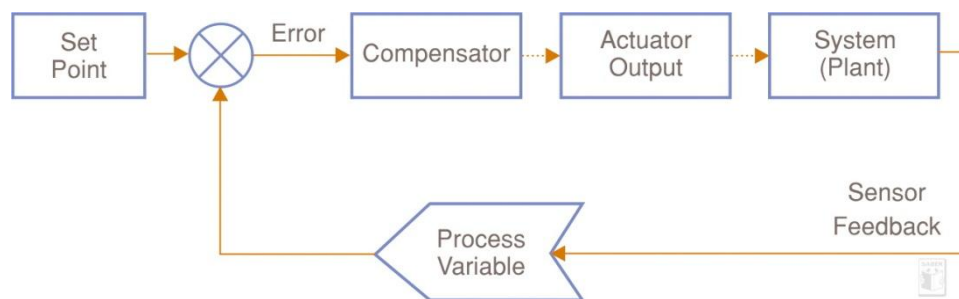


Fonte: BEGA (Org.), 2006

Controle por realimentação – *feedback*

Neste tipo de arquitetura de controle, uma das mais utilizadas na prática, o erro (diferença entre o valor desejado e a variável de processo) é utilizado como referência para realizar a ação de correção no processo, como mostra a figura 74.

Figura 74 - Diagrama em blocos - arquitetura *feedback*



Fonte:

http://www.mecatronicaatual.com.br/images/stories/artigos/instrumentacao/teoria_pid/ma64_teorias_pid_fig01.jpg - Acesso em 21/06/2015

A variável de processo é percebida através de sensores e transmitida para o controlador por meio dos transmissores. O controlador compara o valor do processo com o valor desejado, e então o erro calculado torna-se a base para a ação dos algoritmos de controle.

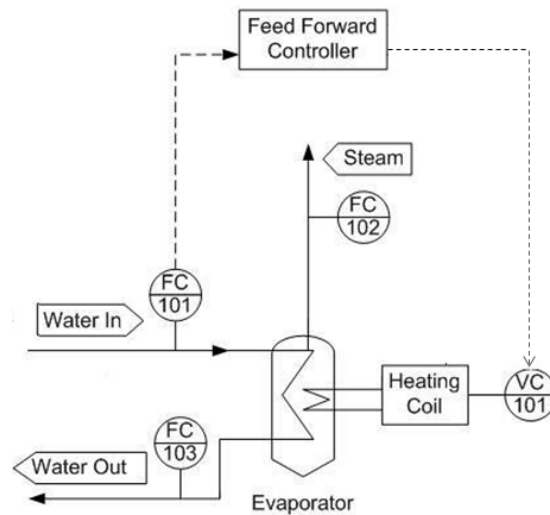
Se não há erro, o controlador mantém a variável de saída no mesmo valor, sem alterar o processo. Se há erro, então a ação de controle interfere no processo, de acordo com o algoritmo de controle parametrizado. A vantagem deste tipo de arquitetura de controle é que não é preciso conhecer os distúrbios que afetam o comportamento do processo, apenas a variável de saída do processo é que é importante para o controle.

Controle por antecipação – *feedforward*

O controle por realimentação exige mais conhecimento do processo para uma correta parametrização. Neste tipo de controle, o controlador analisa os distúrbios da entrada do

processo para realizar as correções na saída do mesmo (figura 75), uma vez que se conhece a relação de variação da entrada com a saída.

Figura 75 - Exemplo de controle por antecipação - *feedforward*



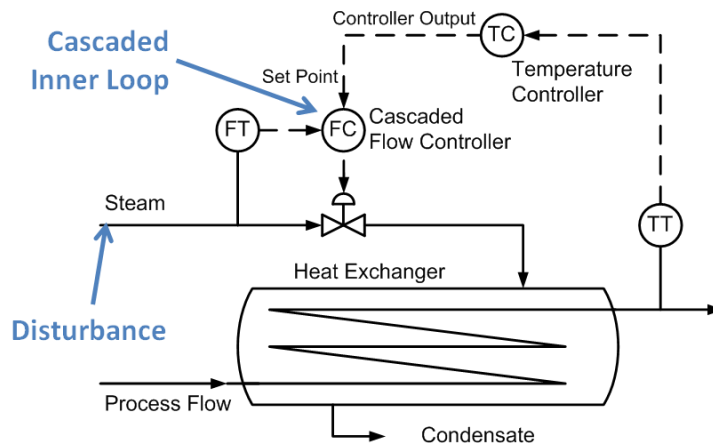
Fonte: Adaptado de < <https://controls.engin.umich.edu/wiki/images/a/ae/Ev1.jpg> > - Acesso em 21/06/2015

Este tipo de arquitetura de controle geralmente não é utilizado sozinho, mas sim em conjunto com o controle *feedback*, a fim de antecipar as variações na entrada do processo que afetarão a saída do mesmo, principalmente em malhas de controle críticas, como controle de pressão e nível em caldeiras.

Controle em cascata

Em algumas situações, utilizar uma malha de controle apenas não é suficiente para manter o processo no ponto desejado. Nestas situações, lançamos mão da combinação entre malhas para garantir a efetividade do controle. Uma destas possíveis combinações é o controle em cascata (exemplo na figura 76).

Figura 76 - Exemplo de controle em cascata



Fonte: <http://blog.opticontrols.com/wp-content/uploads/2011/04/cascade.png> - Acesso em 21/06/2015

No exemplo acima, a malha mestre é o controle de temperatura (**TC**), e o objetivo do controle é controlar a temperatura na saída do trocador de calor, percebida pelo sensor/transmissor de temperatura **TT**.

A vazão de entrada de vapor está sujeita a alguns distúrbios, como a variação de sua pressão. Se a pressão de vapor varia, a sua vazão também varia, e conseqüentemente a temperatura de saída do trocador será afetada. Devido às condições do processo, esta alteração na temperatura poderá ser percebida somente após um longo tempo, prejudicando o processo.

A solução encontrada neste caso é medir a vazão de entrada de vapor através de **FT** e controlá-la através da malha de controle escravo **FC**. Desta maneira, garante-se que há o valor de vazão necessário para processo de troca térmica. Nesta arquitetura de controle, a temperatura de saída é medida e compara com o valor desejado pelo controlador, que por sua vez calcula um *set-point* externo que será a entrada da malha de controle de vazão. Se há necessidade de mais calor na saída, o controlador pedirá mais vazão de vapor, e de modo contrário, pedirá menos vapor.

Medir e controlar a variável secundária, que neste caso é a vazão de vapor, garante que realmente o controle está agindo corretamente no processo, ao passo que, se o controlador apenas abrisse a válvula controle de vazão de vapor, e houvesse algum

problema, como entupimentos ou vazamentos, o controlador demoraria a compensar estes distúrbios e a temperatura, que é a variável de processo a ser controlada, sairia do ponto desejado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As implementações realizadas na caldeira foram focadas no controle de pressão e no controle de nível da caldeira, visando a otimização dos mesmos. Para fins didáticos, iremos abordar primeiramente as características da caldeira e do CLP utilizado, e posteriormente os métodos e dispositivos envolvidos no controle de pressão e no controle de nível.

Os TAG's originais de alguns equipamentos e malhas de controle foram alterados ou omitidos, de maneira a preservar a identificação do local de instalação.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA CALDEIRA ESTUDADA

No desenvolvimento do projeto, a automação proposta foi aplicada em uma caldeira de vapor do tipo flamotubular, escocesa, de tubos horizontais; cujos dados técnicos estão descritos na tabela 1:

Tabela 1 - Características técnicas da caldeira estudada

MARCA	H.BREMER & FILHOS LTDA
MODELO	HBOS . 10
CAPACIDADE DE PRODUÇÃO	10000 Kg/h
PMTA	10 Kgf/cm ²
PRESSÃO DE PROVA	16 Kgf/cm ²
SUPERFÍCIE DE AQUECIMENTO	220 m ²
CATEGORIA DO GERADOR	B

Fonte: Aatoria própria

Tal caldeira opera produzindo vapor saturado, atendendo à demanda de uma planta industrial que necessita de quantidade significativa de calor para o correto funcionamento de seu processo.

