

Luis Carlos Geron

**UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL
APLICADA AO PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO DAS
MALHAS DE CONTROLE DE CALDEIRA A BAGAÇO
DE CANA**



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Dinâmica das Máquinas e Sistemas

Orientador: Prof. Tit. Mário Pinotti Júnior

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço.....06 / 01 / 2011.....

Ass.:.....*P*.....

São Carlos
2009

Class.	TESE ✓
Cutt.	F750
Tombo	T0005/11
Sysno	2.155192

31 100 115377

210211

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.



Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G377u Geron, Luis Carlos
Utilização de ferramenta computacional aplicada ao processo de identificação das malhas de controle de caldeira a bagaço de cana / Luis Carlos Geron ; orientador Mário Pinotti Júnior. -- São Carlos, 2009.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

1. Caldeiras a bagaço de cana. 2. Malhas de controle. 3. Identificação de sistemas. 4. OPC. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

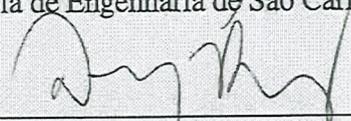
Candidato: Engenheiro LUIS CARLOS GERON

Dissertação defendida e julgada em 30/03/2009 perante a Comissão Julgadora:



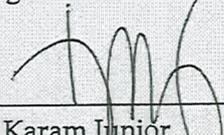
Prof. Titular Mario Pinotti/Junior (**Orientador**)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



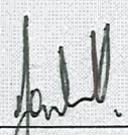
Prof. Dr. Dennis Brandão
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

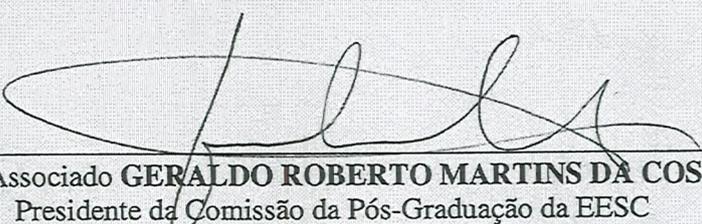


Prof. Dr. Dib Karam Junior
(Escola de Artes, Ciências e Humanidades/USP)

aprovado



Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade.

Agradeço a minha família pela enorme paciência, apoio e carinho.

A meus pais e irmãos por tudo.

Ao amigo e Prof. Tit. Mário Pinotti Junior pela orientação, dedicação e amizade.

Aos amigos do Laboratório de Eletrônica Embarcada: Prof. Dr. Luis Carlos Passarini, Marcio J. da Cunha e Jaime Marini Jr. pela amizade.

Aos amigos do Laboratório de Automação Industrial: Prof. Dennis Brandão, Renato F. Fernandes. Junior, Rodrigo Pantoni, e Eduardo Mossin pela amizade e apoio.

Aos engenheiros e amigos da SMAR, pelo apoio.

A Universidade de São Paulo pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

RESUMO

GERON, L.C. (2009). **Utilização de ferramenta computacional aplicada ao processo de identificação das malhas de controle de caldeira a bagaço de cana**. 81f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Com a crescente utilização dos microcomputadores, as técnicas experimentais de identificação de sistemas aplicados a malhas de controle têm despertado interesses na indústria, devido à possibilidade de gerar modelos matemáticos que, por sua vez, permitem o estudo e a resolução de problemas de controle de processos, inclusive no domínio do tempo, permitindo a simulação do processo e do controlador e a avaliação dos resultados.

É proposto o uso de uma técnica experimental de identificação aplicada às malhas de controle de uma caldeira a bagaço de cana visando obter o seu modelo matemático, a partir de dados obtidos em tempo real.

Palavras chave: Caldeira a bagaço de cana. Malhas de controle. Identificação de sistemas. OPC.

ABSTRACT

GERON, L.C. (2009). **Use of a computational tool applied to the system identification of control loops of a bagasse solid fuel boiler.** 81f. M.Sc.Dissertation - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

With the growing use of microcomputers, experimental system identification techniques of control loops are being considered interesting by industrial sector due to the simple approach to adjust mathematical models, making it easy the formulation and the solution of process control problems, including time domain, allowing simulations of process and controller and then analyzing it.

In this work is proposed the use of an experimental identification technique applied to the control loops of a bagasse solid fuel boiler in order to get its mathematical model from real time data.

Keywords: Bagasse solid fuel boiler. Control loops. System identification. OPC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Caldeira fogotubular típica (3 passes)	20
Figura 02 – Circulação da água em caldeira aquatubular	21
Figura 03 – Caldeira aquatubular típica	22
Figura 04 – Controle de pressão do vapor do tipo paralelo	31
Figura 05 – Controle de nível a dois elementos.	32
Figura 06 – Controle de nível a três elementos	33
Figura 07 – Controle de pressão da fornalha	34
Figura 08 – Controle de temperatura do vapor superaquecido	36
Figura 09 – Controle de nível do desaerador	36
Figura 10 – Arquitetura típica de sistemas de automação industrial	41
Figura 11 – Exemplo de uma malha de controle AI-PID-AO no protocolo PROFIBUS	44
Figura 12 – Esquemático de um bloco funcional FF	45
Figura 13 – Exemplo de uma malha de controle AI-PID-AO no protocolo FOUNDATION Fieldbus	46
Figura 14 – Comunicação de SCADA e equipamentos de campo: a) através de drivers de dispositivo e b) através de OPC	48
Figura 15 – PIC500 - Modelo estimado (vermelho) x Modelo real (azul)	57

Figura 16 – TIC301A - Modelo estimado (verde) x Modelo real (preto) 60

Figura 17 – LIC100 - Modelo estimado (azul) x Modelo real (preto) 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Malhas selecionadas para identificação	55
Tabela 2 - Coleta de Dados PIC500	56
Tabela 3 - Coleta de Dados TIC301A	59
Tabela 4 - Coleta de Dados LIC100	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	- Analog Input (Entrada Analógica)
AO	- Analog Output (Saída Analógica)
ARMAX	- AutoRegressive Moving Average with eXogenous Input Model (Modelo linear, auto-regressivo com média móvel e entrada externa)
ARX	- AutoRegressive with eXogenous Variable Model (Modelo linear, auto-regressivo com entrada externa)
CLP	- Controlador Lógico Programável
DCS	- Distributed Control System (Sistemas de controle distribuído)
FB	- Function Block (Bloco Funcional)
FF	- Fieldbus Foundation
HMI	- Human Machine Interface (Interface homem-máquina)
IEC	- International Eletrotechnical Commission
IEEE	- The Institute of Electrical and Eletronics Engineers
ISA	- International Society for Measurement and Control
ISO/OSI	- International Standard Organization / Open System Interconnection
LSR	- Least Square (Método dos mínimos quadrados recursivo)
MV	- Variável Manipulada
MQ	- Mínimos Quadrados
MQR	- Mínimos Quadrados Recursivo
na	- Número de coeficientes de saída da estrutura ARX

nb	- Número dos coeficientes de entrada da estrutura ARX
OLE	- Object Linking Embedding (Ligação e incorporação de objetos)
OPC	- OLE for Process Control (Padrão OLE aplicado em controle de Processos)
OPCDA	- Data Access
OPCHDA	- Historical Data Access
PID	- Controlador com ação Proporcional-Integral-Derivativo
PV	- Process Variable (Variável de Processo)
RLS	- Recursive Least Square (Método dos mínimos quadrados recursivo)
SCADA	- Supervisory Control & Data Acquisition Systems (Sistemas supervisórios de controle e aquisição de dados)
SISO	- Single Input, Single Output (Sistemas com uma entrada e uma saída)
SP	- Setpoint (Valor de Referência)
TOT	- Totalizador

LISTA DE SÍMBOLOS

kgf	-	quilograma força
ton/h	-	tonelada por hora
cm ²	-	centímetro quadrado
mmH ₂ O	-	milímetro de coluna d'água
°C	-	grau Celsius
u(K)	-	sinais de entrada
y(K)	-	saída real
K	-	parâmetro de tempo discreto

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO DO TRABALHO	16
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2 CALDEIRAS	18
2.1 TIPOS DE CALDEIRAS	19
2.2 DESCRIÇÃO DOS ITENS COMPONENTES DE UMA CALDEIRA	23
2.3 APLICAÇÃO DE CALDEIRAS – VAPOR PARA PROCESSO	27
3 CONTROLE DE CALDEIRAS	29
3.1 MALHAS DE CONTROLE PRINCIPAIS	30
3.1.1 CONTROLE DE PRESSÃO DO VAPOR / CONTROLE DE COMBUSTÃO	30
3.1.2 CONTROLE DE NÍVEL DO TUBULÃO	31
3.1.3 CONTROLE DE PRESSÃO DA FORNALHA OU CONTROLE DE TIRAGEM	34
3.1.4 CONTROLE DE TEMPERATURA DO VAPOR SUPERAQUECIDO	35
3.1.5 CONTROLE DE NÍVEL DO DESAERADOR	36
3.2 SELEÇÃO DAS MALHAS DE CONTROLE QUE SERÃO IDENTIFICADAS	37
3.2.1 SELEÇÃO 1 – CONTROLE DE PRESSÃO DA FORNALHA	38

3.2.2	SELEÇÃO 2 – CONTROLE DE TEMPERATURA DO VAPOR SUPERAQUECIDO	39
3.2.3	SELEÇÃO 3 – MALHA DE CONTROLE DE NÍVEL DO DESAERADOR	39
3.3	INFLUÊNCIA DAS NOVAS TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE PROCESSOS APLICADA A CALDEIRA	40
3.3.1	SISTEMAS DE CHÃO DE FÁBRICA	42
3.3.2	CONTROLADORES PID	47
3.3.3	TECNOLOGIA OPC	47
4	MELHORIA DO DESEMPENHO DA CALDEIRA ATRAVÉS DO MODELAMENTO EM TEMPO REAL DE SUAS MALHAS DE CONTROLE	49
5	TESTES E RESULTADOS	54
5.1	TESTE 1 – MALHA DE CONTROLE DE PRESSÃO DA FORNALHA	56
5.2	TESTE 2 – MALHA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DO VAPOR	59
5.3	TESTE 3 – MALHA DE CONTROLE DE NÍVEL DO DESAERADOR	61
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
6	CONCLUSÕES	64
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO A – IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS	69

1 INTRODUÇÃO

A maioria das unidades industriais de produção de açúcar e / ou etanol é praticamente auto-suficiente em energia, produzindo a energia térmica, mecânica e elétrica, necessárias a sua operação a partir da queima de seu próprio combustível, a biomassa (o bagaço resultante da moagem da cana-de-açúcar) (HUGOT, 1977; RIBEIRO, 1999).

Dentro do aspecto energético, o atual cenário do mercado indica um momento favorável para o setor sucroalcooleiro onde tem destaque o etanol, que sofre aumento da demanda interna desde o lançamento dos carros bicompostíveis em 2003, o fornecimento da energia elétrica excedente para o sistema interligado, a partir da promulgação da Lei 10.438 de 2002, que instituiu o Programa de Incentivo às Fontes de Energia Alternativa (Proinfa) e, finalmente, o biodiesel, combustível alternativo que utiliza o etanol em seu processo de produção via transesterificação etílica. Ainda dentro do aspecto energético, é importante citar o impacto ambiental positivo da utilização dos produtos energéticos da cana, etanol e bagaço, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ao substituir combustíveis fósseis, tais como a gasolina e o óleo combustível (BIOCOMBUSTÍVEIS, 2004).

As caldeiras respondem por toda a produção do vapor consumido pelo funcionamento das turbinas a vapor, que acionam desde o maquinário para a extração do caldo da cana até os geradores de energia elétrica, e pelos processos de fabricação (HUGOT, 1977; RIBEIRO, 1999).

As caldeiras utilizadas amplamente nas unidades industriais de produção de açúcar e / ou etanol são definidas como sendo do tipo aquatubular, consumindo em suas fornalhas o bagaço da cana-de-açúcar para a geração de vapor.

Tal como em qualquer processo produtivo, também nas caldeiras a bagaço, objetiva-se a eficiência no consumo do combustível, pois o bagaço da cana-de-açúcar, originalmente uma fonte de energia barata e reciclável, ficou, desde então, submetido à curva de oferta e procura, podendo ser usado como ração animal (BIOCOMBUSTÍVEIS, 2004), na fabricação de pasta de papel, na fabricação de matéria plástica ou solvente (HUGOT, 1966), sendo, nos momentos atuais, a tonelada de bagaço negociada a preços compensadores para o produtor que possui excedentes.

Neste contexto, é desejável buscar um aumento da eficiência na geração de energia (térmica, mecânica ou elétrica) com o bagaço e simultaneamente reduzir os consumos internos de energia, de forma a ampliar o excedente de bagaço que poderá ser utilizado então para outros fins (BIOCOMBUSTÍVEIS, 2004), e ao mesmo tempo minimizar o impacto ambiental, pois uma característica dos sistemas de combustão com combustível sólido é a dificuldade de medir as características físicas, densidade e umidade entre outras, e controlar a vazão do combustível, variáveis estas que influenciam o processo de combustão na fornalha das caldeiras e que por sua vez influencia os demais sistemas envolvidos na eficiência da geração de energia.

De forma geral, para fazer frente às demandas supra, torna-se necessário investimento para ampliação e / ou modernização das instalações existentes, o que é um objetivo demasiado abrangente. Sendo assim, limitaremos a abordagem deste trabalho à identificação de possíveis métodos para que se efetue a modelagem das malhas de controle de caldeira a bagaço em tempo real, durante sua utilização em processos, sem nenhuma interferência neles.

A obtenção de um modelo preciso é de fundamental importância para tornar viável a sua utilização por outros aplicativos computacionais que realizam a sintonia de malhas de controle e que usando o modelo obtido venham a efetuar a sintonia das malhas de controle de caldeira a bagaço. Evidencia-se, ainda, a possibilidade de se fazer a re-sintonia ao longo da vida da caldeira, possibilitando com isso a constante manutenção do bom desempenho das caldeiras ao longo de sua vida útil.

Observamos que, até hoje, tipicamente, as caldeiras utilizadas nas unidades industriais de produção de açúcar e / ou etanol não são periodicamente sintonizadas por não haver procedimentos, ferramentas e pessoal preparados, nas condições hoje existentes de operação das mesmas.

Dentro do contexto de conhecimento das malhas de uma caldeira a bagaço é preciso conhecer as variáveis que interferem nas malhas de controle para então poder tomar uma ação corretiva. Assim, tudo que venha a simplificar o trabalho de melhoria do desempenho de caldeiras a bagaço, tal como a automação da tarefa de identificação, para que se possa fazer periodicamente a sintonia, é de muita utilidade ao setor.

Com relação à identificação e sintonia de malhas de controle, o modelo de malha aberta pode ser obtido a partir do modelo de malha fechada por diversos métodos sem incorrer em erros significativos. Um programa computacional para identificação de malhas de controle, comprovadamente de boa qualidade, abre perspectivas para a melhoria do desempenho das caldeiras a bagaço de cana.

Não foram encontradas na literatura publicações que indiquem como são modeladas, em tempo real, as malhas de controle de caldeira a bagaço de cana.

Assim, modelar as malhas de controle de caldeiras a bagaço, atende a uma necessidade premente, pois a aplicação periódica de ferramenta de modelagem e posteriormente de ferramenta de sintonia fornece um recurso importante para otimizar as malhas de controle de

caldeiras a bagaço.

Dentro do contexto de instrumentação, monitoração, aquisição de dados e controle de processos, verificamos que os técnicos e engenheiros de instrumentação e controle de processos têm, hoje em dia, acesso a instrumentos e equipamentos digitais sofisticados, com um significativo potencial de utilização, especialmente quando associado ao uso de redes de chão de fábrica, por exemplo, Foundation Fieldbus, Profibus PA/DP entre outros.

Estas redes de chão de fábrica têm sua comunicação com os sistemas de supervisão e gerenciamento, facilitada através da utilização de tecnologias e interfaces padronizadas, tal como o OPC (OLE for Process Control), sendo possível, desta forma, criar e manter uma base de dados adquirida em tempo real e sem qualquer interferência no processo, para uso posterior.

