



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
PROGRAMA TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E  
BIOQUÍMICOS



**JOSE MARCIO NIKIEL**

**SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE CALDEIRA  
COM COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS**

Dissertação de Mestrado  
Orientadora  
Prof<sup>a</sup> Dra Belkis Valdman

Rio de Janeiro  
2010

**Jose Marcio Nikiel**

**SISTEMAS DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE CALDEIRA COM  
COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Instituto de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dra. Belkis Valdman.

Rio de Janeiro  
2010

N692s Nikiel, Jose Marcio

Sistema de instrumentação e automação de caldeira com combustíveis alternativos/ Jose Marcio Nikiel – 2010.  
XIX, 101f.:il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2010.

Orientadora: Belkis Valdman.

1. Caldeira 2. Biodiesel 3. Engenharia Química - Teses I. Valdman, Belkis, (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química. III. Título.

CDD: 665.53

**Jose Marcio Nikiel**

**SISTEMAS DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE CALDEIRA COM  
COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS**

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Dra Belkis Valdman (Orientadora)  
DEQ/EQ/UFRJ

---

Prof. Dr. Caetano Moraes  
DEQ/EQ/UFRJ

---

Dr. Mario Cesar M. Massa de Campos  
CENPES/EB/AOT - PETROBRAS

---

Prof. Dr. Maurício Bezerra de Souza Jr.  
DEQ/EQ/UFRJ

Rio de Janeiro  
2010

*Aos meus avós, pelos exemplos de coragem, paciência e generosidade.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa e aos meus filhos pela compreensão, pelas contribuições e pelo carinho recebido.

Agradeço a Quattor Petroquímica e aos gerentes de processos petroquímicos Charles Diament e Ermínio Palmigiani, pelo incentivo e apoio recebido.

Agradeço ao colega de trabalho, Nerval Junior que me substituiu nas atividades do meu trabalho para que pudesse assistir às aulas de mestrado.

Agradecimentos a Denise Barbosa, secretária da professora Belkis que me atendeu sempre gentilmente, mesmo nos dias de agenda complicada.

Agradeço a Meu Irmão Léo, pelas longas e saudáveis discussões filosóficas a respeito da importância da pós-graduação para a formação profissional.

Ao meu sogro, Antonio Sergio Fragomeni (*In memoriam*), pelas discussões sobre (bio) combustíveis e sua importância no desenvolvimento do país.

Aos operadores de Caldeira da Quattor Petroquímica, especialmente a Salvador Caldas e Edgar Duarte pelos ensinamentos a respeito de operação e funcionamento de caldeiras.

Ao colega Herbert Teixeira que não mede esforços para transmitir conhecimentos de controle de processo.

A Professora Belkis Valdman por todas as discussões acerca deste trabalho e pela paciência.

A todos, muito obrigado.

*“O segredo de progredir é começar. O segredo de começar é dividir tarefas árduas e complicadas em tarefas pequenas e fáceis de executar, e depois começar pela primeira.”*  
*Mark Tawin*

## RESUMO

NIKIEL, Jose Marcio. **Sistema de instrumentação e automação de caldeira com combustíveis alternativos**. Rio de Janeiro, 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2010.

A avaliação da influencia de misturas de combustíveis no comportamento de uma caldeira é ponto central do presente trabalho e os combustíveis em estudo são o diesel comum e o biodiesel em várias proporções. O desempenho dinâmico da caldeira é analisado através de um modelo de processo, baseado em balanços de massa e energia e elaborado de acordo com referências recentes obtidas na literatura apresentando resultados de simulação satisfatórios quando comparados com os obtidos nas referências e uma análise do comportamento da caldeira indica mudança no ganho de processo quando há a variação no fornecimento de energia à caldeira. Para objetivos de operação e automação é analisada uma malha de controle de pressão utilizando modelo simplificado e representativo em função de transferência determinado com base na resposta dinâmica observada pelo modelo completo. Os resultados simulados com a malha proposta apresentam desempenho satisfatório na resposta a variações no sinal de entrada. Para os controles de pressão e de vazão de alimentação da mistura de combustíveis, algumas considerações são destacadas, como condições requeridas para usar misturas de diesel e biodiesel em uma mesma caldeira. Para o controle de razão ar-combustível, é proposto um critério que leva em consideração a estequiometria da combustão influenciada pela composição da mistura de combustíveis.

Palavras-chave: Caldeiras. Biodiesel. Controle de Processos.



## ABSTRACT

NIKIEL, Jose Marcio. **Sistema de instrumentação e automação de caldeira com combustíveis alternativos**. Rio de Janeiro, 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2010.

The evaluation of influence of fuel mixtures in the behavior of a steam boiler is the central point of present work. The fuels considered in the study are diesel and biodiesel in different ratio. The dynamic performance of the steam boiler is analyzed by using a process model based in mass and energy balances, built accord to recent literature references. The simulation results of these models are satisfactory when compared with the results showed in literature references. Boiler behavior analysis show changes in process gain when mixture fuel composition changes. To pressure and feed fuel controls, some considerations must be made, as request conditions to use diesel and biodiesel in the same boiler. To fuel-air control the mixture composition influence in the combustion stoichiometry is considered. With operation and automation objectives, a control loop based in a simplified transfer function is considered. Simulation results based on cited loops shows satisfactory results in function of input values

Keywords: Boilers. Biodiesel. Process Control

**CONTEÚDO**

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE QUADROS	xix
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2	5
PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 CALDEIRAS	5
2.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES	6
2.1.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES	7
2.1.3 COMPONENTES PRINCIPAIS DE CALDEIRAS	7
2.1.4 COMBUSTÍVEIS PARA CALDEIRAS	8
2.2 VISCOSIDADE	10
2.2.1 CONTROLE PARA MINIMIZAR EFEITO DA VISCOSIDADE NOS COMBUSTÍVEIS PARA CALDEIRAS	12
2.2.2 EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A VISCOSIDADE	13
2.3 BIODIESEL	14
2.3.1 PROPRIEDADES DO BIODIESEL	15

2.3.2	COMPOSIÇÃO DO BIODIESEL	16
2.4	COMBUSTÃO	17
2.4.1	ESTEQUIOMETRIA DA COMBUSTÃO	18
2.4.2	EXCESSO DE AR	18
2.4.3	EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO	21
2.5	MODELAGEM DE PROCESSOS	21
2.5.1	MODELAGEM EM CALDEIRAS	22
2.5.2	MODELAGEM COM FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA	24
2.6	CONTROLE DE PROCESSOS	27
2.6.1	CONTROLES TÍPICOS DE CALDEIRAS	28
2.6.2	CONTROLE DE NÍVEL DE TUBULÃO	29
2.6.3	CONTROLE DE NÍVEL DE CALDEIRAS A UM ELEMENTO	31
2.6.4	CONTROLE DE NÍVEL DE CALDEIRAS A DOIS ELEMENTOS	31
2.6.5	CONTROLE DE NÍVEL DE CALDEIRAS A TRES ELEMENTOS	32
2.6.6	CONTROLE DE COMBUSTÃO DE CALDEIRAS	33
2.6.7	CONTROLE DE COMBUSTÃO - COMBUSTÍVEL SEGUINDO AR	34
2.6.8	CONTROLE DE COMBUSTÃO - AR SEGUINDO COMBUSTÍVEL	35
2.6.9	CONTROLE DE COMBUSTÃO - CONTROLE POR LIMITE CRUZADO	36
2.6.10	CONTROLE DE EXCESSO DE AR EM CALDEIRAS	37
	CAPÍTULO 3	39
	MODELAGEM	39
3.1	INTRODUÇÃO	39
3.2	BALANÇO DE MASSA E ENERGIA	39
3.3	APROXIMAÇÃO DOS COEFICIENTES $E_{ij}$	45

3.4	MODELO DE NIVEL DO TUBULÃO CONSIDERANDO A PRESSÃO CONSTANTE.	46
	CAPÍTULO 4	48
	SIMULAÇÃO DINÂMICA DO MODELO	48
4.1	SIMULAÇÃO DOS MODELOS OBTIDOS	48
4.1.1	SIMULAÇÃO DO ESTADO ESTACIONÁRIO	49
4.1.2	EFEITO DE DEGRAU NO VAPOR CONSUMIDO	49
4.1.3	EFEITO DE DEGRAU NA VAZÃO DE AGUA DE ALIMENTAÇÃO DA CALDEIRA	51
4.1.4	EFEITO DE DEGRAU NA ENTALPIA DA AGUA DE ALIMENTAÇÃO	51
4.1.5	EFEITO DA COMPOSIÇÃO DE COMBUSTÍVEL NO COMPORTAMENTO DA PRESSÃO	52
4.1.6	COMPORTAMENTO DO MODELO A DIFERENTES PRESSÕES INICIAIS	54
4.1.7	EFEITO DE UM DEGRAU NO CALOR FORNECIDO A UMA CALDEIRA	56
	CAPÍTULO 5	58
	CONTROLE DE PROCESSOS	58
5.1	CONTROLE DE PRESSÃO EM CALDEIRAS	58
5.1.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO POR FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	58
5.1.2	UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA PRESSÃO DE UMA CALDEIRA	61
5.2	ANÁLISE DO EFEITO DA TROCA DE COMBUSTÍVEL NA VAZÃO DA VÁLVULA	65
5.3	ANÁLISE DO EFEITO DA MISTURA DE COMBUSTÍVEL NA PRESSÃO DO TUBULÃO DA CALDEIRA UTILIZANDO UMA VALVULA LINEAR	68
5.4	CONTROLE DE EXCESSO DE AR EM CALDEIRAS	71
5.4.1	OBTENÇÃO DA RAZÃO TEÓRICA AR-COMBUSTIVEL-CASO DO BIODIESEL DE SOJA	71
5.4.2	UM CONTROLADOR DE EXCESSO DE AR PARA DIFERENTES COMBUSTÍVEIS EM UMA CALDEIRA - USO DE BIODIESEL	73

	xiii
CAPÍTULO 6	75
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	75
6.1 CONCLUSÕES	75
6.2 TRABALHOS FUTUROS	76
BIBLIOGRAFIA	77
APENDICES	82
ANEXOS	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo esquemático de uma caldeira genérica .....	5
Figura 2: Representação de uma caldeira flamotubular.....	6
Figura 3: Caldeira flamotubular.....	6
Figura 4: Esquema de uma caldeira aquatubular.....	7
Figura 5: Sistema de manuseio de combustível líquido nos EUA.....	11
Figura 6: Gráfico de viscosidade de vários combustíveis X temperatura .....	12
Figura 7: Arranjo de controle para sistemas com óleos viscosos.....	13
Figura 8: Excesso ar X combustível.....	19
Figura 9: Esquema de uma usina geradora de energia- .....	23
Figura 10: Representação de um processo por função de transferência .....	24
Figura 11: Resposta ao degrau de um processo integrador .....	26
Figura 12: Perturbação degrau para um sistema de primeira ordem .....	26
Figura 13: Diagrama para o controlador genérico e seus elementos .....	28
Figura 14: Representação dos principais controles de uma caldeira .....	29
Figura 15: Controle de Nível a três elementos.....	30
Figura 16: Controle de nível a um elemento .....	31
Figura 17: Controle de nível a dois elementos.....	32
Figura 18: Controle de nível a três elementos.....	33
Figura 19: Controle de combustão - Combustível seguindo o ar.....	34
Figura 20: Controle de combustão - Ar seguindo o combustível.....	35
Figura 21: Controle por limite cruzado .....	37
Figura 22: Faixa de controle do CO .....	38
Figura 23: Esquema de produção de vapor de uma caldeira .....	39
Figura 24: Simulação no estado estacionário.....	49
Figura 25: Resposta da pressão da caldeira ao degrau positivo na vazão mássica de vapor .....	50
Figura 26: Resposta da pressão da caldeira ao degrau negativo na vazão mássica de vapor .....	50
Figura 27: Simulação de degrau no consumo de água de alimentação.....	51
Figura 28: Simulação de degrau na entalpia de água de alimentação.....	52
Figura 29: Energia fornecida / 10kg de combustível.....	53
Figura 30: Comportamento da pressão para um degrau na vazão de vapor para diferentes misturas de combustíveis ( $p_0=3$ bar) .....	54
Figura 31: Comportamento da pressão para um degrau na vazão de vapor para diferentes misturas de combustíveis ( $p_0=7$ bar) .....	55
Figura 32: Comportamento da pressão para um degrau na vazão de vapor para diferentes misturas de combustíveis( $p_0=14$ bar) .....	55
Figura 33: Efeito dos degraus na energia fornecida (Q) na pressão do sistema.....	56
Figura 34: Representação do modelo da caldeira em função de transferência .....	60
Figura 35: Resposta aos degraus em “Q” usando o modelo de função de transferência.....	61
Figura 36: Estratégia de controle para a pressão da caldeira .....	62
Figura 37: Resposta do controlador em malha Fechada (P=10, I=0, D=0) .....	63
Figura 38: Representação do sistema de controle incluindo perturbações .....	64
Figura 39: Comportamento do sistema com controlador P puro.....	64
Figura 40: Esquema simplificado do controle vazão de combustível .....	65
Figura 41: Curvas de vazão de válvulas em função da abertura.....	66
Figura 42: Grafico de fator R.....	68

Figura 43: Pressão para uma mesma abertura de válvula (B0-B100).....	69
Figura 44: Pressão para abertura máxima de válvula (B0-B100).....	70
Figura 45: Relação Ar combustível para vários tipos de combustíveis .....	73
Figura 46: Controle de combustão com analisador de efluentes gasosos .....	74

## LISTA DE SIMBOLOS

$a$	Abertura da válvula	(%)
$C_p$	Calor específico do metal	(J/(kg°C))
$C_v$	Coeficiente de vazão	(Gal/min)
$E_a$	Energia de ativação	(J/g.mol)
$e_{ij}$	Termos auxiliares	(-)
$F_p$	Fator de geometria da tubulação adjacente	(-)
$F_R$	Fator do número de Reynolds na válvula	(-)
$F_y$	Fator de correção devido ao fluxo critico	(-)
$G_p$	Ganho do controlador	(-)
$h$	Entalpia específica da mistura vapor/água	(J/kg)
$h_c$	Entalpia específica de condensação	(J/kg)
$h_f$	Entalpia específica da água de alimentação	(J/kg)
$h_s$	Entalpia específica do vapor	(J/kg)
$h_w$	Entalpia específica da água	(J/kg)
$k$	Constante adimensional para correção do excesso de ar	(-)
$K_i$	Ganho de processo	(bar/J)
$K_p$	Ganho de processo	(-)
$l$	Nível de líquido no tubulão de vapor	(m)
$m_t$	Massa total do metal	(kg)
$N$	Constante numérica (depende das unidades usadas)	(-)
$p$	Pressão	(bar)
$P$	Energia de saída	(w)
$Q$	Fluxo de calor	(w)
$q_f$	Fluxo mássico de água que entra no tubulão	(kg/s)
$q_s$	Fluxo mássico de vapor que sai do tubulão	(kg/s)
$R$	Constante dos gases ideais	(J/g.K)
$T$	Temperatura absoluta	(K)
$T$	Tempo	(s)
$T_d$	Tempo de residência do vapor no tubulão	(s)
$t_m$	Temperatura do metal	(°C)



$t_s$	Temperatura do vapor	(°C)
$u_1$	Vazão da água de alimentação	(kg/h)
$u_2$	Abertura da válvula de vapor	(%)
$u_3$	Vazão de combustível	(kg/h)
$u_s$	Energia interna específica do vapor	(J/kg)
$u_w$	Energia interna específica da água	(J/kg)
$V_{ar}^0$	Volume estequiométrico de ar para reação de combustão	(m <sup>3</sup> )
$V_{ar}$	Volume real de ar fornecido para reação de combustão	(m <sup>3</sup> )
$V_{sd}$	Volume do vapor abaixo do nível líquido	(m <sup>3</sup> )
$V_{st}$	Volume total de vapor no sistema	(m <sup>3</sup> )
$V_t$	Volume total do tubulão	(m <sup>3</sup> )
$V_{wt}$	Volume total de água no sistema	(m <sup>3</sup> )
$W$	Vazão do fluido	Kg/h
$\eta$	Viscosidade	(cST)
$\Delta$	Varição de variável de estado	(-)
$\alpha$	Razão ar consumido/ar estequiométrico	(-)
$\alpha_1$	Parâmetro de ajuste	(bar <sup>3/8</sup> /(%.s))
$\alpha_2$	Parâmetro de ajuste	(bar/kg)
$\alpha_3$	Parâmetro de ajuste	(bar/kg)
$\alpha_4$	Parâmetro de ajuste	(w/(%.bar <sup>5/8</sup> ))
$\alpha_5$	Parâmetro de ajuste	(%.bar <sup>5/8</sup> )
$\varepsilon$	Fator adimensional de Excesso de ar	(-)
$\rho_s$	Massa específica do vapor	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_w$	Massa específica da água	(kg/m <sup>3</sup> )
$\tau_p$	Constante de tempo	(s)

**LISTA DE ABREVIATURAS**

AIC	Controlador indicador de concentração
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Celsius
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
cST	Centistoke
FIC	Controlador indicador de vazão
HIC	Controlador indicador manual
HS	Acionamento manual
IEA	International Energy Agency
ISA	International Society of Automation
LIC	Controlador indicador de nível
MV	Variável manipulada
PIC	Controlador indicador de pressão
PV	Variável de processo
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SIC	Controlador indicador de velocidade
SSU	Saybolts universal seconds
TIC	Controlador indicador de temperatura

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1:	Matriz Energética Mundial	1
Quadro 2:	Viscosidade dinâmica de vários óleos minerais	10
Quadro 3:	Viscosidade dinâmica de vários óleos vegetais	11
Quadro 4:	Propriedades de várias amostras de misturas de óleos vegetais com óleo diesel	16
Quadro 5:	Propriedades do Biodiesel de Babaçu	53
Quadro 6:	Calculo dos valores de $K_i$ para vários degraus em Q	60
Quadro 7:	Equações representativas de tipos de válvulas	66
Quadro 8:	Balanço estequiométrico de uma amostra de biodiesel	72

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 INTRODUÇÃO

Os grandes desafios dos governantes ao longo da história estão associados à disponibilidade de recursos e demandas crescentes de todos os gêneros de consumo humano. Em seu trabalho original “Um ensaio sobre o princípio da população”, Thomas Malthus, relaciona o crescimento da população a uma progressão geométrica, enquanto a oferta de alimentos naturais cresceria em progressão aritmética. Este trabalho de Malthus é de 1798. Muito tempo passou desde então e não se pode afirmar que se tem abundância de recursos para toda a população da terra.

Entre os recursos básicos e vitais, o fornecimento de energia, em suas diversas modalidades, também aparece como recurso escasso para as populações.

De acordo com a IEA (International Energy Agency), em seu relatório de 2007, a matriz energética mundial esta dividida conforme apresentada no quadro 1:

**Quadro 1: Matriz Energética Mundial**

Fonte	Contribuição (%)
Petróleo	34,3
Carvão Mineral	25,1
Gás Natural	20,9
Energias Renováveis	10,6
Energia Nuclear	6,5
Hidráulica	2,2
Outras	0,4

Fonte IEA (2007)

De acordo com a tabela anterior, mais de 80% da matriz energética mundial é de recursos não renováveis.

Em função do exposto anteriormente, governos e organizações independentes intensificam estudos para descoberta, desenvolvimento e aplicações de novas fontes energéticas.

Neste contexto, o biodiesel tem lugar de destaque, pois se trata de um recurso renovável, com excelente potencial energético, e em muitos casos, pode atuar como elemento de inclusão social, quando criar novas oportunidades de negócios e empregos para populações excluídas.

## 1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Vários equipamentos são utilizados para transformar e processar energia. Um dos equipamentos de montagem mais simples e de amplo uso é a caldeira que pode ser alimentada por energia elétrica, energia nuclear ou a partir de combustão de vários tipos de combustíveis.

Com relação aos equipamentos que processam energia a combustão, algumas questões podem ser levantadas na substituição de um combustível por outro, mesmo que os combustíveis possuam propriedades semelhantes, a saber:

- É possível substituir diretamente um combustível por outro?
- O desempenho dos equipamentos será comprometido?
- Será necessário trocar os componentes internos dos equipamentos?
- Os reagentes requerem algum tratamento prévio?
- Os efluentes gerados são simples de manusear?
- Será necessário modificar a forma de operar os equipamentos?

Com relação às caldeiras, todas as perguntas anteriores são pertinentes e aplicáveis.

Um aspecto sensível que deve ser observado nas caldeiras quando se altera as propriedades dos combustíveis, é o comportamento da pressão do vapor fornecido e o comportamento do nível do tubulão.

A qualidade da pressão do vapor gerado por uma caldeira é em muitos casos requisito para funcionamento adequado de equipamentos turbinados operados a vapor. Se esta variável de estado oscila em faixas amplas e fora de valores especificados pelos documentos de projetos, pode ter conseqüências imensuráveis sobre a operação dos equipamentos.

O controle de nível está associado à segurança operacional das caldeiras e ao fornecimento de vapor aos consumidores. Na questão da segurança, deve ser

garantido que certos limites operacionais sejam mantidos, a fim de evitar acionamentos de intertravamentos de segurança. Estes intertravamentos de segurança devem evitar que a caldeira opere vazia ou cheia. Como consequência do acionamento dos intertravamentos de segurança, o fornecimento de vapor poderá ser interrompido, e neste caso também, os resultados sobre as operações dos equipamentos podem ser danosos.

Ressaltando a importância dos controles de nível e de pressão, o governo brasileiro através da norma regulamentadora número 13 (NR13) do Ministério do Trabalho e Emprego estabelece condições e requisitos para operação de vasos de pressão e caldeiras. Entre requisitos mínimos a serem atendidos, estão a presença de malhas de indicação e condições para controle de nível e pressão de caldeiras.

### **1.3 OBJETIVO DO TRABALHO**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos do uso do diesel e do biodiesel em várias composições no funcionamento de uma caldeira.

Para estudar o efeito na pressão da caldeira, será utilizado um modelo matemático baseado em balanço de massa e energia. Para estudo dos controles, será utilizado um modelo simplificado por funções de transferência.

O efeito da composição da mistura de combustíveis sobre a razão ar-combustível também será avaliado através de um balanço estequiométrico.

### **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho está dividido de acordo com os capítulos a seguir:

Capítulo I – Introdução. Uma introdução sobre o trabalho proposto, expondo o problema e objetivos almejados.

Capítulo II - Pesquisa Bibliográfica. Este capítulo contém informações associadas aos temas: combustão, instalações de caldeiras, modelagem de caldeiras, controle de processo e de caldeiras e biodiesel, presentes na literatura recente.

Capítulo III – Modelagem matemática. Este capítulo expõe um modelo matemático com balanço de massa e energia baseado no trabalho original de Åstron e Bell (2000). A partir de algumas equações termodinâmicas, arranjos matemáticos e simplificações necessárias, obtêm-se um modelo robusto de pressão e nível.

Capítulo IV - Simulação do modelo. Aqui, através do uso de uma plataforma computacional serão feitas várias simulações do modelo exposto no capítulo III. Será feito o uso do software *Matlab*®. A simulação será feita variando a composição das cargas de combustíveis, entalpia da água de alimentação, poder calorífico e consumo de vapor.

Capítulo V – Controle de processos. Em função dos resultados obtidos no capítulo III e capítulo IV, serão avaliados impactos na construção dos equipamentos. Será proposto um modelo de processo baseado em função de transferência e uma estrutura de controle correspondente. Será elaborada uma curva de combustão com cálculo da razão ar-combustível teórica para um biodiesel puro (B100). Também serão abordados possíveis efeitos nos controles após troca de combustível.

Capítulo VI – Conclusões e recomendações.

## CAPÍTULO 2

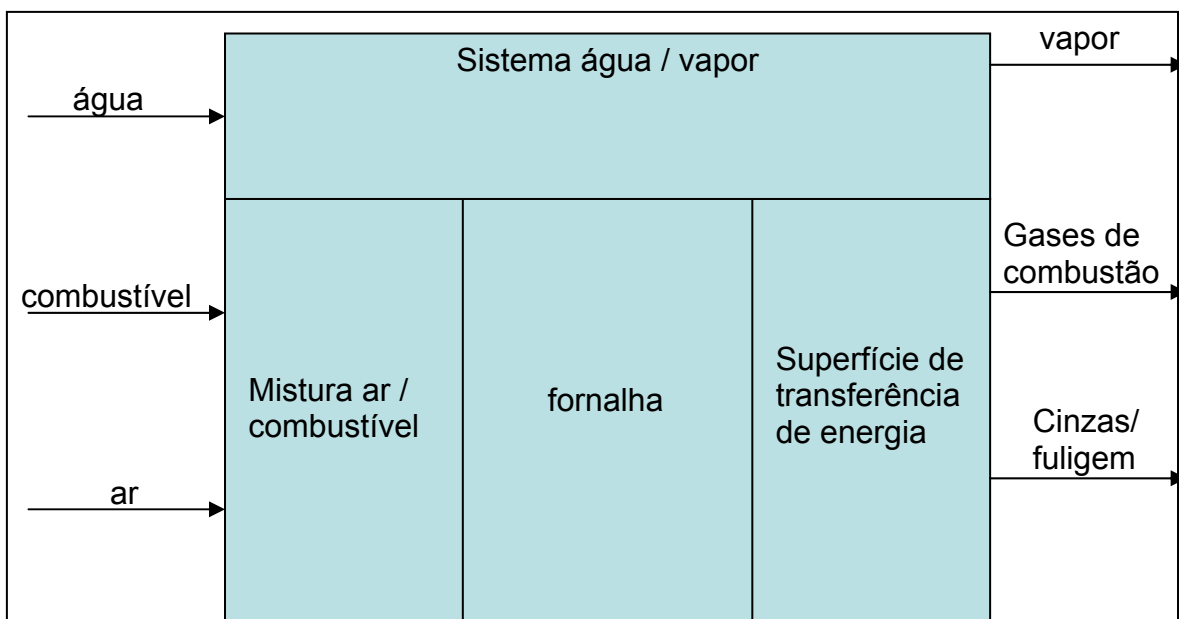
### PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 CALDEIRAS

Os primeiros registros de usos de caldeiras datam do século XVI, embora existam registros anteriores de mecanismos geradores de vapor semelhantes às caldeiras. A principal máquina da revolução industrial, a máquina a vapor, pode ser considerada uma caldeira, cujo propósito era o de transformar a energia interna da madeira ou carvão mineral em energia cinética para movimentar teares, prensas, moinhos e outras máquinas para uso nas atividades de mineração, construção, tecelagem, transporte e aquecimento. (BABCOCK e WILCOX, 2007).

De maneira simplificada, as caldeiras a combustão são equipamentos utilizados para geração de vapor em várias faixas de pressão e temperatura. Recebem água líquida e a aquecem através de sistema de transferência de calor oriundo da queima de um combustível. Este combustível pode ser gasoso, líquido ou sólido, de origem vegetal, animal ou mineral. Existem registros de uso de gordura animal, bagaço de cana, madeira, carvão mineral, além de gás natural e óleos de várias origens. (KOHAN,1997).

Gilman (2005) apresenta esquema de uma caldeira genérica, conforme figura 1.



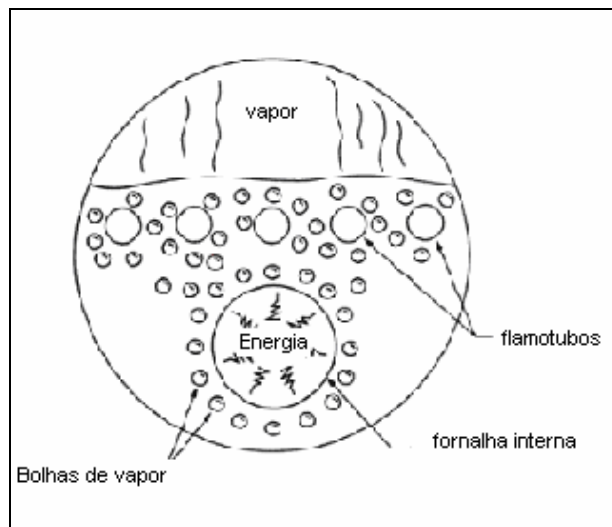
**Figura 1: Modelo esquemático de uma caldeira genérica**



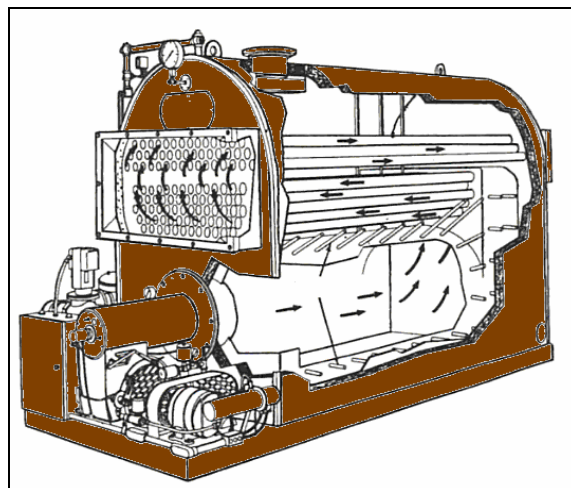
### 2.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

Trata-se de um tipo de caldeira bastante difundido e utilizado. Elas são usadas para baixas pressões e pequenas demandas. Neste tipo de caldeira, o calor é transmitido à água através de tubos inseridos dentro do tubulão da caldeira. A combustão acontece em uma fornalha e os produtos de combustão são expelidos por tubos que estão em contato permanente com a água, este contato direto dos tubos com a água é o que possibilita a produção de vapor.

As figuras 2 e 3 são representações da geração de vapor através da transferência de energia da combustão para a água em caldeiras flamotubulares.