Tal caldeira já possuía controles automáticos de pressão e de nível, porém ambos eram constituídos por arquiteturas simples, com apenas uma malha em cada controle. Desta forma, as oscilações na demanda prejudicavam o desempenho da caldeira, afetando significativamente o controle de nível e de pressão. As melhorias propostas foram implementadas a fim de amortecer as variações de pressão e nível causadas pela demanda de vapor variável.

4.2 CARACTERÍSTICAS DO CLP UTILIZADO

O CLP utilizado no trabalho é o *ControlLogix 5000*®, da *Allen-Bradley*, e foi estruturado da maneira descrita na tabela 2, montado sobre o chassi *1756-A10 10-Slot ControlLogix Chassis*, com capacidade para alocar 10 *slots*, demonstrado na figura 77.

Figura 77 - CLP instalado



Fonte: Autoria própria

Tabela 2 - Características técnicas do CLP utilizado

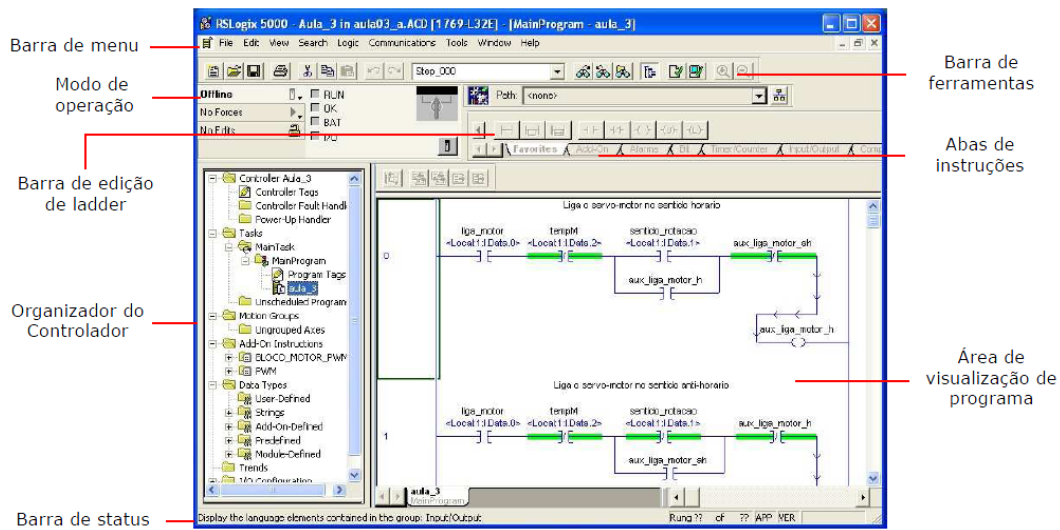
COMPONENTE	NÚMERO DO SLOT	MODELO
CPU	0	1756-L72 <i>ControlLogix5572 Controller</i>
CARTÃO DE COMUNICAÇÃO ETHERNET	1	1756-ENBT 1756 10/100 Mbps <i>Ethernet Bridge, Twisted-Pair Media</i>
CARTÃO DE 16 ENTRADAS ANALÓGICAS – HART	2	1756-IF16H 16 <i>Channel HART Analog Input</i>
CARTÃO DE 8 SAÍDAS ANALÓGICAS – HART	3	1756-OF8H 8 <i>Channel HART Analog Output</i>
CARTÃO DE 32 ENTRADAS DIGITAIS	4	1756-IB32/B 32 <i>Point 10V-31,2V DC Input</i>
CARTÃO DE 32 ENTRADAS DIGITAIS	5	1756-IB32/B 32 <i>Point 10V-31,2V DC Input</i>
CARTÃO DE 32 SAÍDAS DIGITAIS	6	1756-OB32 32 <i>Point 10V-31,2V DC Output</i>
VAGO	7	-----
VAGO	8	-----
CARTÃO DE COMUNICAÇÃO DEVICENET	9	1756-DNB 1756 <i>Devicenet Bridge, Twisted-Pair Media</i>

Fonte: Autoria própria

A ferramenta utilizada para a implementação das malhas de controle no CLP foi o *software RSLogix 5000®*, disponibilizado pelo próprio fabricante do CLP. Este *software* permite a criação e edição de programas para todos os controladores da família *Logix 5000*, em todas as linguagens de programação homologadas pela norma IEC 61131-3, com exceção da “Lista de Instruções (IL)”.

A figura 78 mostra a tela inicial do *software*, destacando as ações gerais disponibilizadas na interface.

Figura 78 - Tela inicial do software RSLogix 5000®



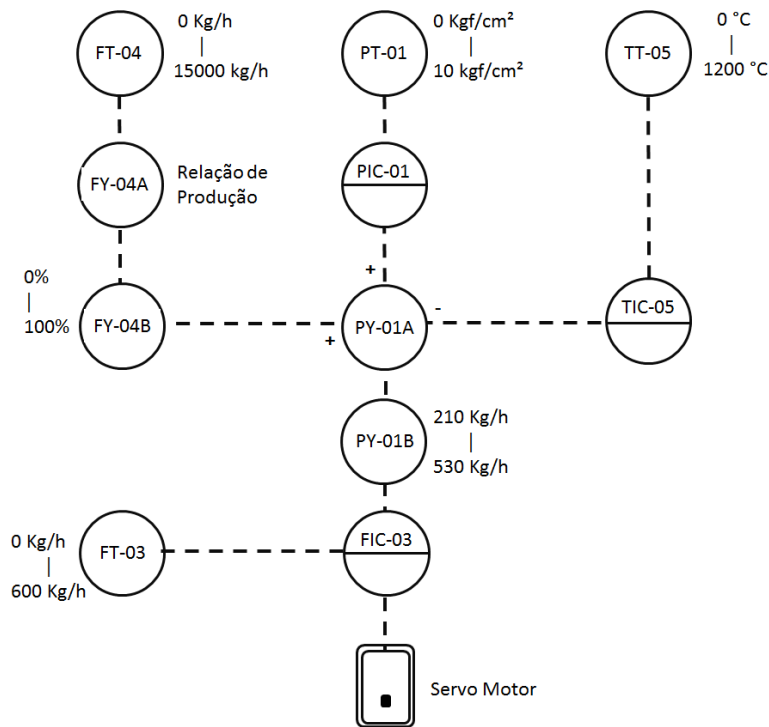
Fonte: SOUZA, 2014. p.75

4.3 DISPOSITIVOS E MÉTODOS ENVOLVIDOS NO CONTROLE DE PRESSÃO

4.3.1 ARQUITETURA DO CONTROLE DE PRESSÃO

Para o controle de pressão da caldeira foi utilizado o conceito de controle em cascata, combinado com a predição da demanda de vapor (adaptado de BEGA (2003, p.28)), a fim de adicionar caráter preditivo ao controle e buscando minimizar as oscilações provenientes de efeitos externos, como as variações na demanda de vapor e na densidade do combustível utilizado (GLP). A arquitetura desta malha de controle foi concebida de acordo com o diagrama da figura 79.