A associação destas tecnologias e o uso dos microcomputadores permitem a utilização de diversos programas aplicativos para o estudo e a resolução de problemas de estabilidade do controle de processos, inclusive no domínio do tempo, oferecendo recursos como simulações e análises gráficas, entre outros. Este trabalho procura mostrar que é possível, obtendo-se uma modelagem das malhas das caldeiras e utilizando-se de métodos de sintonia destas malhas, alcançar resultados hoje necessários aos usuários de caldeiras a bagaço de cana, como aliado dos procedimentos para manter o melhor desempenho destas caldeiras ao longo de sua vida útil.

A determinação dos modelos citados resulta da aplicação do método descrito no anexo A, onde é representado o tipo de modelo matemático a ser alcançado, com o qual é possível reproduzir, por simulação, o comportamento das malhas.

As variáveis necessárias estão disponíveis, pois a utilização dos recursos citados no item 3.3, permite o acesso às variáveis em tempo real sem interferir no processo. Isto leva a modelagem das malhas fechadas.

Todo o potencial acima descrito pode ser utilizado para atender as premissas básicas da instrumentação e controle de processos, ou seja, prover uma operação contínua, segura, econômica e confiável dos equipamentos da planta industrial onde estão instalados.

Com o intuito de atingir tais premissas observamos a necessidade de aliar o conhecimento do funcionamento das malhas de controle da caldeira a bagaço com as características dos instrumentos e equipamentos digitais de medição e controle associado ao aprofundamento nos conhecimentos das técnicas atuais do controle de processos.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho consiste em obter-se um modelo de uma malha fechada de uma caldeira a bagaço, de precisão, em tempo real, usando-se o modelo ARX, que leva em conta as variações do sistema físico que acontecem durante a obtenção do modelo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

No capítulo 2 são descritos sinteticamente os tipos, características e aplicações da caldeira.

No capítulo 3 é apresentada uma síntese das principais malhas típicas utilizadas no controle de caldeiras, seus tipos e características básicas, bem como é feita uma síntese da influência das novas tecnologias no controle de caldeiras a bagaço.

No Capítulo 4 é apresentado o sistema de identificação utilizado, é descrito o método de identificação e a ferramenta computacional utilizada, acrescido de aspectos práticos de utilização da ferramenta.

No Capítulo 5 são apresentados os testes efetuados e os resultados obtidos.

Por fim no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e discussões sobre o trabalho realizado, onde são feitas as sugestões para novos trabalhos.

2 CALDEIRAS

Pera (1966, p. 1) faz a seguinte definição

[...] Gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir da energia térmica (combustível), ar e fluido vaporizante, constituído por diversos equipamentos associados, perfeitamente integrados, para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível.

Caldeira é o nome comumente dado aos equipamentos geradores de vapor. Para o propósito deste trabalho, consideraremos somente os geradores de vapor de água.

Baseado nos textos de diversos autores, Babcock & Wilcox Co.(1955), Bega (1989), Coretti e Pessa (2008); Dukelow (1986), Pera (1966), apresentaremos uma síntese do equipamento caldeira, necessária para o desenvolvimento dos objetivos do trabalho.

Na caldeira há dois sistemas básicos separados envolvidos no processo de geração de vapor. Um é o sistema vapor-água. Neste sistema o calor resultante da combustão é transferido através das paredes dos tubos da caldeira e absorvido pela água, que é aquecida e convertida em vapor; O outro é o sistema combustível-ar-gases da combustão. Neste sistema o ar de combustão reage com o combustível assegurando a sua contínua queima na fornalha, gerando calor que é transferido para o sistema vapor-água, para geração de vapor, Bega (1989), Dukelow (1986) e Pera (1966).

2.1 TIPOS DE CALDEIRAS

As caldeiras são classificadas de forma genérica em dois tipos: caldeiras fogotubulares e caldeiras aquatubulares.

A seguir, será abordado o princípio de funcionamento de cada tipo:

2.1.1 Caldeira Tubos de Fumaça ou Fogotubular

Neste tipo de caldeira, os gases quentes da combustão circulam pelo interior dos tubos enquanto a água envolve a superfície externa dos mesmos, recebe o calor transmitido através de suas paredes metálicas, se convertendo em vapor, Bega (1989), Dukelow (1986) e Pera (1966).

Ao ceder calor para aquecer a água ocorre redução da temperatura dos gases quentes da combustão; donde temos que um melhor aproveitamento do calor incorre em maior redução da temperatura dos gases conforme Bega (1989) e Dukelow (1986).

A redução da temperatura dos gases depende da superfície de transferência de calor, do material e da espessura dos tubos, do diferencial de temperatura entre os gases quentes e a água da caldeira, da velocidade dos gases quentes dentro dos tubos da caldeira, entre outros fatores, Bega (1989), Dukelow (1986) e Pera (1966).

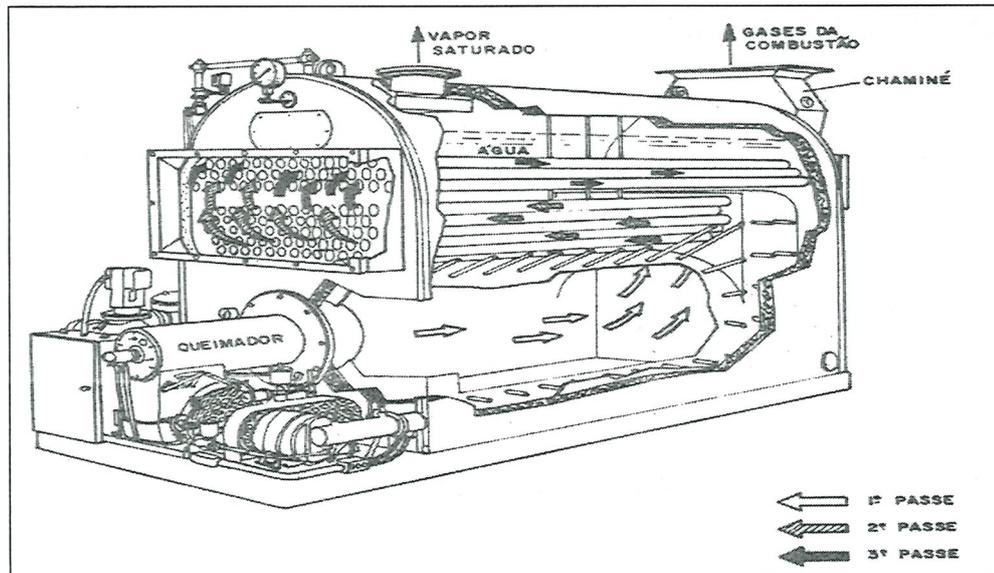


Figura 01 - Caldeira fogotubular típica (3 passes)

Fonte: Bega (1989)

Segundo Bega (1986) essas caldeiras são muito utilizadas nos processos industriais embora limitadas a produção de vapor saturado de até 10 t/h, e pressões não superiores a 10 kgf/cm^2 (150psi). Pera (1966) acrescenta que apesar das suas limitações o baixo custo inicial, em comparação com as caldeiras aquatubulares, e a facilidade de manutenção tornam este tipo de caldeira atrativa para o mercado.

2.1.2 Caldeira Tubos de Água ou Aquatubular

A necessidade do mercado por maior produção de vapor para uso nos processos industriais foi atendida com o desenvolvimento da caldeira aquatubular, que de acordo com Pera (1966) permite maior capacidade de produção de vapor com pressões e temperaturas elevadas.

Na caldeira aquatubular, os gases quentes da combustão envolvem a superfície externa dos tubos, escoando através de um caminho definida por alvenaria e placas defletoras

internas, conforme Pera (1966), enquanto a água circula pelo interior dos tubos, recebe o calor transmitido através das suas paredes metálicas, se convertendo em vapor.

Estes tubos são dispostos de forma a compor um feixe tubular de água que são frequentemente conectados entre dois ou mais tubulões cilíndricos Bega (1989), Dukelow (1986) e Pera (1966). É a concepção do feixe tubular de água que viabiliza a obtenção de um aumento substancial da superfície de aquecimento, com diversos arranjos, e permite aumentar a capacidade de produção de vapor com temperaturas e pressões elevadas de acordo com Dukelow (1986) e Pera (1966).

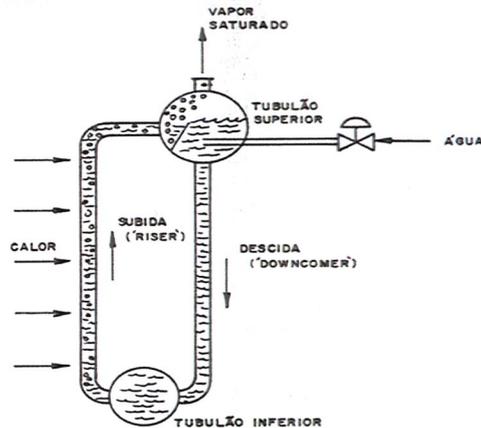


Figura 02 – Circulação da água em caldeira aquatubular

Fonte: Bega (1989)

Conforme mostrado na fig. 02, à medida que o vapor é gerado nos tubos aquecidos pelo calor fornecido pelos gases quentes da combustão e posteriormente liberado no tubulão superior, a água circula naturalmente dentro dos tubos da caldeira, resfriando os mesmos, em função da diferença de densidade entre a água de reposição e a água aquecida misturada com bolhas de vapor, descendo pelos tubos mais frios e subindo pelos tubos mais quentes, conforme Bega (1989), Dukelow (1986) e Pera (1966).

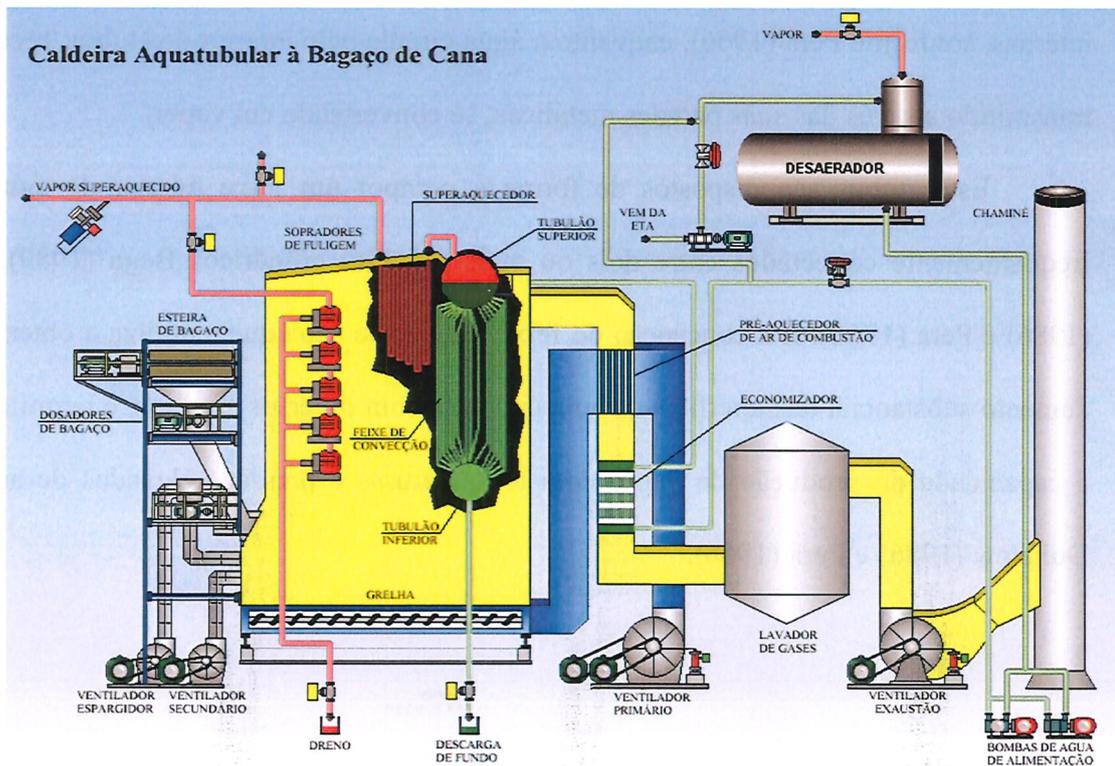


Figura 03 – Caldeira aquatubular típica

Fonte: Adaptado de Ribeiro (1999)

Segundo Dukelow (1986) este tipo de caldeira é apropriado para o uso com combustível sólido, no nosso caso o bagaço de cana, em função da facilidade de dimensionamento de um maior ou menor volume da fornalha para uma mesma superfície de aquecimento por convecção. A figura 03 mostra uma caldeira aquatubular típica que usa bagaço de cana como combustível.

Este tipo de caldeira oferece rapidez na entrada em operação e facilidade de manutenção conforme Pera (1966). A limpeza dos tubos que pode ser feita automaticamente através de sopradores de fuligem.

A caldeira aquatubular industrial é produzida em diversos tamanhos podendo atingir capacidades de produção de vapor que variam na faixa de 6 a 680 ton/h com pressões de 7 a 200 kg/cm² e temperaturas até 450 °C, conforme dados de Dukelow (1986) e Pera (1966).

2.2 DESCRIÇÃO DOS ITENS COMPONENTES DE UMA CALDEIRA

Nesta seção, limitaremos a descrição aos itens de interesse das caldeiras aquatubulares que queimam bagaço de cana e geram vapor superaquecido, que é o tipo utilizado para gerar vapor nas unidades industriais de produção de açúcar e / ou etanol.

Conforme Pera (1966) e Processos (198-?) os componentes básicos de uma caldeira geradora de vapor são os seguintes:

2.2.1 Fornalha

Local da caldeira onde se visa obter a queima contínua e eficiente do combustível utilizado, antes dos gases quentes da combustão atingirem a superfície do feixe tubular de água. Sua construção depende do combustível a ser queimado que pode ser óleo, gás, carvão, lenha, bagaço ou outros (PERA, 1966; PROCESSOS, 198-?).

2.2.2 Caldeira de Vapor - Tubos e Tubulões

Conjunto utilizado na produção de vapor. Conforme indicado na fig. 02, é composto por um tubulão superior, ou mais de um, unido por um feixe de tubos cheios de água a um tubulão inferior. Cada item componente possui sua função.

O feixe de tubos forma a superfície que absorve o calor contido nos gases quentes da combustão, aquece a água para gerar vapor saturado e ainda fornece o caminho para circulação e reposição da mesma (PERA, 1966; PROCESSOS, 198-?).

O tubulão superior é um cilindro empregado para realizar a liberação do vapor da mistura água-vapor recebida do feixe de tubos aquecidos (CORETTI; PESSA, 2008). Com este propósito, o nível de água do tubulão superior deve ser mantido em torno de 50%, visando propiciar a maior área de evaporação possível, conforme Bega (1989) e Dukelow (1986).

O tubulão inferior é um cilindro empregado para receber as impurezas da água da caldeira, trazidas pela circulação da mesma pelo feixe aguatubular (CORETTI; PESSA, 2008). Este tubulão possui válvulas para retirar as impurezas acumuladas em seu interior.

2.2.3 Superaquecedor

Este equipamento permite elevar a temperatura do vapor saturado acima da temperatura de saturação, aproveitando o calor dos gases da combustão, mantendo sua pressão e tornando-o mais seco, produzindo assim vapor superaquecido (BEGA, 1989; CORETTI; PESSA, 2008; PERA, 1966).

A utilização do vapor superaquecido reside nas aplicações que requeiram vapor seco, com alta pressão e alta temperatura, tal como na geração de energia elétrica, (HUGOT, 1977; PERA, 1966), onde o arraste de água e partículas sólidas com o vapor saturado torna-o impróprio para uso nas turbinas, (PERA, 1966).

Construtivamente é composto por um conjunto de serpentinas inserido no caminho dos gases quentes da combustão, (HUGOT, 1977; PERA, 1966), podendo ser projetado para aproveitar o calor pelo processo de convecção ou por irradiação (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; PERA, 1966).