**Figura 2: Representação de uma caldeira flamotubular.  
Reprodução de Malek (2004)**



**Figura 3: Caldeira flamotubular.  
Reprodução de Kohan (1997)**

### 2.1.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES

Neste tipo de caldeira a água é continuamente alimentada a um reservatório. Deste reservatório a água é conduzida a um conjunto de tubos que são aquecidos em altas temperaturas e a energia oriunda da combustão é transferida para a água. Parte da energia é usada para aquecer a água (calor sensível), e outra parte é fornecida para mudança de estado (calor latente) (DUKELOW,1991).

Neste tipo de caldeira existem dois tubulões, um inferior onde é feita uma decantação e purga de sólidos em suspensão e um superior, onde é feita a separação da fase líquida com a gasosa, conforme esquema da figura 4.

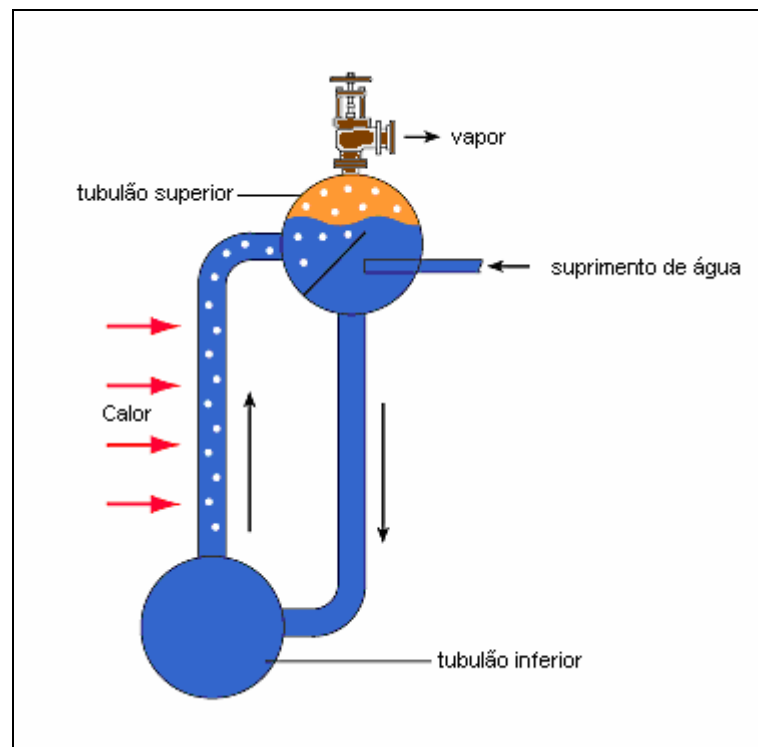


Figura 4: Esquema de uma caldeira aquatubular.  
Adaptado de [www.spiraxsarco.com](http://www.spiraxsarco.com)

### 2.1.3 COMPONENTES PRINCIPAIS DE CALDEIRAS

As caldeiras flamotubulares são de montagem compacta e portátil. Todos os elementos necessários para seu funcionamento são montados em uma mesma estrutura.

As caldeiras aquatubulares são mais complexas na sua constituição.

Os principais componentes de uma caldeira aquatubular são:

- Cinzeiro para depósito das cinzas, se o combustível for sólido.
- Fornalhas para queimar o combustível.
- Seção de irradiação e convecção, que transmitem a energia do combustível para a água.
- Superaquecedores, caso a caldeira seja de produção de vapor superaquecido.
- Economizador que é um trocador de calor que aproveita o calor dos gases de combustão para aquecer a água de alimentação.
- Exaustor – chaminé que é o conjunto responsável de expelir os gases de combustão.

#### **2.1.4 COMBUSTÍVEIS PARA CALDEIRAS**

Em todas as aplicações das caldeiras podem-se encontrar vários tipos de combustíveis. Existem combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. A depender da disponibilidade, podem-se usar os gases metano, etano, propano, ou misturas destes. (BABCOCK e WILCOX, 2007).

Entre os combustíveis líquidos, existem caldeiras que podem queimar etanol, gasolina, óleo diesel, óleos pesados e subprodutos líquidos de refinarias. (DUKELOW, 1991)

Entre os combustíveis sólidos, a madeira ainda encontra grande aplicação, mas o carvão de origem mineral é o combustível sólido com grande destaque (SANTOS, 2007). O bagaço de cana também é bastante usado como combustível para caldeiras (SOUZA, 2000), principalmente no Brasil.

Como regra prática, usa-se a relação entre os componentes primários, hidrogênio e carbono, para definir se um combustível é gasoso, líquido ou sólido. (BEGA, 2003)

$H/C > 0.3$  combustível gasoso,

$H/C > 0.1$  combustível líquido,

$H/C < 0.07$  combustível sólido.

A eficiência e qualidade da combustão estão diretamente associadas ao estado da combustível.

Os combustíveis gasosos podem ser usados diretamente nas câmaras de combustão. Neste caso, se faz necessário adequar a pressão dos gases aos limites mecânicos dos sistemas de combustão.

Os combustíveis líquidos devem ser atomizados para aumentar a eficiência de contato do calor da chama com o combustível fresco sendo injetado na fornalha.

A maneira mais comum de promover a atomização é através da mistura do combustível com vapor em uma pressão que pode ser entre 4-20kgf/cm<sup>2</sup>.

Os combustíveis sólidos podem ser queimados sobre um leito fixo, em suspensão ou em leito fluidizado. Na queima em leito fixo, o combustível requer pouca preparação e é alimentado diretamente sobre um grelha, por gravidade. No caso da suspensão, se faz necessário pulverizar o combustível. E no caso do leito fluidizado, o combustível entra em contato com ar atmosférico que fluidiza o material granulado, assumindo características de um fluido. (BEGA, 2003)

Nos Estados Unidos da América, os combustíveis líquidos mais comuns para uso em caldeiras são os óleos combustíveis número dois e o número seis<sup>1</sup>, (DUKELOW, 1991).

Algumas empresas usam subprodutos de suas linhas de produção para gerar energia. A indústria de papel é um desses exemplos, que queima o “licor negro” em suas caldeiras (SOSA, 2007). Outro exemplo é a indústria sucro alcooleira que além de gerar para consumo próprio, fornece energia elétrica para o sistema de distribuição nacional (ALVES, 2006).

Se a empresa não produz seu próprio combustível, ela precisa adquirir seus estoques via navio, trem, caminhão ou tubovia. Neste caso, o material é recebido e transferido para tanques e armazenado apropriadamente até o momento da sua utilização.

Em muitas instalações, o armazenamento é feito em tanques aquecidos por vapor para que baixas temperaturas não tornem o óleo muito viscoso e dificultem o seu manuseio.

No caso de uso imediato, os óleos são transferidos dos tanques de armazenamento para tanques menores, chamados de tanque de uso diário e destes tanques para aquecedores através de bombas. O objetivo destes aquecedores é o de elevar a temperatura do óleo até um nível onde a viscosidade diminua a um ponto ideal de

---

<sup>1</sup> Classificação dos óleos combustíveis por números (1 a 6) de acordo com norma ASTM D396-01 (ASTM-American Society for Testing and Materials)

operação. Este ponto ideal de operação é aquele onde os problemas causados pela viscosidade são extintos ou reduzidos a faixas aceitáveis.

## 2.2 VISCOSIDADE

A viscosidade de um óleo representa sua resistência ao escoamento. Substâncias mais viscosas escoam mais lentamente do que substâncias menos viscosas.

A viscosidade pode ser absoluta ou cinemática. A primeira não leva em consideração efeitos da gravidade e sua unidade de medida é o poise. A segunda, leva em consideração os efeitos da gravidade e sua unidade de medida é o stoke.

Para óleos combustíveis a viscosidade é uma propriedade muito importante, pois está associada ao escoamento e a combustão, uma vez que a atomização é influenciada pela viscosidade.

O principal problema da viscosidade alta é no sistema de injeção de combustível. Caso este sistema não opere adequadamente, podem ocorrer entupimentos, e a caldeira pode não acender.

Segundo Dukelow (1991), a maioria das caldeiras é projetada para operar na faixa de 135 a 150 Saybolts universal seconds (SSU). Convertendo para centstoke, os valores limites serão 28,7 a 32,1 cST.

O quadro 2 traz alguns exemplos de óleos combustíveis e a relação entre temperatura e viscosidade (classificação de acordo com a norma ASTM D396-01).

**Quadro 2: Viscosidade dinâmica de vários óleos minerais**

Óleo	Viscosidade (cST)			
	37,8 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Óleo numero dois	6,90	5,43	4,49	4,49
Óleo numero cinco	164,82	76,61	54,46	32,10
Óleo numero seis	2199,99	769,96	329,91	164,82

Fonte: Dukelow (1991)

Baseado em Dukelow (1991) na figura 5 está representado um esquema de manuseio de óleos pesados em instalações nos Estados Unidos.

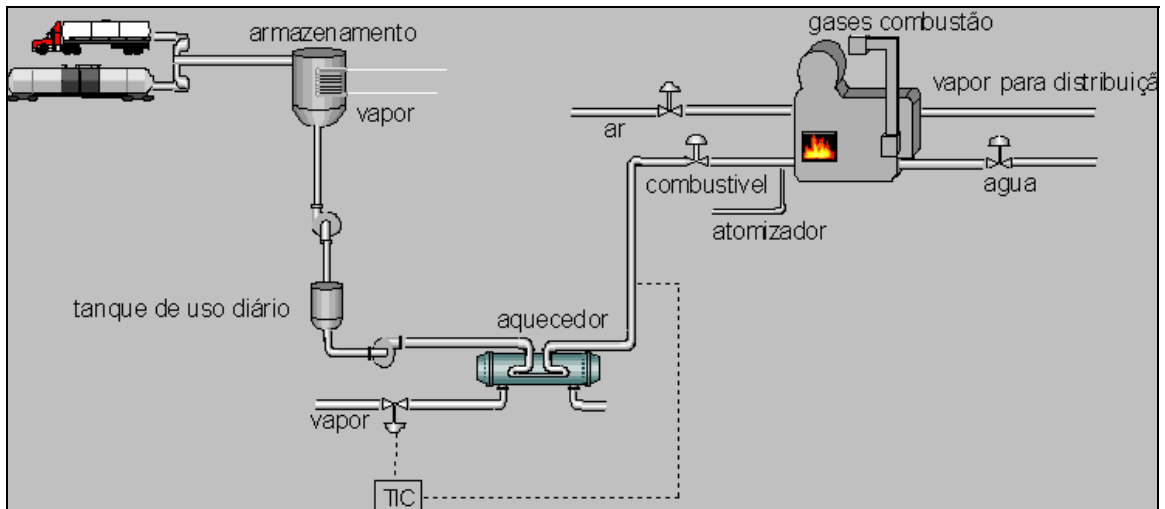


Figura 5: Sistema de manuseio de combustível líquido nos EUA.

O quadro 3 relaciona vários óleos de origem vegetais e suas respectivas viscosidades:

Quadro 3: Viscosidade dinâmica de vários óleos vegetais

Óleo	Viscosidade (cST)			
	37,8 °C	50 °C	60 °C	70 °C
DIESEL	1,6-6			
MACAUBA	50	30	20,2	14,7
PINHÃO MANSO	31,5	19,8	14	10,5
INDAIÁ RASTEIRO (POLPA)	45	17,8	19,2	14,3
INDAIÁ RASTEIRO (AMENDOA)	31	19,8	14	10,5
PIQUI (POLPA)	47	28,2	19,8	14,4
PIQUI (AMENDOA)	40	24,8	17,5	13
QUINGUI	41	25	17,5	12,8
BURITI	35	21,8	15,4	11,5
DENDE	43	27	18,5	13,5
MAMONA	285	140	82	52
BABAÇU	36,5	23	16,2	12
COTIEIRA	25,8	16,7	12	9,2

Fonte: Cetec

Na figura 6, estão representadas em termos gráficos, as várias viscosidades dos óleos, vegetais e minerais potencialmente utilizáveis em caldeiras e os limites operacionais citados anteriormente.

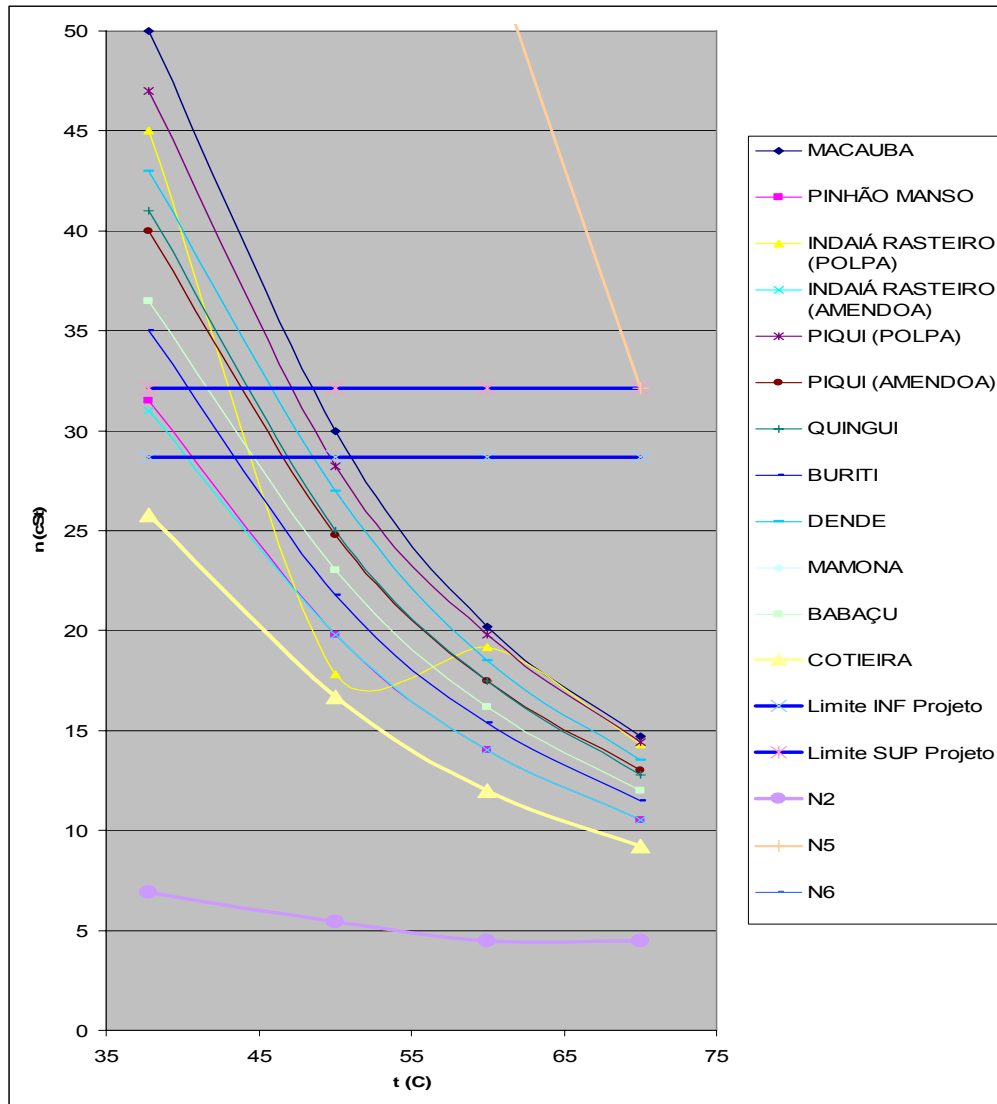


Figura 6: Gráfico de viscosidade de vários combustíveis X temperatura

De acordo com o gráfico da figura 6 após 50 °C, todos os óleos se enquadram nos limites operacionais de 28,7-32,1 cSt, exceto o óleo combustível numero 6 e a mamona, que mesmo após 70 °C continuam acima do limite superior de projeto. Este fato isolado não é suficiente para invalidar o uso do óleo, até por que, pode-se fornecer uma quantidade a mais de energia até que a viscosidade atinja valores possíveis de uso em caldeiras. Deve-se destacar que esta parcela a mais de energia aumentará o custo de uso dos combustíveis mais viscosos.

### 2.2.1 CONTROLE PARA MINIMIZAR EFEITO DA VISCOSIDADE NOS COMBUSTÍVEIS PARA CALDEIRAS

Conforme exposto na pesquisa bibliográfica, a viscosidade de projeto das caldeiras varia na faixa de 28-32 cST. Como pôde ser visto no quadro 3, a maioria dos óleos

vegetais quando atingem a temperatura de 50°C, se enquadram na faixa de viscosidade de projeto das caldeiras a óleo combustível. Exceto óleos derivados da mamona, que mesmo a 70° C, ainda estaria fora da referida faixa de especificação. Deve-se ressaltar que as viscosidades em questão se referem aos produtos refinados, esta extrapolação não se aplica para o caso dos óleos não refinados. Liptak (2006) faz uma proposta de controle para atomizadores que requeiram pré-aquecimento de óleo combustível, de acordo com esquema da figura 7.

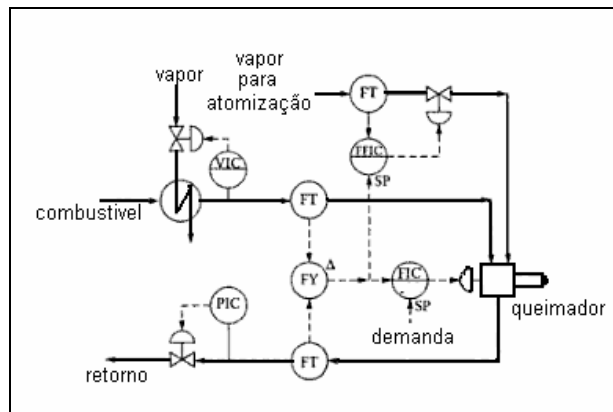


Figura 7: Arranjo de controle para sistemas com óleos viscosos

A vazão de alimentação para o queimador é indicada pela diferença entre os dois transmissores de vazão (linha de combustível e linha de recirculação). A pressão a jusante do queimador é controlada por uma válvula de controle na linha de recirculação e a vazão é ajustada pelo *setpoint* da demanda. O Vapor para atomização é controlado por uma malha de razão com a vazão de alimentação de combustível para o queimador. Um aquecedor a vapor é modulado para manter a viscosidade constante.

## 2.2.2 EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A VISCOSIDADE

O efeito da temperatura sobre a viscosidade de um fluido pode ser representado pela equação de Arrhenius:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T}}$$

Eq 1



É possível obter as energias de ativações para cada combustível líquido enumerado. O que se espera é uma energia de ativação maior para líquidos mais viscosos e uma energia de ativação menor para líquidos menos viscosos.

De posse destas energias de ativação, é possível prever o comportamento da viscosidade em função da temperatura.

Para encontrar a energia de ativação, basta realizar um experimento com duas medições de viscosidade e temperatura e linearizar a equação de Arrhenius aplicando logaritmo natural nos dois lados da equação.

## **2.3 BIODIESEL**

No desenvolvimento das caldeiras, várias melhorias e mudanças foram feitas e continuam sendo propostas. No contexto dos combustíveis, o crescimento da produção do biodiesel encontra terreno fértil para uso em caldeiras. Na literatura encontra-se várias referências ao uso do biodiesel como combustível alternativo aos óleos de origem fóssil.

Pelas suas características aproximadas do diesel de petróleo, o biodiesel tem sido amplamente testado e usado em países europeus e na América do Norte. Existem registros de usos do biodiesel como combustível desde o final do século XIX.

Como todo produto de uso generalizado, a aceitação do biodiesel requer elaboração de testes, bem como, adequação aos sistemas já existentes e melhorias contínuas. (BOZBAS, 2005).

De acordo com Bozbas (2005), o uso de biodiesel apresenta alguns inconvenientes para uso em motores a explosão. Estes inconvenientes estão associados às propriedades características dos diversos óleos vegetais utilizados.

No seu trabalho, Bozbas enumera situações como os problemas na partida de motores a frio, criação de gomas que provocam entupimentos de filtros e bicos injetores, surgimento de coque no cabeçote de motores e injetores de combustível.

Em outros trabalhos, aparecem citações a respeito do biodiesel agindo como solvente natural de borrachas existentes nos mecanismos de motores (STOMBAUGH, 2006).

Supõe-se que para a geração de vapor através de caldeiras, os problemas citados acima são menos significativos e mais fáceis de contornar uma vez que caldeiras não são motores de ciclos e operam de forma contínua (os sistemas acessórios

podem ser constituídos de borrachas e podem sofrer ação da corrosão do biodiesel). No entanto, medidas de melhorias podem ser propostas para permitir uso de vários de tipos de biodiesel para alimentação em caldeiras.

### **2.3.1 PROPRIEDADES DO BIODIESEL**

O biodiesel é um combustível que apresenta em sua composição óleos de origem vegetal. Varias espécies de plantas na natureza apresentam em sua composição óleos e gorduras que possuem propriedades características muito próximas do óleo diesel.

Existem vários estudos comparativos entre óleos de origem vegetal e o óleo diesel, de origem mineral.

O biodiesel pode ser oriundo de varias espécies, das quais pode-se citar, a mamona, a soja, a palma, o babaçu, o pinhão manso, entre muitas outras espécies vegetais. (PARENTE, 2005)

Na classificação feita por órgãos regulamentadores, o biodiesel pode variar do B1 ao B100. Onde B1, significa que o diesel de petróleo está misturado na proporção de 1% de óleo de origem vegetal e 99% de óleo de origem mineral.

De acordo com Parente (2005) um conjunto de propriedades características do biodiesel deve ser avaliado para uso como combustível: combustibilidade, impactos ambientais, compatibilidade de uso e compatibilidade de manuseio. No trabalho supracitado, outros pontos são destacados e merecem ser investigados, a saber:

- Água e Sedimentos
- Cinzas
- Glicerina Total
- Resíduo de Carbono
- Acidez
- Corrosividade

A seguir, o quadro 4 que traz algumas propriedades importantes do diesel e biodiesel.

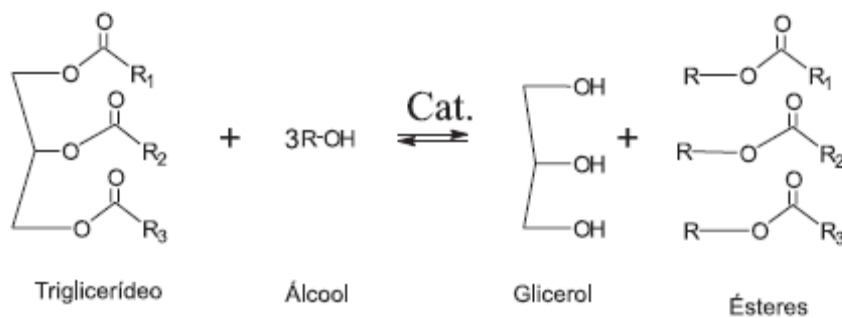
**Quadro 4: Propriedades de várias amostras de misturas de óleos vegetais com óleo diesel**

Propriedade/Combustível	DIESEL	B2	B5	B10	B15	B20	B100
Aspecto	Límpido	Límpido	Límpido	Límpido	Límpido	Límpido	Límpido
Cor ASTM	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	-
Massa Específica (a 20°C Kg/m <sup>3</sup> )	858,1	858,5	859,1	859,4	860,6	862,0	876,0
Teor de enxofre (%)	0,259	0,197	0,326	0,315	0,262	0,297	0,0152
Ponto de Fulgor (°C)	59,0	62,0	65,0	64,0	67,0	66,0	109,0
Viscosidade Cinem. a 40°C (cST)	4,433	4,393	4,358	4,334	4,285	4,172	3,725
Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C.	1	1	1	1	1	1	1
Poder Calorífico (kg/kcal)	10.688	10.761	10.704	10.615	10.185	10.435	9.15

Fonte: Adaptado de Cardoso et al 2006.

### 2.3.2 COMPOSIÇÃO DO BODIESEL

Lima et al (2007), apresenta um esquema da reação para produção de biodiesel etanólico:



De acordo com esquema anterior, o triglicerídeo pode apresentar diferentes radicais. Estes radicais resultarão em diferentes ésteres, que farão a composição do biodiesel variar a depender da matriz da matéria prima.

No trabalho de Lobo (2007) encontra-se a composição predominante do biodiesel de soja produzido pela rota etanólica:

12% de ester do ácido graxo palmítico - C<sub>15</sub>H<sub>31</sub>COOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>

4% de ester do ácido graxo esteárico - CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>

26% de ester do ácido graxo oléico - C<sub>17</sub>H<sub>33</sub>COOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>

53% de ester do ácido graxo linoléico -  $C_{17}H_{31}COOC_2H_5$

5,5% de ester do ácido graxo linolênico -  $C_{17}H_{29}COOC_2H_5$

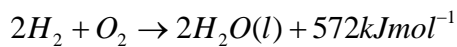
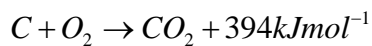
Esta é uma das composições possíveis do biodiesel. A depender da presença de diferentes ácidos graxos na matéria prima, pode-se obter óleos de origem vegetal com diferentes composições de ésteres.

## 2.4 COMBUSTÃO

De acordo com Mullinger e Jenkins (2008):

“Combustão é um grupo específico de reações químicas onde um combustível e um comburente queimam juntos a uma temperatura suficientemente alta para produzir calor e produtos de combustão”.

Para fins práticos, é possível simplificar as reações envolvidas na combustão em um grupo de quatro reações:



Além dos reagentes e produtos listados acima, outros componentes estáveis e instáveis estão presentes na reação de combustão.

Os estáveis são  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $H_2$

Os instáveis são:  $H$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $C$ ,  $C_2$ ,  $CH$ ,  $HCO$ ,  $HCOH$ ,  $CH_3$ .

Isto sem considerar a presença de enxofre e outros elementos.

Todo e qualquer processo de combustão acontece segundo o esquema abaixo:

Mistura → ignição → reação química → dispersão de produtos

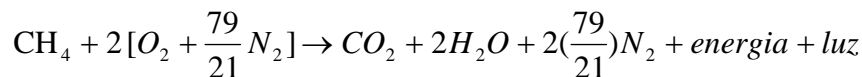
A taxa de reação depende da velocidade da etapa mais lenta. Na maioria dos processos industriais, a mistura é a etapa mais lenta. (MULLINGER e JENKINS, 2008)

### **2.4.1 ESTEQUIOMETRIA DA COMBUSTÃO**

Uma combustão estequiométrica ou teórica é aquela onde os reagentes estão presentes nas quantidades exatas necessárias para oxidação completa dos combustíveis.

Uma combustão completa é aquela onde todo carbono do combustível é transformado em CO<sub>2</sub> e todo hidrogênio é transformado em água.

Adiante está um esquema de uma reação de combustão para o caso do metano, considerando a relação molar de 79/21 entre nitrogênio e oxigênio presentes no ar:



Deve-se levar em consideração que certa parcela do oxigênio reage com nitrogênio para formar óxidos de nitrogênio. Embora importante em outro contexto, aqui deve ser considerado pouco significativo (BAUKAL, 2001).

Perry (1997) propõe modelo prático para obtenção do oxigênio teórico requerido para combustão de qualquer combustível que tenha na sua composição predominantemente, carbono, oxigênio, hidrogênio e enxofre (para 1 atm e 298K):

$$\text{O}_2 = 24,45 \left( \frac{\text{C}}{12} + \frac{\text{H}}{4} - \frac{\text{O}}{32} + \frac{\text{S}}{32} \right) = m^3 \text{O}_2 / \text{kg Combustível} \quad \text{Eq 2}$$

Onde C, H, O e S são os pesos decimais dos elementos em 1 kg de combustível.

### **2.4.2 EXCESSO DE AR**

As quantidades de reagentes necessárias para a combustão completa são determinadas pela estequiometria da reação de combustão. No entanto, o que se observa é que para se obter a melhor eficiência de uma caldeira é necessário o fornecimento de uma quantidade a mais de ar para combustão. É o excesso de ar

(BAUKAL, 2001). Este valor varia de combustível para combustível e deve ser obtido através de experimento ou seguir a recomendação do fabricante da caldeira. (DUKELOW, 1991)

Dukelow (1991), Bega (2003) e Gilman (2005) expõem valores de referência para excesso de ar na combustão de caldeiras para diferentes combustíveis:

Gás natural: 7-15%

Óleo combustível: 3-15%

Carvão: 25-40%.

Os autores supracitados apresentam equações empíricas para o cálculo de excesso de ar, baseado na análise do oxigênio presente nos gases de combustão:

$$\text{Excesso\_de\_ar} = k \left( \frac{21}{21 - \% \text{oxigenio}} - 1 \right) \times 100 \quad \text{Eq 3}$$

onde  $k=0,9$  para gás natural,  $0,94$  para óleo número 6 e  $0,97$  para carvão.

A figura 8 demonstra as relações entre eficiência e disponibilidade de ar para a combustão.

