

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E ESTATÍSTICA**

**ABORDAGEM PARA A AUTOMAÇÃO EM UMA USINA AÇUCAREIRA**

**Dissertação Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a  
Obtenção do Grau de Mestre em Ciência da Computação**

**RENÉ CRUZ GUERRERO**

**Florianópolis, agosto de 1999**

# ABORDAGEM PARA A AUTOMAÇÃO EM UMA USINA AÇUCAREIRA

**RENÉ CRUZ GUERRERO**

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de

**Mestre em Ciência da Computação**

e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação



Prof. João Bosco da Mota Alves, Dr.  
Orientador



Prof. Dr. Jorge Múñiz Barreto, Dr.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação  
em Ciência da Computação

## Banca examinadora



Prof. João Bosco da Mota Alves, Dr.  
Presidente



Prof. Luiz Fernando Jacintho Maia, Dr.



Czesław Lubomiro Barczak, Dr.

A todos aquellos que luchan, no importa donde, con tal de que se mantenga siempre viva la esperanza de un hermoso porvenir.

A mi linda tierra y su pueblo heróico que hacen del sacrificio, el trabajo y el amor, un canto al futuro.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor João Bosco da Mota Alves, pela sua orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Luiz Fernando Jacintho Maia e ao doutor Czeslau Lubomiro Barczak, pela sua participação na banca examinadora e pelas contribuições ao trabalho.

À minha família e companheiros de trabalho, em especial à Odalys, Acuña e Cardentey, pela consecução de informação e a sua colaboração à distância, dando-me a tranquilidade de saber que em Cuba tinha todo o apoio, sempre que fosse preciso.

Ao engenheiro Antonio José Hernández Fonseca, pela sua orientação técnica e valiosos conhecimentos do processo açucareiro transmitidos.

A Miguel e Cleber pela sua orientação técnica na execução deste projeto e em geral à Escola Técnica Federal de Pelotas pela informação técnica fornecida.

A Edson e demais companheiros do grupo de eletrônica e automação da Escola Técnica Federal de Santa Catarina pela sua colaboração no trabalho.

À Mafalda e família, pelo seu apoio moral e hospitalidade.

Aos amigos peruanos, Carlos, Miguel e Ciro, pela informação técnica fornecida.

A Alejandrina pela a sua atenção constante e cuidado a minhas princesinhas do Caribe, Tania e Tamara.

A Alexandra pelo seu empenho e ajuda determinante na execução deste trabalho.

Aos meus companheiros e amigos por estar do meu lado nos momentos difíceis desta jornada.

A direção e companheiros do curso de computação e a toda Universidade, os quais propiciaram um bom ambiente de trabalho, por meio de seus recursos e infra-estrutura.

A todos os que me apoiaram e me incentivaram nesta jornada.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Ao governo e povo brasileiro pela solidariedade latinoamericana, hospitalidade e irmandade recebidos.

## RESUMO

Universidade Federal de Santa Catarina, e especificamente o laboratório de Experimentação remota, cientes da necessidade da automação nos tempos moderno, traçou-se como objetivo neste trabalho, indicar uma proposta para automação do processo açucareiro em um engenho de açúcar automatizando o seu equipamento principal, a caldeira.

Nesta proposta são apresentados os laços de controle para automatizar o processo da combustão e o controle de intertravamento. Em relação ao controle do nível de água, considera-se que os laços de controle existentes para tal fim cumprem adequadamente a sua função de manter este nível 50 mm por embaixo do nível médio do domo superior da caldeira, não precisando aprofundar nesta parte.

O laço do controle da combustão proposto utiliza o oxigênio dos gases liberados à atmosfera como parâmetro que intervém na regulação do processo da combustão e faz continuamente a correção da pressão de vapor, otimizando assim a quantidade de entrada de ar e de combustível.

O laço de controle de intertravamento proposto atua sobre o sistema mecânico da caldeira controlando o acendido, o apagado e seu funcionamento normal, e dispõe de aplicações para interagir com o usuário, permitindo-o visualizar o estado do processo em pleno funcionamento, configurar os tempos do processo mecânico e registrar informação do mesmo processo.

Os resultados obtidos mediante uma simulação feita à malha do controle da combustão, utilizando o programa SIMULINK, demonstraram a aplicabilidade e vantagens da implementação dos laços de controle propostos, já que eles melhoram a eficiência e seguridade do processo açucareiro, e em conseqüência, do engenho todo.

## ABSTRACT

The remote Experiments Laboratory of the Federal University of Santa Catarina, aware of the necessity of automation in modern times, in this work has put forward a proposal on the automation of the sugar-making process in a sugar-mill, automatizing its main equipment: the cauldron.

In this proposal, the control lacings to automatize the combustion process and the interlocking control lacings have been working well. They keep the water level 50 mm below the average level of the superior dome within the cauldron, so we have decided there is no need to emphasize this subject.

The propose de combustion control lacing makes use of the oxygen from the gases released to the atmosphere. This parameter interferes in the combustion process regulation and continually corrects the steam pressure, optimizing the fuel and air input.

The propose interlocking control lacing controls the mechanical system of the cauldron, controlling the "On" and the "Off" its normal operation. It has devices that interact with the user, displaying the process status while it is on operation, letting the user visualize the status, configure the mechanical process times and register the process information.

The result obtained from a simulation on the combustion control mesh, using the SIMULINK program, demonstrate the application and advantages of the implementation of the control lacing, since they improve the efficiency and security of the sugar-making process and, consequently, the efficiency of the whole sugar-mill.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 RECURSOS UTILIZADOS .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 SISTEMAS DE CONTROLE (MORAES, 1996) .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 SISTEMAS DEDICADOS (MORAES, 1996)3.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3 SISTEMAS EM TEMPO REAL (MORAES, 1996)3.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTROLADORES .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5 PROCESSOS DE FLUXO (CURSIO, 1995) .....</b>	<b>16</b>
2.5.1 A válvula pneumática .....	17
2.5.2 Controladores para processos de fluxo.....	21
<b>2.6 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE SINAIS (BLANK, 1996).....</b>	<b>21</b>
2.6.1 Sistemas de medição .....	22
2.6.2 Tipos de transdutores.....	22
2.6.3 Módulos dos sistemas de aquisição de sinais .....	24
2.6.4 Fontes de erro em medições automatizadas.....	27
2.6.5 Especificação de sistemas de aquisição de sinais .....	28
<b>3. O PROCESSO AÇUCAREIRO.....</b>	<b>30</b>
3.1 TRANSFORMAÇÃO DO BAGAÇO.....	30
3.2 TRANSFORMAÇÃO DO GUARAPO .....	31
<b>4. A CALDEIRA.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 CICLO RANKINE DE POTÊNCIA DE VAPOR .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 O GERADOR DE VAPOR.....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 CLASSIFICAÇÃO DAS CALDEIRAS .....</b>	<b>38</b>
4.3.1 De acordo com a pressão.....	38
4.3.2 De acordo com o conteúdo dos tubos.....	38
4.3.3 De acordo com o tipo de combustível.....	41
<b>4.4 PARTES INTEGRANTES DA CALDEIRA.....</b>	<b>41</b>
<b>4.5 PROCESSO DE VAPORIZAÇÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>4.6 PROCESSO DE COMBUSTÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>4.7 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES .....</b>	<b>47</b>
4.7.1 Os combustíveis.....	47
4.7.2 O poder calorífico .....	49
4.7.3 Perdas e rendimento térmico.....	52
<b>5. CONTROLES DA CALDEIRA.....</b>	<b>55</b>
<b>5.1 OBJETIVOS DO CONTROLE.....</b>	<b>55</b>
<b>5.2 INSTRUMENTAÇÃO .....</b>	<b>56</b>



<b>5.3 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTROLES</b> .....	<b>58</b>
5.3.1 De acordo com a execução .....	58
5.3.2 De acordo com o sinal .....	59
5.3.3 De acordo com o processamento de informação .....	59
5.3.4 De acordo com os atuadores .....	59
5.3.5 De acordo com a tarefa .....	60
<b>5.4 CONTROLES DE FUNCIONAMENTO EM LINHA</b> .....	<b>60</b>
5.4.1 Controle do processo de combustão .....	60
5.4.2 Controle da alimentação da água .....	63
5.4.3 Controle da pressão do lar .....	64
5.4.4 Controle da temperatura de vapor .....	64
5.4.5 Controle da qualidade da água .....	65
<b>5.5 CONTROLE DE INTERTRAVAMENTO</b> .....	<b>65</b>
<b>6. PROJETO DE CONTROLE</b> .....	<b>66</b>
<b>6.1 CONTROLE DE PROCESSOS</b> .....	<b>66</b>
<b>6.2 AQUITETURA DO PROJETO</b> .....	<b>66</b>
<b>6.3 FATORES QUE INTERVÊM NO PROCESSO</b> .....	<b>69</b>
<b>6.4 CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO</b> .....	<b>73</b>
6.4.1 Utilização de um CLP ou circuito eletrônico .....	73
6.4.2 Otimização da eficiência .....	73
6.4.3 Outros controles .....	74
<b>6.5 CONTROLE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO</b> .....	<b>75</b>
6.5.1 A malha de controle .....	75
6.5.2 Simulação da malha .....	80
6.5.3 Especificação dos equipamentos e instrumentos .....	82
<b>6.6 CONTROLE DO INTERTRAVAMENTO</b> .....	<b>83</b>
6.6.1 Eleição da tecnologia .....	83
6.6.2 Sistema digital de processamento .....	85
6.6.3 Interfaces .....	92
6.6.4 Circuito amplificador do sensor de chama .....	94
6.6.5 A malha de controle .....	95
<b>7. CONTROLADOR DE INTERTRAVAMENTO</b> .....	<b>99</b>
<b>7.1 NECESSIDADE DO CONTROLADOR</b> .....	<b>99</b>
<b>7.2 EQUIPAMENTOS A CONTROLAR</b> .....	<b>101</b>
7.2.1 Motor do queimador .....	101
7.2.2 Modulador .....	101
7.2.3 Válvula principal de combustível .....	102
7.2.4 Válvula piloto de combustível .....	102
7.2.5 Transformador de ignição .....	103
<b>7.3 DETECTORES E SENSORES</b> .....	<b>103</b>
7.3.1 Detectores de limite .....	103
7.3.2 Detectores de funcionamento .....	103
<b>7.4 TAREFAS DO CONTROLADOR</b> .....	<b>105</b>
7.4.1 Verificação de limites .....	105
7.4.2 Execução da seqüência .....	106
7.4.3 Verificação do funcionamento .....	107
<b>7.5 CONTROLE DO SISTEMA MECÂNICO</b> .....	<b>108</b>

7.5.1	Prepurga .....	108
7.5.2	Ignição chama piloto.....	109
7.5.3	Chama piloto – chama principal.....	110
7.5.4	Estabelecimento da chama principal.....	111
7.5.5	Plena operação .....	112
7.5.6	Postpurga.....	112
<b>7.6</b>	<b>CIRCUITO DE CONTROLE .....</b>	<b>113</b>
<b>8.</b>	<b>A CALDEIRA NOS ENGENHOS DE AÇÚCAR.....</b>	<b>119</b>
8.1.1	Alimentação do bagaço .....	119
8.1.2	Tiros na caldeira.....	122
8.1.3	Nível de água .....	123
8.1.4	Sobreaquecimento na caldeira .....	124
8.1.5	Trabalho da caldeira.....	125
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>127</b>
<b>9.1</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>127</b>
<b>9.2</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>129</b>
9.2.1	Recomendações para a implementação de sistemas de controle .....	129
9.2.2	Recomendações para futuros trabalhos.....	130
<b>Anexo 1.</b>	<b>Normas aplicáveis ao controle de intertravamento .....</b>	<b>131</b>
<b>Anexo 2.</b>	<b>Interface RS MAX 485 .....</b>	<b>138</b>
<b>Anexo 3.</b>	<b>Conversor CMOS A/D ADC0808.....</b>	<b>145</b>
<b>Anexo 4.</b>	<b>Filtro do circuito amplificador do sensor infravermelho.....</b>	<b>152</b>
<b>Anexo 5.</b>	<b>Diagramas de fluxo do controlador de intertravamento proposto.....</b>	<b>160</b>
<b>GLOSSÁRIO</b>	<b>.....</b>	<b>165</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>.....</b>	<b>167</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutural geral de um sistema de controle .....	8
Figura 2. Estrutural geral de um sistema com controlador digital.....	9
Figura 3. Computador pessoal e sistema dedicado.....	10
Figura 4. Arquitetura básica de um sistema dedicado .....	10
Figura 5. Elementos de um processo de fluxo .....	16
Figura 6. Válvula pneumática .....	18
Figura 7. Representação de um sistema de medição.....	22
Figura 8. Sistema de aquisição de sinais genérico.....	26
Figura 9. Cadeia de medição simplificada para transdutores piezoelétricos convencionais	27
Figura 10. O processo açucareiro.....	33
Figura 11. Planta de vapor e diagrama T-S do ciclo rankine .....	34
Figura 12. Turbina de vapor e seus termos de energia .....	35
Figura 13. Condensador adiabático .....	36
Figura 14. Bomba adiabática .....	36
Figura 15. Gerador de vapor (caldeira) .....	37
Figura 16. Esquema simples de caldeira aquotubular (1).....	39
Figura 17. Esquema simples de caldeira aquotubular (2).....	39
Figura 18. Esquema caldeira flamotubular.....	40
Figura 19. Processo de combustão em geradores de vapor.....	44
Figura 20. Diagrama geral de um sistema de controle .....	56
Figura 21. Diagrama do processo de aquecimento de leite.....	57
Figura 22. Controle modulado da combustão.....	62
Figura 23. Esquemas de controle para o nível de água.....	63
Figura 24. Arquitetura do projeto de automação da caldeira .....	67
Figura 25. Arquitetura modificada .....	68
Figura 26. Variáveis controladas do processo de geração de vapor.....	69
Figura 27. Curvas de perdas na combustão.....	71
Figura 28. Relação entre carga da caldeira e excesso de oxigênio .....	76
Figura 29. Malha de controle do processo da combustão.....	77
Figura 30. Diagrama de simulação da malha de controle da combustão .....	80
Figura 31. Resultado da simulação.....	81
Figura 32. Ciclo de leitura de memória externa.....	89
Figura 33. Microcontrolador 8951 .....	90
Figura 34. Fonte + 24 VDC.....	92
Figura 35. Fonte + 5 VDC.....	92
Figura 36. Interface elétrica .....	93
Figura 37. Malha do controle de intertravamento .....	96
Figura 38. Variáveis e equipamentos de interesse para o controlador.....	100
Figura 39. Equipamentos e sensores para o controle da caldeira.....	105
Figura 40. Seqüência de operação da caldeira .....	114
Figura 41. Diagrama de blocos do sistema eletrônico .....	115
Figura 42. Esquema elétrico do controlador.....	116
Figura 43. Circuito amplificador do sensor infravermelho .....	117
Figura 44. Esquema elétrico de um controlador para registrar variáveis analógicas .....	118
Figura 45. Caldeira de um engenho de açúcar cubano .....	120
Figura 46. Alimentador rotativo para o forno de bagaço .....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fontes de erros.....	27
Tabela 2. Valores práticos do fator de excesso de ar.....	46
Tabela 3. Características do óleo combustível com BPF.....	48
Tabela 4. Poder calorífico dos elementos.....	51
Tabela 5. Elementos da família MCS51.....	87
Tabela 6. Sensores comerciais.....	107
Tabela 7. Características do vapor para turbinas.....	124

# 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra a necessidade de implementação de um sistema automático para o controle de usinas açucareiras, fazendo uso das tecnologias disponíveis para tal fim, tais como os atuais avanços em computação e equipamentos de controle especifica os objetivos do trabalho, dá uma visão geral do processo de controle proposto, e apresenta a seqüência dos temas que são abordados neste estudo.

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Para proteger-se dos olvidos e não perder os detalhes, o homem modelou a rotina. Mas o remédio teve seqüelas, adoeceu-le de monotonia e mecanicismo, neurotizou a sua criatividade e, aos poucos, encurtou as horas e a vida. Os tempo modernos –lembramos a Chaplin-, marcados pela produção em série e a industrialização a grande escala, agudizaram os males. Os robots e a automação apareceram então como a chave à “liberdade”.

Tal fato tem não poucos matizes e desperta, com razão o sem ela, não poucas inconformidades, mas sem duvida seria muito difícil conceber o desenvolvimento atual da sociedade humana, sem assumir a necessidade do controle automático. E não somente de complexos processos industrias, mas de opções mais simples, como pode ser a sincronização múltipla de instrumentos, equipamentos ou circuitos, para que iniciem o detenham a sua marcha sem necessidade de uma lenta operação manual.

A evolução para melhorar a operação dos processos industriais começou há séculos. Com a revolução industrial, iniciada na Inglaterra, o trabalho muscular foi substituído pelo trabalho das máquinas. Em 1785, James Watt desenvolveu o primeiro sistema de controle automático de velocidade de uma máquina rotativa de vapor, denominado de controlador centrífugo.

Logo, em 1790, Watt aplicou o controle realimentado para controlar automaticamente o nível de água da caldeira, regulando a água que ingressava nela. Aproximadamente 10 anos depois, usou o controle realimentado para controlar a pressão de vapor.

A finais de 1790 apareceram melhoras nas ferramentas utilizadas, mas os conceitos não avançaram até começos do século XX. Em 1922, Minorsky desenvolveu um controlador automático para pilotagem de navios baseado em equações diferenciais.<sup>1</sup>

Em 1932, Nyquist desenvolveu um procedimento para determinar a estabilidade de sistemas em malha fechada através da análise da resposta a entrada senoidal de sistemas de malha aberta. Em 1934, Hazen discutiu o projeto de servomecanismos a relé para acompanhar uma entrada variável. Na década de 1940, engenheiros começaram a projetar sistemas de controle lineares com realimentação.

Na indústria de processos, foi introduzida a instrumentação eletrônica que possibilitou a instalação de salas de controle construídas a grandes distâncias dos processos.

Com a introdução do controle numérico abriu-se uma nova fase, uma vez que baseava-se no uso de computadores digitais como parte integrante do sistema de controle. O computador passou a representar um fator decisivo no aumento da produtividade, na qualidade dos produtos e na flexibilidade de produção. Os sistemas de computação começaram a ser introduzidos em todos os segmentos da indústria, desde o nível de chão de fábrica até o nível de gestão empresarial, dando origem à automação industrial.

A proliferação dos microcomputadores e a melhoria das interfaces e periféricos permitiram diminuir os custos e aumentar a velocidade e eficiência dos equipamentos computacionais. Além disso, o surgimento das

---

<sup>1</sup> GOMIDE, F. A. C. e NETTO, M. L. A. **Introdução a automação industrial informatizada**. Ed. Kapelusz S. A. I EBAI, Buenos Aires (Argentina), 1986.

redes locais e o desenvolvimento da tecnologia da informação contribuíram para dar origem à automação industrial integrada.

Desde aproximadamente 1915 até 1950, os controladores da caldeira converteram-se em sistemas integrados para o controle da pressão de vapor, a impulsão da chama no lar, a combustão, a alimentação da água e a temperatura de vapor.

De 1950 a 1960, a maioria dos controles eram pneumáticos. Nesta década iniciou-se a fabricação dos controles de intertravamento implementado-os com relés mecânicos. A década dos 60 caracterizou-se pela aparição de lógica discreta de estado sólido, a aparição do relé eletromecânico e o passo do controle pneumático ao controle eletrônico. Na década dos 70, com crise do petróleo, impulsaram-se de forma contundente o desenvolvimento dos controles para a caldeira. A partir desse momento desenvolveram-se melhores sensores e, a aparição dos microprocessadores beneficiaram a transição para os controles digitais com sofisticação, melhora e economia.

Naturalmente, um grande impacto econômico e social está associado a estes desenvolvimentos tecnológicos. Fatores como, competitividade, qualidade, custos, uso racional da matéria prima, dentre outros, estão exigindo maior eficiência nas indústrias. A junção da tecnologia, da metodologia (sistema, controle, otimização, modelagem, etc) e dos conhecimentos sobre a dinâmica dos processos proporcionaram um novo período na automação, o período da automação industrial integrada inteligente, com a implementação de controladores ótimos, adaptativos e com inteligência artificial.

Assim, o crescimento da indústria não só depende de custos, mas da rapidez com que os sistemas de automação são desenvolvidos e do suporte técnico que seus equipamentos dispõem. Por tudo isso, a tecnologia e o conhecimento do desenvolvimento de sistemas de controle e automação deve ser absorvida e verificada dentro e fora das universidades.

O laboratório de experimentação remota da Universidade Federal de Santa Catarina, ciente desta necessidade, procurou aprofundar sobre o tema, tomando como processo aplicativo a operação de usinas açucareiras que pode ser bastante útil para países como Brasil, Austrália e Cuba, dentre outros.

Por exemplo, em Cuba, das 157 centrais açucareiras, só 28 delas possuem certo grau de automação em caldeiras, tandem<sup>2</sup> e alguns controles de nível. Como consequência, o trabalho das caldeiras nesses engenhos é mais eficiente, reafirmando a utilidade e necessidade de automatizar estes processos.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Demonstrada a importância da automação no controle de processos e comprovada a sua eficiência nos engenhos açucareiros, foi traçado como objetivo geral propor um sistema de controle automático para o processo de usinas açucareiras, centrando a análise no projeto de controle da caldeira, que constitui o coração do processo açucareiro nos engenhos de açúcar.

Os objetivos específicos, necessários para alcançar o objetivo geral, são os seguintes:

1. Explicar, passo a passo, o processo açucareiro e o funcionamento da caldeira neste processo.
2. Desenvolver os laços de controle de uma caldeira standardizada, para ser aplicados em caldeiras de maior desempenho utilizadas nos engenhos açucareiros.

## 1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia geral para desenvolver o trabalho fundamenta-se na implementação dos laços de controle dos principais processos que o requer, os quais foram identificados a partir da análise do funcionamento da caldeira.

---

<sup>2</sup> Sucessão de moinhos por onde entra a cana que vai ser moída.



1. Laço de controle de processo na combustão: Intervém, como variáveis de controle, a alimentação do combustível, a pressão de vapor no interior da caldeira e a entrada de ar na caldeira.
2. Laço de controle do nível de água: Atua sobre a bomba de alimentação da caldeira para manter o nível de água requerido no domo superior da mesma.
3. Laço de controle para o intertravamento: Também chamado de controlador de chama. Intervém sobre o sistema de ignição, as paradas de funcionamento e as situações de emergência da caldeira.

#### 1.4 RECURSOS UTILIZADOS

Os recursos utilizados para o desenvolvimento e implementação do trabalho citam-se a seguir:

1. Programa de computação Tango, para o projeto de circuitos eletrônicos.
2. Microcontrolador Intel 8951 de oito bits.
3. Circuito conversor CMOS A/D ADC0808, com oito canais multiplexados.
4. Interface RS MAX 485.

#### 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em nove capítulos e cinco anexos, os quais são rapidamente descritos em continuação:

**Cap 1. Introdução:** Indica que o assunto da dissertação é sobre o tópico de automação de processos, especialmente nos engenhos açucareiros, explicando a sua importância, objetivos e metodologia do trabalho.

**Cap 2. Revisão bibliográfica:** Apresenta o material bibliográfico relacionado com o tema da automação, especialmente aquele que foi de maior utilidade neste estudo.

**Cap 3. Processo açucareiro:** Explica, passo a passo, como sucede o processo açucareiro.

**Cap 4. A caldeira:** Detalha o funcionamento das caldeiras de pequeno e mediano porte e os processos que no interior dela sucedem.

**Cap 5. Controles da caldeira:** Apresenta, minuciosamente, os diferentes tipos de controles que podem ser implementados em uma caldeira.

**Cap 6. Projeto de controle:** Apresenta a proposta para automatizar o processo de funcionamento de uma caldeira, detalhando os laços de controle pertinentes depois da análise feita aos controles existentes, visando a maior eficiência de seu desempenho e segurança no trabalho.

**Cap 7. Controlador programável de intertravamento:** Explica e apresenta o controle de intertravamento proposto para a caldeira.

**Cap 8. A caldeira nos engenhos de açúcar:** Faz especial ênfase nas caldeiras usadas nos engenhos de açúcar, ou o que é o mesmo, nas caldeiras de grande porte

**Cap 9. Conclusões e recomendações:** Apresenta as conclusões e recomendações derivadas do estudo.

**Anexo 1. Normas aplicáveis ao controlador de intertravamento:** Descreve os principais requerimentos para a implementação de controles de intertravamento, incluindo a norma FM76610 e UL372.

**Anexo 2. Interface RS MAX 485:** Contém uma descrição geral, as características elétricas e as condições de operação recomendadas.

**Anexo 3. Conversor A/D ADC0808:** Contém a seqüência de operação, as condições de operação e as características elétricas.

**Anexo 4. Filtro do circuito amplificador do sensor infravermelho:** Apresenta os cálculos matemáticos de projeto para o filtro do circuito amplificador do sensor infravermelho.

**Anexo 5. Diagramas de fluxo do controlador de intertravamento proposto:** Apresenta os diagramas de fluxo elaborados para cada uma das etapas do controle do sistema mecânico, incluindo o diagrama de fluxo para o controle de erros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se um suporte teórico, de forma a incluir os conceitos básicos inseridos no desenvolvimento de trabalhos de automação e controle de processos. Entre os temas abordados encontra-se a classificação dos diferentes sistemas de controle, a classificação dos diferentes controladores, e a utilização de sistemas de aquisição de sinais que servirão para a tomada de dados no processo de controle.

### 2.1 SISTEMAS DE CONTROLE (MORAES, 1996)<sup>3</sup>

Um sistema de controle computadorizado consiste de uma coleção de dispositivos controlados por um programa, composto de instruções, que atua como regulador, em um laço realimentado (ALLWORTH e ZOBEL, 1987)<sup>4</sup>. O elemento regulador geralmente é um microcontrolador ou microprocessador.

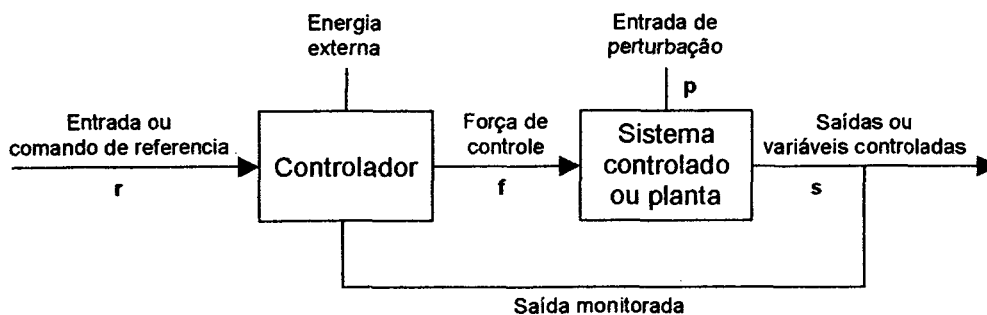
Em princípio, é possível alterar o estado de um sistema de uma forma previsível por meio da escolha apropriada de entradas, pelo menos dentro de limites razoáveis. Pode-se exercer influência sobre o estado de um sistema através de uma manipulação inteligente de suas entradas. De modo geral, isto constitui um "sistema controlado".

A teoria de controle convencional trata da formulação matemática de leis para ações de controle. A Figura 1 mostra a estrutura geral de um sistema de controle.

---

<sup>3</sup> MORAES de A., Marcelo. **Um ambiente de desenvolvimento Forth, para sistemas dedicados e controle difuso**. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1996.

<sup>4</sup> ALLWORTH, S. T. e ZOBEL, R. N. **Introduction to real-time software design**. Macmillan, 1987.



**Figura 1. Estrutural geral de um sistema de controle**

A saída do sistema controlado, também chamada de variável controlada ou de estado, é avaliada através da variável  $s$ , que reflete o estado da planta.

O controle do sistema é exercido através da força de controle,  $f$ , com um sinal elétrico, por exemplo. Esta força é aplicada pelo controlador, que constitui a parte inteligente e de ação do sistema. O controlador determina a ação apropriada de controle baseado nas entradas de comando de referência,  $r$ , e informações obtidas, via sensores de saída, referentes à saída monitorada,  $s$ .

Em algumas situações práticas, o controle é exercido de modo a evitar as influências prejudiciais de vários fatores classificados coletivamente de perturbações,  $p$ . O diagrama de blocos genérico da Figura 1 representa também a entrada destas perturbações, que podem ter origem externa, ou podem emanar do próprio sistema. A força perturbadora pode ser de natureza totalmente randômica ou previsível com algum grau de precisão.

Se as variáveis do sistema são funções contínuas do tempo, em todos os pontos, diz-se que o sistema é de tempo contínuo, e o controlador é um "controlador analógico". (GOPAL, 1984)<sup>5</sup>.

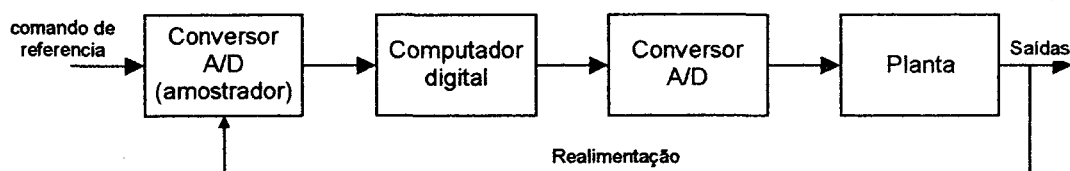
A complexidade de um controlador é função da complexidade da planta e da severidade dos requerimentos de controle. O custo de um controlador analógico cresce acentuadamente com o aumento da complexidade da

---

<sup>5</sup> GOPAL, M. **Modern Control System Theory**. Wiley Eastern Limited, 1984.

função de controle. Algumas funções podem ter complexidade tão grande a ponto de não ser possível implementar um controle apenas com elementos analógicos. Nestas situações, controladores digitais para aplicações especiais ou mesmo de aplicações gerais, onde um computador é o elemento central, o "coração de sistema", é a opção ideal para exercer o controle. Computadores para aplicações gerais além de executarem a função de controle, podem realizar outras funções na planta ou no processo.

Controladores digitais são versáteis, podendo-se modificar a função de controle com simples alterações de instruções em um programa. Os sinais que trafegam em controladores digitais são discretos no tempo, ou seja, são amostrados periodicamente. A estrutura geral de um sistema de controle digital é mostrada na Figura 2.



**Figura 2. Estrutura geral de um sistema com controlador digital**

Sinais contínuos no tempo, ou seja, analógicos, são convertidos pelo conversor A/D, para sinais discretos, ou seja, digitais, na forma que o computador os utiliza. O computador executa a função de controle implementada no programa armazenado, e a saída produzida é convertida para sinal contínuo no tempo, pelo conversor D/A, conseguindo o controle da planta.

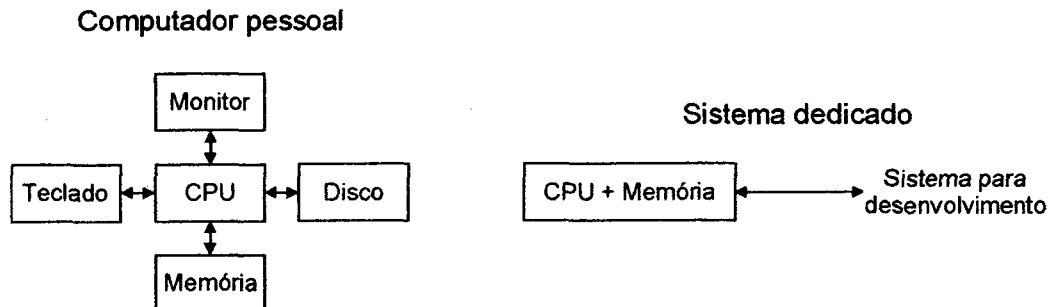
## 2.2 SISTEMAS DEDICADOS (MORAES, 1996)<sup>3</sup>

Sistema dedicado ou embutido, como também é chamado, é o sistema que utiliza processador e hardware especial, dedicado a uma função específica de controle (TZOU et al, 1993)<sup>6</sup>. Diferente dos computadores pessoais, os sistemas dedicados geralmente não possuem monitores,

---

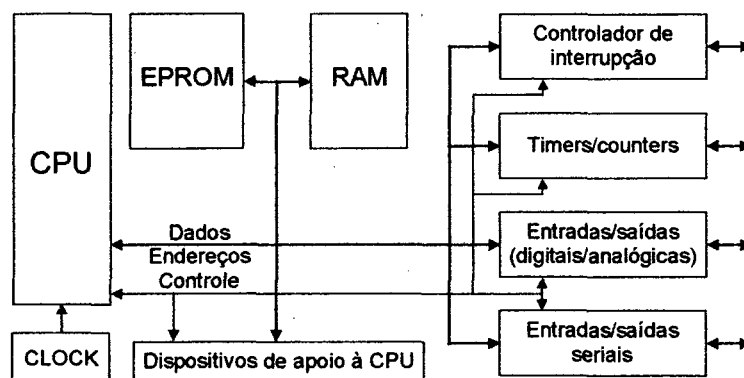
<sup>6</sup> TZOU, S.Y. et al. **A Distributed Development Environment for Embedded Software. Software-practice and Experience.** Vol. 23 (11). 1235-1248. Novembro, 1993.

unidades de disco e impressora, devido ao hardware ser minimizado para a tarefa de controle a que se dedica. A Figura 3 ilustra esta diferença mostrando uma estrutura universal para um computador pessoal, e a estrutura para um sistema dedicado.



**Figura 3. Computador pessoal e sistema dedicado**

A necessidade de minimizar o hardware se deve, em geral, a serem instalados em lugares ou equipamentos onde o espaço é restrito, ou em gabinetes especiais à prova de choques, de água, de altas temperaturas, pressão, sujeira, etc., construídos especialmente para comportá-los. A Figura 4 mostra a arquitetura básica de um sistema dedicado.



**Figura 4. Arquitetura básica de um sistema dedicado**

A CPU é o elemento que gerência e controla o sistema. Aplicações que exijam processamento massivo de dados, requerendo maiores velocidades de processamento, utilizam microprocessador como CPU. Nestes casos, os blocos da Figura 4 são blocos discretos, cada bloco constituindo um chip do hardware.

Nos sistemas dedicados normalmente são utilizados microcontroladores por simplificar o hardware, e por ser dispositivos mais robustos para os fins a que estes sistemas se destinam. Microcontroladores comuns possuem em um mesmo encapsulamento todos os blocos da Figura 4, assim, a tarefa do programador torna-se mais fácil, e o acesso aos dispositivos de entrada e saída, mais rápido.

Sistemas dedicados equipam fornos aquecedores, impressoras, controladores de disco magnético; sistemas de pilotagem em aviões e mísseis; sistemas de navegação em satélites e naves espaciais, injeção de combustíveis em automóveis, etc. O software executado nestes sistemas é chamado de "software dedicado".

O desenvolvimento de software dedicado exige uma técnica especial, a maioria deles são estruturados para um determinado hardware de projeto específico, devido a isto, não há uma metodologia padronizada de desenvolvimento, ou pacotes de softwares comerciais prontos para todas as aplicações possíveis. Estes softwares são mais precisamente definidos como *realtime-executives*<sup>7</sup>, e não como sistemas operacionais, por possuírem características que vão além daquelas exigidas de um sistema operacional.

A finalidade de um sistema dedicado pode exigir funções do software dedicado muito diversas das funções comuns dos sistemas operacionais, como também dispensar algumas funções daquele. Dois aspectos principais diferenciam o desenvolvimento de software dedicado do desenvolvimento comum de software:

1. O software dedicado geralmente não é desenvolvido no computador onde será executado quando estiver pronto, ou seja, no processador dedicado, sendo desenvolvido em outro computador e posto para rodar no processador dedicado quando concluído.

---

<sup>7</sup> O termo *realtime-executive*, empregado para designar o software dedicado, relaciona a execução de programas a temporizações, a eventos e ações do programa, relacionados com o tempo.

2. O software dedicado normalmente é desenvolvido paralelamente com o hardware dedicado.

O fato de desenvolver software para um hardware que ainda não está pronto não permite que algumas práticas para teste de software sejam diretamente aplicáveis, obrigando o programador a utilizar técnicas e ferramentas menos confiáveis e eficientes. Este problema se agrava quando o sistema a ser desenvolvido é grande, necessitando de equipes de programadores.

### 2.3 SISTEMAS EM TEMPO REAL (MORAES, 1996)<sup>3</sup>

O termo "tempo-real" foi originalmente introduzido para distinguir entre processamento em lote e computações onde haviam interações diretas entre o processador e o mundo real (BENNETT e LINKENS, 1984)<sup>8</sup>. Atualmente é usado para indicar que a computação é "sincronizada" com eventos externos, e que o resultado de um processamento ou cálculo particular terá dependência de tempo.

Um sistema é considerado em tempo-real quando o correto processamento das informações depende não apenas da execução lógica correta, mas também do tempo que os resultados levam para serem produzidos.

Tanto resultados incorretos produzidos pela execução lógica do processamento, como a produção dos resultados fora do tempo, previamente especificado para os resultados serem produzidos, implicam em falha do sistema. Exemplificando, um robô que tenha que pegar uma peça em uma esteira movendo-se continuamente, se atrasar algum movimento, a peça não estará na posição onde ele deveria encontrá-la, causando uma atividade incorreta, falha.

---

<sup>8</sup> BENNETT, S. e LINKENS, D.A. **Real-time Computer Control**. Peter Peregrinus Ltd, 1984.



Sistemas em tempo real são implementados tanto em grandes sistemas, como supercomputadores controlando processos de alta complexidade, quanto em sistemas dedicados, para o controle de processos de menores proporções.

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTROLADORES<sup>9</sup>

A maioria dos controladores utilizados em sistemas de controle de processos, e os mais conhecidos, são os do tipo Proporcional, Integral, Derivativo, e de três termos, denominados PID.

**Controlador proporcional (P):** Fornece uma relação linear (ganho) entre o sinal de entrada e a saída do controlador.

**Controlador proporcional e integral (PI):** A ação proporcional está associada com uma ação integral que faz a saída do controlador aumentar em uma taxa proporcional à integral da entrada do controlador.

**Controlador proporcional e derivativo (PD):** A ação proporcional está associada com uma ação derivativa na qual a saída do controlador é diretamente proporcional à taxa de variação da sua entrada, ou seja, com base na tendência do erro, a ação derivativa se antecipa na ação de controle.

**Controlador proporcional, integral e derivativo (PID):** Incorpora as ações dos controladores P, PI e PD.

O controle PI é apropriado para sistemas onde um comportamento de primeira ordem é dominante, enquanto o controle PID é indicado para sistemas com dinâmicas de segunda ordem, sendo estes casos obtidos na maior parte dos processos encontrados na indústria.

Explica-se então porque, além da sua simplicidade, o controlador PID é o algoritmo de controle mais utilizado na indústria, já que ele é capaz de controlar uma grande variedade de processos se sintonizado adequadamente.

---

<sup>9</sup> ROMÃO, Wesley. **Análise e projeto de controladores pid adaptativos baseados em estimação de parâmetros: Um estudo de caso.** Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1996.

Os controladores PID podem ser empregados, também, em processos complexos que são difíceis para controlar, desde que não se requeira um ótimo desempenho. Em outras palavras, o controlador PID, de ganho fixo, proporciona um desempenho satisfatório no acompanhamento de um sinal de referência e na rejeição de perturbações quando o processo controlado é de ordem reduzida, linear e invariante no tempo.

No entanto, existem situações práticas onde é possível obter um comportamento dinâmico melhor através de outros tipos de controladores e onde os controladores PID são mesmo inadequados. Exemplos típicos são processos com um longo atraso de transporte e sistemas oscilatórios.

Para solucionar esta dificuldade, durante as últimas décadas observa-se um considerável interesse em uma nova concepção de sistemas de controle, denominados adaptativos ou auto-ajustáveis.

**Controlador adaptativo:** Ajusta automaticamente, em tempo real, os parâmetros do controlador, junto ao processo de resposta a mudanças na planta ou ambiente.

Os controladores adaptativos proporcionam um meio sistemático e flexível na solução de problemas de controle devido à existência de processos com incertezas, não-linearidades e parâmetros variantes no tempo. Uma possibilidade de implementação é projetar controladores adaptativos adequando-os para que apresentem uma estrutura tipo PID.

Os métodos de projeto para o desenvolvimento de controladores PID adaptativos baseiam-se na estrutura convencional do controlador PID, onde as ações de controle são funções da mudança da referência e saída do processo, buscando a minimização de uma função custo ou através da alocação dos pólos (zeros) em malha fechada para obter-se o comportamento especificado pelo usuário.

Algumas técnicas de projeto de controladores PID adaptativos consideram que o processo possa ser representado por um modelo de segunda ordem cujos parâmetros podem ser estimados utilizando o método dos mínimos quadrados recursivo. No entanto, o processo a ser controlado pode não ser de segunda ordem.

Apesar dos controladores PID de ganhos fixos ainda serem os mais conhecidos e implementados no meio industrial, o interesse por controladores adaptativos está crescendo devido a sua importância prática. O controlador PID adaptativo une a popularidade do PID convencional com a eficiência do controle adaptativo. Além disso, os controladores adaptativos apresentam uma estrutura alternativa no controle de processos complexos, quando controladores de ganhos fixos são ineficazes e comprometem as respostas transitórias requeridas dos processos controlados. A estrutura do controle PID adaptativo é interessante em ambientes industriais pela familiarização e facilidade de entendimento por parte dos operadores de processos.

A escolha do melhor controlador para o processo que se deseja controlar é feita mediante a análise do sistema de controle considerando, como primeiro passo, encontrar um modelo matemático que o represente satisfatoriamente. Depois do modelo, existem vários métodos para a análise do desempenho do sistema.

Para comparar o desempenho de vários sistemas, especifica-se sinais de teste de entrada e compara-se as respostas de saída dos diferentes sistemas. Os principais sinais de teste utilizados são as funções degrau, rampa, aceleração, impulso e senoidal.

A resposta de um sistema de controle consiste de duas partes: a resposta transitória e a resposta de regime. Entende-se por resposta transitória aquela que vai do estado inicial até um estado final. Por resposta de regime, entende-se a maneira como a saída do sistema se comporta quando o tempo tende a infinito.

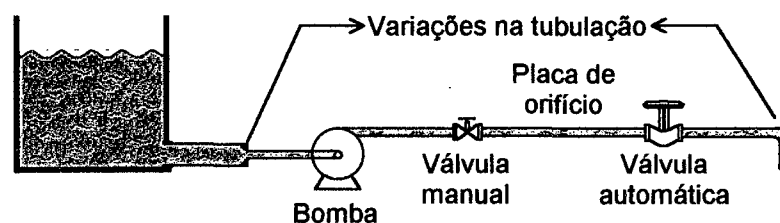
Depois da análise e antes da implementação de um sistema de controle, o estudo de simulação é o caminho indicado para simplificar o projeto de controladores confiáveis e robustos.

## 2.5 PROCESSOS DE FLUXO (CURSIO, 1995)<sup>10</sup>

Na modelação de um processo de fluxo deve ser analisado o comportamento dos fluidos, quando forçados a escoar através de tubulações, orifícios, válvulas e outros equipamentos encontrados em uma malha de controle de fluxo.

As malhas de controle de fluxo apresentam a particularidade de que a variável que se deseja controlar pode ser variada, de forma direta, através da abertura de uma válvula. Neste controle de fluxo, vários fenômenos físicos atuam simultaneamente resultando em um comportamento dinâmico não linear.

Para representar um circuito de fluxo são modelados três elementos, tal como se mostra na Figura 5, análogos àqueles existentes em circuitos elétricos. Essa análise fornece uma boa idéia da influência exercida pela natureza física dos fluidos no comportamento dinâmico e estáticos dos mesmos.