A temperatura do vapor superaquecido sofre variação influenciada pela carga da caldeira, pela temperatura dos gases, pela variação no excesso de ar de combustão, pela

limpeza da superfície de absorção de calor, entre outros fatores, (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; PERA, 1966), logo para assegurar as melhores condições possíveis de funcionamento das turbinas é necessário utilizar o recurso de controle automático da temperatura do vapor superaquecido, (DUKELOW, 1986; PERA, 1966).

2.2.4 Economizador e Pré-aquecedor

Os economizadores e os pré-aquecedores de ar são equipamentos empregados para aproveitar o calor residual dos gases de combustão na saída da fornalha, antes de ser perdido pela chaminé, resultando em aumento da eficiência da caldeira, (BEGA, 1989; HUGOT, 1977; PERA, 1966; RIBEIRO, 1999).

O economizador aquece a água de alimentação, gerando economia de combustível ao reduzir o calor necessário a ser fornecido para a geração do vapor na caldeira, (HUGOT, 1977; PERA, 1966).

Dukelow (1986), relata que aproximadamente 1 % de combustível é economizado para cada acréscimo de 5,55 °C na temperatura da água, e Pera (1966) acrescenta que este equipamento pode adicionar 1 % na eficiência da caldeira por cada elevação de 15,5 °C na temperatura da água.

O pré-aquecedor aquece o ar destinado à combustão, antes de entrar na fornalha. O aumento da temperatura na câmara de combustão promove economia de combustível (DUKELOW, 1986; HUGOT, 1977; PERA, 1966).

Dukelow (1986), relata que aproximadamente 1 % de combustível é economizado para cada acréscimo de 22,22 °C na temperatura do ar, e Pera (1966) acrescenta que usualmente este equipamento propicia de 10 a 12 % na eficiência da caldeira.

2.2.5 Desaerador térmico

A qualidade da água de alimentação influencia diretamente na operacionalidade e segurança das caldeiras, pois a água ao evaporar libera resíduos sólidos e gases dissolvidos, ((BEGA, 1989; RIBEIRO, 1999); PERA, 1966);

A água de alimentação da caldeira usualmente é composta pela mistura da água de retorno proveniente da condensação do vapor e de água nova para complementação das perdas, (HUGOT, 1977; RIBEIRO, 1999).

O tratamento da água de alimentação precisa ocorrer antes de sua entrada na caldeira a fim de evitar incrustações, originadas pelo acúmulo de resíduos sólidos e a corrosão da tubulação ocasionada pelo ataque dos gases liberados, comumente CO_2 e O_2 , (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; PERA, 1966)

A eliminação dos gases dissolvidos é realizada pelo desaerador térmico comumente por um processo conhecido como desaeração a pressão, que consiste em aquecer a água com vapor e liberar os gases dissolvidos, sendo estes posteriormente ventilados para a atmosfera. Este equipamento, contudo não retira todo o gás dissolvido na água, em especial o O_2 , sendo necessário a adição de produtos químicos para eliminar a sobra, (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; PERA, 1966).

O desaerador térmico esta frequentemente presente nas instalações típicas de caldeira, e ao aquecer a água de alimentação para retirar os gases dissolvidos, além de contribuir para melhorar a capacidade operacional da caldeira, contribui também para melhorar sua eficiência.

2.3 APLICAÇÃO DE CALDEIRAS – VAPOR PARA PROCESSO

A maioria das indústrias utiliza o vapor para seus processos característicos de transformação e produção, dentre tantos podemos citar os seguintes:

2.3.1 Indústria de Produtos Alimentícios

A indústria alimentícia emprega o vapor saturado em processos de cozimento, secagem e evaporação. Os aparelhos utilizados para realizar tais funções podem utilizar o vapor de forma direta ou indireta. Quando é preciso utilizar o vapor de forma direta no processo de fabricação de alimentos, devem-se observar regras estritas de tratamento e limpeza a fim de não contaminar o produto, e para tanto é necessário utilizar mecanismos controladores da qualidade do vapor.

2.3.2 Indústria Têxtil

A indústria de tecidos e roupas emprega o vapor em processos de secagem, evaporação, e aquecimento nos tanques de alvejamento e tingimento.

2.3.3. Indústria de Celulose e Papel

A indústria de celulose e papel emprega uma enorme quantidade de vapor consumido nos processos de cozimento da madeira (digestores), branqueamento da celulose, fabricação e secagem do papel.

2.3.4. Indústria de Açúcar e Etanol

A indústria sucroalcooleira emprega o vapor nos processos de moagem e extração do caldo, clarificação, evaporação, cozimento, secagem do açúcar, destilação do etanol, acionamento de turbinas e maquinário e geração de energia (HUGOT, 1977; RIBEIRO, 1999).

2.3.5. Indústria de Química e Petroquímica

A indústria de Química e Petroquímica empregam o vapor nos processos de aquecimento, destilação, evaporação, separação, condensação, geração de hidrogênio, acionamento de turbinas e maquinário, agitação / mistura e geração de energia.

2.3.6. Indústria de Metalurgia e Siderurgia

A indústria de Metalurgia e Siderurgia emprega o vapor nos processos de aquecimento, condensação, acionamento de turbinas e maquinário e geração de energia.

3 CONTROLE DE CALDEIRAS

O objetivo do uso das técnicas de controle de processos nas caldeiras é basicamente obter uma produção contínua e eficiente de vapor e para tanto, conforme Dukelow (1986) é necessário:

- a) atender o requisito de pressão e temperatura exigido pelos equipamentos consumidores.
- b) operar sob condições de economia, estabilidade e segurança permitidas pelo projeto da caldeira.

Produzir sob condições de economia, com menor consumo de combustível e insumos, exige melhor combustão e aproveitamento do calor gerado resultando numa maior eficiência da caldeira.

Dukelow (1986) destaca ainda que o sistema de controle de uma caldeira é geralmente um sistema multivariável que pode ser entendido como sendo uma série de malhas de controle básicas conectadas no mesmo processo de produção de vapor.

Em função do exposto acima e conforme o texto de diversos autores, Bega (1989), Coretti e Pessa (2008); Dukelow (1986), Pera (1966), apresenta-se a seguir uma síntese das principais malhas de controle de uma caldeira a bagaço.

Observamos que cada uma possui suas peculiaridades e dentre elas serão selecionadas as malhas de controle para investigação, em função do propósito deste trabalho.

3.1 MALHAS DE CONTROLE PRINCIPAIS

3.1.1 CONTROLE DE PRESSÃO DO VAPOR / CONTROLE DE COMBUSTÃO

A pressão do vapor na saída da caldeira depende da quantidade de calor fornecido pelos gases quentes produzidos pela combustão, aos tubos, (BEGA, 1989; CORETTI; PESSA, 2008; DUKELOW, 1986; PERA, 1966). Esta pressão, por exigência operacional dos equipamentos alimentados pelo vapor, a exemplo da turbina, deve ser controlada dentro de uma estreita faixa de variação (BEGA, 1989).

Trata-se então de uma malha de controle de combustão com combustível sólido. Em função das dificuldades de medir o combustível consumido, é adotada uma malha de controle de combustão do tipo paralelo, (BEGA, 1989; CORETTI; PESSA, 2008; DUKELOW, 1986).

Este controle mede a pressão do vapor na saída da caldeira, a variável controlada, e controla as entradas de ar de combustão e de bagaço, as variáveis manipuladas, através de atuação no damper do ventilador de ar de combustão e no sistema de alimentação do bagaço, respectivamente, mantendo uma relação ar-bagaço necessária, ajustada pelo operador, (BEGA, 1989; CORETTI; PESSA, 2008; DUKELOW, 1986).

O bagaço chega à caldeira com umidade em torno de 48% conforme Hugot (1969 e Ribeiro (1999). Esta é a característica do bagaço que mais influencia no rendimento da geração de vapor, visto que provoca variação do seu poder calorífico inferior (PCI), do excesso de ar necessário para a combustão e da temperatura da fornalha (HUGOT, 1969), alterando as condições de combustão, de geração de calor e o conseqüente desempenho da caldeira.

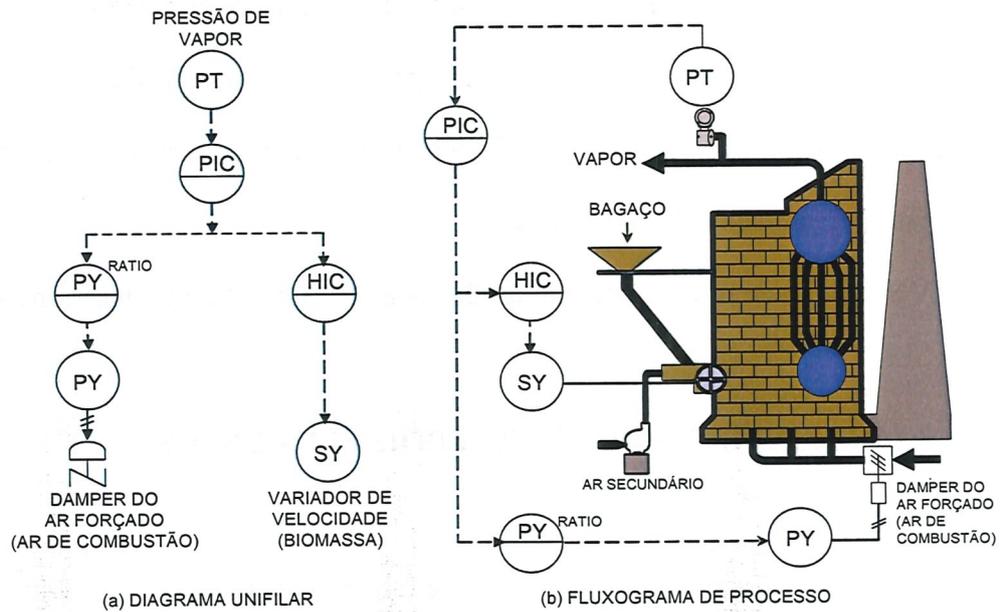


Figura 04 – Controle de pressão do vapor do tipo paralelo

Fonte: Adaptado de Coretti e Pessa (2008)

Recursos extras são introduzidos para melhorar a queima do bagaço, Ribeiro (1999) relata que normalmente as fornalhas das caldeiras a bagaço são equipadas com projetores-distribuidores (ou spreader-stoker). Este recurso lança uma mistura de bagaço e ar sob pressão na fornalha permitindo sua queima em suspensão, sendo a sobra queimada sobre a grelha, propiciando maior velocidade combustão e redução do excesso normal de ar, aumentando o rendimento da caldeira e melhorando sua resposta às variações de cargas (HUGOT, 1977; RIBEIRO, 1999).

3.1.2 CONTROLE DE NÍVEL DO TUBULÃO

O objetivo do controle de nível em caldeiras é obter a constância do nível no tubulão superior, de forma a manter a maior superfície de vaporização para maior rendimento e estabilidade da produção de vapor, garantido ainda o equilíbrio entre as vazões de vapor e da

água de alimentação sob qualquer condição de demanda. Conforme Bega (1989) e Dukelow (1986), nas caldeiras de grande porte o controle de nível do tubulão exige estratégias mais elaboradas de controle, pois, por possuírem pequeno volume de água no tubulão superior quando submetidos a rápidas variações de consumo de vapor ou carga, ficam sujeitos a sérios problemas operacionais e de segurança.

Veremos a seguir duas das malhas de controle de nível de caldeiras mais comuns.

3.1.2.1 CONTROLE DE NÍVEL A DOIS ELEMENTOS

Esse controle consiste em medir o nível do tubulão superior e a vazão de vapor gerada pela caldeira e controlar a vazão de água de alimentação, visando evitar grandes oscilações no nível do tubulão, a variável controlada.

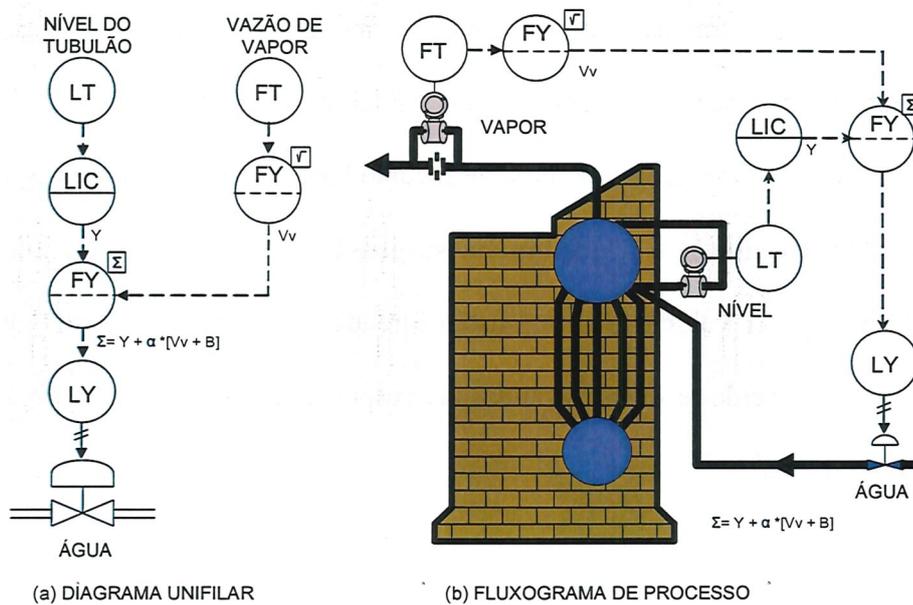


Figura 05 – Controle de nível a dois elementos.

Fonte: Adaptado de Coretti e Pessa (2008)

Esta malha é constituída pela associação de uma malha de controle antecipatório, a vazão de vapor, que antecipa a necessidade de uma vazão adicional de água, e uma malha de realimentação para controle do nível do tubulão, composta pelo transmissor de nível e pelo controlador de nível, cuja saída adicionada ao sinal de antecipação irá regular a vazão de água de alimentação. Bega (1989) e Dukelow (1986) destacam que esta malha de controle opera adequadamente sob a condição de pressão constante na tubulação de água de alimentação.

3.1.2.2 CONTROLE DE NÍVEL A TRÊS ELEMENTOS

Similar ao controle a dois elementos, acrescido do terceiro elemento, a medição de vazão de água de alimentação, busca suprimir o efeito das variações da pressão da água de alimentação no controle do nível, (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986).

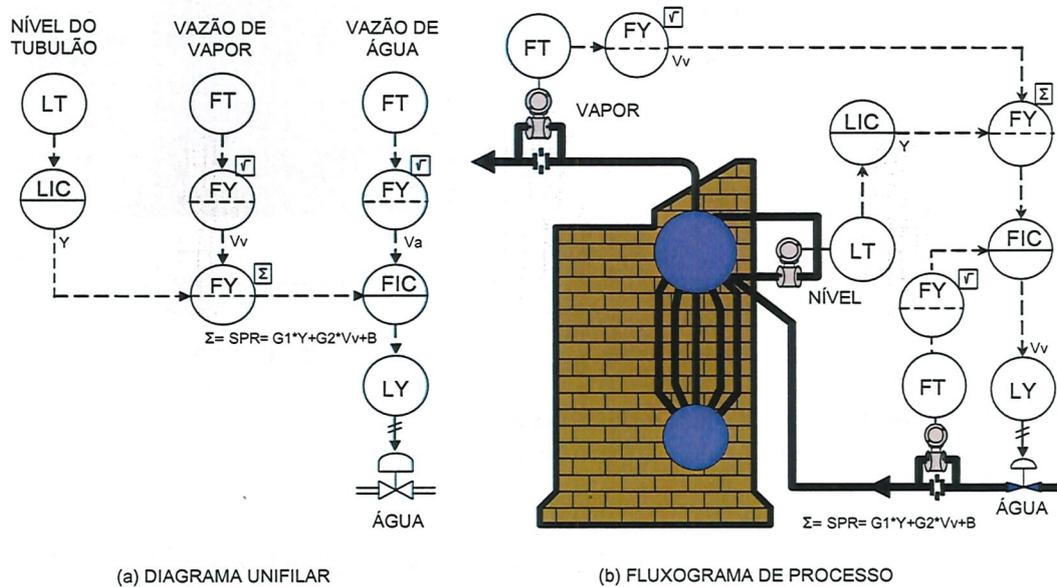


Figura 06 – Controle de nível a três elementos

Fonte: Adaptado de Coretti e Pessa (2008)

Esta malha é constituída pela associação de uma malha de controle antecipatório, a vazão de vapor, que antecipa a necessidade de uma vazão adicional de água, e uma malha de

realimentação para controle do nível do tubulão, composta pelo transmissor de nível e pelo controlador de nível, combinadas com um controle cascata, sendo a malha escrava formada pelo transmissor de vazão e o controlador de vazão de água, cuja saída irá regular a vazão de água de alimentação.