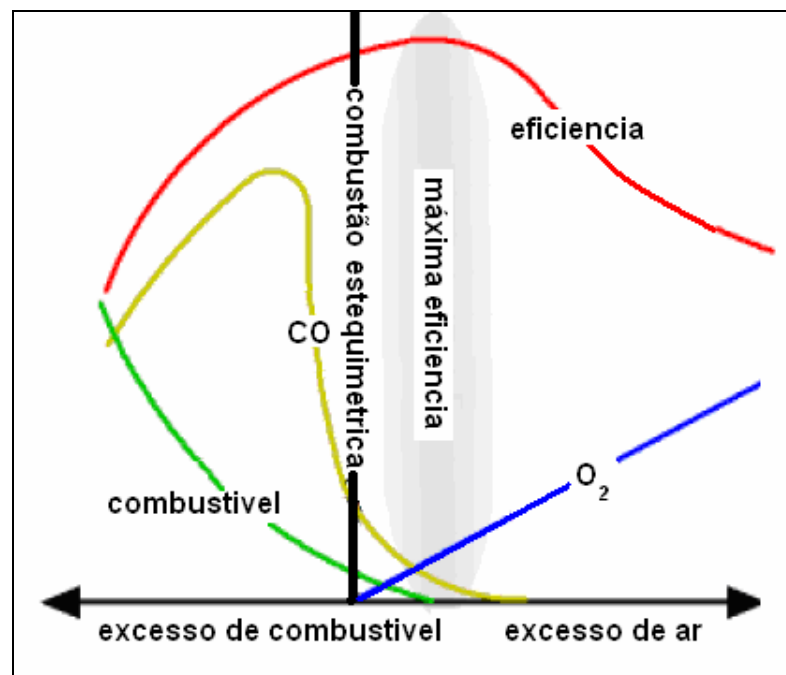
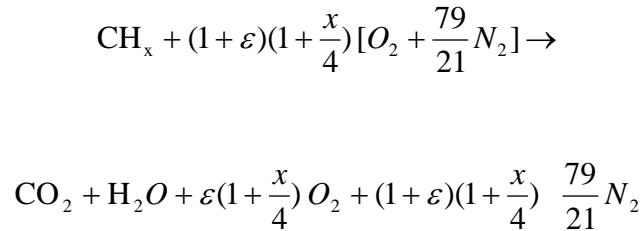


Figura 8: Excesso ar X combustível.  
Adaptado de [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)

Em Baukal (2009) encontra-se referência a um termo de fração de excesso de ar  $\varepsilon$ , para um hidrocarboneto genérico:



Outra versão do excesso de ar aparece em Pinheiro (1995) que introduz o termo  $\alpha$ , como sendo a relação entre o volume de ar realmente consumido pela reação e o volume de ar estequiométrico.

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^0} \quad \text{Eq 4}$$

No trabalho supracitado Pinheiro, propõe uma maneira mais conveniente para cálculo do excesso de ar:

$$\alpha = \frac{20,9}{\left[20,9 - \left(\% \text{O}_2 - \frac{\% \text{CO}}{2}\right)\right]} \quad \text{Eq 5}$$

A equação anterior permite saber o excesso de ar, sem necessariamente saber a natureza do combustível.

É ponto comum entre os autores citados, que o excesso de ar é benéfico em um sentido e prejudicial em outro sentido, a saber:

Um valor elevado de excesso de ar pode diminuir a temperatura da chama, reduz a eficiência térmica e compromete o comprimento da chama. Do outro lado, um valor reduzido de excesso de ar, resultará em uma combustão incompleta, formação de CO, fumaça e fuligem, podendo inclusive favorecer a concentração de combustível na câmara de combustão.

### **2.4.3 EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO**

De acordo com o POWER TEST CODE PTC 4.1<sup>2</sup>, da American Society of Mechanical Engineers (ASME), existem dois métodos para medir a eficiência de uma caldeira. O primeiro é o método da entrada-saída, que calcula a eficiência dividindo a energia que sai da caldeira, na forma de vapor, pela energia cedida para a caldeira, através da queima do combustível.

O segundo método é o das perdas de calor pela chaminé e perdas através da convecção e radiação.

Quanto maior a temperatura na chaminé, menor será a eficiência de combustão. Quanto maior a perda por convecção e radiação menor será a eficiência.

## **2.5 MODELAGEM DE PROCESSOS**

A modelagem de processos consiste no desenvolvimento de equações que relacionam as diferentes variáveis de processo. Estas variáveis podem ser de entrada ou saída e geralmente estão associadas a parâmetros.

De acordo com Bequete (1998):

“Um modelo de processo é um conjunto de equações (incluindo as variáveis de entrada para resolver as equações) que nos permitem prever o comportamento de um sistema de processo químico”

Com a finalidade de obter as equações de modelagem, são usadas as equações de balanço de massa, momento e energia. Esta modelagem é conhecida como modelagem baseada em princípios de conservação ou fenomenológica.

Um modelo também pode ser obtido através de equações empíricas que são ajustadas a partir de experimentos. Este método de modelagem é conhecido como identificação de processos.

---

<sup>2</sup> O Power Test Code 4.1-1964 foi substituído pelo PTC 4 em 1998 de acordo com a própria ASME.



Em qualquer um dos casos, após obtenção do modelo, pode-se prever o comportamento das variáveis de saída em função das variáveis de entrada. Esta etapa é a simulação de processos. (JANA, 2008).

As seguir algumas classificações dos modelos:

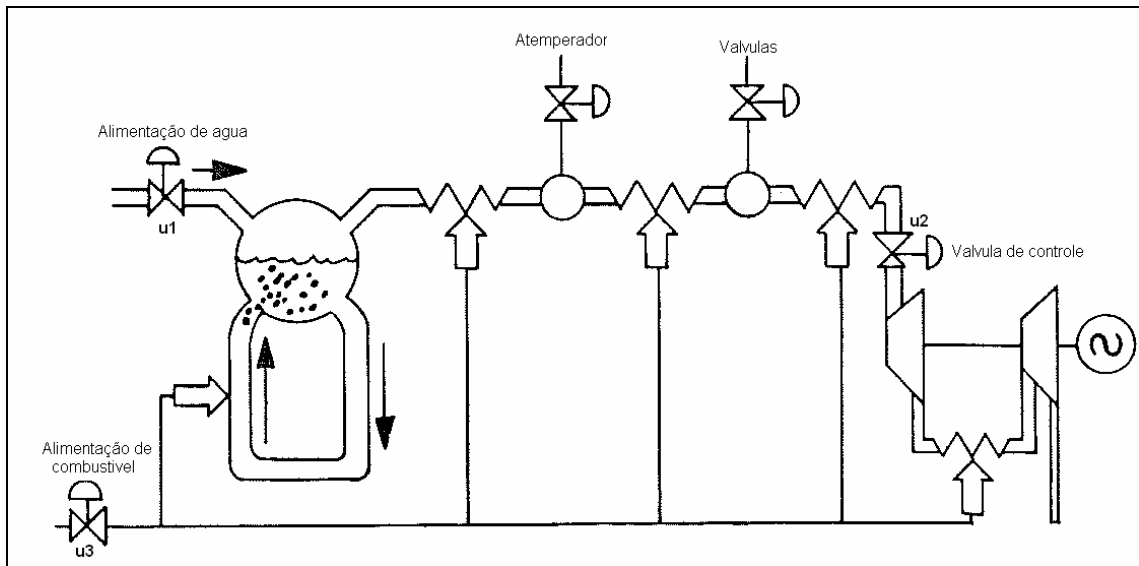
- Modelo estacionário - é dito estacionário, o modelo que independe da variável tempo.
- Modelo dinâmico - este é o modelo onde uma ou mais variáveis variam com o tempo.
- Modelos de parâmetros concentrados - onde os parâmetros e variáveis são homogêneos ao longo de todo o sistema estudado. Suas representações matemáticas resultam em equações diferenciais ordinárias.
- Modelos de parâmetros distribuídos - os parâmetros e variáveis variam com a localização espacial no sistema em estudo. As equações matemáticas que representam o modelo podem ser equações diferenciais parciais.

### **2.5.1 MODELAGEM EM CALDEIRAS**

Um dos primeiros modelos de caldeiras foi proposto por Åström (1972), conforme esquema da figura 9.

$$\frac{dp}{dt} = -\alpha_1(u_2 p^{5/8} - \alpha_5) + \alpha_2 u_1 - \alpha_3 u_3 \quad \text{Eq 6}$$

$$P = \alpha_4(u_2 p^{5/8} - \alpha_5) \quad \text{Eq 7}$$



**Figura 9: Esquema de uma usina geradora de energia-  
Adaptado de Astrom (1972)**

No modelo anterior a variável de estado  $p$  é igual à pressão no tubulão da caldeira. As variáveis de controle são as vazões de combustível, vazão de água de alimentação e abertura da válvula de controle. O modelo é parametrizado com cinco constantes -  $\alpha_1 - \alpha_5$ .

Elmegaard (1999) faz uma apresentação de modelagem e simulação dinâmica de caldeira usando ferramentas computacionais. Xu *et al* (2004) propõe um controle de nível de uma caldeira baseado em controle preditivo generalizado (GPC) com aplicação em tempo real. Tan *et al* (2005) apresenta no seu trabalho, uma análise e proposta de controle de uma unidade geradora de vapor para movimentar uma turbina.

Em um trabalho com rigor matemático e bastante aplicável à realidade das indústrias, Åström e Bell (2000) publicaram o desenvolvimento de um modelo de caldeira baseado em balanços de massa e energia.

Neste trabalho, é possível visualizar e simular relações entre pressão, volume, combustível e material de fabricação das caldeiras, usando relações termodinâmicas relativamente simples.

A seguir o modelo de Åström e Bell:

$$e_1 \frac{dp}{dt} = Q - q_f(h_w - h_f) - q_s h_c$$

Eq 8

Onde:

$$h_c = (h_s - h_w) \quad \text{Eq 9}$$

$$e_1 = h_c V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s V_{st} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w V_{wr} \frac{\partial h_w}{\partial p} + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} - V_t \quad \text{Eq 10}$$

## 2.5.2 MODELAGEM COM FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Uma função de transferência de um sistema de controle é a razão entre a transformada de Laplace do desvio da variável de saída pela transformada de Laplace do desvio da variável de entrada. A figura 10 é uma representação das variáveis de processo em transformada de Laplace.

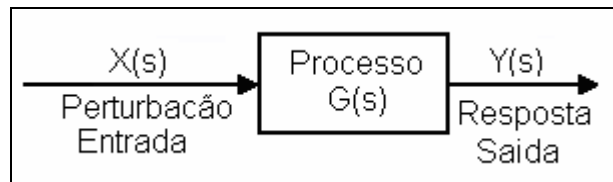


Figura 10: Representação de um processo por função de transferência

Valdman *et al* (2008) representa as funções de transferências de acordo com equação a seguir e as divide em duas partes:

$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = K \cdot g(s) \quad \text{Eq 11}$$

1ª parte:

K-ganho estático que é quociente do desvio final alcançado por Y após uma variação em X. Sua unidade é obtida da relação entre as unidades de Y e X.

2ª parte:

g(s)- fator de ganho dinâmico. É a representação da variação com o tempo. Não possui unidade.

Ainda em Valdman *et al* (2008) encontra-se um resumo das principais funções de transferências:

## 1. Capacitância pura ou processo Integrador

$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = \frac{K}{s} \quad \text{Eq 12}$$

## 2. Processos de primeira ordem

$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = \frac{K}{as + 1} \quad \text{Eq 13}$$

## 3. Processos de segunda ordem

$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = \frac{K}{(as + 1)(bs + 1)} \quad \text{ou}$$

$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = \frac{K}{(as^2 + bs + 1)} \quad \text{Eq 14}$$

## 4. Processos com tempo morto

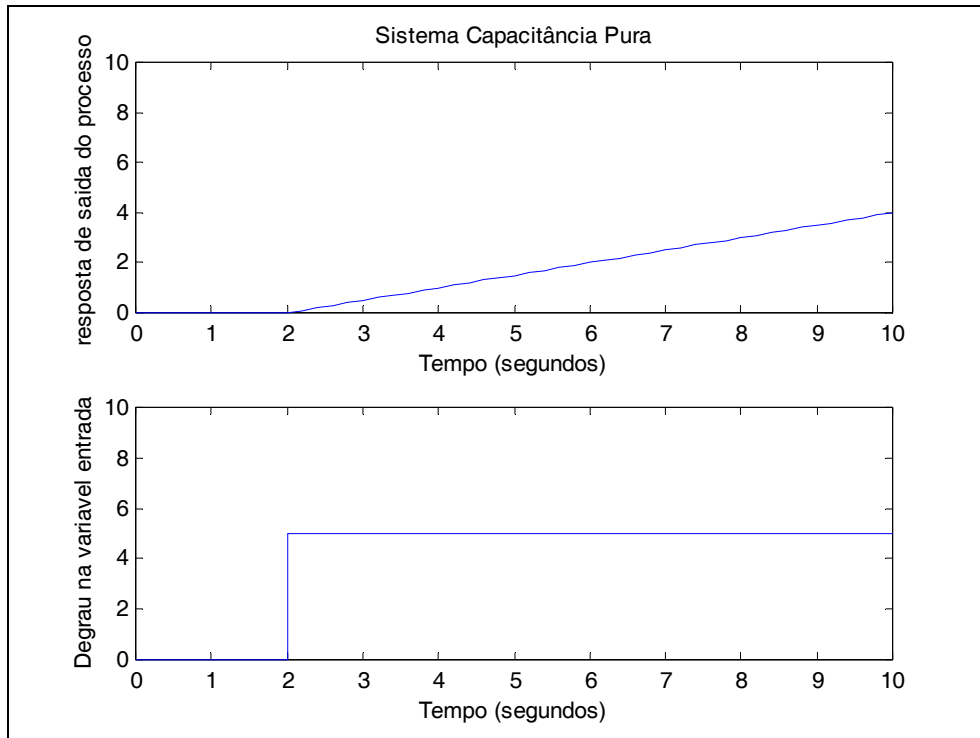
$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = e^{-as} \quad \text{Eq 15}$$

## 5. Processos combinando condições anteriores

$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = \frac{Ke^{-as}}{as + 1} \quad \text{ou}$$

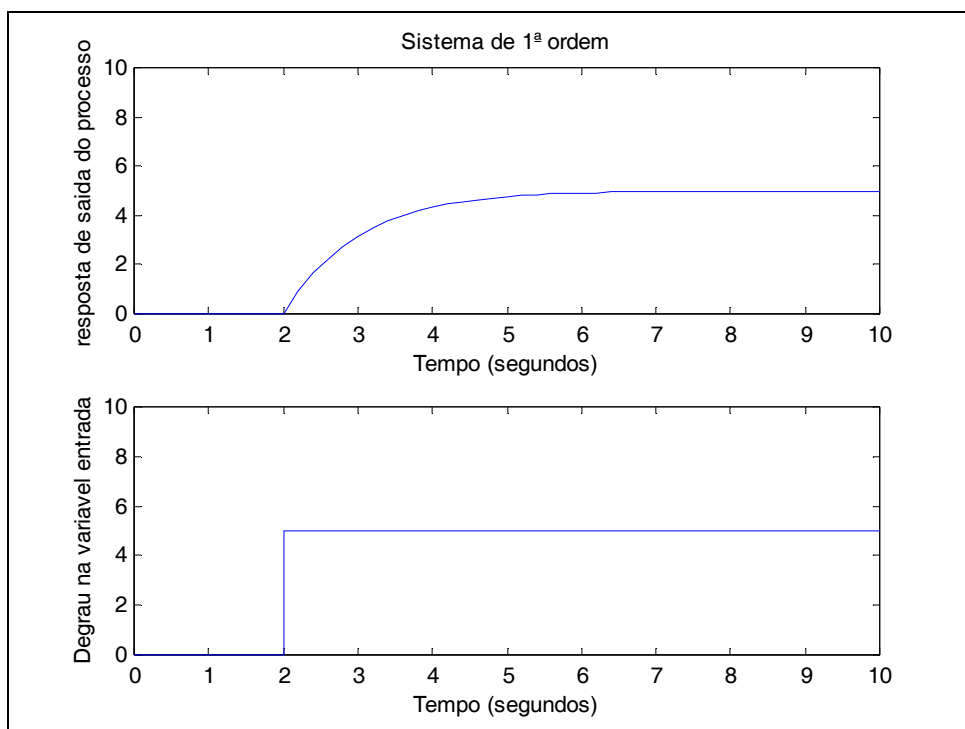
$$G(s) = \frac{\hat{Y}(s)}{\hat{X}(s)} = \frac{Ke^{-as}}{(as^2 + bs + 1)} \quad \text{Eq 16}$$

A Figura 11 é uma representação gráfica de uma perturbação degrau na variável de entrada em um processo de capacitância pura ou integrador:



**Figura 11: Resposta ao degrau de um processo integrador**

Para fins de comparação gráfica, a figura 12 é uma representação da perturbação em degrau permanente da variável de entrada de um sistema de primeira ordem:



**Figura 12: Perturbação degrau para um sistema de primeira ordem**

## 2.6 CONTROLE DE PROCESSOS

Os processos industriais consistem em operações e transformações com fins a produzir, a partir de matérias-primas apropriadas, produtos intermediários ou finais para aplicações em diversas finalidades. O controle de processo é uma atividade associada aos processos produtivos e pode-se afirmar que os principais objetivos do controle de processo são os seguintes:

- Aumento de produtividade;
- Garantia e melhoria da qualidade dos produtos;
- Redução de consumo de energia;
- Redução de emissão de poluentes;
- Garantia e melhoria na segurança de processo;
- Aumento de vida útil dos equipamentos;
- Garantia e melhoria na operabilidade;
- Redução de custos e perdas operacionais;

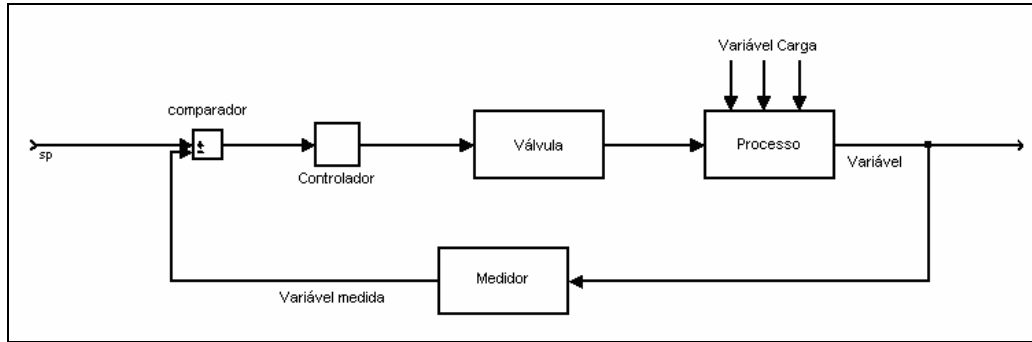
Naturalmente, existem outros objetivos não citados acima, muitos deles subjetivos, mas de relevância significativa.

Conceitualmente o controle de processo consiste em um conjunto de elementos com funções distintas objetivando manter uma ou mais variáveis dentro de valores desejados.

Entre os vários arranjos possíveis, um dos mais aplicados na indústria é o conjunto medição-algoritmo de controle-saída para um elemento final de controle.

Este conjunto pode estar em malha aberta ou malha fechada.

Valdman *et al* (2008), traz um exemplo de representação de processo em diagrama de blocos, com todos os elementos integrantes de um sistema de controle por retroalimentação, conforme figura 13.



**Figura 13: Diagrama para o controlador genérico e seus elementos**

Bolton (1993) e Valdman *et al* (2008), relacionam cada um dos elementos citados com sua função:

**Medidor:** gera um sinal associado à condição do processo e fornece o sinal para o elemento de comparação.

**Comparador:** compara um valor desejado da variável controlada com o valor medido e se estes forem diferentes será gerado um erro. Este erro é uma representação de quão afastado o processo está da condição desejada.

**Controlador:** decide o que fazer quando recebe um sinal de erro. Internamente possui um algoritmo que gerará um sinal de saída de acordo com o valor do erro.

**Elemento final de controle:** Também pode ser chamado de atuador ou válvula. Provoca mudanças na planta de acordo com valor fornecido pelo controlador.

### **2.6.1 CONTROLES TÍPICOS DE CALDEIRAS**

Os controles mais importantes encontrados nas caldeiras são os enumerados abaixo:

- Controle de nível do tubulão
- Controle de vazão de água para a caldeira
- Controle de vazão de vapor saindo da caldeira
- Controle de pressão do vapor produzido
- Controle de vazão de ar
- Controle de vazão de combustível
- Controle de excesso de ar.

A figura 14 apresenta um esquema dos controles de uma caldeira, reproduzido de Dorf & Bishop (2007). No esquema aparecem os principais controles de uma

caldeira e o sistema de controle distribuído (SDCD) de uma usina geradora de energia.

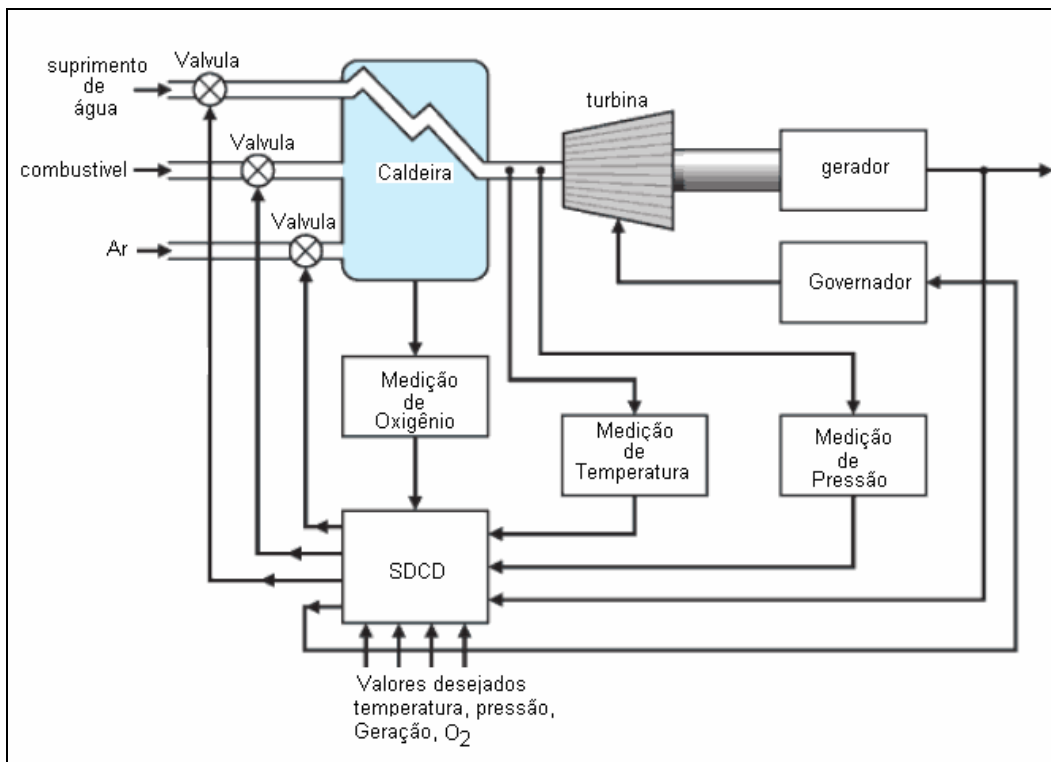
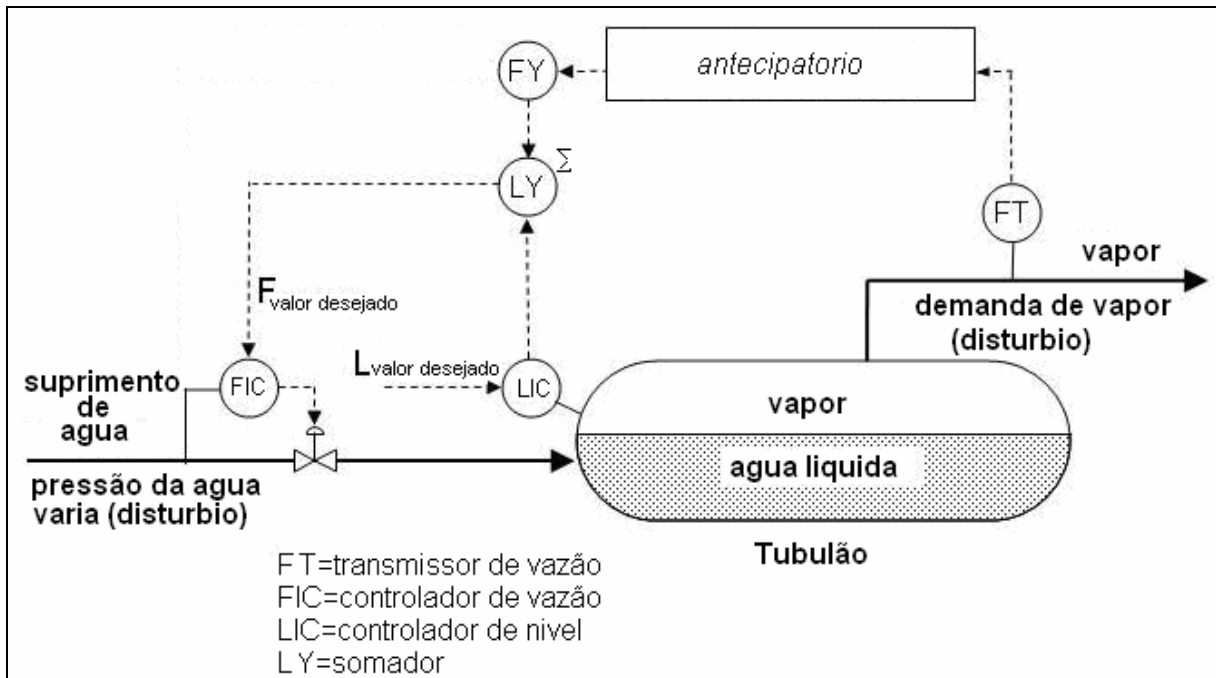


Figura 14: Representação dos principais controles de uma caldeira

### 2.6.2 CONTROLE DE NÍVEL DE TUBULÃO

O controle de nível do tubulão tem como objetivo manter o nível da água da caldeira dentro dos limites operacionais desejados. Este controle é feito variando a vazão de água de alimentação do tubulão (HOUTZ, 2006), de acordo com figura 15.





**Figura 15: Controle de Nível a três elementos.**  
 Adaptado de [www.controlguru.com](http://www.controlguru.com)

Os principais problemas relacionados ao controle de nível são os fenômenos de expansão e contração e as variações na pressão da água de alimentação.

A expansão corresponde a um aumento de volume no tubo causado pelo aumento de carga da caldeira. O aumento de carga está associado ao aumento de bolhas abaixo da linha d'água. Isto faz com que a densidade do meio diminua, provocando assim um aumento de volume.

No sentido oposto, isto é, quando a carga é diminuída, a concentração de bolhas tende a reduzir, neste ponto haverá um aumento da densidade do meio e conseqüentemente, redução de volume. Este é o fenômeno de contração.

Nas caldeiras de pequeno porte, o controle de nível, geralmente é auto-operado (a energia para movimentar válvula é proveniente do sistema controlado).

Nas caldeiras de grande porte, isto é, com produção de vapor acima de 7 toneladas por hora, o controle de nível pode ser feito a um, dois ou três elementos, onde elemento se refere à variável de processo (BEGA, 2003) e conforme representado na figura 15.

### 2.6.3 CONTROLE DE NÍVEL DE CALDEIRAS A UM ELEMENTO

Este controle leva em consideração a medição de uma única variável de processo, o transmissor de nível, que alimenta um controlador e este controla uma válvula de alimentação, conforme apresentado no esquema da figura 16.

Tem como única vantagem a simplicidade de montagem e custo de instalação baixo. Como ponto negativo pode-se dizer que esta malha sofrerá grande influência dos fenômenos de contração e expansão do volume de água no tubulão provocando um controle oscilatório entre os limites operacionais.

O esquema a seguir é uma representação do controle de nível a um elemento, baseado nos critérios de simbologia da ISA-*International Society of Automation*<sup>3</sup> (Vide Anexo A). (HESELTON, 2004).

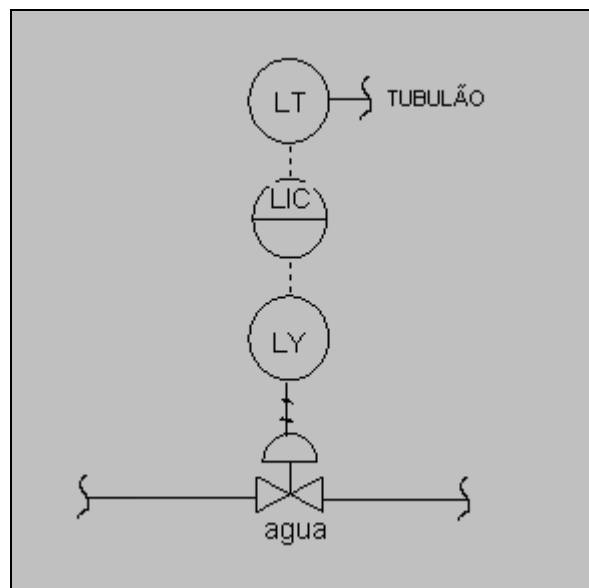


Figura 16: Controle de nível a um elemento

### 2.6.4 CONTROLE DE NÍVEL DE CALDEIRAS A DOIS ELEMENTOS

Neste controle, conforme figura 17, além de levar em consideração o nível do tubulão, considera-se a vazão de vapor para consumidores. O sinal do controlador de nível deve ser adicionado ao sinal de vazão de vapor. Um somador deverá enviar este sinal à válvula. Desta maneira, tem-se um controle antecipatório de demanda de vapor no controle de nível.

<sup>3</sup> Em outubro de 2008 a ISA mudou seu nome de The Instrumentation, Systems, and Automation Society para International Society of Automation de acordo com o site da organização.

A principal vantagem deste arranjo é o de diminuir a influência dos fenômenos de expansão e contração por ação antecipatória do efeito da variação de demanda de vapor.

Como desvantagem, cita-se o fato do sistema ser vulnerável a variações na pressão de alimentação do sistema de água forçando o controle a fazer constantes correções. (HESELTON, 2004).

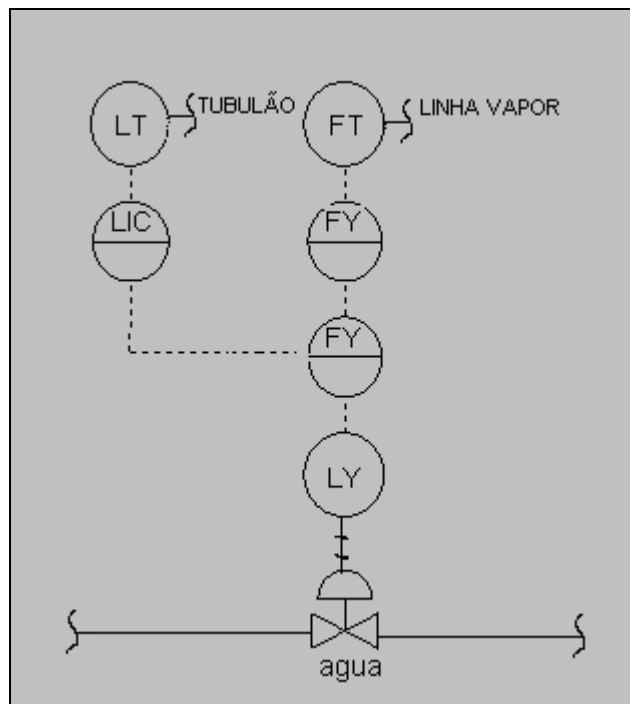


Figura 17: Controle de nível a dois elementos.