**Figura 5. Elementos de um processo de fluxo**

Por outro lado, sem utilizar a analogia dos circuitos elétricos, pode-se apresentar um desenvolvimento que conduz a um modelo dinâmico de fluxo durante a aceleração ou a desaceleração do mesmo, levando-se em conta apenas a inércia do fluido, seja um fluido incompressível ou um fluido compressível.

Ao contrário dos líquidos, o efeito da inércia no fluxo de gases é desprezível em virtude da sua pequena densidade. Para fluidos gasosos, a

---

<sup>10</sup> CURSIO, Vinícius Leônidas. **Ajuste automático de controladores PI para processos de fluxo**. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1995.

expansão ou contração, causado pelas mudanças na pressão é o efeito dominante na dinâmica dos mesmos. Para esses casos, utiliza-se o conceito de capacitância, em analogia a circuitos elétricos, para modelar o referido efeito.

Considerando-se o fluxo turbulento <sup>11</sup>, a relação existente entre a queda de pressão e fluxo é mais complicada para o caso dos fluidos compressíveis do que para os incompressíveis.

Em poucas palavras, a dinâmica do fluxo é variável com o ponto de operação. Quando consideram-se todos os elementos envolvidos na malha de controle de fluxo, em especial a válvula reguladora, observa-se que a dinâmica do fluxo é muito mais rápida do que a dinâmica da própria válvula. O próprio transmissor pode ter uma resposta mais lenta.

A transmissão dos sinais é baseada em eletrônica analógica e cada vez mais em eletrônica digital, eliminando os problemas de atraso que existem em linhas pneumáticas. As válvulas com acionamento pneumático possuem uma dinâmica mais lenta que é dominante nos processos de fluxo.

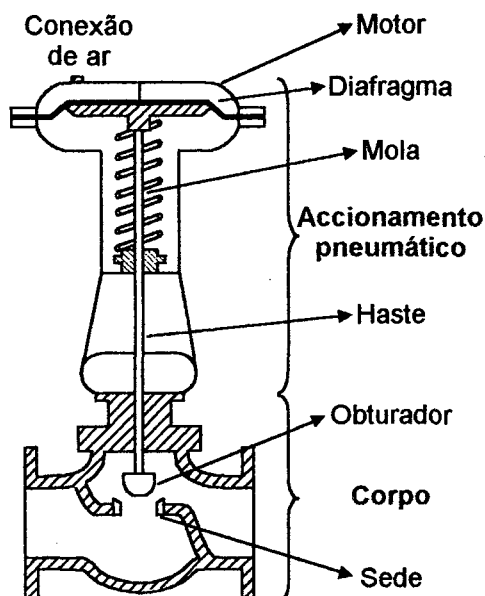
### **2.5.1 A válvula pneumática**

Em um laço de controle, o elemento final de controle, ou atuador, é o equipamento que implementa, no processo, a ação calculada pelo controlador. Dentre os vários tipos de elemento final, o mais utilizado é a válvula pneumática.

Em uma válvula pneumática existem duas partes principais: o corpo da válvula, que é por onde passa o fluido e, portanto, aonde se localiza a restrição ao fluxo, e o acionamento, que é responsável pela abertura o fechamento da mesma.

---

<sup>11</sup> De acordo com o movimento do fluido, o fluxo pode ser classificado como laminar o turbulento. No primeiro caso, partículas adjacentes do fluido terão movimentos paralelos entre si e paralelos também em relação à direção do fluxo, ocorrendo de uma forma ordenada. O segundo caso ocorre quando as partículas do fluido possuem movimentos em direções diferentes da do fluxo, ocorrendo cruzamento dos caminhos percorridos pelas partículas do fluido.



**Figura 6. Válvula pneumática**

Como mostra a Figura 6, na parte superior do acionamento, está localizado o motor da válvula, que é quem recebe o sinal pneumático de controle. Dentro do motor existe uma membrana flexível, ou diafragma, e uma mola. De acordo com a pressão que chega na válvula, a membrana é impelida para cima ou para baixo, até que encontre uma posição de equilíbrio em conjunto com a mola, com os atritos e com as forças de pressão no obturador.

Entre o corpo e o motor da válvula existe uma haste. Na extremidade de cima, a haste fica presa à placa do diafragma, e na extremidade de baixo, ao obturador.

Como pode-se notar na Figura 6, o obturador está localizado no interior do corpo da válvula, onde também se localiza o orifício por onde se dá o fluxo, sendo esse orifício denominado de sede da válvula. Na medida em que o obturador se move em direção à sede da válvula, o fluxo é restringido através da diminuição da área do orifício e vice-versa.

Como foi dito, a haste se move em função do sinal de controle enviado para a válvula, de forma diretamente proporcional a esse sinal. Já o fluxo resultante em função da posição da haste irá depender da forma geométrica do obturador.

A característica normalizada, e portanto adimensional, do fluxo  $f$  em função da posição da haste  $x$ , é normalmente do tipo linear ou igual-porcentagem, mas existem outras relações para  $f(x)$  tais como Raiz Quadrada, Parabólica ou Hiperbólica.

- Linear: 
$$f(x) = \frac{I}{R} + \left(1 - \frac{I}{R}\right) \cdot x$$
- Igual-porcentagem: 
$$f(x) = R^{x-1}$$
- Raiz Quadrada: 
$$f(x) = \frac{I}{R} + \left(1 - \frac{I}{R}\right) \cdot \sqrt{x}$$
- Parabólica: 
$$f(x) = \frac{I}{R} + \left(1 - \frac{I}{R}\right) \cdot x^2$$
- Hiperbólica: 
$$f(x) = \frac{I}{R - (R - I) \cdot x}$$

Estas equações são conhecidas como *caraterística inerente* da válvula. A constante  $R$ , denominada de "rangeabilidade" é a relação entre o fluxo máximo e o fluxo mínimo que podem ser controlados pela válvula. Abaixo do valor de fluxo máximo, a válvula tende a fechar completamente.

Quando a válvula é colocada em uma linha de fluxo, ocorre uma influência desta sobre as curvas de fluxo das válvulas. O comportamento resultante da interação da válvula com a linha de fluxo, é denominada *caraterística instalada* das válvulas, em uma referência ao fato de que esse comportamento é uma característica do sistema de fluxo no qual a válvula está instalada, incluindo-se esta, e não depende apenas da válvula.

A característica inerente das válvulas só é verificada quando a queda de pressão que ocorre na válvula é constante para qualquer valor de fluxo. Entretanto, o que ocorre em uma situação real é uma queda variável de pressão na válvula, que depende do que acontece nas linhas de fluxo.

Conclui-se que a curva do fluxo em função da abertura de uma válvula, e portanto, o ganho de um processo de fluxo, é variável e depende do tipo da válvula, da diferença de pressão sobre o sistema, dos próprios elementos introduzidos na linha de fluxo, e do próprio fluido.

Uma válvula pneumática sempre possui algum atraso dinâmico, pois uma mudança de pressão aplicada ao motor da válvula não possui uma resposta instantânea de movimento da haste. Devido à característica construtiva e de operação das válvulas pneumáticas, a dinâmica apresentada pelas mesmas é inerentemente de segunda ordem.

A dinâmica da válvula poderá ou não ter importância no comportamento da malha de controle. Tudo dependerá de como é a resposta do processo. Se o processo for lento, como são a maioria dos processos industriais, o atraso na válvula poderá ser desprezado, sendo seu comportamento representado apenas por um ganho. Caso contrário, a dinâmica da válvula terá de ser considerada. A constante de tempo da válvula, segundo Gould (1969)<sup>12</sup> é da ordem de 1 a 30 segundos. Coughnour e Koppel (1965)<sup>13</sup> fornecem como valor para essa constante 10 segundos. Esses dados são para válvulas sem posicionador.

Sempre que a válvula encontrar-se em uma situação de repouso, mesmo que por um instante de tempo muito pequeno, enquanto não houver força suficiente para vencer o atrito estático, o que corresponde a uma variação no sinal de controle abaixo de um valor mínimo, a válvula não apresentará resposta, e quando ela apresentar, o fará de uma maneira abrupta, no início do movimento.

Segundo Clair (1993)<sup>14</sup>, pode ocorrer até mesmo sobrepasso na posição da válvula no momento do movimento abrupto (caso o impulso no movimento seja demasiadamente forte), ou ainda, pode ocorrer que a válvula apresente movimento, só que mais lento do que o normal (assemelhando-se a um atraso de transporte pequeno), mesmo para uma variação pequena no sinal da entrada.

---

<sup>12</sup> GOULD, Leonard A. *Chemical Process Control: Theory and Applications*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1969.

<sup>13</sup> COUGHNOUR, Donald R. & KOPPEL, Lowell B. *Process Systems Analysis and Control*. Tokyo: McGraw-Hill, 1965

<sup>14</sup> CLAIR, David W. St. *Controller Tuning and Control Loop Performance*. 2 ed. United States of America: Straight-Line Control Company, 1993.



### 2.5.2 Controladores para processos de fluxo

Como foi dito anteriormente, os controladores PID são os mais utilizados em indústrias de processos, mas nos processos de fluxo a ação derivativa normalmente não é utilizada, pois o forte ruído existente na medição, originada pela turbulência do movimento, especialmente nas proximidades de obstruções, impede a sua utilização.

Devido a ação derivativa não ser necessária, os controladores PI são apropriados para atingir à exigência de desempenho moderada das malhas de fluxo.

## 2.6 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE SINAIS (BLANK, 1996)<sup>15</sup>

Para a escolha de um sistema de aquisição de sinais (SAS) existem basicamente duas opções: usar um sistema dedicado a um tipo de aplicação, ou configurar um sistema composto de vários módulos que sejam compatíveis entre si para compor a cadeia de medição, os quais podem inclusive serem adquiridos de diversos fabricantes.

A modularização é a tendência futura da instrumentação automatizada, a pesar de que ocorre um aumento da incerteza de medição do sistema devido à propagação de erros, o que não impede o uso desta opção desde que estes estejam dentro de limites confiáveis.

Na prática recomenda-se o cálculo da incerteza de medição do SAS como um todo, pela técnica da modelagem, a qual permite compor o modelo elétrico do SAS a partir do modelo elétrico de cada módulo em separado. Desta forma, são consideradas as não idealidades de cada módulo de forma mais detalhada do que simplesmente as especificações do tipo "incerteza de medição".

Infelizmente, o uso desta técnica é dificultada pelo fato comprovado que a maioria dos fabricantes de módulos de SAS's, mesmo os mais

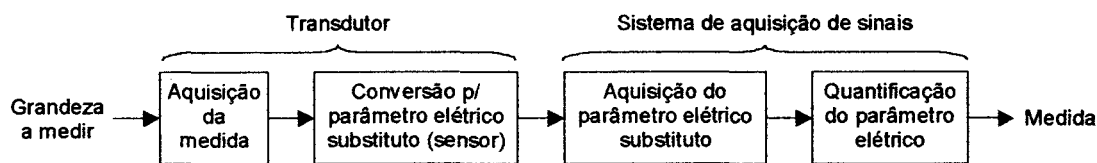
---

<sup>15</sup> BLANK, Martim. **Sistematização das especificações metrológicas em sistemas automatizados de aquisição de sinais**. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1996.

renomados, não fornecem as especificações necessárias para a estimativa da incerteza de medição do sistema de medição funcionando como um todo, o que dificulta a confiabilidade metrológica no uso da modularização e a escolha correta dos módulos, já que as inovações são constantes e diversas. Estas especificações dependem muito mais do princípio de funcionamento dos transdutores que das grandezas de medição envolvidas.

### 2.6.1 Sistemas de medição

Os sistemas de medição auxiliados por computador, em sua forma genérica, podem ser divididos conforme a Figura 7.



**Figura 7. Representação de um sistema de medição**

Os SAS's ocupam um lugar na cadeia de medição desde a aquisição de um sinal elétrico proporcional à grandeza a medir até a obtenção do sinal digital correspondente.

Na análise de incertezas metrológicas, devido às interações entre os módulos, deve-se considerar desde o transdutor até a conversão analógica-digital. Após desta etapa, os erros são decorrentes, em geral, do arredondamento do processador.

### 2.6.2 Tipos de transdutores

Os transdutores, por possuírem baixas sensibilidades, em geral constituem o fator limitante em medições automatizadas. A análise das características metrológicas e operacionais dos transdutores auxiliará na seleção de um SAS otimizado.

**Transdutores piezoelétricos:** São transdutores que quando mecanicamente deformados, produzem carga elétrica. A carga gerada depende do sentido da deformação e tende a se dissipar com o tempo. Desta forma, somente podem realizar medições dinâmicas, o que pode ser melhorado empregando-se amplificadores acoplados com alta constante de tempo.

As suas vantagens é que apresentam resposta mais rápida devido à alta frequência natural, permitindo, por tanto, medições em alta frequência; menor deflexão e maior sensibilidade que qualquer outro transdutor de força e pressão.

Os transdutores piezoelétricos com amplificadores acoplados são construídos e calibrados com amplificadores de tensão acoplados, produzindo sinais de saída que podem facilmente serem adquiridos por SAS's usuais. Diminui-se a influência do comprimento dos cabos, tornando tais transdutores mais flexíveis em suas aplicações.

**Transdutores resistivos:** Baseiam-se na variação proporcional da resistência elétrica do elemento sensor à grandeza a medir. Podem ser subdivididos em extensométricos, termorresistivos e potenciométricos.

**Transdutores indutivos:** Baseiam-se na variação da indutância do sensor com a grandeza a medir. São amplamente empregados em medições automatizadas de deslocamento na ordem de micrômetros a metros. Podem ser empregados como conversores na transdução das demais grandezas diretamente relacionadas, tais como força e pressão. Possuem as vantagens de permitirem medições com baixa incerteza, boa sensibilidade, linearidade e repetitividade, além da possibilidade de operar em ambientes severos e, em alguns casos, fazer medições sem contato.

**Transdutores capacitivos:** Baseiam-se na variação da capacitância do sensor com a grandeza a medir. São muito empregados em medições de pressão diferencial, baixas pressões absolutas, umidade e nível. No entanto, traz em desvantagens, exigir a eletrônica mais complexa no tratamento do sinal, possuir linearidade e faixa dinâmica, e o problema de capacitâncias parasitas poderem ser maiores que a capacitância do elemento sensor a ser medida.

**Termopares:** São os transdutores de temperatura mais comuns. Apresentam ampla faixa de medição, simplicidade e facilidade de instalação. No entanto, apresentam baixa sensibilidade e susceptibilidade à contaminação. Circuitos elétricos para medições com termopares necessitam basicamente um sistema para medição de pequenas tensões e um sistema que garanta o conhecimento da tensão termelétrica da junta de

referência. Os cabos que conectam as junções termelétricas ao SAS, também chamados cabos de extensão, devem ser dos mesmos materiais destas.

Como as aplicações que envolvem termopares freqüentemente necessitam medição de temperatura em vários pontos, torna-se interessante a multiplexação. Como o sinal dos termopares é muito baixo, é desejável que a amplificação seja feita antes do módulo de chaveamento. Isto diminui erros ao chaveamento, porém existe a necessidade de um amplificador para cada transdutor.

### 2.6.3 Módulos dos sistemas de aquisição de sinais

Os módulos a serem considerados para a composição de um SAS dependem da sua aplicação, mas quatro finalidades são bem definidas como explica-se a seguir.

**1. Excitação:** Em transdutores passivos, tais como termorresistores e extensômetros de resistência, a excitação, que pode ser feita com fonte de corrente ou fonte de tensão, tem como função fornecer energia auxiliar para a medição de um parâmetro elétrico como variação de resistência ou indutância. A excitação é necessária em transmissores para permitir a amplificação do sinal neles.

**2. Transmissão de sinais:** Convencionalmente, a transmissão de sinais é feita por cabos elétricos. Cabos apropriados para a instrumentação com blindagem e com fios trançados são importantes para diminuir as interferências de campos elétricos e magnéticos.

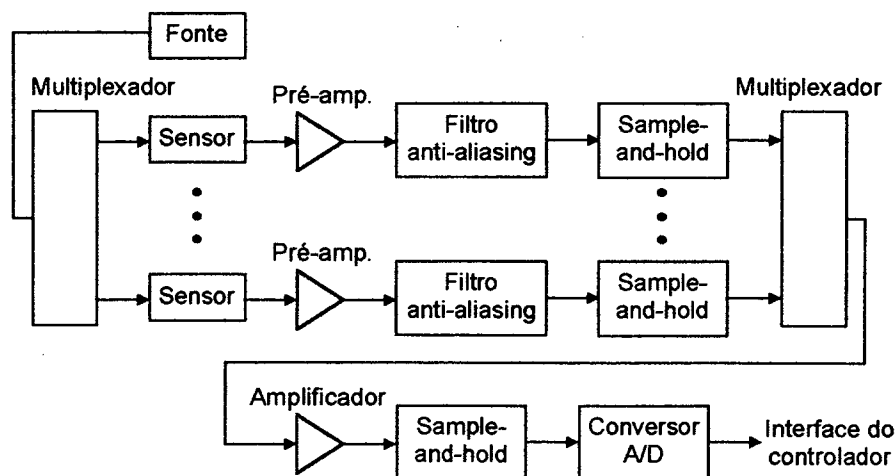
**3. Chaveamento de sinais:** As chaves mais utilizadas em instrumentação são as do tipo relé e semicondutora (FET e CMOS). Tem por função conectar os módulos do SAS, geralmente o transdutor, ao circuito de condicionamento de sinal. Também pode ser feita uma pré-amplificação do sinal para minimizar erros decorrentes do chaveamento. As arquiteturas de chaveamentos mais conhecidas e disponíveis são: chave de um contato, chave de dois contatos, multiplexador, scanner e matriz.

**4. Condicionamento de sinais:** Existem vários módulos de condicionamento do sinal, eles são:

- **Amplificadores:** Amplificam a tensão de entrada do sinal analógico, uma vez que os sinais produzidos pela maioria dos transdutores são de baixa tensão ou nível de potência, e favorecem a relação de impedâncias adequada entre os circuitos de entrada e saída. Podem possuir acoplamento AC ou DC.
- **Amplificadores de carga:** São utilizados para transdutores piezoelétricos. Proporcionam um sinal de saída de alto nível com tensão proporcional à carga de entrada.
- **Filtros:** Permitem a eliminação de sinais cujas frequências não são de interesse. Podem eliminar ruídos de rede e minimizar ruídos Johnson. Segundo a frequência de interesse, podem ser do tipo passa alta, passa baixa, rejeita-banda e passa banda. Podem ser elementos ativos baseados em amplificadores operacionais, ou podem ser passivos. A filtragem pode ser feita de forma digital através de software. De qualquer forma, a filtragem digital necessita filtragem prévia do sinal com filtro passa-baixa para evitar erros de aliasing. As características de um filtro dependem também da sua ordem. Em geral, quanto mais alta a ordem do filtro melhor a característica de resposta.
- **Demoduladores sensíveis à fase:** Quando a alimentação for feita com tensão AC, o sinal de saída do transdutor será o produto de um sinal proporcional à grandeza a medir e de um sinal com a frequência da alimentação. O demodulador sensível à fase é utilizado para retificar o sinal, permitindo que a frequência portadora seja eliminada posteriormente com um filtro passa-baixa.
- **Módulos de adição o subtração:** São utilizados, por exemplo, para se obter a diferença de deslocamento de dos transdutores indutivos.
- **Multiplicadores:** Utilizados para multiplicar dois sinais de entrada.
- **Integradores:** Utilizados quando é necessário a integração de um sinal em determinado intervalo de tempo. Podem atuar como um filtro passa-baixa, por exemplo, para atenuar ruídos em medições com termopares.

- **Diferenciadores:** Utilizados para derivar o sinal de entrada sendo aplicados, por exemplo, para se obter valores de velocidade a partir de potenciômetros. A diferenciação analógica, ao contrário da integração, tende a acentuar ruídos.
- **Complementos de ponte de Wheatstone (PW):** Os circuitos de PW constituem dois divisores de tensão para fazer a conversão de variações muito pequenas de resistência, capacitância ou indutância para tensão. Necessitam excitação, podendo ser esta em tensão contínua ou alternada ou em corrente contínua. Nos casos em que o transdutor não possua acopladas todas as impedâncias que formam parte do PW, os complementos de PW serão necessários para acrescentá-las ao circuito.
- **Amplificadores Sample-and-holds:** Constituem uma espécie de memória analógica. Têm por função capturar o sinal, reter o último valor e amplificá-lo com ganho unitário.
- **Conversores A/D:** Constituem o elementos mais importante de um SAS. Servem para converter o sinal de entrada analógico em um sinal digital, o qual pode ser processado e transmitido através da interface com o computador.
- **Conversores corrente-tensão:** Permitem passar um sinal, quantificado em corrente, para um sinal quantificado em tensão.

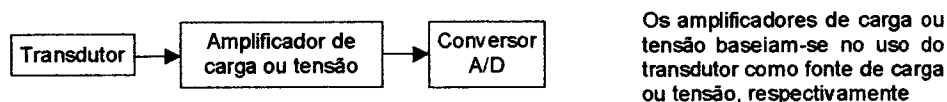
Diversas combinações de módulos podem ser empregadas. A Figura 8 ilustra um exemplo da cadeia de medição genérica.



**Figura 8. Sistema de aquisição de sinais genérico**

O ordenamento dos demais módulos, ao longo da cadeia de medição, obedece a uma seqüência lógica, porém não rígida, cuja configuração é influenciada por vários aspectos, por exemplo, finalidade dos dados e característica dos módulos. Segundo a conveniência, os módulos podem ser retirados, substituídos, intercalados por outros e reordenados para originar inúmeras formas.

Assim, um SAS pode ser constituído simplesmente de um sensor e um conversor A/D. A cadeia de medição, para transdutores piezoelétricos convencionais por exemplo, na sua forma mais simplificada, é mostrada na Figura 9.



**Figura 9. Cadeia de medição simplificada para transdutores piezoelétricos convencionais**

#### 2.6.4 Fontes de erro em medições automatizadas

As principais fontes de erros e os erros devidos a ditas fontes são os citados na Tabela 1.

**Tabela 1. Fontes de erros**

Fontes do erro	Tipos de erros
Intrínsecos de cada módulo	Incerteza do sistema de medição
	Histerese
	Repetitividade
	Tensão de off-set
	Ruído
	Tensões em modo comum
	Cross-talk
	Resolução
	Ripple
	Efeitos da frequência
Interfaceamento dos módulos	Relações de impedância
	Tensões de contato
	Correntes de fuga
	Efeito dos cabos
Condições ambientais	Derivas com tempo e temperatura
	Interferência de campos elétricos e magnéticos
De amostragem	Erro de aliasing
	Erro de abertura
	Erro de estabilização
Relativos à aplicação	Erros relativos à aplicação

### 2.6.5 Especificação de sistemas de aquisição de sinais

Do ponto de vista da metrologia, um sistema de medição, composto por transdutores e um SAS modular é adequado se for capaz de adquirir sinais provenientes de transdutores, dentro de faixas de medição desejadas, a taxas de aquisição desejadas e com incertezas de medição abaixo das admissíveis. A maior dificuldade do usuário será avaliar a incerteza deste sistema de medição como um todo.

Uma metodologia sistematizada e adequada para a especificação metrológica de SAS's consta da execução seqüencial e iterativa das quatro etapas que se descrevem a seguir.

**1. Sistematização dos requisitos metrológicos:** É necessário o conhecimento dos seguintes requisitos a serem satisfeitos: grandezas a medir, incertezas de medição admissíveis para cada grandeza a medir, método de medição (diferencial ou absoluto), faixas de medição (amplitude e freqüência) necessárias, tempo de uso do instrumento, variações de temperatura ambiente, intervalos de tempo toleráveis entre medições, número de medições simultâneas necessárias e condições particulares da aplicação (ex.: condições ambientais extremas).

**2. Escolha preliminar dos módulos:** Nesta etapa são definidos o tipo de transdutores, os circuitos elétricos, a configuração do SAS e modelos comerciais de módulos de SAS 's a serem utilizados.

Para a escolha preliminar dos módulos considera-se que os requisitos metrológicos são, muitas vezes, decisivos na escolha dos transdutores. Por sua vez, o princípio de funcionamento dos transdutores será decisivo na escolha da configuração do SAS e das fontes de erros predominantes.

A escolha preliminar dos módulos considera basicamente:

- **Faixas de medição:** Os valores nominais de entrada e saída dos módulos, em amplitude e freqüência, deverão estar dentro das especificações, desde o transdutor até o conversor A/D.



- **Incertezas de medição:** Caso não seja fornecida a incerteza de medição como parâmetro, pode-se utilizar, o erro na sensibilidade, erro no zero e a não-linearidade como referências nesta etapa. A soma das incertezas individuais de cada módulo não deve ser maior que a incerteza total admissível para o SAS.
- **Taxas de aquisição:** O SAS deve ter taxa de aquisição compatível com a requerida, considerando a máxima frequência de interesse no sinal, critério de Nyquist e filtros adequados. Devem ser verificados parâmetros como taxa de aquisição, taxa de chaveamento e settling time.
- **Impedâncias:** Para agilizar a eliminação de soluções metrologicamente inviáveis, na escolha preliminar, somente deverá ser observado se a relação entre as impedâncias de entrada e saída dos módulos adjacentes, sem considerar cabos e chaves, está de acordo com a incerteza admissível total.

**3. Análise de erros:** Nesta parte deve-se fazer uma análise erros seqüencial.

**4. Escolha final dos módulos:** Após as três primeiras etapas, serão obtidas combinações de módulos que satisfazem os requisitos metrológicos da aplicação. A escolha final dos módulos a serem empregados poderá ser feita de acordo com critérios adotados pelo usuário.

### **3. O PROCESSO AÇUCAREIRO**

Este capítulo descreve a forma em que se sucede o processo açucareiro em um engenho de açúcar, detalhando especialmente a geração de energia necessária para o processo, a qual é produzida dentro do mesmo processo açucareiro, tanto para efetuar o trabalho mecânico quanto para o trabalho elétrico e calórico, para lograr a evaporação do suco de cana, normalmente chamado de guarapo. A descrição do processo pode ser acompanhada utilizando a Figura 10, localizada ao final deste capítulo.

O processo açucareiro dentro dos engenhos começa pelo tandem, que é uma sucessão de moinhos por onde entra a cana para ser moída. Nos engenhos cubanos, a cana sofre entre quatro e oito moídas sucessivas.

O suco que se obtém no primeiro moinho é levado para o segundo moinho, e assim sucessivamente até lograr uma extração total do suco contido no bagaço.

Do processo de moído no tandem são obtidos dois produtos: O bagaço e o guarapo<sup>16</sup>. Estes, por sua vez, são submetidos a um processo de transformação, o bagaço para gerar a energia suficiente para o tratamento do guarapo, e o guarapo para obter a açúcar como produto final.

#### **3.1 TRANSFORMAÇÃO DO BAGAÇO**

O bagaço é um resíduo fibroso que contém 50% de umidade, quantidade de água grande demais para torna-se um bom combustível, mas ainda assim é utilizado no processo açucareiro dado que é o resíduo mais abundante.

O bagaço, depois de passar por um tratamento de secado a vapor, entra na caldeira para serem queimado e liberar uma energia que produz um

---

<sup>16</sup> Suco extraído da cana ao ser passada por um processo de moído. Também chamado de suco de cana.

vapor a 80 at e 485°C com uma entalpia de 803,5. Este vapor produzido vai até uma turbina, expande-se com umas pequenas perdas ficando a uma pressão de aproximadamente 76 at e 480°C, e produz energia elétrica, que neste caso seria de 7457 kW.

A pressão de saída da turbina, depois de produzida a energia elétrica, é 4,2 at. Pressão com a qual a turbina passa o vapor ao permutador, ou pre- evaporador, para concentrar-se nesse permutador, o guarapo que vem dos moinhos (com uma porcentagem de água de 70%) e leva-lo até converti-se em açúcar. Esta concentração é lograda através de várias transformações, chamadas de múltiplos efeitos ou efeitos I, II, III, e IV.

A partir deste momento, é dada simultaneamente, a transformação do bagaço na caldeira e transformação do guarapo no permutador.

### 3.2 TRANSFORMAÇÃO DO GUARAPO

O guarapo é um fluido que contém aproximadamente 10 ou 15% de seu peso em açúcar, 70% em água, e a porcentagem restante corresponde às meles ou outras componentes adicionais que ao final serão convertidas em meles.

No permutador acontece a primeira evaporação do guarapo produzindo o vapor vegetal que entra no primeiro efeito com uma pressão de 3,11 at junto com o suco resultante dessa evaporação. Neste ponto, evapora-se novamente o suco e assim sucessivamente. Depois do segundo efeito as pressões de vapor são pressões de vazio menores que a pressão atmosférica.

À saída do quarto efeito, o suco resultante, que é na realidade uma combinação de mel e açúcar em maior densidade e pouca água, ou em outras palavras, sacarose, vai para os tachos<sup>17</sup>. Os tachos recebem uma

---

<sup>17</sup> Tanque de acero de seção em U que permite manter a massa em um movimento lento e contínuo.

parte do vapor do segundo efeito para aquecer a sacarose e logo aplicar-lhe os pontos de concentração para obter um aumento no tamanho dos cristais.

A aplicação dos pontos de concentração consiste em adicionar à sacarose um composto de álcool e açúcar moída. Cada ponto de açúcar diluído em álcool cria o chamado ponto de sobresaturação, conseguindo aumentar o tamanho dos cristais da sacarose.

Na "cristalização", que tem uma duração entre uma faixa de 60 a 90 min, é preciso diminuir de forma muito lenta a quantidade de calor que o processo estava recebendo para evitar o movimento intermolecular. Assim, a sacarose concentra-se ao redor de determinados pontos de concentração logrando o aumento dos cristais, momento no qual o puntista<sup>18</sup> abre o tacho e passa o produto processado (mel com cristais maiores) para a centrífuga.

O efeito de rotação e alta velocidade imposta pela centrífuga, faz com que a mel escape por um pano que ela tem no seu interior retendo somente os cristais. O processo termina extraíndo estes cristais para formar com eles o que chamamos de açúcar.

Em resumo, o engenho açucareiro desde o ponto de vista energético utiliza o bagaço como combustível para gerar vapor, esse vapor gera a energia suficiente para mover os moinhos, as bombas e dar eletricidade ao batey<sup>19</sup> e de ali, o vapor de escape com muito menos entalpia, vai a cozinhar o guarapo. Inicialmente cozinha o guarapo bem diluído e posteriormente cozinha o guarapo cru. Em outras palavras, o engenho possui dois níveis da pressão fundamentais, o chamado de alta, que sai da caldeira, e o de baixa, que sai da casa da caldeira.

---

<sup>18</sup> Pessoa com experiência empírica para classificar e testar os cristais de açúcar e determinar o seu crescimento ótimo.

<sup>19</sup> Palavra popular que representa a localização física da moradia dos trabalhadores da usina açucareira e que normalmente encontra-se em terrenos próximos a ela.

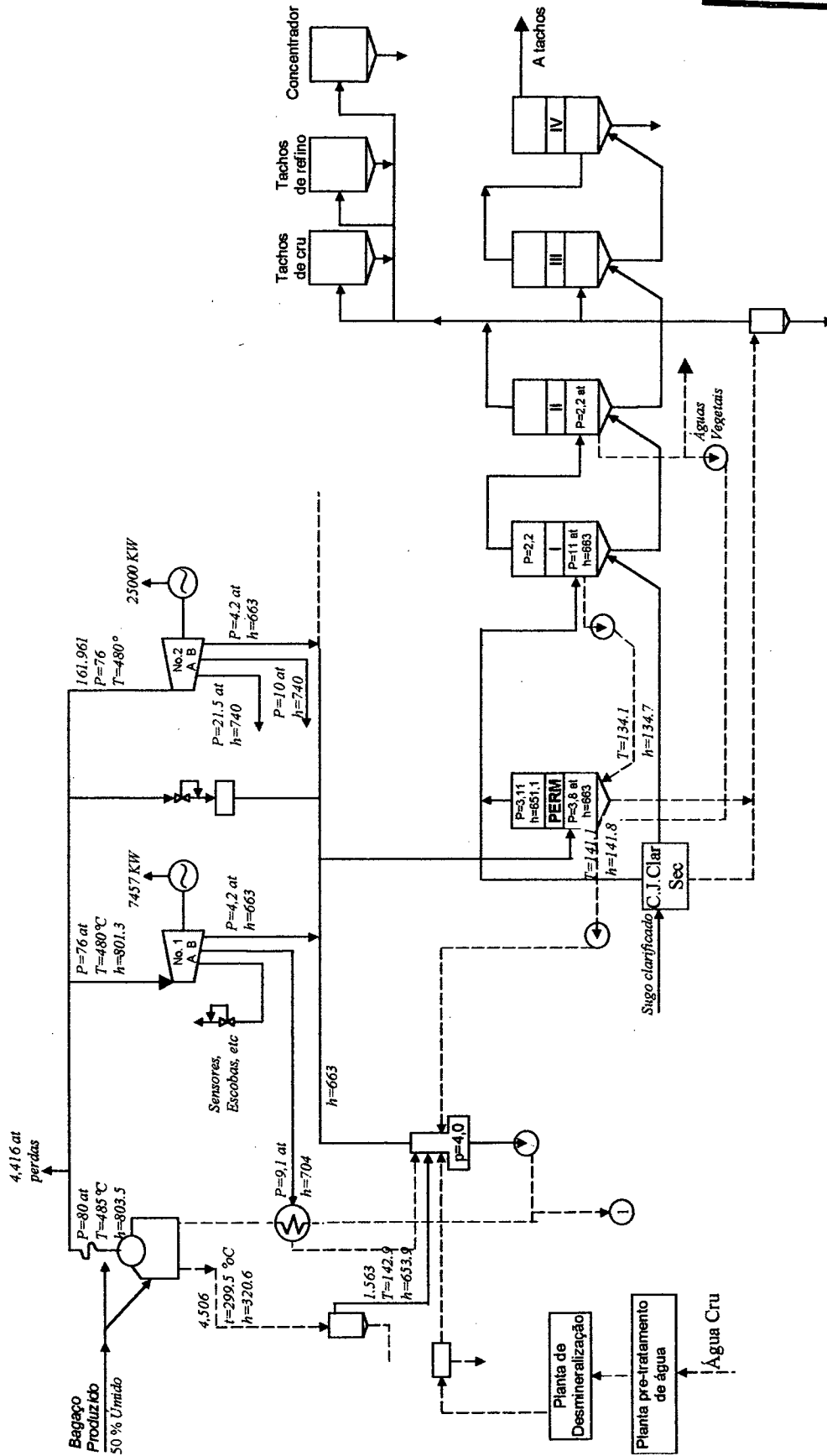


Figura 10. O processo açucareiro

## 4. A CALDEIRA

Este capítulo explica o funcionamento de uma caldeira comum, como elemento principal de um ciclo de geração de vapor. Esta caldeira tem sido tomada como referência em o nosso estudo devido a falta de informação sobre as caldeiras dos engenhos açucareiros. Mas a análise e soluções apresentados para este tipo de caldeiras podem ser aplicados posteriormente nas caldeiras de maior porte, ou seja, nas caldeiras próprias dos engenhos açucareiros.

### 4.1 CICLO RANKINE DE POTÊNCIA DE VAPOR

O ciclo rankine é o mais eficiente ciclo de potência de vapor, já que permite levar a água ao estado de vapor sobreaquecido, reduzindo em grande medida o conteúdo de umidade antes de ingressar às turbomáquinas, reduzindo a erosão que sobre elas produzem as partículas de líquido. Esta vantagem apresenta-se nas plantas de vapor com geradores que dispõem de sobreaquecedores.

Na Figura 11 podem apreciar-se os componentes de uma planta de vapor e o diagrama de temperatura contra entropia (T-S) do ciclo rankine.

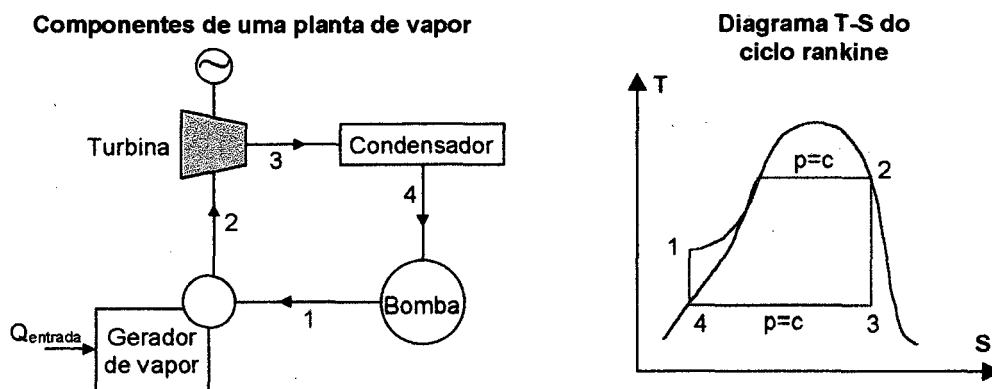


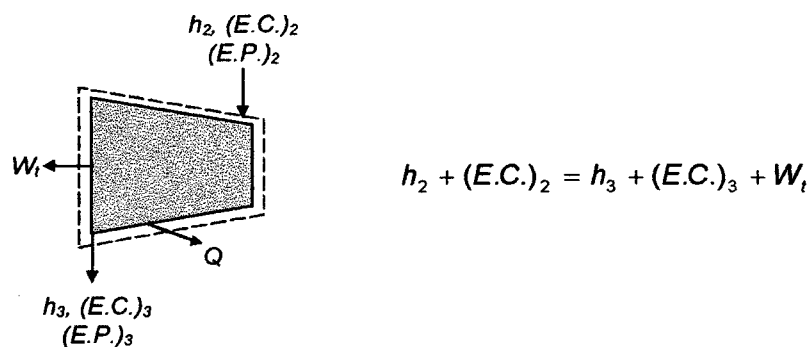
Figura 11. Planta de vapor e diagrama T-S do ciclo rankine

Iniciando no estado 1 do ciclo, a água entra no gerador de vapor como um líquido subesfriado à pressão  $p_1=p_2$ , ou seja, o processo realiza-se a

pressão constante. No gerador de vapor, o calor eleva a temperatura da água até converti-la em um líquido saturado. Neste ponto a temperatura mantém-se constante e o calor adicional é utilizado no ciclo 2 para mudar o estado da água, de líquido saturado a vapor saturado.

**Turbina:** Na turbina, que encontra-se acoplada a um gerador de eletricidade encarregado de alimentar outros dispositivos e aparelhos do processo, o vapor saturado, logo de produzir essa energia, perde pressão para logo ser passado ao condensador.

O esquema da turbina e seu balanço de energia são apresentados na Figura 12.



**Figura 12. Turbina de vapor e seus termos de energia**

Onde:

$h_2$ : Entalpia do vapor à entrada da turbina

$h_3$ : Entalpia do vapor à saída da turbina

$(E.C.)_2$ : Energia cinética à entrada da turbina

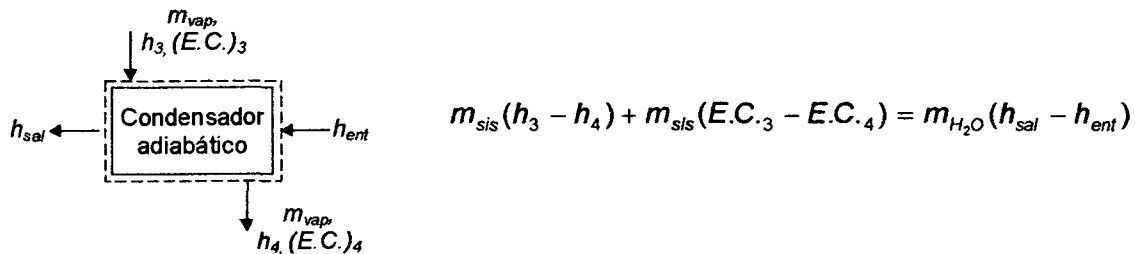
$(E.C.)_3$ : Energia cinética à saída da turbina

$W_t$ : Trabalho realizado pela turbina

**Condensador:** Nas usinas açucareiras a água é reciclada, por esta razão o vapor saturado depois de cumprir seu objetivo, tende a converte-se em água novamente. Assim, a seguinte forma de transferência de energia se dá no condensador. O condensador é um intercambiador de calor, no seu interior o vapor passa pelo exterior de uns tubos no interior dos quais encontra-se circulando o água de esfriamento, recebendo esta o calor cedido pelo vapor. Neste ponto diminui a eficiência do ciclo pois a entalpia

do vapor, que é parte do conteúdo de energia ganhado no gerador de vapor, transfere-se à água de esfriamento.

O diagrama da transferência e o balanço da energia do condensador mostra-se na Figura 13.



**Figura 13. Condensador adiabático**

Onde:

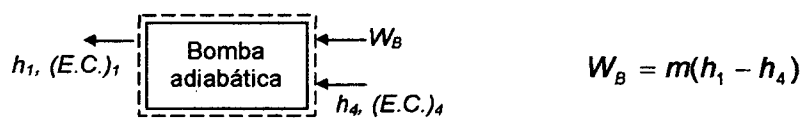
$m_{sis}$ : Fluxo de vapor

$m_{H_2O}$ : Fluxo de água de refrigeração

$h_{ent}$ : Entalpia de entrada para a água de refrigeração

$h_{sal}$ : Entalpia de saída para a água de refrigeração

**Bomba:** A bomba eleva a pressão de água à mesma pressão do gerador de vapor. Na Figura 14 mostra-se o esquema da bomba, indicando os termos de energia, mas aqui também se desprezam os termos de energia potencial, devido a que tanto a bomba quanto o condensador consideram-se adiabáticos. Também apresenta-se o balanço da energia para esta máquina, no qual são consideradas a energia cinética e potencial essencialmente iguais.



**Figura 14. Bomba adiabática**

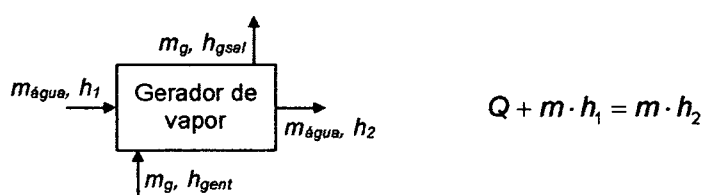
Onde:

$W_B$ : Trabalho da bomba

$m$ : Fluxo de água



**Gerador de vapor:** A função desta máquina térmica é produzir vapor, a partir da água líquida, por meio da transferência de calor. A água líquida entra ao tambor principal a uma temperatura menor que a de saturação. No caso de caldeiras flamotubulares, o calor é entregue à água por meio de uns tubos inseridos nela, no interior dos quais encontra-se a chama e os gases de combustão quentes gerados pela queima de algum combustível. A Figura 15 ilustra esquematicamente este conceito e o balanço de energia, considerando unicamente à água, segundo uma análise da primeira lei. Aqui  $Q$  representa o calor transferido à água.



**Figura 15. Gerador de vapor (caldeira)**

#### **Eficiência do ciclo rankine:**

A eficiência do ciclo rankine avalia-se como o quociente do trabalho neto produzido entre o calor gerado para produzi-lo. O trabalho neto produzido corresponde ao trabalho da turbina menos o trabalho gastado pela bomba, e o calor gerado corresponde ao produzido na caldeira. Estes conceitos ficam estabelecidos na seguinte expressão, onde  $n_{rank}$  representa a eficiência do ciclo rankine.

$$n_{rank} = \frac{W_{net}}{Q_{net}} = \frac{W_t - W_B}{m(h_2 - h_1)}$$

## **4.2 O GERADOR DE VAPOR**

O papel do gerador de vapor é cumprido pela caldeira que, no seu conceito mais simples, é um recipiente fechado que gera vapor de água a pressões superiores à atmosférica, absorvendo parte do calor que produz a combustão de algum combustível. As caldeiras têm dois usos principais: Obtenção de vapor para força, processos industriais ou calefação; e obtenção de água quente para calefação ou uso geral.