Figura 79 - Diagrama do controle de Pressão da Caldeira



Fonte: Autoria própria

Através deste diagrama, podemos descrever a lógica de controle da pressão da caldeira:

O *setpoint* de pressão é escrito pelo operador na malha mestre PIC-01 (em um range de 0 a 10 Kgf/cm²). Esta malha utiliza como referência do transmissor de pressão PT-01. A ação desta malha de controle é escrever um *setpoint* remoto na malha de controle de vazão de GLP (FIC-03), escalonado de 250 Kg/h a 530 Kg/h; que são os valores de mínimo e máximo, respectivamente, determinados para a vazão de GLP do queimador da caldeira. Até então isto é um controle cascata simples.

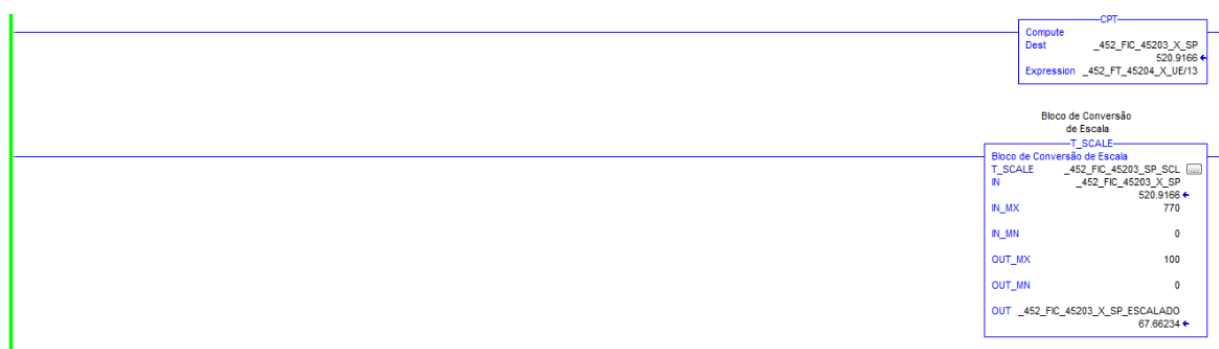
Para buscar a estabilidade na pressão mesmo com as alterações na demanda de vapor, foi incluído um *setpoint* escalado relativo à demanda de vapor. De acordo com a especificação do fabricante da caldeira, juntamente com os dados do queimador e do combustível utilizado, pode-se determinar que, esta caldeira pode produzir, com 1 Kg de GLP, cerca de 13 Kg a 16 Kg de vapor saturado. Esses valores dependem da

eficiência térmica da caldeira, que é um valor que pode variar, dependendo do momento de operação.

Foi adotado então, empiricamente, o pior caso, a relação de 1 Kg de GLP para produzir 13 Kg de vapor, e adicionado o valor percentual correspondente a essa relação como adição na malha de controle principal.

Ou seja, o valor da demanda de vapor medido (FT-04) é dividido por 13, continuamente (relação FY-04A). O resultado deste cálculo representa o mínimo de vazão de GLP necessária para suprir a demanda atual de vapor. Esta vazão é escalada em um valor de 0% a 100%, em relação aos valores de 0 Kg/h a 770 Kg/h, através da relação FY-04B. Este trecho da lógica de controle pode ser visto na figura 80.

Figura 80 - Trecho da lógica contendo escalonamento da vazão de glp em função da demanda de vapor



Fonte: Autoria própria

Este valor superior da escala (770 Kg/h) seria o valor necessário para suprir a demanda máxima de 10000 Kg/h (capacidade máxima de produção da caldeira), com o pior caso de relação de produção (1 Kg de GLP para 13 Kg de vapor).

A MV de saída da relação FY-04B se soma à MV da malha de controle de pressão PIC-01 através da relação somadora PY-01A. O sinal de saída desta relação alimenta outra função de escalonamento, para resultar em um *setpoint* externo para a malha FIC-03, de 250 Kg/h a 530 Kg/h – valores mínimo e máximo de vazão de glp do queimador.

Portanto, mesmo que a malha mestre leve a sua MV a zero, se houver demanda haverá uma MV proveniente da relação de produção do combustível para o vapor. Isto foi criado para garantir que sempre se tenha o mínimo de combustível suficiente para manter a demanda exigida.

Existe para o sinal de MV da malha PIC-01 e para o valor calculado da operação FY-04B, um respectivo *Bias* para cada, que é um fator multiplicador (entre 0 e 1) da malha, de modo a possibilitar o balanceamento das malhas dentro da arquitetura. Deste modo é possível definir qual sinal tem o maior peso para a ação de controle.

A malha TIC-05 é um controle de segurança para os tubos da caldeira. Segundo dados do fabricante, os tubos desta caldeira devem operar a uma temperatura máxima de 1050°C, pois acima deste valor pode haver fusão dos tubos de fogo, ocasionando dano nos mesmos e dificultando a sua posterior substituição. Em virtude disto, a malha TIC-05 opera como um fator subtrator na MV da malha PIC-01, porém só após o valor de temperatura na fornalha (TT-05) ter ultrapassado o *setpoint* de temperatura limite.

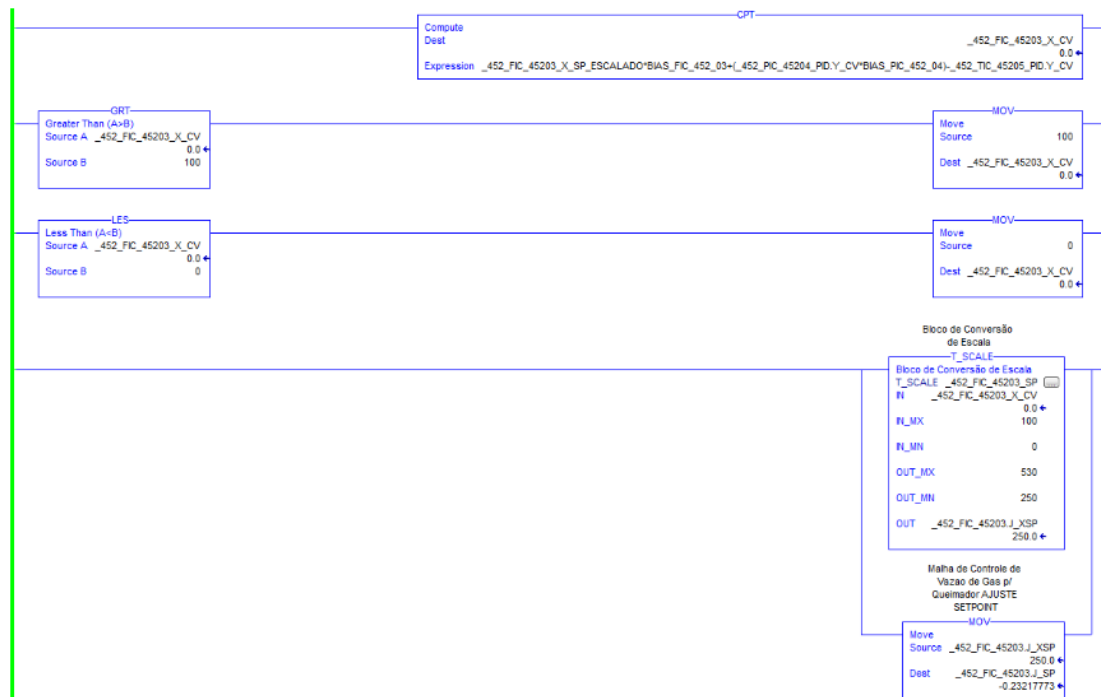
Isto quer dizer que: foi definido um *setpoint* para a malha TIC-05 de 950°C; se a temperatura começar a chegar neste valor ajustado, o controle desta malha começa a atuar, para que a temperatura fique abaixo deste *setpoint*. O valor da MV desta malha entra como o último componente na malha PIC-01, mas com sinal negativo. O resultado final é que, se a temperatura na fornalha começar a aumentar demais, chegando próxima ao *setpoint* de segurança, a malha TIC-05 começa a interferir no controle de combustão, como um “freio” para evitar o superaquecimento da fornalha, e conseqüentemente, dos tubos da caldeira.