### 2.6.5 CONTROLE DE NÍVEL DE CALDEIRAS A TRES ELEMENTOS

O termo “a três elementos” está relacionado com as variáveis de processo que podem provocar variações no nível. As três variáveis são:

- Nível do líquido no tubo.
- Vazão de água de alimentação para a caldeira.
- Vazão de vapor que sai da caldeira.

O principal objetivo deste arranjo é o de manter o nível controlado dentro de uma faixa desejada eliminando os distúrbios causados por variações na vazão de água de alimentação ou por distúrbios causados por variação no consumo de vapor da instalação.

A figura 18 é uma representação simplificada de uma caldeira a três elementos:

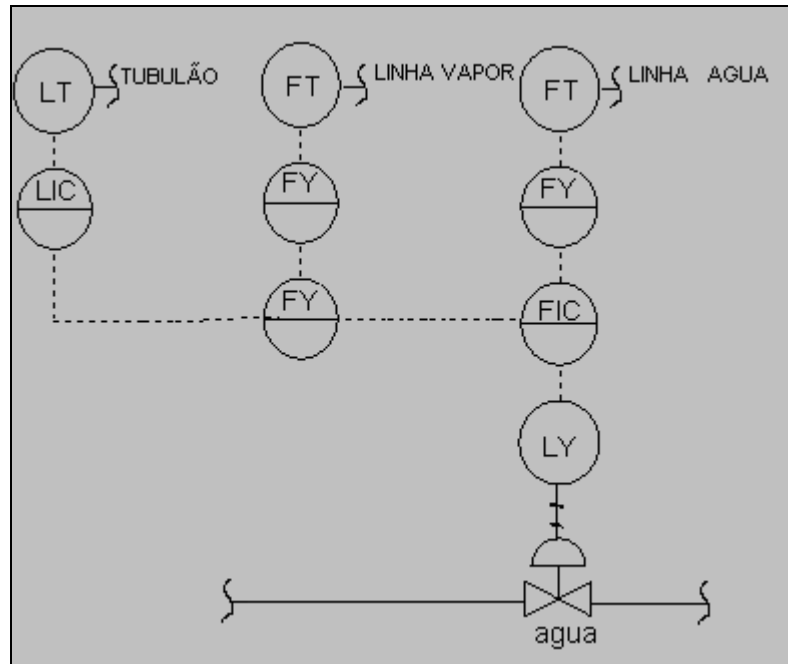


Figura 18: Controle de nível a três elementos.

Face às estratégias apresentadas anteriormente, esta estratégia é a mais eficiente, pois consegue manter o nível dentro da faixa de controle, anulando efeito de perturbação na carga e na pressão de água de alimentação. (HESELTON, 2004).

### 2.6.6 CONTROLE DE COMBUSTÃO DE CALDEIRAS

“Geração de vapor é o processo de converter água em vapor”. (MALEK, 2004).

O controle de combustão de uma caldeira está associado à produção de vapor (vazão de vapor) e à pressão do vapor produzido.

É intuitiva a afirmação de que quanto maior a quantidade de vapor requerido pelas instalações, maior será a demanda de combustível para combustão.

No caso da pressão, o que se observa é que numa situação de aumento de consumo de vapor, mantidas as vazões de água, de combustível e ar, a pressão tende a cair. Havendo uma diminuição no consumo de vapor, a pressão tende a aumentar.

Conforme exposto no item 2.4.2, na operação de caldeiras, existe uma região onde a combustão é mais eficiente e segura. Para trabalhar nesta região ótima implementa-se um controle de excesso de ar associado a uma curva de combustão.

### 2.6.7 CONTROLE DE COMBUSTÃO - COMBUSTÍVEL SEGUINDO AR

Conforme a figura 19, neste arranjo com três medições, a saída do controlador de pressão envia um *setpoint* remoto para o controlador de vazão de ar. O sinal de vazão de ar é linearizado por um extrator de raiz quadrada e depois dividido por um fator de razão (HIC). A diferença entre o sinal do *setpoint* remoto e o valor final da vazão será o erro da malha que deverá responder de acordo com os parâmetros de sintonia pré-definidos.

O ponto de ajuste (*setpoint* remoto) do controlador de vazão de combustível é enviado pelo sinal de vazão de ar. Assim sendo, a malha de combustível *seguirá* a malha de ar.

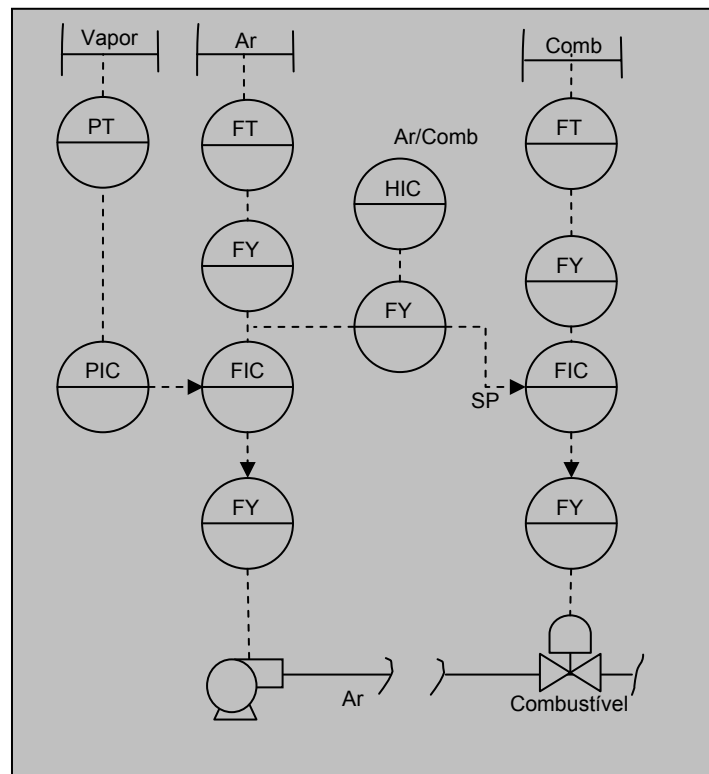


Figura 19: Controle de combustão - Combustível seguindo o ar.

Este arranjo pode levar a planta a uma condição insegura, pois se a carga diminuir o ar será diminuído antes do combustível. Outra desvantagem é a resposta lenta a distúrbios na demanda de vapor. Isto se dá por que o ponto de ajuste é feito pelo ar, que é uma malha mais lento que a malha de combustível (BEGA, 2003; GILMAN, 2005).

### 2.6.8 CONTROLE DE COMBUSTÃO - AR SEGUINDO COMBUSTÍVEL

Conforme representado na figura 20, o ponto de ajuste (*setpoint* remoto) do controle de vazão de combustível é fornecido pelo controlador de pressão e a vazão de combustível é enviada como controle de vazão do ar de combustão. A medição vazão de ar é linearizada e dividida por um fator de razão. Como o setpoint para o controlador de vazão de ar é proveniente da vazão de combustível, diz-se que o controlador de vazão de ar está *seguindo* o controlador de vazão de combustível.

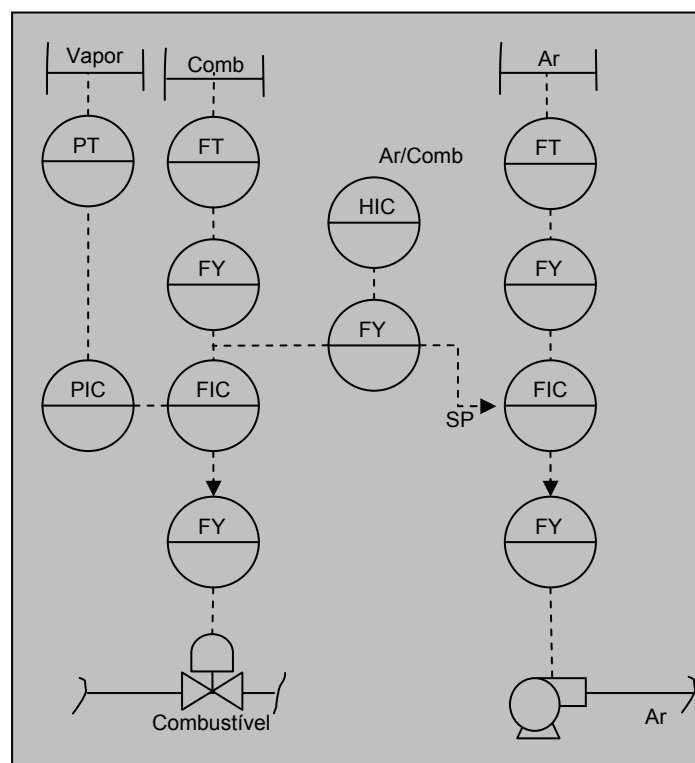


Figura 20: Controle de combustão - Ar seguindo o combustível

A desvantagem desta malha é que pode levar a planta para condição insegura, pois havendo um aumento na demanda de vapor, a vazão de combustível aumenta antes da vazão de ar de combustão.

Apresenta como vantagem o fato de ser mais rápida, uma vez que o ponto operacional é dado pela malha de combustível (BEGA, 2003; GILMAN, 2005).

### **2.6.9 CONTROLE DE COMBUSTÃO - CONTROLE POR LIMITE CRUZADO**

Existe um arranjo no qual os inconvenientes das malhas anteriores podem ser bastante minimizados. Este arranjo é o controle de combustão por limite cruzado.

A figura 21 é uma representação do controle por limite cruzado. Uma chave seletora permite a escolha entre controle de pressão e de vazão, a depender do controle desejado. Para os casos onde se tem mais de uma caldeira, o controle de pressão da rede de fornecimento de vapor é feito por uma única caldeira e as outras operam fornecendo vapor em uma vazão controlada (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006).

O referido controle utiliza dois seletores para priorizar sempre um excesso de ar em caso de aumento ou diminuição de demanda de vapor.

Sendo a pressão a variável controlada, esta deve ser mantida em um ponto operacional desejado. O sinal de saída do controlador de pressão é enviado a um seletor de maior e a um seletor de menor. Nos dois casos o sinal de saída da pressão é comparado ao sinal de vazão de combustível e ao sinal de vazão de ar.

O sinal de saída do controlador de pressão controla as malhas de vazões no estado estacionário. Nos transientes, a malha de pressão comanda uma das malhas, enquanto esta malha controlada pela pressão, comanda a outra malha de vazão. Este arranjo aumenta significativamente a segurança operacional das caldeiras. (BRANAN, 2007).

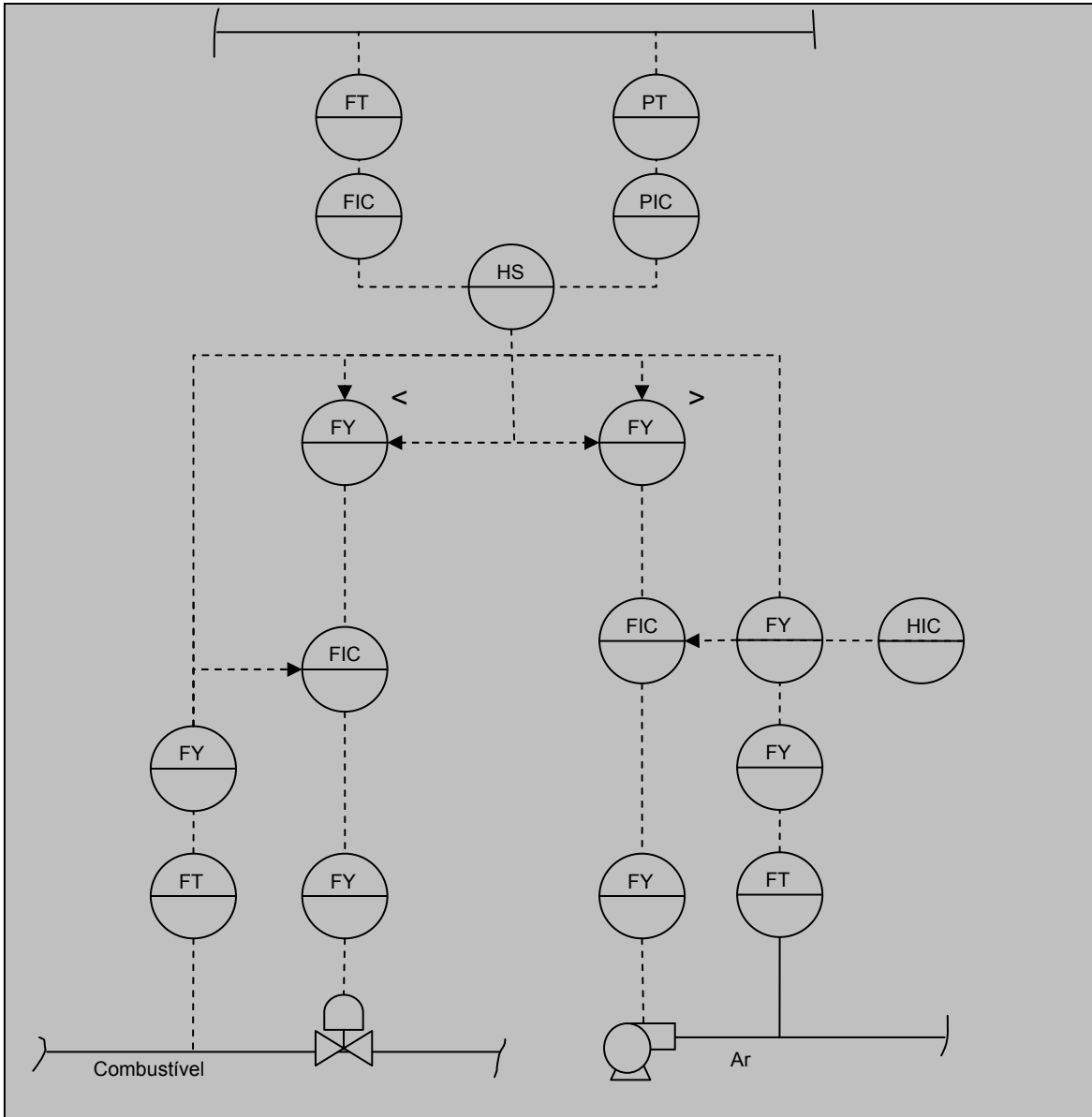


Figura 21: Controle por limite cruzado

### 2.6.10 CONTROLE DE EXCESSO DE AR EM CALDEIRAS

O controle de combustão determina a quantidade de ar necessário para a queima total de combustível. Em complemento ao controle de combustão, deve ser assegurado o fornecimento de ar em quantidade suficiente para garantir o excesso de ar ótimo.

Nas caldeiras oferecidas pelo mercado, encontram-se vários tipos de controles de excesso de ar.

O mais simples é controle com malha aberta, isto é, regula-se um *dumper* em uma abertura fixa que proporcionará uma razão fixa e excessiva de ar-combustível. Vê-se



de imediato que este controle é insatisfatório, uma vez que mudança na carga do processo pode provocar combustão incompleta. Para evitar este problema, regula-se o excesso de ar em 20-30%, o que compromete a eficiência da combustão. (BEGA, 2003).

Para obter o controle ótimo, é mais usual fechar uma malha com a análise dos gases de combustão  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}$ .

O controle pela análise do  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$  apresenta a desvantagem que o *setpoint* depende do tipo de combustível.

No controle pela análise do  $\text{CO}$  o *setpoint* independe do tipo de combustível.

A presença de  $\text{CO}$  é um forte indicativo de combustão incompleta. Se a combustão for completa ou próxima da completa o valor de  $\text{CO}$  tende a zero. Como a mistura perfeita de ar combustível não é possível, os níveis práticos de  $\text{CO}$  para qualquer combustível ou combinação é de 120 a 250 ppm (PINHEIRO, 1995) conforme gráfico da figura 22.

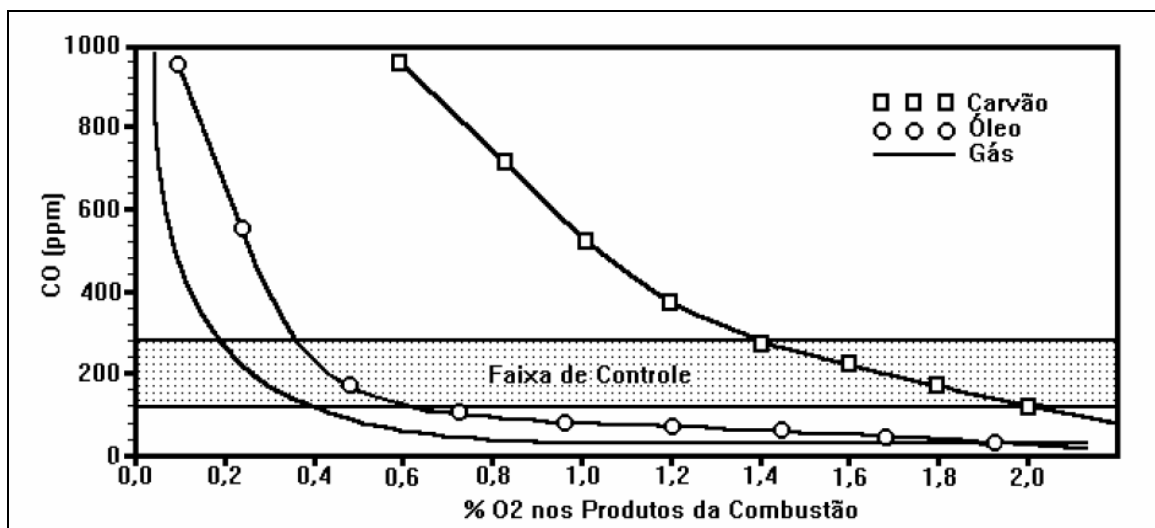


Figura 22: Faixa de controle do CO  
Adaptado de Pinheiro (1995)

## CAPÍTULO 3

### MODELAGEM

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Ao começar um trabalho de modelagem deve-se ter em vista o objetivo final ao qual o modelo deve servir (GAMBETTA, 2001). No presente trabalho, o propósito de usar um modelo matemático é de entendimento e domínio das relações entre as variáveis de processo para proposta de estratégia de controle de processo confiável e robusta.

Åström & Bell (2000) propuseram um modelo baseado em balanço de massa e energia. Marques (2005) e Palma (2006) utilizam o modelo anterior para simular comportamento de caldeiras industriais.

No desenvolvimento a seguir, o modelo de Åström & Bell será revisitado. Algumas simplificações serão necessárias, sem comprometimento da qualidade e robustez do modelo.

#### 3.2 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

O esquema da figura 23 é uma representação simplificada de uma caldeira.

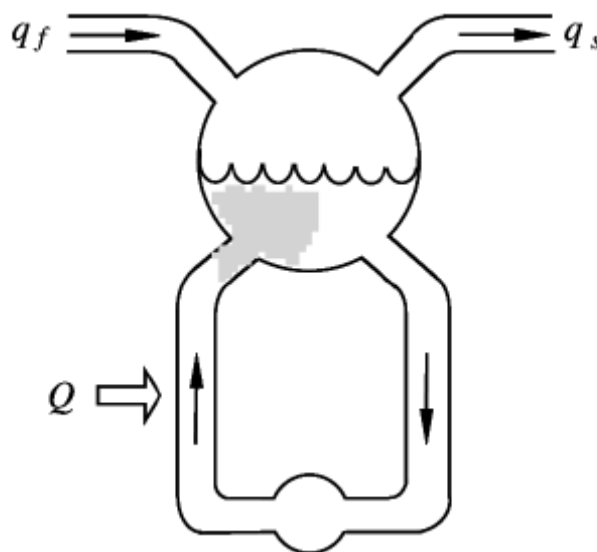


Figura 23: Esquema de produção de vapor de uma caldeira.

A primeira equação, de balanço de massa, é:

$$q_f - q_s = \frac{d}{dt}(\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}) \quad \text{Eq 17}$$

A segunda equação, de balanço de energia, deste sistema é:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt}(\rho_s u_s V_{st} + \rho_w u_w V_{wt} + m_t C_p t_m) \quad \text{Eq 18}$$

Onde:

$$u_w = h_w - \frac{P}{\rho_w} \quad \text{Eq 19}$$

$u_w$  : energia interna específica da água (J/kg),

$$u_s = h_s - \frac{P}{\rho_s} \quad \text{Eq 20}$$

$u_s$  : energia interna específica do vapor (J/kg),

O volume total de água no tubulão e a pressão serão as variáveis de estado.

O Volume total da caldeira pode ser representado pela equação abaixo:

$$V_t = V_{st} + V_{wt} \quad \text{Eq 21}$$

A energia Interna específica é:

$$u = h - \frac{P}{\rho} \quad \text{Eq 22}$$

Que pode ser reescrita:

$$\rho u = \rho h - p \quad \text{Eq 23}$$

Substituindo a Eq 23 na Eq 18,

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt} ((\rho_s h_s - p)V_{st} + (\rho_w h_w - p)V_{wt} + m_t C_p t_m) \quad \text{Eq 24}$$

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt} [\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p(V_{st} + V_{wt}) + m_t C_p t_m] \quad \text{Eq 25}$$

Substituindo a Eq 21 na Eq 25, tem-se:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt} [\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t C_p t_m] \quad \text{Eq 26}$$

Para representar a equação de balanço de energia na forma de variável de estado, será necessário desenvolver cada termo do lado direito da Eq. 26:

Primeiro termo:

$$\frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st}) = \frac{d}{dt} (\rho_s h_s) V_{st} + \rho_s h_s \frac{dV_{st}}{dt} \quad \text{Eq 27}$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st}) = V_{st} \left( \frac{d\rho_s}{dt} h_s + \rho_s \frac{dh_s}{dt} \right) + \rho_s h_s \frac{d}{dt} (V_t - V_{wt}) \quad \text{Eq 28}$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st}) = V_{st} \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right) + \rho_s h_s \left( \frac{dV_t}{dt} - \frac{dV_{wt}}{dt} \right) \quad \text{Eq 29}$$

O volume total de líquido na caldeira é constante, logo:

$$\frac{dV_t}{dt} = 0 \quad \text{Eq 30}$$

Então:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s h_s V_{st}) = V_{st} \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt} - \rho_s h_s \frac{dV_{wt}}{dt} \quad \text{Eq 31}$$

Segundo termo:

$$\frac{d}{dt}(\rho_w h_w V_{wt}) = \frac{d}{dt}(\rho_w h_w) V_{wt} + \rho_w h_w \frac{dV_{wt}}{dt} \quad \text{Eq 32}$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_w h_w V_{wt}) = V_{wt} \left( \frac{d\rho_w}{dt} h_w + \rho_w \frac{dh_w}{dt} \right) + \rho_w h_w \frac{dV_{wt}}{dt} \quad \text{Eq 33}$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_w h_w V_{wt}) = V_{wt} \left( h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \frac{dp}{dt} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right) + \rho_w h_w \frac{dV_{wt}}{dt} \quad \text{Eq 34}$$

Logo,

$$\frac{d}{dt}(\rho_w h_w V_{wt}) = V_{wt} \left( h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt} + \rho_w h_w \frac{dV_{wt}}{dt} \quad \text{Eq 35}$$

Terceiro termo:

$$\frac{d}{dt}(pV_t) = V_t \frac{dp}{dt} \quad \text{Eq 36}$$

Quarto termo:

$$\frac{d}{dt}(m_t C_p t_m) = m_t C_p \frac{\partial t_m}{\partial p} \frac{dp}{dt} \quad \text{Eq 37}$$

Fazendo a consideração que  $t_m = t_s$

Então:

$$\frac{d}{dt}(m_t C_p t_m) = m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} \quad \text{Eq 38}$$

Substituindo todos estes termos na equação de balanço de energia (Eq.18) tem-se:

$$\begin{aligned} & (-\rho_s h_s + \rho_w h_w) \frac{dV_{wt}}{dt} + \left[ V_{st} \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) + V_{wt} \left( h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) \right. \\ & \left. - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right] \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \end{aligned} \quad \text{Eq 39}$$

Definindo os parâmetros:

$$e_{21} = (-\rho_s h_s + \rho_w h_w) \quad \text{Eq 40}$$

e

$$e_{22} = V_{st} \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) + V_{wt} \left( h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \quad \text{Eq 41}$$

A partir destas definições, a Eq. 39 torna-se:

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad \text{Eq 42}$$

Desenvolvendo a equação de balanço de massa (Eq.17),

$$q_f - q_s = \frac{d}{dt}(\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}) \quad \text{Eq 43}$$

$$q_f - q_s = \rho_s \frac{dV_{st}}{dt} + V_{st} \frac{d\rho_s}{dt} + \rho_w \frac{dV_{wt}}{dt} + V_{wt} \frac{d\rho_w}{dt} \quad \text{Eq 44}$$

$$\frac{dV_{st}}{dt} = \frac{d}{dt}(V_t - V_{wt}) \quad \text{Eq 45}$$

$$\frac{dV_{st}}{dt} = -\frac{dV_{wt}}{dt} \quad \text{Eq 46}$$

$$q_f - q_s = -\rho_s \frac{dV_{wt}}{dt} + V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} + \rho_w \frac{dV_{wt}}{dt} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \frac{dp}{dt} \quad \text{Eq 47}$$

$$(-\rho_s + \rho_w) \frac{dV_{wt}}{dt} + (V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p}) \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \quad \text{Eq 48}$$

Considerando:

$$\begin{cases} e_{11} = \rho_w - \rho_s \\ e_{12} = V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \end{cases} \quad \text{Eq 49}$$

Obtém-se a seguinte equação:

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \quad \text{Eq 50}$$

Considerando as equações 42 e 50 chega-se ao modelo de segunda ordem para representar o comportamento da pressão e do nível do tubulão de uma caldeira.

$$\begin{cases} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \end{cases} \quad \text{Eq 51}$$

O modelo da equação 51 representa o comportamento da pressão em função da energia fornecida, vazão de água de alimentação e da vazão de vapor. De acordo com ÅSTRÖM e BELL (2000), “embora o modelo represente o volume total de água do sistema, ele não representa perfeitamente o comportamento do nível do tubulão por que não descreve a distribuição de vapor e água no sistema.”

No presente trabalho o interesse maior é no comportamento da pressão. Åström & Bell (2000), propõem uma simplificação da seguinte maneira: multiplicando a Eq. 17 por  $h_w$  e subtraindo da Eq.26, tem-se

$$\begin{aligned}
 hc \frac{d}{dt}(\rho_s V_{st}) + \rho_s V_{st} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wt} \frac{dh_w}{dt} - V_t \frac{dp}{dt} \\
 + m_t C_p \frac{dt_s}{dt} = Q - q_f (h_w - h_f) - q_s h_c
 \end{aligned}
 \tag{Eq 52}$$

Onde:

$$h_c = (h_s - h_w) \tag{Eq 53}$$

Se o nível do tubulão for bem controlado, variações no volume de vapor serão pequenas. Negligenciando estas variações, é possível obter o seguinte modelo simplificado:

$$e_1 \frac{dp}{dt} = Q - q_f (h_w - h_f) - q_s h_c \tag{Eq 54}$$

$$e_1 = h_c V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s V_{st} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w V_{wt} \frac{\partial h_w}{\partial p} + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} - V_t \tag{Eq 55}$$

### 3.3 APROXIMAÇÃO DOS COEFICIENTES $e_{ij}$

Os coeficientes  $e_{ij}$  dependem de entalpias específicas, massas específicas e temperaturas. Neste trabalho, foram utilizadas as relações de Palma (2006) que propôs aproximações para os termos da entalpia do vapor e da água, densidade do vapor e da água e temperatura do vapor. O apêndice B apresenta a avaliação estatística das referidas aproximações.

$$h_s = 43469 \ln(p) + 2675000 \tag{Eq 56}$$

$$\rho_s = -0.0014 p^2 + 0.5198 p + 0.093 \tag{Eq 57}$$



$$h_w = 420998p^{0.2583} \quad \text{Eq 58}$$

$$\rho_w = 0.3081p^2 - 10.984p + 964.35 \quad \text{Eq 59}$$

$$t_s = 100.67p^{0.2522} \quad \text{Eq 60}$$

As derivadas parciais com relação à p das equações acima são:

$$\frac{\partial h_s}{\partial p} = \frac{43469}{p} \quad \text{Eq 61}$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial p} = -0.0028p + 0.5198 \quad \text{Eq 62}$$

$$\frac{\partial h_w}{\partial p} = 108743.7834p^{-0.7471} \quad \text{Eq 63}$$

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial p} = 0.6162p - 10.984 \quad \text{Eq 64}$$

$$\frac{\partial t_s}{\partial p} = 25.388974p^{-0.7478} \quad \text{Eq 65}$$

### 3.4 MODELO DE NIVEL DO TUBULÃO CONSIDERANDO A PRESSÃO CONSTANTE.

No item 3.2, chegou-se ao conjunto de equações abaixo (Eq.51):

$$\begin{cases} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \end{cases}$$

Fazendo a pressão controlada em um valor constante, tem-se que a derivada da pressão no tempo será nula:

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{Eq 66}$$

Daí chega-se ao seguinte arranjo:

$$\begin{cases} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} = q_f - q_s \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \end{cases} \quad \text{Eq 67}$$

Este sistema pode ser reagrupado com um simples arranjo de  $e_{11}$  e  $e_{21}$ :

$$e_{21}(q_f - q_s) - e_{11}(Q + q_f h_f - q_s h_s) = 0 \quad \text{Eq 68}$$

Resolvendo para Q:

$$Q = \frac{e_{21}(q_f - q_s)}{e_{11}} - q_f h_f + q_s h_s \quad \text{Eq 69}$$

E substituindo adequadamente, o valor de Q, chega-se a

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} = \frac{e_{21}(q_f - q_s)}{e_{11}} \quad \text{Eq 70}$$

Esta é uma estimativa do comportamento do nível em função do tempo. Vê-se que o termo Q não está presente em nenhuma parte da equação, mesmo nos termos auxiliares  $e_{21}$  e  $e_{11}$ .