As caldeiras projetam-se para transmitir calor procedente de uma fonte externa a um fluido contido dentro da mesma caldeira, o qual geralmente é água; este líquido deve encontra-se dentro do equipamento com as medidas de segurança exigidas; assim, seu nível de pressão deve ser elevado ao nível que existe no interior da caldeira. A unidade que contém o fluido denomina-se vaporizador.

### 4.3 CLASSIFICAÇÃO DAS CALDEIRAS

#### 4.3.1 De acordo com a pressão<sup>20</sup>

**Caldeiras de calefação de baixa pressão:** Abrange as caldeiras de vapor que não excedem  $1,05 \text{ kg/cm}^2$  e as caldeiras para água quente que operam a pressões máximas de  $11,25 \text{ kg/cm}^2$ .

**Caldeiras para geração de força:** Abrange as caldeiras cujas condições de operação superam os limites das caldeiras de calefação de baixa pressão.

#### 4.3.2 De acordo com o conteúdo dos tubos

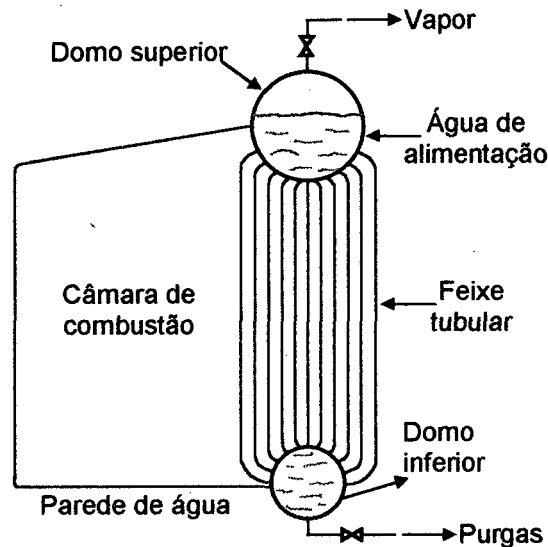
**Aquotubulares:** Nas caldeiras aquotubulares a água circula internamente pelos diversos tubos de pequenos diâmetros integrados entre si, na forma de paredes d'água ou de feixes tubulares. Enquanto as paredes d'água situam-se na câmara de combustão, onde prevalece a transferência de calor por radiação, os feixes tubulares são ligados pelos tubulões separadores superiores e o tubulão inferior, sendo que os feixes tubulares estão localizados na parte posterior da caldeira, onde a troca de calor ocorre por convecção e por radiação gasosa.

As caldeiras aquotubulares têm como características técnicas as altas temperaturas e altas pressões de trabalho, além de permitir a adaptação dos componentes necessários para aumentar o rendimento térmico. O uso destas caldeiras é muito abrangente, desde pequenas indústrias até grandes

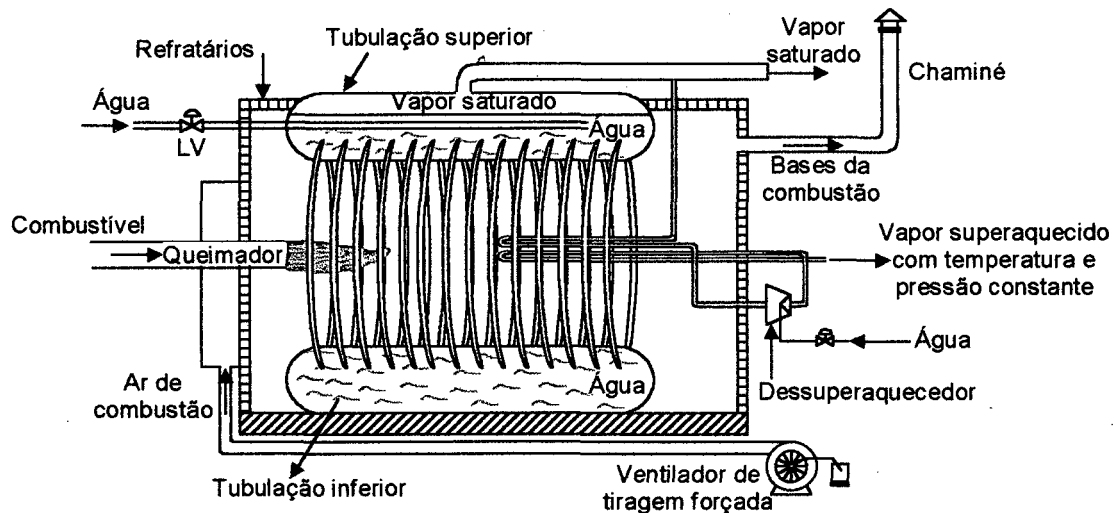
---

<sup>20</sup> Classificação de acordo com as normas apresentadas pelo "código de caldeiras e tanques de pressão" da Associação Americana de Engenheiros Mecânicos – ASME.

centrais termelétricas. A Figura 16 e a Figura 17 mostram o esquema de funcionamento de uma caldeira aquotubular simples, com dois tubulões, utilizando óleo, com baixo ponto de fluidez, como combustível.



**Figura 16. Esquema simples de caldeira aquotubular (1)**



**Figura 17. Esquema simples de caldeira aquotubular (2)**

**Flamotubulares:** É quase certo que este foi o primeiro tipo de caldeira construída, sendo também chamada de tubo-de-fogo, tubo-de-fumaça ou pirotubular, devido aos gases quentes decorrentes da combustão que circula internamente pelos tubos em um ou mais passes, enquanto a água permanece externamente em contato com os tubos.

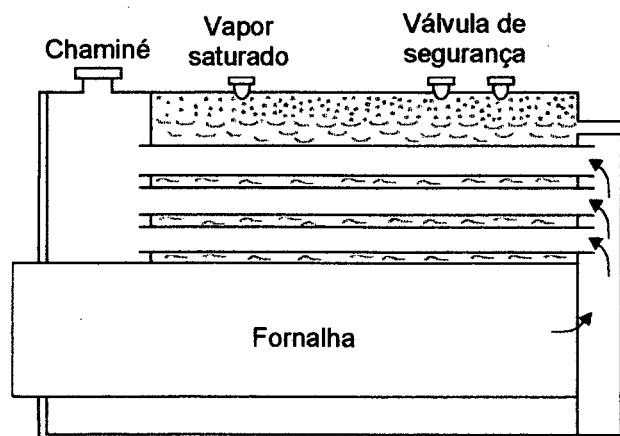
As caldeiras flamotubulares são restritamente utilizadas para pequenas produções de vapor, com pressões inferiores a 1,5 kPa (15 bar) ou capacidades inferiores a 15 t/h de vapor saturado, e limitada apenas ao uso de vapor saturado.

Por outro lado, apesar destas limitações, é o tipo de caldeira mais simples, bastante utilizada em locomotivas, navios, hospitais, hotéis, entre outros, e mesmo com o surgimento de caldeiras mais modernas, essas caldeiras continuam em pleno uso.

Após alguns melhoramentos, essa caldeira passou a denominar-se caldeira escocesa. As caldeiras flamotubulares ainda podem ser classificadas em horizontais e verticais.

Estas caldeiras são construídas de forma tal que a água circula externamente aos vários tubos, montados entre espelhos, formando um único feixe tubular. Os gases quentes provenientes da câmara de combustão circulam internamente pelos tubos, em dois o mais passes, visando aumentar o rendimento térmico, e em seguida deslocam-se em direção à chaminé por onde são lançados ao meio ambiente.

A primeira passagem dos gases quentes ocorre na própria fornalha onde predomina a troca de calor por radiação, enquanto na segunda passagem os gases são forçados a deslocar-se por dentro dos tubos, pela ação combinada de convecção e radiação gasosa. A Figura 18 mostra o esquema de uma caldeira tubular de duas passagens.



**Figura 18. Esquema caldeira flamotubular**

### 4.3.3 De acordo com o tipo de combustão

O seu abastecimento de calor pode ser gerado por:

- **Fogo:** São caldeiras que recebem o calor aplicado da combustão de algum produto combustível, tais como carvão betuminoso, antracito, carvão em pó, gás, lenha e bagaço ou outros produtos de desperdício.
- **Gases quentes:** Provem do desperdício de reações químicas.
- **Aplicação de energia elétrica**
- **Uso de energia nuclear**

## 4.4 PARTES INTEGRANTES DA CALDEIRA

**Lar:** Lugar onde efetua-se a combustão do combustível. Precisa de um elemento que permita a expulsão dos gases da combustão, que pode ser uma chaminé, um ventilador ou ambos.

**Câmara de vaporização:** Também conhecido como Domo, é o recinto onde encontra-se a água a ser evaporada. As paredes deste recinto estabelecem a fronteira entre o Lar e o Domo, permitindo desta maneira a transferência de calor produzido da combustão gerada no Lar para a água interior do Domo.

**Galerias:** Conduitos pelos que circulam os gases da combustão, cedendo calor à água.

No caso de caldeiras flamotubulares, o Domo, além de conter água, contém as galerias ou tubos pelos quais circulam as chamas e os gases produzidos na combustão. O exterior dos tubos é a fronteira termodinâmica para a transferência de calor.

No caso de caldeiras aquotubulares, as galerias confundem-se com o Lar, sendo os tubos o receptáculo do fluido.

**Equipamentos:** Os constituem os sistemas que permitem gerar o processo termodinâmico. Eles são especificados a continuação.

- **Queimador:** É o equipamento onde realiza-se a combustão do combustível para gerar o calor necessário para evaporar a água. Está composto por um transformador de ignição, uma bomba de combinação combustível-água e um sistema de controle que governa o funcionamento do queimador.
- **Bomba de alimentação de água:** Equipamento que impulsa o fluxo de água para o receptáculo ou câmara de vaporização da caldeira.
- **Controles:** Estão conformados por dispositivos tais como o pressóstato de vapor, o medidor do nível de água, o medidor de temperatura do combustível, o sensor do fluxo de ar, o medidor de pressão do petróleo e o detetor de chama. Todos eles medem e supervisionam as faixas de funcionamento de cada uma das variáveis que intervêm no funcionamento da caldeira. Estes dispositivos estão conectados a um sistema de controle principal que aciona a caldeira.

**Acessórios:** Eles são os canos necessários para a circulação do combustível, água e vapor, as válvulas e diafragmas para controlar o fluxo dos mesmos e os sistemas opcionais que melhoram a eficiência da caldeira, tais como o sobreaquecedor, o poupador e o tratador de água.

#### 4.5 PROCESSO DE VAPORIZAÇÃO

Na conversão da água, de seu estado líquido ao estado gasoso, ela passa por três estados termodinâmicos: líquido comprimido, vapor úmido e vapor sobreaquecido.

Inicialmente a água encontra-se como líquido comprimido, ao fornecer-lhe calor, chamado de calor sensível, aumenta a sua temperatura até alcançar o ponto de ebulição com uma temperatura de saturação, passando a água ao estado de vapor úmido. A temperatura no ponto de ebulição, a pressão de uma atmosfera, é de 100°C. Se a pressão no sistema aumenta, a temperatura de saturação também aumenta.

No momento em que a água alcança o ponto de ebulição, a temperatura deixa de aumentar e o calor adicionado posteriormente,

chamado de calor latente, não aumenta nem a pressão nem a temperatura do vapor, somente aumenta o seu volume específico. Nesta etapa começa-se a gerar vapor na caldeira existindo dentro dela uma combinação de vapor e líquido, em outras palavras, vapor úmido.

A maioria das caldeiras trabalham à pressão e temperatura de saturação, embora também existem caldeiras que aquecem o vapor até sobrepassar esta temperatura, produzindo vapor sobreaquecido.

#### 4.6 PROCESSO DE COMBUSTÃO

O processo de combustão consiste na oxidação dos constituintes do combustível, como consequência da elevação da temperatura destes em presença do oxigênio. Como a maioria dos processos realizam-se com ar e não com oxigênio, este é um dos elementos participantes na combustão e costuma-se de chamar "comburente". O outro elemento participante é o "combustível" que, no caso das caldeiras, é comum o uso dos hidrocarbonetos líquidos como o petróleo, embora também sejam usados hidrocarbonetos gasosos como o gás propano. A elevação da temperatura no processo de combustão é normalmente proporcionada pela geração de uma chispa em presença de combustível e ar.

O processo de combustão é um processo reativo, o qual pode ser formulado com uma equação para descreve-lo. Durante o processo de combustão, a massa total de cada elemento permanece inalterada de modo que no estudo estequiométrico da reação aplica-se a principio de conservação da massa.

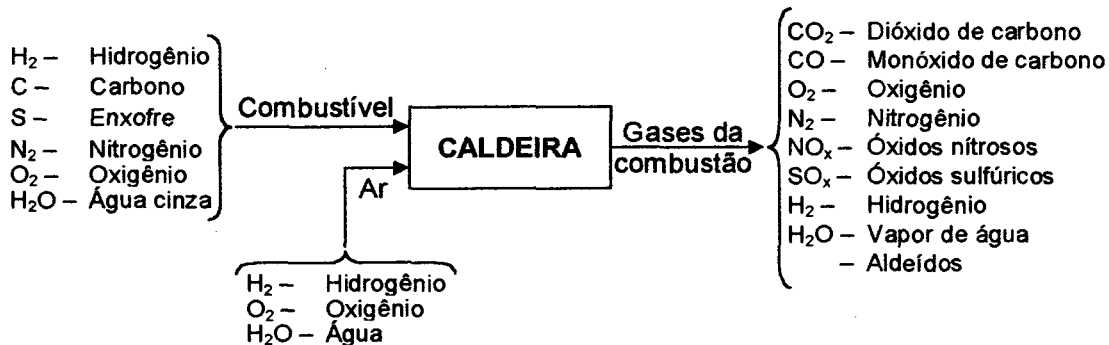
Nas equações de reação também deve considera-se o nitrogênio que contém o ar, podendo desprezar os restantes gases inertes que o conformam. A proporção na que intervém o nitrogênio nas reações, é igual à que guarda o nitrogênio com o oxigênio na composição volumétrica do ar. Sendo esta 21% de nitrogênio e 79% de oxigênio, dá como resultado:

$$79/21 = 3,76 \text{ moles de nitrogênio por mol de oxigênio}$$

Na combustão ocorre a ignição através da introdução de uma mecha ou troca no combustível, ou ainda, por meio de uma centelha ou faísca entre dois eletrodos ligados a um transformador de alta tensão ou bobina semelhante ao sistema de ignição do motor de combustão interna de automóveis.

Uma outra característica do processo de combustão é que as reações mais importantes quanto ao aspecto da liberação de calor, se verificam em fase gasosa. Durante o processo, existem reações intermediárias instáveis que atuam sobre as formas sólidas e líquidas dos combustíveis desdobrando-as em compostos cada vez menos complexos até a formação de CO e H.

A Figura 19 fornece esquematicamente o processo de combustão com a formação dos gases de combustão, que são chamados de produtos da combustão, transportando calor que em contato com água, a transformam em calor.



**Figura 19. Processo de combustão em geradores de vapor**

Quando toda a massa dos constituintes combustíveis, ou seja C,  $H_2$  e S, reagirem com o oxigênio do ar para formar tão somente  $CO_2$ ,  $H_2O$  e  $SO_2$ , a combustão é denominada de combustão completa. Nesta, o hidrogênio livre, H, combina-se diretamente com o carbono livre, C, a fim de formar hidrocarbonetos leves do tipo  $CH_4$  ou pesados,  $C_2H_4$ , que são facilmente inflamáveis e queimam com o oxigênio do ar formando  $CO_2$  e  $H_2O$ .

A combustão é considerada incompleta quando nos gases da combustão, também chamados de fumos, comparecem além do gás



carbônico, gás sulfuroso, oxigênio, nitrogênio, e vapor de água, o monóxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e até o próprio carbono livre, ambos responsáveis por perdas consideráveis de calor e o último pelo escurecimento dos gases que se escoam pela chaminé desprendendo a chamada fuligem.

Para se obter uma combustão completa é necessário, antes de tudo, fornecer suficiente quantidade de ar, isto é de oxigênio. Uma reação química qualquer só ocorre quando as moléculas dos reagentes encontram-se nas proporções exatas, posições relativas corretas e velocidade, associada a energia, adequada para que haja uma mudança estrutural que é a reação (PERA, 1994)<sup>21</sup>.

Uma combustão naturalmente está sujeita às mesmas circunstâncias, sendo que o produto desejado é a energia liberada, que é máxima quando garante-se a transformação do combustível nos produtos finais,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Devido a granulometria do combustível, a seu estado de divisão, ao sistema de injeção de ar e o próprio aparelho de combustão, dificilmente será obtido o aproveitamento máximo do combustível caso se forneça somente a quantidade de ar exata, denominado de ar teórico. Esse ar teórico é determinado conhecendo-se a composição do combustível, calculado com base na estequiometria da combustão e expresso em  $\text{Var}^t$ , volume de ar teórico.

Na prática precisa-se mais oxigênio para efetuar a oxidação total dos reativos. Requer-se então de um excesso de ar, pois cada gota de combustível deve achar-se rodeada por um número de moléculas de oxigênio maior que o necessário para assegurar a oxidação de todas as moléculas do hidrocarboneto. Esta quantidade de ar em excesso, denominada de  $\text{Var}^r$ , volume de ar real, geralmente expressa-se como uma porcentagem do ar teórico.

---

<sup>21</sup> PERA, Hildo. **Geradores de vapor de água – caldeiras**. Dep. De Eng. Mecânica da universidade de São Paulo. São Paulo: 1994.

Se o excesso de ar é insuficiente para permitir a combustão completa, não todo o carbono se oxidará na forma de dióxido de carbono mas um aparte resultará de monóxido de carbono. Em geral, quando existe uma quantidade consideravelmente menor de ar teórico, aparecerão hidrocarbonetos não queimados nos produtos, os quais produzem o fuligem ou fumaça preta que em ocasiões expulsam as chaminé.

Define-se então um o fator de excesso de ar,  $M$ , expresso em porcentagem:

$$M = \frac{Var^t}{Var^r}$$

Há valores de  $M$  estabelecidos pela prática para cada tipo de equipamento de combustão e para cada combustível. A Tabela 2 fornece alguns exemplos.

**Tabela 2. Valores práticos do fator de excesso de ar**

Combustível	Tipo de fornalha	$M$
Carvão moído	Ciclônica	1,10-1,15
Carvão pulverizado	Integralmente irradiada	1,15-1,20
Óleo combustível	Queimador de óleo de baixa pressão de ar	1,30-1,40
Óleo combustível	Queimador de pulverização mecânica	1,20-1,25
Óleo combustível	Queimador de pulverização mecânica com vapor auxiliar	1,05-1,15
Lenha	Grelha plana e ar natural	1,40-1,50
Bagaço	Grelha plana e ar natural	1,50-2,00

Algumas considerações sobre o excesso de ar devem ser levadas em conta, como por exemplo, se for introduzido um excesso de ar muito grande a temperatura da combustão diminui (WYLEN e SONNTAG, 1976)<sup>22</sup>. Quanto mais elevada for essa temperatura mais rápida será a gaseificação do combustível e menor o risco de que uma parte dos gases não chegue a se inflamar. Além disso, uma queda de temperatura da combustão corresponde a uma diminuição da produção da caldeira pelo fato de ser a diferença de temperatura entre os gases e água da caldeira menos elevada proporcionando diminuição da transmissão de calor.

<sup>22</sup> WYLEN, Gordon J. Van e SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1976.

Outra conseqüência é o aumento da quantidade de gás pela superabundância de ar e conseqüentemente perda pelo calor sensível dos gases que se escapam pela chaminé. Em compensação, para temperaturas muito altas, a combustão começa a se tornar incompleta como conseqüência da decomposição do vapor de água e do gás carbônico.

Portanto, existem valores ótimos para excesso de ar que devem ser utilizados para que não ocorram perdas e combustão incompleta. Esse valor depende principalmente do tipo de combustível, tipo de queimador, características e preparação do combustível, tipo de câmara de combustão, carga e outros fatores ligados ao controle da combustão (BEGA, 1989)<sup>23</sup>.

Uma análise dos gases na saída da chaminé poderá fornecer métodos para se determinar a quantidade real de ar que deve ser fornecida em um processo de combustão. Em uma combustão completa os gases da combustão contém, tendo sido utilizado excesso de ar, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Assim, pode-se controlar o excesso de ar através da utilização de instrumentos analisadores como o parêlo Orsat, Fyrite ou ainda analisadores contínuos que podem fornecer teores de CO<sub>2</sub>, CO e O<sub>2</sub> em volume presentes nos gases de combustão.

## 4.7 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

### 4.7.1 Os combustíveis

Um dos elementos responsáveis diretamente pelo rendimento térmico de uma caldeira é o combustível utilizado, associado ao controle da sua combustão. De uma maneira geral, pode-se defini-lo como toda substância natural ou artificial, encontrada na natureza no estado sólido, líquido ou gasoso, capaz e reagir com o oxigênio do ar liberando calor e luz.

Os tipos de combustíveis sólidos mais utilizados em caldeiras são a turfa e a lenha obtida de eucalipto e de pinho. A lenha tem a vantagem da ausência quase que total de enxofre com P<sub>Cl</sub> em torno de 4.100 Kcal/Kg, porém, é um combustível sujeito a escassez contínua.

---

<sup>23</sup> BEGA, Egidio Alberto. **Caldeiras – instrumentação e controle**. Rio de Janeiro: JR. Editora técnica, 1989.

Entre os combustíveis líquidos destaca-se o petróleo e seus derivados, como óleo diesel, gasóleo e o óleo combustível. Desses, o mais utilizado é o óleo combustível que decorre do resíduo final líquido da destilação do petróleo, sendo obtido com alto ponto de fluidez, APF, ou baixo ponto de fluidez, BPF. Para a ignição pode-se utilizar o óleo diesel e manter a operação com óleo combustível. Isto é feito porque o sistema de combustão para o diesel é bastante simples devido a sua facilidade para pulverização, não havendo necessidade de aquecimento prévio, e os combustores funcionam geralmente a pressão mecânica.

O óleo combustível com BPF, devido a sua elevada faixa de viscosidade nas condições ambientes, deve ser aquecido até uma temperatura que situa-se na faixa de 95 a 130 °C antes do combustor reduzindo assim a viscosidade a valores ótimos para atomização. Este óleo é armazenado a temperatura ambiente ou com aquecimento até a temperatura de 65 °C, para isso, instalam-se serpentinas no interior dos tanques de armazenamento.

Atualmente nas unidades geradoras industriais, o óleo combustível é o mais utilizado devido principalmente a fatores atraentes como oferta abundante, suprimento seguro, facilidade de manuseio e estocagem, além de proporcionar uma operação que pode ser completamente automatizada devido ao avanço tecnológico dos aparelhos de queima e controle da combustão. A Tabela 3 fornece algumas características do óleo combustível.

**Tabela 3. Características do óleo combustível com BPF**

<b>Composição</b>	<b>Tipo A - BPF</b>
Carbono	81,9 %
Hidrogênio	11,1 %
Enxofre	5,0 %
Água e sedimentos	2,0 %
TOTAL	100 %
PCS	10.238 Kcal/Kg
PCI	9.683 Kcal/Kg

Todos os tipos de combustíveis podem, de uma maneira geral, possuir em sua constituição os seguintes elementos químicos: Carbono (C),

hidrogênio (H), enxofre (S), nitrogênio (N), oxigênio (O), materiais voláteis, água e sais minerais.

O carbono e hidrogênio são os maiores responsáveis pela formação de calor no combustível sendo que o enxofre participa com pequena parcela. Teores crescentes desses elementos aumentam o poder calorífico do combustível. Observando a pode-se comprovar o dito:

- O carbono na reação  $C + O_2 \Rightarrow CO_2$  libera 8.100 Kcal/Kg
- O hidrogênio na reação  $H_2 + 1/2 O_2 \Rightarrow H_2O$  libera 33.900 Kcal/Kg
- O enxofre na reação  $S + O_2 \Rightarrow SO_2$  libera 2.214 Kcal/Kg

Um agravante do enxofre é que ele ataca as partes metálicas mais frias do gerador localizadas geralmente no pré-aquecedor de ar. Os demais componentes dos combustíveis não reagem com o oxigênio e são completamente inúteis e até prejudiciais. Os sais minerais, por exemplo, aparecem praticamente somente nos combustíveis sólidos formando as cinzas.

#### 4.7.2 O poder calorífico

O conhecimento das propriedades de um combustível é essencial não só na elaboração de um projeto como também na operação das unidades geradoras de vapor. Sendo assim, pode-se relacionar as propriedades físicas mais comuns que o identificam:

- Poder calorífico inferior,  $P_{CI}$
- Poder calorífico superior,  $P_{CS}$
- Teor de materiais voláteis,  $v$
- Teor de enxofre,  $s$
- Teor de cinzas,  $z$
- Teor de umidade,  $w$
- Temperatura de fusão de cinzas
- Peso específico

- Ponto de fluidez
- Composição química dos elementos

Quando realiza-se o processo da combustão transforma-se a energia química em energia térmica, levando em conta que esta transformação de energia provoca a mudança da substância no transcurso do processo. Deve existir uma relação entre o conteúdo de energia dos produtos da combustão e o conteúdo dos reativos. A entalpia de formação permite quantificar a quantidade de energia liberada no processo.

A entalpia de formação permite estabelecer o conteúdo de energia dos componentes que intervêm em uma reação. Por convenção assume-se que todos os elementos que são considerados como moléculas que não formam compostos são nulos à pressão de uma atmosfera e 25°C. As entalpias de formação dos compostos são negativas e encontram-se tabuladas em tabelas para 25°C e 1 at. Elas podem-se interpretar como o nível de energia necessário para a geração composto. Aplicando a primeira lei da termodinâmica a um processo reativo temos:

$$Q + h_R = h_P \quad h_R = \sum(n_i)(h_i) \quad h_P = \sum(n_j)(h_j)$$

Onde  $h_R$  e  $h_P$  são a somatória das entalpias de formação dos reativos e dos produtos respectivamente, e são dadas nas unidades  $\text{kJ/kg}_{\text{mol}}$ .

$n_i$ ,  $n_j$  são o número de moles dos reativos e os produtos respectivamente, e  $h_i$ ,  $h_j$  são suas respectivas entalpias de formação.

A entalpia de combustão é a diferença entre as entalpias de formação dos produtos e as entalpias de formação dos reativos. A diferença de  $Q$ , as unidades da entalpia de combustão se dão em  $\text{kJ/kg}$ , para o qual deve dividir-se esta diferença entre o peso molecular. A entalpia de combustão também chama-se de poder calorífico do combustível e expressa a relação dada na seguinte equação:

$$P_C = \frac{h_P - h_R}{m_{\text{comb}}}$$

A entalpia de combustão depende da equação de reação e é avaliada com o ar teórico. Como a equação de reação para cada combustível é única, existe somente um poder calorífico para cada combustível.

Y é precisamente este poder calorífico a principal propriedade dos combustíveis, devido à sua importância na análise da transmissão de calor e água, é o poder calorífico. É definido como quantidade de calor liberada pela unidade de massa ou volume do combustível submetido à combustão completa. É expresso em Kcal/Kg para combustíveis sólidos e Kcal/m<sup>3</sup> para gases.

A água contida no combustível em forma de umidade se incorpora nos produtos da combustão produzindo vapor. Na operação normal da caldeira esse vapor é eliminado para a atmosfera pela chaminé transportando ainda certa quantidade de calor, não utilizado. Durante a determinação do poder calorífico, esse vapor já se condensa, incorporando seu conteúdo térmico ao valor do poder calorífico. Sendo assim, define-se dois tipos diferentes de poder calorífico para o combustível: poder calorífico superior,  $P_{CS}$ , e poder calorífico inferior,  $P_{CI}$ .

O  $P_{CS}$  representa a quantidade total de calor liberado pelo combustível incluindo o vapor de água. O  $P_{CI}$  corresponde ao mesmo calor anterior descontado o calor devido ao vapor de água.

Conseqüentemente, na prática pode-se usufruir somente do poder calorífico inferior do combustível. A quantidade de calorias não aproveitada é cerca de 540 por cada quilo de água evaporada. A Tabela 4 indica o poder calorífico de alguns elementos.

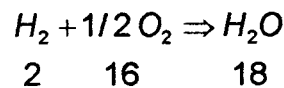
**Tabela 4. Poder calorífico dos elementos**

Substância	Fórmula	PCS [Kcal/Kg]	PCI [Kcal/Kg]
Carbono	C	8.100	8.100
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	33.960	28.702
Enxofre	S	2.214	2.214
Monóxido carbono	CO	2.419	2.419
Metano	CH <sub>4</sub>	13.279	11.965
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	14.405	12.410
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12.044	11.089
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	12.034	11.284
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	11.699	10.948

Matematicamente, portanto, pode-se exprimir a relação entre os dois tipos de poder calorífico como:

$$P_{Cl} = P_{CS} - \text{Calor do vapor água}$$

Admitindo 600 Kcal/Kg, o valor arredondado da entalpia do vapor de água à pressão atmosférica. Isso significa que o poder calorífico superior de um combustível diminui de aproximadamente 600 Kcal/Kg por cada Kg de água produzida pela combustão. Considerando um combustível com um teor de unidade,  $w$ , e teor de hidrogênio,  $h$ , a seguinte reação química



Implica que 1 Kg de hidrogênio forma 9 Kg de água. Assim, o calor contido no vapor de água que sai pela chaminé será igual a  $(9h + w) \cdot 600$  e a relação entre os dois tipos de poder calorífico se modifica para:

$$P_{Cl} = P_{CS} - (9h + w) \cdot 600$$

#### 4.7.3 Perdas e rendimento térmico

Queimando combustível em uma caldeira, produz-se calor que serve para evaporar a água que entra nela. Porém, por causa de evitáveis e inevitáveis perdas que se tem durante o funcionamento, nem todo o calor que se produz pode ser utilizado. Assim, pode-se definir rendimento térmico de uma caldeira,  $\eta_{cald}$ , como a relação entre a quantidade de calor utilizado e o disponível, ou também como  $\eta_{cald} = 100 - \sum P$ , onde  $\sum P$  representa a soma de todas as perdas do processo.

Existem vários tipos de perdas devido a diversos fatores, porém três merecem destaque pela sua importância no rendimento da caldeira.

1. As perdas por calor sensível são as mais importantes já que são originadas pela quantidade de calor que os gases da combustão transportam na saída da chaminé e que não é aproveitada na transmissão de calor para a água.



2. A perda pela chaminé por calor latente é relativa aos gases resultantes da combustão incompleta, como o óxido de carbono, o hidrogênio, o metano e outros hidrocarbonetos e até o carbono livre. Nesse caso não se calcula uma perda de calor produzida na combustão, mas sim uma perda de calor não produzido e que poderia ter sido produzido se acontecesse uma combustão completa.
3. A perda por irradiação é devida a calor que irradia de todas as paredes externas da caldeira e que por esta são transmitidas por condutibilidade ao meio ambiente. Muitas vezes esse tipo de perda é inevitável podendo em alguns casos ser minimizadas.

Retornando a definição de rendimento térmico, pode-se determinar uma relação matemática para o seu cálculo que será útil posteriormente quando se tratar do controle do processo de geração de vapor. O calor útil ou calor contido no vapor pode ser calculado pela expressão:

$$Q_u = m_v(h_v - h_a)$$

Onde:

$m_v$ : Quantidade de vapor produzida pela caldeira, [Kg/h]

$h_v$ : Entalpia do vapor, [Kcal/Kg]

$h_a$ : Entalpia da água de alimentação, [Kcal/Kg]

O calor da combustão se determina pela expressão:  $Q_c = (1 - \mu) \cdot B \cdot P_{ci}$

Onde:

$B$ : Quantidade de combustível alimentado na fornalha, [Kg/h]

$\mu$ : Teor de materiais resultantes da combustão incompleta

A esse calor se adiciona o calor do ar:  $Q_{ar} = C_{p_{ar}} \cdot Var^f \cdot t_{ar}$

Onde:

$C_{p_{ar}}$ : Calor específico médio do ar a pressão constante, [Kcal/Nm<sup>3</sup>]

$Var^f$ : Volume de ar necessário para a queima de combustível, [Nm<sup>3</sup>/h]

$t_{ar}$ : Temperatura do ar, [°C]

O calor total introduzido na fornalha é, portanto:  $Q_f = Q_c + Q_{ar}$

Pela definição de rendimento térmico, tem-se:

$$\eta = \frac{Q_u}{B \cdot P_{ci}} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{D(h_v - h_a)}{B \cdot P_{ci}}$$

No desenvolvimento acima, o consumo de força motriz pelos aparelhos auxiliares da instalação da caldeira não foi ainda considerado, embora, com toda a evidência, influencie no valor do rendimento global. O consumo de energia auxiliar resulta da energia necessária para insulflamento do ar de combustão, do acionamento dos ventiladores de ar secundário, das bombas de alimentação de água e combustível e outros dependendo da instalação. Define-se  $E_a$  como a perda resultante atribuída a essa energia gasta, em porcentagem do poder calorífico do combustível. Assim, o rendimento da instalação da caldeira é dado por  $\eta - E_a$ .

A relação ar/combustível,  $r_{a/f}$ , é um dos fatores determinantes na eficiência do processo da combustão. Esta é definida como o quociente do número de moles de ar que intervém na reação e o número de moles de combustível. Levando em conta os pesos moleculares dos componentes, esta relação pode-se expressar em quilogramas.

Por último temos que a eficiência de uma planta térmica, em função do elemento mais primário de energia que intervém no sistema, que é o combustível, é calculada com a seguinte expressão:

$$\eta_{planta} = \eta_{rank} \cdot \eta_{cald} = \frac{W_t - W_B}{m_{comb} \cdot P_C}$$

Onde:

$\eta_{rank}$ : Eficiência do ciclo rankine

$\eta_{cald}$ : Eficiência da caldeira

$W_t$ : Trabalho da turbina

$W_B$ : Trabalho da bomba

$m_{comb}$ : Fluxo da combustão

$P_C$ : Poder calorífico.

## **5. CONTROLES DA CALDEIRA**

Este capítulo apresenta os objetivos do controle em caldeiras, os equipamentos que intervêm neste controle, e os tipos de controle que devem ser implementados em uma caldeira para alcançar os objetivos traçados.

Os controles, no marco do controle de caldeiras, são todos aqueles sistemas que permitem usar a caldeira de forma regulada, supervisionada, econômica e segura. Estes controles envolvem todo o processo de arranque e apagado assim como o controle de segurança e de operação.

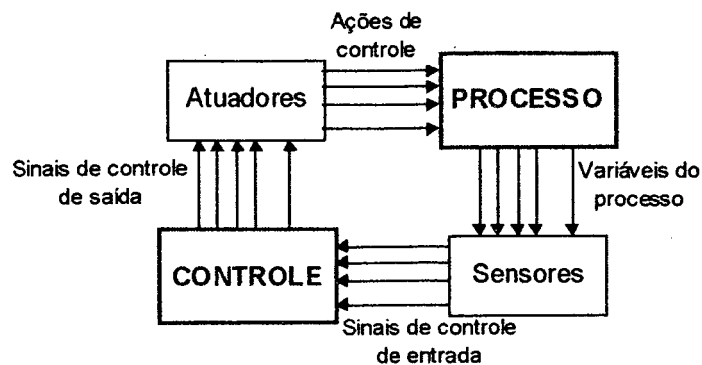
### **5.1 OBJETIVOS DO CONTROLE**

Os objetivos dos sistemas de controle de caldeiras de vapor, podem ser definidos como:

1. Induzir a caldeira para prover continuamente o vapor às condições de pressão e temperatura requeridas.
2. Operar a caldeira a mínimo custo sem sacrificar um alto nível de segurança e a sua vida útil.
3. Monitorar a operação normal da caldeira, detectando condições inseguras ou de falha e tomando as providencias apropriadas para corrigi-las.

Os dois primeiros objetivos são alcançados mediante os controles de operação da caldeira, sendo que o segundo traduz-se em melhorar a sua eficiência reduzindo o gasto de combustível mediante a otimização do processo de combustão. O terceiro objetivo é alcançado mediante a utilização de um controle de intertravamento.

A Figura 20 apresenta um diagrama geral de controle, sendo mais específico do que a figura da estrutura geral mostrada no capítulo da revisão bibliográfica.



**Figura 20. Diagrama geral de um sistema de controle**

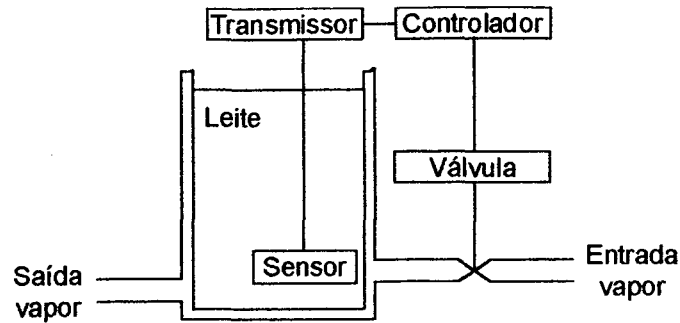
## 5.2 INSTRUMENTAÇÃO

Considerando as ações a serem executadas por um sistema de controle, um item essencial nesse sistema é a instrumentação utilizada. Ela é a responsável direta pelo rendimento do processo pois sua função é adquirir dados do processo a ser controlado para que se possam fazer as necessárias correções visando obter o controle desejado.

As medidas das grandezas do processo, como por exemplo, pressão, temperatura, pH, umidade ou velocidade, são feitas por elementos primários os quais, na maior parte dos casos, os transformam em grandezas de outra espécie como pressão pneumática, potencial elétrico ou deslocamentos mecânicos que são mais fáceis de medir ou transmitir à distância. Em um sistema de controle, normalmente, o transdutor e o sensor são o mesmo elemento.

As variáveis de interesse para o controle de uma caldeira são a pressão de vapor, a pressão de petróleo, o nível de água, o fluxo de ar necessário para a combustão e a presença da chama.

Com a finalidade de exemplificar as definições anteriores, será analisado um processo industrial, o processo de aquecimento de leite na indústria de pasteurização, como se ilustra na Figura 21. Nesse exemplo será mostrada a importância da instrumentação bem como a análise de todo o sistema de controle.



**Figura 21. Diagrama do processo de aquecimento de leite**

Neste processo, o leite na dorna *in natura*, é aquecido a 114°C e em seguida é resfriado a 0°C. O leite é aquecido pelo vapor que circula nas paredes da dorna. Quanto maior a quantidade de vapor, maior a temperatura da dorna. Essa quantidade de vapor é regulada pela válvula de controle instalada na linha de vapor. Então pode-se inferir que:

- A variável controlada é a temperatura do leite;
- O meio controlado, onde o sensor busca as informações, é o leite;
- O agente de controle que é o responsável pelas correções do processo, é o vapor;
- A variável manipulada, aquela que varia o agente de controle, é a vazão de vapor.

Os sensores são os responsáveis por transmitir o estado daquilo que se está controlando. Nesse exemplo, há um sensor de temperatura que vai fornecer a temperatura do leite a todo instante.

Os transmissores são equipamentos eletrônicos dedicados que transformam o sinal do sensor em um sinal padronizado e o envia ao controlador.

Os controladores são aqueles equipamentos que efetivamente atuam no controle. Eles recebem as informações dos transmissores sobre o valor da variável que se quer controlar. Comparam esse valor com um valor que se quer estabelecer para a variável controlada, ou seja, o set-point, e de acordo com o resultado da comparação ele faz a atuação enviando um sinal

para que a válvula abra ou feche. Essa atuação é feita normalmente de uma maneira inteligente usando alguma ação de controle do tipo proporcional, P, proporcional-integral, PI, ou proporcional-integral-derivativo, PID. Em grande parte das instalações esse controlador é do tipo denominado de controlador lógico programável, CLP, onde pode-se implementar a estratégia de controle desejada através de uma seqüência lógica de execução de funções, ou seja, um programa. Também com um CLP pode-se controlar muitas variáveis relacionadas ou não e também vários processos ou malhas independentes.

Os elementos finais de controle são aparelhos de campo e que efetivamente fazem o controle. São chamados de atuadores e quando acoplados à válvulas são chamados de atuadores de válvulas. No exemplo, esse aparelhos recebem o sinal do controlador e posicionam a válvula de totalmente aberta a totalmente fechada e em outras aplicações, para valores intermediários.

Devido a uma série de fatores comerciais, técnicos e lógicos, todos os fabricantes de instrumentação fabricam seus transmissores, controladores e demais acessórios dentro de padrões, ditos, de entrada e saída. Isso facilita o cliente a trocar de fabricante e a miscigenar instrumentos de diversos fabricantes no mesmo sistema de controle.

Um dos padrões comercialmente utilizados é o padrão 4 a 20 mA que significa que na sua menor medida, o transmissor envia 4 mA e na sua maior medida envia 20 mA (ou vice-versa se estiver no modo reverso). Analogamente, existe também o padrão 1 a 5 V. No exemplo, o leite pode ir de 0°C a 150°C, então combina-se o transmissor de forma que quando o sensor indicar 0°C, na saída do transmissor tem-se 4 mA e quando indicar 150°C tem-se 20 mA.

## **5.3 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTROLES**

### **5.3.1 De acordo com a execução**

As ações de controle, do ponto de vista da execução da mesma, pode ser feita das formas a seguir.

- **Manual:** No caso seja um operário o encarregado de controlar a caldeira. Este tipo de controle está desaparecendo com o decorrer do tempo.
- **Automático:** No caso seja um equipamento que efetua as ações de controle. O uso destes controles está sendo utilizado a cada vez mais.

### **5.3.2 De acordo com o sinal**

O controle, segundo o tipo de sinais que maneje o equipamento de controle, pode ser classificado como pneumático, hidráulico, ou eletrônico.

As indústrias que não podem permitir a parada das operações, normalmente usam controles pneumáticos e um equipamento de compressão de ar para dar alimentação elétrica a estes controles.

### **5.3.3 De acordo com o processamento de informação**

Segundo a forma em que seja processada a informação tomada do sensor, o controle pode ser feito da seguinte maneira:

- **Controle analógico:** Quando o atuador é afetado continuamente pelo valor da variável medida pelo sensor.
- **Controle digital:** Quando, em forma constante mas discreta, mede-se a variável a controlar, converte-se em um sinal digital, processa-se e opera-se o atuador. Neste tipo de controles, que estão suplantando os controles mecânico-analógicos, destaca-se o uso de circuitaria digital e de microprocessadores.

### **5.3.4 De acordo com os atuadores**

Segundo o tipo de atuadores, o controle pode ser classificado como:

- **Controle On/Off:** Quando o atuador é do tipo digital binário, ou seja, a saída tem duas possibilidades, como por exemplo abrir e fechar uma válvula. O controle On/Off destaca-se pela sua simplicidade mas gera uma condição de regulação mais pobre que os dois controles que se descrevem a continuação.

- **Controle de posição:** Quando o atuador pode tomar uma série de valores discretos ou uma série de “posições”. Por exemplo, ter uma válvula que tenha a possibilidade de ficar completamente aberta, 75%, 50%, 25% ou completamente fechada.
- **Controle modulado:** Quando o atuador pode tomar valores contínuos, ou infinitas posições. O controle modulado está vinculado ao tradicional controle analógico, onde a leitura contínua de uma variável análoga origina uma mudança contínua na variável de saída.

