UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

PROGRAMA TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

ELENE DE SOUZA FREITAS

ESTUDO DA EFICIÊNCIA E DA EMISSÃO DE CALDEIRA OPERADA A DIESEL E BIODIESEL

ORIENTADORES
PROF. MAURÍCIO BEZERRA DE SOUZA JÚNIOR, D.Sc.
PROF. ROSSANA ODETTE MATTOS FOLLY, D.Sc.

DEZEMBRO 2013

ESTUDO DA EFICIÊNCIA E DA EMISSÃO DE CALDEIRA OPERADA A DIESEL E BIODIESEL

ELENE DE SOUZA FREITAS

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Tecnologia
de Processos Químicos e
Bioquímicos, para a obtenção
do título de Mestre em Ciências (M.Sc.).

Freitas, Elene de Souza Freitas

Estudo da Eficiência e da emissão de caldeira operada a diesel e biodiesel / Elene de Souza Freitas. – Rio de Janeiro, 2013.
xvi, 92 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2013.

Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Júnior e Rossana Odette Mattos Folly.

1. Eficiência de Caldeiras 2. Controle de Processo. 3. Automação Industrial. 4 Biodiesel. 5. Gases de emissão da combustão. - Teses. I. Souza Jr., Maurício Bezerra de (Orient.). II. Folly., Rossana Odette Mattos Folly (Orient.) III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química. IV. Título.

CDD: 665.776

ESTUDO DA EFICIÊNCIA E DA EMISSÃO DE CALDEIRA OPERADA A DIESEL E BIODIESEL

Elene de Souza Freitas

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.

Aprovado por:

_____

Maurício Bezerra De Souza Júnior - D.Sc

_____

Rossana Odette Mattos Folly - D.Sc.

_____

Lídia Yokoyama - D.Sc

_____

Andrea Valdman - D.Sc

_____

Ana Mehl - D.Sc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro, 2013.

Aos meus pais,

que sempre estiveram ao meu lado me

dando forças para alcançar meus objetivos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me ter dado forças ao longo desses três anos e mesmo com todas as dificuldades não ter desistido.

Agradeço aos meus pais por estarem sempre ao meu lado, me incentivando, não me deixando desanimar e a me apoiando em todos os momentos da minha vida. E por contribuírem de todas as formas que estavam ao seu alcance para que eu pudesse concluir mais essa etapa dos meus sonhos.

Agradeço aos meus irmãos, sobrinhos e namorado por mais uma vez entenderem minha ausência em alguns momentos em prol da busca desse título e acima de tudo por me ajudarem sempre que estava ao alcance de vocês.

Agradeço a todos os amigos do mestrado que dividiram comigo as noites de sexta e manhãs de sábado e me ajudaram no desenvolvimento e conclusão das matérias Principalmente aqueles que me ajudaram a resolver aos infinitos problemas com o Matlab.

Agradeço aos professores que dividiram comigo seus conhecimentos e me deram base para chegar aqui.

Agradeço aos meus orientadores por serem extremamente pacientes comigo mesmo tendo trabalhado de forma lenta muitas vezes, vocês não desistiram de me apoiar e me ajudaram a concluir esse trabalho. A Andrea por me ajudar a entender toda a parte prática que havia sido desenvolvida e por toda a dedicação em solucionar minhas intermináveis dúvidas.

Agradeço a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para a finalização desse trabalho.

Resumo

FREITAS, Elene de Souza. Estudo da Eficiência e da Emissão de Caldeira Operada a Diesel E Biodiesel Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Júnior e Rossana Odette Mattos Folly. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