Pela equação exposta, o nível é dependente das vazões de entrada e saída de água, na forma líquida e vapor, das densidades da água e do vapor. Esta evidência expõe a independência do nível com o tipo de combustível utilizado na caldeira para a premissa de um controlador de pressão ideal, isto é, a pressão perfeitamente controlada em um *setpoint* fixo.

## CAPÍTULO 4

### SIMULAÇÃO DINÂMICA DO MODELO

#### 4.1 SIMULAÇÃO DOS MODELOS OBTIDOS

O modelo indicado nas equações 54 e 55 representa o comportamento dinâmico da pressão considerando nível constante, não tem solução analítica conhecida. Assim, para obter sua solução numérica aplicou-se o método de integração de Runge-Kutta e condições iniciais definidas para cada caso.

O algoritmo iterativo de Runge-Kutta foi desenvolvido em programa próprio em Matlab® chegando-se ao melhoramento do passo de integração e número de iterações para convergência da solução.

Como é possível verificar no modelo de pressão obtido no capítulo anterior (equações 53, 54 e 55), vários fatores podem influenciar na pressão ao longo do tempo, a saber: entalpia da água de alimentação, entalpia do vapor de saída, vazão de água de alimentação, vazão de vapor e a energia fornecida pelo combustível.

Para simulação em Matlab®, serão consideradas as equações de balanço de massa e energia, as equações de propriedades termodinâmicas e as derivadas parciais com relação à  $p$  das propriedades termodinâmicas obtidas no capítulo 3 deste trabalho.

Tomando como referência os dados da caldeira do trabalho de Palma (2006), no estado estacionário, têm-se os seguintes parâmetros:

$$Q \text{ (J)} = 429776;$$

$$q_s \text{ (kg/s)} = 0.16;$$

$$q_f \text{ (kg/s)} = 0.16;$$

$$V_t \text{ (m}^3\text{)} = 2.8038;$$

$$V_{wt} \text{ (m}^3\text{)} = 2.38;$$

$$V_{st} \text{ (m}^3\text{)} = 0.42;$$

$$m_t \text{ (kg)} = 1000;$$

$$C_p \text{ (cal/g}^\circ\text{C)} = 448;$$

$$h_f \text{ (J/kg)} = 103900;$$

### 4.1.1 SIMULAÇÃO DO ESTADO ESTACIONÁRIO

O comportamento da pressão para as condições iniciais do estado estacionário pode ser observado na figura 24.

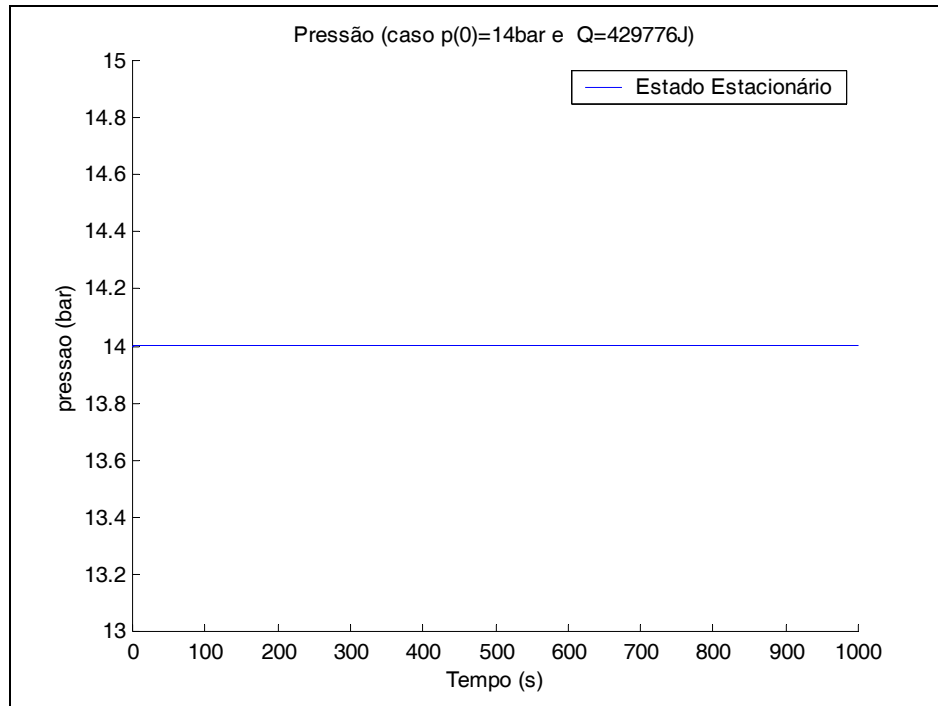


Figura 24: Simulação no estado estacionário.

No estado estacionário, a geração de vapor é igual ao consumo, logo, de acordo com o modelo, a pressão permanecerá inalterada, conforme gráfico da figura 24.

### 4.1.2 EFEITO DE DEGRAU NO VAPOR CONSUMIDO

A seguir, foi simulada uma perturbação degrau no processo, em malha aberta, aumentando a vazão mássica de vapor consumido.

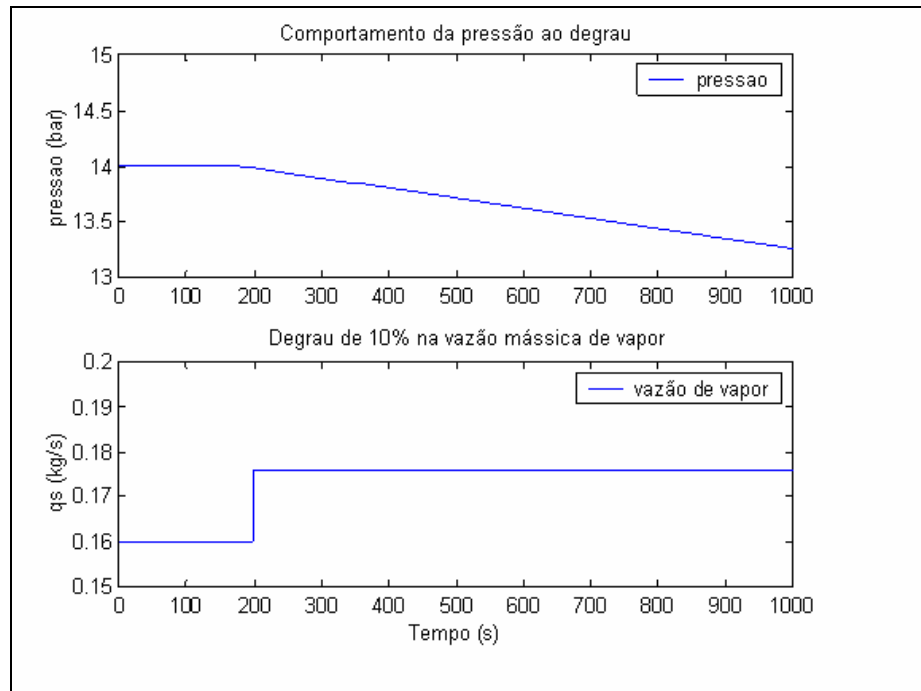


Figura 25: Resposta da pressão da caldeira ao degrau positivo na vazão mássica de vapor

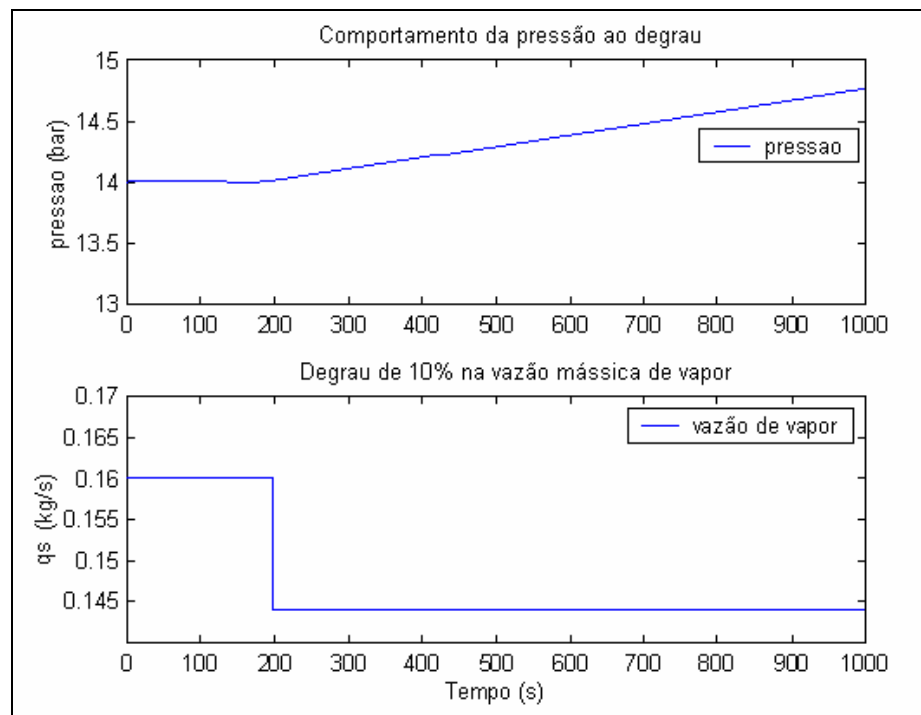


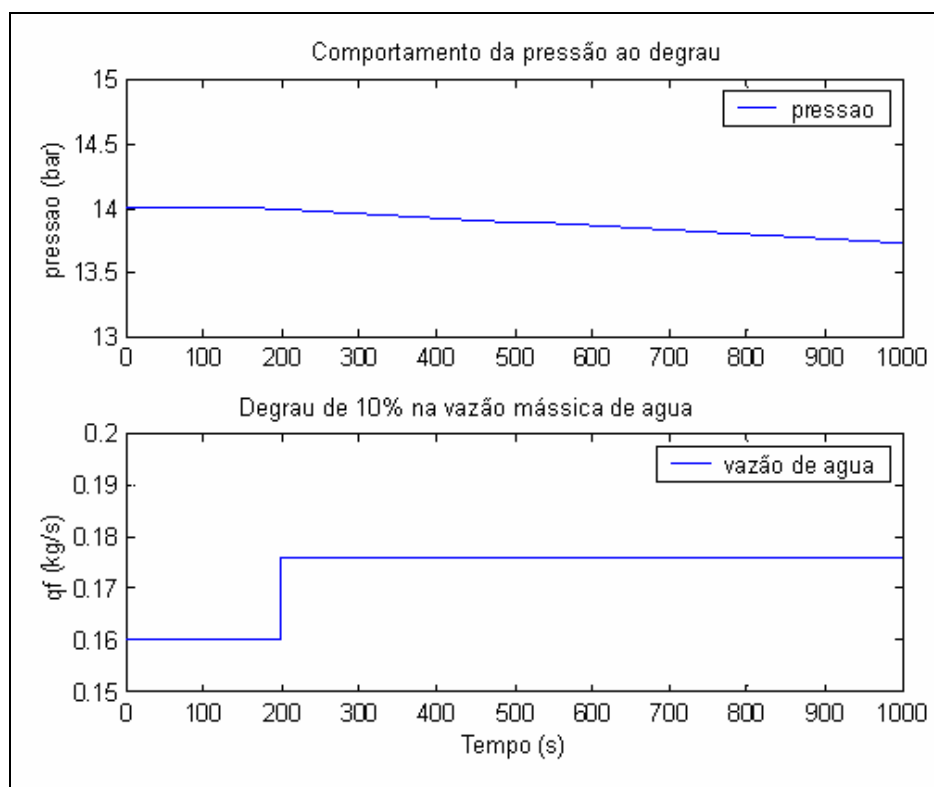
Figura 26: Resposta da pressão da caldeira ao degrau negativo na vazão mássica de vapor

De acordo com o modelo proposto, um degrau de 10% no consumo de vapor acarreta um aumento ou diminuição na pressão do vapor, de acordo com o sinal da perturbação, conforme as curvas da figura 25 e figura 26.

Percebe-se um comportamento linear do modelo, isto é, para degraus de sinais opostos, o sistema apresenta respostas correspondentes.

### 4.1.3 EFEITO DE DEGRAU NA VAZÃO DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DA CALDEIRA

O próximo efeito estudado na resposta da pressão foi um degrau de perturbação na vazão da água de alimentação.



**Figura 27: Simulação de degrau no consumo de água de alimentação**

De acordo com o modelo proposto, um degrau na vazão de água em 10%, afeta a pressão pouco significativamente. Isto é, após um tempo de 800 segundos a pressão modificou-se de 14 bar para pouco mais de 13.7 bar, conforme figura 27.

#### 4.1.4 EFEITO DE DEGRAU NA ENTALPIA DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO

A seguir, perturbação no processo, em malha aberta, aumentando entalpia da água de alimentação.

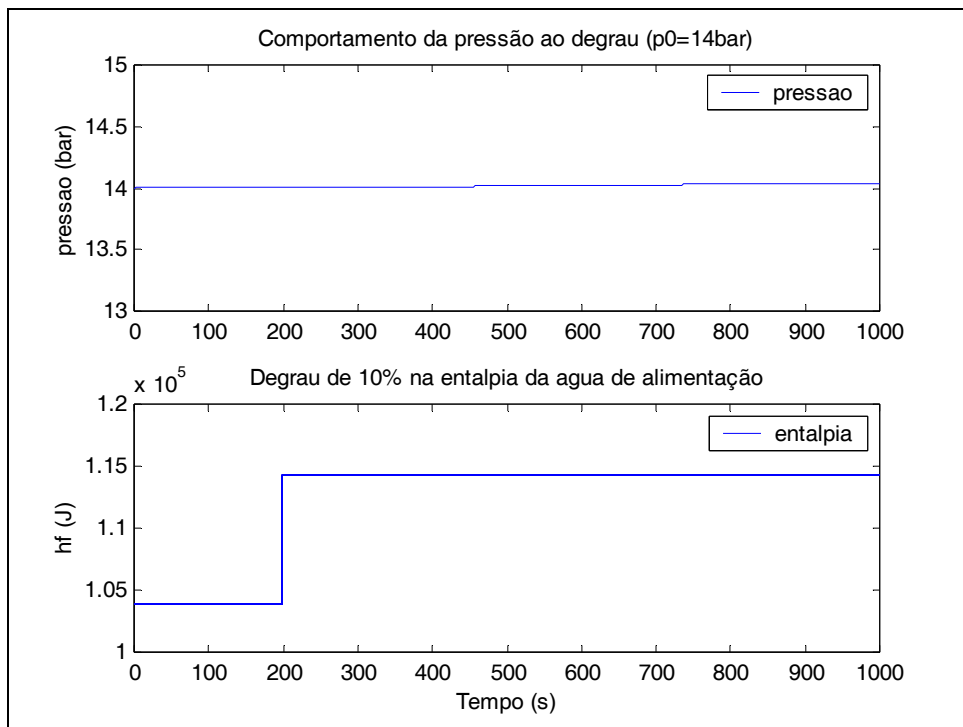


Figura 28: Simulação de degrau na entalpia de água de alimentação

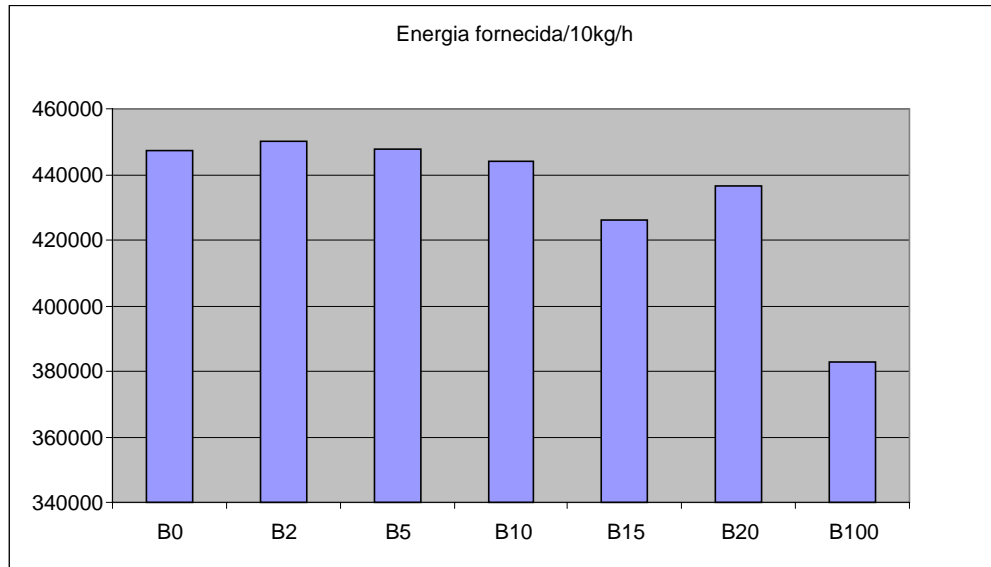
De acordo com o resultado obtido na figura 28, o degrau de 10% na entalpia de água de alimentação influencia pouco significativamente no valor da pressão.

#### 4.1.5 EFEITO DA COMPOSIÇÃO DE COMBUSTÍVEL NO COMPORTAMENTO DA PRESSÃO

No modelo proposto na equação 54 o termo “Q” é dependente do tipo e da composição do combustível. Para estudar o efeito da composição do combustível na pressão, foram feitas várias simulações variando a referida propriedade, desde diesel puro, até o combustível com 100% de biodiesel. Foram utilizados os dados do trabalho experimental de Cardoso *et al* (2006), conforme quadro 5 e gráfico da figura 29.

**Quadro 5 : Propriedades do Biodiesel de Babaçu**

	B0	B2	B5	B10	B15	B20	B100
Poder calorífico (kJ/10kg de combustível)	447185.9	450240.2	447855.4	444131.6	426140.4	436600.4	382836
Massa Esp. (a 20°C Kg/m <sup>3</sup> )	858.1	858.5	859.1	859.4	860.6	862	876
Viscosidade Cinem. a 40°C (cSt)	4,433	4,393	4,358	4,334	4,285	4,172	3,725



**Figura 29: Energia fornecida / 10 kg de combustível (KJ).  
Adaptado de Cardoso *et al* (2006)**



#### 4.1.6 COMPORTAMENTO DO MODELO A DIFERENTES PRESSÕES INICIAIS

Os gráficos das figuras 30, 31 e 32 representam mudanças nas composições do combustível de alimentação. Foram feitas simulações para biodiesel variando de B0 a B100, com diferentes pressões iniciais (3 bar, 7 bar e 14 bar). No tempo de 200 segundos foi dado um degrau de 25% no consumo de vapor.

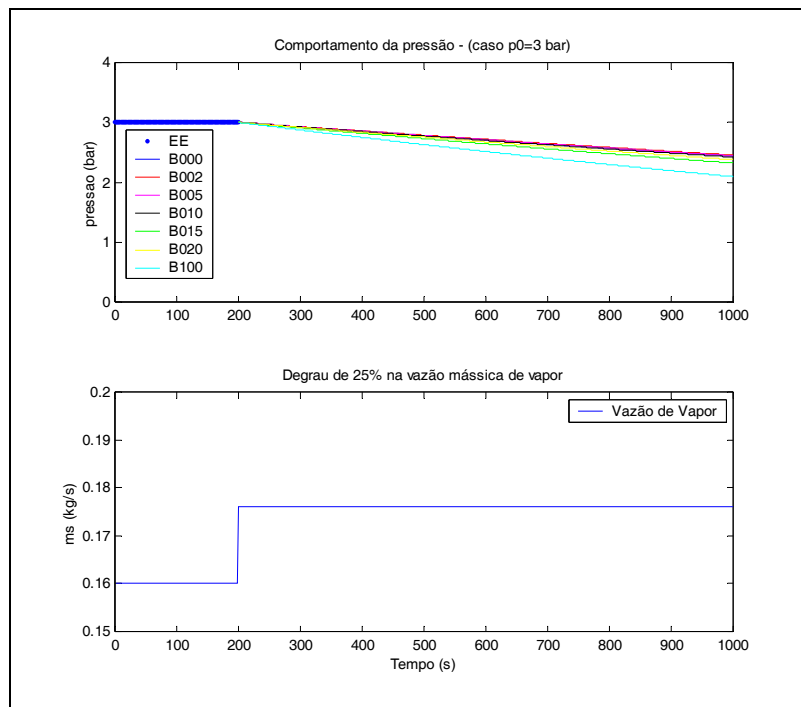
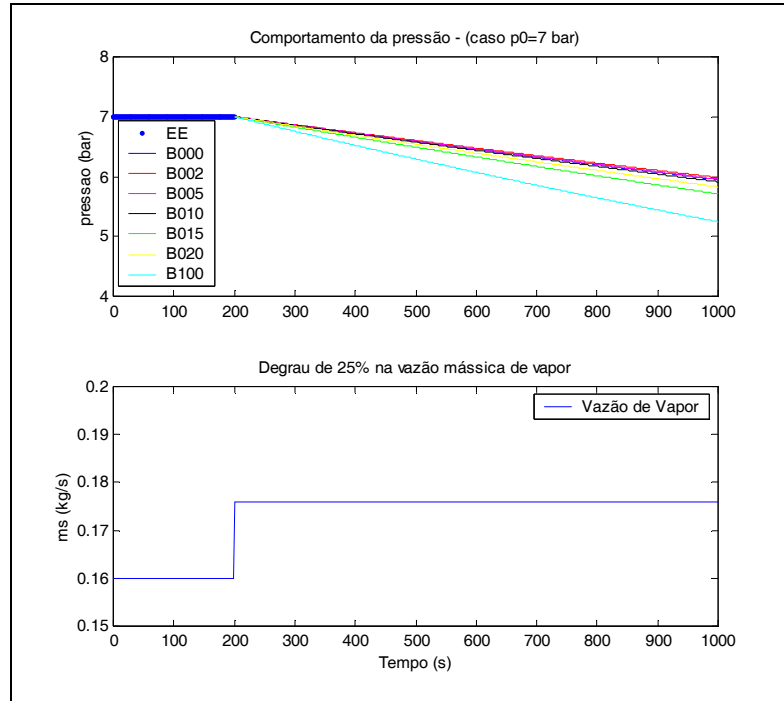
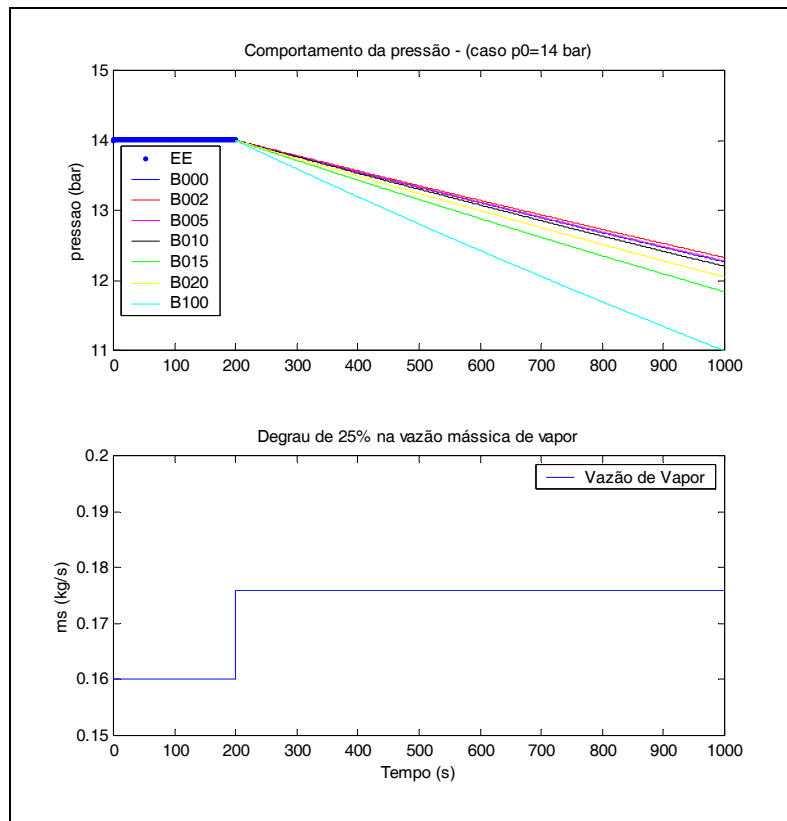


Figura 30: Comportamento da pressão para um degrau na vazão de vapor para diferentes misturas de combustíveis ( $p_0=3$  bar)



**Figura 31: Comportamento da pressão para um degrau na vazão de vapor para diferentes misturas de combustíveis ( $p_0=7$  bar)**



**Figura 32: Comportamento da pressão para um degrau na vazão de vapor para diferentes misturas de combustíveis ( $p_0=14$  bar)**

Em todas as três pressões simuladas, percebe-se que as quedas de pressões mais acentuadas acontecem com o B100. Até o B20, as perdas de pressão ficam em torno de 2 bar.

Este comportamento da pressão é possível de explicar pelo fato de que o poder calorífico das amostras de combustíveis diminui do B0 ao B100. A partir do modelo da equação 54, um aumento na quantidade de energia fornecida tem o efeito de aumentar a pressão e a diminuição da energia fornecida tem o efeito de diminuir a pressão.

#### 4.1.7 EFEITO DE UM DEGRAU NO CALOR FORNECIDO A UMA CALDEIRA

O gráfico da figura 33 é uma representação de vários degraus no fornecimento de energia à caldeira, de acordo com o modelo obtido no capítulo (equação 54 e 55).

Foram executados degraus negativos e positivos (-25%, -10%, estado estacionário, +10% e 25%).

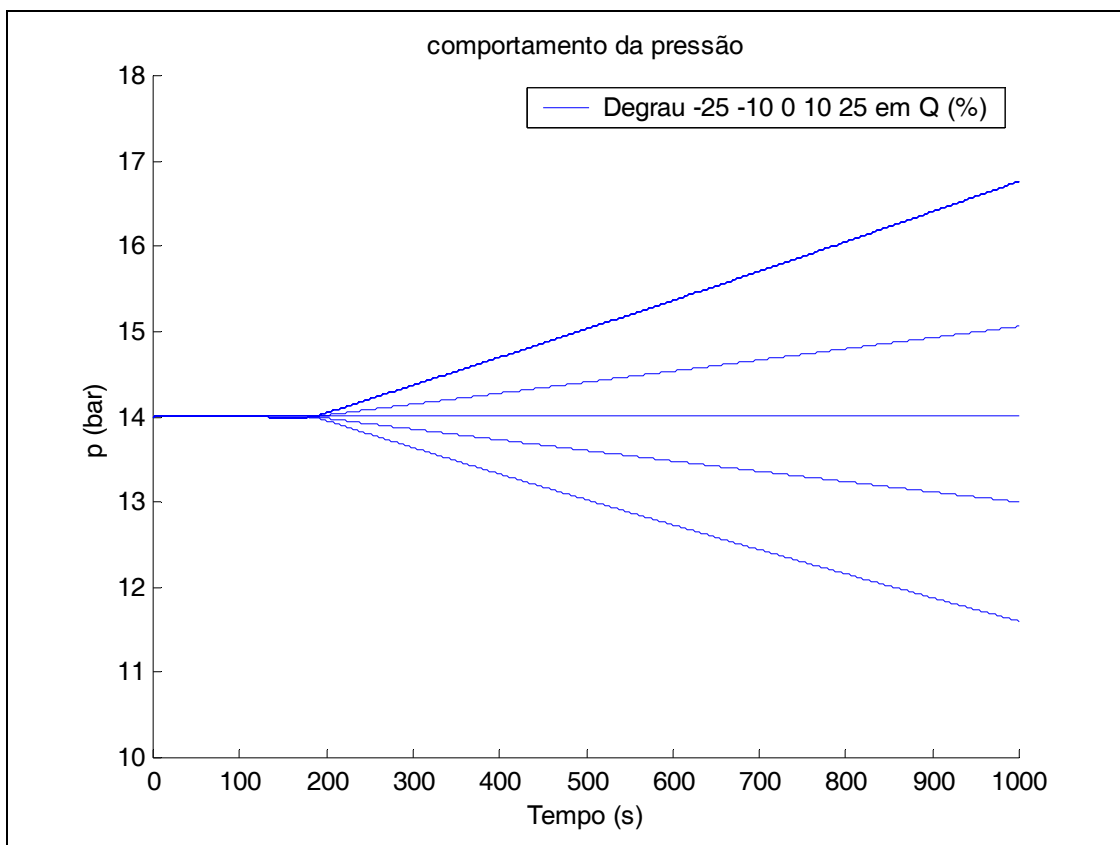


Figura 33: Efeito dos degraus na energia fornecida (Q) na pressão do sistema

Em todos os casos simulados, é evidente que o comportamento da pressão é semelhante a um processo de capacitância pura ou processo integrador e que a direção da resposta da pressão é a mesma da perturbação. Pode-se afirmar, que o ganho de processo é variável em função de  $Q$  ( $G_p \sim f(Q)$ ).

Considerando que os modelos empíricos (equações 56 a 60) das propriedades termodinâmicas vão de 0 bar a 15 bar (vide apêndice B), resultados de modelagem que projetam a valores fora desta faixa devem ser usados com restrições, pois podem não representar a realidade. Caso seja necessário simular para valores fora da referida faixa, novos modelos de propriedades termodinâmicas devem ser obtidos.