### **5.3.5 De acordo com a tarefa**

Segundo a tarefa ou objetivo específico do controlador, ele poder ser dividido em:

- **Controle de funcionamento em linha:** Envolve todo o processo de operação da caldeira. Este controle tem sido feito tradicionalmente por um controle analógico e modulado.
- **Controle de intertravamento:** Intervém no arranque, paradas e situações de emergência da caldeira, além de verificar o funcionamento adequado dos controles de funcionamento em linha. Este controle, em alguns casos, ainda é feito de forma manual, embora a maioria das vezes é feito mediante um controle eletromecânico, usando motores elétricos para as temporizações e tempos de respostas longos.

## **5.4 CONTROLES DE FUNCIONAMENTO EM LINHA**

### **5.4.1 Controle do processo de combustão**

Regula a estrada de calor à caldeira e a relação combustível/ar no lar da mesma. O controle da combustão deve assegurar que todo o tempo exista uma adequada quantidade de ar para cumprir os requerimentos de combustível, queimando-o eficientemente, sem fumaça e com a mínima emissão de partículas sólidas pela chaminé.



O principal sinal para a operação do controle da combustão, e a única na maioria dos casos, é a pressão do vapor gerado, sendo que a quantidade de calor depende deste parâmetro, assim:  $Q_{\text{gerado}} = f(\text{pressão de vapor})$ .

Ante uma diminuição da pressão de vapor há um maior requerimento de calor para compensar a caída, e ante um aumento da pressão há um menor requerimento de calor.

Este requerimento de calor pode ser interpretado como a necessidade de maior ou menor diferença de temperatura entre o lar e o lado da água dentro da caldeira. Assim, o controle da combustão modifica esta diferença modificando a temperatura no lar mediante um aumento ou diminuição na emissão de combustível e ar para acender este combustível.

A relação entre o fluxo de ar e o fluxo de combustível é controlada de forma a lograr uma boa combustão. Para isto é preciso considerar que o fluxo de ar não deve ser muito limitado ficando combustível sem queimar, e não deve ter um excesso tal que diminua a transferência de calor à caldeira.

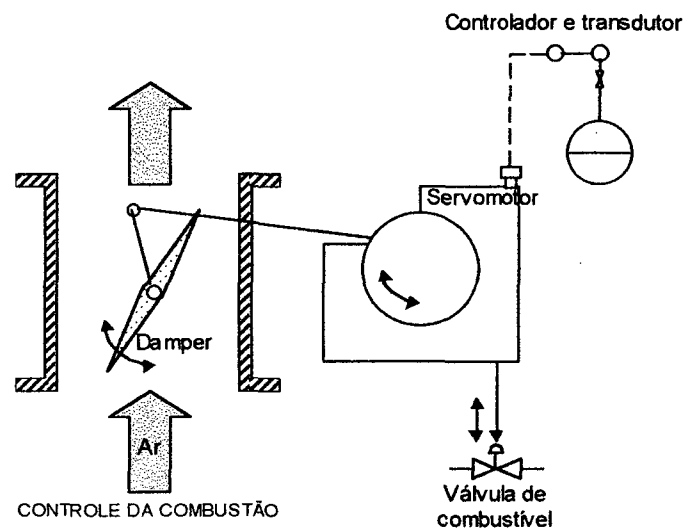
Na prática, mede-se a pressão de vapor mediante um sensor de pressão, este valor transmite-se ao controle, o qual atua sobre:

- Uma válvula solenóide abrindo-a e fechando-a para regular um maior ou menor passo de combustível, ou arrancando e parando o motor do alimentador rotativo de bagaço.
- Um regulador de fluxo de ar (ou damper), dando-o uma maior ou menor inclinação permitindo o passo de um maior ou menor fluxo de ar gerado por um ventilador.

O controle da relação ar/combustível é com freqüência um controle de laço aberto onde se tem um set-point prefixado no momento de instalação da caldeira. Existem algumas caldeiras nas que suas dimensões, e em conseqüência o consumo, justifica um controle mais sofisticado onde tomam-se medidas da presença do oxigênio nos gases de saída da combustão e compara-se com um set-point, que depende do fluxo de vapor. A diferença obtida é um fator de multiplicação do fluxo de ar para conseguir um fluxo de ar "efetivo", o qual intervém na relação ar/combustível.

A parte do controle da combustão que regula a quantidade de calor a transmitir à caldeira é, nos casos mais simples, um controle On/Off. Quando a pressão cai abaixo de um limite inferior, abre-se a válvula de combustível completamente e deixa-se passar a quantidade necessária de ar. Quando a pressão sobrepassa um limite superior, fecha-se completamente a válvula do combustível e evita-se a passagem de ar. Controles mais sofisticados são os controles modulados onde uma diminuição da pressão de vapor ocasiona uma maior abertura da válvula de combustível e um maior fluxo de ar.

Uma implementação prática do exposto é o controle modulado da combustão da Figura 22, no que um servomotor e um sistema mecânico gera o movimento de abertura da válvula de combustível e do regulador de ar.



**Figura 22. Controle modulado da combustão**

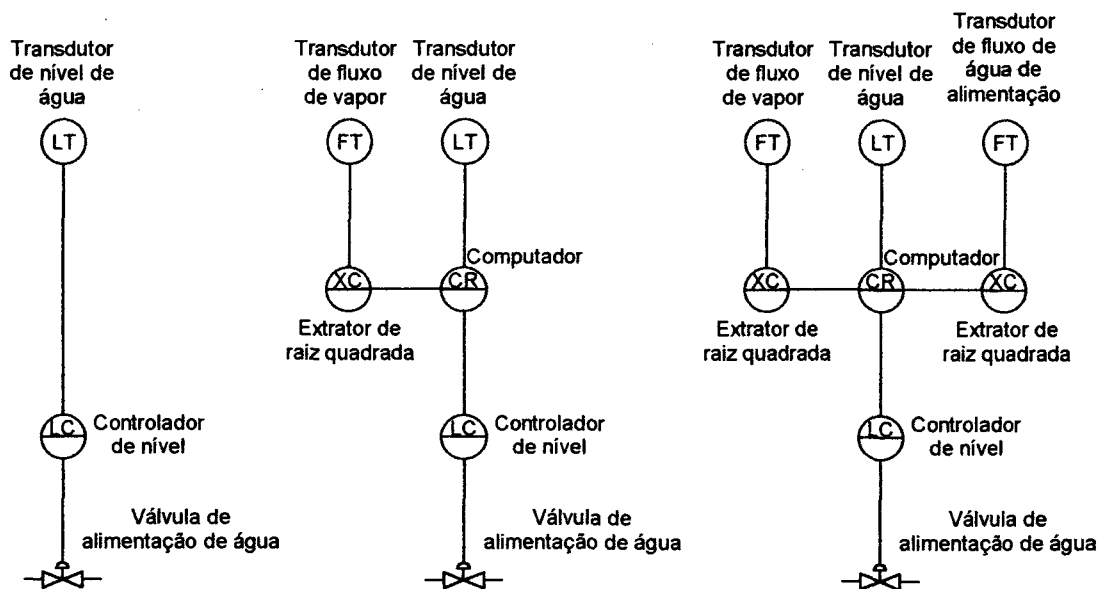
Nos controles mais complexos controla-se a rapidez com que abre-se a válvula de combustível e o regulador de fluxo de ar, utilizando um controle "cross limiting", já que existe uma mudança muito forte da pressão de vapor com conseqüentes mudanças em ambos set-points (relacionados pela relação ar/combustível). Pode acontecer, devido ao diferente tempo de resposta de ambos controles, que enquanto as variáveis envolvidas alcançam seus respectivos set-point, exista um distanciamento prolongado

da relação ar/combustível provocando uma situação de perigo. Isto ocorre porque a resposta do fluxo do combustível, seja gasoso ou líquido, ante uma mudança na válvula de combustível, é usualmente mais rápida que a resposta de fluxo de ar ante uma mudança no regulador de ar.

Com a finalidade de ter uma melhor combustão, no caso de combustível líquido, atomiza-se este com ar ou vapor, logrando aumentar a sua superfície de contato com o ar no qual deve-se inflamar. O fluxo de ar atomizado também é chamado de fluxo de ar primário, e o fluxo de ar restante, encarregado de impulsionar a chama, denomina-se fluxo de ar secundário.

#### 5.4.2 Controle da alimentação da água

Procura manter um nível constante de água dentro da caldeira, sendo usualmente utilizado um controle tipo On/Off o um controle modulado. A Figura 23 apresenta diferentes esquemas de controle.



**Figura 23. Esquemas de controle para o nível de água**

O mais simples e usado é o controle do nível de água que somente leva em conta o nível atual da água para acionar sobre a válvula. Os outros esquemas precisam de um equipamento inteligente para calcular o set-point sobre a válvula.

No caso do controle On/Off ante a queda do nível de água dentro da caldeira abaixo de um nível mínimo, abre-se a válvula de alimentação de água aumentando o nível. Se o nível de água dentro da caldeira sobrepassa certo nível máximo, fecha-se a válvula de água. O controle modulado trata de manter o nível de água em um set-point. As caldeiras estão providas de visores que permitem verificar o nível da água nelas.

O sensor geralmente é uma bóia localizada em uma pequena câmara externa e o atuador, uma válvula solenóide. Atualmente tem-se desenvolvido outros sensores mais sofisticados, os quais, mediante o uso de eletrodos, permitem ter uma medição muito precisa do nível de água dentro da caldeira.

#### **5.4.3 Controle da pressão do lar**

Nas caldeiras que usam combustível líquido ou gás, a pressão do lar deixa-se variar sem controle, ficando esta determinada pelas condições de entrada de ar e combustível.

Nas caldeiras de carvão utilizam-se controles de pressão, já que uma pressão no lar maior que a pressão em linha de alimentação de carvão pode causar que produtos parciais da combustão acendam o carvão nessa linha.

#### **5.4.4 Controle da temperatura de vapor**

Nas caldeiras com sobreaquecedor, onde gera-se vapor sobreaquecido, precisa-se um equipamento para controlar a temperatura já que as caldeiras raramente geram vapor a mesma temperatura dentro de toda a sua faixa de operações.

O controle da temperatura é usualmente localizado dentro do sobreaquecedor no lado do vapor, este tira o calor no caso que a temperatura seja maior que a necessária. Este tipo de controles não é particularmente econômico e somente é usado no caso que os requerimentos dos usuários especifiquem temperaturas muito precisas.

#### **5.4.5 Controle da qualidade da água**

É importante que a qualidade da água dentro da caldeira seja mantida dentro de certos limites recomendados. Isto é feito mediante a tomada de amostras e testes, mas ainda não existe um controle “em linha” para efetuar esta tarefa.

A medida da condutividade da água é muito simples e confiável, usando eletrodos com a água atuando como um braço de uma ponte de Wheastone. A condutividade da água é, aproximadamente, equivalente ao total de sólidos contidos na caldeira de vapor. Adicionalmente mede-se o nível de pH para evitar corrosão na caldeira.

As vezes é necessário dar tratamento químico à água antes de ingressar a caldeira para evitar corrosão e diminuição da capacidade de transferir o calor do lar até o lado da água.

### **5.5 CONTROLE DE INTERTRAVAMENTO**

Este controle tem várias funções e complementa aos controles de funcionamento em linha. Encarrega-se de levar a caldeira a um ponto específico para a entrada em operação do controle da combustão, supervisionando a operação deste e de outros controles de funcionamento em linha, vigiando que o estado da caldeira e o de seus equipamentos seja adequado para a operação que esteja sendo efetuada. Finalmente, realiza um apagado seguro e controlado também.

## **6. PROJETO DE CONTROLE**

O projeto de controle e automação para um processo de geração de vapor deve atingir como objetivos básicos a segurança e a máxima eficiência ou rendimento térmico. Neste sentido, o capítulo apresenta os fatores que interferem diretamente para alcançar os objetivos e uma proposta para o controle dos três campos de ação no processo de geração de vapor ou mais especificamente, para a caldeira.

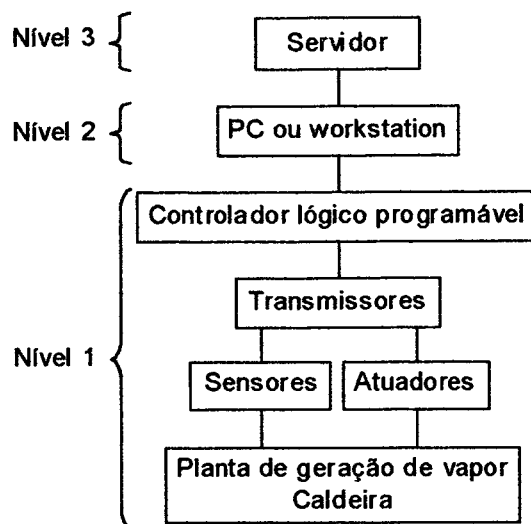
### **6.1 CONTROLE DE PROCESSOS**

Um sistema de controle de processos é um sistema que tem a habilidade para partir, regular e parar um processo em resposta às variáveis medidas ou monitoradas dentro do processo de maneira a obter a saída desejada. É formado por uma série de instrumentos e mecanismos de controle que recebem e fornecem informações por meio de sinais elétricos, mecânicos ou pneumáticos, interligados sob a forma de malha de controle de modo a produzir resultados úteis com o mínimo de supervisão humana.

O controle de processos tem como função principal manter as variáveis de um processo industrial em valores considerados eficientes, seguros e com qualidade, de tal maneira a evitar condições instáveis que poderiam colocar em risco pessoas e equipamentos. É também função do controle fornecer dados no processo aos operadores da planta para que eles possam mantê-la em um ritmo seguro e eficiente.

### **6.2 AQUITETURA DO PROJETO**

O diagrama esquemático da estrutura elaborada para o sistema de controle da caldeira que pretende automatizar o processo de geração de vapor, o qual inclui como campos de ação o controle da combustão, o controle da alimentação de água e as funções de intertravamento, é apresentada na Figura 24.



**Figura 24. Arquitetura do projeto de automação da caldeira**

Na Figura 24, o nível 1 representa o sistema de controle em malha fechada. As informações da caldeira são captadas por sensores e são transmitidas ao CLP através dos transmissores. O CLP utilizando um programa interno, compara as informações recebidas com outras preestabelecidas pelo projetista e determina qual a ação de controle que deve ser realizada. Essa ação é enviada através dos transmissores aos atuadores localizados na caldeira. As ações consecutivas que surgem em uma malha de controle em operação como esta, são:

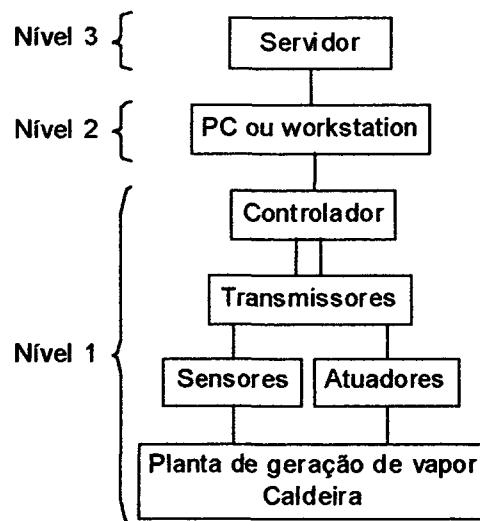
- Detecção do sinal de desvio da variável controlada;
- Transmissão da variável ao controlador;
- Ação do controlador para eliminar o desvio;
- Envio da ação do controlador ao órgão de ajuste;
- Ação do órgão do ajuste sobre o processo
- Reação do processo à correção;
- Detecção do novo estado do processo pela instrumentação
- Transmissão do sinal modificado ao controlador.

O nível 2 representa o nível de supervisão onde um software supervisor pode estar funcionando em um microcomputador ou em uma estação de trabalho. As funções desse supervisor enumeram-se a seguir.

- Atualização dos set-point, ou seja, atualização dos valores desejados para as variáveis;
- Executar simulações do controle de processo;
- Fornecer um quadro sinóptico do processo, amigável aos operadores;
- Obter dados estatísticos e históricos do processo;
- Emitir relatórios e gráficos;
- Validar e modificar modelos matemáticos.

No nível 3, denominado de nível corporativo, é onde se tem um computador de grande porte para executar funções de cunho corporativo como análise estatística de dados de produção, controle de estoque de matéria prima e emissão de relatórios específicos.

Segundo a exigência do processo a ser controlado, a estrutura da Figura 24 pode sofrer pequenas mudanças, tais como trocar o CLP por um controlador eletrônico, tal como mostra-se na Figura 25.



**Figura 25. Arquitetura modificada**

Um dos motivos para tais mudanças é que um controlador eletrônico é construído especificamente para operação em malhas de controle contendo as ações já incorporadas bastando ativá-las de acordo com a estratégia determinada no projeto. Isso torna o projeto mais viável do ponto de vista econômico e operacional, pois na maioria dos casos um CLP com as ações

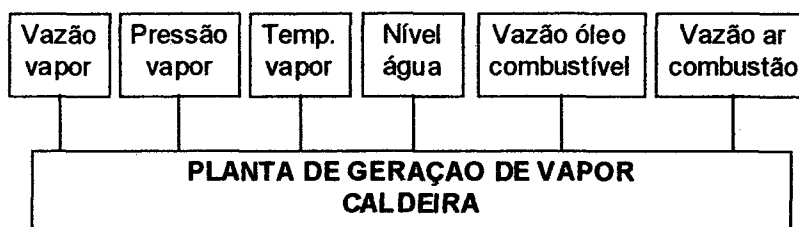


de controle do tipo PID incorporadas na forma de módulos, normalmente tem um custo mais elevado.

Em geral, para obter do processo as principais variáveis envolvidas deve-se dotar a caldeira de sensores, transmissores e atuadores para registrar as seguintes grandezas do processo:

- Vazão de vapor;
- Pressão de vapor;
- Temperatura de vapor;
- Nível de água;
- Vazão de óleo combustível;
- Vazão de ar de combustão.

A Figura 26 relaciona as variáveis ou grandezas em termos de diagrama de blocos. Tais variáveis foram determinadas através do estudo de caldeiras de um modo geral.



**Figura 26. Variáveis controladas do processo de geração de vapor**

Um instrumento denominado de analisador de gases da combustão, poderá ser inserido para servir como ferramenta para validação do modelo matemático como também para análise do rendimento do processo.

### 6.3 FATORES QUE INTERVÊM NO PROCESSO

A grosso modo podem ser citados seis fatores que interferem diretamente no processo e geração de vapor:

- O suprimento de água de alimentação da caldeira;
- A pressão do vapor produzido;

- A quantidade de combustível utilizado;
- A quantidade de ar necessário à combustão;
- A análise dos gases formados na combustão, e
- O sistema de intertravamento das operações da caldeira.

Portanto, um sistema de controle e automação de uma caldeira deve possuir a característica de coordenar as ações desses seis elementos visando preservar a qualidade do vapor gerado em termos de pressão, temperatura e teor de impurezas associada a uma segurança nas operações.

O suprimento de água de alimentação é de grande importância para a geração de vapor, sendo em todos os casos função prioritária manter o nível preestabelecido dentro da caldeira. Naturalmente, por esta razão, em um sistema de controle deve existir apenas uma malha de controle do nível de água.

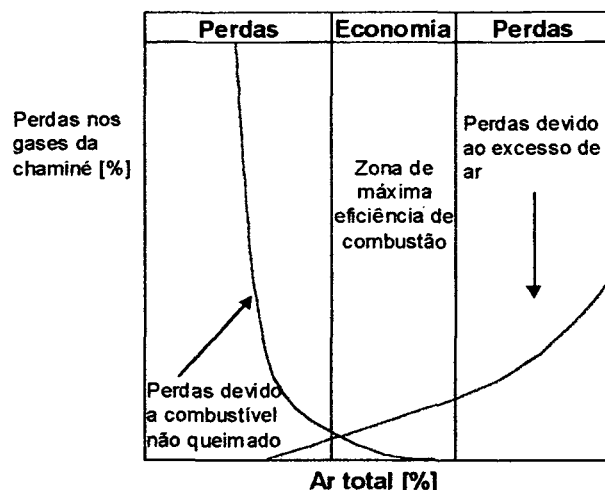
Como foi visto no capítulo anterior, existem varias malhas para medir o nível de água. A malha mais simples utiliza apenas a medição de nível para iniciar a ação corretiva, quando for o caso. Quando a medida se afasta do valor preestabelecido, set-point, o sistema de controle atua para corrigir, normalmente atuando em uma válvula de alimentação ou atuando em uma bomba de água. Esse tipo de malha pode ser inadequado, principalmente para caldeiras do tipo aquotubular, pois pode provocar os efeitos de expansão e contração.

Um projeto de sistema de controle mais adequado utiliza a vazão de vapor como variável medida. Consegue-se dessa maneira manter a vazão de água proporcional à vazão de vapor, mantendo-se o nível de água dentro valores preestabelecidos.

Um outro tipo de malha mais sofisticada é necessária quando as variações da demanda de vapor são muito grandes. Esta utiliza a própria vazão de água de alimentação como uma outra variável medida de modo a corrigi-la constantemente.

A pressão de vapor, a quantidade de combustível, a quantidade de ar necessário à combustão e análise dos gases formados pela combustão, fazem parte do conjunto de variáveis que formarão a malha de controle da combustão. Esse controle é o responsável direto pelo rendimento térmico da caldeira e controle da poluição atmosférica.

Como dito anteriormente, para se obter uma combustão completa, deve-se proporcionar uma quantidade de ar adequada em função da quantidade de combustível que é calculada através da estequiometria da combustão. Uma combustão eficiente é obtida com o excesso de ar dentro de certa faixa, como mostra a Figura 27.



**Figura 27. Curvas de perdas na combustão**

Na Figura 27 observa-se que as perdas por excesso de ar aumentam em proporção muito menor que as perdas com combustível não queimado.

A informação da pressão de vapor é o sinal normalmente utilizado para esse controle. Considerando a caldeira operando em seus valores nominais de pressão e produção de vapor, caso ocorra, por exemplo, uma demanda maior de vapor, a pressão irá cair para produzir maior quantidade de vapor. Para corrigir isso, deve-se injetar mais combustível na caldeira. A intervenção na vazão de combustível implica na variação da vazão de ar, no caso, aumento da vazão, para manter a combustão completa. Por outro lado, um aumento na pressão implica em excesso de combustível devendo nesse caso reduzir sua vazão e também a do ar.

Uma outra informação sobre a qualidade da combustão pode ser obtida com a análise dos gases da combustão da saída da chaminé. A malha de controle, utilizando a análise dos gases, também poderá ser utilizada para controlar a taxa de CO, monóxido de carbono, nocivo ao meio ambiente, presente nos gases quando de uma combustão incompleta.

O projeto do sistema de controle da caldeira poderá conter também um sistema de intertravamento constituído de um conjunto de sensores, relés e acionadores que asseguram a prevenção contra seqüências de eventos que possam ser danosos para a caldeira, evitando as operações ou ocorrências em situações inseguras. É esse sistema que garantirá a operação com segurança do processo como a ignição, paradas e situações de emergências.

Observando por um outro ângulo o controle e automação do processo de geração de vapor, o projeto propõe uma otimização e rapidez nas operações obtendo maior precisão e maior qualidade no produto gerado, no caso o vapor, em comparação com toda a operação sendo realizada pelo homem. No caso da implantação da automação, ao operador caberá as tarefas de supervisão e manutenção do sistema realizadas através de um sistema utilizando computadores.

Neste trabalho, o estudo realizado sobre caldeiras mostrou que, devido ao tamanho, aplicação e ao tipo da caldeira, a malha típica de controle de nível de água já existente para as caldeiras, está atendendo perfeitamente a finalidade proposta, não necessitando modificações. Porém as malhas de controle da combustão e intertravamento existentes, estão necessitando de alterações para conseguir controlar adequadamente o processo de geração de vapor com eficiência e segurança nas operações.

A malha projetada para o controle do processo da combustão elimina o controle atual que permite atuar praticamente somente em dois pontos da pressão de vapor, que é o sinal mestre na malha. Assim, o sistema proposto permite corrigir a pressão de vapor continuamente com a otimização da quantidade de ar e quantidade de combustível para a queima obtendo

menores perdas. Desta forma, contribui-se para a obtenção do melhor rendimento térmico e controle do teor dos gases da combustão lançados na atmosfera. Uma parte dessa malha utiliza a estratégia de limites cruzados simples. Essa submalha foi simulada em um computador e os resultados foram apresentados, demonstrando a sua eficiência em proporcionar sempre um excesso de ar dentro da caldeira durante transições de pressão.

Para a malha de intertravamento, foi sugerido substituir ou colocar como alternativa, um sistema utilizando um microcontrolador. A justificativa para esse procedimento é discutida no item 6.6.1 na página 83.

## **6.4 CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO**

### **6.4.1 Utilização de um CLP ou circuito eletrônico**

As funções de intertravamento e os procedimentos de operação realizados pelo programador de combustão, poderão ser feitos por um controlador lógico programável, CLP, ou com a utilização de um circuito eletrônico com a presença de um microcontrolador. Embora o próprio sistema da caldeira funcione adequadamente, ele é rígido e não apresenta flexibilidades para alterações que poderiam ocorrer, por exemplo, mudança no tempo de purga ou mudança em alguma seqüência de operação. Em um CLP ou circuito eletrônico, isso é facilmente conseguido com alterações de linhas no programa interno.

Um outro detalhe é que o CLP ou circuito eletrônico poderá ser instalado sem a retirada do sistema próprio da caldeira, podendo inclusive ter a flexibilidade de se operar com um ou outro sistema.

Soma-se a todas essas vantagens o fato do CLP ou circuito eletrônico ser facilmente inserido em um sistema computacional como previsto, comunicando-se com um microcomputador no nível de controle.

### **6.4.2 Otimização da eficiência**

A otimização da sua eficiência é o principal objetivo de um projeto de controle e automação de uma caldeira. Para se atingir esse objetivo é

necessário otimizar a relação ar/combustível, como visto anteriormente. Um excesso de ar adequado com a quantidade de combustível, demanda de vapor e conseqüente pressão de vapor, é a principal fonte de atuação para se conseguir melhorar o rendimento da caldeira. Sendo assim, é necessário dotar a caldeira com uma boa instrumentação, tal como sensor e transmissor de pressão de vapor, sensor e transmissor de vazão de ar secundário e sensor e transmissor de vazão de óleo combustível. Para receber esses sinais e realizar as ações de controle, que serão enviadas aos controladores, de acordo com estratégias a serem definidas, é necessário um controlador eletrônico.

Como elementos atuadores dessas variáveis, pode-se propor duas alternativas. A primeira seria mudança do servomotor existente de somente duas posições fixas, para um outro com mais posições intermediárias. A saída do controlador irá atuar nesse servomotor que por sua vez controlaria a posição da borboleta do ventilador e da válvula de comando de fogo, comandando a vazão de ar e óleo, respectivamente. A Segunda alternativa seria controlar a vazão de ar e óleo através do controle da velocidade dos motores do ventilador e da bomba de óleo. Isso poderia ser conseguido com a colocação de sistemas inversores de potência na alimentação alternada do motores. Com os inversores pode-se alterar a velocidade sendo que esta velocidade pode ser determinada pelo controlador eletrônico através da informação das vazões de ar e combustível.

Essa Segunda alternativa é mais atraente pois pode proporcionar adicionalmente uma economia de energia já que os motores funcionarão na velocidade máxima somente quando for necessário.

### **6.4.3 Outros controles**

Um outro controle que pode ser implementado é o controle da emissão de gases para atmosfera através da chaminé. A análise dos gases da combustão também oferece informação da qualidade da queima no interior da câmara de combustão. Sendo assim, um analisador de gases em linha

poderá fazer parte do projeto enviando a sua informação a um controlador eletrônico que atuará nas vazões de ar e combustível.

Um controle na velocidade do motor da bomba da água de alimentação com um sistema semelhante ao sugerido para o motor do ventilador e bomba de óleo poderá ser implementado também, procurando sempre aumentar o rendimento da instalação como um todo.

Um sistema de tratamento de água de alimentação também poderá melhorar o rendimento da instalação através da diminuição das paradas para limpeza melhorando a transmissão de calor no interior da caldeira.

Para reafirmar a eficácia do projeto de automação, um sistema de utilização do vapor gerado poderá ser implementado na construção de pré-aquecedores da água e óleo.

## **6.5 CONTROLE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO**

O detalhamento da malha de controle da combustão inclui o estudo da malha, a especificação dos equipamentos e instrumentação necessários para a sua implementação e uma simulação de sua atuação utilizando um software dedicado, SIMULINK.

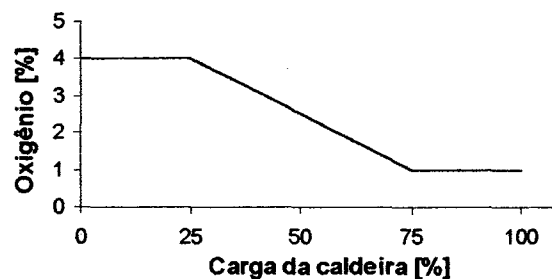
### **6.5.1 A malha de controle**

As estratégias de controle para o processo de combustão, visam atingir a um objetivo básico que é a máxima eficiência ou rendimento térmico da caldeira. Como foi dito no capítulo 4, os fatores que interferem diretamente no rendimento térmico são a quantidade de combustível utilizado, a quantidade de ar necessário à combustão e a análise dos gases formados na combustão.

a vazão de ar e de combustível dependerá da pressão e da vazão de vapor requisitada. Normalmente se utiliza o sinal de pressão como sinal mestre para controle pois esta é uma precisa indicação do balanço entre a quantidade de calor retirada e a quantidade de calor fornecida pelo processo de combustão.

Considerando a caldeira operando com seu valor nominal de pressão, caso ocorra, por exemplo, uma demanda maior de vapor, a pressão irá cair para produzir maior quantidade de vapor. Para corrigir isso, deve-se injetar mais combustível na caldeira. A intervenção na vazão de combustível implica na variação de vazão de ar, no caso, aumento da vazão, para manter a combustão completa. Por outro lado, um aumento na pressão de vapor implica um excesso de combustível devendo nesse caso, reduzir sua vazão e também a do ar. Numa análise de transientes, correspondente a um aumento ou diminuição e carga, deve-se garantir sempre um excesso de ar para evitar, por exemplo, uma mistura por demais rica em combustível, o que pode ocasionar uma explosão na fornalha.

Uma outra informação sobre a qualidade da combustão pode ser obtida com a análise dos gases na saída da chaminé. O teor de oxigênio,  $O_2$ , presente nos gases é uma indicação da quantidade de ar que passou pela fornalha, ou seja, aquele que foi aquecido mas não foi usado na combustão, representando energia desperdiçada. Com essa informação pode-se controlar a quantidade de ar em excesso necessária para a combustão completa e obter assim menores perdas. O valor ótimo de excesso de ar depende, entre outros fatores, da carga da caldeira. Esta relação é mostrada na Figura 28.



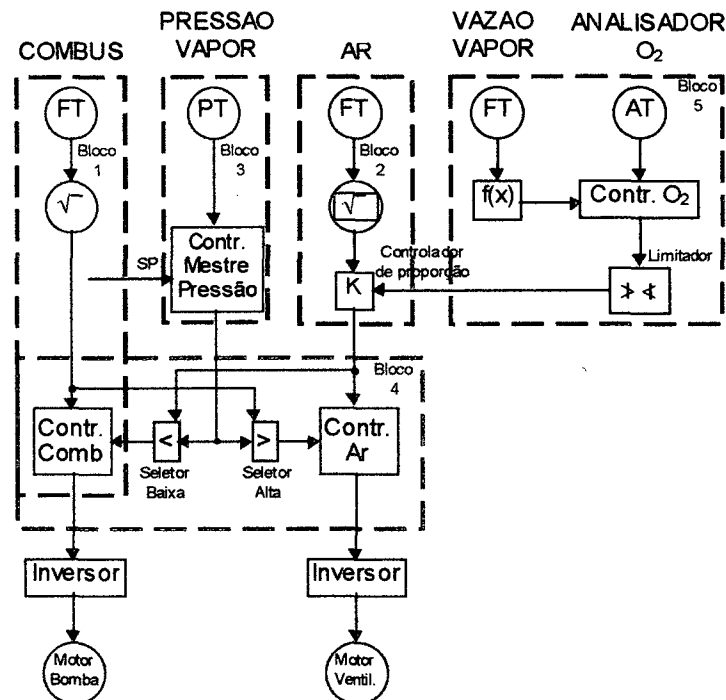
**Figura 28. Relação entre carga da caldeira e excesso de oxigênio**

Nota-se na Figura 28 que os valores ideais de excesso de oxigênio diminuem a medida que se aumenta a carga da caldeira. Embora esses valores variem lentamente com a variação da carga, nas caldeiras de grande



porte essas variações podem significar uma economia considerável já que a quantidade consumida de combustível é muito grande.

Considerando todos esses fatores, foi elaborada a malha de controle do processo de combustão que está representada na Figura 29.



**Figura 29. Malha de controle do processo da combustão**

A malha utiliza a estratégia de controle de realimentação e também, como pode ser observado, o controle em cascata com as medições das vazões de ar e combustível. Além disso, usa também a técnica dos limites cruzados. A malha está dividida em cinco blocos, que serão explicados a continuação.

**Bloco 1:** Composto pelo controlador de combustível que através do sinal recebido do transmissor de vazão compara com um valor set-poin estabelecido pela saída do seletor de alta. De acordo com o resultado da comparação, é enviado um sinal à entrada do inversor que definirá a velocidade de rotação do motor da bomba de óleo e conseqüentemente a vazão de óleo combustível.

**Bloco 2:** Idêntico ao bloco 1, porém referente ao ar de combustão. Foi inserido, após o transmissor de vazão, um controlador proporcional cujo ganho poderá ser alterado de acordo com as necessidades operacionais da planta. É utilizado como controlador de proporção entre a quantidade de ar e combustível.

**Bloco 3:** Este bloco ser chamado de bloco mestre pois é nele que o sinal de pressão, o sinal mestre de controle, é tratado. A variação de pressão na saída de vapor é também uma indicação direta da variação da carga da mesma que implicará em variar a quantidade de ar e combustível para a queima. Portanto, a variável controlada é a pressão de vapor e as variáveis manipuladas são os set-points da vazão de ar e de combustível.

**Bloco 4:** É o bloco que representa a técnica dos limites cruzados. Essa estratégia garante sempre que nunca haverá um excesso de óleo não queimado na fornalha, o que poderia causar fuligem e explosões. Supondo uma queda na pressão de vapor, a saída do controlador será aumentada, pois possui característica reversa. O seletor de alta pressão também terá a sua saída aumentada para o mesmo valor. O controlador de vazão de ar, dado o aumento de seu set-point, enviará um sinal para o atuador da vazão de ar no sentido de aumentar essa vazão.

Conforma a vazão de ar aumenta, o sinal para o seletor de baixa pressão também aumenta. Em consequência, aumenta o set-point do controlador de vazão de óleo. Assim, observa-se que inicialmente aumentou-se a vazão de ar e posteriormente o combustível e foi a vazão de ar que modificou o set-point do combustível. Somente com a variação efetiva da vazão de ar é que o combustível irá variar.

Em uma descida de carga, aumento na pressão de vapor, o funcionamento é similar. Neste caso, o sinal diminuído do controlador de pressão vai ser enviado pelo seletor de baixa atuando no set-point do controlador da vazão de combustível que irá enviar um sinal ao atuador para diminuir a quantidade de combustível injetada na fornalha. O sinal de vazão diminuído vai ser comparado no seletor de alta com o sinal do controlador de

pressão também diminuído. O maior dos dois, mas ainda menor que o sinal original, vai diminuir o set-point do controlador de ar. Verifica-se novamente que o primeiro diminui-se com o combustível e em seguida o ar pois foi a queda de vazão do combustível que provocou a alteração no set-point do controlador de ar. Com esse sistema garante-se excesso de ar tanto na subida como na descida da carga.

**Bloco 5:** Neste bloco, o sinal de vazão de vapor, que é uma indicação da carga da caldeira, é enviado a um controlador, programado com tabelas representando o relacionamento entre índice de carga e o excesso de ar ótimo, que estabelece automaticamente o ponto de ajuste do oxigênio para as condições operacionais do momento. Em outras palavras, o controlador é incrementado com a relação entre o excesso de oxigênio e a porcentagem de carga em relação à carga máxima, representada pela Figura 29. Dessa maneira, como o ponto de ajuste do controlador de oxigênio é variado automaticamente, de acordo com a carga, o rendimento da caldeira será otimizado. Nota-se também a presença de um limitador da influência do analisador do oxigênio na malha de controle, por ele deve ser utilizado somente para ajustes finos (BEGA, 1989)<sup>24</sup>.

Os controladores de ar e óleo enviarão um sinal aos atuadores da vazão de ar e óleo, respectivamente. Conforme descrito anteriormente, esse controle na caldeira pode ser feito através da ação simultaneamente em um damper de ar. Porém, essa ação é exercida somente em duas posições ou vazões denominadas de fogo máximo e fogo mínimo. Desta forma, para complementar o projeto, é sugerido controlar a vazão de ar e combustível através da utilização de controladores eletrônicos de velocidade dos motores do ventilador e da bomba de óleo combustível. Esses controladores são denominados comercialmente de inversores de frequência e controlam a velocidade de motores de indução através da variação de frequência e amplitude da tensão alternada aplicada ao estator do motor. Variando-se a

---

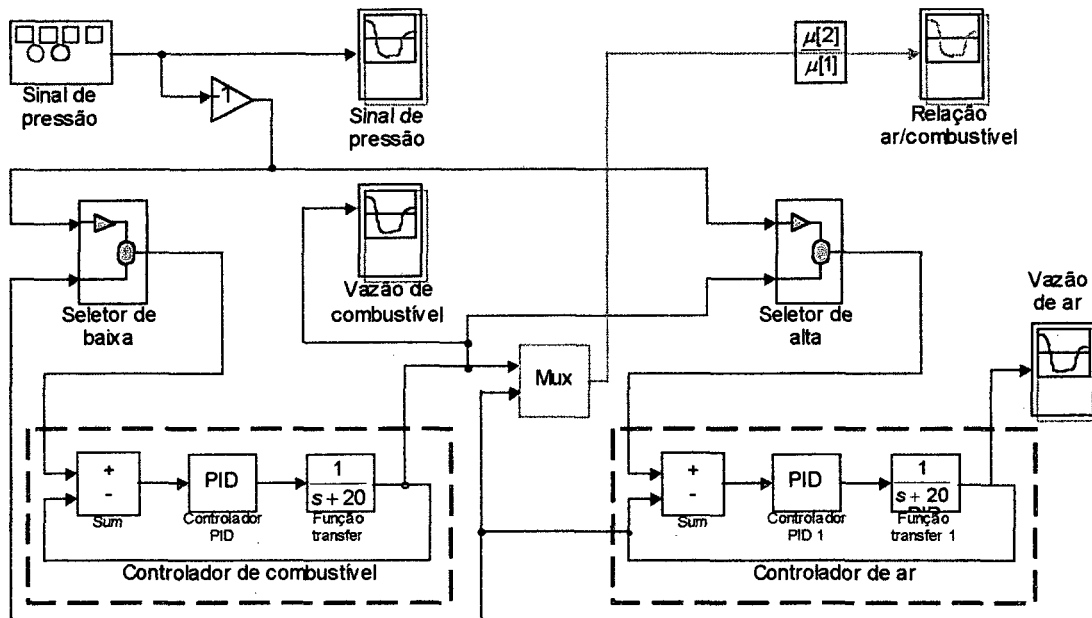
<sup>24</sup> BEGA, Egídio Alberto. **Caldeiras – instrumentação e controle**. Rio de Janeiro: JR, Editora Técnica, 1989.

velocidade, varia-se continuamente a vazão de ar e do combustível. Os inversores de potência comerciais tem as entradas com padrões de instrumentação, facilitando sua inserção na malha de controle.

A inclusão desse tipo de atuador justifica-se porque os motores só irão funcionar à plena carga somente quando for necessário resultando em economia de energia.

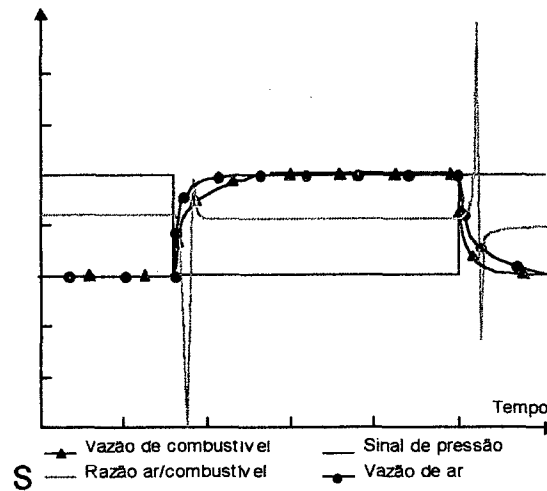
### 6.5.2 Simulação da malha

Para simulação da malha de controle da combustão foi utilizado o software SIMULINK. Devido a sua importância para o perfeito funcionamento da malha de controle, foi realizada a simulação somente do bloco 4, limites cruzados, referente à Figura 29. A Figura 30 representa o diagrama do SIMULINK com a implementação do bloco referido.



**Figura 30. Diagrama de simulação da malha de controle da combustão**

A razão de se realizar a simulação dessa malha é para mostrar a eficiência da técnica de limites cruzados na manutenção de excesso de ar dentro de caldeiras nas transições do valor da pressão. A Figura 31 mostra o resultado da simulação.



**Figura 31. Resultado da simulação**

Considerações sobre o diagrama:

- O sinal de pressão é proporcionado por um gerador de onda quadrada, cuja amplitude e frequência podem ser ajustadas. A variação de pressão é indicada na transição do nível alto para o nível baixo e vice-versa.
- A representação do sinal de vazão de ar, indica aumento ou diminuição dessa vazão. No caso real, esse sinal será enviado à entrada do inversor que por sua vez irá variar a velocidade do motor do ventilador em função desse sinal, atuando na vazão de ar dentro da caldeira.
- Consideração análoga pode ser feita para a indicação da variação de vazão de combustível.
- Observa-se que a malha está em circuito aberto, não havendo, portanto, correção do sinal de pressão com a variação da vazão de ar e de combustível.
- Observa-se também que o sinal da relação ar/combustível mostra que esta relação deve permanecer constante.
- A variação da vazão de ar na descida da pressão é mais rápida o que significa que a vazão de óleo é aumentada mais lentamente para a correção, mantendo excesso de ar no interior da caldeira durante a transição. Na subida da pressão, a diminuição da vazão de ar é

acentuadamente mais lenta resultando no estabelecimento do valor da vazão, para a correção da pressão, mais lentamente do que a vazão de óleo. Da mesma maneira, ocorreu excesso de ar na transição.

### 6.5.3 Especificação dos equipamentos e instrumentos

Considerando a malha de controle de processo da combustão e a instrumentação já existente na caldeira, nota-se a necessidade da aquisição dos seguintes equipamentos para a sua implementação:

- **Quatro controladores digitais:** Serão utilizados para o controle da malha de combustível, ar e do analisador de oxigênio, além da malha de controle de pressão de vapor. A caldeira analisada possui um controlador digital tipo *multi-loop* capaz e atender a esta finalidade sem necessidade da aquisição de outros equipamentos. Com ele podem ser implementados os extratores de raiz quadrada, proporção, limites cruzados e limitador, além da função representando a variação do índice de carga com o teor de oxigênio nos gases da combustão.
- **Dois inversores de potência para motores de indução trifásicos:** Serão utilizados para controle de velocidade do motor do ventilador de ar secundário e da bomba de óleo combustível. Especificações mínimas: Entrada e saída trifásica de 220 V, e potência de 1/2 CV.
- **Um medidor/transmissor de vazão combustível:** Faixa mínima de medição entre 0 e 50 Kg/h.
- **Um medidor/transmissor de vazão de ar:** Faixa mínima de medição entre 0 e 700 Kg/h.
- **Um medidor/transmissor de pressão de vapor:** Faixa mínima de medição entre 0 e 150 psig.
- **Um analisador de oxigênio em linha**

## 6.6 CONTROLE DO INTERTRAVAMENTO

O detalhamento do controle de intertravamento inclui o estudo da eleição da tecnologia, a análise do sistema digital de processamento e a especificação da malha para a implementação do controle.