3.1.3 CONTROLE DE PRESSÃO DA FORNALHA OU CONTROLE DE TIRAGEM

Tiragem é o processo que assegura uma corrente de ar ou gases da combustão dentro da caldeira, abrangendo a entrada do ar de combustão na fornalha e a circulação dos gases da combustão desde a fornalha até a chaminé (DUKELOW, 1986; HUGOT, 1977; PERA, 1966).

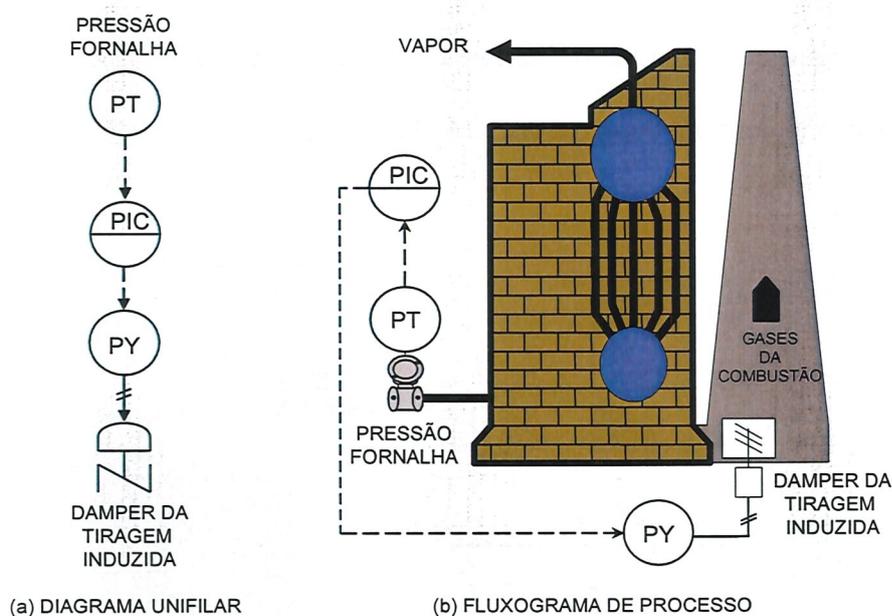


Figura 07 – Controle de pressão da fornalha
 Fonte: Adaptado de Coretti e Pessa (2008)

As caldeiras a bagaço de cana usualmente são projetadas para trabalhar com o sistema de tiragem balanceada. Este sistema conforme Dukelow (1986) e Pêra (1966) utiliza dois ventiladores:

- um ventilador exclusivo para assegurar o fluxo de ar para dentro da fornalha, chamado de ventilador de tiragem forçada, e;

- o outro ventilador para assegurar o fluxo dos gases da combustão desde a fornalha até a chaminé, chamado de ventilador de tiragem induzida, mantendo a pressão interna da fornalha ligeiramente negativa.

Este controle consiste em manter a pressão interna da fornalha ligeiramente negativa, usualmente -5 mmH₂O (CORETTI; PESSA, 2008), atuando na vazão de saída dos gases da combustão pela chaminé.

Trata-se de uma malha de controle automático por realimentação.

A pressão da fornalha é a variável controlada, sendo o valor medido comparado, no controlador utilizado, com o valor desejado para tal pressão, onde o controlador usa a diferença para atuar na vazão dos gases quentes da combustão pela chaminé, a variável manipulada, ajustando a posição do damper do ventilador de tiragem induzida.

3.1.4 CONTROLE DE TEMPERATURA DO VAPOR SUPERAQUECIDO

O objetivo desta malha é garantir uma temperatura de superaquecimento do vapor sem variações (DUKELOW, 1986) controlando a sua temperatura, usualmente, pelo processo de injeção de água (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; PERA, 1966). Sendo este processo o mais difundido (PERA, 1966) e o que possui o melhor tempo de resposta (DUKELOW, 1986).

Trata-se de uma malha de controle automático por realimentação conforme definição de Mollemkamp (1988).

A temperatura de superaquecimento do vapor é a variável controlada, sendo o valor medido comparado, no controlador utilizado, com o valor desejado para tal temperatura, onde o controlador usa a diferença para atuar na vazão de água, a variável manipulada, a ser pulverizada no vapor superaquecido, ajustando a posição da válvula de admissão de água.

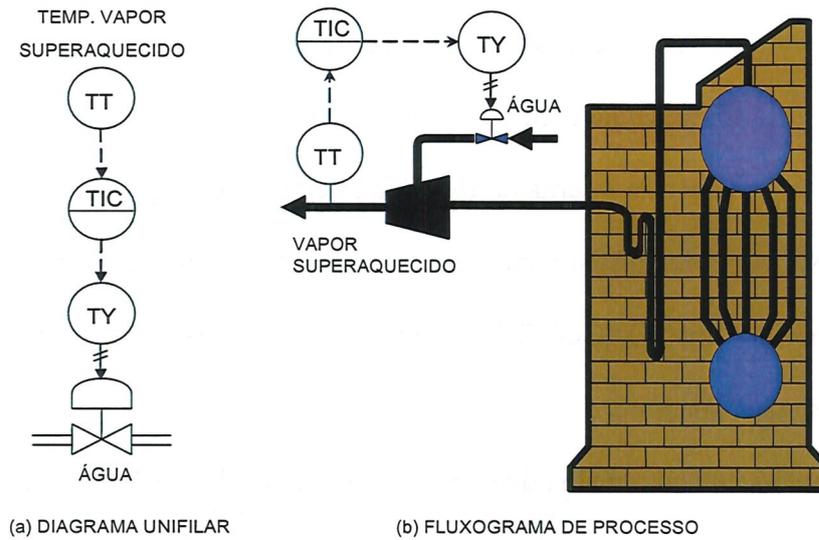


Figura 08 – Controle de temperatura do vapor superaquecido
 Fonte: Adaptado de Coretti e Pessa (2008)

3.1.5 CONTROLE DE NÍVEL DO DESAERADOR

Esse controle consiste em medir o nível do tanque do desaerador e controlar a vazão de água de alimentação do desaerador.

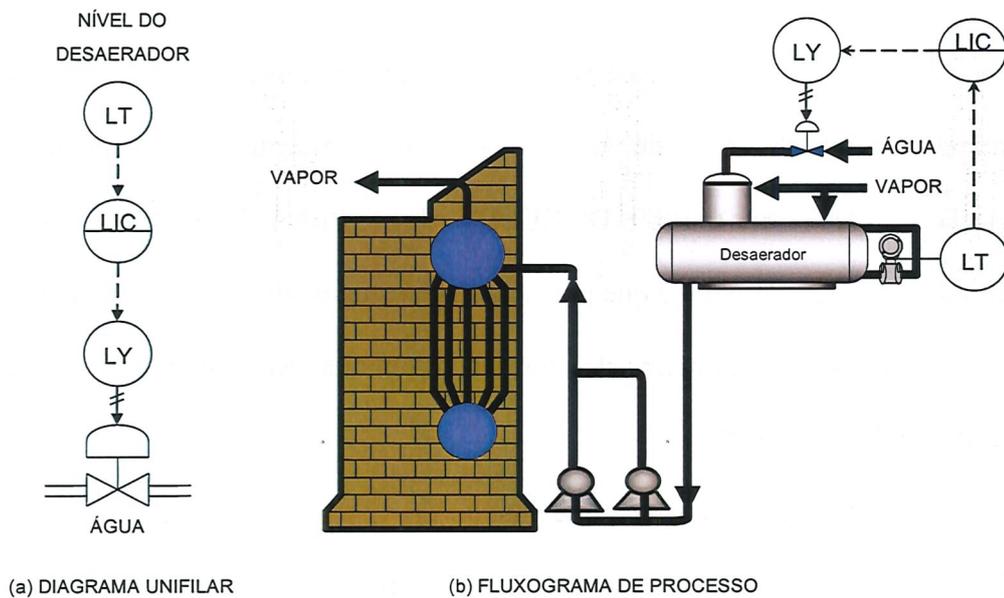


Figura 09 – Controle de nível do desaerador
 Fonte: Adaptado de Coretti e Pessa (2008)

Trata-se de uma malha de controle automático por realimentação conforme definição de Mollemkamp (1988).

O nível do tanque do desaerador é a variável controlada, sendo o valor medido comparado, no controlador utilizado, com o valor desejado para tal nível, onde o controlador usa a diferença para atuar na vazão de água de entrada, a variável manipulada, ajustando a posição da válvula de admissão de água.

3.2 SELEÇÃO DAS MALHAS DE CONTROLE QUE SERÃO IDENTIFICADAS

O desempenho da caldeira envolve sua eficiência em transferir calor do combustível para a água e sua estabilidade operacional (DUKELOW, 1986).

Sendo sua eficiência calculada a partir da seguinte consideração (DUKELOW, 1986; HUGOT, 1977; PERA, 1966):

$$\text{Eficiência da Caldeira} = \frac{\text{Calor absorvido pelo fluido de trabalho (água)}}{\text{Calor fornecido pelo combustível}} \times 100$$

Para efetuar o cálculo supra é necessário conhecer os fatores que o influenciam, que segundo (DUKELOW, 1986; HUGOT, 1977; PERA, 1966) incluem:

- o tipo e características do combustível utilizado.
- a qualidade da combustão,
- as perdas geradas pela circulação do ar e dos gases da combustão,
- as pressões e temperaturas da caldeira,
- as características da água de alimentação.

Com base nas informações acima, abordaremos as implicações do modelamento necessário das malhas selecionadas, que pode ser utilizado na melhoria da sua sintonia, visando contribuir para a eficiência e estabilidade operacional da caldeira.

São definidas a seguir as malhas de controle selecionadas para serem identificadas pela ferramenta computacional adotada.

3.2.1 SELEÇÃO 1 – CONTROLE DE PRESSÃO DA FORNALHA

As perdas nas fornalhas, perdas por calor sensível nos gases da chaminé, perdas nas mudanças de carga, entre outros fatores, afetam a eficiência de uma caldeira.

O controle da pressão da fornalha garante o fluxo adequado dos gases através da caldeira, permitindo uma maior transferência de calor, aumentando a eficiência da caldeira (CORETTI; PESSA, 2008). É influenciado pelo controle de vazão do ar de combustão, e vice-versa (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986), e por ruídos existentes no sinal de medição de pressão devido ao seu baixo valor, -5 mmH₂O, frente à pressão atmosférica (DUKELOW, 1986), o que muitas vezes exige uma sintonia mais lenta desta malha de controle (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986) que é considerada a malha simples mais difícil de manter sob controle de uma caldeira (DUKELOW, 1986).

As oscilações na pressão da fornalha produzem variações nas vazões de bagaço (sólido) e ar (gás), alterando a relação entre as mesmas, afetando a combustão e reduzindo a eficiência da caldeira. Maior será a eficiência no funcionamento da caldeira quanto maior for a redução no excesso de ar (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; HUGOT, 1977).

Desta forma, uma sintonia periódica é necessária frente à necessidade de estabilizar as oscilações devidas à dinâmica e à degradação do sistema físico projetado pelo fabricante.

Trata-se de uma malha de controle automático por realimentação.

3.2.2 SELEÇÃO 2 – CONTROLE DE TEMPERATURA DO VAPOR SUPERAQUECIDO

Entre os fatores que afetam a eficiência de uma caldeira esta o aproveitamento do calor fornecido pelo combustível para aquecer o vapor, desta forma o superaquecimento aumenta o calor total do vapor, contribuindo para melhorar o rendimento da caldeira (DUKELOW, 1986).

O propósito desta malha de controle é garantir uma temperatura de superaquecimento sem variações visando garantir uma operação eficiente das turbinas (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; PERA, 1966) e o mesmo tempo preservar o próprio superaquecedor (PERA, 1966).

A temperatura do vapor superaquecido sofre variação influenciada pela carga da caldeira, pela temperatura dos gases, pela variação no excesso de ar de combustão, pela limpeza da superfície de absorção de calor, entre outros fatores, (BEGA, 1989; DUKELOW, 1986; PERA, 1966).

Portanto faz-se necessária uma sintonia periódica para suprir a necessidade de estabilizar as oscilações devidas à dinâmica e à degradação do sistema físico projetado pelo fabricante.

Trata-se de uma malha de controle automático por realimentação.

3.2.3 SELEÇÃO 3 – MALHA DE CONTROLE DE NÍVEL DO DESAERADOR

O desaerador tem como função remover os gases dissolvidos na água tais como o oxigênio e o gás carbônico, a fim de proteger a caldeira e suas tubulações contra corrosão, e também contribuir para o aumento da eficiência da caldeira, pois ao aquecer a água reduz o

calor necessário para a geração do vapor na caldeira, gerando economia de combustível (DUKELOW, 1986, HUGOT, 1977; PERA, 1966).

O nível do desaerador está sujeito a uma grande variedade de condições de processo, pois necessita atender às variações de carga da caldeira.

É necessária uma sintonia periódica frente à necessidade de estabilizar as oscilações devidas à dinâmica e à degradação do sistema físico projetado pelo fabricante.

Trata-se de uma malha de controle automático por realimentação.

3.3 INFLUÊNCIA DAS NOVAS TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE PROCESSOS APLICADA A CALDEIRA

O ritmo de desenvolvimento das empresas e a complexidade dos processos de produção exigem cada vez mais da instrumentação encontrada nas plantas industriais. Muitas tentativas de modernização em busca de mais eficiência podem ser visualizadas. Surgem constantemente alternativas tecnológicas com o objetivo de suprir a demanda por novas funcionalidades ou melhores características de operação dos sistemas industriais de produção.

Com o setor sucroalcooleiro não é diferente. Hoje, a tecnologia de redes digitais para os sistemas de controle de processos é uma alternativa bastante freqüente nestas plantas industriais. A comunicação vai migrando para sistemas de redes digitais, cada qual buscando atender as necessidades específicas do seu nível industrial e permitindo integração entre os dispositivos componentes dos diferentes sistemas (BERGE, 2002) e ambientes industriais (CUNHA 2004), aumentando a quantidade de informação tratada e disponibilizando variadas funções de controle e supervisão, além da considerável redução de hardware que a comunicação digital proporciona.

A figura a seguir mostra esta integração, onde a informação flui do nível de chão de fábrica, chega ao nível de gerenciamento do processo, sendo usada para fins de operação, configuração, base de dados, diagnostico e sintonia. Posteriormente, a informação pura ou apropriadamente tratada, pode ser enviada ao nível de gerenciamento de negócios.