## CAPÍTULO 5

### CONTROLE DE PROCESSOS

#### 5.1 CONTROLE DE PRESSÃO EM CALDEIRAS

O vapor produzido pelas caldeiras deve atender a requisitos específicos para não comprometer o desempenho das unidades operacionais. Em função disto, é necessário um bom controle de pressão do vapor fornecido pelas caldeiras.

Pode-se relacionar indiretamente a variação de composição de um combustível com a pressão do tubulão de uma caldeira. Conforme capítulo anterior constatou-se que a pressão tem dependência com a quantidade de energia fornecida à caldeira.

Mais detalhadamente, a pressão pode ser relacionada com o poder calorífico do combustível. De acordo com o modelo obtido, pode-se afirmar que para uma mesma massa de biodiesel, diferentes composições (B0, B5, B10, B20 e B100) na alimentação de combustível, resultarão em diferentes pressões finais (equação 54 e equação 55)

$$e_1 \frac{dp}{dt} = Q - q_f(h_w - h_f) - q_s h_c \quad \text{Eq 54}$$

$$e_1 = h_c V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s V_{st} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w V_{wt} \frac{\partial h_w}{\partial p} + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} - V_t \quad \text{Eq 55}$$

##### 5.1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO POR FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

O modelo representado pelas equações 54 e 55 não apresenta solução analítica trivial. A solução do sistema de equações utilizou o algoritmo de Runge-Kuta para resolver o modelo. Do ponto de vista prático para implementação de um modelo de sistema de controle, o sistema anterior pode ser simplificado com o uso de funções de transferência. Assim, considerando as respostas obtidas aos degraus no fornecimento de energia a caldeira, pode-se identificar o modelo do processo para fins de projeto e de simulação de um sistema de controle.

A curva de resposta da pressão para os degraus na energia fornecida à caldeira (figura 33, capítulo 4), indica que se trata de um processo integrador por este ter comportamento similar ao observado em Chau, (2002) e Valdman *et al*, (2008). Assim o processo pode ser representado pela função:

$$G_p = \frac{PV(s)}{MV(s)} = \frac{K_I}{s} \quad \text{Eq 71}$$

Uma solução possível para o processo integrador na base de tempo é:

$$y(t) = K_I \int_{t_0}^t x(t) dt \quad \text{Eq 72}$$

Para um degrau  $x(t) = A$  constante, a equação tem a solução:

$$y(t) - y(t_0) = K_I A(t - t_0) \quad \text{Eq 73}$$

∴

$$K_I = \frac{y(t) - y(t_0)}{A(t - t_0)} \quad \text{Eq 74}$$

Considerando vários degraus na energia fornecida ao sistema em 4.2.7, figura 33, é possível obter o valor de  $K_i$ , aproximado do sistema:

$$K_I = \frac{p(t) - p(t_0)}{\Delta E(t - t_0)} \quad \text{Eq 75}$$

**Quadro 6: Calculo dos valores de  $K_i$  para vários degraus em Q**

Degrau (%)	$P_{200}$ (Bar)	$P_{1000}$ (Bar)	$\Delta E$ (J)	$t_0$ (s)	$t_f$ (s)	$K_i$ (bar/J.s)
-25	13.9601	11.6077	-107444	200	1000	2.74E-08
-10	13.9842	13.0019	-42978	200	1000	2.86E-08
10	14.0164	15.059	42978	200	1000	3.03E-08
25	14.0405	16.7584	107444	200	1000	3.16E-08

Em rigor, o ganho do processo é variável para cada degrau. A diferença entre os ganhos correspondentes aos degraus é aproximadamente de 5%.

Pode-se propor um modelo de ganho dinâmico em função do degrau cuja lei seria:

$$K_i = 9.10^{-11} \cdot \text{degrau} + 3.10^{-8} \quad \text{Eq 77}$$

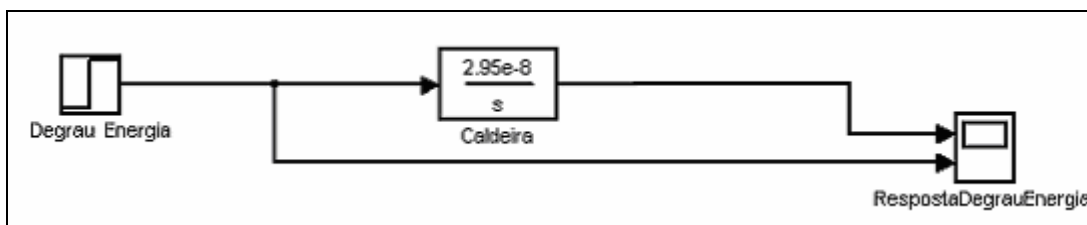
Este trabalho considerará um ganho médio, sem perda significativa de representatividade do modelo.

A média dos valores de  $K_i$  no quadro 6 é de  $2.95 \times 10^{-8}$  e desvio padrão é  $1.88 \times 10^{-9}$ .

A equação final para representar o modelo de processo integrador fica:

$$G_p = \frac{2.95 \times 10^{-8}}{s} \quad \text{Eq 78}$$

A figura 34 é uma representação do processo em função de transferência utilizando o software Simulink®.



**Figura 34: Representação do modelo da caldeira em função de transferência.**

As figuras 33 do capítulo anterior e a figura 35 são semelhantes. Isto é um indicativo que o modelo por função de transferência representa o processo em estudo com considerável fidelidade.

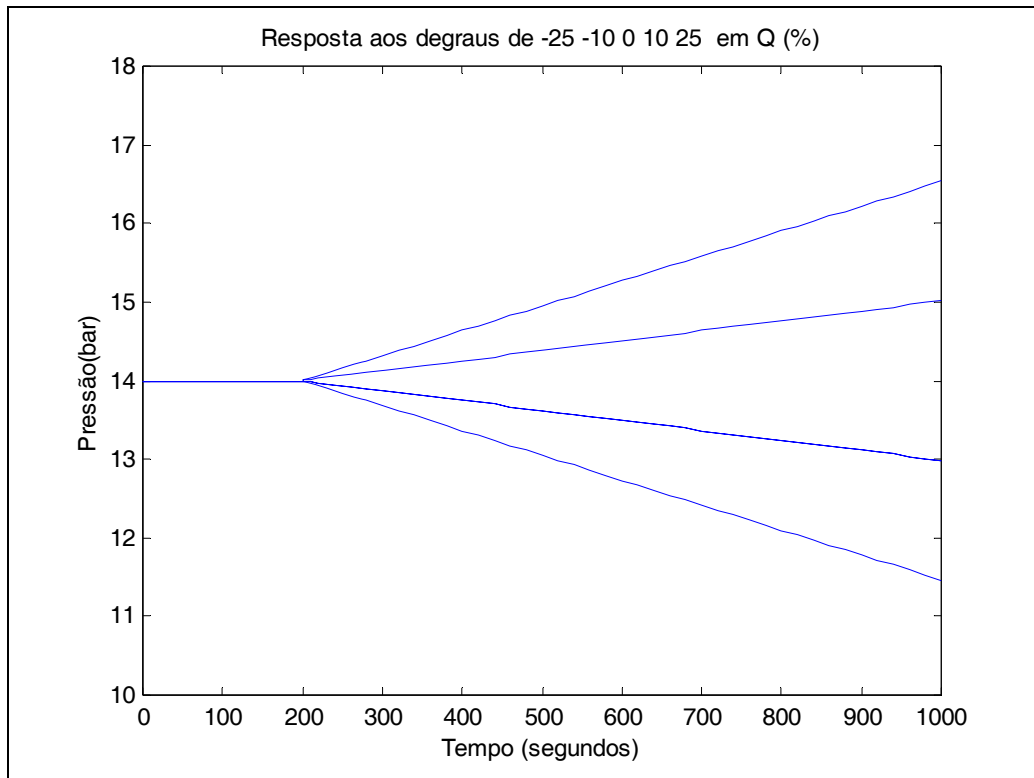


Figura 35: Resposta aos degraus em “Q” usando o modelo de função de transferência

### 5.1.2 UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA PRESSÃO DE UMA CALDEIRA

De posse do modelo de transferência do processo é possível propor uma estratégia de controle para a pressão da caldeira.

Para o problema em estudo a estratégia de controle deverá manter a pressão do tubulão dentro de faixas especificadas caso haja variações no *setpoint* ou perturbações no sistema de combustão da caldeira.

Será proposta uma estratégia de controle por realimentação, cujo “princípio de atuação consiste na tomada de decisão de correção pelo aparecimento de um desvio ou *erro* na variável de processo que se deseja controlar.” (VALDMAN *et al*, 2008).

Para que o controlador possa comparar os sinais de entrada e gere sinais de saídas compatíveis com as unidades de medida, será necessário adicionar um fator de ganho à saída do controlador. Ou seja, deverá ser considerada uma relação na proporção de combustível fornecido ao processo em função do sinal de saída solicitado pelo controlador.



Considerando a premissa de consumo máximo de 50kg/h de biodiesel, e o poder calorífico do B100 de 38283,6kJ/kg tem-se um ganho aproximado de 20000kJ/% .

A figura 36 é uma representação da estratégia de controle proposta.

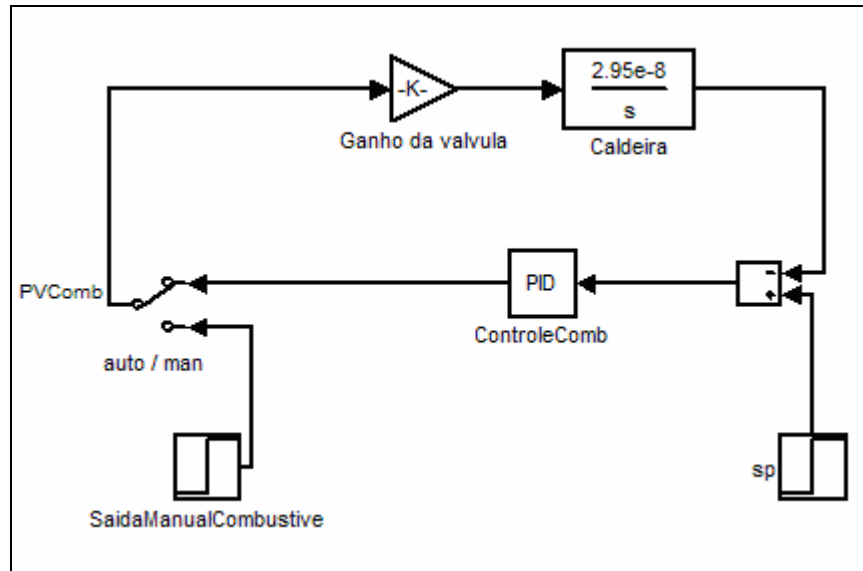
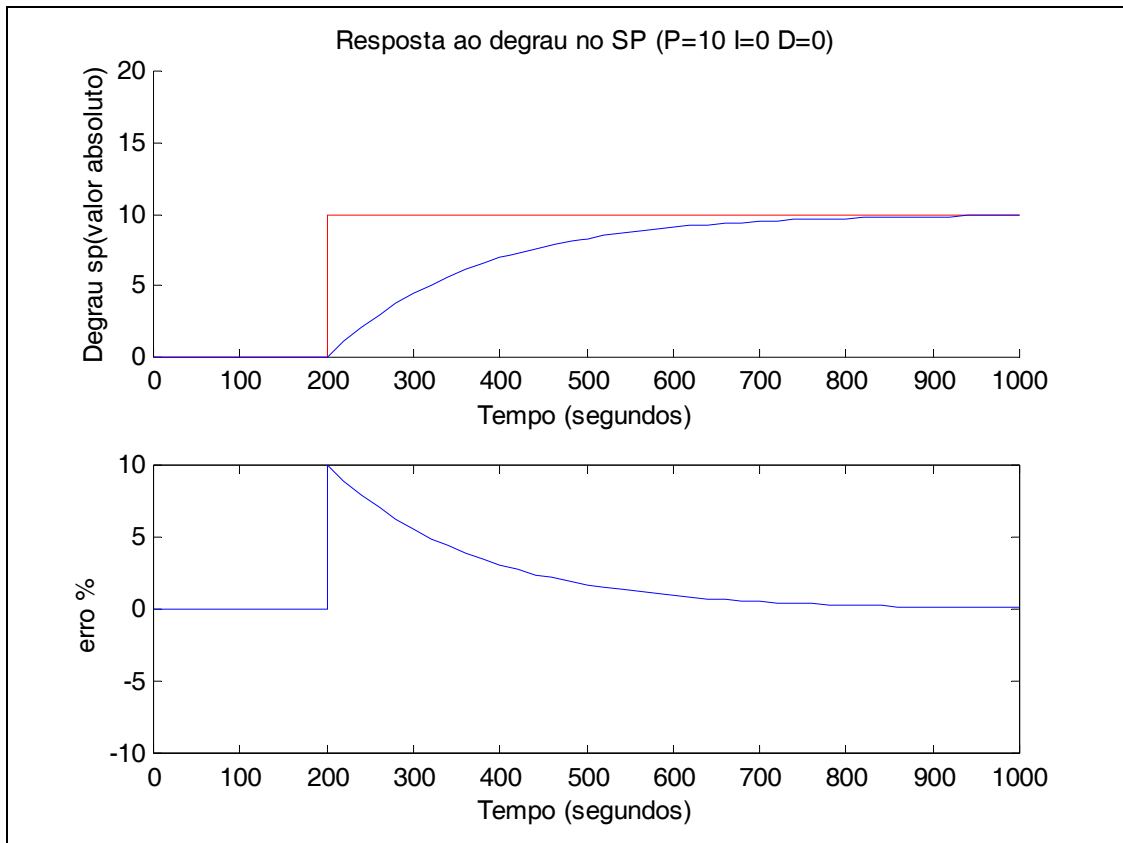


Figura 36: Estratégia de controle para a pressão da caldeira

De acordo com Smith (2005), um processo integrador deve ter uma sintonia preferencialmente com o termo proporcional, para evitar *overshot* e *offset*. A sintonia inicial para o controlador proposto adotará esta premissa.

A figura 37 é a representação da resposta do sistema fechando a malha com parâmetros PID iniciais de 10, 0 e 0 respectivamente. Pela observação direta do gráfico, vê-se que aproximadamente 700 segundos depois da mudança no *setpoint*, o sistema voltou ao estado estacionário. Pode ser desejável uma resposta mais rápida do sistema, isto sugere um aumento no valor do ganho.



**Figura 37: Resposta do controlador em malha Fechada (P=10, I=0, D=0)**

O controlador adequado é aquele que responde apropriadamente as mudanças de *setpoints* e às perturbações na carga. No estudo em questão as perturbações prováveis são no combustível e na pressão. No caso do combustível podem ocorrer mudanças bruscas de vazão e variação da composição. No caso da pressão, as variações podem ocorrer por causa da entrada ou saída de um consumidor de vapor.

Nos dois casos citados, o efeito será na pressão do sistema de vapor. Assim, o controlador deve ser sintonizado de acordo com as perturbações possíveis. A figura 38 é a representação do sistema incluindo distúrbios e mudanças de *setpoints* e a figura 39 é representação gráfica do desempenho do sistema de controle quando submetido a perturbações e mudanças de *setpoints*.

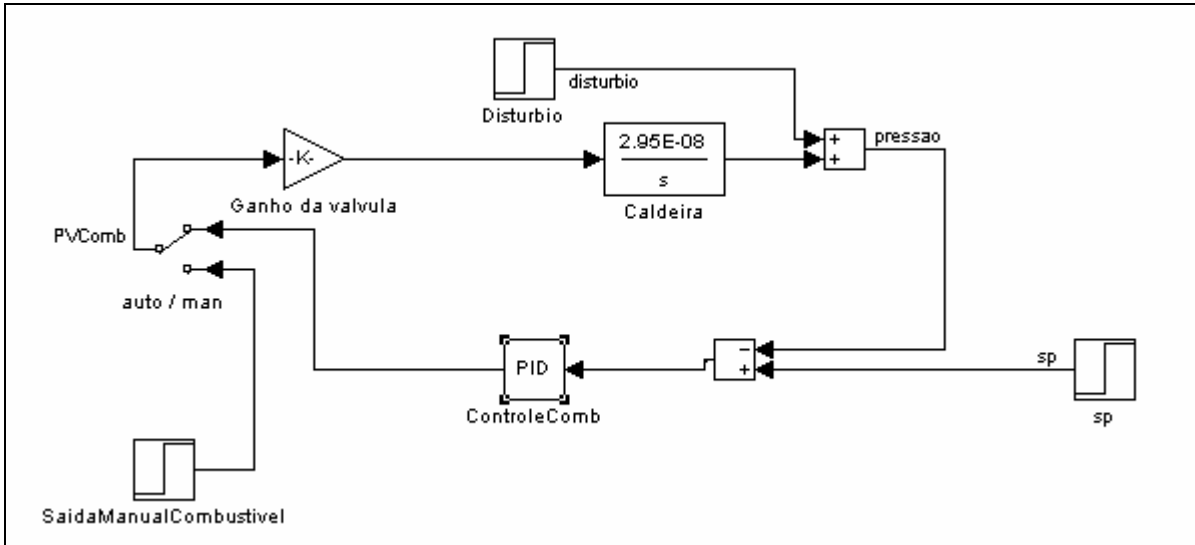


Figura 38: Representação do sistema de controle incluindo perturbações

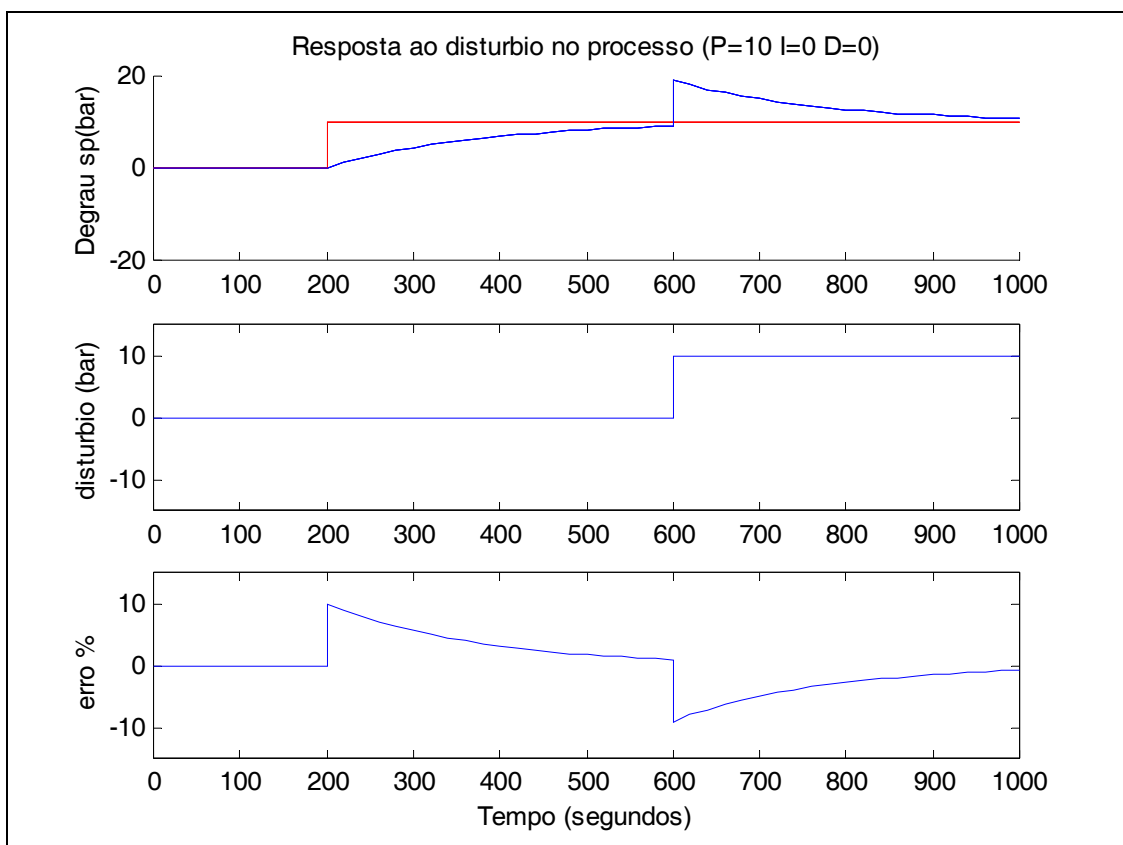


Figura 39: Comportamento do sistema com controlador P puro

Existe margem para aperfeiçoar a sintonia do controlador para obter respostas mais rápidas. A sintonia deve ser adequada à demanda de resposta do processo, esta informação de rapidez de resposta não será estudada neste trabalho.

## 5.2 ANÁLISE DO EFEITO TROCA DE COMBUSTÍVEL NA VAZÃO DA VÁLVULA

Um controle de pressão típico de caldeiras é feito através do controle de vazão de combustível. O arranjo medição de pressão-controlador-elemento final deve ser configurado tal que qualquer variação na demanda de vapor, com diminuição ou aumento de pressão, seja compensada diretamente pela abertura ou fechamento de uma válvula de controle de vazão.

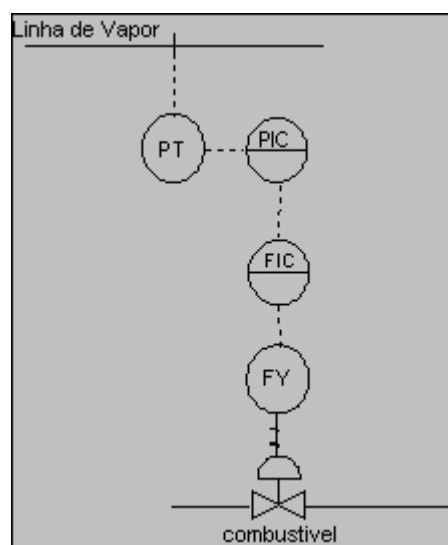


Figura 40: Esquema simplificado do controle de vazão de combustível

O esquema da figura 40 contempla um controlador de pressão sendo o mestre de um controlador de vazão. Neste arranjo a válvula de combustível deve ser projetada para uma vazão máxima ( $V_{max}$ ). Dentro desta faixa de vazão a quantidade de combustível fornecido para queima será função da pressão que controlará a abertura da válvula.

Um aspecto importante na questão da válvula, diz respeito à natureza do fluido para o qual foi projetada. No caso de haver uma troca de combustível, deverá ser feito o cálculo de vazão da válvula considerando o novo fluido e suas propriedades (densidade e viscosidade) para saber os novos limites operacionais da válvula.

Em Campos e Teixeira (2006) encontra-se um método de dimensionamento de válvulas baseado nas normas ANSI/ISA-75.01.01 e IEC 60534-2-1.

No trabalho supracitado, os autores propõem uma metodologia simplificada de dimensionamento de válvula, conforme equação a seguir:

$$W = N \cdot f(a) \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho}$$

Eq 79

Onde  $f(a)$  é a função de característica inerente da válvula em função da abertura. O quadro 7 traz algumas equações representativas de tipos freqüentes de válvulas:

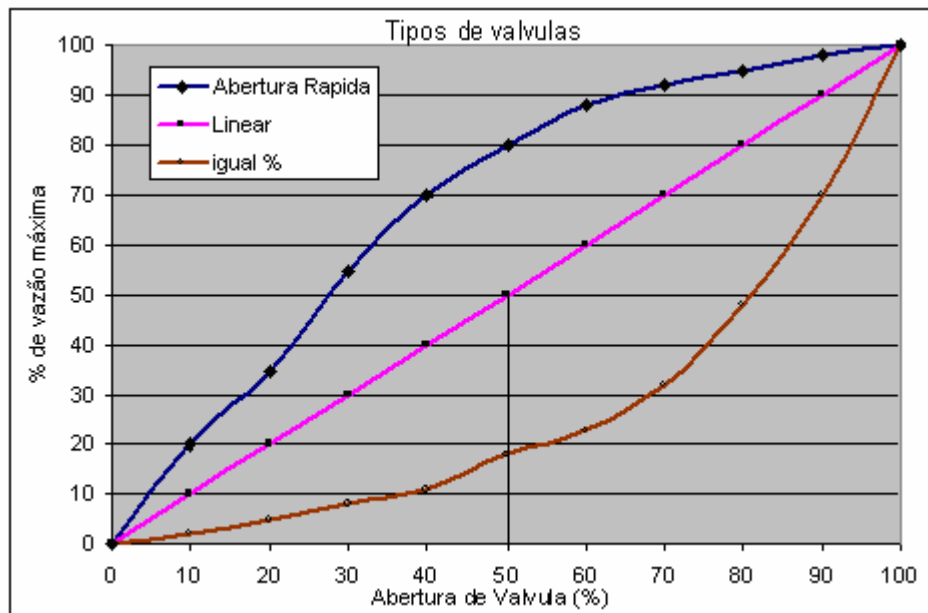
**Quadro 7: Equações representativas de tipos de válvulas**

Tipo de válvula	$f(a)$
Linear	$a$
Igual percentagem	$R^{(a-1)}$
Hiperbólica modificada	$\frac{a}{\sqrt{3-2a^2}}$

Fonte: Campos e Teixeira (2006)

R: rangeabilidade da válvula.

Na figura 41 estão representados alguns tipos de válvula e suas vazões em função da abertura.



**Figura 41: Curvas de vazão de válvulas em função da abertura.**

No mesmo texto, Campos e Teixeira (2006) relatam uma equação mais abrangente para cálculo de vazão, de acordo com a norma ANSI/ISA-75.01.01:

$$W = \frac{a}{100} \cdot N \cdot F_p \cdot F_y \cdot FR \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho} \quad \text{Eq 80}$$

Em ambas equações aparece o termo da densidade do fluido de processo. No caso do biodiesel, a densidade varia de acordo com a matéria prima e com o grau de mistura diesel com biodiesel (vide quadro 4 no item 4.1.5). A rigor, este termo de densidade presente na equação fará com que a vazão seja diferente quando estiver usando o diesel ou o biodiesel, para uma mesma válvula. Para as amostras de biodiesel do trabalho de Cardoso *et al* (2006), a diferença de densidade entre o B0 e o B100 é de pouco mais de 2%. Para este valor de diferença, não é esperado um impacto significativo no valor da vazão (vide apêndice D).

De acordo com Sighieri (1997) o valor de  $C_v$  de uma válvula deve ser corrigido para viscosidades superiores a 20cSt. Conforme relatado em 2.2, a maioria dos óleos vegetais em temperatura ambiente, possuem viscosidade acima de 20 cSt.

A seguir o procedimento para obtenção do fator de correção proposto em Sighieri (1997):

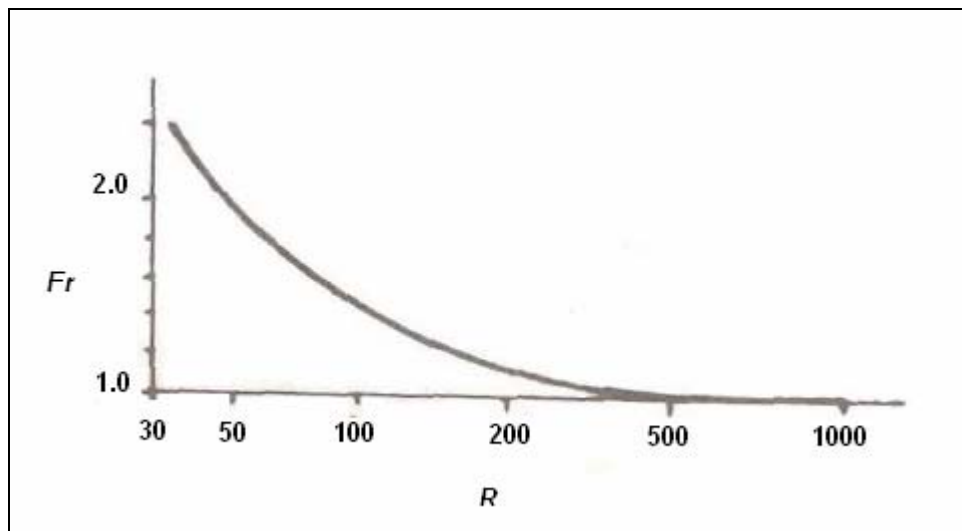
1. Calcula-se um termo “R” que é função da vazão, do  $C_v$  original e da viscosidade.

$$R = \frac{12.285 \times \text{Vazão} / \text{min}}{\sqrt{C_{v_{original}} \times \text{Viscosidade}(\text{cSt})}} \quad \text{Eq 81}$$

De posse do valor de “R”, com auxílio do gráfico da figura 42, encontra-se o “Fr”.

2. Calcula-se o novo  $C_v$  a partir da equação abaixo:

$$C_{v'} = C_{v_{original}} \times F_r \quad \text{Eq 82}$$



**Figura 42: Gráfico de fator R**  
Adaptado de Sighieri (1997)

Diante do exposto anteriormente e atendido o quesito de correção do  $C_v$  pela viscosidade, pode-se afirmar que, dentro dos limites da modelagem e dos limites operacionais da válvula, não é necessário trocar a válvula de controle no caso de uma substituição de diesel por biodiesel.

### **5.3 ANÁLISE DO EFEITO DA MISTURA DE COMBUSTÍVEL NA PRESSÃO DO TUBULÃO DA CALDEIRA UTILIZANDO UMA VALVULA LINEAR**

Partindo das amostras de biodiesel do artigo de Cardoso *et al* (2006), pode-se prever o comportamento da pressão ao longo do tempo para o caso de usar B0 até B100.

Para o primeiro teste, as seguintes premissas serão adotadas:

- Válvula linear.
- Vazão máxima da válvula de 50 kg/h.
- Nenhuma perturbação no sistema.
- Caldeira com 50% da carga
- Caldeira em estado estacionário.

Os valores de Q fornecidos à caldeira serão proporcionais à abertura da válvula. No estado estacionário, a energia requerida será de aproximadamente 215000 J/s. O que para o B0 resultaria em uma vazão de 17,31 kg/h e para o B100 uma vazão de 20,22 kg/h.