### 6.6.1 Eleição da tecnologia

O problema do controle da caldeira pode ter sido resolvido das seguintes formas:

- a. Uso de controladores lógicos programáveis (PLC's) integrado a algumas interfaces para poder adquirir sinais como a do sensor de chama ou retroalimentações das linhas de potência (para verificação externa dos dispositivos). O PLC poderia desenvolver a seqüência de passos de acendido e supervisionar o funcionamento da caldeira requerendo-se a conexão a um computador quando precise-se monitorar o sistema.
- b. Uso de um computador exclusiva: O problema da execução de comandos pode ser solucionado através da porta paralela de um computador. Para monitoramento variáveis deveria incorporar-se um sistema de aquisição de dados. Esta alternativa proporciona as vantagens da visualização e armazenamento que uma ferramenta deste tipo possui, apoiada em um software de amigável interação com o usuário.
- c. Uso de um sistema eletrônico de aplicação específica: Baseado em um microprocessador e apoiado por uma variedade de circuitos de suporte. Este meio permite a realização das tarefas de comando, monitoramento, reporte e registro que a aplicação requer. Além disso pode comunicar-se com um computador, fazendo desta maneira uso de todas as capacidades que pode oferecer.

Já que a escolha de uma determinada tecnologia depende em grande parte das condições do país, a opção elegida foi a terceira principalmente pelas seguintes razões.

Um sistema que pode ser residente no ambiente em que encontra-se instalado a caldeira, levando em conta as altas temperaturas e a atmosfera corrosiva, não faz deste um lugar adequado para albergar um computador. Adicionalmente, o computador é um equipamento de propósito geral que requer de muitas adaptações e interfaces para cumprir com este fim, portanto, este tipo de aplicação não justifica a dedicação exclusiva dela, já que ficam excluídos todos os seus usos restantes.

Conta-se com grande disponibilidade de microcontroladores no atual lugar de interesse (Cuba), que foram adquiridos devido a seu preço muito inferior comparado com o preço de um CLP no mercado, sem mencionar que o circuito implementado com o microcontrolador, embora cumpra as mesmas funções de um CLP, é tão flexível e geral que, pode ser aplicado para qualquer outro processo do próprio engenho açucareiro, basta trocar o software para a sua implementação.

Por outro lado, a capacidade de fazer um registro detalhado das falhas ocorridas, faz o microcontrolador mais conveniente que um PLC. O sistema eletrônico do microcontrolador é capaz de ser configurado pelo usuário, mas não o PLC, cujo programa deve ser modificado e novamente carregado quando for precisada alguma operação especial ou conectar um novo equipamento.

Adicionalmente, se o usuário dispõe de um computador, sempre está aberta a possibilidade de poder conectar o sistema eletrônico o computador, permitindo transmitir o estado do sistema para um software mais representativo.

Para finalizar e com a finalidade de oferecer um produto de custo relativamente menor ao que implicaria oferecer uma solução baseada nas outras duas alternativas, optou-se por desenvolver um sistema projetando absolutamente todos seus elementos, o qual proporciona ampla liberdade para a incorporação de todas as capacidades que possui sem estar restringidos por um projeto predeterminado que implicaria aumentar os custos e/ou eliminar capacidades.



### 6.6.2 Sistema digital de processamento

O sistema digital encarrega-se de realizar as funções correspondentes ao processamento da informação, incluindo adicionalmente as funções de registro de informação, a administração dos demais componentes do sistema e a coordenação das tarefas.

O sistema digital é um sistema baseado em um microprocessador, o qual permite que o sistema eletrônico seja capaz de afrontar eficientemente o grande número de tarefas que devem ser cumpridas, dispondo de uma diversidade de circuitos de suporte, os quais são configurados e/ou governados pelo microcontrolador. Desta forma, o microcontrolador converte-se no elemento central do sistema eletrônico.

O sistema digital de processamento está conformado pelos seguintes elementos:

- Microcontrolador MCS Intel 8951
- Memória RAM
- Memória EEPROM
- Circuito temporizador
- Circuito de supervisão do microcontrolador
- Circuito da fonte do circuito eletrônico de controle

#### **Microcontrolador MCS Intel 8951**

Um microcontrolador é um componente eletrônico que incorpora em seu invólucro um ou mais microprocessadores e uma série de periféricos (contadores/temporizadores, latches, interfaces seriais, memórias, etc.), permitindo dessa forma, a construção de sistemas compactos e poderosos.

Diversos fabricantes oferecem diversos tipos de microcontroladores, os quais são caracterizados por seus periféricos (tipo e quantidade) e microprocessadores, incluídos na pastilha. Alguns fabricantes, tal como a Motorola, oferecem ao usuário a possibilidade de escolher a incorporação de certos periféricos no microcontrolador genérico para adequá-lo à aplicação desejada. Essa interação entre usuário e fabricante acaba gerando novos produtos de linha que podem ser úteis a outros usuários.

Os microcontroladores podem ainda ser classificados quanto ao uso genérico ou específico, tais como os direcionados ao controle de display de cristal líquido, controle de vídeo, controle de barramento, etc.

Os periféricos incorporados nas pastilhas dos microcontroladores têm por objetivo reduzir a necessidade de circuitos externos, contudo tal fato está diretamente relacionado com a aplicação. Desse modo, várias combinações de periféricos são oferecidas pelos fabricantes, gerando o que se conhece por família de um microcontrolador. Dentre os periféricos normalmente encontrados nos microcontroladores pode-se citar: portas de entrada e saída, contadores/temporizadores, interfaces seriais, memórias RAM/ROM/EPROM/EEPROM, unidades PWM, temporizadores tipo watchdog, conversores A/D, unidades geradoras de evento, unidades detectoras de eventos. Menos comumente são encontrados por exemplo: controladores de sinais para displays de cristal líquido, controladores de redes e unidades de autoprogramação de memória EPROM.

A escolha do uso de um certo microcontrolador é baseada, portanto na sua aplicação e no seu custo. No que tange à aplicação, o microcontrolador escolhido deve requerer o menor número de periféricos externos possível e o menor esforço de programação, ou seja, possuir um conjunto de instruções que se adeque às operações mais frequentemente realizadas no programa.

A Intel oferece três famílias de microcontroladores: a MCS48, MCS51 e a MCS96, sendo que a MCS51 tem encontrado grande aceitação no mercado brasileiro no últimos anos. Variações dessa família são fornecidas também por outros fabricantes entre os quais estão: PILHIPS, AMD, SIEMENS, OKI e MATRA /HARRIS.

A família MCS51 tem como principal característica sua CPU, a qual é otimizada para operações de controle e operações booleanas. Para facilitar tais operações encontram-se no conjunto de instruções, operadores para manipulação direta de bits. As características básicas desta família são:

- CPU de 8 bits;

- Capacidade de endereçar até 64 Kb de memória de programa;
- Capacidade de endereçar até 64 Kb de memória de dados;
- 4 Kb de memória de ROM/EPROM interna para programas;
- 128 bytes de memória RAM interna com características especiais;
- 32 linhas bidirecionais e individualmente endereçáveis;
- 2 temporizadores / contadores de 16 bits;
- 6 fontes / 5 vetores de interrupção com 2 níveis de prioridade;
- oscilador interno.

As características citadas são básicas, no entanto existem variações dentro da própria família MCS51. A Tabela 5 lista os principais elementos desta família.

**Tabela 5. Elementos da família MCS51**

Versão com ROM interna	ROM [kby]	RAM [by]	Temporiz. de 16 bits	Tecnologia	Versão sem ROM	Versão com Eprom
8051	4	128	2	NMOS	8031	8751
80C51	4	128	2	CMOS	80C31	87C51
8052	8	256	3	NMOS	8032	8752
80C52	8	256	3	CMOS	80C32	87C52
80C53	8	192	2	CMOS	-	87C54
83CL410	4	128	2	CMOS Low Power	80CL410	-
83C451	4	128	2	CMOS	80C451	87C451
83C528	32	512	3+watchdog	CMOS	80C528	87C528
83C550	4	128	2+watchdog	CMOS	80C550	87C550
83C552	8	256	3+watchdog	CMOS	80C552	87C552
83C592	16	512	3+watchdog	CMOS	-	87C592
83C582	6	256	2	CMOS	-	-

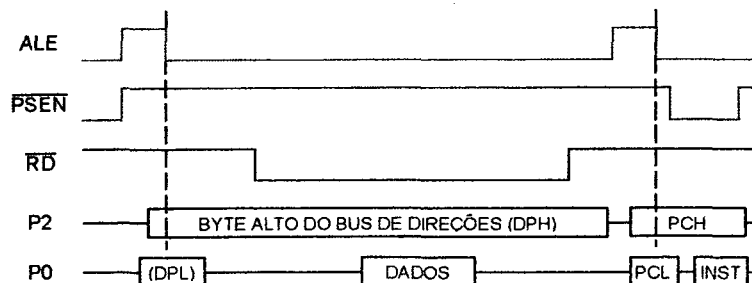
Depois da análise das diferentes alternativas foi selecionado o microcontrolador MCS Intel 8951 que possui as seguintes características:

- Frequência de oscilador: 12 MHz, a qual proporciona um tempo de execução de uma operação de um microsegundo. Esta velocidade de processamento permite realizar um grande número de tarefas por vez, já que o microcontrolador pode realizar um milhão de operações por segundo.

- Memória interna UVEPROM de 4 Kbytes: Esta memória é usada para armazenamento de programas, oferecendo a vantagem de proteger a leitura do programa mediante a ativação de uma cadeia de encriptação. Por outra parte, reduz a necessidade de incluir no sistema uma memória EPROM externa, a menos que seja preciso uma capacidade de memória maior que 4 Kb.
- Memória interna RAM de 256 bytes: É subdividida em área de banco por registros, área direcionável bit por bit e área de registros especiais. Por outro lado, dispõe-se de uma área RAM de 128 bytes, adicional às anteriores, para propósitos de armazenamento temporal.
- Quatro portas paralelas de oito bits: Podem ser usadas como portas de saída ou entrada digital. Desde o momento que o microcontrolador dispõe de uma memória interna de programas (UVEPROM) e uma memória interna de dados (RAM de 256 bytes), não requerem-se conectar memórias externas. Porém, se precisa-se capacidade de armazenamento adicional ou necessita-se direcionar algum dispositivo, perde-se imediatamente a disponibilidade de duas portas que passam a ser usadas como o barramento de dados e o barramento de endereços.

A porta P0 tem a função de portar os bits do barramento de dados e o byte baixo do barramento de endereços. Isto é possível já que o uso da porta multiplexa-se no tempo, ou seja, quando o microcontrolador está efetuando um ciclo de leitura ou escrita, este usa parte do ciclo para emitir o byte e a outra parte para emitir o barramento de dados. No primeiro intervalo de tempo, o qual está marcado pelo sinal de controle ALE (Address Latch Enable), a porta entrega o byte baixo do barramento de endereços e logo de este intervalo entrega o barramento de dados. Para poder multiplexar o byte baixo do barramento de endereços e o barramento de dados, usa-se um circuito Latch 74LS373, cujo sinal de clock é ativado com o sinal ALE na borda de descida, permitindo desta forma que o byte baixo do barramento de endereços seja retido no circuito latch e não desapareça quando chegar o barramento de dados.

A porta P2 desempenha a função de emitir o byte alto do barramento de endereços durante todo o intervalo de tempo que dura o ciclo de leitura ou escrita. A Figura 32 mostra os sinais de controle e manejo das portas P0 e P2 do microcontrolador, durante a execução de uma instrução de leitura de memória externa.

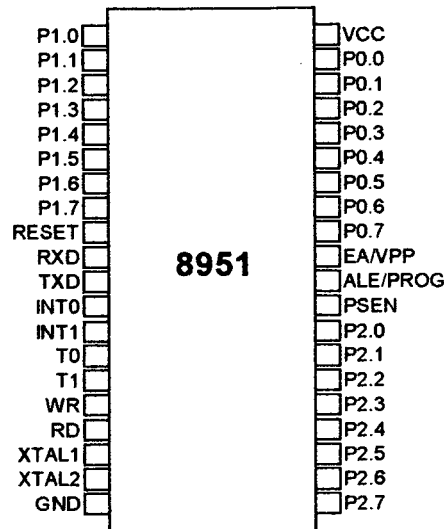


**Figura 32. Ciclo de leitura de memória externa**

A porta P1 é o que fica efetivamente como porta de entrada ou saída, podendo ser configurada individualmente cada bit em um dos dois modos, oferecendo desta forma oito saídas e/ou entradas digitais.

A porta P3 também pode ser configurado como porta de entrada ou saída, porém, alguns de seus pinos têm funções alternadas usadas pelos dispositivos circuitais internos, tais como: as entradas de interrupção 0 e 1, os pinos T0 e T0EX do contador de eventos e da interrupção do Timer 0, os pinos T1 e T1EX do contador de eventos e da interrupção do Timer 1 e os pinos RX e TX correspondentes as linhas de transmissão da porta serial de comunicações.

- Dois circuitos temporizadores (Timer 0 e Timer 1): Podem atuar como temporizadores ou contadores de eventos. Cada um tem associado consigo uma interrupção.
- Uma porta serial de comunicações, a qual permite estabelecer comunicação serial em diversos modos. Esta requer o emprego de um dos temporizadores para estabelecer a velocidade de transmissão. A Figura 33 mostra as entradas e saídas do microcontrolador 8951.



**Figura 33. Microcontrolador 8951**

### Memórias

Estas são usadas para armazenar informação. No caso da memória RAM, a informação guardada é temporal e só é usada no presente ciclo de funcionamento do microcontrolador. Ela inclui variáveis, tabelas de dados, ponteiros das tabelas, filas temporais, etc. No caso da memória EEPROM, a informação registrada permanece depois de desenergizar o sistema digital, desta forma, podem-se guardar registros, configurações e tabelas de inicialização.

### Circuito temporizador

Conhecido também como relógio de tempo real, este circuito cumpre a função de gerar o sinal temporizado, que permite marcar os segundos da seqüência de acendido e apagado.

O circuito envia ao microcontrolador níveis baixos de tensão a cada certo intervalo de tempo. Desta forma, o microcontrolador recebe externamente o sinal do relógio necessário para poder contabilizar os segundos transcorridos em cada fase do sistema, assim como para poder executar os comandos nos segundos predeterminados.

Este circuito cumpre também com a função de registrar o dia e hora, a qual é lida pelo microcontrolador da memória RAM que possui este circuito, cada vez que um reporte de falha precisa ser preenchido ou quando apresenta-se o dia e a hora.

O sinal do relógio requerido pelo processo também pode ter sido obtida de um dos Timers do microcontrolador, embora conseguiu-se comprovar experimentalmente que seu sinal temporizado não era muito estável, ou seja, que se adiantava ou atrasava em relação a um sinal horário de referência. Isto deve-se a que a temporização implicava programar um contador de oito bits em modo de autorecarga, o qual era incrementado com a velocidade do relógio de oscilação do microcontrolador.

A precisão obtida com oito bits para gerar uma janela de tempo de um segundo não era muito grande, e por outro lado o cristal de oscilação do microcontrolador não era muito estável. O circuito temporizador provê uma melhor resposta para esta aplicação.

### **Circuito de supervisão do microcontrolador**

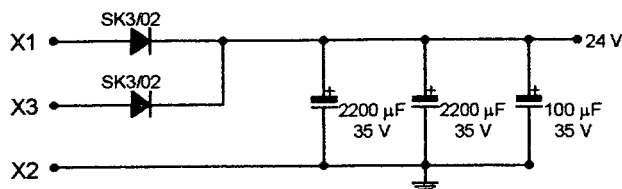
Mais conhecido como circuito “watch dog” (cão de guarda), cumpre com a função de supervisionar as funções lógicas do microcontrolador, dando assim segurança ao funcionamento.

O microcontrolador envia permanentemente um sinal, conformado por um trem de pulsos, ao circuito de supervisão chamado de “sinal de consciência”. O circuito de supervisão espera um espaço de tempo para a chegada deste sinal.

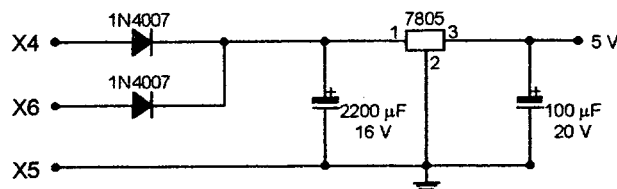
No caso exista uma falha no funcionamento do microcontrolador, por ingresso deste em um laço interno infinito ou por outro motivo, este deixará de enviar o sinal de consciência. Excedera-se então o limite de tempo de espera imposto pelo circuito de supervisão, em consequência este atua imediatamente reiniciando o microcontrolador.

### **Circuito da fonte do circuito eletrônico de controle**

Utilizados para manter os níveis de tensões requisitados pelo microcontrolador e as interfaces de entrada e saída acopladas a este microcontrolador. A Figura 34 apresenta a fonte de 24 V<sub>DC</sub> e a Figura 35, a fonte de 5 V<sub>DC</sub>.



**Figura 34. Fonte + 24 V<sub>DC</sub>**



**Figura 35. Fonte + 5 V<sub>DC</sub>**

### 6.6.3 Interfaces

Os circuitos periféricos precisam de módulos que permitam estabelecer o enlace de seus sinais com o meio exterior com o qual interatuam. As interfaces permitem resolver diversos problemas de adaptação. As interfaces das que dispõe o sistema eletrônico descrevem-se a seguir.

**Interface de controle:** Devido a que o nível de tensão que circula através dos equipamentos da caldeira é da ordem de 220 V<sub>AC</sub> projetou-se uma interface que permite isolar eletricamente a corrente que circula pelos equipamentos da caldeira da tensão contínua (5 V<sub>CC</sub>) que existe no sistema eletrônico.

Esta interface está conformada por um grupo de relés eletromecânicos, de forma tal que a linha de alimentação de corrente alternada de cada equipamento da caldeira é conectada em série através dos contatos normalmente abertos de cada relé.

Cada relé dispõe de um circuito manejador, formado por um optoacoplador, o qual está composto por um diodo emissor de luz e um fototransistor. O diodo emissor de luz está conectado a uma das saídas do periférico da interface de controle. O fototransistor está conectado a um transistor que encarrega-se de prover corrente à bobina do relé.



Quando o periférico da interface de controle envia um nível lógico alto ( $5 V_{DC}$ ), o diodo emissor de luz polariza-se diretamente e emite luz à base do fototransistor. Este satura-se entregando  $24 V_{DC}$  através de uma resistência à base de um transistor, o qual passa do estado de corte ao estado de saturação, procedendo neste passo a prover corrente à bobina do relé.

A fonte de  $24 V_{DC}$  empregada para energizar os relés, está referida a um terra diferente do terra da fonte de  $5 V_{DC}$  que alimenta o sistema digital. Portanto, mantém-se um isolamento elétrico, graças ao emprego dos optoacopladores, o qual confere ao sistema eletrônico um nível de imunidade ao ruído procedente dos relés.

A porta periférica da interface de controle que lê os interruptores dos sensores limites, também dispõe de uma interface baseada em circuitos optoacopladores, os quais permitem manter isolamento elétrico com os sensores. O circuito manejador de relés e o circuito de interface com sensores limites apresenta-se na Figura 36.

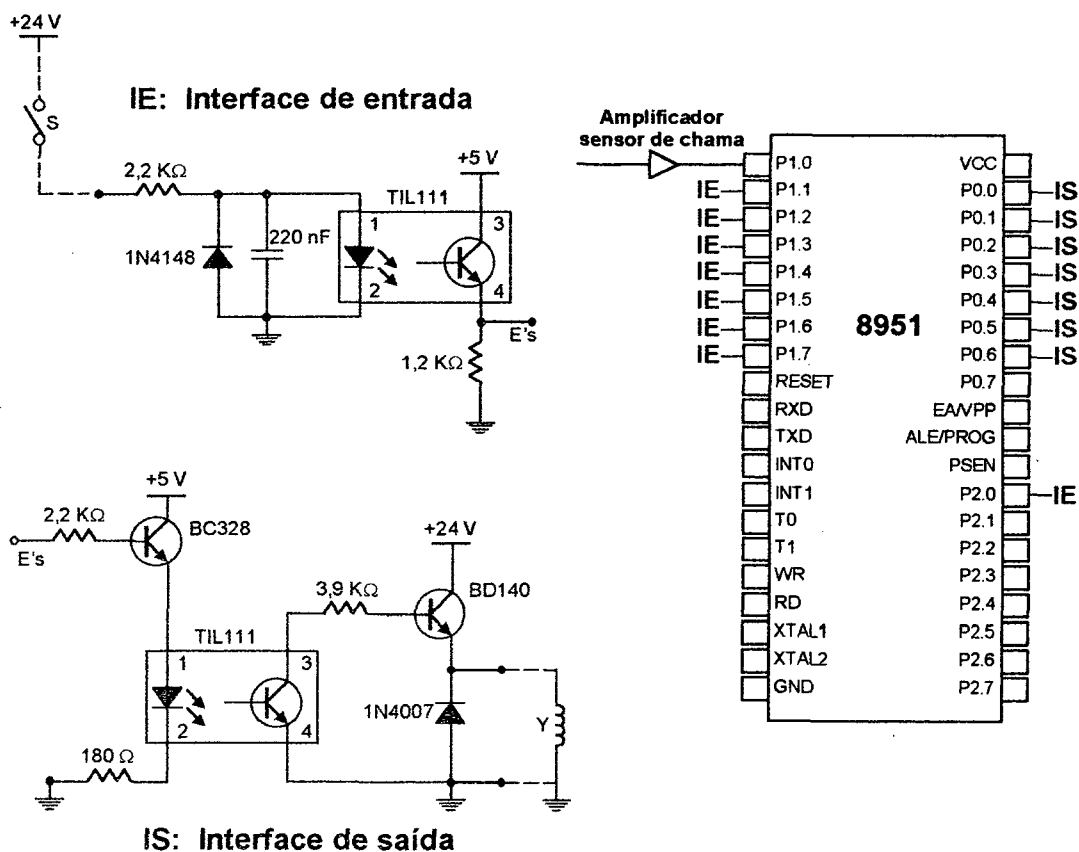


Figura 36. Interface elétrica

**Interface de comunicações:** Os níveis de tensão que manejam a porta de comunicações serial do computador, correspondentes aos níveis lógicos de informação 0 e 1 são de  $-7\text{ V}$  e  $+12\text{ V}$  segundo a norma RS485.

A fim de poder estabelecer comunicação serial bidirecional entre o sistema eletrônico e um computador, o sistema eletrônico tem um circuito que eleva os níveis lógicos que manejam a porta de comunicações serial do microcontrolador. Estes níveis são de  $5\text{ V}_{\text{DC}}$  e  $0\text{ V}_{\text{DC}}$  para um 1 ou um 0 lógico respectivamente.

#### 6.6.4 Circuito amplificador do sensor de chama

Este circuito permite estabelecer a interface entre o sensor de chama e o microcontrolador, gerando os níveis de tensão requeridos por ele e efetuando a filtragem adequada ao sinal.

Devido a natureza do sensor de chama usado requer-se um circuito amplificador especial. Os sensores de chama mais comuns são: o sensor ultravioleta, o sensor fotoresistivo e o sensor infravermelho. Cada um deles tem seu próprio princípio de funcionamento e portanto, cada um, requer um circuito particular de amplificação.

O sensor ultravioleta detecta a radiação ultravioleta que provém do espectro de luz visível que emite a chama. Este sensor gera uma corrente da ordem de microampères precisando uma amplificação e filtragem que elimine o ruído do sinal enviado por ele.

O sensor infravermelho detecta a radiação infravermelha, porém, seu desempenho é menos eficiente comparado com o do sensor ultravioleta já que nas caldeiras a radiação infravermelha não só é emitida pela chama mas pelas paredes refratárias do lar da combustão. Neste caso diferencia-se a radiação emitida pela chama, que tem uma frequência de oscilação média  $10\text{ Hz}$ , da radiação do refratário que tem um nível constante, o que implica a necessidade de uma filtragem que elimine a componente continua do sinal do sensor infravermelho.

No caso do sensor infravermelho, este comporta-se como uma resistência elétrica que varia com a intensidade da radiação infravermelha exposta ao sensor. O sentido da variação é de decremento da resistência ante um incremento da intensidade da radiação.

O circuito amplificador para o sensor infravermelho está conformado por um amplificador não inversor, o qual entrega um nível mínimo de tensão quando não tem o sensor infravermelho conectado a ele. Na presença do sensor mas na ausência de intensidade de radiação (escuridão exposta ao sensor), tem um nível de tensão maior que o anterior, mas inferior aquele que tem quando a chama está presente.

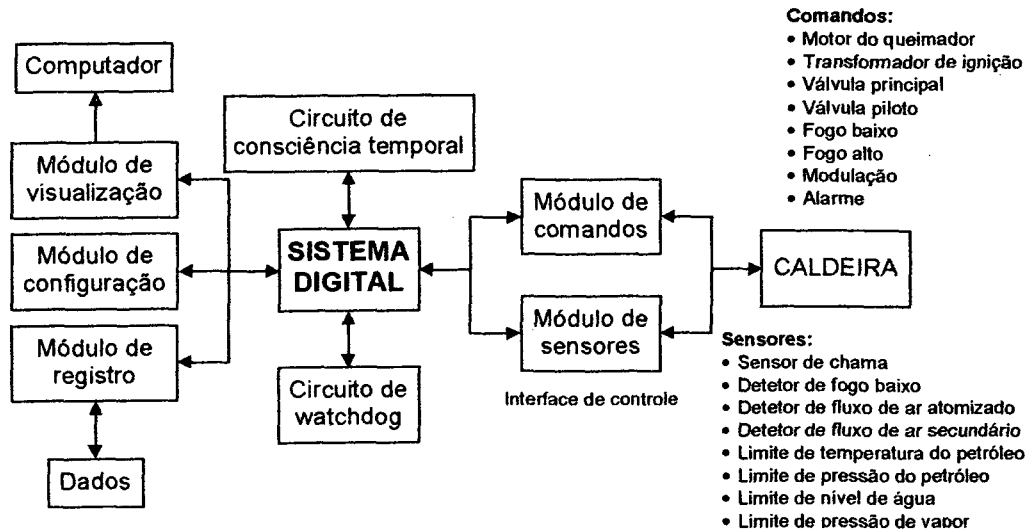
Depois do amplificador não inversor, há um filtro ativo passabanda com as seguintes especificações: frequência de passo superior aos 15 Hz, frequência de passo inferior aos 8 Hz, frequência de rejeição inferior aos 3 Hz, frequência de rejeição superior aos 40 Hz, atenuação de 3 dB na banda de passo e 30 dB na banda de rejeição. O processo matemático para o cálculo deste filtro encontra-se no Anexo 4.

Na etapa final do circuito amplificador, logo do filtro passabanda, há um circuito retificador para obter um nível de tensão contínua e um circuito comparador para estabelecer um nível de umbral de detecção de chama.

Se o sinal que provém do filtro passabanda é inferior à tensão de referência conectada ao terminal positivo do comparador, a saída deste é um nível de  $5 V_{DC}$ . Com este nível satura-se um transistor, o qual entrega o nível lógico 0 a porta de entrada do periférico da interface de controle, indicando assim que não existe presença de chama no lar de combustão. Se o sinal do filtro é superior ao nível de referência, a saída do comparador é nível de  $-5 V_{DC}$ , cortando o transistor, entregando um nível lógico 1 ao periférico e indicando a presença de chama no lar.

#### **6.6.5 A malha de controle**

O controlador programável de intertravamento está composto por uma série de módulos, tal como apresenta-se na Figura 37.



**Figura 37. Malha do controle de intertravamento**

Este controle é um sistema digital baseado em um microprocessador que possui um ingresso de dados por parte do usuário mediante o teclado do computador. Estes dados também podem ser consultados e armazenados em menus.

Em sistemas com microcontroladores os dados são lidos e escritos em portas de entrada e saída paralelas ou seriais, em dispositivos internos ao chip, ou dispositivos externos mapeados em memória. A implementação do procedimento de leitura e escrita depende da linguagem utilizada. A fonte de dados (sensores) que variam conforme o processo controlado, deve ter seus sinais convertidos para sinais binários antes de serem entregues ao microcontrolador. A leitura de dados atribui valores às variáveis de entrada. A escrita de dados atribui o valor resultante do processamento, contido na variável de saída, ao dispositivo de saída ou atuador.

As diversas tarefas que realiza o controlador de intertravamento são agrupadas em cinco funções principais, sendo as duas primeiras concernentes ao controle do sistema mecânico da caldeira e ao controle de segurança necessários na operação. As três seguintes são referidas às aplicações que permitem interagir com o usuário, as quais dão ao controlador a capacidade de visualização do estado de funcionamento, configuração e registro de informação.

**Controle do sistema mecânico:** O controlador efetua as operações de acendido, apagado e verificação do funcionamento normal do sistema da caldeira. Tanto para o acendido quanto para o apagado da caldeira, executam-se uma série de passos que consistem na ativação ou desativação dos equipamentos que operam sobre o sistema mecânico, verificando em cada passo que as condições dos sensores indiquem o normal desenvolvimento das operações efetuadas. Quando situações anormais de funcionamento acontecem, o sistema toma imediatamente uma ação preventiva acompanhada da emissão de um alarme, que inclui a identificação da causa que provocou a falha.

A caldeira dispõe de cinco equipamentos básicos que governam o funcionamento do sistema mecânico e que serão descritos no próximo capítulo. Estes equipamentos são ativados ou desativados segundo a seqüência de operações. Os sensores dos que dispõe o sistema agrupam-se em os sensores limites e os sensores detetores.

Os sensores limites indicam que os valores da variáveis com as que opera o sistema da caldeira encontram-se dentro o fora da faixa normal de funcionamento, adotando para isto duas posições: normal ou anormal. Os sensores detetores, que são o detetor de fogo baixo e o detetor de chama, indicam a presença desses estados. A condição adequada dos sensores é determinada na seqüência de operações.

**Controle de segurança:** Dada a necessidade de segurança na operação da caldeira, o controlador possui um módulo de supervisão das funções dos sistema eletrônico, que permite poder levar a caldeira a um estado seguro ante a presença de uma falha, o qual é basicamente o apagado absoluto dos equipamentos da caldeira. Por outro lado, realiza-se uma autoexaminação dos componentes do sistema eletrônico antes de proceder a efetuar o controle da caldeira.

São previstas algumas situações não freqüentes, como curto-circuito no sistema eletrônico ou corte da alimentação ao controlador, ante as quais o controlador responde cortando a energia a todos os equipamentos da caldeira como uma medida de segurança.

**Visualização do estado do sistema:** Dada a importância que tem a possibilidade de observar o sucedido durante o funcionamento da caldeira em qualquer uma das suas etapas, o controlador tem a capacidade de reportar o estado do sistema no monitor do computador, tanto no seu progresso quanto no seu comportamento, mediante a utilização do software. O reporte inclui também os comandos executados, ou seja, o estado de acendido e apagado dos equipamentos da caldeira.

**Configuração da operação:** O usuário da caldeira tem a possibilidade de alterar os intervalos de tempo de cada uma das fases do funcionamento, e inclusive, pode programar o tempo que deve permanecer acendida a caldeira. Os intervalos de tempo que podem ser modificados pela configuração do usuário são: Prepurga, ignição, estabelecimento de chama principal e postpurga.

Para preservar a segurança, o acesso a esta configuração está limitado pelo ingresso de uma senha. Além, o ingresso de um intervalo de tempo incoerente com a norma de segurança é cancelado e, por defeito, a configuração permanece inalterada.

**Registro de dados:** O controlador permite registrar as falhas ocorridas no sistema, incluindo: A fase na que ocorreu a falha, tempo transcorrido desde o início da fase, condição da falha (sensor que produziu a condição de alarme) e dia e hora em que se produziu a falha.

A informação do registro de falhas é de utilidade para o usuário, já que permite identificar defeitos na caldeira ou nos equipamentos, a partir de um seguimento das falhas ocorridas.

## **7. CONTROLADOR DE INTERTRAVAMENTO**

Neste capítulo é mostrada a importância de utilizar um controlador de intertravamento, são descritos os equipamentos que controla e as variáveis que registra, além de especificar as tarefas específicas deste controlador e de apresentar os circuitos que o compõem.

Um controlador de intertravamento utilizado em caldeiras é constituído de um conjunto de sensores, relés e acionadores que asseguram a prevenção contra conseqüências de eventos que possam ser danosos para caldeiras, evitando as operações ou ocorrências em situações inseguras. É este sistema que garantirá a operação com segurança do processo de geração como a ignição, as paradas e situações de emergências.

### **7.1 NECESSIDADE DO CONTROLADOR**

Entre os acidentes mais sérios que ocorrem enquanto funciona a caldeira podem-se mencionar os problemas que surgem no lar e no lado da água. A explosão no lar é o pior dos acidentes da caldeira, enquanto que no lado da água uma sobrepressão ocasiona uma fuga de vapor que geralmente é suficiente para manter a caldeira funcionando a uma pressão aceitável que não implique risco.

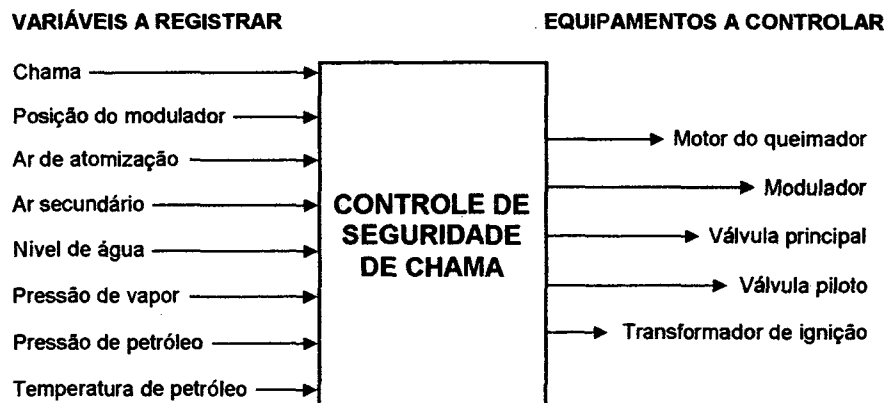
A causa básica de explosões na caldeira é a ignição de combustível acumulado no lar ou nos condutos que transportam os gases da combustão à chaminé. Um composto de combustível perigoso dentro do lar consiste na acumulação de uma excessiva quantidade de combustível combinado com ar, em condições que ocasionem uma rápida ou descontrolada combustão quando a fonte de ignição é fornecida. Uma explosão no lar pode resultar da ignição desta acumulação se o composto é tal que consiga gerar uma força explosiva.

Em resumo, explosões e deformações da caldeira são o resultado de procedimentos não apropriados executados pelos operários, mau projeto dos equipamentos ou mau funcionamento do controlador.

As situações que geram um composto explosivo são muito diversas, entre elas encontram-se:

- Uma interrupção de combustível ou ar ou apagar o transformador de ignição, de modo que ocasione o desvanecimento momentâneo da chama seguida de um intento de reacendido.
- Filtração de combustível e a ignição da acumulação com chispa ou outra fonte de acendido.
- Repetidos intentos de apagar a chama sem uma apropriada purga, resultando na acumulação do produto explosivo.
- Em uma caldeira composta por vários queimadores, a acumulação de um produto explosivo como resultado de uma perda de chama ou combustão incompleta, de um ou mais queimadores em presença de outros queimadores operando normalmente ou enquanto são acendidos outros queimadores.
- A acumulação de um produto explosivo como resultado da extinção total da chama e a posterior ignição da acumulação em um intento de acender a caldeira.

A Figura 38 apresenta as variáveis a serem registradas e os equipamentos a serem controlados para exercer este controle em uma caldeira de mediana envergadura.



**Figura 38. Variáveis e equipamentos de interesse para o controlador**



A caldeira a controlar é uma caldeira aquotubular com modulador. O controle de intertravamento é programável, para queimadores de petróleo ou gás, não reinicializável automaticamente, e com piloto interrompido.

O termo programável refere-se a possibilidade de configurar a temporização da operação. O termo reinicializável automaticamente refere-se a que, no caso de falha de chama, o sistema não deve intentar um reacendido automático. O termo piloto interrompido refere-se a que o sistema manterá aberta a válvula piloto até antes iniciar a verificação da chama principal.

## **7.2 EQUIPAMENTOS A CONTROLAR**

São os equipamentos que o controle de intertravamento opera com a finalidade de dar um arranque e um apagado seguro, ativando cada um deles em um momento estabelecido. O controle destes equipamentos é feito alimentando-os mediante uma série de relés.

### **7.2.1 Motor do queimador**

É um motor alimentado com energia elétrica que, acoplado a umas aspas, gera o fluxo de ar necessário para a combustão e impulsão dos gases, e para atomização do combustível líquido no caso este seja atomizado com ar. É comum encontrar que este motor forneça também a potência necessária para impulsionar a bomba de combustível. O controlador, mediante um relé, tem a faculdade de acendê-lo e apagá-lo quando seja conveniente.

### **7.2.2 Modulador**

É um equipamento composto por um motor e um controlador, que determina a quantidade de ar e de combustível liberado para a combustão, mediante o movimento de um regulador de ar e de uma válvula de combustível regulada através de uma série de acoplamentos mecânicos com o motor. O controle de intertravamento determina qual o modo de operação deste equipamento, seja controlado ou automático.

No modo controlado, o controle de intertravamento pode controlar o motor do modulador levando-o a uma das seguintes posições:

- Fogo baixo: Esta posição do motor do modulador determina uma mínima abertura da válvula de combustível e do regulador de ar, independente da pressão de vapor no interior da caldeira.
- Fogo alto: Esta posição do motor do modulador determina uma máxima abertura da válvula de combustível e do regulador de ar, independente da pressão de vapor no interior da caldeira.

No modo automático, chamado de modulação, o controle de intertravamento indica ao modulador que o controle da válvula de combustível e do regulador de ar deve estar a cargo do controle da combustão, o qual ante uma diminuição de pressão de vapor aumentará a abertura da válvula de combustível e do regulador de ar.

O controle do modulador efetua-se mediante a energização de um de três contatos, ocasionando que o modulador coloque o motor em posição de fogo alto, fogo baixo ou que trabalhe em modulação, utilizando um relé para cada posição.

### **7.2.3 Válvula principal de combustível**

É a válvula solenóide, controlada pelo controlador mediante um relé, que deixa passar o combustível para o funcionamento normal da caldeira. Esta válvula está em série com outra válvula regulada acionada pelo modulador e a qual é utilizada para modular a quantidade de combustível.

### **7.2.4 Válvula piloto de combustível**

Com a finalidade de assegurar o acendido do combustível que vai ser utilizado para a operação da caldeira, costuma-se empregar uma chama piloto, que está presente uns segundos nos momentos iniciais da expulsão deste combustível. A chama é gerada acendendo um combustível de fácil ignição, cujo passo está regulado por uma válvula solenóide, chamada de válvula piloto de combustível, a qual é controlada pelo controlador mediante um relé.

### 7.2.5 Transformador de ignição

É um transformador que gera uma chispa para inflamar o combustível liberado pela válvula piloto do combustível. A sua alimentação é controlada pelo controlador mediante um relé.

## 7.3 DETECTORES E SENSORES

Com a finalidade de efetuar o controle na caldeira, existem uma variedade de dispositivos que permitem registrar seu funcionamento.

### 7.3.1 Detectores de limite

Estão encarregados de detectar se:

- A água tem diminuído debaixo de um nível mínimo admissível, devido possivelmente a uma falha na bomba de água ou a um imperfeito no controle do nível de água.
- A pressão e temperatura do petróleo tem diminuído por debaixo do nível mínimo de operação. Requer-se que o petróleo seja expelido com um nível de pressão que permita sua atomização, além de precisa-se que o petróleo pré-aquecido ingresse ao queimador com um determinado nível de temperatura, com a finalidade de obter uma combustão eficiente.
- A pressão de vapor gerado tenha sobrepassado um nível máximo, o qual encontra-se fixado pela pressão de projeto da caldeira. É uma manobra costumada pelos operários, forçar um apagado da caldeira desligando da linha de vapor todas as máquinas alimentadas pela caldeira. Eliminando a carga deste forma, necessariamente a pressão terá que aumentar e o controle de intertravamento apagará todos os equipamentos da caldeira.

### 7.3.2 Detectores de funcionamento

Estão encarregados de detectar se:

- Existe o fluxo de ar secundário, necessário para a combustão e impulsão da chama. A ausência deste fluxo pode ser originada por um imperfeito no motor do queimador.

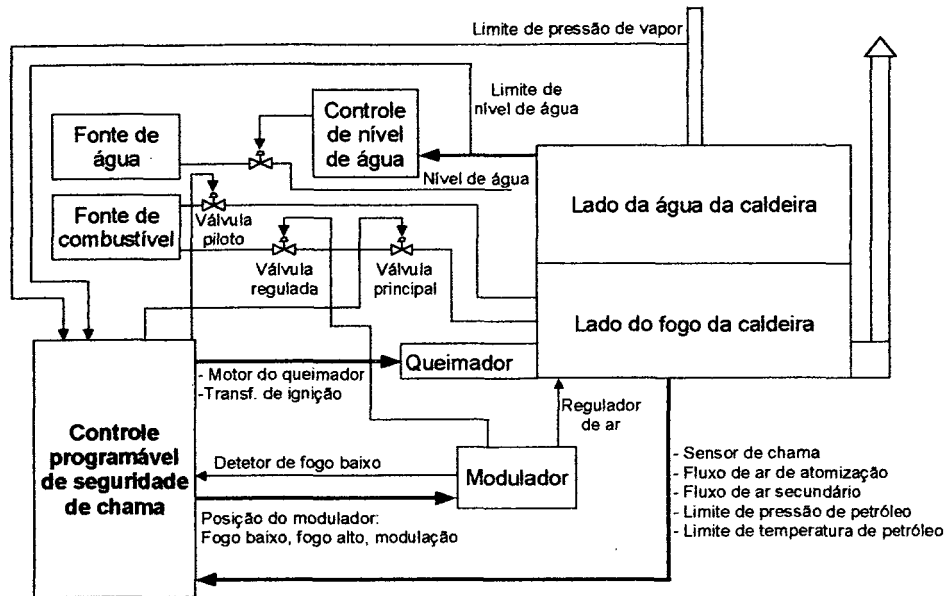
- Existe fluxo de ar primário, também chamado de fluxo de ar de atomização, necessário para atomização do combustível. A ausência deste fluxo pode ser originada por um imperfeito no motor do queimador ou no atomizador.
- Existe chama entre a etapa de acendido do transformador de ignição e o apagado da válvula de combustível, e não existe chama fora desse intervalo.
- A posição do motor do modulador é a especificada pelo controle de intertravamento.

Os detetores e sensores com os que deve contar a caldeira são:

- Sensor de chama do tipo ultravioleta
- Detetor de fogo baixo
- Detetor de fogo alto
- Detetor de fluxo de ar secundário
- Detetor de fluxo de ar de atomização
- Detetor de limite de nível de água
- Detetor de limite de pressão de petróleo
- Detetor de limite de temperatura de petróleo
- Detetor de limite de pressão de vapor

No caso do sensor de chama deve-se obter o sinal analógico produzido por este tipo de sensor, amplifica-la e entrega-la à entrada do microcontrolador em forma de níveis lógicos. Nos outros casos, os detetores devem fechar ou abrir contatos.