Porém, se mesmo assim a temperatura continuar subindo e atingir 980 °C, haverá o desarme do queimador da caldeira, provocado pelo controlador.

Estes três sinais de MV (PIC-01; FY-04 e TIC-05) alimentam a função PY-01A e o sinal de controle proveniente (lógica de controle vista na figura 81) alimenta, como um *setpoint* externo, a malha FIC-03, que controla a vazão de GLP através da abertura de um servomotor conectado ao queimador. O sinal de retorno de vazão de combustível é

fornecido por um medidor de vazão mássica tipo coriollis, o *Promass P®*, da *Endress and Hauser*, semelhante ao visualizado na figura 82.

Figura 81 - Trecho da lógica que calcula o *setpoint* externo para alimentar a FIC-03



Fonte: Autoria própria

Figura 82 - Medidor *Proline Promass P®*, da *Endress and Hauser*



Fonte: <http://www.endress.com> - Acesso em 26/06/2015

4.3.2 O CONTROLE DE COMBUSTÃO

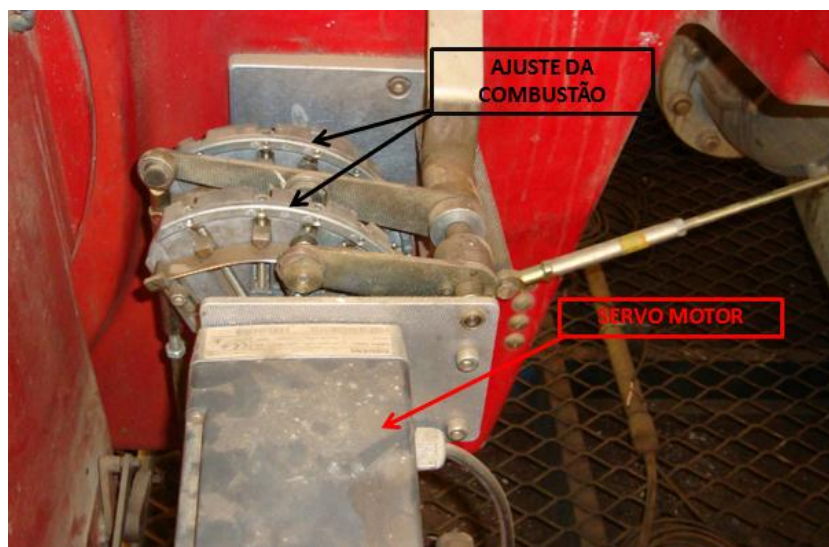
O queimador utilizado para a combustão é o modelo G70/2A – ZM (figura 83). A regulagem de sua combustão (proporção ar/combustível) é feita através de dois dispositivos mecânicos dispostos em forma de meia lua (figura 84). Tais dispositivos alteram os pontos de abertura para a válvula de GLP e para a válvula de admissão de ar, de modo que a curva de combustão seja corretamente ajustada.

Figura 83 - Queimador modelo G70 - Weishaupt



Fonte: <http://www.weishaupt.com.br> - Acesso em 25/06/2015

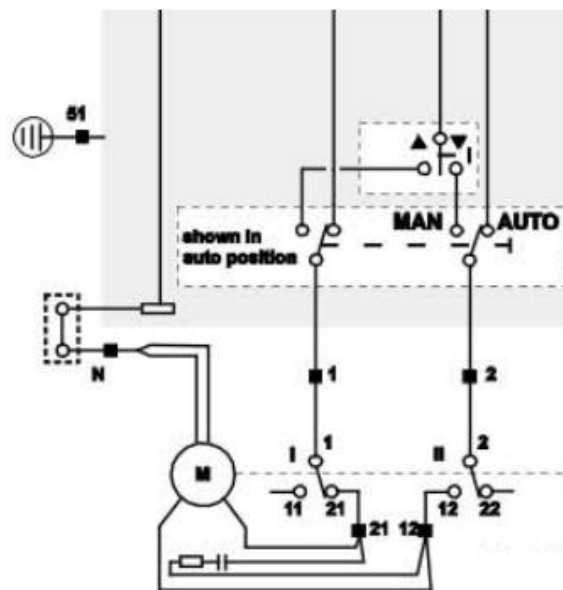
Figura 84 - Servo motor e curvas de ajuste de combustão



Fonte: Autoria própria

Uma vez feito o ajuste mecânico da combustão, o servomotor que controla a abertura das válvulas de admissão de ar e de abertura de GLP precisa apenas abrir ou fechar para injetar mais ou retirar potência da chama. Este servo motor realiza o seu movimento a partir da aplicação de tensão em seus relés internos, exemplificados na figura 85, que demonstra a representação esquemática dos relés internos de um servomotor muito similar ao que foi usado.

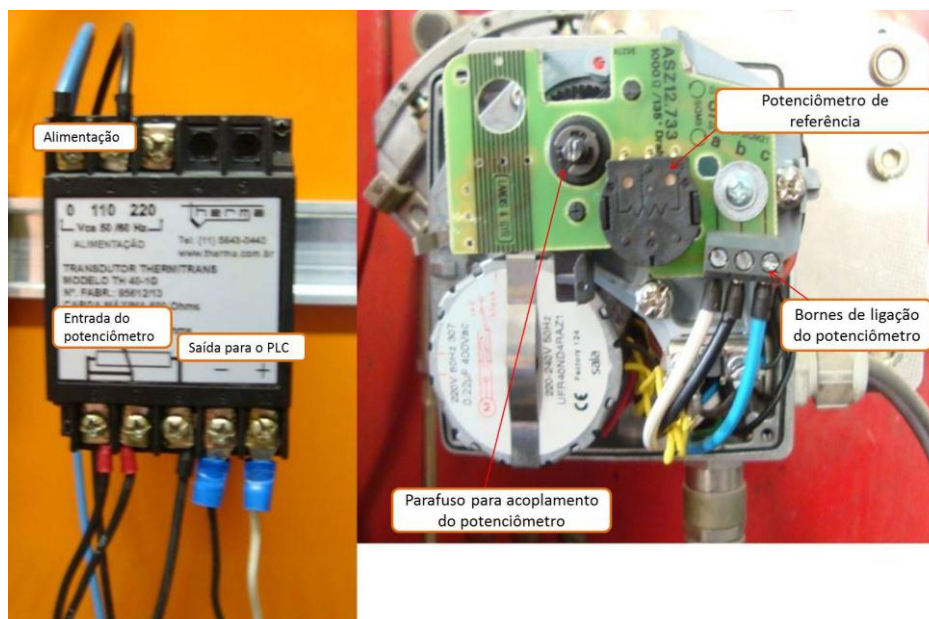
Figura 85 - Representação esquemática do acionamento do servomotor



Fonte: Adaptado de <http://interburn.co.uk/products/images/books/siemens/SQM5%20technical%20instruction%20i.pdf> - Acesso em 26/06/2015

Se a tensão for aplicada nos bornes 1 e N, o servomotor irá girar para um lado; se a tensão for aplicada entre os bornes 2 e N, o servomotor girará para o lado contrário; isto apenas enquanto há tensão aplicada. A partir do momento em que a tensão é retirada, o servomotor mantém a sua última posição. Para se obter o retorno de posição do servomotor, foi utilizado um potenciômetro acoplado ao seu eixo, aliado a um transdutor de resistência elétrica para corrente elétrica (figura 86), fornecendo um sinal de 4 a 20 mA para o CLP.