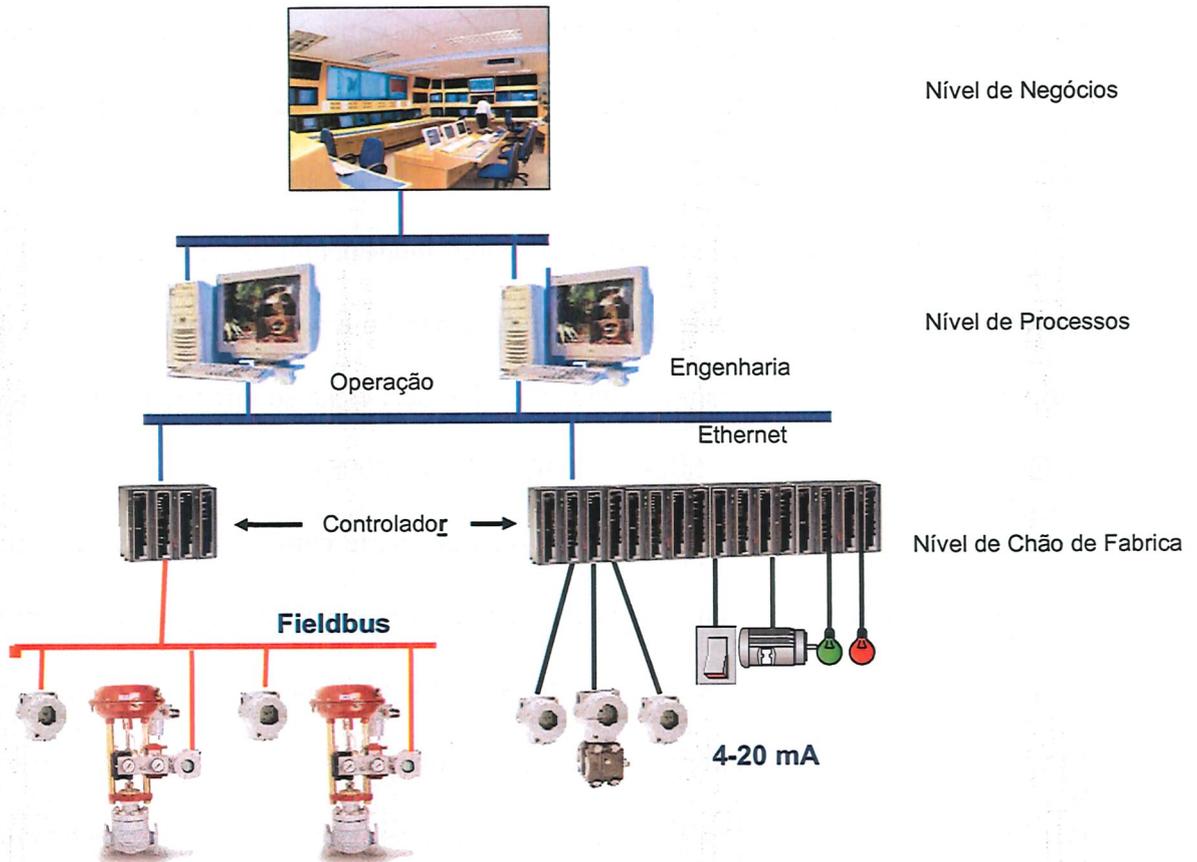


Figura 10 – Arquitetura típica de sistemas de automação industrial

Fonte: Adaptado de SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS [1998?]

O emprego das redes digitais na industria obrigou-as a atender requisitos operacionais (BERGE, 2002), tais como: segurança, disponibilidade, flexibilidade, robustez, adaptação, escalabilidade, interoperabilidade, algoritmos inteligentes entre outros.

Com o objetivo de explicar as tendências tecnológicas da instrumentação e controle de processos a seguir serão abordados conceitos relacionados aos sistemas de chão de fábrica e a tecnologia de supervisão usando OPC.

3.3.1 SISTEMAS DE CHÃO DE FÁBRICA

Os sistemas de chão de fábrica são compostos por equipamentos de campo que interagem diretamente com o processo e executam as funções de medição de grandezas físicas, na forma de sensores de temperatura e pressão entre outros, executam a função de controle, na forma de controladores e finalmente atuam no processo, na forma de elementos finais de controle ou atuadores.

Em função da oferta de vantagens, tais como interoperabilidade e intercambibilidade, segurança, distribuição do controle, facilidade de expansão e possibilidade de acesso remoto, os barramentos de campo, também chamados de fieldbus, estão se tornando ferramentas cada vez mais importantes dentro das indústrias (BRANDÃO, 2005).

A automação de processos industriais trata em parte com os sistemas de controle de processos contínuos, que são mais lentos e tratam com variáveis analógicas tais como nível, pressão, temperatura, vazão entre outras. Estes sistemas estão presentes, em maior ou menor proporção nas indústrias de siderurgia e mineração, químicas e petroquímicas, açúcar e etanol, geração de energia, farmacêuticas, alimentos e bebidas, papel e celulose, entre outras, e utilizam redes digitais de campo para o controle dos processos, tendo como maior base instalada os protocolos do tipo FOUNDATION Fieldbus (FF) e PROFIBUS-PA (Process Fieldbus – Process Automation).

As principais características e funcionalidades destes protocolos serão apresentadas a seguir. Informações complementares sobre os protocolos podem ser encontradas em Brandão (2005) e nas especificações PROFIBUS ou FOUNDATION Fieldbus.

3.3.1.1 PROFIBUS

O protocolo PROFIBUS é um padrão de rede de campo aberto do tipo mestre/escravo (CASSIOLATO; TORRES; CAMARGO, 2006), estando os mestres classificados como:

- DP Mestre Classe 1 (DPM1) que controlam o processo realizando troca de dados de forma cíclica com os dispositivos escravos e este tipo de mestre é representado pelos PLCs ou DCSs.
- DP Mestre Classe 2 (DPM2) que efetua a configuração, manutenção e diagnóstico da rede de campo realizando comunicação acíclica com os dispositivos escravos da rede que são constituídos pelos equipamentos de campo, tais como transmissores e/ou atuadores, tendo suas funções e comportamento interno estruturados em unidades de funções lógicas, chamadas de blocos funcionais. A especificação PROFIBUS PA (utilizado no chão de fábrica para controle de processo) padrão, inclui apenas blocos de entrada e saída, representados basicamente pelos blocos Analog Input (AI), Analog Output (AO) e Totalizador (TOT).

Os blocos de controle e cálculo que estão dentro do controlador central, DPM1, não são padronizados, permitindo que cada fornecedor crie blocos customizados com características internas diferentes das dos demais fabricantes.

A figura abaixo representa uma malha de controle formada pelos blocos AI-PID-AO em um ambiente de comunicação entre o módulo mestre DPM1 e os equipamentos de campo.

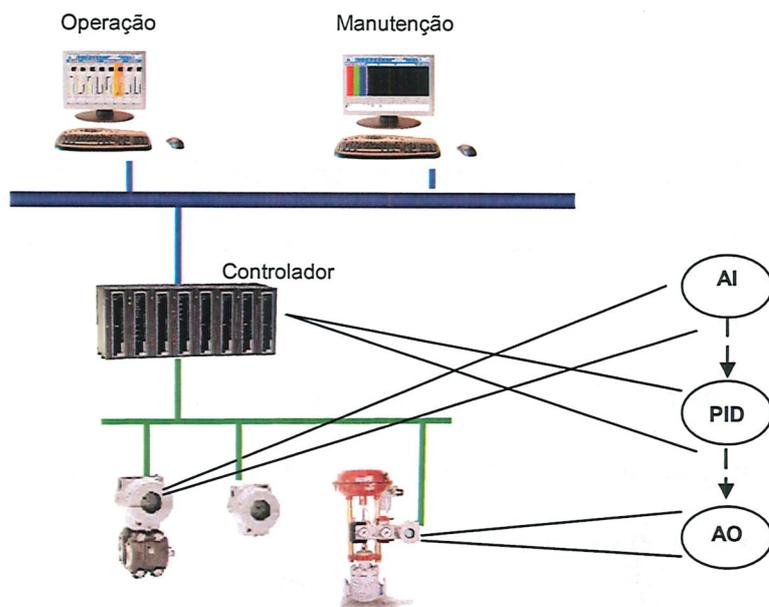


Figura 11 – Exemplo de uma malha de controle AI-PID-AO no protocolo PROFIBUS

Fonte: Adaptado de SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS [1998?]

No exemplo acima, os equipamentos de campo, transmissores e atuadores, possuem somente blocos de entrada e saída respectivamente. O controle é feito totalmente no controlador (PLC) utilizando um PID não padronizado, implicando que cada fabricante possui algoritmo e conjunto de parâmetros customizados para cada controlador. Assim, a integração deste PID oferece dificuldades e custo relativamente alto, exigindo drives de comunicação específicos para cada fabricante.

3.3.1.2 FOUNDATION FIELDBUS

O protocolo FOUNDATION Fieldbus (FF) é um padrão de rede de campo aberto baseado no conceito de controle distribuído, onde a troca de informações entre equipamentos de campo e controladores pode se realizar através da comunicação cliente-servidor ou produtor-consumidor (FOUNDATION FIELDBUS, 2003a). Neste caso as funções de controle podem estar localizadas tanto nos equipamentos de campo como nos controladores.

A utilização do conceito de blocos funcionais é a base fundamental para implementar a distribuição das funções de controle ao longo dos equipamentos em campo. Um bloco funcional pode representar uma função ou algoritmo tal como, um controlador PID, blocos de entrada ou saída analógica, um totalizador etc. Por essa razão, esta tecnologia é normalmente chamada de tecnologia orientada a blocos.

Desta forma, toda e qualquer aplicação de usuário é baseada em blocos funcionais. A interface e comportamento destes blocos funcionais são definidos na norma que regulamenta o padrão FF e que define uma linguagem universal para descrição de aplicações de controle de processos e automação (FOUNDATION FIELDBUS, 2003b).

Todo bloco é composto por um conjunto de parâmetros e um algoritmo associado. Os parâmetros são classificados como:

- parâmetros de Entrada, que fornecem dados para o algoritmo;
- parâmetros de Saída, que representam o resultado do processamento;
- parâmetros Contidos para todas as outras funções que não sejam troca de dados entre blocos, contendo dados de configuração do bloco e variáveis de pré-cálculo.

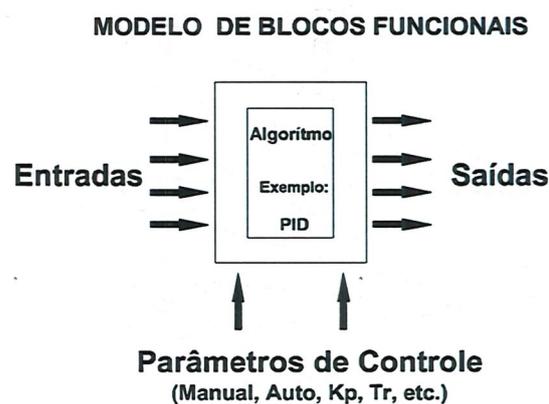


Figura 12 – Esquemático de um bloco funcional FF

Fonte: SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS [1998?]

A especificação FF define um conjunto básico de parâmetros usados por qualquer bloco, e também uma biblioteca de blocos padrão. Na especificação estão previstas opções onde os fabricantes adicionem funcionalidades aos blocos já existentes ou mesmo desenvolvam novos blocos. Os blocos funcionais podem ser conectados entre si de forma a trocar informações e formar as estratégias. Estas conexões entre blocos recebem a denominação de links e são efetuadas entre as entradas e saídas dos blocos. Cada parâmetro “linkável” de entrada e saída tem associado a ele um status que determina informações de diagnóstico do link, do bloco e da malha de controle como um todo.

Uma malha de controle PID típica será composta por, no mínimo, os seguintes blocos funcionais: um bloco de entrada analógica (AI), um bloco controlador PID (PID) e um bloco de saída analógica (AO), distribuídos entre um transmissor e um atuador de válvula, como representa a figura a seguir:

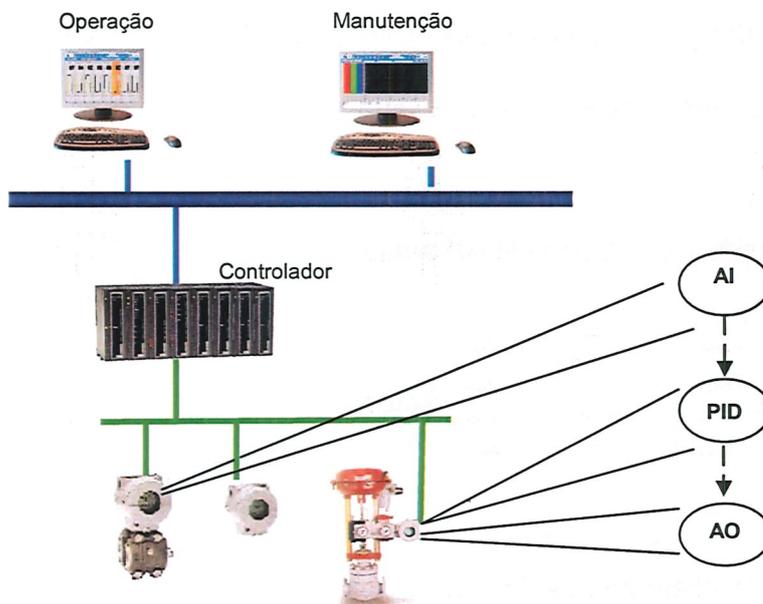


Figura 13 – Exemplo de uma malha de controle AI-PID-AO no protocolo FOUNDATION Fieldbus
Fonte: Adaptado de SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS [1998?]

3.3.2 CONTROLADORES PID

Apesar do atual desenvolvimento tecnológico aplicados aos processos industriais, os controles do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ainda oferecem soluções simples e muito eficientes para a grande maioria dos sistemas de controle industrial (ASTROM; HAGGLUND, 2001).

Com o avanço das tecnologias digitais, e também com a grande experiência em controladores PID, são oferecidas extensas listas de soluções para controladores nesta área.

3.3.3 TECNOLOGIA OPC

A supervisão e operação de plantas vêm utilizando as facilidades promovidas pelo padrão OPC (OPC FOUNDATION, 2006), que visa prover conectividade ampla através de padrões abertos, baseado na comunicação entre cliente e servidor.

Nesta tecnologia os clientes são desenvolvidos pelos fabricantes dos softwares de supervisão ou SCADA e os servidores são fornecidos pelos fabricantes de equipamentos. Assim sendo o fabricante do software de supervisão desenvolve uma única vez o cliente OPC, passando a ter acesso a uma infinidade de servidores existentes para cada equipamento diferente existente no mercado.

Desta forma o benefício alcançado para os fabricantes de equipamentos foi a habilidade de reduzir os custos e pontos de falhas de desenvolvimento relativos a conectividade podendo focar seus esforços no aprimoramento de seus produtos, enquanto o

benefício para o usuário foi a flexibilidade na escolha da solução de menor custo x benefício, sem se preocupar com a conectividade.

A figura seguinte ilustra as diferenças de aplicações utilizando drivers proprietários nos aplicativos e com padrão OPC.

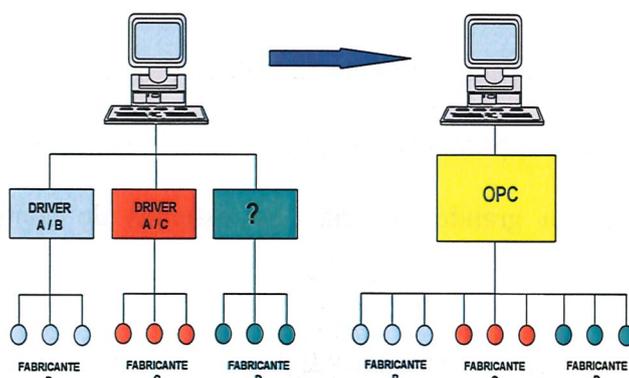


Figura 14 – Comunicação de SCADA e equipamentos de campo: a) através de drivers de dispositivo e b) através de OPC

Fonte: Adaptado de SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS [1998?]

A partir dessa iniciativa de aquisição padronizada de dados de processo percebeu-se que a aquisição padronizada para outros tipos de comunicação de dados poderia ser realizada.

A atual arquitetura OPC contempla diferentes conjuntos de especificações para cada domínio de aplicação. Para a supervisão dos dados de uma planta, inicialmente, foi especificada a norma OPC DA (Data Access) que define todas as interfaces necessárias para acesso e atuação em dados do processo. Outras normas foram criadas: OPC A&E (Alarms & Events), OPC HDA (Historical Data Access), OPC Security. Todos estes padrões seguem a tecnologia COM e DCOM que são baseadas na plataforma Windows.

4 MELHORIA DO DESEMPENHO DA CALDEIRA ATRAVÉS DO MODELAMENTO EM TEMPO REAL DE SUAS MALHAS DE CONTROLE

Neste trabalho estaremos utilizando como base uma ferramenta computacional desenvolvida dentro do grupo de pesquisa, resultante do trabalho de Fernandes Junior¹.