Os equipamentos mencionados no item 7.2 são os mais comuns em caldeiras de mediana e grande envergadura, o mesmo sucede com os sensores citados no item 7.3. Um diagrama que envolve estes equipamentos e sensores é apresentado na Figura 39.



**Figura 39. Equipamentos e sensores para o controle da caldeira**

## 7.4 TAREFAS DO CONTROLADOR

As ações que realiza o controlador de intertravamento podem ser classificadas em: verificação de limites, execução de seqüência e verificação de funcionamento.

### 7.4.1 Verificação de limites

Encarrega-se de verificar que as condições de operação da caldeira estejam dentro da faixa de projeto da mesma, parando o funcionamento desta, apagando os seus equipamentos, ante uma situação anormal. Os limites que são verificados são os seguintes:

- Limite da pressão de petróleo: Verifica que as condições do combustível estejam dentro de valores aceitáveis, de forma a ser inflamado no momento preciso e evitando que fique combustível sem queimar ocasionando uma situação de risco.
- Limite da temperatura do petróleo: Igual ao anterior, verifica que o combustível esteja em condições ótimas para efetuar uma combustão segura.

- Limite da pressão de vapor: Verifica que a pressão de vapor não ultrapasse certos limites, evitando gerar uma operação insegura. Um excesso de pressão de vapor dentro da caldeira pode gerar fugas de vapor, e no pior dos casos, uma explosão.
- Limite do nível de água: Verifica que o nível de água não diminua do limite para o qual a caldeira tem sido projetada. Caso ocorra, fecha-se um contato mediante uma bóia.

Em todos os casos, o sinal de alarme gerado pelos sensores é dado por um contato que se fecha ou se abre. No caso aparecer um alarme, a caldeira é apagada de imediato.

#### 7.4.2 Execução da seqüência

Encarrega-se de efetuar o acendido e apagado dos equipamentos que intervêm no funcionamento da caldeira, de forma a lograr um acendido seguro. O ciclo normal da caldeira passa pela seguinte seqüência.

- **Prepurga:** Etapa de limpeza do lar para eliminar os resíduos de combustível deixados em uma operação falida anterior.
- **Ignição chama piloto:** Acendido da chama piloto mediante a chama gerada pelo acendido piloto.
- **Chama piloto/chama principal:** Acendido da chama principal mediante a chama gerada pelo acendido piloto.
- **Estabelecimento da chama principal:** Período em que a caldeira alcança o ponto próximo ao set-point do funcionamento normal.
- **Funcionamento em linha:** Período em que a caldeira está completamente acendida, gerando vapor à pressão requerida.
- **Postpurga:** Período de apagado da caldeira mediante o corte de fluxo de combustível mas deixando acendido o motor do queimador removendo qualquer resíduo de combustível do lar.

### 7.4.3 Verificação do funcionamento

É um controle que verifica que as ações tomadas pelo controle de intertravamento sejam refletidas no interior da caldeira, de forma a realimentar o resultado das ações tomadas. Entre as variáveis que se verificam encontram-se:

- A chama

Depois de emitir combustível e ar e gerado a chispa, deve-se detectar que a chama esteja sendo gerada. Em caso negativo, detém-se a caldeira já que é perigoso que acumule combustível sem queimar, dado que este pode ocasionar uma explosão ao intentar acender novamente a caldeira. Comercialmente encontram-se os tipos de sensores apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6. Sensores comerciais**

Sensor	Descrição
Infravermelho	É uma resistência que depende da intensidade da parte infravermelha do espectro eletromagnético.
Ultravioleta	Funciona de acordo ao princípio fotoelétrico. Ante a presença de ondas eletromagnéticas de longitude de onda inferior à da luz ultravioleta gera-se uma corrente proporcionai à intensidade da luz UV.
Fotore sistivo	É uma resistência que depende da intensidade de luz visível.

- Posição do modulador

Segundo depois que o controle de intertravamento tem dado uma ordem de posição ao modulador, deve-se verificar se modulador está nessa posição. Para tal verificação se dispões de um detetor de fogo baixo e outro de fogo alto.

O detetor de fogo baixo detecta, mediante um artefato mecânico, se a posição do motor do modulador é a que determina a mínima abertura da válvula da combustível e do regulador de ar. Se existir fogo baixo, fecha-se um contato.

O detetor de fogo alto, similar ao de fogo baixo, detecta se a posição do motor do modulador é a que determina a máxima abertura da válvula da combustível e do regulador de ar. Se existir fogo alto, fecha-se um contato.

No funcionamento da caldeira é feito primeiro, a cargo do controle de intertravamento, o controle da qualidade de ar e de combustível que ingressa ao lar. Na etapa de plena operação, este controle é feito pelo controle da combustão, mas ao final retorna ao controle de intertravamento.

Quando o controle está a cargo do controle de intertravamento, se a ordem é posicionar o motor do modulador no fogo alto ou fogo baixo, verifica-se mediante estes detetores se tem chegado à posição desejada. No caso esteja trabalhando o controle da combustão, verifica-se unicamente que o motor do modulador não esteja na posição de fogo alto ou fogo baixo.

- Fluxo de ar secundário

O ar que provê o oxigênio, necessário para a combustão e que impulsa a chama e os gases da combustão, é verificado mediante um detetor de fluxo enquanto esteja acendido o motor do queimador.

- Fluxo de ar de atomização

É preciso ter a certeza de que enquanto o combustível esteja sendo liberado exista suficiente fluxo de ar de atomização, a fim de lograr uma combustão segura. O detetor de fluxo de ar é um diafragma que fecha um contato ante o fluxo de ar.

## 7.5 CONTROLE DO SISTEMA MECÂNICO

### 7.5.1 Prepurga

Esta é a primeira fase que desenvolve-se na seqüência de acendido da caldeira. Nos passos que constituem esta fase efetua-se a limpeza do lar da caldeira para eliminar os restos de combustível e gases remanescentes de combustões anteriores, evitando assim combustões de maior intensidade que as previstas no projeto da caldeira, as quais prejudicariam o controle da caldeira originando explosões nela.

Esta fase começa com o acendido do motor do ventilador do queimador da caldeira. As duas válvulas de combustível, tanto a principal quanto a piloto, devem ficar inativas durante toda a execução desta fase,



evitando a passagem de fluxo de combustível para o interior do lar. O motor do modulador de combustão deve ser levado até a posição de fogo alto, permitindo a abertura máxima do diafragma de ar e da válvula de combustível governada no modulador.

Dado que a válvula principal de combustível está fechada, nenhum combustível passará através da válvula governada no modulador. Só é permitida a passagem de fluxo de ar impulsado pelo motor do ventilador, sendo máximo quando o diafragma de ar está completamente aberto para realizar uma efetiva limpeza dos restos de combustível.

Antes de terminar a fase, o motor do modulador de combustão é levado a posição do fogo baixo, ficando todos os demais equipamentos no seu mesmo estado.

O tempo de duração desta fase oscila entre 30 s e 70 s. Durante toda a execução deve ser verificado que não exista chama no lar da caldeira, se acontecer, deve ser apagado imediatamente o ventilador, levar o motor do modulador de combustível até a posição de fogo baixo e emitir um alarme indicando que existe uma condição de falha de chama. Deve ser verificado também que os sensores de limite encontrem-se em posição normal de funcionamento. Caso contrário, deve proceder-se da mesma forma que no caso anterior, indicando na condição de falha, qual o sensor limite que gerou essa condição.

### **7.5.2 Ignição chama piloto**

Esta fase encarrega-se de assegurar, na caldeira, a presença da chama piloto de pouca intensidade, antes de proceder a liberar o fluxo principal de combustível. A chama piloto, que serve de acendedor para a chama principal de seguinte fase, é formada mediante a combustão de um fluxo de combustível que procede da válvula de piloto de combustível.

O processo de acendido de uma chama pequena prévia ao acendido da chama maior da próxima fase é uma medida de segurança, já que se o acendido falhar nesta fase, o fluxo de combustível derramado será menor e

a situação não é tão crítica em comparação com o fluxo de combustível para a chama principal.

Existem duas formas de realizar a ignição da chama piloto. Uma delas é conhecida como "ignição intermitente", a qual consiste na constante geração de uma chispa a intervalos regulares de tempo, que se estende até o apagado da caldeira como meio de reforço da chama principal. A outra forma é conhecida como "ignição interrompida", na qual a geração da chispa ocorre durante um curto intervalo de tempo para conseguir o acendido da chama piloto. Esta segunda forma é a que utiliza o controlador proposto.

Ao iniciar esta fase ativam-se o transformador de ignição e a válvula piloto de combustível, gerando-se uma chispa com a aplicação da tensão ao transformador de ignição, a qual ao entrar em contato com o fluxo de combustível que provém da abertura da válvula piloto, cria a chama piloto de baixa intensidade.

O motor do modulador de combustível deve estar na posição de fogo baixo, o qual deve ter sido feito e verificado na fase anterior. Transcorridos cinco segundos desde o início desta fase, desativa-se o transformador de ignição apagando-o, mantém-se aberta a válvula piloto e por conseqüente, a alimentação da chama piloto. A válvula principal de combustível deve permanecer fechada durante toda esta fase.

A duração desta fase é 10 s. Logo após do início desta fase o controlador espera três segundos, período no qual o sensor de chama deve ter detectado a presença da chama piloto. Caso negativo, fecha-se de imediato a válvula piloto e apagam-se o transformador de ignição e o motor do ventilador. Do mesmo modo que na fase anterior, é verificado que os sensores limites encontram-se em posições normais de funcionamento.

### **7.5.3 Chama piloto – chama principal**

Esta é uma fase de transição entre a fase anterior e a fase seguinte, como uma medida de segurança para ter certeza da presença da chama piloto antes da liberação de combustível da válvula principal. Desta forma,

existe um intervalo de tempo em que permanecem abertas tanto a válvula piloto quanto a válvula principal, assegurando a geração da chama principal e eliminando a possibilidade de uma transição abrupta entre as chamas piloto e principal.

Esta fase começa com a abertura da válvula principal enquanto a válvula piloto permanece aberta durante um intervalo de tempo adicional que oscila entre 5 s e 10 s.

O motor do modulador de combustível deve estar na posição de fogo baixo, tal como foi realizado e verificado na primeira fase. Isto é feito devido a que o processo de acendido da chama principal deve efetuar-se estabelecendo a menor intensidade de chama principal, o qual consegue-se precisamente com a mínima abertura da válvula de combustível e do diafragma de ar, ambos controlados pelo modulador de combustível.

A duração desta fase oscila entre 5 s e 10 s, e termina com o fechamento da válvula piloto. Se durante este intervalo de tempo desaparece a chama emite-se um alarme indicando a condição de falha de chama.

#### **7.5.4 Estabelecimento da chama principal**

Esta fase permite assegurar a estabilidade da chama principal antes de ingressar à fase de plena operação. Com a conclusão desta fase se dá por terminada a seqüência de acendido da caldeira.

A fase começa com o fechamento da válvula piloto. O transformador de ignição e a válvula principal mantêm-se desativados. Ao final da fase o motor do modulador da combustão é levado à posição de modulação.

A duração desta fase oscila entre 40 s e 70 s. Durante toda a fase deve verificar-se a presença da chama assim como a posição normal dos sensores limites e, em defeito de qualquer uma destas duas condições, devem emitir-se os sinais de alarmes respectivos.

Ao final da fase, o detetor de fogo baixo deve verificar que o motor do modulador da combustão tem abandonado a posição de fogo baixo, já que

foi ativada a posição de modulação. Caso negativo, deve emitir-se um alarme, procedendo a apagar todos os equipamentos da caldeira, evitando que se chegue a fase de plena operação.

#### **7.5.5 Plena operação**

Ao chegar a esta fase se dá por acendida a caldeira e entra em pleno funcionamento. O motor do modulador encontra-se colocado na posição de modulação, sendo controlado desta forma pelo pressóstato de vapor, abrindo e fechando as válvulas de ar e combustível segundo a demanda de vapor que tenham as cargas conectadas à caldeira, gerando uma maior ou menor chama segundo tenha-se maior ou menor demanda.

Nestas fase estão ativas somente a válvula principal de combustível e o motor do ventilador do queimador, permitindo que a chama principal seja mantida.

Nesta, como em todas as fases, verificam-se que os sensores limites encontrem-se dentro da sua posição normal de funcionamento, igualmente, o detetor de chama deve detectar em todo momento a presença de chama. Se durante o funcionamento da caldeira falha a chama ou algum de seus sensores limites encontra-se fora de sua posição normal, detém-se a caldeira apagando todos os seus equipamentos e emitindo-se um alarme indicando a condição deste alarme.

A duração desta fase é equivalente ao tempo que requeira-se ter acendida a caldeira, podendo variar segundo a sua aplicação. Este período pode ser horas, dias e até semanas. A capacidade de configuração que oferece o controlador é capaz de receber a programação do tempo que deve permanecer acendida a caldeira e proceder a apaga-lo quando este período tenha concluído, tal como explica-se no item 6.6.3.

#### **7.5.6 Postpurga**

Esta é a última fase a ser executada antes de apagar totalmente a caldeira. Esta fase é importante já que é necessário limpar o lar da caldeira para eliminar os resíduos de combustível que ficaram depois da operação.

A fase começa com o fechamento da válvula de combustível principal, o motor do modulador é levado à posição de fogo baixo, o motor do ventilador permanece acendido de forma a efetuar a limpeza com o fluxo de ar impulsionado.

Este período dura entre 20 min e 30 min. Depois do fechamento da válvula principal, espera-se cinco segundos para a desapareção da chama e se isto não ocorre dentro desse intervalo, emite-se um alarme indicando a condição de falha de chama. Isto indicaria que encontram-se restos de combustível no lar da caldeira e que serão perigosos no próximo acendido da mesma, de forma a alertar ao usuário ou operário antes de pôr a funcionar novamente a caldeira. Ao final do período apaga-se o motor do ventilador, efetuando com esta operação o apagado total da caldeira.

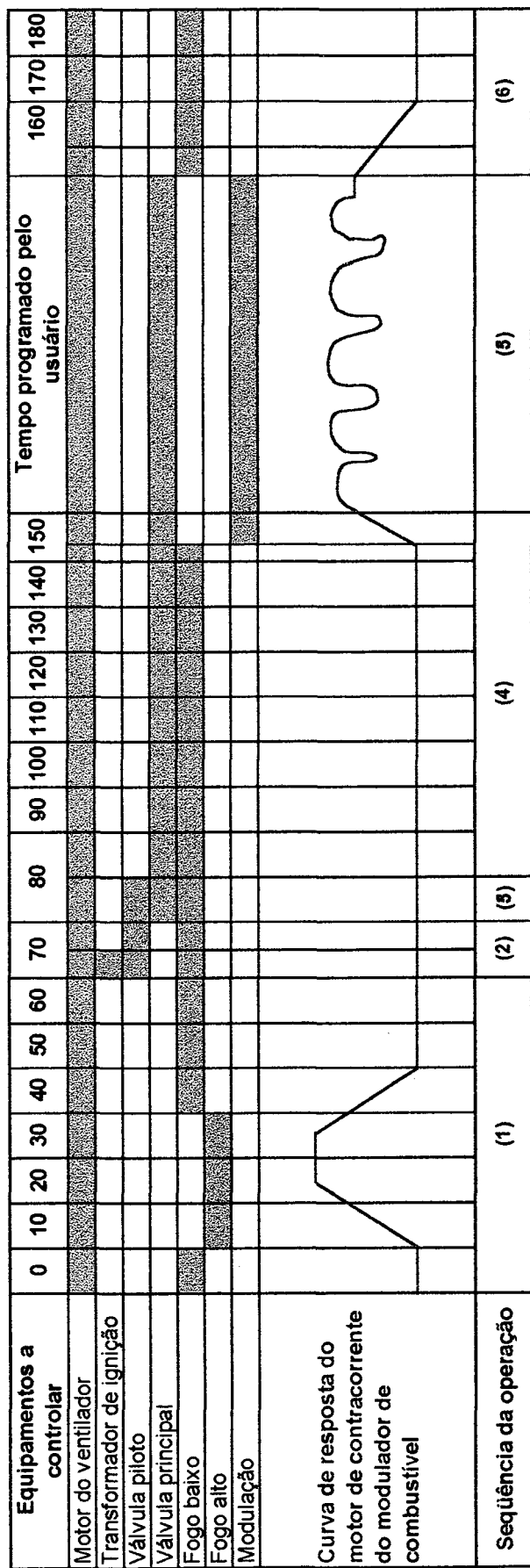
Na Figura 40 pode-se apreciar a seqüência de operação e as respectivas fases que se sucedem durante o processo. A temporização apresentada é a standardizada.

## 7.6 CIRCUITO DE CONTROLE

A Figura 41 apresenta o diagrama de blocos do sistema eletrônico, a Figura 42 o esquema elétrico do controlador e a Figura 43 o circuito amplificador de sensor infravermelho.

A Figura 44 representa o circuito proposto para registrar um número maior de variáveis analógicas e apresenta-as na tela. É a configuração idônea para pôr em prática o controle utilizando lógica difusa.

No anexo 5 apresenta-se o diagrama de fluxo do controlador de seguridade de chama proposto.



- (1) PREPRUGA
- (2) IGNIÇÃO CHAMA PILOTO
- (3) CHAMA PILOTO - CHAMA PRINCIPAL
- (4) ESTABELECIMENTO DA CHAMA PRINCIPAL
- (5) PLENA OPERAÇÃO
- (6) POSTPURGA

Figura 40. Seqüência de operação da caldeira

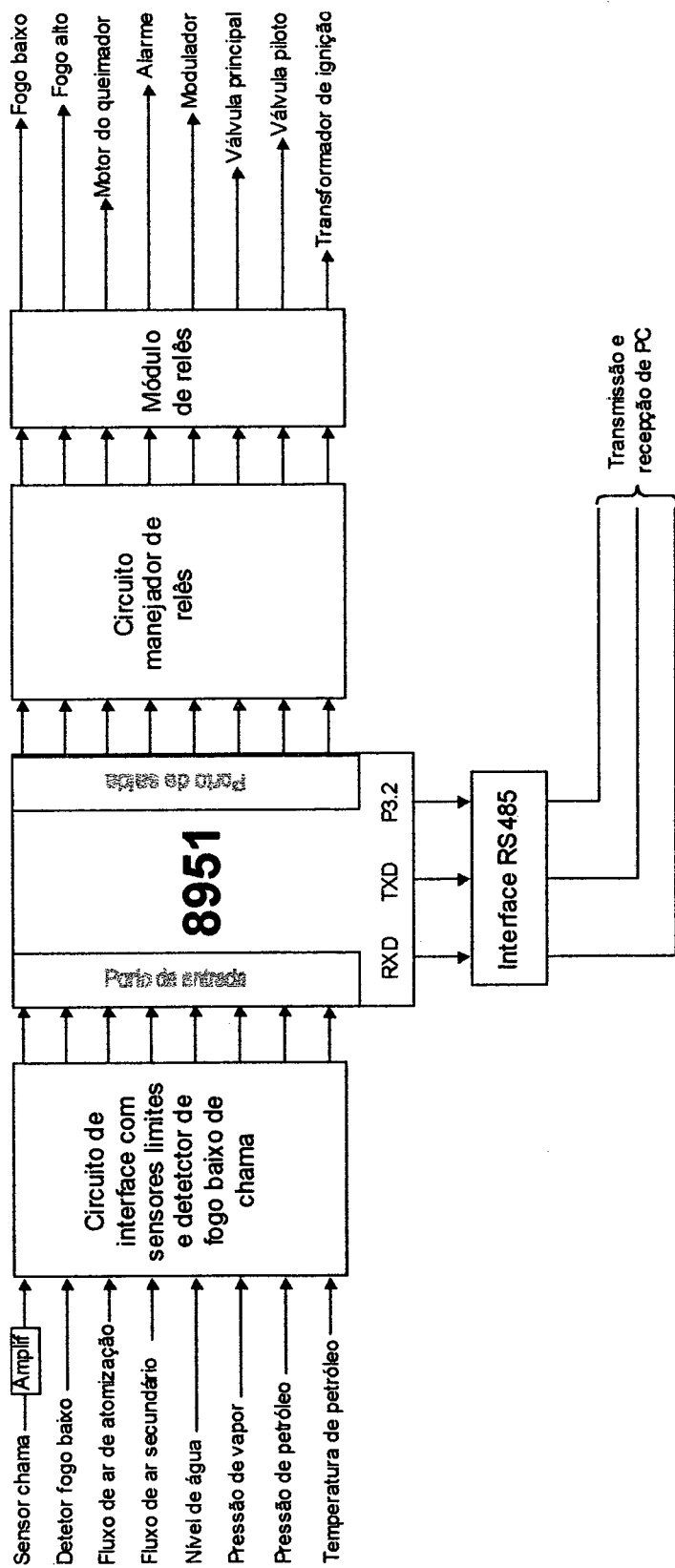


Figura 41. Diagrama de blocos do sistema eletrônico

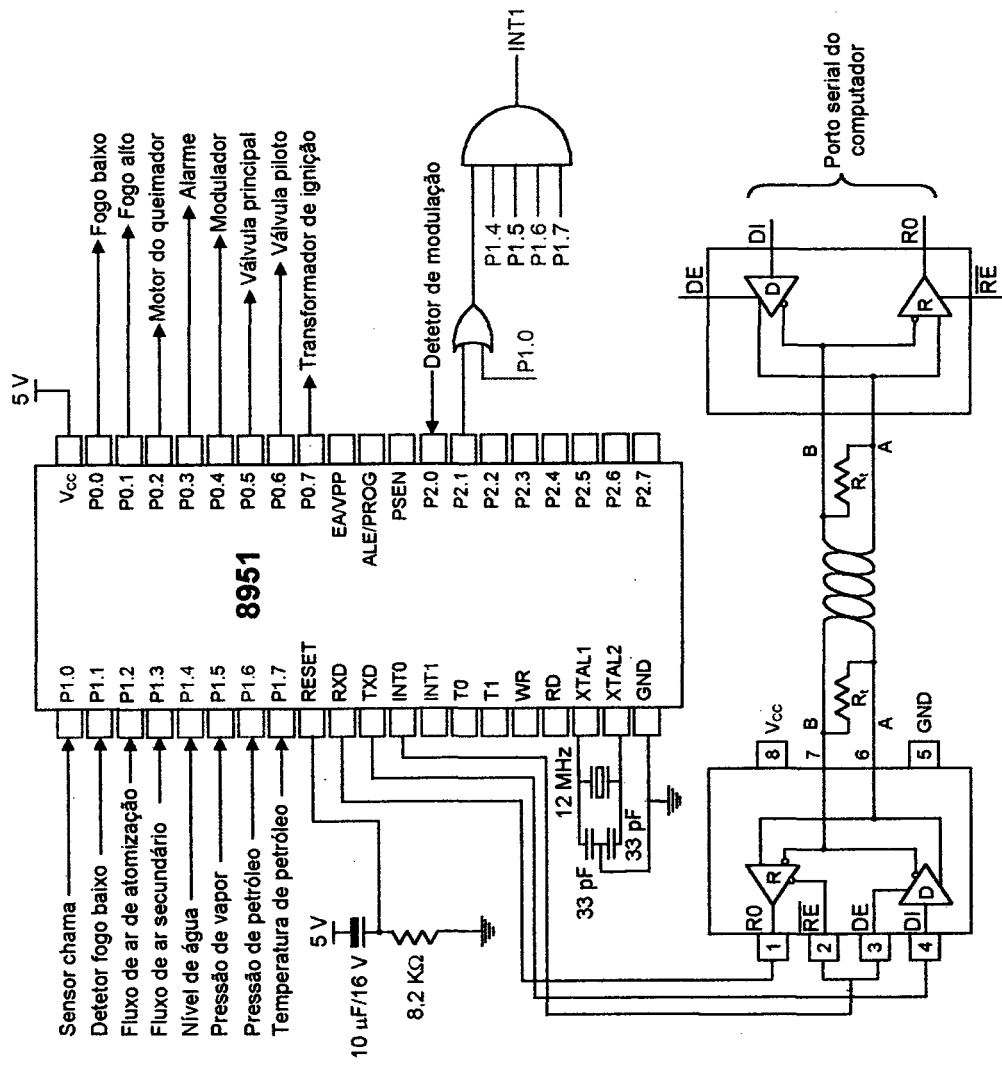


Figura 42. Esquema elétrico do controlador



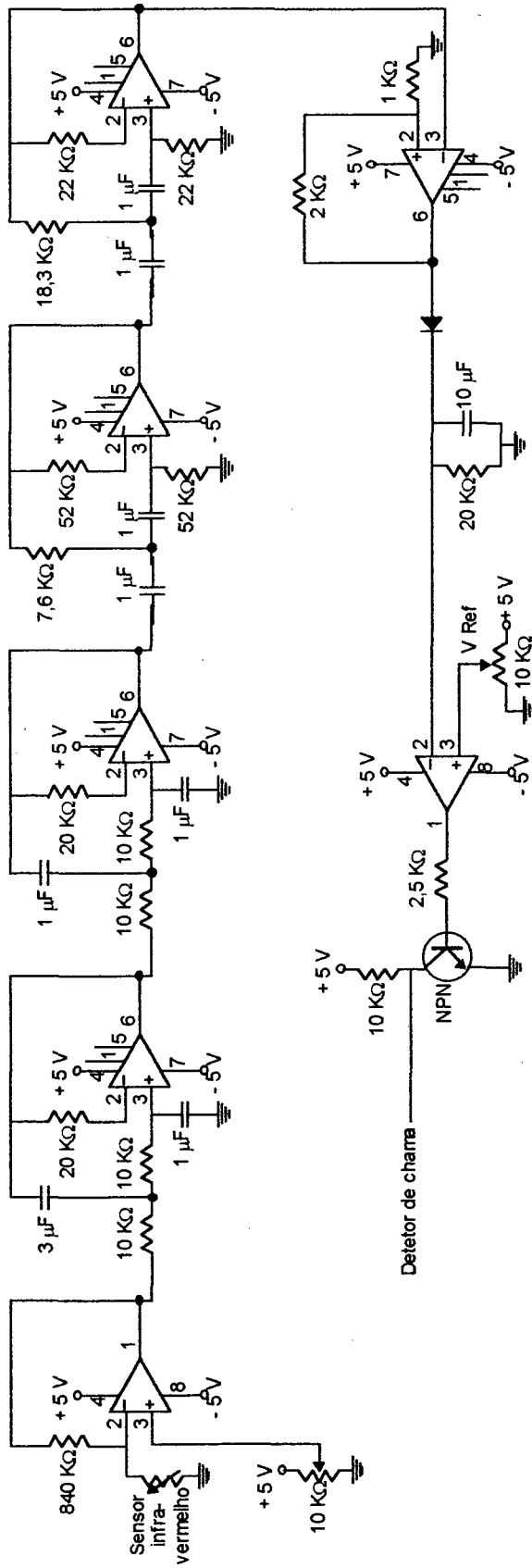


Figura 43. Circuito amplificador do sensor infravermelho

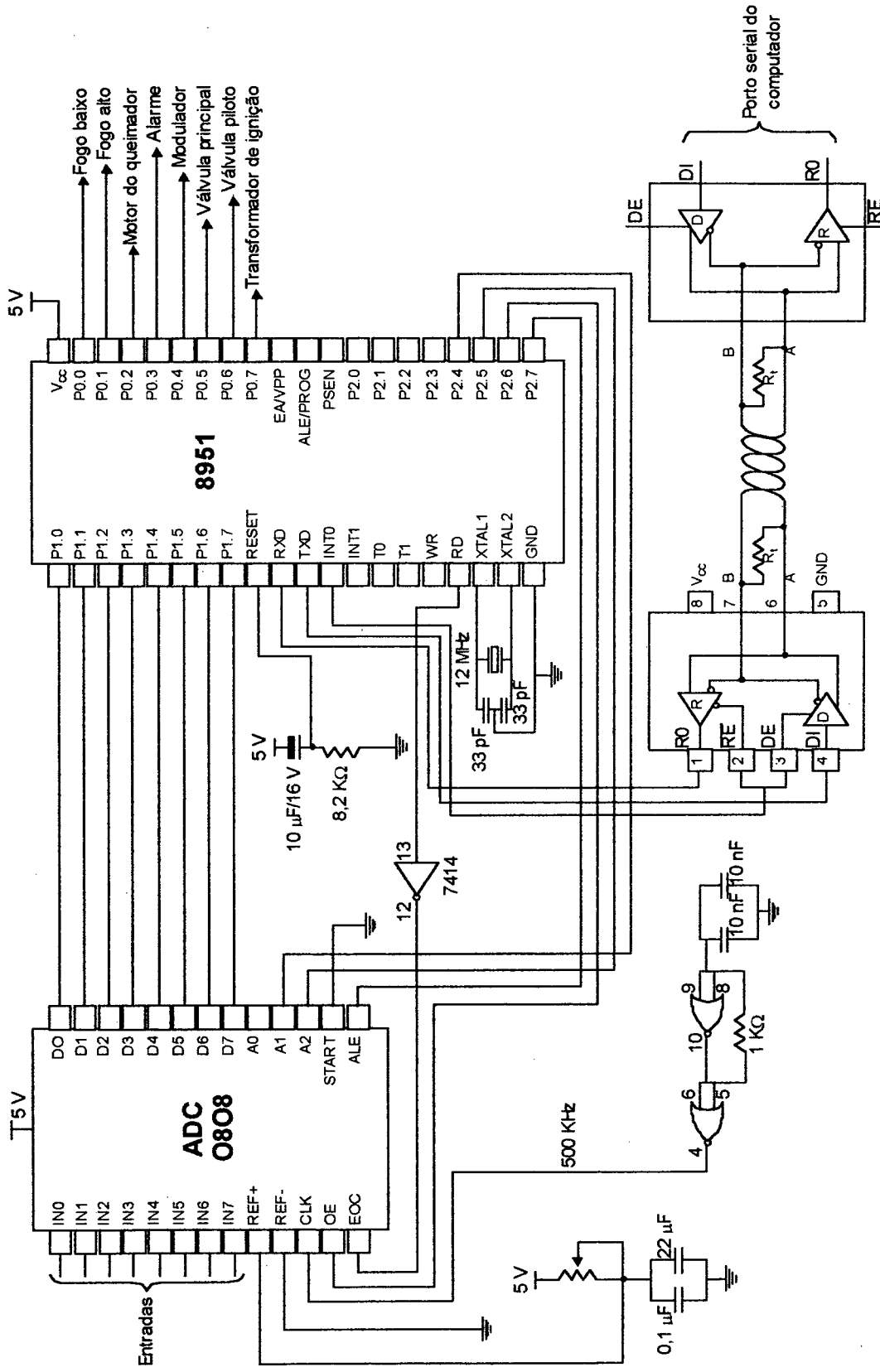


Figura 44. Esquema elétrico de um controlador para registrar variáveis analógicas

## **8. A CALDEIRA NOS ENGENHOS DE AÇÚCAR**

Este capítulo apresenta o funcionamento geral das caldeiras de grande porte utilizadas nos engenhos de açúcar e as suas principais características.

Uma caldeira para os engenhos de açúcar, tal como se apresenta na Figura 45, é um “quarto” com um tamanho aproximado de 110 ou 135 m<sup>2</sup> por cada metro de largura. Em profundidade, as caldeiras podem ser muito grandes ou muito pequenas, dependendo da capacidade do seu forno interior. Este forno está formado pelo teto, o piso e por quatro paredes de tijolos refratários que resistem o calor do forno. Os tijolos refratários estão cobertos com tijolos isolantes, os quais, por sua vez, estão cobertos por lâminas de aço.

Tanto a caldeira como o forno estão cheios de tubos verticais em seu redor, no forno o comprimento dos tubos vai desde o piso até o teto, ou seja, eles nascem em um domo inferior e terminam no domo superior, o qual é um tanque cilíndrico com um diâmetro aproximado de 1/2 m.

Cada tubo está completamente cheio de água, eles começam a receber a água desde o domo inferior até que alcança o nível médio do domo superior. Na caldeira estes tubos são chamados de “paredes verticais de água”.

### **8.1.1 Alimentação do bagaço**

Os fornos antigos de bagaço estavam providos de tolvas retangulares, que consistem em simples canais através da parede do forno. Por esta ampla passagem, o ar circulava junto com o bagaço sem encontrar praticamente resistência alguma diferente do ar comburentes que passava pela grade metálica e atravessava o colchão de bagaço. O ar, passando através da abertura superior da tolva, entrava ao forno diretamente, sem contribuir à combustão e aumentando consideravelmente o excesso de ar.

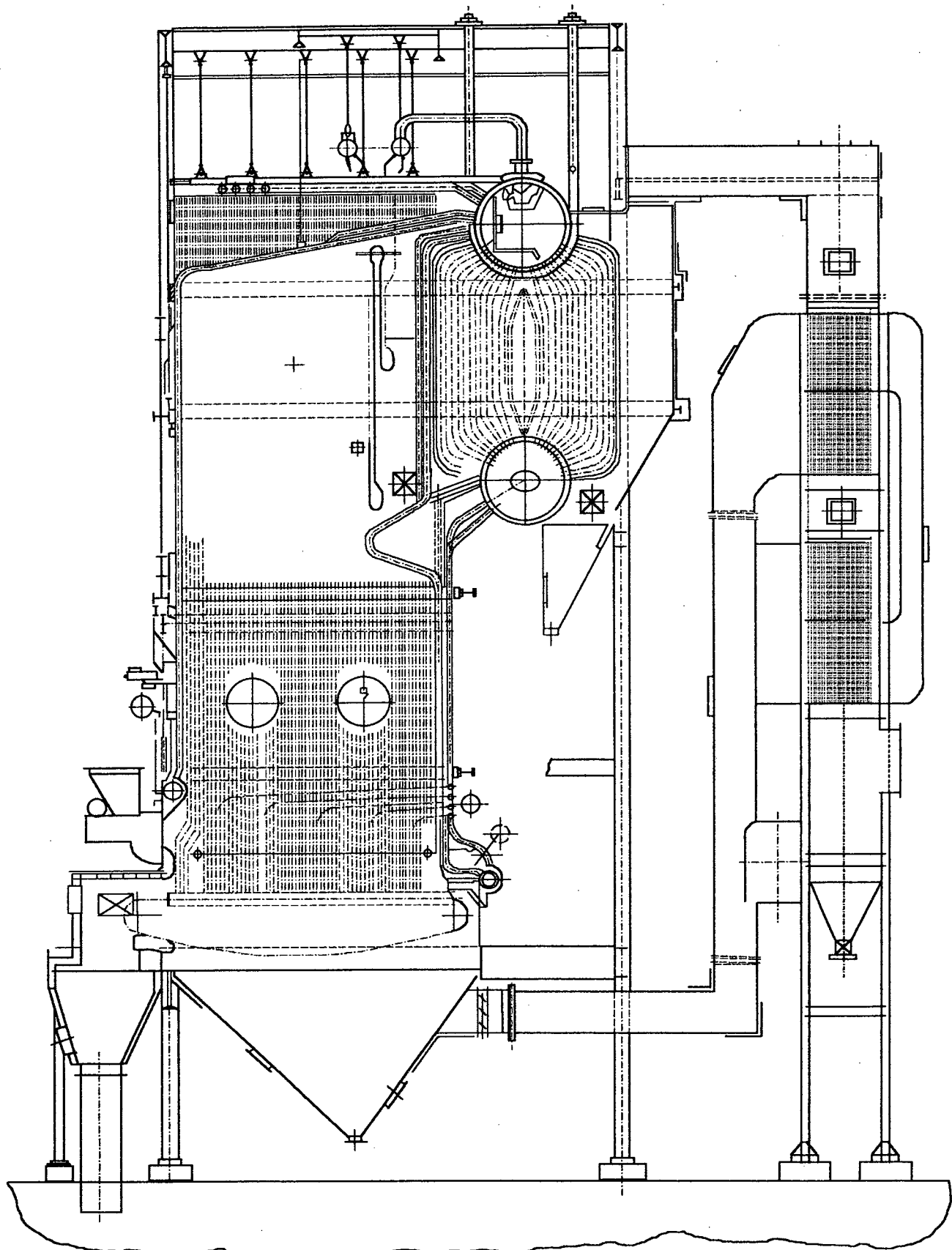
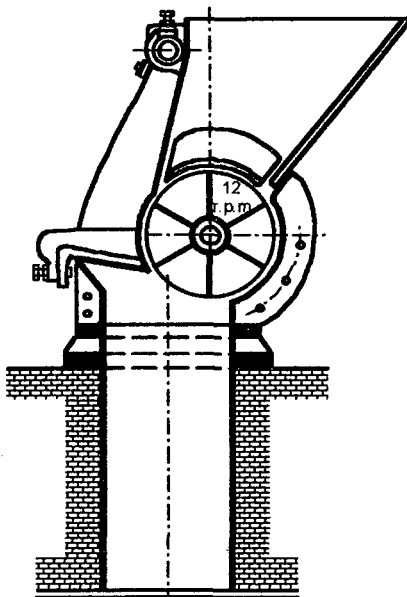


Figura 45. Caldeira de um engenho de açúcar cubano

Para evitar este inconveniente, os fornos de bagaço estão providos de uma tolva e um alimentador de bagaço rotativo, como mostra a Figura 46. Este simples acessório, ao evitar o excesso de ar, converte-se em uma peça valiosa e indispensável.



**Figura 46. Alimentador rotativo para o forno de bagaço**

O bagaço corre através de um conduto que o leva até o alimentador. O alimentador é um dispositivo mecânico provido de paletas que pegam o bagaço que cai lançando-o ao forno.

No forno, o bagaço contido na grelha metálica recebe o fogo, cuja chama sobe aquecendo os tubos laterais com uma temperatura que oscila entre 1000 e 1200°C. Quando o fogo vai-se debilitando a medida que a chama sobe, os gases resultado da combustão atravessam os tubos indo a outro intercambiador de calor e logo passam à chaminé.

As caldeiras começam a combustão com petróleo atomizado, já que possuem quatro queimadores de petróleo nos laterais que iniciam o trabalho do forno. Na ausência de bagaço, o processo pode ser continuado por meio da utilização dos queimadores de petróleo.

### 8.1.2 Tiros na caldeira

Para manter a temperatura constante durante o processo de combustão, a caldeira está provida de um ou alguns tiros de ar. Estes tiros podem ser naturais ou forçados.

**Tiro natural:** No tiro natural a sucção cria-se evacuando os gases da combustão pela chaminé. Este é vantajoso porque tem uma longa vida, não risco de ruptura de ventiladores, e não precisa de motores que consumam potência. De outro lado, tem a desvantagem de precisar de boa cimentação devido ao peso da chaminé, ocupa bastante espaço e não tem flexibilidade quando ocorrem cargas inesperadas.

**Tiro mecânico:** Existem três tipos de tiro mecânico: o tiro forçado, o tiro induzido e o tiro de injeção.

- **Tiro forçado:** Neste tiro o ar sopra embaixo da grelha metálica de forma a fechar o depósito de cinzas. Tem a vantagem de permitir a introdução de ar a pressão atmosférica na câmara de combustão evitando, conseqüentemente, a entrada de ar por qualquer outro orifício ainda existindo defeitos de obra civil. Este tipo de tiro é utilizado principalmente quando se instala um aquecedor de ar.
- **Tiro induzido:** Este o sistema mais comum. O ventilador não está localizado na grelha metálica, mas na extremidade dos ductos e na base da chaminé.
- **Tiro de injeção:** Esta é outra forma de tiro induzido. A sucção se produz não com um ventilador mas com uma boquilha de vapor de descarga da chaminé produzindo nos gases o chamado efeito Giffard, tomando do ducto uma fração dos gases e retornando-os por meio de uma boquilha similar à utilizada com o vapor.

A desvantagem do tiro mecânico é que ele precisa de um ventilador, pelo qual, existem possibilidade de acidentes, além de ser necessário parar o trabalho de caldeira para revisar e fazer manutenção ao ventilador. Porém, utiliza-se cada vez mais devido a seu baixo custo de instalação,

pouco requerimento de espaço e alta flexibilidade se é usado junto com um motor de velocidade variável.

As caldeiras nos engenhos de açúcar estão providas geralmente de tiro forçado e tiro induzido. Na realidade, o que pretende-se é que na caldeira exista uma pequena pressão de vazio pré-estabelecida, este balanço é mantido com o tiro forçado ao soprar ar e com o tiro induzido ao sugar gases criando um laço de controle que obriga a pressão do forno a ser inferior à pressão atmosférica.

Caso a pressão no interior da caldeira fosse maior que a pressão atmosférica, por qualquer orifício existente na caldeira, sairiam chamas, enquanto se a pressão é menor, pelos orifícios entraria ar secundário facilitando a combustão.

De outro lado, se a pressão de vazio tem um valor muito inferior comparado com a pressão atmosférica, a quantidade que ar que entraria seria tão grande que esfriaria o forno, sendo esta umas das funções principais do laço de controle. O laço funciona controlando comportas mecânicas manejadas por dispositivos eletro-pneumáticos, que logram o balanço entre o tiro forçado e o tiro induzido.

### 8.1.3 Nível de água

Um dos controles importantes é o do nível de água dentro do domo superior, o qual deve estar 50 mm por abaixo do nível geométrico do mesmo. O nível é garantido com a utilização de uma bomba de água de alimentação e um sistema de eletrodos para o seu controle.

Na saída da bomba, deve instala-se uma válvula de não retorno, com o objeto de evitar que ao parar, a água volte da caldeira ao tanque de alimentação, no caso que a válvula de saída não feche corretamente.

A bomba de alimentação deve ser capaz de dar um gasto, pelo menos, 50% maior à produção média de vapor das caldeiras às que serve. Deve poder bombear contra uma pressão manométrica, pelo menos, 25% maior à pressão de trabalho das caldeiras.

Devido a que a temperatura d'água de alimentação encontra-se entre 90 e 95°C, o tanque de alimentação deve estar, pelo menos, a um ou dois metros sobre a bomba, preferentemente a 2,5 m.

#### 8.1.4 Sobreaquecimento na caldeira

Normalmente as turbinas não utilizam o vapor que sai diretamente do domo, o qual está em contato com a água e chama-se de vapor saturado. Existe uma relação entre este vapor, a temperatura e a pressão à qual o vapor saturado está em interface com o líquido, ou seja para cada pressão no domo tem-se uma temperatura determinada.

O vapor que chega às turbinas é um vapor sobresaturado produto da passagem do vapor saturado por um sobreaquecedor, eliminando assim a possibilidade de que dentro deste vapor exista alguma gota de água que danificaria as paletas da turbina. Além disso, existe um ganho adicional que é o sobreaquecimento do vapor, já que termodinamicamente o vapor saturado produz uma energia elétrica na turbina inferior à energia produzida com vapor sobreaquecido.

**Uso de vapor sobreaquecido:** A utilização do vapor sobreaquecido é indispensável quando a energia necessária para a fabrica obtém-se por meio de uma turbina a vapor. A Tabela 7 apresenta as propriedades do vapor que se usa neste caso.

**Tabela 7. Características do vapor para turbinas**

Pressão manométrica [kg/cm <sup>2</sup> ]	Temperatura [°C]	Pressão manométrica [lb/plg <sup>2</sup> ]	Temperatura [°F]
18	300-350	250	600-650
20	325-375	300	625-700
25	350-400	350	650-750

Porém, o vapor sobreaquecido é igualmente interessante nas fábricas que trabalham com máquinas de vapor. O sobreaquecimento tem a vantagem de evitar ou diminuir as perdas por condensação nas paredes dos cilindros e de eliminar os riscos de golpes da água nas máquinas.