Diante da crescente demanda de geração de vapor, a constante busca por melhorias operacionais que elevem a capacidade de produção da planta se faz imprescindível. A maximização da eficiência, a diminuição das perdas do processo e a minimização dos impactos ambientais vêm sendo juntos os principais desafios encontrados no gerenciamento operacional das unidades de geração de vapor. Para buscar a solução desses desafios cada vez mais se faz necessário a implementação de sofisticadas estratégias de controles de processo, reduzindo perdas e consequentemente aumentando a geração de vapor. A partir de dados experimentais conduzidos em uma caldeira de pequeno porte (operando com pressão em torno de 60psi), o presente trabalho desenvolveu um estudo da análise de sensibilidade da eficiência da caldeira operada com diesel, biodiesel de dendê e misturas desses combustíveis com três diferentes porcentagens de excesso de ar (10%, 20% e 30%). A norma ASME-PTC 4 foi utilizada como base para o desenvolvimento do cálculo da eficiência. Os resultados desta análise permitiram identificar quais parâmetros operacionais deveriam ser controlados de forma mais eficaz, para diminuir possíveis desvios operacionais e aumentar a eficiência da planta. Uma vez identificado o parâmetro a ser controlado, buscou-se avaliar o efeito do tipo de combustível no desempenho da caldeira. Por fim se averiguou quais seriam os impactos das emissões de gases de combustão gerados pela queima desses diferentes combustíveis. Os resultados indicaram que o uso do diesel, biodiesel ou misturas desses dois combustíveis, não se tem mudanças significativas na eficiência, ou seja, a eficiência para os três combustíveis é aproximadamente 88%,83%,76% para operação com 10%, 20% e 30% de excesso de ar respectivamente, contudo a utilização de biodiesel ou misturas de diesel/biodiesel em caldeiras gera menores impactos ambientais.

Astract

FREITAS, Elene de Souza. Study of the eficiency and emissions of Boiler Operated with Diesel and Biodiesel. Supervisors: Maurício Bezerra de Souza Júnior and Rossana Odette Mattos Folly. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2013. M.Sc. Dissertation (Graduate Program on Technology of Chemical and Biochemical Processes).

Given the growing demand for steam generation, the search for operational practices improvements that increase the plant production capacity becomes a mandatory work to be performed. The efficiency maximization, loss reduction on the process and minimizing the environmental impacts have been together the main challenges encountered in the operational management for the steam generation units. To seek solutions for these challenges it is necessary to implement sophisticated control process, to avoid losses and consequently increase the steam generation. Using data obtained from experimental runs conducted in a small steam generator unit, the present work developed the boiler sensibility efficiency analysis study of a boiler operated with diesel, biodiesel and blends of these two fuels in different percentages of excess of air (10%, 20% e 30%).. ASME PTC-4 standard was used as a basis for the efficiency calculation development. The results of this analysis showed a way to identify which operating parameters should be controlled more effectively to reduce possible operational deviations and increase efficiency. Once identified the parameters to be controlled, the analyses was started on how the fuel type used to feed the boiler could change its efficiency. Finally it was investigated what would be the combustion emissions gases impacts generated by burning these different fuels. Then one can conclude on this second study that when operating a boiler with diesel, biodiesel or blends of these two fuels, there isn't significant changes in efficiency, in all cases efficiency is nearly 88%,83%,76% with excess of air 10%, 20% e 30%, however the use of biodiesel or blends of diesel/biodiesel as boilers fuel, generates less environmental impacts.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução 1