Como o propósito deste trabalho é obter um modelo de uma malha fechada de precisão em tempo real usando-se o modelo ARX, que leva em conta as variações do sistema físico que acontecem durante a obtenção do modelo, será feita uma breve descrição prática desta técnica.

A identificação, ou seja, a obtenção de um modelo matemático representativo de um processo industrial é o passo inicial e o mais importante.

A identificação de sistemas busca determinar, a partir de dados experimentais e com a melhor precisão possível, modelos matemáticos representativos do comportamento de um sistema (CUNHA, 2004). A escolha destes modelos e a estimação de seus respectivos parâmetros sofrem influencia de diversos fatores como: conhecimento a priori do sistema, características do modelo, existência de ruídos e critérios a serem minimizados na identificação.

¹FERNANDES JUNIOR, R. F. Tele—sintonia de controladores industriais utilizando tecnologia CyberOPC. A ser editado pela USP, 2009



Será aplicada uma técnica experimental de identificação de sistemas, utilizando a estrutura matemática linear *ARX*. Os parâmetros da estrutura matemática *ARX* são estimados por meio do algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivos.

A comunicação e a aquisição de dados são feitas através do padrão de comunicação *OPC*, coletando dados em tempo real, sem interferência no processo.

Ao final da identificação é obtido um modelo em tempo real, sem interferência no processo.

Identificação de processo

A identificação de sistema pode ocorrer com as malhas de controle sendo operadas de forma aberta ou fechada, sendo esta possibilidade motivo de discussões. A identificação em malha aberta ocorre com o controlador operado no modo manual. Por outro lado, a identificação em malha fechada consiste em manter o controlador no modo automático durante a identificação.

Nota-se que existe um maior interesse nos atuais desenvolvimentos em tentar determinar a dinâmica da planta com o controlador em malha fechada, pois, desta forma, o sistema fornecerá dados ideais para a identificação do modelo, englobando os distúrbios da operação em tempo real.

Os métodos de identificação podem ser classificados com abordagem no domínio da frequência e no domínio do tempo (AGUIRRE, 2004).

Na abordagem do domínio da frequência, a resposta transiente é obtida através da excitação do sistema por um relé com o objetivo de gerar uma oscilação constante. Desta forma, obtém-se as margens de ganho e fase e largura de banda. O método mais abordado na literatura é da excitação a relé com histerese (CAON, 1999).



Na abordagem do domínio do tempo, a resposta transiente é obtida através da aplicação de um sinal do tipo degrau, impulso ou uma seqüência pseudo-randômica binária (PRBS) na entrada do sistema. Assim são obtidas as constantes de tempo, ganho estático e o tempo morto do sistema em malha aberta ou fechada.

Modelo de identificação

É utilizada uma técnica experimental de identificação de sistemas, utilizando a estrutura matemática linear ARX.

ARX (AutoRegressive with eXogeneous variable model) é um modelo polinomial linear, conhecido também como modelo auto-regressivo com entrada externa, sendo representado por meio de equações diferenças da seguinte forma:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + \dots + a_{na} y(k-na) + b_1 u(k-1) + b_{nb} u(k-nb) \quad (1)$$

onde,

- $u(k)$ e $y(k)$ são os sinais de entrada e saída do sistema,
- a e b são os parâmetros do sistema a ser identificado,
- na e nb são as ordens dos polinômios, e
- k o número de amostras.

A aquisição de dados de campo é feita através do padrão de comunicação OPC e os dados obtidos em tempo real são armazenados em base de dados para posterior análise.

Os parâmetros da estrutura matemática ARX são estimados por meio do algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivo, utilizando os dados coletados, disponíveis na base de dados.

Ao fim do processo são obtidas equações características na forma das seguintes expressões, resultantes do desenvolvimento do modelo:

Dado um sistema discreto no domínio z .

$$\frac{Y}{Y_D}(z) = \frac{b_1 z^9 + \dots + b_9 z + b_{10}}{z^{10} + a_1 z^9 + \dots + a_9 z + a_{10}} \quad (2)$$

A equação de y para o tempo discreto é da forma:

$$y = -(a_1) * y_{Est}(T-1) - (a_2) * y_{Est}(T-2) - \dots - (a_{10}) * y_{Est}(T-10) + (b_1) * u(T) + b_2 * u(T-1) + \dots + (b_{10}) * u(T-9) \quad (3)$$

A validação da identificação é realizada através do índice da percentagem da variação da saída (FIT), que representa a qualidade do modelo de 0 a 100%. Quanto maior o FIT, melhor o modelo (LJUNG, 2008).

Uma vez obtido o modelo do sistema este pode ser utilizado por diversos métodos de sintonia tais como:

- Os métodos de Ziegler e Nichols (1995). Estes métodos são baseados no decaimento de $\frac{1}{4}$, que produz respostas oscilatórias e largos overshoots. Embora estes métodos sejam considerados antigos e apresentem alguns problemas, eles são largamente aplicados na indústria. Aström e Hägglund, (1995) ressaltam que ocorre na literatura, uma multiplicidade de métodos modificados baseados em Ziegler-Nichols.

- Os métodos baseados em modelo interno. Estes métodos são baseados na adoção de modelos do processo que conduzem a expressões analíticas para a sintonia de controladores. São seus representantes os modelos de síntese direta (SD), de controle por modelo interno (IMC) e método de Lambda-Tuning. A sintonia utilizando os modelos SD e IMC apresenta resultado muito próximo, contudo o IMC oferece a vantagem de permitir incertezas no modelo e uma relação entre desempenho e robustez. O método Lambda-tuning é utilizado em aplicações onde ocorrem grandes atrasos de transporte ou quando o atraso é variante no tempo (SEBORG et al., 2004).

- Métodos baseados em técnicas de otimização. Os métodos de critérios de integrais de erro são os mais comuns e utilizam conceitos simples de otimização de uma função integral do erro (LIPTAK, 1995). Aström e Hägglund, (1995) indicam que o método é adequado para controladores PID e que ele tem a vantagem de capturar diferentes aspectos dos problemas de desenvolvimento.

5 TESTES E RESULTADOS

Para a realização dos testes foi utilizado o seguinte procedimento para validar a ferramenta escolhida:

A)- A definição e coleta dos dados:

- Definimos as malhas para modelar matematicamente.
- Definimos as variáveis de cada malha supra para amostrar.
- Definimos a taxa de amostragem para coleta dos dados, em função de cada malha.
- Realizamos a coleta e registro, em base de dados, via comunicação OPC, das variáveis de processo de cada malha definida, nas instalações do cliente, aproveitando do comportamento dinâmico de cada malha, sem provocar distúrbios indesejáveis, conforme exigência do cliente.

B)- A identificação do sistema:

- Definimos a estrutura do modelo para identificação do sistema, neste caso o modelo ARX, conforme método adotado.
- Utilizando os dados coletados em campo foi realizada a identificação paramétrica usando o modelo selecionado, ARX, através do método dos mínimos quadrados recursivo. Os detalhes estão relacionados em cada experimento.

C)- Malhas selecionadas:

As malhas selecionadas são as seguintes:

Tabela 1 - Malhas selecionadas para identificação

TAG	FAIXA DE CALIBRAÇÃO			DESCRICAÇÃO
PIC500.PV	-50	a	50	mmH2O Controle de Pressão da Fomalha
LIC100.PV	0	a	100	% Controle de Nível do Desaerador
TIC301A.PV	0	a	800	oC Controle de temperatura vapor superaquecido

Foram realizados testes com as malhas selecionadas utilizando o mesmo procedimento mostrado acima e os resultados são mostrados a seguir:

5.1 TESTE 1 – MALHA DE CONTROLE DE PRESSÃO DA FORNALHA

A)- Coleta dos dados:

Tabela 2 - Coleta de Dados PIC500

HORA	PIC500 PV	PIC500 SP	PIC500 MV	PIC500 Kp	PIC500 Ti	PIC500 Td	SELEÇÃO A/M
00:00:01	-0,21	-5,00	41,750	0,1	2,300	0	1
00:00:11	0,40	-5,00	42,380	0,1	2,300	0	1
00:00:21	1,78	-5,00	42,860	0,1	2,300	0	1
00:00:31	0,73	-5,00	43,310	0,1	2,300	0	1
00:00:41	1,11	-5,00	43,940	0,1	2,300	0	1
00:00:51	-0,21	-5,00	44,080	0,1	2,300	0	1

Nota: Seleção A/M: 1- Automático, 0 - Manual

Trata-se de malha simples de realimentação;

As variáveis selecionadas para amostragem conforme tabela;

A amostragem foi colhida nas instalações do cliente, aproveitando o comportamento dinâmico de cada malha, em malha fechada, sem provocar distúrbios indesejáveis;

O intervalo de tempo da amostragem é de 10 seg. – limite imposto pela memória disponível para o banco de dados.

O armazenamento foi realizado em base de dados, via OPC, com hora/min/seg, totalizando 08h30min de amostragem por dia de operação.

B)- Identificação

A identificação é realizada utilizando o modelo ARX com ordem 10, conforme previsto no método adotado:

A função de transferência de 10ª ordem obtida para a malha fechada é a seguinte:

FTMF_Estimado(z) =

$$0.2907 z^9 - 0.05563 z^8 - 0.09624 z^7 + 0.1689 z^6 - 0.1214 z^5 - 0.211 z^4 + 0.2963 z^3 - 0.252 z^2 - 0.07886 z + 0.04939$$

$$z^{10} - 1.635 z^9 + 1.071 z^8 - 0.4427 z^7 + 0.1036 z^6 - 0.00677 z^5 + 0.04686 z^4 + 0.06713 z^3 - 0.302 z^2 + 0.3646 z - 0.1609$$

O gráfico a seguir mostra a comparação entre modelo estimado e o modelo real.

Observamos que os pontos do gráfico foram obtidos experimentalmente.

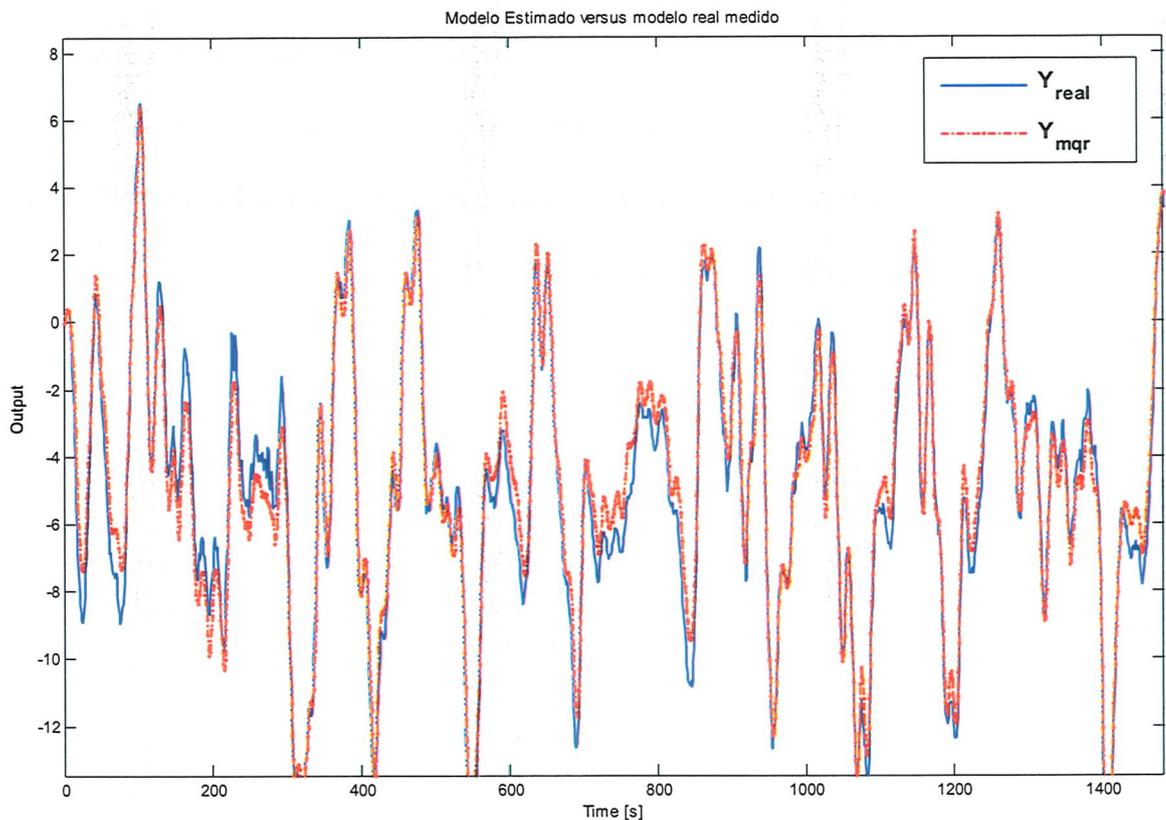


Figura 15 – PIC500 - Modelo estimado (vermelho) x Modelo real (azul)

A identificação atingiu FIT de 83.6617%

A função de transferência em z da malha fechada obtida é de 10^a ordem, conforme método adotado.

Os pontos do modelo estimado foram gerados a partir da função de transferência estimada

para a malha fechada supra.

Observamos que o modelo obtido é muito fiel à dinâmica do sistema real indicando a correção do método adotado.

Conclusão do modelamento da malha de controle de pressão da fornalha

O método adotado se revelou viável visto ter conseguido obter um modelamento de qualidade conforme se comprova no gráfico da figura 15.

Em um período de 08h30min de operação utilizado para a determinação do modelo, observa-se, na figura 15, que a variação média e instantânea são muito pequenas, conforme indica o resultado de identificação quantizado pelo método e que obteve FIT de 83.6617 %. Este resultado pode ser considerado de qualidade, pois a identificação foi realizada em tempo real, com a caldeira operando no processo.

5.2 TESTE 2 – MALHA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DO VAPOR

A)- Coleta dos dados:

Tabela 3 - Coleta de Dados TIC301A

HORA	TIC301A	TIC301A	TIC301A	TIC301A	TIC301A	TIC301A	SELEÇÃO
HORA	PV	SP	MV	Kp	Ti	Td	A/M
00:00:01	517,68	510,00	92,95	6,00	1,10	-	1,00
00:00:11	516,00	510,00	91,82	6,00	1,10	-	1,00
00:00:21	515,12	510,00	91,26	6,00	1,10	-	1,00
00:00:31	513,36	510,00	90,02	6,00	1,10	-	1,00
00:00:41	513,84	510,00	90,46	6,00	1,10	-	1,00
00:00:51	511,12	510,00	88,45	6,00	1,10	-	1,00

Nota: Seleção A/M: 1 - Automático, 0 - Manual

Trata-se de malha simples de realimentação;

As variáveis selecionadas para amostragem conforme tabela;

A amostragem foi colhida nas instalações do cliente, aproveitando o comportamento dinâmico de cada malha, em malha fechada, sem provocar distúrbios indesejáveis;

O intervalo de tempo da amostragem é de 10 seg. – limite imposto pela memória disponível para o banco de dados.

O armazenamento foi realizado em base de dados, via OPC, com hora/min/seg, totalizando 08h30min de amostragem por dia de operação.

B)- Identificação

A identificação é realizada utilizando o modelo ARX com ordem 10, conforme previsto no método adotado.