**Sobreaquecedores:** Os sobreaquecedores são intercambiadores de calor, dispostos no passo dos gases quentes. Geralmente colocam-se em qualquer espaço livre e apropriado, cerca dos tubos das caldeiras.

Os sobreaquecedores recebem o vapor saturado ou ligeiramente úmido que vem do domo da caldeira e o passam sobreaquecido ao coletor geral de vapor da fábrica.

O sobreaquecedor é um aparato geralmente formado por tubos de pequena seção da mesma forma e com vários cotovelos, interpostos entre dois coletores.

#### 8.1.5 Trabalho da caldeira

Inicialmente o forno está frio e o nível de água dos tubos sobe sendo controlado para permanecer no nível requerido dentro do domo superior, como foi dito anteriormente. Começam a funcionar os queimadores de petróleo e no momento de alcançar certo valor de temperatura, introduz-se a lenha e o ventilador de tiro forçado já tem começado a trabalhar para controlar o vazio dentro do forno em conjunto com o ventilador de tiro induzido. A lenha queima-se e o forno inicia a criação de vapor, para dar passo à alimentação de bagaço.

O calor aquece os tubos e a água começa a ferver quando alcança os 100°C. Os tubos que formam as paredes da caldeira favorecem a subida de vapor devido a sua posição vertical, enquanto as suas terminações inclinadas evitam que quando o vapor chega a esse ponto, atrapalhe a circulação normal do vapor que continua subindo.

A água evaporada vai concentrando-se no domo superior, o qual está dotado de uma válvula de escape que se abre para que o ar inicialmente armazenado ali saia do sistema, deixando a sua vez sair um pouco de vapor com o fim de assegurar que o ar foi evacuado completamente do lugar. Seguidamente a válvula fecha-se, aproximadamente aos 30 minutos depois de ter sido aberta.

Com a alimentação do bagaço é feito o controle da pressão de modo a aumentá-la no interior do domo até alcançar o valor pré-estabelecido para efetuar o processo, momento no qual a válvula que vai à turbina abre-se lentamente diminuindo um pouco a pressão que é estabilizada logo depois chegando a 80 at. Posteriormente, é feito o controle sobre a temperatura do vapor para passar à turbina com a pressão requerida (Geralmente 80 at).

Se a pressão é superior às 80 at deve reduzi-se a alimentação de bagaço que é na realidade uma diminuição de combustível produzindo menos fogo, ou seja, a energia que está sendo entregue a água diminui, com o qual a pressão tende a diminuir. Este processo é continuado até conseguir uma pressão de 80 at é somente nesse momento é que pode-se abrir a válvula que vai à turbina.

Em síntese, existem quatro laços fundamentais no controle da caldeira:

1. Laço de controle do nível de água: Trabalha sobre a bomba de alimentação de água de forma a manter dentro do domo superior o nível requerido para o processo.
2. Laço de controle de vazio dentro do forno: Atua sobre os ventiladores de tiro forçado e de tiro induzido.
3. Laço de controle de pressão: Trabalha sobre a alimentação de combustíveis e sobre a circulação de ar.
4. Laço de controle da temperatura de vapor sobreaquecido: Atua sobre a entrada de vapor saturado regulando o fluxo de vapor através de uma válvula localizada na saída do domo superior.

## **9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Neste capítulo expõe-se de forma resumida as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho e se fazem algumas recomendações a ser levadas em conta na implementação de sistemas de controles automatizados de caldeiras pertencentes a engenhos açucareiros, além de recomendar tópicos que podem ser aprofundados para dar continuidade a este estudo.

### **9.1 CONCLUSÕES**

O principal equipamento para a produção de vapor em um engenho açucareiro é a caldeira, e é precisamente a este equipamento que deve fazer-se um controle direto do seu funcionamento para lograr automatizar o processo de produção de açúcar. Neste sentido foram apresentados os sistemas de controle para o nível de água, a combustão e o intertravamento da caldeira.

O sistema de controle típico de nível de água existente em caldeiras já instaladas regula perfeitamente o nível de água mantendo-o no ponto médio do domo superior. Por esta razão, geralmente não é preciso realizar modificações a este sistema de controle.

A quantidade adequada de ar para lograr a combustão completa, não é precisamente o volume de ar teórico calculado com as características próprias do combustível (especialmente com o poder calorífico), mas sim o volume de ar real calculado com a quantidade de ar em excesso necessário, que é simplesmente uma porcentagem do volume de ar teórico.

O aumento da eficiência e a segurança no trabalho, logra-se a partir da análise da influência do ar no ciclo Rankine (ciclo da combustão). Na proposta apresentada introduz-se, como alternativa dos sistemas existentes, um bloco que considera a vazão de ar como parâmetro para medir o

oxigênio utilizado na combustão, bloco que atua sobre a malha do controle da combustão.

O sistema de controle proposto para o processo de combustão corrige continuamente a pressão de vapor otimizando a quantidade de entrada de ar e de combustível, melhorando assim o rendimento térmico da caldeira. Este sistema de controle está composto por uma malha de cinco blocos que usa a estratégia de realimentação, o controle em cascata para as medições das vazões de ar e combustível, e a técnica dos limites cruzados para o controle do excesso de ar nas transições do valor da pressão.

A eficiência da técnica dos limites cruzados foi demonstrada mediante a simulação de um dos blocos da malha utilizando como ferramenta o software SIMULINK. Também foram indicados os equipamentos adicionais com que deve ser dotada a caldeira para a implementação deste sistema de controle.

A malha do sistema de controle de intertravamento proposta foi composta por cinco módulos: O controle do sistema mecânico para o acendido, apagado e funcionamento normal da caldeira; o controle de segurança para a supervisão das funções do sistema eletrônico; a visualização do estado do sistema mediante o monitor de um computador; a configuração da operação para programar ou alterar os tempos das fases de funcionamento da caldeira; e por último, o registro de dados para o estudo de falhas do sistema.

Este sistema de controle de intertravamento evita a ocorrência de acidentes dentro da caldeira, tais como explosões no lar. Ele possui um sistema digital de processamento e as interfaces de controle e comunicação. O sistema digital de processamento encarrega-se de registrar e processar a informação e administrar e coordenar as tarefas dos demais componentes. Para isto, inclui o microcontrolador 8951, com memórias RAM e EPROM internas, um circuito temporizador, um circuito de supervisão do microcontrolador e dois circuitos da fonte do circuito eletrônico.

O circuito implementado com o microcontrolador, embora cumpra as mesmas condições de um CLP, é tão flexível e geral que pode ser aplicado

para qualquer outro processo do próprio engenho açucareiro. Basta trocar o software para a sua implementação.

No trabalho foi feita uma análise dos sistemas de automação existentes nas usinas na atualidade, e valorou-se a sua eficiência e segurança. A proposta apresentada, visa atingir estes parâmetros fundamentais nas usinas açucareiras. Com a melhora da eficiência logra-se reduzir o consumo do combustível e considerando que o número de usinas (157) existentes no país (Cuba) e que cada uma delas tem várias caldeiras, a economia de combustível é um fator determinante na recuperação econômica do país. Ao aumentar a segurança de trabalho na caldeira, evitam-se perdas econômicas, e especialmente humanas, que o fator mais considerado na sociedade socialista.

Além dos controles propostos podem ser implementados um controle da emissão dos gases para a atmosfera, um controle da velocidade do motor da bomba de água de alimentação e um sistema de tratamento da água de alimentação.

## **9.2 RECOMENDAÇÕES**

### **9.2.1 Recomendações para a implementação de sistemas de controle**

Implementar a automação dos processos de produção de açúcar nos engenhos açucareiros, com o fim de melhorar a sua eficiência, mediante a implantação e adequação do controle de nível de água, controle de combustão e controle de intertravamento, propostos neste trabalho.

No caso de modificações feitas nas malhas de controle propostas, recomenda-se o cumprimento estrito das normas estabelecidas para o controle de intertravamento, as quais foram descritas a grosso modo neste trabalho.

### 9.2.2 Recomendações para futuros trabalhos

Projetar de forma genérica, o controle automático da emissão dos gases para a atmosfera, o controle automático da velocidade do motor da bomba de água de alimentação e automatizar o sistema de tratamento da água de alimentação.

Projetar um sistema para o controle automático de várias caldeiras que compõem o parque de trabalho em um engenho açucareiro.

Analisar os laços de controle para automação da caldeira, aplicando lógica difusa, cujas equações resultantes sejam materializadas através de um projeto eletrônico com a utilização de um microcontrolador

## **ANEXO 1**

### **NORMAS APLICÁVEIS AO CONTROLADOR DE INTERTRAVAMENTO**

## **A1. NORMAS APLICÁVEIS AO CONTROLE DE INTERTRAVAMENTO**

A continuação são apresentados os requerimentos mais importantes das normas FM7610 e UL372 para ser aplicados no projeto de controle de intertravamento.

### **A1.1 NORMA FACTORY MUTUAL RESEARCH 7610**

Esta norma estabelece os requerimentos para implementar um controle de intertravamento, programável ou não programável, para queimadores simples ou múltiplos, de gás industrial ou aceite combustível.

#### **A1.1.1 Requerimentos gerais**

**Construção:** O controle de intertravamento deve ser um módulo ou conjunto de módulos identificáveis.

**Ambiente:** O controle de intertravamento deve ser capaz de resistir às condições de vibração e atmosféricas normais, existentes em um ambiente industrial.

**Avaliação:** O equipamento deve estar de acordo com as avaliações e especificações do fabricante

**Durabilidade:** O controlador de intertravamento deve estar projetado de forma que permita operar de forma confiável sem manutenção excessiva durante um período de tempo razoável.

**Proteção contra falha dos componentes do controlador:** A falha de um componente individual não deve ocasionar uma condição insegura, caso contrario deve fazer-se uma inspeção minuciosa.

**Invólucro:** o controlador deve ter um invólucro que proveja proteção adequada contra o pó, a umidade e a corrosão, além da vibração.



**Sensibilidade à tensão:** O controlador deve operar corretamente sobre variações de tensão, em uma faixa de 85% e 110% ao redor da tensão nominal. Mudanças rápidas nesta faixa não devem conduzir a uma operação insegura.

**Sensibilidade a falhas de chama:** O controlador deve atuar automaticamente frente a um tempo de falha de chama menor de quatro segundos.

**Controle da combustão e de segurança:** O controlador deve incluir os contatos de operação de todos os controles automáticos de combustão e de segurança.

**Controle de limites:** O controlador deve incluir controle de limites. No caso de falha, deve cortar o acesso de combustível para a chama principal e a piloto.

**Detetor de chama:** Deve acender-se simultaneamente com o controlador.

**Acendido seguro:** O sistema só deve acender-se na ausência de chama.

**Componentes elétricos e sua disposição:** O espaçamento dos terminais, dos cabos, e outros, deve estar de acordo com as normas IEEE e NEMA.

#### **A1.1.2 Requerimentos sobre o funcionamento**

O período de teste de chama, que é o tempo desde que abre-se a válvula principal até que começa-se a verificar a presença da chama principal, não deve exceder 15 s, no caso não tenha-se verificado a chama piloto.

O período de teste de chama, usando uma chama piloto interrompida verificada, não deve exceder 60 s. Antes de abrir a válvula principal de combustível deve-se verificar que existe chama piloto. No caso de falha de

chama, o sistema deve fechar as válvulas principal e piloto, sem intentar um reacendido automático.

### **A1.1.3 Requerimentos para caldeiras de petróleo maiores de 100 HP**

- mecanismo de acendido deve ser um acendedor de chispa de alta energia testado.
- O tempo de estabelecimento da chama piloto, até antes de verificar a sua presença, é de 10 s máximo.
- O período de teste da chama principal deve ser menor de 10 s.
- A chama principal deve ser constantemente supervisionada.
- O controlador deve ser não reiniciável.

## **A1.2 NORMA UL372**

Esta norma estabelece os requerimentos para controles de intertravamento com aplicações de gás, gás-óleo e óleo. Estes controles devem executar um apagado seguro no caso de falha de chama.

### **A1.2.1 Construção**

- A entrada primaria do controlador deve ser um cabo de dois fios, um deles o terra, com uma entrada menor a 240 V. Um switch e um dispositivo de proteção deve estar no outro fio.
- Os circuitos de controle do controlador devem permitir a operação do equipamento controlado somente quando o circuito está fechado. Uma abertura accidental do circuito deve fechar as válvulas de combustíveis no mesmo intervalo de tempo contemplado por falha de chama. O controlador não deve permitir um intento de apagado do motor do queimador.
- O circuito de controle deve permitir a incorporação da conexão dos controles de limite que cortam diretamente o passo do combustível.

- O circuito de controle deve possuir início seguro com revisão de componentes.
- Uma falha interna do sistema, como curto-circuito ou abertura do circuito entre elementos adjacentes, falha do detetor de chama, falha em resistências, condensadores ou componentes similares por curto-circuito ou circuito aberto, não deve apagar o motor do queimador e deve fechar as válvulas de combustível.
- O controle não deve permitir o desarmelo de ciclos contínuos sem a devida programação, incluindo a purga.
- No caso de falha, deve-se esperar um reset manual.
- O controlador deve possuir uma cobertura com switch interlock de modo que a abertura ou retiro da cobertura permita ao sistema detecção a falsa de chama.
- Se o controlador é instalado de acordo com as especificações do fabricante, nenhuma interferência por indução ou capacitância, ou por mudança nos cabos, deve ocasionar uma falsa detecção de alarme.
- O controlador deve especificar: Programação de uma ignição segura, período de estabelecimento da chama principal, ciclo de operação, e tempo de resposta ante falha de chama. O controlador deve funcionar dentro da faixas de temporização especificadas, se as condições de tensão, frequência e temperatura ambiental são especificadas pelo fabricante.

A Tabela 1 apresenta as especificações nominais de tempo para o sistema.

**Tabela 1. Especificações nominais de tempo para o sistema**

Tempo de resposta ante falha de chama nominal	$TRFL_n$	< 4 s
Período de estabelecimento da chama piloto nominal	$PELP_n$	< 15 s
Período de estabelecimento da chama principal nominal	$PELPR_n$	< 30 s
Não reiniciável		

Nas condições de operação especificadas pelo fabricante, considerando a temperatura entre 21,1°C e 25°C, os tempos medidos reais devem estar na faixa apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2. Especificações nas condições especificadas pelo fabricante**

Tempo de resposta ante falha de chama real	TRFL <sub>r</sub>	< 4 s
Período de estabelecimento da chama piloto real	PELP <sub>r</sub>	< PELP <sub>n</sub> · 1,1
Período de estabelecimento da chama principal real	PELPR <sub>r</sub>	< PELPR <sub>n</sub> · 1,1

Em qualquer combinação de tensão entre 0,7 e 1,1 vezes a tensão de entrada, e uma temperatura entre 0°C e 66°C, os tempos medidos reais devem estar na faixa apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3. Especificações quando a combinação de condições**

Tempo de resposta ante falha de chama real	TRFL <sub>r</sub>	< 5 s
Período de estabelecimento da chama piloto real	PELP <sub>r</sub>	< PELP <sub>n</sub> · 1,2
Período de estabelecimento da chama principal real	PELPR <sub>r</sub>	< PELPR <sub>n</sub> · 1,2

Se o controlador está especificado para trabalhar fora desta faixa, os tempos medidos reais devem estar na faixa antes especificada.

Se o controlador tem prepurga às condições nominais de tensão e temperatura: Tempo de prepurga real:  $TP_r > 0,9 \cdot TP_n$

Em qualquer combinação de tensão entre 0,7 e 1,1 vezes a tensão de entrada, e uma temperatura entre 0°C e 66°C:  $TP_r > 0,8 \cdot TP_n$ .

Se o controlador está especificado para trabalhar fora desta faixa, o tempo de prepurga medido real deve estar na faixa antes especificada.

A mínima tensão de operação deve ser ao menos 15% menor que a tensão especificada.

O controle de seqüência do controlador deve ser tal que o início da ignição deve ser antes ou simultâneo com a emissão do combustível. Esta ignição deve ser detida antes do fim do período de verificação de chama piloto o depois do estabelecimento da chama principal. A ignição deve permanecer apagada durante o resto do ciclo.

As partes do controlador não devem deforma-se, derrete-se ou oxidarse durante o desenvolvimento dos testes especificados nesta norma.

#### **A1.2.2 Armação e invólucro**

- Uma armação de metal para o controlador deve ter ao menos 0,89 mm de grosso com bordas reforçadas. Para uma área maior que 155 mm<sup>2</sup> ou uma dimensão maior que 152,4 cm, deve ser reforçada.
- Um vidro que cobre uma abertura de observação, deve estar o suficientemente fixo para que não possa ser removido facilmente. Este vidro deve ter pelo menos 1,6 mm se nenhuma dimensão supera 101,6 mm.
- A resistência de uma armação não metálica ou uma parte não metálica embutida na armação, devem ter ao menos a resistência de uma placa de metal de 0,89 mm de grosso.

## **ANEXO 2**

### **INTERFACE RS MAX 485**

## **A2. INTERFACE RS MAX 485**

Neste anexo são apresentadas as características elétricas da interface RS MAX 485 e seu diagrama lógico e diagramas de conexões.

### **A2.1 GENERAL DESCRIPTION**

The DS75175B is a high speed differential Tri-state bus/line transceiver designed to meet the requirements of EIA standard RS485 with extended common mode range (+12 V to -7 V), for multipoint data transmission. In addition, it is compatible with RS-422.

The driver and receiver outputs feature TRI-STATE capability; for the driver outputs, over the entire common mode range of +12 V to -7 V. Bus contention or fault situations that cause excessive power dissipation within the device are handled by a thermal shutdown circuit, which forces the driver outputs into the high impedance state.

DC specifications are guaranteed over the 0 to 70°C temperature and 4,75 V to 5,25 V supply voltage range.

### **A2.2 FEATURES**

- Meets EIA standard RS485 for multipoint bus transmission and is compatible with RS-422.
- Small outline (SO) package option available for minimum board space.
- 22 ns driver propagation delays.
- Single +5 V supply.
- -7 V to +12 V bus common mode range permits  $\pm 7$  V ground difference between devices on the bus.
- Thermal shutdown protection.
- Pin out compatible with DS3695/A and SN75176A/B.
- 70 mV typical receiver hysteresis.

- High impedance to bus driver in TRI-STATE or with power off, over the entire common mode range allows the unused devices on the bus to be powered down.
- Combined impedance of a driver output and receiver input is less than one RS485 unit load, allowing up to 32 transceivers on the bus.

### A2.3 CONNECTION AND LOGIC DIAGRAM

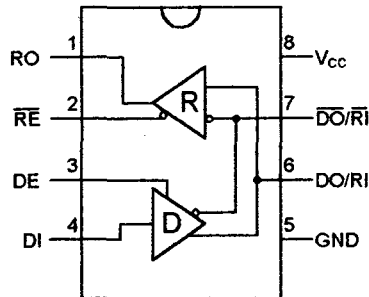


Figura 1. Top view

### A2.4 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

If military/aerospace specified devices are required, please contact the national semiconductor sales office/distributors for availability and specifications.

Tabela 1. Absolute maximum rating (see note 1)

Parameter	Valores
Supply voltage, $V_{CC}$	7 V
Control input voltages	7 V
Driver input voltages	7 V
Driver output voltages	+15 V/-10 V
Receiver input voltages	+15 V/-10 V
Receiver output voltages	5,5 V
Continuous power dissipation at 25°C:	
- For M package	675 mW (see note 2)
- For N package	900 mW (see note 3)
Storage temperatura range	-40°C até 85°C
Lead temperature (soldering, 4 seconds)	-65°C até 150°C

Note 1: Absolute maximum ratings are those beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. They are not meant to imply that the device should be operated at these limits. The tables of electrical condicions provide condicions for atual device operation.

Note 2: Derate linearly at 6,11 mW/°C to 400 mW at 70°C

Note 3: Derate linearly at 5,56 mW/°C to 650 mW at 70°C



## A2.5 RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Tabela 2. Recommended operating conditions

Parameter		Min	Máx	Un
$V_{CC}$	Supply voltage	4,75	5,25	V
	Voltage at any bus terminal (separate or common mode)	-7	+12	V
$T_A$	Operating free air temperature			
	DS75176B	0	+70	°C
	DS75176BT	-40	+85	°C
VID	Differential input voltage (see note)	-12	+12	V

Note: Differential input/output bus voltage is measured at the noninverting terminal A with respect to the inverting terminal B.

## A2.6 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Tabela 3. Electrical characteristics,  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$  (see notes 1 e 2)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Máx	Un
$V_{OD1}$	Differential driver output voltage (unloaded)	$I_O = 0$			5	V
$V_{OD2}$	Differential driver output voltage (with load)	See Figura 2 $R = 27 \Omega$	1,5			V
$\Delta V_{OD}$	Change in magnitude of driver differential output voltage for complementary output states				0,2	V
$V_{OC}$	Differential common mode output voltage				3	V
$\Delta V_{OC}$	Change in magnitude of driver common mode output voltage for complementary output states				0,2	V
$V_{IH}$	Input high voltage	DI, DE, $\overline{RE}$ , E	2			V
$V_{IL}$	Input low voltage				0,8	
$V_{CL}$	Input clamp voltage		$I_{IN} = -18 \text{ mA}$		-1,5	
$I_{IL}$	Input low current		$V_{IL} = -0,4 \text{ V}$		-200	$\mu\text{A}$
$I_{IH}$	Input high current		$V_{IH} = 2,4 \text{ V}$		20	$\mu\text{A}$
$I_{IN}$	Input current	DO/RI, $\overline{DO}/\overline{RI}$ $V_{CC}=0$ ou $5,25 \text{ V}$ , DE = $0 \text{ V}$	$V_{IN} = 12 \text{ V}$ $V_{IN} = -7 \text{ V}$		+1,0 -0,8	mA
$V_{TH}$	Differential input threshold voltage for receiver	$-7 \text{ V} \leq V_{CM} \leq +12 \text{ V}$	-0,2		+0,2	V
$\Delta V_{TH}$	Receiver input hysteresis	$V_{CM} = 0 \text{ V}$		70		mV
$V_{OH}$	Receiver output high voltage	$I_{OH} = -400 \mu\text{A}$	2,7			V
$V_{OL}$	Output low voltage	RO $I_{OL} = 16 \text{ mA}$ (see note 3)			0,5	V
$I_{OZR}$	Off-state (high impedance) Output current at receiver	$V_{CC} = \text{Max}$ ; $0,4 \text{ V} \leq V_O \leq 2,4 \text{ V}$			$\pm 20$	$\mu\text{A}$
$R_{IN}$	Receiver input resistance	$-7 \text{ V} \leq V_{CM} \leq +12 \text{ V}$	12			$\text{K}\Omega$
$I_{CC}$	Supply current	No load see note 3	Driver output enabled Driver output disabled		55 35	mA
$I_{OSD}$	Driver short-circuit output current	$V_O = -7 \text{ V}$ (see note 3) $V_O = +12 \text{ V}$ (see note 3)			-250 250	mA
$I_{OSR}$	Receiver short-circuit output current	$V_O = 0 \text{ V}$	-15		-85	mA

Note 1: All currents into device pins are positive; all currents out of device pins are negative. All voltage are referenced to device ground unless otherwise especificed.

Note 2: All typicals are given for  $V_{CC} = 5\text{ V}$  and  $T_A = 70^\circ\text{C}$

Note 3: All worst case parameters for which note 3 is applied, must be increased by 10% for DS75176BT. The other parameters remain valid for  $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85^\circ\text{C}$

### A2.7 SWITCHING CHARACTERISTICS

Tabela 4. Switching characteristics,  $V_{CC} = 5\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	Máx	Un
$t_{PLH}$	Driver input to output	$R_{L\text{ DIFF}} = 60\ \Omega$	12	22	ns
$t_{PHL}$	Driver input to output	$C_{L1} = C_{L2} = 100\ \text{pF}$	17	22	ns
$t_r$	Driver rise time	$R_{L\text{ DIFF}} = 60\ \Omega$		18	ns
$t_f$	Driver fall time	$C_{L1} = C_{L2} = 100\ \text{pF}$ (see fig and )		18	ns
$t_{ZH}$	Driver enable to output high	$C_L = 100\ \text{pF}$ (fig 5 and 7) S1 open	29	100	ns
$t_{ZL}$	Driver enable to output low	$C_L = 100\ \text{pF}$ (fig 5 and 7) S2 open	31	60	ns
$t_{LZ}$	Driver disable time from low	$C_L = 15\ \text{pF}$ (fig 5 and 7) S2 open	13	30	ns
$t_{HZ}$	Driver disable time from high	$C_L = 15\ \text{pF}$ (fig 5 and 7) S1 open	19	200	ns
$t_{PLH}$	Receiver input to output	$C_L = 15\ \text{pF}$ (fig 3 and 8)	30	37	ns
$t_{PHL}$	Receiver input to output	S1 and S2 closed	32	37	ns
$t_{ZL}$	Receiver enable to output low	$C_L = 15\ \text{pF}$ (fig 3 and 9) S2 open	15	20	ns
$t_{ZH}$	Receiver enable to output high	$C_L = 15\ \text{pF}$ (fig 3 and 9) S1 open	11	20	ns
$t_{LZ}$	Receiver disable from low	$C_L = 15\ \text{pF}$ (fig 3 and 9) S2 open	28	32	ns
$t_{HZ}$	Receiver disable from high	$C_L = 15\ \text{pF}$ (fig 3 and 9) S1 open	13	35	ns

### A2.8 AC TEST CIRCUITS

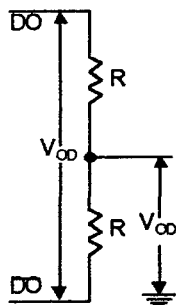


Figura 2

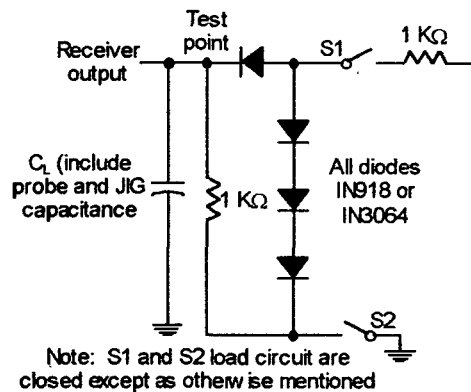


Figura 4

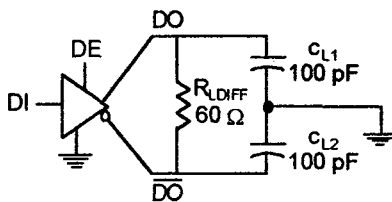


Figura 3

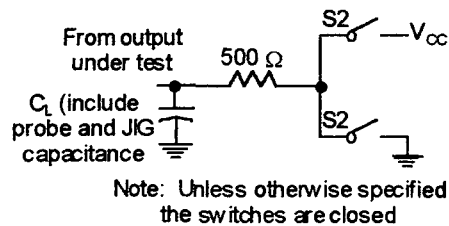
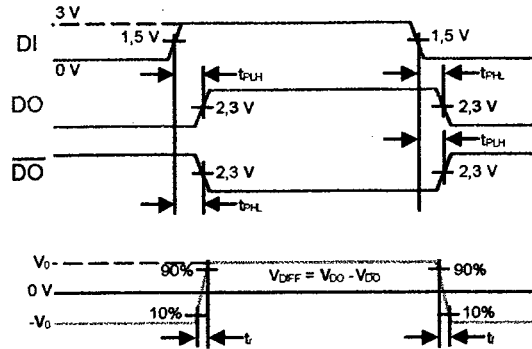
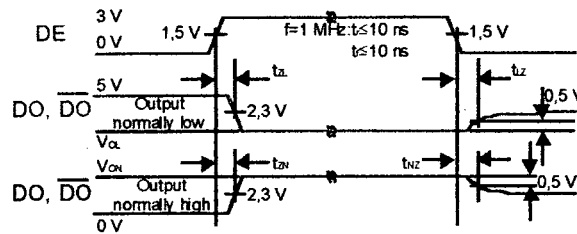


Figura 5

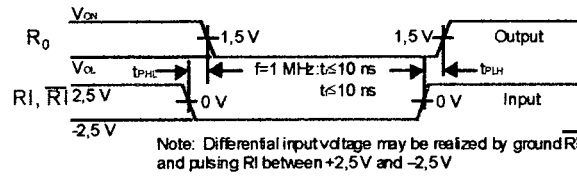
**A2.9 SWITCHING TIME WAVEFORMS**



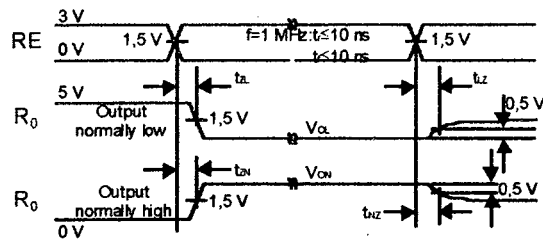
**Figura 6. Driver propagation delays and transition times**



**Figura 7. Driver enable and disable times**



**Figura 8. Receiver propagation delays**



**Figura 9. Receiver enable and disable times**

**A2.10 FUNCTION TABLES**

**Tabela 5. DS75176B transmitting**

Inputs			Line condition	Outputs	
RE	DE	DI		DO	DO
x	1	1	No fault	0	1
x	1	0	No fault	1	0
x	0	x	x	Z	Z
x	1	x	No fault	Z	Z

**Tabela 6. DS75176B receiving**

Inputs			Outputs
RE	DE	RI-RI	R <sub>0</sub>
0	0	≥ +0,2 v	1
0	0	≤ -0,2 v	0
0	0	Inputs open**	1
1	0	x	Z

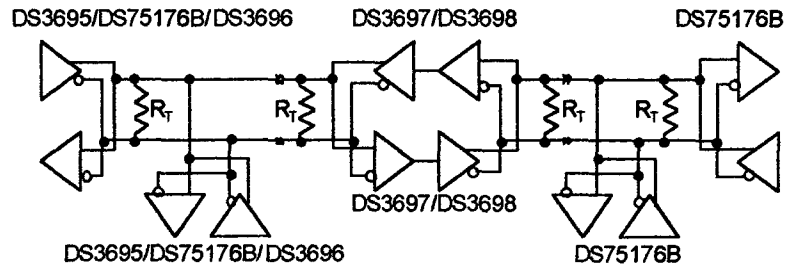
x: Don't care condition.

z: High impedance state

Fault: Improper line conditions causing excessive power dissipation in the driver, such as shorts or bus contention situations.

\*\* : This a fail safe condition

## A2.11 TYPICAL APPLICATION



## **ANEXO 3**

**CONVERSOR CMOS A/D ADC0808**

### **A3. CONVERTOR CMOS A/D ADC0808**

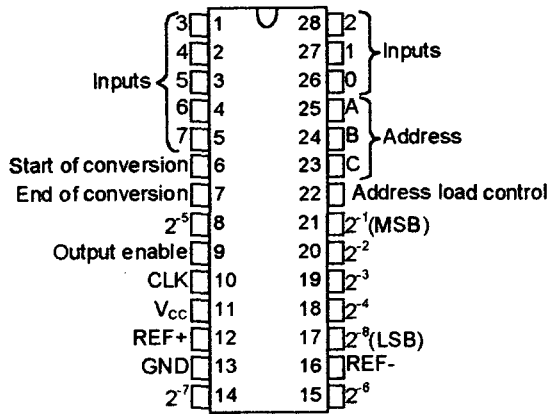
Neste anexo são apresentadas as características do conversor CMOS A/D ADC0808 que contém um multiplexor de sinal análogo, um conversor de aproximações sucessivas de oito bit e circuitos de controle.

#### **A3.1 DESCRIPTION**

The ADC0808 and ADC0809 are monolithic CMOS device with an 8-channel multiplexer, an 8-bit analog-to-digital (A/D) converter, and microprocessor compatible control logic. The 8-channel multiplexer can be controlled by a microprocessor through a 3-bit address decoder with address load to select any one of eight single-ended analog switches connected directly to the comparator. The 8-bit A/D converter uses the successive-approximation conversion technique featuring a high-impedance threshold detector, a switched-capacitor array, a sample-and-hold, and a successive approximation register (SAR).

The comparison and converting methods used eliminate the possibility of missing codes, nonmonotonicity, and the need for zero or full-scale adjustment. Also featured are latched 3-state outputs from the SAR and latched inputs to the multiplexer address decoder. The single 5-volts supply and low power requirements make the ADC0808 and ADC0809 especially useful for a wide variety of applications. Ratiometric conversion is made possible by access to the reference voltage input terminals.

The ADC0808 and ADC0809 are characterized for operation from -40°C to 85°C.



- Total unadjusted error ...±1 LSB máx
- Resolution of 8 bits
- 100 µs conversion time
- Radiometric conversion
- Guaranteed Monotonicity
- No missing codes
- Easy interface with microprocessors
- Latched 3-state outputs
- Latched address inputs
- Single 5 V supply
- Low power consumption
- Designer to be interchangeable with national semiconductor ADC0808

Figura 1. Dual-in-line package (top view)

### A3.2 MULTIPLEXER

The analog multiplexer selects a of 8 single-ended input channels as determined by the address decoder. Address load control loads the address code into the decoder on a low-to-high transition.

### A3.3 CONVERTER

The CMOS threshold detector in the successive approximation conversion system determines each bit by examining the charge on a series of binary weighted capacitors (Figura 2). In the first phase of the conversion process, the analog input is sampled by closing switch  $S_C$  and all  $S_T$  switches, and by simultaneously charging all the capacitors to the input voltage.

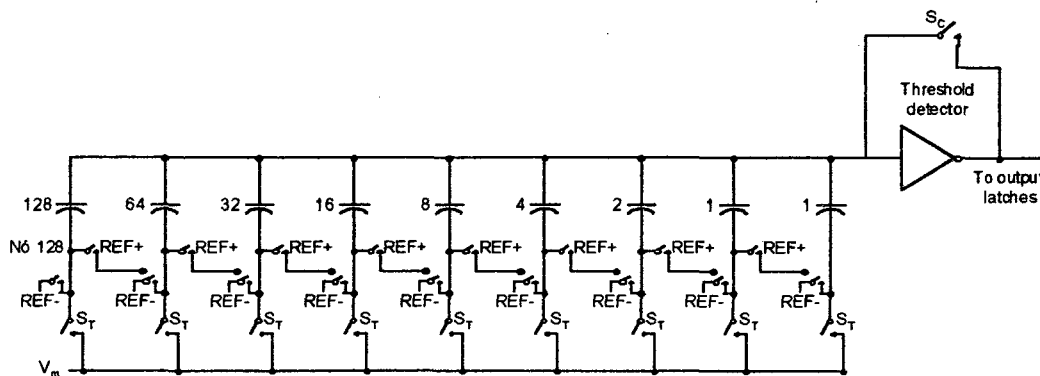


Figura 2. Modelo simplificado de um sistema de aproximações sucessivas

In the next phase of the conversion process, all  $S_T$  and  $S_C$  switches are opened and threshold detector begins identifying bits the charge (voltage) on each capacitor relative to the reference voltage. In the switching sequence, all eight capacitors are examined separately until all 8 bits are identified, and then the charge-convert sequence is repeated. In the first step of the conversion phase, the threshold detector looks at the first capacitor (weight = 128). Node 128 of this capacitor is switched to the reference voltage, and the equivalent nodes of all the other capacitors on the ladder are switched to REF-. If the voltage at the summing node is greater than the trip point of the threshold detector (approximately one half the  $V_{CC}$  voltage), a bit is placed in the output register, and the 128 weight capacitor is switched to REF-. If the voltage at the summing node is less than the trip point of the threshold detector, this 128 weight capacitor remains connected to REF+ through the remainder of the capacitor-sampling (bit counting) process. The process is repeated for 64 weight capacitor, the 32 weight capacitor, and so forth down the line, until all bits are counted.

With each step of the capacitor-sampling process, the initial charge is redistributed among the capacitors. The conversion process is successive approximation, but relies on charge redistribution rather than a successive-approximation register (and reference D/A) to count and weigh the bits from MSB to LSB.

#### A3.4 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS OVER OPERATING FREE-AIR TEMPERATURE RANGE (Unless otherwise noted)

Supply voltage, $V_{CC}$ (see note)		6,5 V
Input voltage range	CS, RD, WR	-0,3 V to 18 V
	Other input	-0,3 V to $V_{CC} + 0,3$ V
Output voltage range		-0,3 V to $V_{CC} + 0,3$ V
Continuous total power dissipation at 25°C free-air temperature		875 mW
Operating free-air temperature range		0°C to 70°C
Storage temperature range		-65°C até 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case 10 s		260°C

Note: All voltage values are with respect to digital-ground (DGTL GND) with DGTL GND and ANLG GND connected together (unless otherwise note).



### A3.5 FUNTIONAL BLOCK DIAGRAM (Positive logic)

A Figura 3 apresenta a lógica positiva do diagrama funcional de blocos.

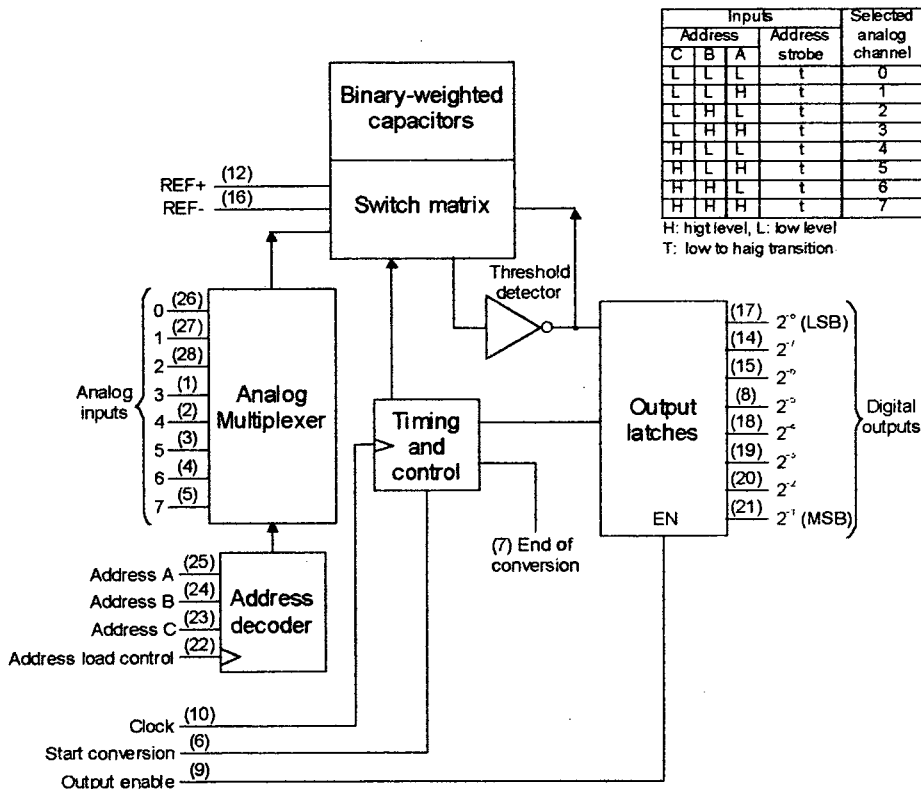


Figura 3. Functional block diagram (positive logic)

### A3.6 OPERATING SEQUENCE

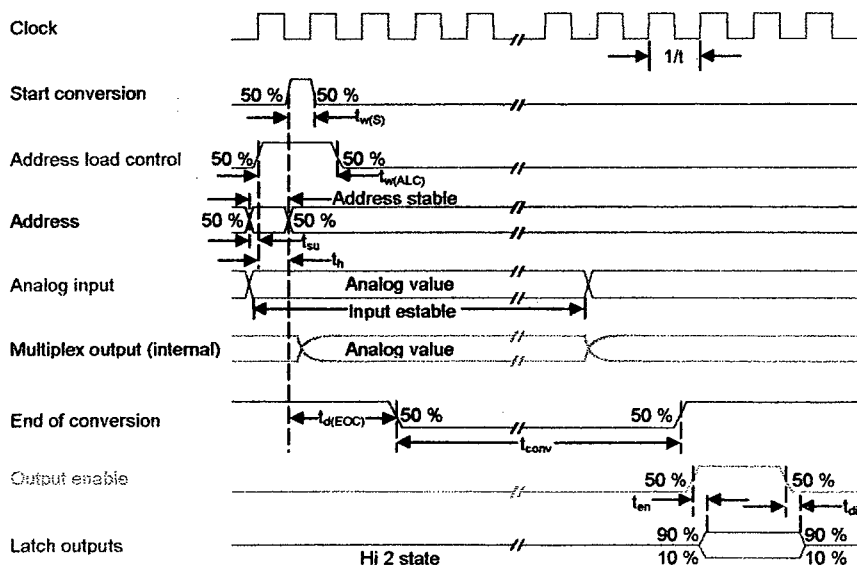


Figura 4. Operating sequence

### A3.7 RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Parameter		Min	Nom	Max	Unit
Supply voltage	$V_{CC}$	4,5	5	6	V
Positive reference voltage (see note)	$V_{ref+}$		$V_{CC}$	$V_{CC} + 0,1$	V
Negative reference voltage	$V_{ref-}$		0	-0,1	V
Diference reference voltage	$V_{ref+} - V_{ref-}$		5		V
Start pulse duration	$t_{w(S)}$	200	5		ns
Address load control pulse width	$t_{w(ALC)}$	200			ns
Address setup time	$t_{su}$	50			ns
Address hold time	$t_h$	50			ns
Clock frequency	$f_{clock}$	10	640	1280	KHz

Nota: Care must be taken tahn rating is observed even during power-up

### A3.8 ELECTRICAL CHARACTERISTICS AVER RECOMMENDED OPERATING FREE-AIR TEMPERATURE RANGE. $V_{CC}=4,75$ V to 5,25 V (Unless otherwise noted)

#### Total device

Parameter		Test condicion	Min	Nom	Max	Un
$V_{IH}$	High-level input voltage, control inputs	$V_{CC} = 5$ V	$V_{CC} - 1,5$	6		V
$V_{IL}$	Low-level input voltage, control inputs	$V_{CC} = 5$ V			1,5	V
$V_{OH}$	High-level output voltage	$I_o = -360$ $\mu$ A	$V_{CC} - 0,4$			V
$V_{OL}$	Low-level output voltage	Data outputs	$I_o = 1,6$ mA		0,45	V
		End of conversion	$I_o = 1,2$ mA		0,45	$\mu$ A
$I_{OZ}$	Off-state (high-impedance-state) output current	$V_o = 5$ V			3	$\mu$ A
		$V_o = 0$ V			-3	
$I_i$	Control input current at maximum input voltage	$V_i = 15$ V			1	$\mu$ A
$I_{iL}$	Low-level control input current	$V_i = 0$ V			-1	MA
$I_{CC}$	Supply current	$f_{clock} = 640$ KHz		0,3	3	pF
$C_i$	Input capacitance, control inputs	$T_A = 25^\circ$ C		10	15	pF
$C_o$	Output capacitance, date outputs	$T_A = 25^\circ$ C		10	15	pF
	Resistance from pin 12 to pin 16		1	1000		K $\Omega$

#### Analog multiplexer

Parameter		Test condicion	Typ	Max	Un
$I_{on}$	Channel on-state current (see note)	$V_i = 5$ V, $f_{clock} = 640$ KHz		2	$\mu$ A
		$V_i = 0$ V, $f_{clock} = 640$ KHz		-2	
$I_{off}$	Channel off-state current	$V_{CC} = 5$ V, $T_A = 25^\circ$ C	10	200	nA
			-10	-200	
		$V_{CC} = 5$ V		1	$\mu$ A
				-1	

Nota: Channel on-state current is primarily due to the bias current into or out of the threshold detector, and it varies directly with clock frequency.