Baseado na estrutura de controle da figura 40, para corrigir a pressão, no caso de uso do B100, será necessário aumentar a vazão de combustível suprindo a quantidade de energia requerida para manter a pressão dentro das especificações de uso.

Em termos numéricos, um controlador deverá comandar a abertura da válvula para 20,22 kg/h. Assim sendo, mesmo usando o B100, nesta condição operacional, não seria necessário fazer a troca da válvula, pois ainda é possível garantir a vazão e pressão de trabalho desejadas.

A figura 43 é uma representação da resposta da pressão à substituição do combustível B0 pela série B2, B5, B15, B20, B100, (partindo do estado estacionário em B0).

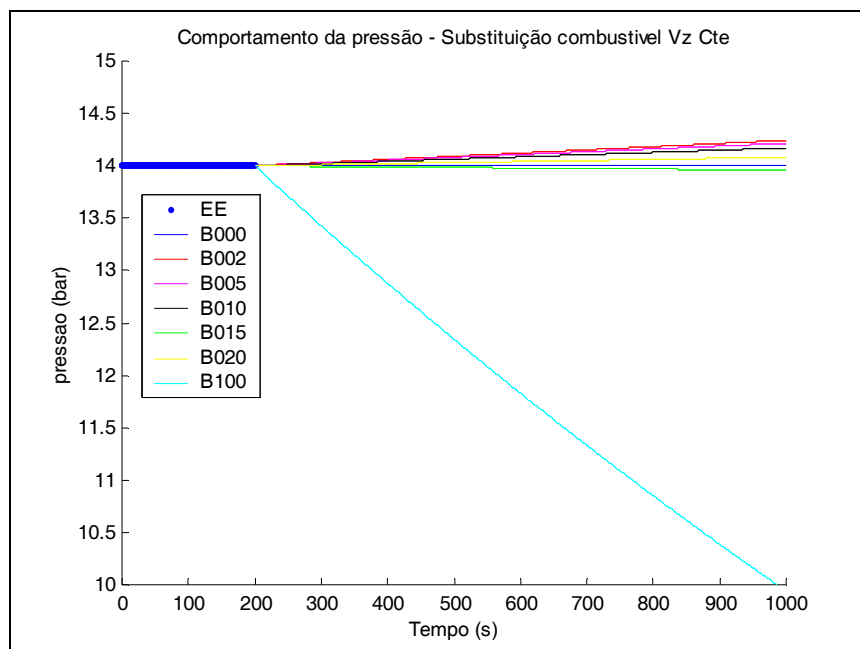


Figura 43: Pressão para uma mesma abertura de válvula (B0-B100)

No caso extremo, onde os consumos de vapor e combustível são máximos, a energia requerida para o estado estacionário é de 430776 J/s. Se for utilizado B0, a

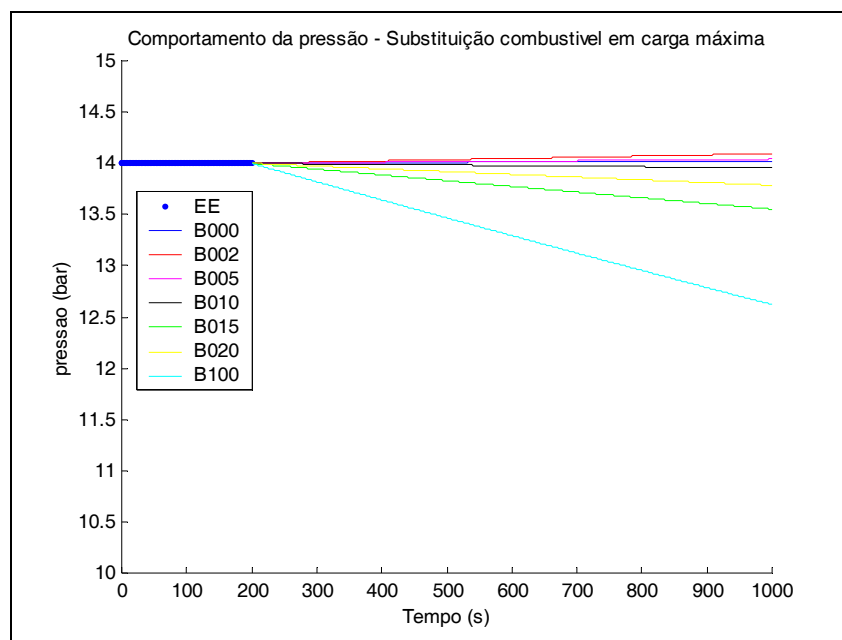


vazão requerida de combustível será de 34,68 kg/h e usando B100 a vazão requerida será de 40,51 kg/h.

Aqui também, de acordo com a estrutura de controle da figura 40, no caso de uso do B100, será necessário aumentar a vazão de combustível em quantidade suficiente para suprir a energia requerida que manterá a pressão dentro das especificações de uso.

O controlador deverá comandar a abertura da válvula para 40,51 kg/h e igualmente à afirmação anterior, não seria necessário fazer a troca da válvula, pois mesmo no caso extremo a válvula ainda possui capacidade suficiente para atender a vazão requerida.

A figura 44 é a representação do sistema com consumo máximo de vapor.



**Figura 44: Comportamento da pressão para consumo máximo de combustível (B0-B100)**

Nos dois casos, constata-se que não é necessário fazer a troca da válvula de controle de vazão de biodiesel.

## 5.4 CONTROLE DE EXCESSO DE AR EM CALDEIRAS

Conforme exposto nos itens introdutórios deste trabalho, o controle de excesso de ar na caldeira é necessário para garantir uma combustão completa e eficiente sob o ponto de vista energético, sob o ponto de vista de segurança das pessoas e sob o ponto de vista de proteção ao meio ambiente.

Um dos objetivos deste trabalho é o de avaliar o efeito do uso dos diferentes combustíveis na estequiometria da combustão. Neste tópico, serão abordadas as questões relativas ao controle de excesso de ar enfatizando os tipos de arranjos possíveis para aperfeiçoar o referido controle.

### 5.4.1 OBTENÇÃO DA RAZÃO TEÓRICA AR-COMBUSTIVEL-CASO DO BIODIESEL DE SOJA

A estequiometria de uma reação está intimamente relacionada com a natureza dos reagentes. Assim, havendo troca de combustíveis, o suprimento de ar para a combustão deve ser ajustado para o novo combustível.

Partindo do balanço estequiométrico de uma reação com um biodiesel de soja com a composição citada em 2.3.2, pode-se obter a quantidade de ar estequiométrico necessário para consumir a totalidade do biodiesel presente em um mol de amostra:

12% de ester do ácido graxo palmítico -  $C_{15}H_{31}COOC_2H_5$

4% de ester do ácido graxo esteárico -  $CH_3(CH_2)_{16}COOC_2H_5$

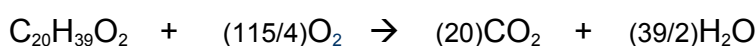
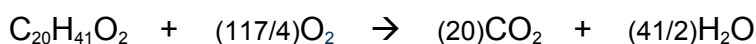
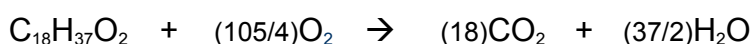
26% de ester do ácido graxo oléico -  $C_{17}H_{33}COOC_2H_5$

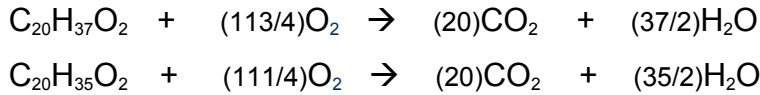
53% de ester do ácido graxo linoléico -  $C_{17}H_{31}COOC_2H_5$

5,5% de ester do ácido graxo linolênico -  $C_{17}H_{29}COOC_2H_5$

Para efeito de fechamento de balanço, será considerado 5% de ester do ácido graxo linolênico.

Assim, fazendo a balanço estequiométrico das reações dos compostos presente em um biodiesel de soja, pode-se obter a razão combustível-ar para a mistura.





O quadro 8 representa as quantidades de reagentes e oxigênio para uma combustão completa. Para o cálculo, foi considerada a proporção de cada componente no biodiesel.

**Quadro 8: Balanço estequiométrico de uma amostra de biodiesel**

Ester	Presença na mistura (%)	Massa de reagente (gmol)	Oxigênio requerido (gmol)
Palmítico	12	34,2	100,8
Estearico	4	12,52	37,44
Oléico	26	80,86	239,2
Linoléico	53	163,77	479,12
Linolênico	5	15,35	44,4
Total	100	306,7	900,96

Considerando uma proporção mássica de 23g de O<sub>2</sub> para 77g de N<sub>2</sub> no ar, pode-se calcular a quantidade de ar requerida para a combustão completa desta mistura:

$$massa\_total\_de\_ar(g) = \frac{QtdeO_2Total(g) * QtdeArBase(g)}{QtdeO_2noar(g)} \quad \text{Eq 83}$$

Substituindo os valores totais do quadro anterior, tem-se:

$$massa\_total\_de\_ar(g) = \frac{900,96(g) * 100(g)}{23(g)} = 3917,22g$$

Dividindo a massa total de ar requerida pela quantidade de reagente, obtêm-se a razão ar-combustível para o biodiesel de soja:

$$RazaoArCombustivel = \frac{3917,22}{306,70} = 12,77(g/g)$$

Este valor corrobora com o combustível teórico proposto por Perry (1997), que é de 12,78 kg de ar para 1 kg de combustível (apresentado em 2.4.1).

Em Perry (1973), encontram-se referências à proporção entre combustível e ar para uma combustão eficiente. Os valores de referências variam de acordo com o combustível. Para carbono puro a razão é de 11,53 kg de ar / 1kg de combustível. Para o metano, a razão é de 17,27 kg de ar / 1kg de combustível. Com estes valores é possível propor a curva de combustão característica para o combustível.

Na prática a curva deve ser levantada na própria caldeira fixando-se demanda de vapor, pressão de trabalho, nível de tubulão. Deste ponto em diante, coleta-se a vazão de ar para uma vazão de combustível fixada, tendo como parâmetros ótimos as concentrações dos gases efluentes e a qualidade da chama. Este último é um parâmetro qualitativo e variável uma vez que requer fator humano de comparação. A figura 45 é a representação de curva de combustão do metano, do carvão e do biodiesel de soja. As curvas de combustão do metano e do carvão (carbono) foram construídas a partir dos valores obtidos de Perry (1973), a curva de combustão do biodiesel de soja é uma contribuição deste trabalho.

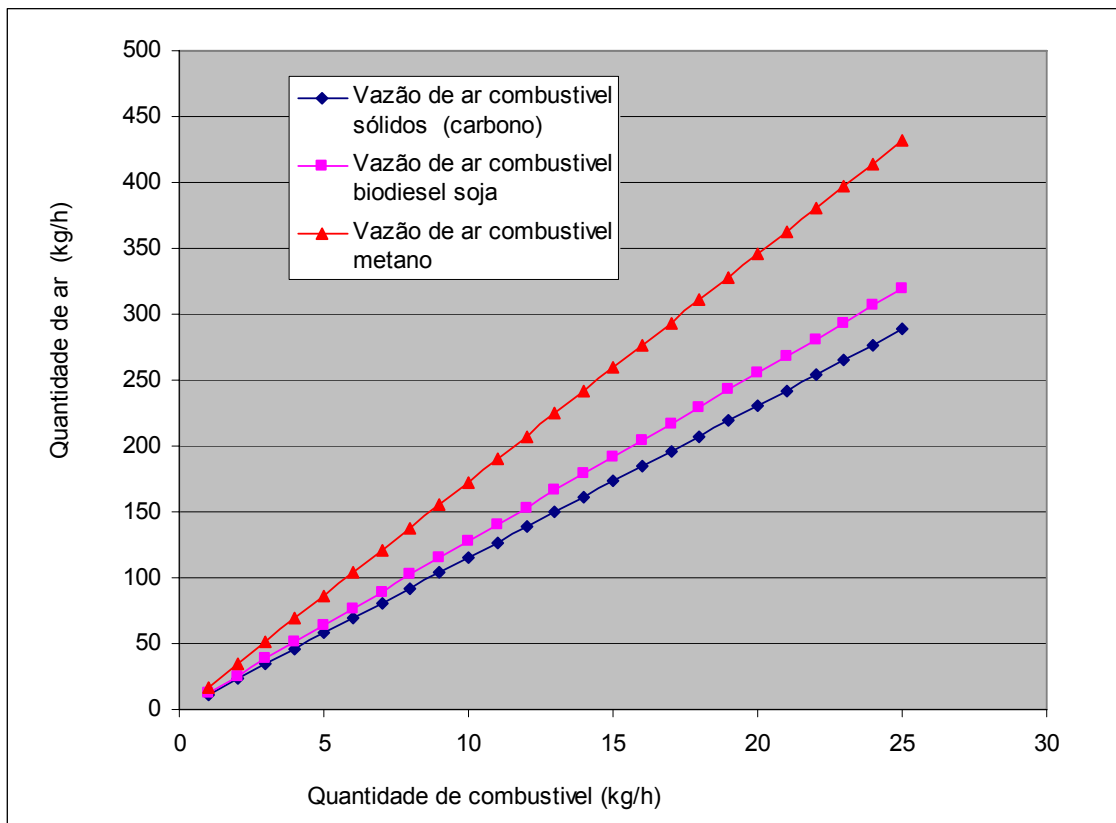


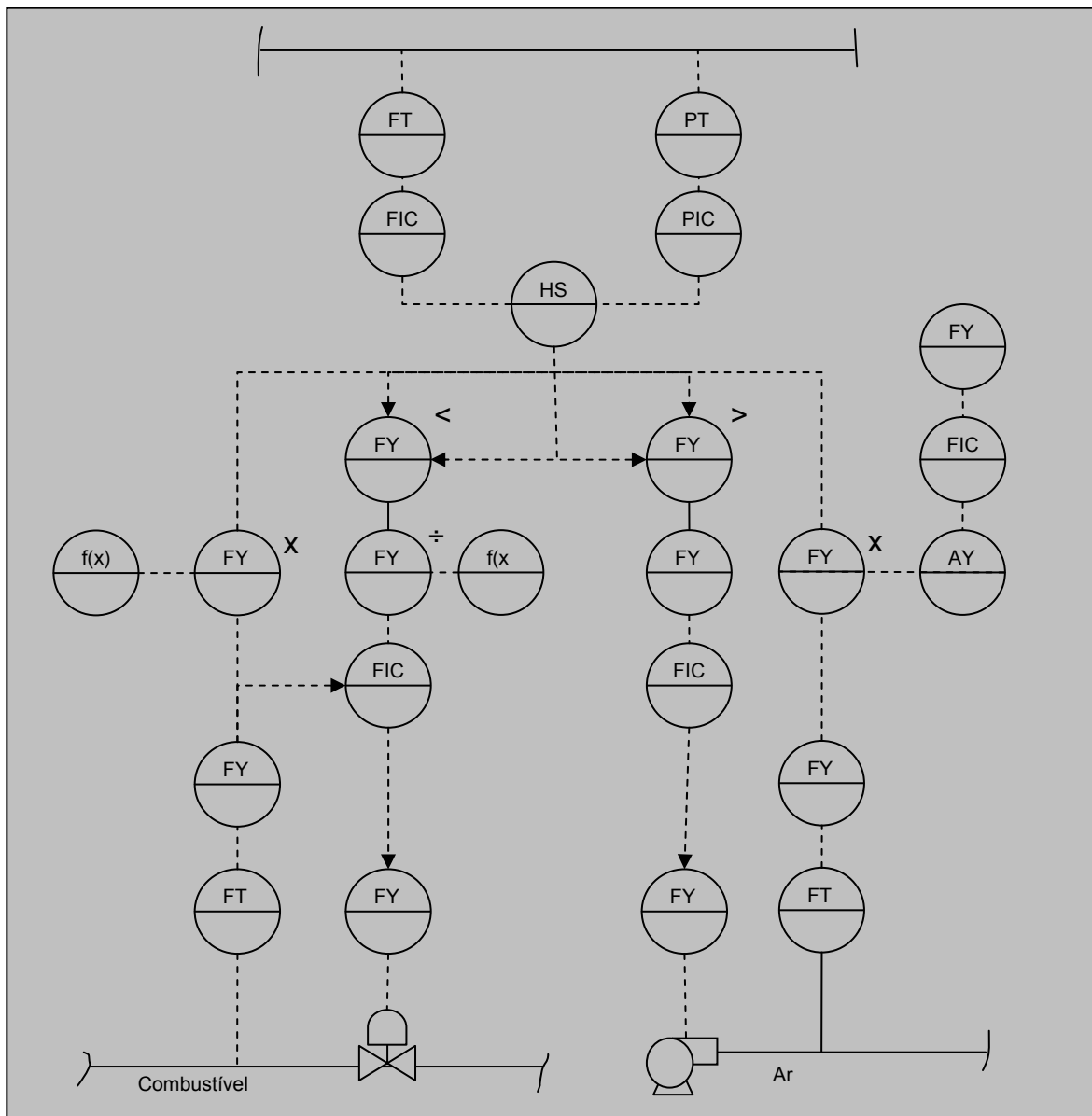
Figura 45: Relação Ar combustível para vários tipos de combustíveis

#### 5.4.2 UM CONTROLADOR DE EXCESSO DE AR PARA DIFERENTES COMBUSTÍVEIS EM UMA CALDEIRA - USO DE BIODIESEL

De posse da curva de combustão é possível calcular a quantidade de ar necessária para suprir a combustão, em função do combustível utilizado. Esta quantidade calculada será a saída para um posicionador de um “damper”, que alimentará fornalha com o ar necessário para a combustão.

O valor da quantidade de ar obtido deve ser considerado como uma quantidade “grosseira”, e necessita ser ajustado por uma retroalimentação da medição da concentração dos gases de combustão.

O item 2.4.2 expõe a conveniência de se usar o analisador de CO, que é independente do tipo de combustível utilizado. Esta medição pode ser incluída no arranjo do controlador para fazer o ajuste fino da combustão. Conforme esquema na figura 46, adaptado de Bega, (2003):



**Figura 46: Controle de combustão com analisador de efluentes gasosos**

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 6.1 CONCLUSÕES

No estado estacionário o modelo apresentou comportamento adequado, isto é, o valor da pressão permaneceu inalterado ao longo do tempo.

O modelo apresenta comportamento linear quanto ao consumo de vapor, pois quando submetido a perturbações de sinais opostos nesta variável, apresentou resposta correspondentes às perturbações.

Apesar da vazão de água de alimentação estar presente como termo da equação do modelo, um degrau de 10% no seu valor não provocou perturbações significativas no valor da pressão.

Da mesma maneira, a variação em 10% na entalpia da água de alimentação não provoca variação significativa na pressão do sistema.

Partindo de diferentes pressões iniciais, o sistema apresenta resposta não linear para perturbação na vazão mássica de vapor.

O modelo de pressão apresenta resposta integradora ou capacitiva para os degraus nas energias fornecidas à caldeira e o ganho do processo é variável para cada degrau em cerca de 5%.

O modelo baseado em função de transferência é consideravelmente representativo com relação ao modelo baseado em variáveis de estado.

O sistema de controle proposto baseado no modelo de função de transferência apresentou comportamento adequado. Para os parâmetros de sintonia propostos para uma variação na carga o sistema retornou para o *setpoint* algum tempo depois e para variações no *setpoint*, o sistema respondeu apropriadamente e atingiu o valor desejado dentro de um período de tempo.

Com relação à razão ar-combustível, constatou-se que o valor estequiométrico ficou entre o inferior do carvão puro e o superior do gás metano. Constatou-se também que o valor obtido através do balanço estequiométrico corrobora com o valor obtido a partir do cálculo teórico presente na literatura.

Para operar dentro das condições de contorno do modelo, não será necessário substituir a válvula que controla a vazão de combustível caso seja trocado diesel por biodiesel.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Em função de limitações práticas, para este trabalho não foi possível testar o modelo e estratégia de controle em uma caldeira real, assim como próximo passo, recomenda-se validação do modelo em caldeiras reais.

A curva de combustão deste trabalho foi obtida para um único tipo de biodiesel, deste modo, pode não ser representativa para outros combustíveis de origem vegetal, notadamente de composição variável. Assim um trabalho importante é a obtenção de curvas de combustão para óleos biodiesel de origens diferentes.

Outro aspecto em relação à curva de combustão é quanto à mistura biodiesel x diesel. É relevante a obtenção da curva de combustão para combustíveis com diferentes composições de mistura de diesel e biodiesel.

Com relação à viscosidade do biodiesel, este trabalho foi focado no efeito da viscosidade na vazão da válvula, mas um aspecto importante que não foi visitado é a importância da viscosidade na combustão. Assim, um enfoque recomendado para trabalhos futuros, é estudar o efeito da referida propriedade na eficiência combustão. Este trabalho não considerou aspectos econômicos do uso do biodiesel em caldeiras, mas a partir de constatações do capítulo de controle, é possível quantificar e diferenciar aspectos econômicos entre o diesel e biodiesel à luz do controle de pressão.

O presente trabalho não adentrou na questão da eficiência da caldeira em função do uso do biodiesel, este estudo deve ser feito em um trabalho futuro, pois entende-se ser de relevância significativa.

O glicerol, um dos subprodutos da produção do biodiesel, pode ser avaliado sob o ponto de vista energético, uma vez que o poder calorífico deste composto é relativamente alto.

Finalmente, como sugestão recomenda-se ampliar faixa de pressão da modelagem, pois o trabalho se restringiu a uma faixa específica de pressão e não abrangente nos modelos empíricos de propriedades termodinâmicas da água e do vapor.

## BIBLIOGRAFIA

- ALVES, Josias Manoel. Paradigma técnico e co-geração de energia com bagaço de cana de açúcar em Goiás.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/>>. Acesso em: 21 Nov. 2009.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Power Test Code 4.1 Steam-Generating Units. PTC 4.1. 1964.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Caldeiras estacionárias elétricas a vapor - Inspeção de segurança. ABNT NBR 13203:2000. Rio de Janeiro. 2000.
- ASTROM, K.J.; AGGLUND, T.H. The future of PID control. Control Engineering Practice, v.9, n.11, p. 1163-1175, 2001.
- ÅSTRÖM, K. J.; BELL, R.D. Drum Boiler Dynamics. Automatica, v.36, n.3, p. 363-378, 2000.
- ÅSTRÖM, K. J.; EKLUND, K. A simplified non-linear model of a drum boiler-turbine unit. International Journal of Control, v.16, n.1, p. 145-169, 1972.
- BABCOCK e WILCOX C. Steam: Its Generation and Use. 36th ed. New York: Merchant Books , 2007.
- BAUKAUL Jr., C. E. The John Zink Combustion Handbook. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- BEGA, E. A. Instrumentação aplicada ao controle de Caldeiras. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciencia, 2003.
- BEQUETTE B. W. Process Dynamics, Modeling, Analysis and simulation. Upper Saddle River: Prentice Hall , 2003.
- BOLTON, W. Engenharia de controle. São Paulo: Makron Books, 1995.
- BOZBAS, K. Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.12, n.2, p. 542-552, 2005.
- BRANAN, C. Rules of thumb for chemical engineers. 4. ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2007.
- CAMPOS, M.C.M.M.; TEIXEIRA, H. C. G. Controle Típicos de equipamentos Industriais, 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blucher, 2006.



CARDOSO, J. J. F.; COSTA, A. A.; ALMEIDA, M. A. P. MELO; C. K., CARDIAS, H. T. C. Caracterização do biodiesel metílico produzido a partir de óleo babaçu e suas misturas com o diesel de petróleo. In. CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BIODIESEL, 1,2006. p302-307 Disponível em [www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006](http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006). Acesso em 11 out. 2009.

CHAU, P. C. A first Course with Matlab. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

CHAWDHRY, P.K.; HOGG, B.W. Identification of boiler models. IEEE Proc. Control Theory Appl., v.136, n° 5, p. 261-271, 1989.

CHIDAMBARAM M.; R. P. SREE. A simple method of tuning PID controllers for integrator/dead-time processes. Computers and Chemical Engineering, v.27, n.2, p. 211-215, 2003.

COUGHANOWR, D. R.; KOPEL, L. B. Analise e controle de processo. Rio de Janeiro: editora Guanabara, 1986.

DABDOUB, M.J.; BRONZELI, J. L.; RAMPIN, M. A. Biodiesel: visão crítica do status atual e perspectivas na academia e na indústria. Química Nova, v.32, n.3, p. 776-792, 2009.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Modern control systems. 11th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.

DUKELOW, S. G. The control of boilers. 2. ed. [S.I.]: ISA-Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1991.

ELMEGAARD, B. Simulation of Boiler Dynamics - Development, Evaluation and Application of a General Energy System Simulation Tool. 1999. 322 f. Ph.D. Thesis, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, 1999.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja — Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. Química Nova, v.28, n.1, p. 19-23, 2005.

GAMBETTA, R. Modelagem e simulação de reatores em leito fluidizado. 2001. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GILMAN G.F. Boilers control systems engineering. [S.I.]: ISA-Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005.

HARRIS, T. J.; SEPPALA, C. T.; DESBOROUGH, L. D. A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems. Journal of Process Control, v.9, n.1, p. 1-17, 1999.

HESELTON, K. E. Boiler Operator's Handbook. 1. ed. [S.I.]: Fairmont Press, 2004.

HOUTZ, A. D. Cascade, Feed Forward and Boiler Level Control. 2006. Disponível em: <http://www.controlguru.com/wp/p44.html>. Acesso em: dez. 2008.

JANA, A. K. Chemical Process Modelling & Computer Simulation. New Delhi: PHI Learning , 2008.

KOHAN, A. L. Boiler Operator's Guide. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill , 1997.

KREYSZIG, E. Advanced engineering Mathematics. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1988.

KRISTENSEN, J. S.; ØSTERGAARD, T. Generic boiler model - a summary. Technical University of Denmark, Lyngby. 2007. Disponível em: <http://www.efpe.org/DownloadThesis.asp?file=3&thesis=77>. Acesso em: out.2009.

LEE, S. W.; HERAGE, T.; YOUNG B. Emission reduction potential from the combustion of soy methyl ester fuel blended with petroleum distillate fuel. Fuel, v.83, n.11-12, p. 1607-1613, 2004.

Li, D.; CHEN, T.; MARQUEZ, H.J.; GOODEN, R.K. Life extending control of boiler-turbine systems via model predictive methods. Control Engineering Practice, v.14, n.4, p. 319-326, 2006.

LIMA, J. R. O.; SILVA, R. B.; SILVA, C. C. M.; SANTOS, L. S. S.; SANTOS Jr., J. R.; MOURA, E. M.; MOURA, C. V. R. Biodiesel de babaçu obtido por via etanólica. Química Nova, v.30, n.3, p. 600-603, 2007.

LIPTÁK, B. G. Instrument Engineers' Handbook: Process control and optimization. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

LOBO, L. F. L. Cálculo das Propriedades Físico-Químicas das Principais Matérias-Primas e Produtos da Reação de Obtenção do Biodiesel. 2007. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MALEK, M. A. Power boiler design, inspection, and repair. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill , 2004.

MARQUES, F. A. P. Modelagem e controle de nível do tubulão de uma caldeira de vapor aquatubular de uma refinaria de petróleo. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MULLINGER, P.; JENKINS, B. Industrial and process furnaces. [S.l.]: Butterworth-Heinemann , 2008.

NASCIMENTO, M. G.; COSTA NETO, P. R.; MAZZUCO, L. M. Biotransformação de óleos e gorduras. Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento, n.19, p. 28, 2001

PALMA, R. A. Uma metodologia de suporte a Hardware-in-the-loop-Simulation para modelagem de uma caldeira a gás. 2006. 88 f. Dissertação (mestrado) - Setor de

Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

PANG-CHIA C.; SHAMMA, J. S. Gain-scheduled  $l_1$ -optimal control for boiler-turbine dynamics with actuator saturation. *Journal of Process Control*, v.14, n.3, p. 263-277, 2004.

PARENTE, E.J. de S., 2003. Biodiesel - Uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza, CE. Disponível em: <http://www.xitizap.com/Livro-Biodiesel.pdf>. Acesso em: Maio de 2007

PERRY, R. H.; GREEN D. H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7. ed. [S.I.]: Mc. Graw Hill, 1997.

PERRY, R. J.; CHILTON, C. H. *Chemical Engineers Handbook*. 5th ed.[S.I.]: Mc. Graw Hill, 1973.

PINHEIRO, P. C. C.; VALLE, R. M. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar. In: II CONGRESSO DE EQUIPAMENTOS E AUTOMAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA, 09-11 Agosto 1995, Rio de Janeiro, RJ, Anais... Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e Produtos Derivados, 1995, p.157-162.

PROSAD, G.; SWEDENBANK E.; HOGG, B. W. A Local Model Networks Based Multivariable Long-Range Predictive Control Strategy for Thermal Power Plants. *Automatica*, v.34, n.10, p. 1185-1204, 1998.

RIGGS, J. B. *Chemical process control*. Lubbock: Ferret Publishing, 1999.

SANTOS, A. R. M. Estudo de um dispositivo controlador de fluxo de fluidos para ser instalado em uma usina termelétrica. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SIGHIERI L.; NISHINARI A. *Controle Automático de Processos Industriais Instrumentação*. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1997.

SKOGESTAD, S. Probably the best simple PID tuning rules in the world. in: AIChE Annual Meeting, Reno, NV, USA, November 2001.

SMITH, C. A; CORRIPIO, A. B. *Principles & Practice Of Automatic Process Control*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2005.

SOUZA, J. S. I. *Enciclopédia agrícola brasileira*. 1. ed. São Paulo: EDUSP, 2000.