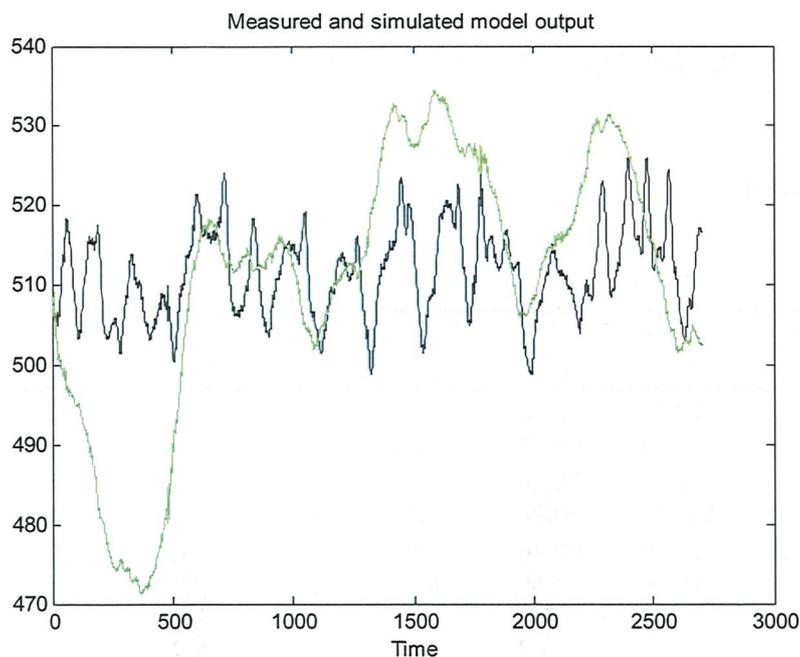


Figura 16 – TIC301A - Modelo estimado (verde) x Modelo real (preto)

A identificação atingiu FIT de - 169,5 %, ou seja, ela não é válida.

O teste de diversas amostras mostrou resultado similar.

Neste caso a identificação não ocorreu.

Conclusão do TESTE 2:

Após análise dos dados concluímos que a possível causa da não identificação seja devido à pequena variação da PV em torno do SP, ou seja, mais ou menos 15 °C em torno de 510 °C, promova um distúrbio insuficiente para que o método adotado seja validado.

5.3 TESTE 3 – MALHA DE CONTROLE DE NÍVEL DO DESAERADOR

A)- Coleta dos dados:

Tabela 4 - Coleta de Dados LIC100

HORA	LIC100 PV	LIC100 SP	LIC100 MV	LIC100 Kp	LIC100 Ti	LIC100 Td	LIC100 A/M
00:00:01	69,61	70,00	57,36	3,500	0,8	0	1,000
00:00:11	69,09	70,00	59,84	3,500	0,8	0	1,000
00:00:21	67,07	70,00	67,85	3,500	0,8	0	1,000
00:00:31	67,59	70,00	64,53	3,500	0,8	0	1,000
00:00:41	68,68	70,00	62,55	3,500	0,8	0	1,000
00:00:51	68,66	70,00	62,71	3,500	0,8	0	1,000

Nota: Seleção A/M: 1- Automático, 0 - Manual

Trata-se de malha simples de realimentação;

As variáveis selecionadas para amostragem conforme tabela;

A amostragem foi colhida nas instalações do cliente, aproveitando o comportamento dinâmico de cada malha, em malha fechada, sem provocar distúrbios indesejáveis;

O intervalo de tempo da amostragem é de 10 seg. – limite imposto pela memória disponível para o banco de dados.

O armazenamento foi realizado em base de dados, via OPC, com hora/min/seg, totalizando 08h30min de amostragem por dia de operação.

B)- Identificação

A identificação é realizada utilizando o modelo com ordem 10, conforme previsto no método adotado.

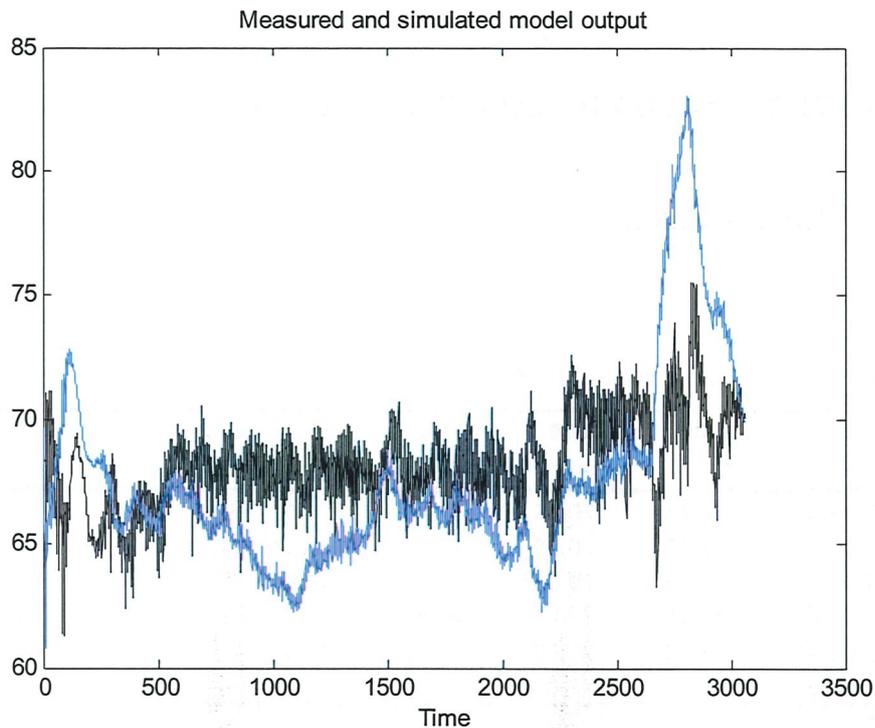


Figura 17 – LIC100 - Modelo estimado (azul) x Modelo real (preto)

A identificação atingiu FIT de - 100,9 %, ou seja, ela não é válida.

O teste de diversas amostras mostrou resultado similar.

Neste caso a identificação não ocorreu.

Conclusão do TESTE 3:

Após análise dos dados concluímos que a possível causa da não identificação seja devido a pequena variação da PV em torno do SP, ou seja, mais ou menos 5% em torno de 66%, promova um distúrbio insuficiente para que o método adotado seja validado.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O método adotado se revelou viável visto ter conseguido obter um modelamento necessário para uma das malhas modeladas.

Para as duas outras malhas analisadas a identificação mostrou-se deficiente, porém, uma análise dos gráficos, mostra que houve uma tendência de acompanhamento dos resultados teóricos e práticos indicando que o procedimento de modelagem e de utilização dos recursos computacionais, ou aprimoramento dos mesmos com os recursos utilizados, ou então com variações nas metodologias de modelagem, poderão permitir melhores resultados.

6 CONCLUSÕES

Como estudo de caso real, este trabalho apresentou a base de conhecimento sobre caldeira a bagaço e seu controle, essencial para entender a utilidade do modelamento das suas malhas de controle, atendendo a necessidade de melhoria do conhecimento do seu comportamento real, visando obter uma melhoria no desempenho da caldeira.

Este trabalho exemplificou o uso sobre um caso real, da utilização pratica bem sucedida, de uma ferramenta computacional aplicada à identificação de sistemas, como alternativa para o usuário de um sistema de instrumentação e controle que utilize qualquer tecnologia de chão de fábrica com aquisição de dados via OPC, mostrando a viabilidade da aquisição de dados, armazenamento e posterior modelamento das suas malhas de controle, sem interferência no processo.

Finalmente, o objetivo deste trabalho foi alcançado, pois foi realizada a identificação paramétrica de uma malha fechada de controle de caldeira a bagaço a partir de dados armazenados em base de dados, coletados em tempo real. Neste caso, foi verificado que o modelo ARX, componente da ferramenta, trabalhou eficientemente as variações do sistema físico presentes nos dados coletados.

Conforme dito na análise dos resultados a melhoria do método e da ferramenta adotados pode propiciar um recurso importante para a sintonia das malhas de controle de caldeiras a partir da aquisição de dados em tempo real. Pode-se ainda considerar, como conclusivo, que a mudança dos recursos para a modelagem aliada a outros procedimentos de amostragem dos sinais das variáveis das malhas de controle poderia melhorar a tendência de bons resultados

para as duas malhas com deficiência nos resultados.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à possibilidade de modelar sistemas reais, apresentada pela ferramenta, pode-se fazer sugestões para trabalhos futuros nesta linha:

- Ampliar o uso da ferramenta para outras malhas de controle de caldeiras a bagaço;
- Ampliar o uso da ferramenta para outras malhas de controle de usina de açúcar e etanol;
- Aperfeiçoar o método de coleta de dados para incluir dados obtidos durante outras fases do funcionamento da caldeira, por exemplo, durante a partida da caldeira, quando são feitos os testes de carga da caldeira, visto que nesta fase as variações são bem maiores, para então modelar o sistema;
- Aperfeiçoar a ferramenta de forma a obter o melhor modelo estimado possível de forma a aplicar o modelo estimado em ferramenta de sintonia, visando a melhoria das malhas de controle da caldeira e como consequência alcançar melhoria do desempenho da própria caldeira.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L.A. (2004). **Introdução a identificação de sistemas, técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais**. 2.ed. Belo Horizonte: Ed.UFMG.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (1964). **Test code for steam generating units - PTC4.1**. New York.
- ANG, K.H.; CHONG, G.; LI, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. **IEEE Transaction on Control Systems Technology**, New York, v.13, n.4, p.559-576, July.
- ASTRÖM, K.J.; HÄGGLUND, T. (1984). Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. **Automatica**, New York, v.20, n.5, p.645-651, Sept.
- ASTRÖM, K.J.; HÄGGLUND, T. (2001). The Future of PID control. **Control Engineering Practice**, v.9, n.11, p.1163-1175, Nov.
- ASTRÖM, K.J.; HÄGGLUND, T. (1995). **PID controllers: theory, design and tuning**. 2nded. Research Triangle Park: International Society for Measurement and Control.
- BABCOCK AND WILCOX COMPANY (1955). **Steam - its generation and use**. 37thed. New York.
- BEGA, E.A. (1989). **Caldeiras - instrumentação e controle**. Rio de Janeiro: JR.
- BERGE, J. (2001). **Fieldbuses for process control: engineering, operation and maintenance**. Research Triangle Park: ISA.
- BIOCOMBUSTÍVEIS. (2004). **Cadernos NAE**, Brasília, n.2, jul.
- BIOETANOL de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. (2008). Organizado por BNDES e CGEE. Rio de Janeiro: BNDES.
- BRANDÃO, D. (2005). **Ferramenta de simulação para projeto, avaliação e ensino de redes fieldbus**. 151f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- CASSIOLATO, C.; TORRES, L.H.B.; CAMARGO, P.R. (2006). **Profibus: descrição técnica**. São Paulo: Associação PROFIBUS Brasil.

CAON JÚNIOR, J.R. (1999). **Controladores PID industriais com sintonia automática por realimentação a relê**. 97p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999

COELHO, A.A.R.; COELHO, L.S. (2004). **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Florianópolis: Ed.UFSC.

CORETTI, J.R.; PESSA, R. (2008). **Instrumentação para caldeiras – Manual de treinamento**. [S.l.:s.n.]. Documento interno SMAR.

CUNHA, M.J. (2004). **Desenvolvimento e implementação de uma ferramenta computacional aplicada no processo de identificação de sistemas em ambientes Fieldbus Foundation**. 81p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DE MELLO, F.P. (1991). Boiler models for system dynamic performance studies. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v.6, n.1, p.66-74, Feb.

DESBOROUGH, L.; MILLER, R. (2001). Increasing customer value of industrial control performance monitoring - honeywell's experience. In: CHEMICAL PROCESS CONTROL, 6., 2001, Tucson. **Proceedings...** Madison: University of Wisconsin. p.153-185.

DUKELOW, S.G. (1986). **The Control of boilers**. Boston: Instrument Society of América.

FERNANDES JUNIOR, R.F.; BRANDÃO, D. (2008). **Método de identificação de sistemas industriais com controladores PI em malha fechada**. Poços de Caldas: INDUSCON.

FOUNDATION FIELDBUS (2003a). **Foundation specification system architecture FF-581**: revision FS1.3, October. Austin.

FOUNDATION FIELDBUS (2003b). **Foundation specification function block application process – part 1**- FF-890, revision FS1.6, October. Austin.

FOUNDATION FIELDBUS (2003c). **Foundation specification function block application process – part 2** - FF-891, revision FS1.6, October. Austin.

HUGOT, E. (1977). **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Mestre Jou.

LIPTAK, B.G. (1995). **Instrument engineers' handbook – process control**. 3th.ed. Radnor: Chilton Book.

LJUNG, L. (1999). **System identification – theory for the user**. 2nded. Englewood: Prentice Hall.

LORENZI, O. (Ed.). **Combustion engineering: a reference book on fuel burning and steam generation**. New York: Combustion Engineering, 1953.

- MIRANDA, F.C.P.R. (2005). **Identificação de sistemas em malha fechada usando controlador preditivo multivariável: um caso industrial**. 99p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- MOLLENKAMP, R.A. (1988). **Controle automático de processos**. Tradução de José Tozzi. São Paulo: EBRAS.
- OPC FOUNDATION (2006). **Especification OPC**. Disponível em:<www.opcfoundation.org>. Acesso em: 26 July 2007.
- PERA, H. (1966). **Geradores de vapor de água (caldeiras)**. São Paulo: USP/EP/Departamento de Engenharia Mecânica.
- PROCESSOS industriais. [198-?]. São Paulo: SENAI.
- REEVES, W.L. (2001). Maintaining boiler safety. **Plant Engineering**, Streamwood, v.55,n.4, p.32-38, Apr.
- RIBEIRO, P.R. (1999). **A Usina de açúcar e sua automação**. [S.l.:s.n.]. Documento interno SMAR.
- RIVERA, D.E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. (1986). Internal model control: PID controller design. **Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development**, Easton, v.25, n.1, p.252-265, Jan.
- SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS [1998?]. **System 302**. Sertãozinho.
- SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS (2007). **Function blocks instruction manual**. Sertãozinho.
- SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS (2008). **System 302 automação empresarial**. Sertãozinho.
- SOUZA, Z.J.; AZEVEDO, P.F. (2006). Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v.44, n.2, p.179-199, abr./jun.
- ZHUANG, M.; ATHERTON, D.P. (1993). Automatic tuning of optimum PID controllers. **IEEE Proceedings – D, Control Theory and applications**, New York, v.140, n.3, p.216-224, May.
- ZIEGLER, J.G.; NICHOLS, N.B. (1995). Optimum settings for automatic controllers. **InTech**, Research Triangle Park, v. 42, n. 6, p.94-100, June.

ANEXO A – IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Este anexo apresenta uma síntese de resultados parciais da equipe de pesquisa sobre a ferramenta de identificação de processos industriais utilizada, com destaque para a pesquisa de Fernandes Junior (em fase de elaboração)¹.

3.1 Identificação de Sistemas

A identificação de sistemas realizada de forma experimental consiste na coleta dos sinais de entrada $u(k)$ e sinais de saída real $y(k)$ do sistema a ser identificado onde k representa o parâmetro de tempo discreto. Então, é estimado um modelo matemático baseado nos dados coletados, que representará o comportamento do sistema. O resultado da modelagem será uma função de transferência contínua ou discreta (LJUNG, 1999).

Para isso, diferentes procedimentos existem para geração destes sinais de entrada, coleta e armazenamento dos sinais de saída e estimação do modelo. Cada um destes procedimentos se aplica de forma mais satisfatória na identificação de um ou outro sistema e a decisão do melhor caminho dependerá do conhecimento a priori do sistema a ser abordado. Na seqüência será feita uma breve descrição destes procedimentos existentes.

No contexto de coleta e armazenamento de dados, CUNHA (2004) classifica a modelagem de identificação de sistemas em:

¹FERNANDES JUNIOR, R. F. Tele—sintonia de controladores industriais utilizando tecnologia CyberOPC. A ser editado pela USP, 2009

- *Identificação off-line*: excita-se o processo com sinais de teste apropriados e armazenam-se as medidas de entrada e saída do ensaio de identificação para estimação posterior dos parâmetros do modelo. Neste caso, necessita-se de coleta de dados e memória para armazenamento de dados, pois o cálculo dos parâmetros será realizado após o ensaio. Dentre as técnicas de modelagem off-line podem ser destacadas: resposta em frequência, resposta temporal e identificação paramétrica.

- *Identificação on-line*: diferencia-se do tipo anterior pelo fato de ser um procedimento iterativo em que o cálculo dos parâmetros é feito simultaneamente ao ensaio de identificação. Não há necessidade de coleta de dados como no método anterior e métodos recursivos são empregados para atualização dos parâmetros da função de transferência, a cada período de amostragem da identificação. A identificação segue até a convergência dos parâmetros estimados. Para as técnicas de modelagem on-line são destaque: a identificação paramétrica usando mínimos quadrados recursivo, variáveis instrumentais, redes neurais artificiais entre outras.