Figura 86 - Servomotor com potenciômetro acoplado e transdutor

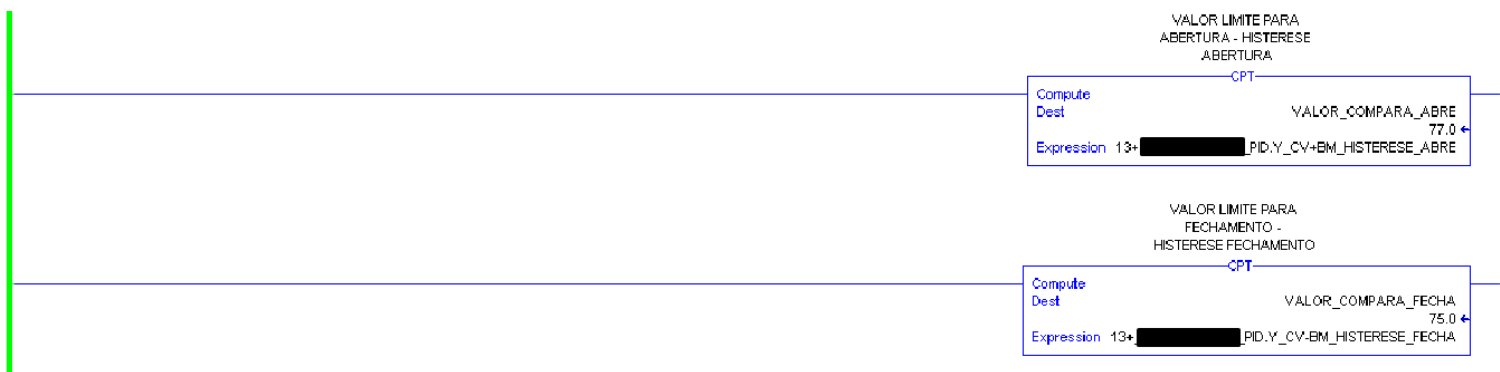


Fonte: Autoria própria.

Em geral, servomotores deste tipo são utilizados fornecendo carga mínima ou carga máxima apenas, ou seja, abertura mínima ou máxima. Para se utilizar o servomotor comandando as válvulas de admissão de ar e de abertura de GLP da maneira mais proporcional possível, buscando uma maior rangeabilidade do controle, foi implementada a seguinte lógica:

1. A saída da malha PIC-03 é o comando de abertura do servomotor, de um valor mínimo de 13%, até 100% (valores empíricos definidos devido à mecânica do servomotor);
2. Portanto, quando a malha PIC-03 solicita uma abertura de 75% do servomotor, por exemplo, se a posição atual está dentro de uma histerese programada (figura 87), nada acontece. Mas se o servomotor está abaixo ou acima desta histerese, o CLP aciona a saída digital de um relé correspondente (figura 88) para a abertura ou fechamento do servomotor;

Figura 87 - Trecho da lógica contendo o cálculo de histerese para o servomotor



Fonte: Autoria própria.

Figura 88 - Relés para acionamento do servomotor

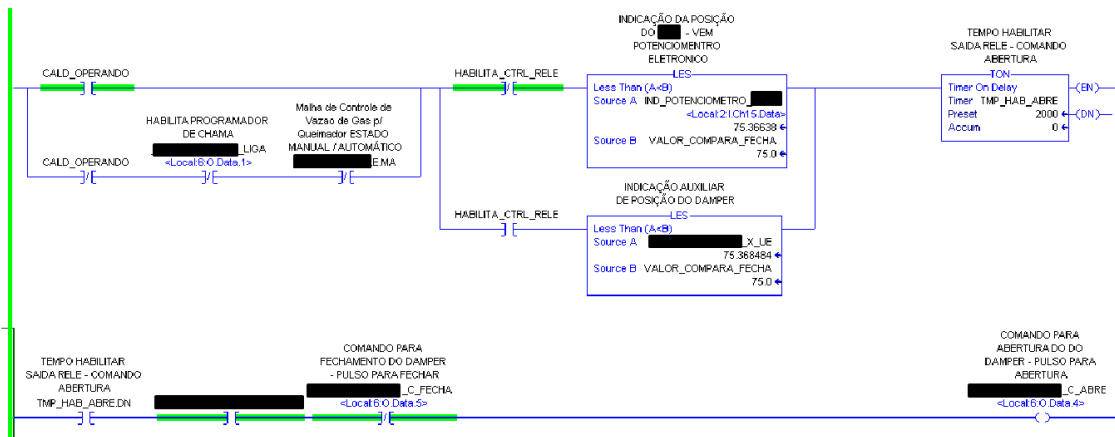


Fonte: Autoria própria

3. Para que não prevenir a instabilidade neste acionamento dos relés, foi adicionado um filtro de tempo para verificar a histerese para abertura ou fechamento. Este tempo faz tanto a função de garantir que realmente haja diferença, prevenindo oscilações na indicação, quanto de obrigar a saída digital do CLP a realizar apenas um pulso na atuação do relé;
4. Ou seja, se há diferença acima da histerese permitida por um tempo que exceda o tempo de filtro, o CLP aciona a saída digital para modular o servomotor, mas apenas com um pulso. Se a posição real não está na desejada, ele aguarda, e se necessário, dispara outro pulso.

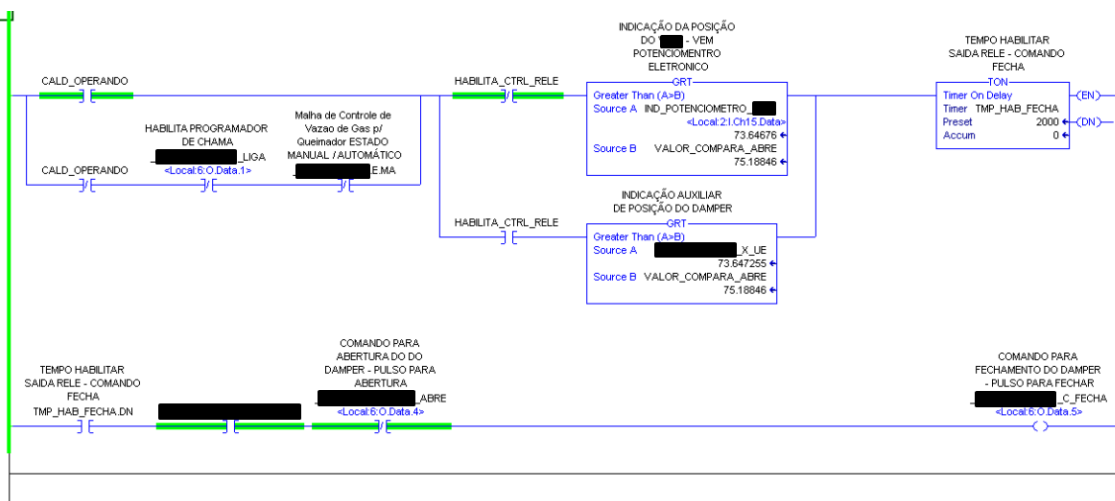
É possível vislumbrar a lógica de acionamento do servomotor para abrir, através da figura 89; e para fechar, através da figura 90.

Figura 89 - Trecho da lógica para abertura do servomotor



Fonte: Autoria própria.