### A3.9 OPERATING CHARACTERISTICS, $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_{CC} = V_{REF+} = 5\text{ V}$ , $V_{REF-} = 0\text{ V}$ , $f_{\text{clock}} = 640\text{ KHz}$ (Unless otherwise noted)

Parameter		Test condition	Min	Typ	Máx	Un
$k_{\text{SVS}}$	Supply voltage sensitivity	$V_{CC} = V_{REF+} = 4,75\text{ V to }5,25\text{ V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C to }85^\circ\text{C}$ , see 1		$\pm 0,05$		%/V
	Linearity error (see 2)			$\pm 0,5$		LSB
	Zero error (see 3)			$\pm 0,25$		LSB
	Total unadjusted error (see 4)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		$\pm 0,5$		LSB
		$T_A = -40^\circ\text{C to }85^\circ\text{C}$			$\pm 1,25$	
		$T_A = 0^\circ\text{C to }70^\circ\text{C}$			$\pm 1$	
$t_{\text{en}}$	Output enable time	$C_L = 50\text{ pF}$ , $R_L = 10\text{ K}\Omega$		80	250	ns
$t_{\text{dis}}$	Output disable time	$C_L = 10\text{ pF}$ , $R_L = 10\text{ K}\Omega$		105	250	ns
$t_{\text{conv}}$	Conversion time	See 6	90	100	116	$\mu\text{s}$
$t_{\text{d(EOC)}}$	Delay time, end of conversion output	See 5 and 6	0		14,6	$\mu\text{s}$

(1): Supply voltage sensitivity relates to the ability of an analog to digital converter to maintain accuracy as the supply voltage varies. The supply and  $V_{\text{ref+}}$  are varied together and the change in accuracy is measured with respect to full-scale.

(2): Linearity errors is the maximum deviation from a straight line through the end points of the A/D transfer characteristic.

(3): Zero error is the difference between the output of an ideal converter and the actual A/D converter for zero input voltage.

(4): Total unadjusted error is the maximum sum of linearity error, zero error, and full-scale error.

(5): For clock frequencies other than 640 KHz,  $t_{\text{d(EOC)}}$  maximum is 8 clock periods plus 2  $\mu\text{s}$ .

(6): Refer to the operating sequence diagram.

## **ANEXO 4**

### **FILTRO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR DO SENSOR INFRAVERMELHO**

## **A4. FILTRO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR DO SENSOR INFRAVERMELHO**

A continuação é apresentado o processo matemático de projeto para o filtro do circuito amplificador do sensor infravermelho.

As paredes refratárias do lar de combustão das caldeiras, emitem um nível contínuo de radiação infravermelha. Este nível contínuo manifesta-se como uma componente DC no sinal entregue pela primeira etapa do circuito amplificador do sensor infravermelho.

Dado que esta componente de sinal contínuo, não procede da chama, deveria ser eliminada, para o qual foi projetado um circuito passabanda. Este circuito permite o passo do sinal de chama, que oscila com uma frequência de 10 Hz e rejeitar tanto os sinais com frequência zero (componente de contínua) quanto os sinais de ruído da linha de alimentação, com frequência de 60 Hz. O processo de projeto do filtro descreve-se a continuação.

### **A4.1 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO**

As especificações do filtro ativo passabanda são as seguintes:

- Frequência de passo inferior: 8 Hz
- Frequência de passo superior: 5 Hz
- Frequência de rejeição inferior: 3 Hz
- Frequência de rejeição superior: 40 Hz
- Atenuação na banda de passo: -3 dB
- Atenuação na banda de rejeição: -30 dB

### **A4.2 PROJETO INDIVIDUAL DOS FILTROS**

O filtro passabanda está conformado por dois filtros colocados em cascata, um passabaixo e outro passaalto. O projeto de ambos filtros é mostrado a continuação.

### A4.2.1 Filtro passabaixo

- Freqüência de passo: 15 Hz, atenuação: -3 dB
- Freqüência de rejeição: 40 Hz, atenuação: -30 dB

Ordem do filtro, o filtro selecionado para o projeto é um Butterworth:

$$e_2 = \sqrt{10^{0,1(30)} - 1} \quad e_1 = \sqrt{10^{0,1(3)} - 1}$$

$$n = \frac{\log(e_2 / e_1)}{\log(f_s / f_p)} = \frac{\log(31,675)}{\log(40 / 15)} = 3,523$$

Assim, a ordem do filtro passabaixo é de 4,  $n=4$ .

Os pólos da função de transferência para este filtro são:

$$p_1 = \cos(5\pi/8) + j \operatorname{sen}(5\pi/8) = -0,3826 + j0,9238$$

$$p_2 = \cos(7\pi/8) + j \operatorname{sen}(7\pi/8) = -0,9238 + j0,3826$$

$$p_3 = \cos(9\pi/8) + j \operatorname{sen}(9\pi/8) = -0,9238 + j0,3826$$

$$p_4 = \cos(11\pi/8) + j \operatorname{sen}(11\pi/8) = -0,3826 + j0,9238$$

A função de transferência do filtro é:

$$T(s) = \frac{1}{(s^2 + 0,7652s + 0,9997)(s^2 + 1,8476s + 0,9997)}$$

Para a síntese da função de transferência é usado um circuito de filtro passabaixo de segunda ordem, cuja função de transferência está dada por:

$$\frac{1}{R_2 R_1 C_1 C_2 s^2 + C_2 (R_1 + R_2) s + 1}$$

Assim, são postos dois filtros passabaixo deste tipo para modelar a função de transferência achada.

- Primeiro filtro

Para  $R_2=R_1=10 \text{ K}\Omega$  tem-se  $C_1=2,613 \times 10^{-4} \text{ F}$  e  $C_2=3,286 \times 10^{-5} \text{ F}$

Normalizando os valores dos condensadores:

$C_1=2,77 \mu\text{F}$ , tomando-se por  $3 \mu\text{F}$  e  $C_2=0,459 \mu\text{F}$  tomando-se por  $1 \mu\text{F}$ .

- Segundo filtro

Para  $R_2=R_1=10\text{ K}\Omega$  tem-se  $C_1=1,082 \times 10^{-4}\text{ F}$  e  $C_2=9,238 \times 10^{-5}\text{ F}$

Normalizando os valores dos condensadores:

$C_1=1,148\ \mu\text{F}$ , tomando-se por  $1\ \mu\text{F}$  e  $C_2=0,98\ \mu\text{F}$  tomando-se por  $1\ \mu\text{F}$ .

#### A4.2.2 Filtro passaalto

Ordem do filtro:

$$n = \frac{\log(e_2 / e_1)}{\log(f_s / f_p)} = \frac{\log(31,675)}{\log(8/3)} = 3,52$$

A ordem do filtro passaalto é  $n=4$ , igual ao caso do passabaixo.

A função de transferência com um filtro Butterworth é:

$$T(s) = \frac{s^2}{(s^2 + 0,7652s + 0,9997)} \frac{s^2}{(s^2 + 1,8476s + 0,9997)}$$

Para a síntese da função de transferência é usado um circuito de filtro passaalto de segunda ordem, cuja função de transferência está dada por:

$$\frac{R_2 R_1 C_1 C_2 s^2}{R_2 R_1 C_1 C_2 s^2 + R_1 (C_1 + C_2) s + 1}$$

O filtro é implementado colocando em cascata os dois circuitos:

- Primeiro filtro

Para  $C_2=C_1=1\ \mu\text{F}$  tem-se  $R_1=382600\ \Omega$  e  $R_2=261300\ \Omega$

Normalizando os valores das resistências:  $R_1=7,611\text{ K}\Omega$ ,  $R_2=51,11\text{ K}\Omega$

- Segundo filtro

Para  $C_2=C_1=1\ \mu\text{F}$  tem-se  $R_1=923800\ \Omega$  e  $R_2=108240\ \Omega$

Normalizando os valores das resistências:  $R_1=18,137\text{ K}\Omega$ ,  $R_2=21,5\text{ K}\Omega$

O projeto fica completo.

O diagrama esquemático do filtro encontra-se dentro do diagrama esquemático do amplificador do sensor infravermelho. O filtro está formado por quatro circuitos de filtro ativo de Segunda ordem cada um, os quais estão dispostos no diagrama, a partir do segundo amplificador.

Foi usado o programa SPICE para simular a resposta em frequência do filtro passabanda, de forma a dar um ajuste mais preciso ao filtro deslocando as frequências próprias das células elementares de segundo ordem que o compõem.

### A4.3 NETLIST DO FILTRO E GRÁFICOS DA SIMULAÇÃO

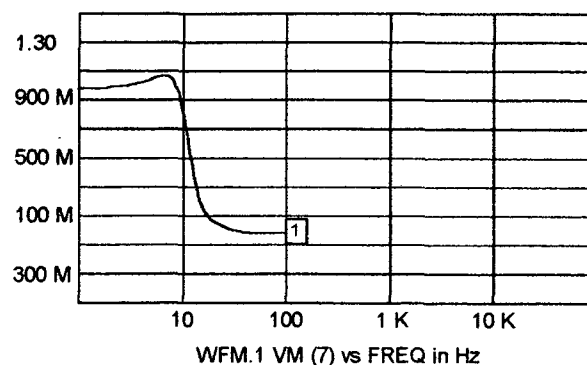
A continuação apresenta-se o NETLIST do circuito do filtro, usado para a simulação.

```

*INCLUDE NONLIN.LIB          RD3 17 0 22K
X1 6 5 7 40 41 UA741        ROUT 19 0 200K
X2 10 9 11 40 41 UA741     CA1 4 7 3UF
X3 14 13 15 40 41 UA741   CA2 5 0 1UF
X4 18 17 19 40 41 UA741   CB1 8 11 1UF
RA1 3 4 10K                CB2 9 0 1UF
RA2 4 5 10K                CC1 11 12 1UF
RA3 6 7 20K                CC2 12 13 1UF
RB1 7 8 10K                CD1 15 16 1UF
RB2 8 9 10K                CD2 16 17 1UF
RB3 10 11 20K             V1 3 0 AC 1
RC1 12 15 7.6K            VCC 40 0 5V
RC2 14 15 52K             VEE 41 0 -5V
RC3 13 0 52K              .AC DEC 100 1HZ 100HZ
RD1 16 19 18.3K           .PRINT AC VM(7) VM(11) VM(15) VM(19)
RD2 18 19 22K             .END

```

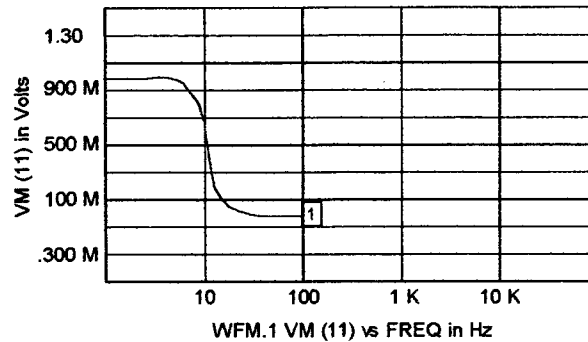
As curvas obtidas como produto da simulação do circuito passabanda no programa SPICE, são apresentadas nas seguintes figuras.



**Figura 1. Primeiro circuito do filtro passabaixo**

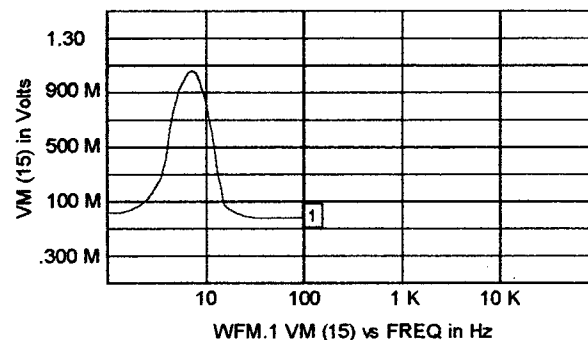


Na Figura 1 a tensão foi medida entre os nós 7 e 3 da NETLIST.



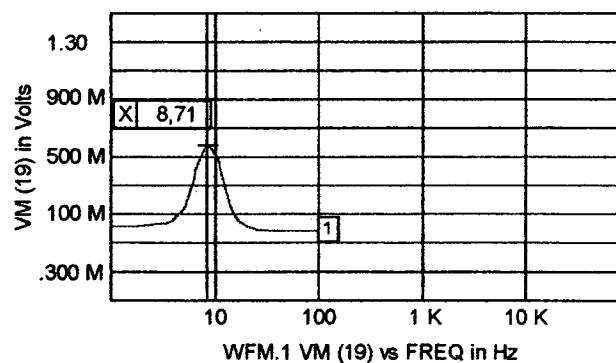
**Figura 2. Cascata do primeiro e segundo circuitos do filtro passabaixo**

Na Figura 2 a tensão foi medida entre os nós 11 e 3 da NETLIST.



**Figura 3. Cascata do primeiro e segundo circuitos do filtro passabaixo e primeiro circuito do filtro passaalto**

Na Figura 3 a tensão foi medida entre os nós 15 e 3 da NETLIST.



**Figura 4. Cascata dos circuitos do filtro passabaixo e dos circuito do filtro passaalto**

Na Figura 4 a tensão foi medida entre os nós 19 e 3 da NETLIST.

Na última curva pode-se ver que a frequência central do filtro passabanda é 8,71 Hz. Para ajustar esta frequência devem-se variar as frequências próprias dos quatro circuitos de Segunda ordem.

Primeiro filtro:  $RA_1=RA_2=10\text{ K}\Omega$ ,  $CA_1=3\ \mu\text{F}$ ,  $CA_2=1\ \mu\text{F}$ , obtendo  $f=9,18\text{ Hz}$

Segundo filtro:  $RB_1=RB_2=10\text{ K}\Omega$ ,  $CB_1=CB_2=1\ \mu\text{F}$ , obtendo  $f=9,18\text{ Hz}$

Terceiro filtro:  $CC_1=CC_2=1\ \mu\text{F}$ ,  $RC_1=7,6\text{ k}\Omega$ ,  $RC_2=52\text{ k}\Omega$ , obtendo  $f=8,006\text{ Hz}$

Quarto filtro:  $CD_1=CD_2=1\ \mu\text{F}$ ,  $RD_1=18,3\text{ k}\Omega$ ,  $RD_2=22\text{ k}\Omega$ , obtendo  $f=7,932\text{ Hz}$

Fazendo variações em  $CA_1$ ,  $CB_1$ ,  $RC_2$ ,  $RD_2$  variam as frequências próprias de cada filtro, sem alterar muito o coeficiente de sobretensão.

Primeiro filtro:  $RA_1=RA_2=10\text{ K}\Omega$ ,  $CA_1=CA_2=1\ \mu\text{F}$ , obtendo  $f=15,91\text{ Hz}$

Segundo filtro:  $RB_1=RB_2=10\text{ K}\Omega$ ,  $CB_1=0,1\ \mu\text{F}$ ,  $CB_2=1\ \mu\text{F}$ , obtendo  $f=50,33\text{ Hz}$

Terceiro filtro:  $CC_1=CC_2=1\ \mu\text{F}$ ,  $RC_1=7,6\text{ k}\Omega$ ,  $RC_2=45\text{ k}\Omega$ , obtendo  $f=8,606\text{ Hz}$

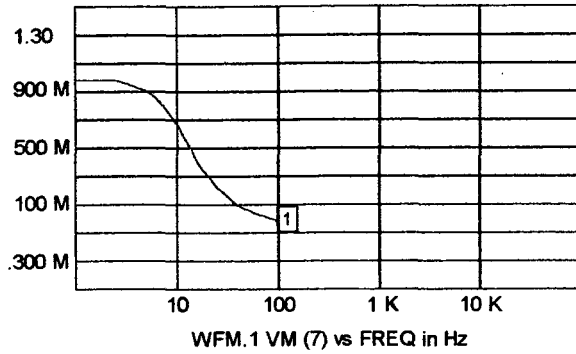
Quarto filtro:  $CD_1=CD_2=1\ \mu\text{F}$ ,  $RD_1=18,3\text{ k}\Omega$ ,  $RD_2=21\text{ k}\Omega$ , obtendo  $f=8,118\text{ Hz}$

#### A4.4 NETLIST MODIFICADO E SEUS GRÁFICOS

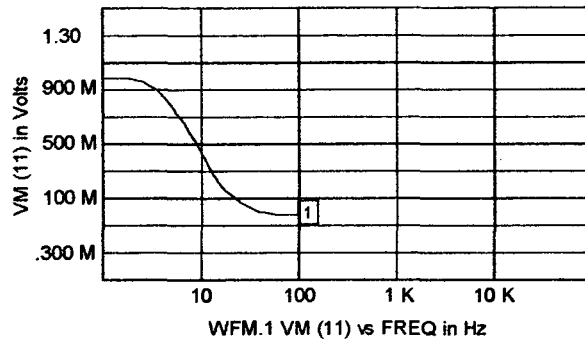
O NETLIST com as variações efectuadas apresenta-se a seguir.

```
*INCLUDE NONLIN.LIB          RD3 17 0 21K
X1 6 5 7 40 41 UA741         ROUT 19 0 200K
X2 10 9 11 40 41 UA741      CA1 4 7 1UF
X3 14 13 15 40 41 UA741    CA2 5 0 1UF
X4 18 17 19 40 41 UA741    CB1 8 11 0.1UF
RA1 3 4 10K                  CB2 9 0 1UF
RA2 4 5 10K                  CC1 11 12 1UF
RA3 6 7 20K                  CC2 12 13 1UF
RB1 7 8 10K                  CD1 15 16 1UF
RB2 8 9 10K                  CD2 16 17 1UF
RB3 10 11 20K                V1 3 0 AC 1
RC1 12 15 7.6K               VCC 40 0 5V
RC2 14 15 45K                VEE 41 0 -5V
RC3 13 0 45K                 .AC DEC 100 1HZ 100HZ
RD1 16 19 18.3K              .PRINT AC VM(7) VM(11) VM(15) VM(19)
RD2 18 19 21K                .END
```

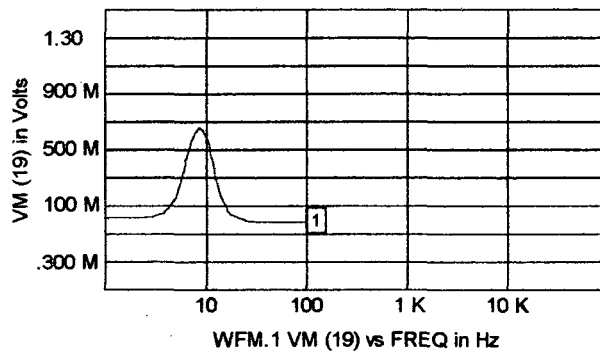
As curvas obtidas da simulação do circuito ajustado apresentam-se a continuação. Na última curva pode-se ver que a frequência central do filtro tem sido aproximada ao valor de 9,77 Hz, que é muito próximo ao desejado.



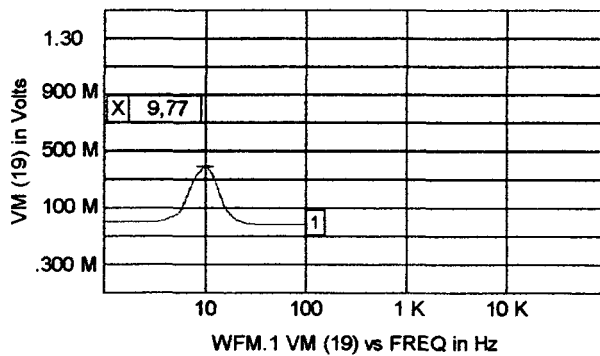
**Figura 5. Primeiro circuito do filtro passabaixo**



**Figura 6. Cascata do primeiro e segundo circuitos do filtro passabaixo**



**Figura 7. Cascata do primeiro e segundo circuitos do filtro passabaixo e primeiro circuito do filtro passaalto**



**Figura 8. Cascata dos circuitos do filtro passabaixo e dos circuito do filtro passaalto**

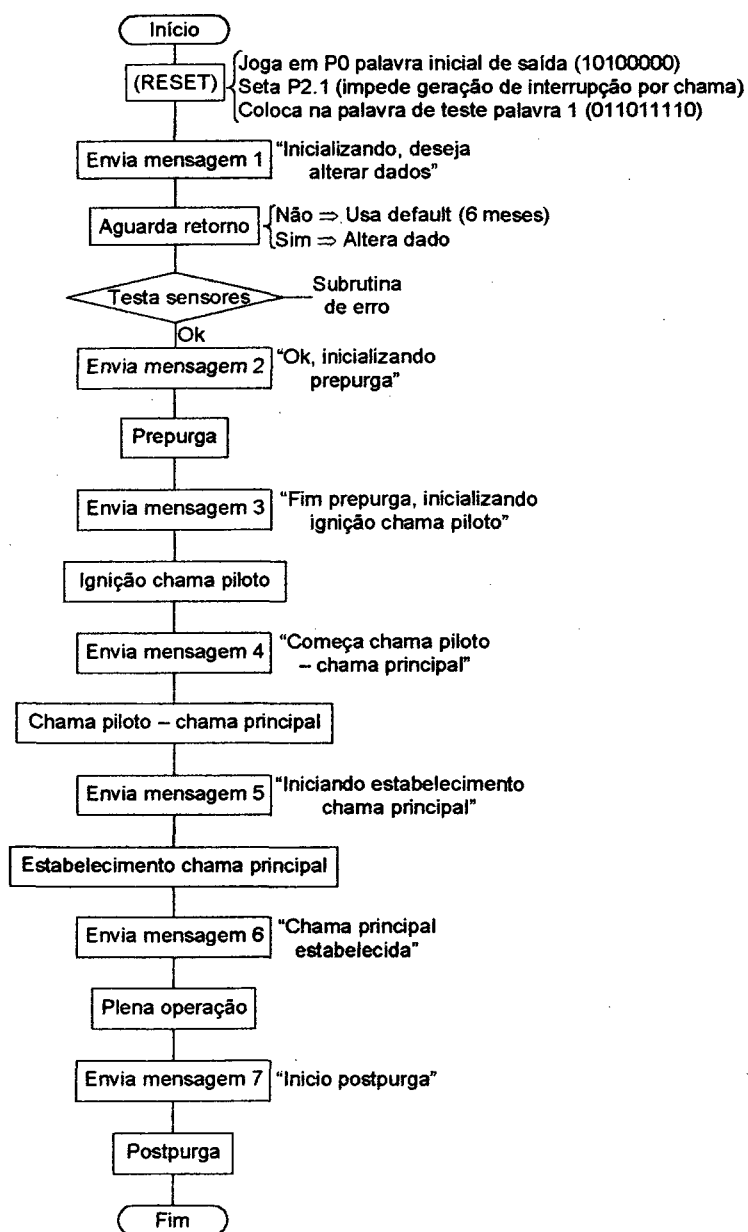
## **ANEXO 5**

### **DIAGRAMAS DE FLUXO DO CONTROLADOR DE INTERTRAVAMENTO PROPOSTO**

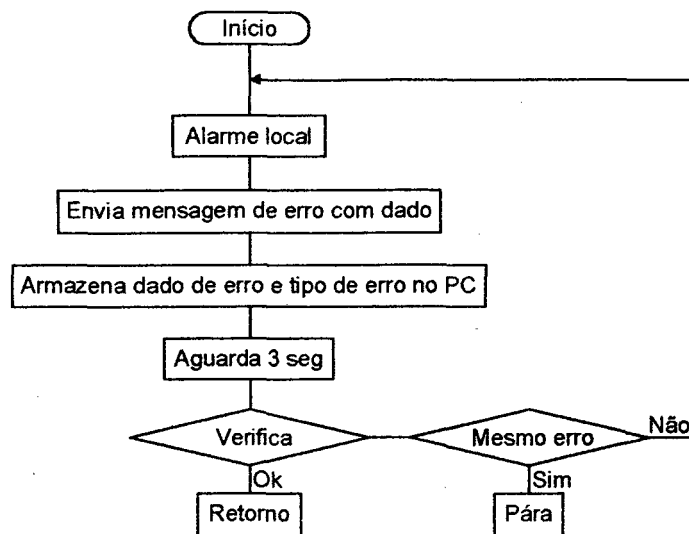
## A5. DIAGRAMAS DE FLUXO DO CONTROLADOR DE INTERTRAVAMENTO PROPOSTO

A continuação são apresentados os diagramas de fluxo elaborados para cada uma das etapas do controle do sistema mecânico, que será efetuado mediante o controlador de intertravamento.

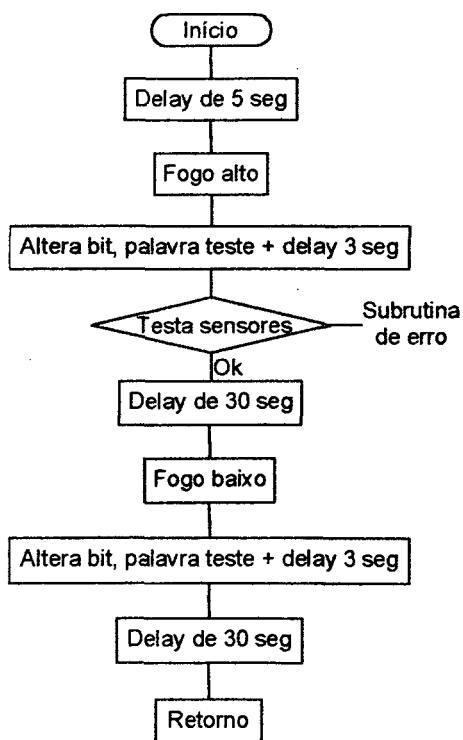
### A5.1 ROTINA PRINCIPAL



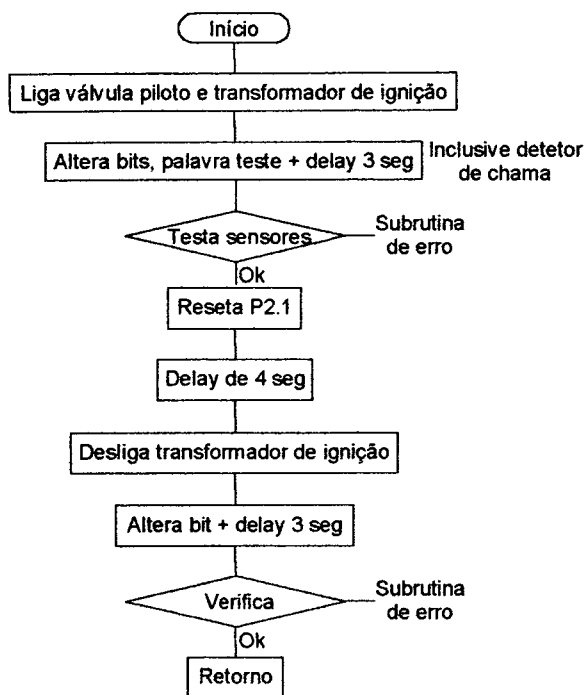
### A5.2 SUBROTINA DE ERRO



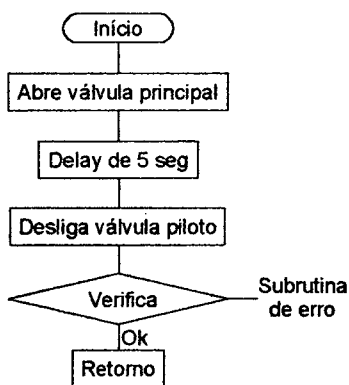
### A5.3 SUBROTINA DE PREPURGA



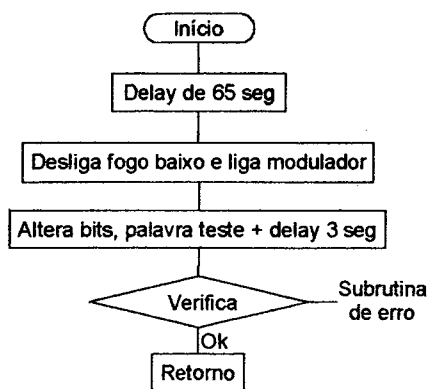
#### A5.4 SUBROTINA DE IGNIÇÃO CHAMA PILOTO



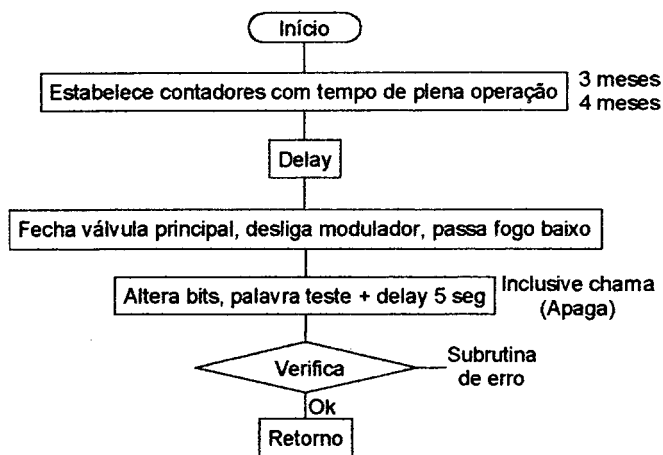
#### A5.5 SUBROTINA CHAMA PILOTO – CHAMA PRINCIPAL



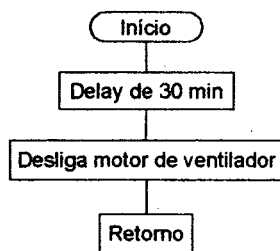
#### A5.6 SUBROTINA ESTABELECIMENTO CHAMA PRINCIPAL



### A5.7 SUBROTINA DE PLENA OPERAÇÃO



### A5.8 SUBROTINA ESTABELECIMENTO CHAMA PRINCIPAL



### A5.9 CONSIDERAÇÕES PARA A EXECUÇÃO DO PROGRAMA

Definições:

- Ligado=1, desligado=0
- Erro=0, Ok=1

**Tabela 1. Considerações**

Eventos	Fogo baixo	Fogo alto	Modulador
Detetor fogo baixo	1	0	0
Sensor modulador	0	0	1

**Tabela 2. Condição inicial**

Eventos	Palavra inicial saída
Fogo baixo	1
Fogo alto	0
Motor queimador (ventilador)	1
Alarme	0
Modulador	0
Válvula principal	0
Válvula piloto	0
Transformador ignição	0

**Tabela 3. Estado dos sensores**

Verifica sensores	No. 1	No. 2	No.3	No. 4
Sensor de chama	0	1	1	1
Detetor fogo baixo	1	1	0	1
Fluxo de ar atomizado	1	1	0	
Fluxo de ar secundário	0	0	1	
Nível de água	1	1	1	
Pressão de vapor	1	1	1	
Pressão de petróleo	1	1	1	
Temperatura de petróleo	1	1	1	
Sensor de modulação	0	0	1	0



## GLOSSÁRIO

No desenvolvimento deste trabalho são utilizados uma série de termos inerentes à automação e controle de processos, ou mais especificamente, à automação e controle do processo de operação de uma usina açucareira. Neste sentido são apresentadas a seguir as especificações básicas para lograr uma boa compreensão da pesquisa e resultados deste estudo.

1. **Batey:** Palavra popular que representa a localização física da moradia dos trabalhadores da usina açucareira e que normalmente encontra-se em terrenos próximos a ela.
2. **Controladores adaptativos:** as características dinâmicas da maioria dos sistemas de controle não são constantes devido a razões tais como a deterioração de componentes ao longo do tempo ou variações em parâmetros e ambiente. Se as variações nos parâmetros do processo e ambiente forem significativas, um controlador satisfatório deve possuir a habilidade de adaptação. A adaptação implica a habilidade de se auto-ajustar de acordo com variações imprevisíveis nas condições de ambiente ou estrutura. Os controladores que possuem esta habilidade de adaptação são denominados controladores adaptativos.
3. **Controle de processos:** É a técnica que consiste em medir o que se deseja controlar, comparar o resultado da medição com o valor que para ela se deseja e agir sobre o sistema no sentido de diminuir a diferença existente.
4. **Controle em malha aberta:** Sistema no qual a saída não têm efeito na ação do controle, isto é, a saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada.
5. **Controle em malha fechada:** Sistema no qual o sinal de saída do processo tem efeito direto na ação de controle.

6. **Guarapo:** Suco extraído da cana ao ser passada por um processo de moído. Também chamado de suco de cana.
7. **Permutador:** Pré-evaporador.
8. **Perturbação:** É um sinal que tende a afetar adversamente o valor de saída de um sistema.
9. **Planta:** parte de um equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina que funcionam conjuntamente cuja finalidade é desempenhar uma dada operação. É portanto, qualquer objeto físico a ser controlado como uma caldeira.
10. **Processo:** Operação ou desenvolvimento natural que evolui progressivamente caracterizado por uma série de mudanças graduais que sucedem, uma em relação às outras, de modo relativamente fixo e objetivando um particular resultado ou meta. Pode-se dizer então, que processo é qualquer operação a ser controlada, como por exemplo, a operação de geração de vapor.
11. **Puntista:** Pessoa com experiência empírica para classificar e testar os cristais de açúcar e determinar o seu crescimento ótimo.
12. **Sistema de controle realimentado:** Sistema em malha fechada onde a saída do processo é comparada com a referência para se obter a diferença, chamada de erro, que deve ser minimizada a zero.
13. **Sistemas:** Combinação de componentes que agem em conjunto para alcançarem um objetivo determinado.
14. **Tacho:** Tanque de acero de seção em U que permite manter a massa em um movimento lento e contínuo.
15. **Tandem:** sucessão de moinhos por onde entra a cana que vai ser moída.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ABREU, A. CUSTÓDIO, L., FERREIRA, C. P. Fuzzi Modelling: a Rule Based Approach, *Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings*. v.1. p 162-168, 1996.
- [2] ALASMAR, M. A. *Automação no setor de açúcar e álcool- Usina da Barra S. A. Açúcar e Alcool in: INSTEC - Instrumentação e Controle de Processos*. São Paulo, setembro 1991.
- [3] ALLWORTH, S. T. e ZOBEL, R. N. *Introduction to real-time software design*. Macmillan, 1987.
- [4] BALBO J. M. *Geração de energia elétrica a partir da utilização do bagaço de cana-de-açúcar, Usina Açúcareira São Francisco*. São Paulo, 1990
- [5] BALBO J.M. *Alcoolquímica. Usina Açúcareira São Francisco*. São Paulo, 1987.
- [6] BEGA, Egídio Alberto. *Caldeiras – instrumentação e controle*. Rio de Janeiro: JR. Editora técnica, 1989.
- [7] BEHN, Emmanuel. *Estudo do trabalho de operadores de caldeiras: Uma abordagem ergonômica*. Teses de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- [8] BENNET, S. e LINKENS, D.A. *Reia-time Computer Control*. Peter Peregrinus Ltd, 1984.
- [9] BLANK, Martim. *Sistematização das especificações metrológicas em sistemas automatizados de aquisição de sinais*. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1996.
- [10] BURGHARDT, David. *Ingeniería Termodinámica*. Ed. Harla.

- [11] CAD - Controle e Automação Digital Ltda. ***Apresentação da empresa, realizações/objetivos e produtos para automação de usinas de açúcar e destilarias de álcool.*** São Carlos.
- [12] CANAPLAN Planejamento, Consultoria SC Ltda. ***Inovações tecnológicas em equipamentos e processos de destilação e suas consequências sobre a qualidade do álcool produzido.*** Piracicaba, 1985.
- [13] CAO, S. G., REES, N. W., FENG G. Fuzzi Control of Nonlinear Discrete – Time Systems, ***Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings.*** v.1. p 265-271, 1996.
- [14] CLAIR, David W. St. ***Controller Tuning and Control Loop Performance.*** 2 ed. United States of America: Straight-Line Control Company, 1993.
- [15] COEYMAN, B., BOWLES, J. B.. Fuzzi Logic Applied to Reboiler Temperature Control, ***Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings.*** v.1. p 511-516, 1996.
- [16] COPERSUCAR, PROALCOO. ***Fundamentos e Perspectivas.*** São Paulo, 1989.
- [17] COPERSUCAR. ***Relatório Anual 1990/1991.*** São Paulo, 1991.
- [18] COUGHNOR, Donald R. & KOPPEL, Lowel B. ***Process Systemns Analysis and Control.*** Tokyo: McGraw-Hill, 1965.
- [19] CURSIO, Vinícius Leônidas. ***Ajuste automático de controladores PI para processos de fluxo.*** Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1995.
- [20] DATAGRO. ***Cana, açúcar e álcool: Informativo reservado quinzenal sobre a indústria sucro-alcooleira.*** São Paulo.
- [21] DE SOUZA J. R., M. B. ***Redes Neuroniais Multicamada Aplicadas a Modelagem e Controle de Processos.*** Tese de Doutorado, COPPE/PEQ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 1993.

- [22] DUKELOW, Sam G.. ***The Control of Boilers***. Ed. Instrumental Society of America. North Carolina, 1981.
- [23] EID, Farid. ***Economie de rente et agro-industrie du sucre et de l'alcool au Brésil***. Amiens, Université de Picardie Jules Verne, 1994, 380p. Tese de Doutorado (Novo Regime).
- [24] GNACCARINI, José C.A. ***Estado, ideologia e ação empresarial na agroindústria açucareira do Estado de São Paulo***. FFLCH-USP, 1972, 250p. Tese de Doutorado.
- [25] GOMIDE, F. A. C. e NETTO, M. L. A. ***Introdução a automação industrial informatizada***. Ed. Kapelusz S. A. I EBAI, Buenos Aires (Argentina), 1986.
- [26] GONZALEZ VÁSQUEZ, José Adolfo. ***Introducción a los Microcontroladores - Hardware, Software y Aplicaciones***. Ed. McGraw-Hill. España, 1992.
- [27] GONZALES VASQUEZ, Manuel. ***Introducción a los microcontroladores***. Primeira edição, Ed. Mc. Graw Hill. España, 1992.
- [28] GOPAL, M. ***Modern Control System Theory***. Wiley Eastern Limited, 1984.
- [29] GOULD, Leonard A. ***Chemical Process Control: Theory and Applications***. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1969.
- [30] HARRIS, C. J. ***Advances in intelligent control***. Taylor & Francis, Bristol, USA., 1994.
- [31] HORWITZ, Paul and HILL, Windfield. ***The art of Electronics***. Cambridge University Press, 1989.
- [32] HUGOTT, E.. ***Manual para ingenieros azucareros***. Ed. Revolucionaria. La Habana, 1967.
- [33] INSTEC, ***Abinee Tec'91 - Rumo à competitividade no ano 2000***. RJ, Mc Klausen, 1991.

- [34] INTEL CORPORATION. *Embedded Control Applications*. California, 1988.
- [35] INTEL CORPORATION. *8 bit Embedded Controllers*. California, 1993.
- [36] Jornal "Juventud Rebelde". Cuba, 1998
- [37] KANDEL, <sup>a</sup>, LANGHOLZ, G. *Fuzzy Control Systems*. CRC Press. Florida, USA, 1994.
- [38] KENNETH, Krane. *Fisica Moderna*. Primeira edição. Ed. Limusa. Mexico, 1991.
- [39] LEE, M., PARK, S., A New Scheme Combining Neural Feedforward Control with Model – Predictive Control, *AIChE Journal*. V. 38, n. 2, 1992.
- [40] LEWIS, F. L., LUI. Towards a Paradigm for Fuzzy Logic Control, *Automatica*. V. 3, n. 2, p. 167-181. 1996.
- [41] MALKI, H., MISIR, D. Determination of the Control Gains of a Fuzzy PID Controller Using Neural Networks. *Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings*. v.1. p 1303-1313, 1996.
- [42] MAZZUCO, M. M. *Implementação de um Controlador Preditivo Baseado em um Modelo Neural associado a um Sistema Especialista*. Dissertação de mestrado, Dpto. Eng. Química - UFSC. Florianópolis-SC, 1997.
- [43] MESNY, Marcelo. *Calderas de Vapor*. Ed. Marymar. Buenos aires, 1981.
- [44] MIC/STI. *1º Seminário de Tecnologia Industrial de Produção de Alcool*. Brasília, 1985.
- [45] MORAES de A., Marcelo. *Um ambiente de desenvolvimento Forth, para sistemas dedicados e controle difuso*. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1996.

- [46] MOTOROLA. **Microprocessor, Microcontroller and Peripheral Data**. Volume II, Motorola Inc. 1988.
- [47] OLIVEIRA, M. C., RACURY, M. <sup>a</sup> R. Writing Fuzzy Rules Directly in a C++ Source Code. **Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings**. v.1. p 522-528, 1996.
- [48] PERA, Hildo. **Geradores de vapor de água – caldeiras**. Dep. De Eng. Mecânica da universidade de São Paulo. São Paulo: 1994.
- [49] QUEDA, Oriovaldo. **A intervenção do Estado e a agroindústria açucareira paulista**. ESALQ, 173p. Tese de Doutorado.
- [50] Revista Usineiro, Ed. Terra, SP (diversos exemplares)
- [51] RITA, D. J. **Controle de Processos Usando Redes Neurais Artificiais: Uma Aplicação Experimental**. Dissertação de Mestrado, Dpto. Eng. Química - UFSC. Florianópolis-SC, 1995.
- [52] ROMÃO, Wesley. **Análise e projeto de controladores pid adaptativos baseados em estimação de parâmetros: Um estudo de caso**. Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1996.
- [53] SCHILD, H. (Autor), SILVEIRA, C. G. (Tradutor). **Inteligência Artificial Utilizando Linguagem C**. McGraw-Hill Ltda. São Paulo, 1989.
- [54] SEEBORG, D. E., EDGAR, T. F., MELLICHAMP, D. A. Process Dynamics and Control. **John Wiley & Sons**. Canada, 1989.
- [55] SIEMENS, A. G. **Instrumentação Industrial**. São Paulo: Siemens S.A., 1986.
- [56] SIGHIERI, Luciano. **Controle automático de processos industriais: Instrumentação**. São Paulo: Edgar Blucher, 1973.
- [57] SILVEIRA, Aquil.es Alfonso da et all. **Automação de processo: um caminho para elevar a qualidade dos produtos. Metalurgia e materiais - ABM**. V. 49, n. 417, mai, 1993.

- [58] SOCEK, B. ***Neural and Intelligent Systems Integration***. Wiley Interscience. Canada, 1989.
- [59] SOISSON, Harold E. ***instrumentação industrial***. São Paulo: Hemus, 1980.
- [60] SZMRECSANYI, T. ***O Planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930-1975)***. São Paulo, Hucitec-Unicamp, 1979.
- [61] TONYAN, Michael J. ***Electronically Controlled Proportional Valves – Selection and Application***. Ed. Marcel Dekker. New York, 1985.
- [62] TZOU, S.Y. et all. ***A Distributed Development Environment for Embedded Software. Software-practice and Experience***. Vol. 23 (11). 1235-1248. Novembro, 1993.
- [63] VADIEE, N., & AKBARZADEH, T., MOHEMMAD, R. ***Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings***. v.1. p 1852-1857, 1996.
- [64] VENETSKY, L. Real Time Direct Adaptative Rule for Fuzzy Controler. ***Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings***. v.1. p 811-816, 1996.
- [65] VUCALOVICH, M. P. ***Propriedades termofisias del agua y del vapor de agua***. Mockba, 1967.
- [66] WARNOCK, Ian G. ***Programmable controllers – operation and application***. UK: Ed. Prentice Hall, 1988.
- [67] WYLEN, Gordon J. Van e SONNTAG, Richard E. ***Fundamentos da termodinâmica clássica***. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1976.
- [68] YAMAZAKI, T. An Applicatio of Fuzzy Modeling to Distillation Control. ***Fifth IEEE International conference on fuzzy systems-proceedings***. v.1. p 654-659, 1996.