No contexto da disposição das malhas de controle surge a questão sobre qual a melhor forma de se identificar um sistema: se a malha de controle deve permanecer fechada ou se deve ser aberta. No passado, a identificação em malha fechada era vista como algo que deveria ser evitado em virtude dos problemas de instabilidade e segurança da planta. Atualmente, os estudos de controle robusto para modelos mais avançados como MPCs trouxeram novas abordagens e vantagens entre os sistemas de malha fechada frente ao malha aberta.

MIRANDA (2005) aponta as seguintes considerações entre as opções de malha aberta e malha fechada:

- Testes industriais em malha aberta deixam a operação exposta a distúrbios ao processo que podem levar a produtos fora de especificação. Testes em malha fechada são mais fáceis de serem realizados, já que a ação manual pode ser praticamente eliminada.
- A ação de realimentação tem a propriedade de reduzir as variações do processo e de permitir que sinais de maior amplitude sejam inseridos no processo sem aumentar a potência de saída, o que torna o sistema em malha fechada preferível em sistemas com restrições na saída.
- Testes em malha aberta podem despertar não-linearidades, o que pode levar a modelos não adequados para a região normal de operação.

No contexto do modelo dinâmico do sistema, ASTRÖM e HÄGGLUND, (1995) os classifica em sistemas regulatórios e sistemas não regulatórios ou integradores. Cada um destes sistemas terá características distintas de sintonia.

No sistema *regulatório* o processo se estabiliza mesmo sem um controlador. A saída sempre estabiliza em um novo valor após uma mudança na entrada. Segundo ASTRÖM e HÄGGLUND, (1995) a grande maioria dos sistemas industriais são regulatórios. Exemplos deste tipo são sistemas de temperatura, de vazão, pH e pressão. Ele é geralmente representado por um modelo de primeira ordem mais tempo morto FOPDT (First order plus dead time):

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (5)$$

Onde, ganho estático (k_p) – determina a sensibilidade do processo a uma mudança na entrada.

Constante de tempo (τ) – Mede a velocidade em que a PV atingirá seu valor final.

Tempo morto (θ) – tempo necessário para a PV começar a mudar, devido a uma

mudança na MV.

No sistema *não regulatório*, ou sistema integrador, o processo aumenta ou diminui o seu valor indefinidamente, ao mudar o sinal de controle. Exemplos desse tipo de sistema podem ser: controle de posição e controle de nível. No controle de nível, por exemplo, aumentando a vazão de entrada, o nível subirá constantemente até transbordar desde que a vazão de saída seja constante.

ASTRÖM e HÄGGLUND, (1995) ainda relatam que uma grande parte dos processos regulatórios com controladores PID pode ser representada pelo modelo de três parâmetros (FOPDT), como em (5). O modelo FOPDT é bastante estudado na literatura como nos trabalhos de ZHUANG e ATHERTON, 1993 ; HANG et.al, 1994, ZHI e JINGLING, 1997, ANG et.al. 2005, entre outros.

Neste trabalho, será abordada a identificação de sistemas no modelo de FOPDT que representa uma grande porcentagem de malhas industriais e uma sólida literatura sobre estes sistemas. Também será feita a identificação em malha fechada por ser uma tendência em sintonia em não perturbação do sistema principalmente na identificação online.

3.1.1 Etapas de identificação

AGUIRRE (2004) divide o processo de identificação em quatro etapas:

- testes dinâmicos e as coletas de dados.
- escolha do modelo matemático que representará o sistema.
- estimação do modelo.
- validação da estimação.

Caso não se obtenha um resultado esperado, são feitas novas estimações até que o modelo seja validado. Abaixo são detalhadas cada uma destas etapas.

Testes dinâmicos e aquisição de dados

Nesta fase são obtidos os dados do processo de identificação. Muitas vezes estes dados são oriundos da operação normal do sistema. Outras vezes, é necessário excitar o sistema para obter as respostas dinâmicas. Alguns pontos importantes nesta etapa são a determinação no sinal de excitação (forma e tamanho do sinal de entrada gerado) e a taxa de amostragem.

Como visto no capítulo 2, o sinal de excitação pode ser de resposta em frequência ou resposta a degrau. Nesta seção será escolhida a excitação por resposta a degrau pois a abordagem é no domínio do tempo. Este caso consiste em aplicar uma variação do tipo degrau na entrada do processo armazenando-se os dados da saída conseqüente. Além do sinal do tipo degrau podem ser aplicados, também, outros sinais determinístico como pulsos, rampas e PRBS (sinais binários pseudo-randômicos). Esta curva de reação obtida é submetida a técnicas gráficas ou numéricas para estimação do modelo do processo. Como o sinal degrau é um sinal com pobre composição freqüencial, este método se aplica para processos de ordens inferiores (primeira e segunda ordem) (ASTROM e HAGLUNG , 1995)

Na identificação em malha aberta as perturbações geralmente costumam ser introduzidas na variável manipulada (MV), ou seja, na saída do controlador com este configurado para operar no modo manual. Já a identificação em malha fechada, a perturbação é introduzida no setpoint (SP) do controlador ou através de mudanças na saída do processo devido à mudança de carga. Vantagem esta que a identificação malha fechada tem sobre malha aberta, pois o processo pode ser mantido em controle durante todo o tempo do experimento. Porém, este procedimento pode não garantir um experimento suficientemente informativo, pois o controlador pode não movimentar a MV tanto quanto desejável. Sendo assim, é necessário verificar previamente alguns parâmetros do controlador como os limites operacionais das manipuladas e das controladas (MIRANDA, 2005).

Outro ponto importante na identificação consiste na determinação da taxa de amostragem. Para que um sinal amostrado retenha algumas das características fundamentais do sinal original, é necessário que o tempo de amostragem seja suficientemente curto. Na prática, a frequência de amostragem é escolhida entre 5 a 10 vezes maior do que a maior frequência de interesse contida nos dados (AGUIRRE, 2004). Para aplicações de controle remotas, a taxa de amostragem pode ser variável, e confronta com a estrutura de controle discreto convencional que pressupõe taxas de amostragem fixas (YANG et al., 2005).

Para o trabalho em questão, a tecnologia OPC não traz uma atualização de dados rápida sendo, em média, da ordem de segundos. Isto reduz o escopo do trabalho a sistemas mais lentos com constantes de tempo e tempo morto da ordem de 5 a 10 vezes o tempo de aquisição do OPC. Portanto, a estratégia a ser utilizada é anexar em cada amostra o tempo de amostragem de cada informação. Com isso sempre será utilizado o tempo medido obtendo assim uma taxa real para cada identificação realizada. Para a comunicação remota, a utilização do CyberOPC assegura que existirá uma aquisição de dados constante do lado do controle e com seqüenciamento de pacotes, assegurando um determinismo da informação obtida pelo cliente remoto.

Ainda no contexto da coleta de dados, em qualquer experimento real haverá ruído. Segundo AGUIRRE, (2004) em muitas situações o ruído pode ser desprezado quando a relação sinal ruído for bastante grande. Uma forma comum de reduzir os efeitos do ruído no sinal de entrada é utilizando a média dos dados através de filtro passa baixa da forma:

$$Y_{Filter} = \frac{1}{T_{Filter} * s + 1} \quad (6)$$

No fieldbus os blocos de entrada analógica e o bloco PID padrão possuem filtro de primeira ordem como mostrado em (6). Neste trabalho será utilizado o filtro de primeira ordem do fieldbus para atenuação do ruído.

Escolha do modelo matemático

Nesta etapa é escolhida a representação matemática que será utilizada para representação do sistema real. Dentre estas, podem ser citados os modelos lineares polinomiais ARX (modelo auto-regressivo com entradas externas) e ARMAX (modelo auto-regressivo com media móvel e entradas exógenas), funções de transferência no tempo contínuo, entre outros. Para realizar esta escolha, é necessário ter um conhecimento a priori do sistema a ser identificado (AGUIRRE, 2004).

Um exemplo de modelo linear polinomial (ARX) é descrito pela equação diferença:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + \dots + a_{na} y(k-na) + b_1 u(k-1) + b_{nb} u(k-nb) \quad (7)$$

Onde, $u(k)$ e $y(k)$ são os sinais de entrada e saída do sistema, a e b são os parâmetros do sistema a ser identificado, na e nb são as ordens dos polinômios, e k o número de amostras.

Este modelo pode ser representado da seguinte forma:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n \varphi_i^T(k) \theta_i + e(k) \quad (8)$$

$$\varphi = [y(k-1), y(k-2), y(k-na), u(k-1), u(k-2), u(k-nb)] \quad (9)$$

onde, φ - definido como o vetor de regressores contendo os valores de entradas $u(k)$ e saídas $y(k)$ do sistema.

na e nb - representam a quantidade de regressores que estão associadas à ordem da equação.

θ - o vetor de parâmetros estimados de acordo com a estrutura escolhida

$e(k)$ - o erro de predição, ou seja, a diferença entre a resposta estimada e resposta real.

Ao final da escolha da representação a ser utilizada devem ser determinados a quantidade de pólos e zeros e o atraso puro do sistema quando se tratar de sistemas lineares (CUNHA, 2004).

Identificação paramétrica

Na fase de estimação paramétrica são estimados os parâmetros da estrutura matemática escolhida que representará o comportamento do sistema dinâmico a ser identificado. Para um sistema SISO (Single Input Single Output) o algoritmo dos mínimos quadrados (MQ) é o método mais clássico para determinar os parâmetros θ a cada amostra $y(k)$ e $u(k)$ no modelo definido em (8). O MQ é a base para muitas outras técnicas de identificação (LJUNG, 1999).

O método dos mínimos quadrados possui duas variantes de formulação: o caso não recursivo (MQ) e recursivo (MQR) que podem ser representados pela estimação off-line e on-line. Abaixo segue a descrição dos dois métodos.

Inicialmente, considere a equação (8) na forma da equação diferença mostrada em (7). Considerando que seja aplicada uma entrada $u(k)$ variante no tempo desde o tempo zero ($k = 1$) até o tempo T ($k = N$), e considerando $n=na=nb$ a ordem do sistema a ser identificado. Podem-se agrupar os dados das leituras em um vetor de saídas Y e uma matriz Ψ com os valores passados de saída e entrada. Têm-se então um sistema matricial:

$$Y = \Psi \Theta + E \quad (10)$$

Onde Y é o vetor de saídas com dimensão $N \times 1$ com N igual ao número de amostras coletadas. Ψ é o vetor com as saídas e entradas passadas e tem dimensão $N \times 2n$. O vetor θ com dimensão $N \times 1$ tem os coeficientes desejados para a identificação. Então para um sistema de ordem $n=na=nb$, tem-se:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + \dots + a_{na} y(k-na) + b_1 u(k-1) + b_{nb} u(k-nb) \quad (11)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \dots \\ y(N) \end{bmatrix} \quad \Psi = \begin{bmatrix} y(n-1) & \dots & y(0) & u(n-1) & \dots & u(0) \\ y(n) & \dots & y(1) & u(n) & \dots & u(1) \\ \dots & & & & & \\ y(N-1) & \dots & y(N-n) & u(N-1) \dots u(N-n) \end{bmatrix} \quad \Theta = \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_{na} \\ b_1 \\ \dots \\ b_{nb} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n+1) \\ \dots \\ e(N) \end{bmatrix} \quad (12)$$

O que se deseja calcular é o vetor Θ sendo que se tem Y e Ψ . Tendo assim um problema de otimização que procura determinar Θ de forma que se minimize o somatório do quadrado de $e(k)$. Definindo-se a função J como erro quadrático médio, tem-se:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^N e(k)^2 = \frac{1}{2} E^T E \quad (13)$$

Então, calcula-se a derivada primeira de J e iguala a zero, obtendo:

$$\Theta = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T Y \quad (14)$$

A operação de (14) é realizada uma vez ao final da coleta dos dados e da montagem das matrizes Ψ e Y , caracterizando assim o processamento offline.

Já no método dos mínimos quadrados recursivo (MQR), os parâmetros são calculados recursivamente no tempo. Isto significa que quando houver uma estimativa de $\hat{\theta}(k-1)$ baseada em dados no instante $k-1$, então, $\hat{\theta}(k)$ será calculada a partir de $\hat{\theta}(k-1)$. Deste modo, a resposta atual do algoritmo será uma previsão baseada em parâmetros processados pela planta, com o sistema em funcionamento, caracterizando o processamento online (CUNHA, 2004).

Para o detalhamento do método, recorre-se à consideração do modelo definido em (8).

A estimativa do vetor de parâmetros θ pelo critério MQR pode ser calculada como no método MQ citado anteriormente:

$$\hat{\theta}(k) = [\phi(k)^T \phi(k)]^{-1} \phi(k)^T Y \quad (15)$$

$$\hat{\theta}(k) = \left[\sum_{i=1}^k \varphi(i) \varphi(i)^T \right]^{-1} \sum_{i=1}^k \varphi(i) y(i)$$

e,

$$\phi(k) = \begin{bmatrix} \varphi_{1 \times n}^T(1) \\ \varphi_{1 \times n}^T(2) \\ \dots \\ \varphi_{1 \times n}^T(k) \end{bmatrix} \quad \phi(k+1) = \begin{bmatrix} \varphi_{1 \times n}^T(1) \\ \varphi_{1 \times n}^T(2) \\ \dots \\ \varphi_{1 \times n}^T(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(k) \\ \varphi^T(k+1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde n é igual ao número de parâmetros do modelo a ser identificado.

Entretanto, deve-se encontrar uma maneira de atualizar a matriz $\hat{\theta}$ sem que seja necessário o cálculo da inversa de $\phi^T \phi$ a cada iteração do método. Para isso, introduz-se a matriz de covariância P :

$$P(k) = [\phi^T \phi]^{-1} = \left[\sum_{i=1}^k \varphi(i) \varphi^T(i) \right]^{-1} \quad (17)$$

e,

$$P^{-1}(k) = P^{-1}(k-1) + \varphi(k) \varphi^T(k) \quad (18)$$

então,

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= P(k) * \left[\sum_{i=1}^{k-1} [\varphi(i) y(i)] + \varphi(k) \varphi^T(k) \right] \\ \hat{\theta}(k) &= P(k) * \left[P^{-1}(k-1) \hat{\theta}(k-1) + \varphi(k) \varphi^T(k) \right] \quad (19) \\ \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + P(k) \varphi(k) * \left[y(k) + \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1) \right] \end{aligned}$$

Chega-se assim às equações fundamentais que compõem o método recursivo:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{1 \times 1}(k) &= y(k) - \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1) \\
 K_{n \times 1}(k) &= P(k) \varphi(k) \\
 \hat{\theta}_{n \times 1}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + K(k) \varepsilon(k)
 \end{aligned} \tag{20}$$

Nestas equações, $\varepsilon(k)$ é o erro de predição, que é a diferença entre a saída medida e a saída do modelo predito baseada nos parâmetros do instante $k-1$. O vetor $K(k)$ é o ganho de Kalman (LJUNG, 1999). A matriz P é denominada matriz de covariância e tem atualização conforme a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 P(k) &= P(k-1) - \frac{P(k-1) \varphi(k) \varphi^T(k) P(k-1)}{1 + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)} \\
 K(k) &= \frac{P(k-1) \varphi(k)}{1 + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)}
 \end{aligned} \tag{21}$$

O erro de previsão torna-se zero quando $\hat{\theta} \rightarrow \theta$. A medida da qualidade do estimador pode ser inferida a partir da magnitude dos elementos da diagonal principal da matriz P , denominada como matriz de covariância do estimador.

Validação do modelo

Nesta fase é verificado se realmente o sistema estimado possui as características de interesse do sistema original. Esta fase é muito subjetiva e dependerá dos critérios de validação para as aplicações desejadas para o modelo.

CUNHA, (2004) cita como formas de validação do modelo o teste cruzado onde são utilizadas duas séries diferentes de dados, e estimam-se parâmetros para o primeiro conjunto. Então são calculados os valores estimados da saída do segundo conjunto baseado na estimação prévia feita pelo primeiro.