Figura 90 - Trecho da lógica para fechamento do servomotor



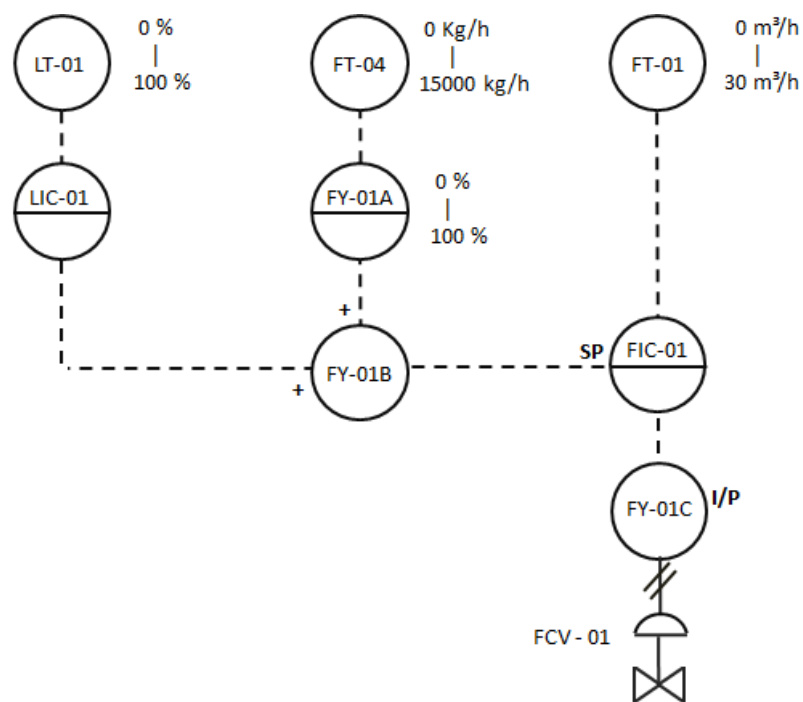
Fonte: Autoria própria.

Desta forma, pôde-se implementar um controle de abertura e fechamento do servomotor por meio de saídas digitais, fugindo ao controle convencional, que seria por uma saída analógica.

4.3 DISPOSITIVOS E MÉTODOS ENVOLVIDOS NO CONTROLE DE NÍVEL

Para o controle de nível do corpo da caldeira também foi utilizado o conceito de controle em cascata, combinando três elementos, vistos na figura 91: o nível do corpo da caldeira, a vazão de água de alimentação e a vazão de vapor produzido. Tal arquitetura de controle é citada em BEGA (2003, p.125).

Figura 91 - Arquitetura do controle de nível a três elementos



Fonte: Autoria própria.

Esta arquitetura do controle de nível tem como objetivo reduzir as variações de nível causadas pelas oscilações na pressão da água de alimentação e adicionar caráter preditivo à malha de controle de nível, uma vez que leva em consideração à variação da demanda de vapor.

O *setpoint* de nível da caldeira é escrito na malha LIC-01, por meio da ação do operador. Esta malha executa o algoritmo de controle e fornece uma MV de saída, que atua como entrada da função somadora FY-01B. O sinal de retorno do nível do corpo da

caldeira é percebido através de um sensor de pressão diferencial, semelhante ao demonstrado na figura 33.

A relação FY-01A escalona a vazão de vapor demandada entre os limites 0% e 100%; para adicionar caráter antecipatório ao controle de nível. Se a demanda de vapor tende a aumentar (percebida pelo FT-04), será necessário mais volume de água para manter o mesmo *setpoint* ajustado. Neste cenário, o fator calculado da demanda em FY-04B se soma à MV de saída do LIC-01, acarretando em uma pedida de vazão de água maior.

Analogamente, se a demanda de vapor diminui, o nível poderia subir em excesso. Neste caso, o fator de demanda diminuirá o seu valor, e a saída da malha LIC-01 exercerá maior influência no controle, diminuindo a MV de saída e, conseqüentemente, a pedida de vazão de alimentação.

A malha FIC-01 recebe o sinal proveniente da relação FY-01B e executa o controle da vazão de água de alimentação, em uma faixa de 0 m³/h a 30 m³/h, tendo como *feedback* a vazão de água de alimentação proveniente do sensor FT-01, que é um sensor de pressão modelo LD-301®, da SMAR (demonstrado na figura 33), acoplado a uma placa de orifício.

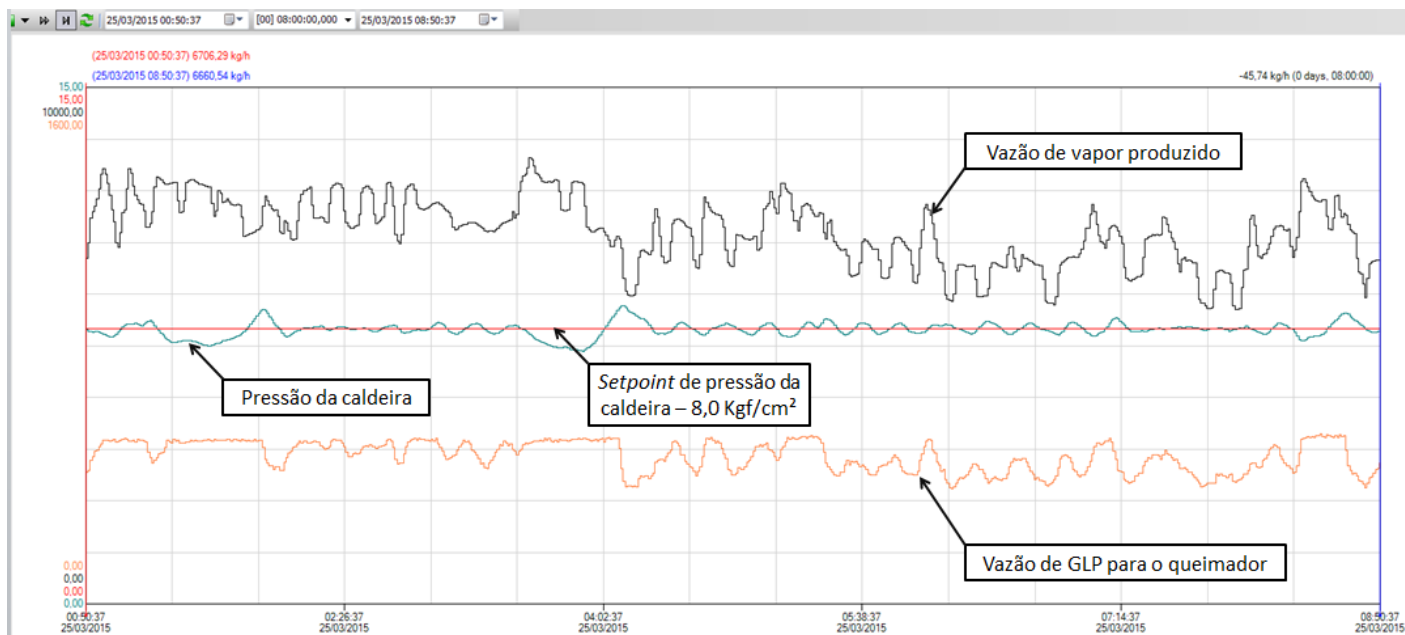
O elemento FY-01C é o posicionador eletropneumático que converte o sinal analógico proveniente do CLP para o sinal pneumático que modula a válvula FCV-01.

Para fins de balanceamento da relação de soma, foi adicionado um *Bias* (fator multiplicador de 0 a 1) ao sinal proveniente da relação FY-01A. Isto possibilita que possa se ponderar a ação da relação, ajudando na sintonia dos ganhos do controlador FIC-01.