SOSA, I.R.H. Sistemas multiagentes para controle inteligente da caldeira de recuperação. 2007. 176 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, 2007

STOMBAUGH, T., et al., Biodiesel FAQ, 2006. Issued 4-2206, Dep. of Biosystems & Agricultural Engineering, University of Kentucky, U.S.A. Disponível em:

<http://www.energy.ky.gov/NR/rdonlyres/AFF33807-0941-477A-A5AE-1AD9C9D9C104/0/biodieselfaqsAEN90.pdf>. Acesso em: out. 2009.

TAN, W.; MARQUEZ, H. J.; CHEN, T.; LIU, J. Modelling and dynamic simulation of processes with 'MATLAB'. An application of a natural gas installation in a power plant. *Journal of Process Control*, v. 15, n. 8, p. 883-891, 2005.

TAT, M. E.; WANG, P. S.; VAN GERPEN, J. H.; CLEMENTE, T. E. Exhaust Emissions from an Engine Fueled with Biodiesel from High-Oleic Soybeans. *J Am Oil Chem Soc.*, v. 84, n. 9, p. 865-869, 2007.

THE INSTRUMENTATION, SYSTEMS, AND AUTOMATION SOCIETY-ISA. Instrumentation Symbols and Identification. ISA-5.1-1984 (R1992).

Valdman, B; Folly, R.; Salgado, A. Dinâmica, Controle e Instrumentação de Processos 1. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008

[www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)

[www.isa.org](http://www.isa.org)

[www.eq.ufrj.br/links/h2cin](http://www.eq.ufrj.br/links/h2cin)

[www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/the-boiler-house/water-tube-boilers.asp](http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/the-boiler-house/water-tube-boilers.asp)

[www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

## APENDICES

### APENDICE A

Memória de cálculo para obtenção da massa de reagente presente em uma amostra de biodiesel:

Ester	Presença na mistura (%)
Palmítico	12
Estearico	4
Oléico	26
Linoleico	53
Linolenico	5
Total	100

Calculo da massa dos ésteres:

Éster palmítico ( $C_{18}H_{37}O_2$ ):

18 átomos de carbono

37 átomos de hidrogênio

2 átomos de oxigênio

massa total no biodiesel:  $(18 \cdot 12 + 37 \cdot 1 + 2 \cdot 16) \cdot 12\% = 34,2 \text{ g}$

Éster esteárico ( $C_{20}H_{41}O_2$ ):

20 átomos de carbono

41 átomos de hidrogênio

2 átomos de oxigênio

massa total no biodiesel:  $(20 \cdot 12 + 41 \cdot 1 + 2 \cdot 16) \cdot 4\% = 12,52 \text{ g}$

Éster Oléico ( $C_{20}H_{39}O_2$ ):

20 átomos de carbono

39 átomos de hidrogênio

2 átomos de oxigênio

massa total no biodiesel:  $(20 \cdot 12 + 39 \cdot 1 + 2 \cdot 16) \cdot 26\% = 80,86 \text{ g}$

Éster Linoleico ( $C_{20}H_{37}O_2$ ):

20 átomos de carbono

37 átomos de hidrogênio

2 átomos de oxigênio

massa total no biodiesel:  $(20 \cdot 12 + 37 \cdot 1 + 2 \cdot 16) \cdot 53\% = 163,77 \text{ g}$

Linolenico ( $C_{20}H_{35}O_2$ ):

20 átomos de carbono

35 átomos de hidrogênio

2 átomos de oxigênio

massa total no biodiesel:  $(20 \cdot 12 + 35 \cdot 1 + 2 \cdot 16) \cdot 5\% = 15,35 \text{ g}$

Massa total do combustível: 306,7 g.

## APENDICE B

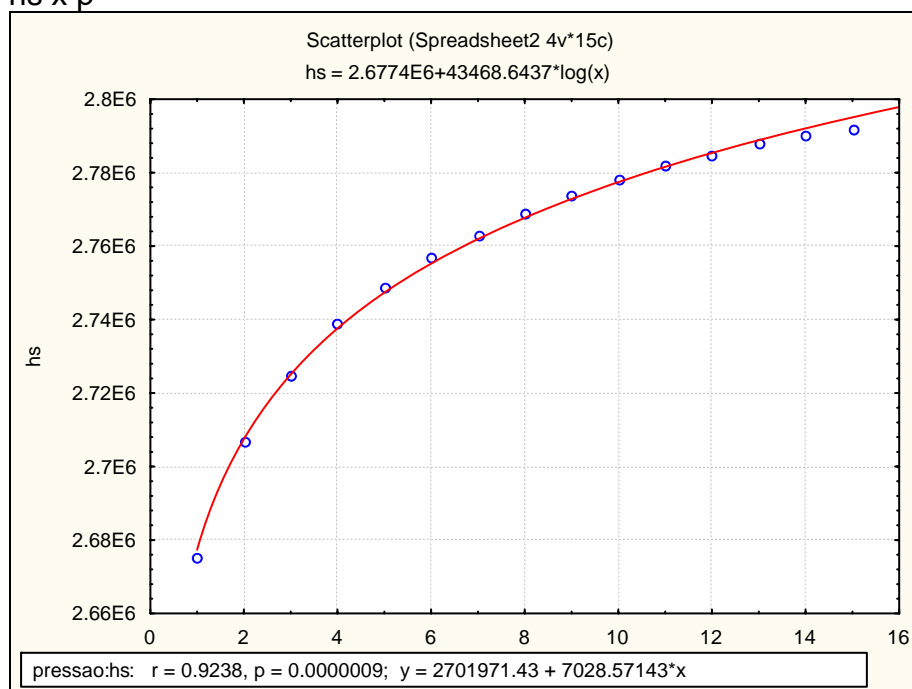
Obtenção das curvas das propriedades termodinâmicas do vapor e da água.

Será utilizado a mesma base de dados usado no trabalho de Palma (2006) e o software Statistica®.

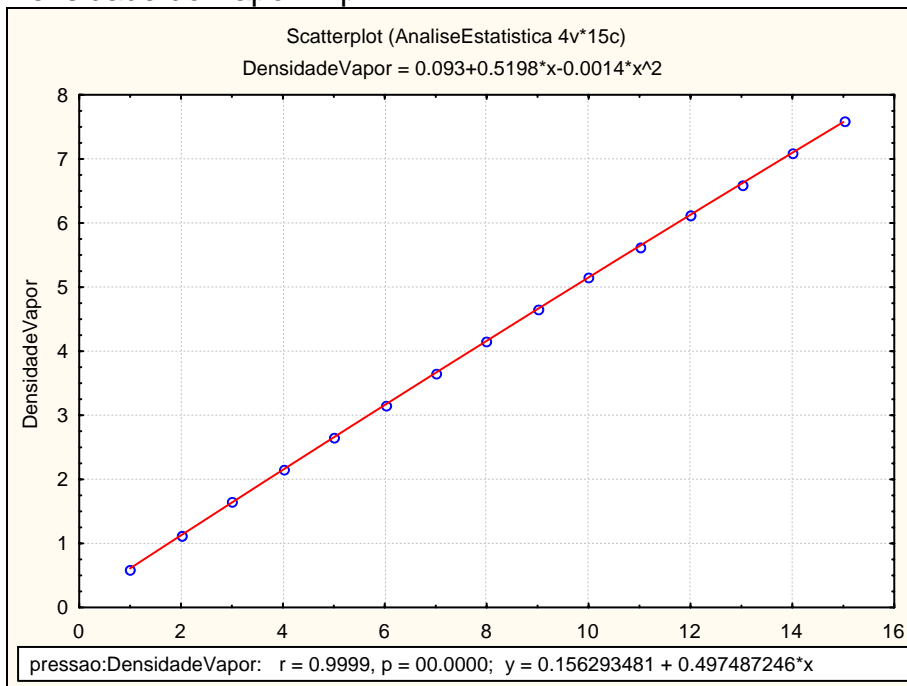
Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Volume Específico (m <sup>3</sup> /kg)	Entalpia (kJ/kg)
1	99,62	1,694	2675
2	120,20	0,8857	2707
3	133,50	0,6058	2725
4	143,60	0,4625	2739
5	151,90	0,3749	2749
6	158,90	0,3157	2757
7	165,00	0,2729	2763
8	170,40	0,2404	2769
9	175,40	0,215	2774
10	179,90	0,1944	2778
11	184,10	0,1775	2782
12	188,00	0,1633	2785
13	191,60	0,1513	2788
14	195,10	0,1408	2790
15	198,30	0,1318	2792

Propriedades do vapor:

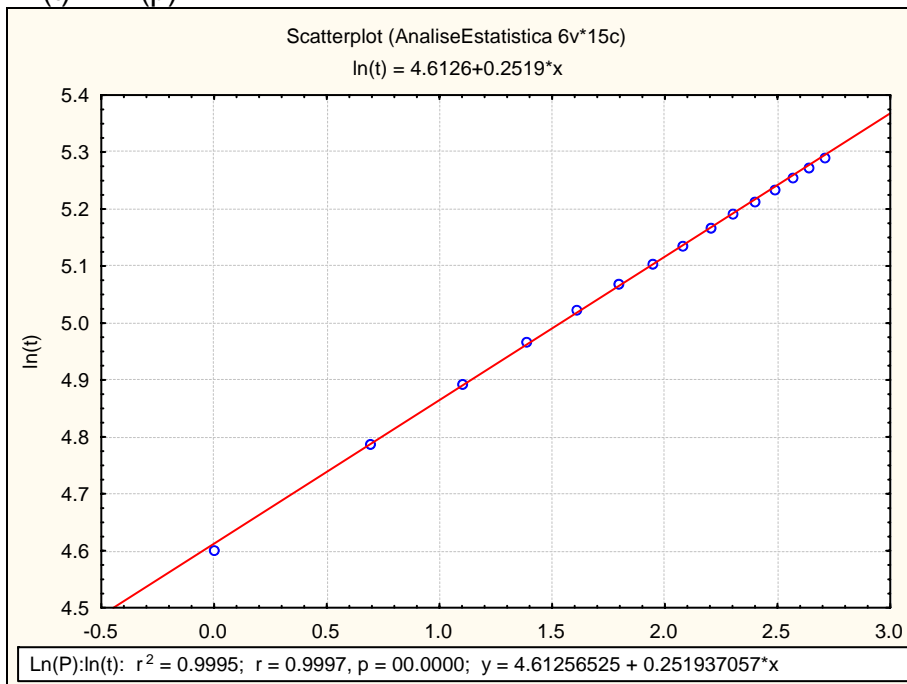
hs x p



### Densidade do Vapor x p



### Ln(t) x ln (p)



No caso anterior é necessário obter os valores dos parâmetros a e b uma vez que o modelo proposto foi :

$$t = ap^b$$

Através de manipulação matemática, obtêm-se uma equação linear da seguinte forma:



$$\ln(t) = \ln(a) + b \cdot \ln(p)$$

No gráfico anterior,  $b=0,2519$ , então

$\ln(a)=4,6126$ , o que implica  $\ln(a)=4,6126 = 100.7457$

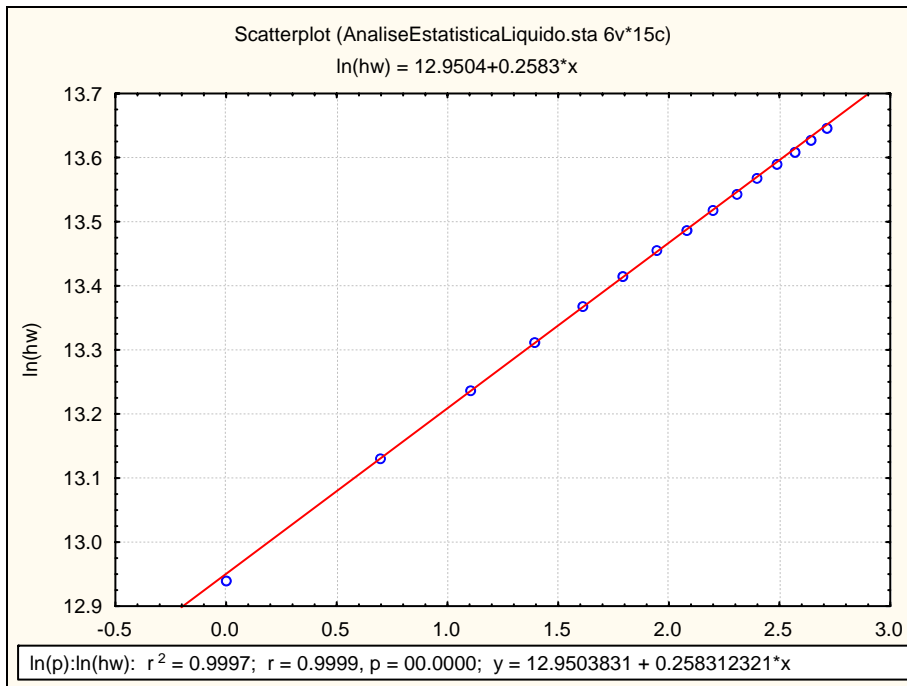
logo, a equação fica:

$$t = 100.7457 p^{0,2519}$$

Propriedades do líquido:

Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Volume (m³/kg)	Hs (kJ/kg)
1	99,62	2675000	1,694
2	120,2	2707000	0,8857
3	133,5	2725000	0,6058
4	143,6	2739000	0,4625
5	151,9	2749000	0,3749
6	158,9	2757000	0,3157
7	165	2763000	0,2729
8	170,4	2769000	0,2404
9	175,4	2774000	0,215
10	179,9	2778000	0,1944
11	184,1	2782000	0,1775
12	188	2785000	0,1633
13	191,6	2788000	0,1513
14	195,1	2790000	0,1408
15	198,3	2792000	0,1318

$\ln(hw) \times \ln(p)$ :



modelo proposto foi :

$$t = ap^b$$

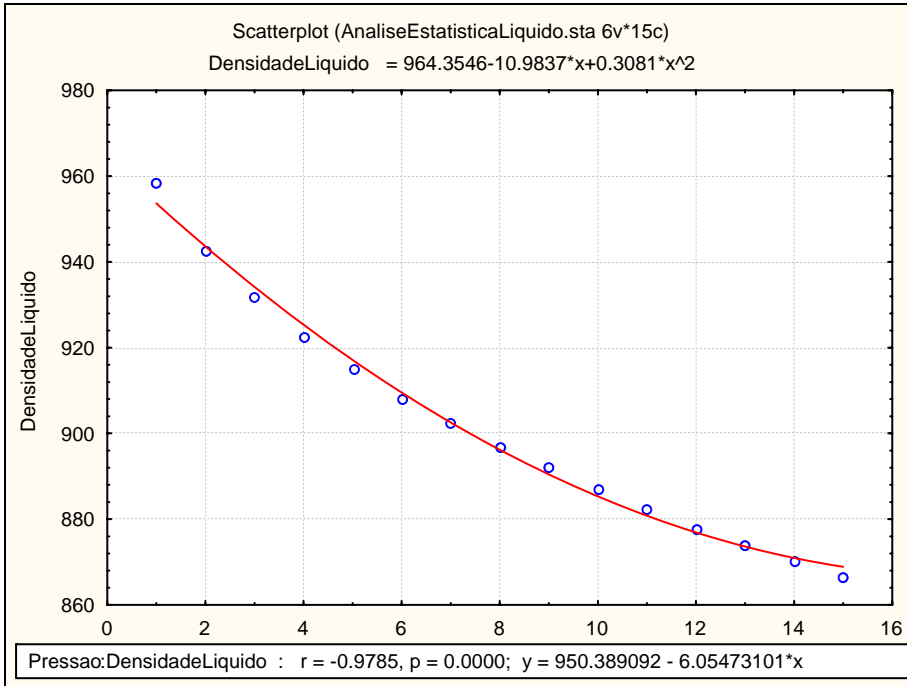
Através de manipulação matemática, obtêm-se uma equação linear da seguinte forma:

$$\ln(t) = \ln(a) + b \cdot \ln(p)$$

No gráfico anterior,  $b=0,2583$ , então  $\ln(a)=6,0426$ , o que implica  $\ln(a)= 6,0426=100.7457$  logo, a equação fica:

$$t = 100.7457 p^{0,2519}$$

Pressão x densidade do liquido



## APENDICE C

### SUBROTINA EM MATLAB®

Simulação no estado estacionário:

```
clear;
ms=0.16;
mw=0.16;
Vt=2.8038;
Vwt=2.38;
Vst=0.42;
mt=1000;
cp=448;
hf=103900;
t = 0.0 : 1 : 1000.0;
p0=14;
Q=[429776];
cor = 'brmkgyc';
leg = ['Estado estacionario'];
for aux = 1 : length(Q)
[t,p] = ode45('pressao_estado_estacionario',t,p0,[],...
[ms mw Q(aux) Vt Vwt Vst mt cp hf]);
% Visualização da simulação
figure(1);
hold on;
plot(t,p(:,1),cor(aux));
titulo=strcat('comportamento da pressão (caso p0=',num2str(p0),')');
title(titulo);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('pressao (bar)');
AXIS ([0 1000 13 15])
end;
figure(1)
legend(leg)
hold off
```

Função `pressao_estado_estacionario`

```
function dp = pressao_estado_estacionario(t,p,flag,par);
ms = par(1);
mw = par(2);
Q = par(3);
Vt = par(4);
Vwt = par(5);
Vst = par(6);
mt = par(7);
cp = par(8);
hf = par(9);

%if t >= 200
%ms = .2;
%end;
```

```

hs=43469*log(p)+2675000;
hw=420998*p^(0.2583);
ros=-0.0014*p^2+0.5198*p+0.093;
row=0.3081*p^2-10.984*p+964.35;
ts=100.67*p^(0.2522);
dhs=43469/p;
dhw=108743.7834*p^(-0.7417);
dros=-0.0028*p+0.5198;
drow=0.6162*p-10.984;
dts=25.388974*p^(-0.7478);
hc=hs-hw;
e1=hc*Vst*dros+ros*Vst*dhs+row*Vwt*dhw+mt*cp*dts-Vt;

dp=(Q-mw*(hw-hf)-ms*hc)/e1;

dp = dp(:);

```

Programa para Simulação Degrau no consumo de vapor:

```

clear;
ms=0.16;
mw=0.16;
Vt=2.8038;
Vwt=2.38;
Vst=0.42;
mt=1000;
cp=448;
hf=103900;
t = 0.0 : 1 : 1000.0;
p0=14;

Q=[429776];
cor = 'brmkgyc';

for aux = 1 : length(Q)
[t,p] = ode45('pressao_degrau_ms',t,p0,[],...
[ms mw Q(aux) Vt Vwt Vst mt cp hf]);
% Visualização da simulação
figure(1);
hold on;

leg=('pressao');

subplot(2,1,1);
plot(t,p(:,1),cor(aux));
titulo=strcat('comportamento da pressão ao degrau');
title(titulo);
ylabel('pressao (bar)');
AXIS ([0 1000 13 15])
legend(leg)

```

```

for i = 1 : 1001
    ms_aux(i)=ms;
if i >= 200
    ms_aux(i)=ms*1.1;
    ms_aux=transp(ms_aux);
end;
end;

leg=('vazão de vapor');
subplot(2,1,2);
plot(t,ms_aux,cor(aux));
titulo=strcat('Degrau de 10% na massa de vapor');
title(titulo);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('ms (kg/s)');
AXIS ([0 1000 0.15 .2])
legend(leg)

end;
figure(1)
hold off

```

Função de Degrau no consumo de vapor:

```

function dp = pressao_degrau_ms(t,p,flag,par);
ms = par(1);
mw = par(2);
Q = par(3);
Vt = par(4);
Vwt = par(5);
Vst = par(6);
mt = par(7);
cp = par(8);
hf = par(9);

if t >= 200
ms = 1.1*0.16;
end;
hs=43469*log(p)+2675000;
hw=420998*p^(0.2583);
ros=-0.0014*p^2+0.5198*p+0.093;
row=0.3081*p^2-10.984*p+964.35;
ts=100.67*p^(0.2522);
dhs=43469/p;
dhw=108743.7834*p^(-0.7417);
dros=-0.0028*p+0.5198;
drow=0.6162*p-10.984;
dts=25.388974*p^(-0.7478);
hc=hs-hw;
e1=hc*Vst*dros+ros*Vst*dhs+row*Vwt*dhw+mt*cp*dts-Vt;

dp=(Q-mw*(hw-hf)-ms*hc)/e1;

dp = dp(:);

```

### Programa para Simulação Degrau na energia fornecida

```

clear;
ms=0.16;
mw=0.16;
Q=429776;
Vt=2.8038;
Vwt=2.38;
Vst=0.42;
mt=1000;
cp=448;
hf=103900;
t = 0.0 : 1 : 1000.0;
p0=14;

Q=[429776];
cor = 'brmkgyc';

leg = ['Degrau 25% Q'];

for aux = 1 : length(Q)
[t,p] = ode45('pressao_degrau_Q',t,p0,[],...
[ms mw Q Vt Vwt Vst mt cp hf]);
figure(1);
hold on;
plot(t,p(:,1),cor(aux));
titulo=strcat('comportamento da pressão');
title(titulo);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('p (bar)');
AXIS ([0 1000 10 18])
end;
figure(1)
legend(leg)
hold off

```

### Função Degrau na energia fornecida

```

function dp = pressao_degrau_Q(t,p,flag,par);
ms = par(1);
mw = par(2);
Q = par(3);
Vt = par(4);
Vwt = par(5);
Vst = par(6);
mt = par(7);
cp = par(8);
hf = par(9);

if t >= 200
Q = 429776*1.25;
end;

```

```
hs=43469*log(p)+2675000;  
hw=420998*p^(0.2583);  
ros=-0.0014*p^2+0.5198*p+0.093;  
row=0.3081*p^2-10.984*p+964.35;  
ts=100.67*p^(0.2522);  
dhs=43469/p;  
dhw=108743.7834*p^(-0.7417);  
dros=-0.0028*p+0.5198;  
drow=0.6162*p-10.984;  
dts=25.388974*p^(-0.7478);  
hc=hs-hw;  
e1=hc*Vst*dros+ros*Vst*dhs+row*Vwt*dhw+mt*cp*dts-Vt;  
  
dp=(Q-mw*(hw-hf)-ms*hc)/e1;  
  
dp = dp(:);
```



## APENDICE D

Efeito da variação da densidade no cálculo de vazão da válvula:

Considerando a equação de vazão de Campos e Teixeira (2006),

$$W = N \cdot f(a) \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho}$$

Mantendo todos os outros parâmetros constantes e considerando os dados do experimento de Cardoso et al (2006),

Combustível	DIESEL	B100
Massa Específica (a 20°C Kg/m3)	858,1	876,0

Resulta que a relação entre as densidades fica

$$\text{Relação entre as densidades} = \frac{\rho_{biodiesel}}{\rho_{diesel}} = \frac{876,0}{858,1} \cong 1,02$$

$$\rho_{biodiesel} = 1,02 \rho_{diesel}$$

$$W_{diesel} = N \cdot f(a) \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{diesel}}$$

$$W_{biodiesel} = N \cdot f(a) \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{biodiesel}}$$

Dividindo as duas equações entre si, tem-se:

$$\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}} = \frac{N \cdot f(a) \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{biodiesel}}}{N \cdot f(a) \cdot C_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{diesel}}}$$

$$\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}} = \frac{\sqrt{\Delta p \cdot \rho_{biodiesel}}}{\sqrt{\Delta p \cdot \rho_{diesel}}}$$

$$\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}} = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot \rho_{biodiesel}}{\Delta p \cdot \rho_{diesel}}}$$

$$\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}} = \sqrt{\frac{\rho_{biodiesel}}{\rho_{diesel}}}$$

$$\left(\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}}\right)^2 = \frac{\rho_{biodiesel}}{\rho_{diesel}}$$

$$\left(\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}}\right)^2 = \frac{1,02 \rho_{diesel}}{\rho_{diesel}}$$

$$\left(\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}}\right)^2 = 1,02$$

$$\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}} = \sqrt{1,02}$$

$$\frac{W_{biodiesel}}{W_{diesel}} \cong 1,01$$

$$W_{biodiesel} \cong 1,01 W_{diesel}$$

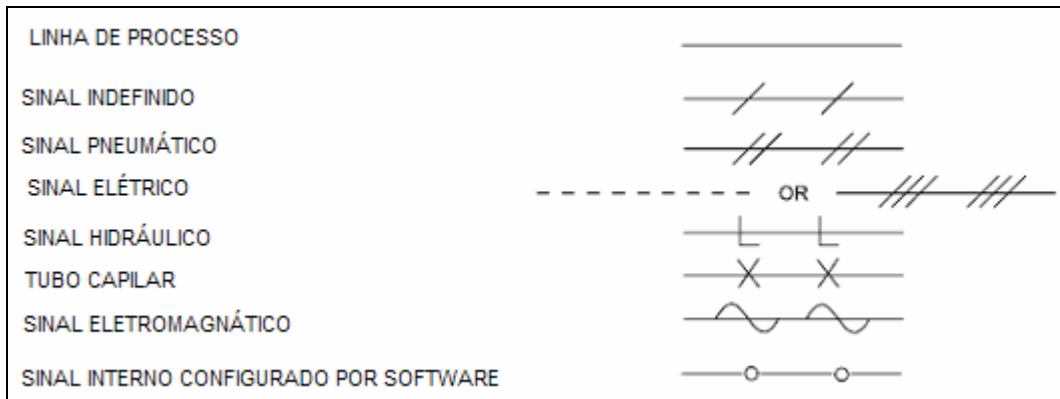
## ANEXOS

### ANEXO A

A seguir o quadro com identificação das variáveis de acordo com norma ISA-5.1-1984 (R 1992)

	Variavel Medida	Modificador	Funções Passivas	Funções de Saída	Modificador
A	Análise		Alarme		
B	Combustão		Definida pelo Usuário	Definida pelo Usuário	Definida pelo Usuário
C	Definida pelo Usuário			Controlador	
D	Definida pelo Usuário	Diferencial			
E	Voltagem		Sensor (Elemento Primário)		
F	Vazão	Razão			
G	Definida pelo Usuário		Janela de Inspeção		
H	Manual				Alto
I	Corrente (Elétrica)		Indicação		
J	Potencia	<i>Scan</i>			
K	Tempo	Frequencia de Mudança		Estação de controle	
L	Nível		<i>Led</i>		Baixo
M	Definida pelo Usuário	Instantâneo			Intermediario
N	Definida pelo Usuário		Definida pelo Usuário	Definida pelo Usuário	Definida pelo Usuário
O	Definida pelo Usuário		Orifício		
P	Pressão		Ponto de Teste		
Q	Quantidade	Integrador, Totalizador			
R	Radiação		Registrador		
S	Velocidade	Segurança		Chave de Posição	
T	Temperatura			Transmissor	
U	Multivariavel		Multifunção	Multifunção	Multifunção
V	Vibração			Valvula	
W	Peso		Poço		
X	Não Classificado	Eixo X	Não classificado	Não Classificado	Não Classificado
Y	Evento, <i>Status</i>	Eixo Y		Relé, Cálculo, Conversor	
Z	Posição, Dimensão	Eixo Z		Posicionador, Atuador	





Representações de tipos conexões entre instrumentos e processo de acordo com norma ISA-5.1-1984 (R 1992)



Representações de símbolos gerais e funções de acordo com norma ISA-5.1-1984 (R 1992)

LOCALIZAÇÃO TIPO/FUNÇÃO	Localização primária *** Normalmente acessível ao operador	Montagem do Campo	Localização Auxiliar *** Normalmente acessível ao operador
Instrumentos discretos	1 *  IPI **	2 	3 
Display compartilhado, controle compartilhado	4 	5 	6 
Função em computador	7 	8 	9 
Controle Lógico Programável	10 	11 	12 

## Representações de válvulas de acordo com norma ISA-5.1-1984 (R 1992)

	VALVULA COM ATUADOR DE DIAFRAGMA
	VALVULA COM ATUADOR ELÉTRICO
	VALVULA COM ATUADOR PNEUMÁTICO (PISTÃO)
	VALVULA MANUAL
	VALVULA AUTO OPERADA

## ANEXO B

Representação de válvulas igual percentagem, linear e abertura rápida.



*ABERTURA RAPIDA*



*LINEAR*

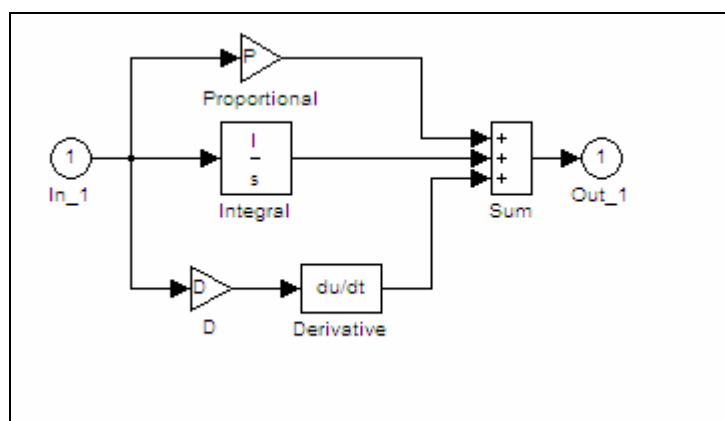


*IGUAL PERCENTAGEM*

*GAIOLAS DE VÁLVULAS TIPO GLOBO-FONTE: Emerson-Control-Valve-HandBook*

## ANEXO C

Diagrama de controle Proporcional integral e derivativo típico do Matlab



## ANEXO D

Kreyszig, (1988) traz o algoritmo de Runge-Kutta em linguagem genérica:

Para  $n=0$  até  $n-1$  faça

$$k_1 = hf(t_n, p_n)$$

$$k_2 = hf(t_n + \frac{1}{2}h, p_n + \frac{1}{2}k_1)$$

$$k_3 = hf(t_n + \frac{1}{2}h, p_n + \frac{1}{2}k_2)$$

$$k_4 = hf(t_n + h, p_n + k_3)$$

$$x_{n+1} = t_n + h$$

$$p_{n+1} = p_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

escreva  $t_{n+1}, p_{n+1}$ .

fim