5 RESULTADOS

O comportamento da pressão de vapor na caldeira após as modificações se deu como mostra a figura 92 (abaixo), obtida através do *software Historian Client*®:

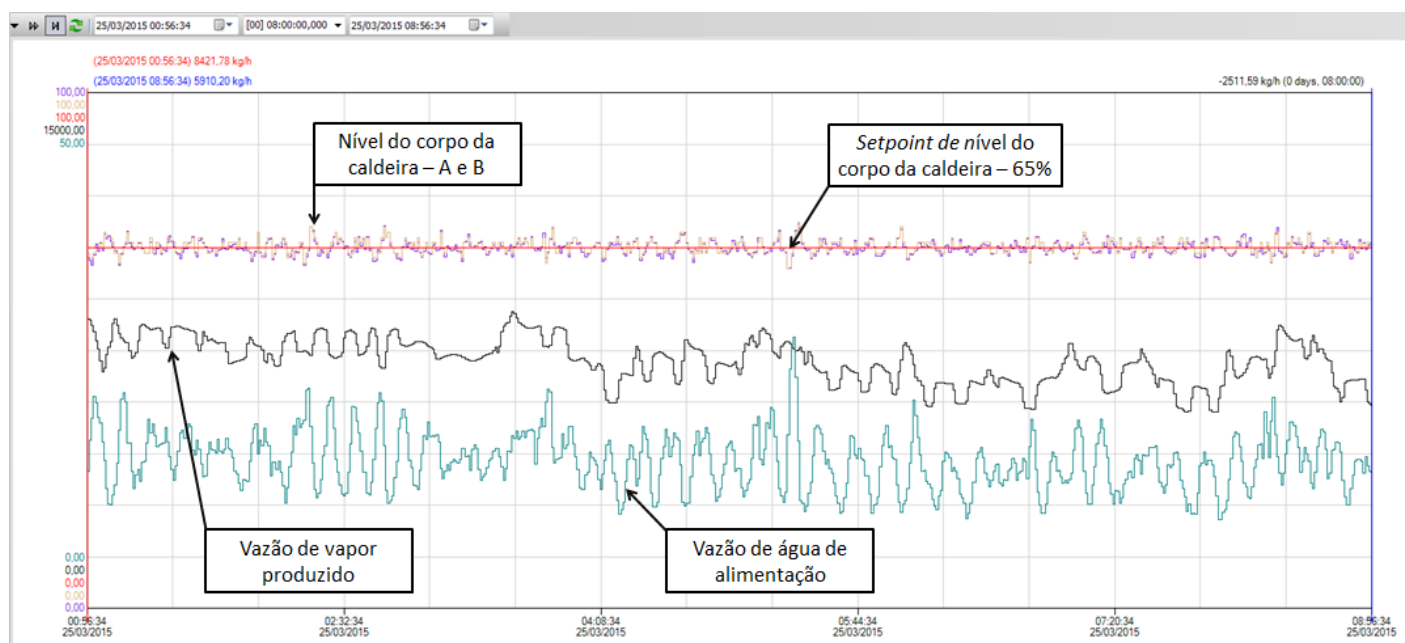
Figura 92 - Tendência do comportamento da pressão da caldeira



Fonte: Autoria própria.

O comportamento do nível do corpo da caldeira após as modificações pode ser visualizado através da figura 93 (abaixo), também obtida através do *software Historian Client*®.

Figura 93 - Tendência do comportamento do nível da caldeira



Fonte: Autoria própria

Através da ferramenta “*Statistics*”, do *software Historian Client*®, é possível visualizar as estatísticas do período amostrado (figura 94), como média, desvio padrão e amplitude:

Figura 94 - Dados estatísticos obtidos com a ferramenta "Statistics"

Type	Tag Name	Server	Samples	Minimum	Time at Minimum	Maximum	Time at Maximum	Average	Standard Deviation	Range	Timespan	From	To
Analog	TT_Y_UE		715	812	25/03/2015 07:47:44.887	878	25/03/2015 04:08:13.000	852,452274605278	17,9383480659421	66	08:00:00	25/03/2015 01:01:34.882	25/03/2015 09:01:34.882
Analog	PT_Y_UE		715	7,35	25/03/2015 03:54:47.380	8,68	25/03/2015 04:09:33.562	7,98020332709893	0,209356861012912	1,33	08:00:00	25/03/2015 01:01:34.882	25/03/2015 09:01:34.882
Analog	LT_B_Y_UE		715	64,63	25/03/2015 05:18:02.224	75,25	25/03/2015 05:22:03.910	70,0341199754835	1,3252321871021	10,63	08:00:00	25/03/2015 01:01:34.882	25/03/2015 09:01:34.882
Analog	LT_A_Y_UE		483	65,00	25/03/2015 05:18:02.224	75,00	25/03/2015 05:22:03.910	70,3064182194617	1,31117927307458	10	08:00:00	25/03/2015 01:01:34.882	25/03/2015 09:01:34.882
Analog	FT_Y_UE_MEDIA		715	5711,49	25/03/2015 07:57:49.102	8644,04	25/03/2015 03:35:19.231	7198,21125710227	645,112191168658	2932,55	08:00:00	25/03/2015 01:01:34.882	25/03/2015 09:01:34.882
Analog	FT_Y_UE1		715	355,39	25/03/2015 06:11:04.423	527,61	25/03/2015 08:31:23.152	457,660549606643	47,6280860656643	172,22	08:00:00	25/03/2015 01:01:34.882	25/03/2015 09:01:34.882

Fonte: Autoria própria

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em relação ao controle de pressão da caldeira, pode-se perceber claramente que a variável se manteve praticamente constante, oscilando muito pouco em relação ao *setpoint* desejado (figura 92).

Isto pode ser provado pelos seguintes fatos: o *setpoint* desejado no período amostrado (8 horas) na figura 92 era de 8,0 Kgf/cm². A média deste período foi de 7,98 Kgf/cm², e o desvio padrão foi de apenas 0,20 Kgf/cm² (estes dados podem ser vistos na figura 94); ou seja, em um período de oito horas, houve um somatório de desvios de apenas 0,20 Kgf/cm² em relação à média.

Nos pontos em que houve uma maior oscilação da pressão, pode-se perceber uma também uma flutuação maior da demanda de vapor produzido, exercendo influência sobre a pressão.

Não podemos deixar de mencionar que a própria dinâmica do processo de queima também gera um atraso na recuperação da pressão: quando o glp é injetado, juntamente com o ar frio, há um tempo para que esta queima gere a energia necessária ao aumento da pressão da caldeira. Concomitantemente, esta pressão está diminuindo, devido ao

fato de que a resposta da pressão é mais lenta do que a resposta da vazão de glp. Se a pressão continua diminuindo, mais vazão de combustível é injetada para alcançar a recuperação. Quando a pressão começa a aumentar, pode haver um volume maior de combustível queimando, que irá gerar um sobressinal na pressão da caldeira, fazendo o ciclo se repetir quando for necessário diminui a pressão. Portanto, alguma oscilação na pressão seria uma característica inerente ao processo de controle de pressão.

Outro fato importante do controle que justifica as pequenas oscilações, é que o controle é feito via relés, por saídas digitais do CLP. Nas figuras 87 e 89 pode-se concluir que a própria lógica de controle adiciona atraso ao processo, pois há um tempo para atuação e verificação da posição do servomotor de 2 segundos, ajustado para adequar o controle com os relés.

Mesmo com estas ponderações, os dados obtidos com a tendência histórica e a ferramenta “*Statistics*”, mostram que o controle é efetivo. Mesmo nos pontos onde houve maior oscilação da demanda de vapor, o controle de pressão conseguiu trazer a variável de processo novamente para o *setpoint* estabelecido.

A vazão do consumo de glp manteve-se variando constantemente a fim de manter a pressão no ponto desejado, porém sem grandes oscilações, como picos atingindo os valores extremos de consumo de vazão. Isto é extremamente importante, pois a ausência destas oscilações indesejadas influencia positivamente na vida útil do elemento final de controle, que neste caso é o conjunto formado por servomotor e válvulas de abertura de ar e glp.

Analisando os gráficos do controle de nível (figura 93), percebe-se claramente a atuação do controle automático. A vazão de água se altera continuamente para manter o nível do *setpoint* desejado, que no caso do período analisado, foi de 65%. A medição de nível ocorre com a incidência de bolhas de vapor e líquido (como uma espuma). Assim, a variação da vazão de água de alimentação serve para acompanhar e/ou compensar o sistema de medição com as bolhas formadas e dispersadas. Pode-se perceber que mesmo com a demanda de vapor oscilando, o nível da caldeira se manteve muito próximo ao *setpoint* definido, resultado da ação antecipatória incluída no controle automático com o cálculo FY-01A (figura 91).

Neste período, os valores dos medidores de nível (A e B, redundantes) se mantiveram entre os valores de 64,63% e 75,25%, como mostra a figura 94, obtidos com a ferramenta “*Statistics*”. Além disso, o desvio padrão do período analisado foi de aproximadamente 1,33% para o medidor A e 1,31 % para o medidor B, que são valores muito positivos.

A vazão de água de alimentação trabalha de maneira mais oscilatória, pois o nível de uma caldeira nos moldes da apresenta neste trabalho é uma variável de resposta rápida; portanto necessita de uma correção rápida para mantê-lo no valor desejado.

7 CONCLUSÃO

As caldeiras flamotubulares que utilizam glp como combustível de sua queima podem apresentar respostas bastante rápidas às solicitações de demanda, desde que equipadas com sistemas de controle eficientes.

As técnicas de controle utilizadas, baseadas em controle tipo cascata, e com realimentação tipo *feedforward* se mostraram eficientes no controle automático da demanda do vapor e no controle de combustível da caldeira. As oscilações percebidas estão entre valores totalmente aceitáveis para um correto e seguro funcionamento da caldeira.

Os controles automáticos de pressão e de nível se mostraram eficientes e eficazes, pois mantiveram as variáveis de processo muito próximas aos *setpoints* definidos, com excelentes valores de média temporal e de desvio padrão; além de atuarem de maneira correta nas variáveis manipuladas, atingindo estabilidade na vazão de glp e capacidade de recuperação rápida na vazão de água de alimentação.

Desta forma, pode-se manter um fornecimento eficaz de vapor com a pressão adequada de trabalho, impedindo que com o aumento da demanda de vapor a pressão da caldeira caia; e um nível seguro para a operação da caldeira, impedindo o seu desarme por nível baixo ou por nível alto (fatos aliados à segurança operacional do equipamento), além de prevenir danos provocados pelo arraste (figura 24), fruto do excesso de água na caldeira.

Os métodos de controle automático não convencionais utilizados (controle em cascata, realimentação tipo *feedforward*) parecem ser mais eficientes que os controles manual e automático *on-off*, normalmente mais conhecidos e utilizados para controle de caldeiras, pois além de apresentarem ótimos valores estatísticos, permitem uma maior segurança operacional da caldeira em relação ao controle manual, e uma maior estabilidade de operação em relação ao controle *on-off*, uma vez que a variável manipulada não chega a todo momento em seus limites máximo e mínimo, contribuindo ainda para o aumento da vida útil dos equipamentos envolvidos.

Os fatores de antecipação (*feedforward*) inclusos nas arquiteturas de controle de pressão e de nível apresentadas conseguem atenuar as oscilações das variáveis de processo, pois acrescentam uma “predição” da demanda de vazão, variável que influencia diretamente no controle das primeiras.

8 REFERÊNCIAS

BALBINOT, Alexandre e BRUSAMARELLO, Valner João. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. Segunda Edição, Editora LTC. Rio de Janeiro, 2012. 385p.

TORREIRA, Raul Peragallo. *Geradores de Vapor*. [s.l.: s.n.], 1995. 710 p.

BEGA, Egídio Alberto. *Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras*. Terceira Edição, Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2003. 179p.

MARQUES, Francisco de Assis Pinto. *Modelagem e controle de nível do tubulão de uma caldeira de vapor aquatubular de uma refinaria de petróleo*. 2005. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2005040801.pdf>>. Acesso em: 05 junho. 2015.

CARVALHO, Nei. *Caldeiras Flamotubulares*. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAALekAD/caldeiras-flamotubulares>>. Acesso em 04 junho. 2015. 5p.

CARVALHO, Nei. *Caldeiras Aquatubulares*. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAALegAE/caldeiras-aquatubulares#>>. Acesso em 05 junho. 2015. 13p.

MARTINELLI JR, Luiz Carlos. *Introdução às máquinas térmicas – Caldeiras*. Apostila técnica. Pato Branco, 2008. 141p.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora número 13 - (NR-13)*. Disponível em: <[http://portal.mte.gov.br/data/files/FF80808147596147014764A4E1D14497/NR-13%20\(Atualizada%202014\).pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/FF80808147596147014764A4E1D14497/NR-13%20(Atualizada%202014).pdf)>. Acesso em: 07 junho. 2015. 22p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12313: sistema de combustão – controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura*. Rio de Janeiro, 2000. 33p.

TARGET ENGENHARIA E CONSULTORIA. *NR-13 – Caldeiras, vasos e tubulação*. Apresentação. São Paulo, 2015. 186p.

TROVATI, Joubert. *Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras*. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua-Caldeira.pdf>. Acesso em 07 junho. 2015. 80p.

BEGA, Egídio Alberto (Org.). *Instrumentação Industrial*. Segunda Edição, Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2006. 585p.

Parker Hannifin. *Tecnologia Eletropneumática Industrial: Apostila de Treinamento*. 2001. 152p.

KOPELVSKI, Maycon Max. *Teoria de CLP*. Apostila Técnica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. São Paulo, 2010. 24p.

SCHNEIDER ELECTRIC. *Redes de Comunicação Industrial*: documento número 2. 2007. 44p. Disponível em: <http://www.schneiderelectric.pt/documents/product-services/training/doctecnico_redes.pdf>. Acesso em 20 junho. 2015.

IEC-61131-3: Programação de Controladores e suas Linguagens. Revista Mecatrônica Atual, São Paulo, n.36, nov. 2007. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/763-iec-61131-3-programao-de-controladores-e-suas-linguagens?showall=&start=1>>. Acesso em: 20 junho. 2015.

RANIERI, Fernando. *Sistema Supervisório de Parâmetros de Máquinas Elétricas via TCP/IP e Painel Eletrônico de Mensagens*. 2007. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-11092007-131014/pt-br.php>>. Acesso em: 16 junho. 2015.

SOUZA, Leonardo Costa. *Projeto de Automação para Sistemas de Pressurização de Cabos Telefônicos*. 135p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia de Automação Industrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, 2014.

SILVESTRIN, André Szczepansk. *Proposta de Melhoria Operacional no Sistema Integrado de Distribuição de Água para Redução dos Custos com Energia Elétrica*. 86p. Dissertação (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1855/1/CT_CEAUT_III_2012_08.ppd>. Acesso em: 17 junho. 2015.

SMAR. *Introdução às Redes Industriais*: Apresentação técnica, Sertãozinho. 2011. Disponível em: <http://www.smar.com/brasil/PATS/downloads/Redes_Industriais_Introducao.pdf>. Acesso em: 20 junho. 2015.

BANNWART, Antônio Carlos; MESQUITA NETO, Euclides de; DEDINI, Franco G; CARAM, Rubens. *A história da mecânica e seu papel na formação do engenheiro*. 10p. Águas de Lindóia, ca. 1993. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/1999/pdf/AAAIHI.pdf>>. Acesso em: 05 julho. 2015.

ROCCO, Cleber Damiano; MORABITO, Reinaldo. *Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais*. Gestão da Produção, São Carlos, v.19, n.2, p.273-286, 2012.