1.1. Apresentação do Problema e Motivação 1

1.2. Objetivo 2

1.3. .Organização do Trabalho 3

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica 4

2.1. Caldeiras 5

2.2. Tipo de Combustíveis 7

2.3. Caldeiras Flamatubulares e Aquatubulares 9

2.4. Funcionamento das Caldeiras 11

2.5. Instrumentação e Controle de Processo 12

2.5.1 Importância e Definições 12

2.5.2. Controle em Caldeiras 14

2.6. Eficiência em Caldeira 19

2.7. Análise de Sensibilidade 22

Capítulo 3 – Metodologia 27

3.1 Caldeira Fogotubular 28

3.2 Diagrama P&ID 30

3.3 Arquitetura de Automação 32

3.4 Sistema SCADA 33

3.5 Dados Históricos 36

3.6 Análise de Sensibilidade 38

3.6.1. Método Gráfico 38

3.6.2. Método Segundo a ASME PTC-4 39

3.7 Eficiência da Caldeira 40

Método de Balanço de Energia 40

3.7.1. 40

3.8 Cálculo das Variáveis Intermediarias 48

3.9 Cálculo das variáveis de saída 49

Capítulo 4 - Resultados 51

4.1. Dados Históricos 52

4.2. Análise das Perdas e Créditos Operando com Diesel 54

4.2.1. Perda de Calor Sensível Pelos Gases, em Base Seca - P1 (Kcal/Kg) 54

4.2.2. Perda de Calor Sensível Pelos Gases Devido à Água - P2 (Kcal/kg) 56

4.2.3. Perda de Calor nas Paredes - P3 57

4.2.4. Crédito Devido ao Calor Sensível do Ar de Combustão - C1 (Kcal/kg) 58

4.2.5. Crédito Devido ao Calor Sensível do Combustível - C2 (kcal/Kg) 60

4.2.6. Crédito Devido ao Calor Sensível da Umidade do Ar de Combustão - C3 (kcal/Kg) 62

4.2.7. Comparação dos Impactos Gerados pela Análise de Sensibilidade Segundo a ASME PTC- (2008). 63

4.3. Análise do Impacto Simulatâneo das Perdas e ou Créditos 63

4.3.1. Análise da Mudança da 64

4.3.2. Temperatura do Ar de Combustão 64

4.3.3. Análise da Mudança da Umidade do Ar 65

4.4. Análise Comparativa das Alterações de Perdas e Créditos na eficiência utilizando diferentes combustíveis. 66

4.4.1. Perdas pelo calor sensível dos gases de combustão em base seca 66

4.4.2. Perdas Pelo Calor Sensível dos Gases de Combustão Devido à Água 67

4.4.3. Perdas de Calor Pelas Paredes por Tipo De Combustível. 67

4.4.4. Comparação dos Impactos Gerados pelos Créditos 68

4.4.5. Comparação dos Impactos Gerados pela Mudança na Temperatura de Ar de Combustão e da Umidade por Tipo de Combustível. 69

4.5. Análise do Poder Calorífico Inferior na Eficiência 71

4.6. Análise do Tipo de Combustível na Eficiência 72

4.7. Análise dos Impactos Ambientais e Econômicos..... 74

4.7.1. Emissão de CO e CO_2..... 75

4.7.2. Emissão de NOx..... 78

4.7.3. Emissão de SO_2..... 80

Capítulo 5 - Conclusão..... 83

5.1. Conclusões 83

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros..... 86

Bibliografia..... 87

Lista de Figuras

Figura 1: Capacidade nacional instalada de geração de energia eletríca Fonte: EPE, 2012. 5
Figura 2: Diagrama básico de uma caldeira. Fonte: GILMAN, 2010. 6
Figura 3: Tipos de Combustíveis e sua origem. Fonte: BIZZO, 2003. 7
Figura 4: Oferta Nacional de Energia. Fonte: EPE, 2012 8
Figura 5: Caldeira Flamotubular. Fonte: BEGA, 2003 10
Figura 6: Caldeira Aquatubular. Fonte: BEGA, 2003. 11
Figura 7: Zonas de Trocas Termicas. Fonte: MARQUES, 2005. 11
Figura 8: Esquema básico de instrumentação analógica. Fonte: VALDMAN, 2010..... 14
Figura 9: Controle Simplificado com medição de vazão de ar e do combustível. Fonte: BEGA, 2003. 16
Figura 10:Controle de conbustão em série – (a) combustível seguido de ar (b) ar seguido de combustível. Fonte: BEGA, 2003. 17
Figura 11: Controle de combustão em paralelo. Fonte: BEGA, 2003. 18
Figura 12: Controle de combustão cruzado com analisador de oxigênio. Fonte: BEGA, 2003. 19
Figura 13: Eficiência de caldeiras. Fonte: DUKELOW, 2005 20
Figura 14: Eficiência X Temperatura do gás de combustão para diferentes combustíveis. Fonte: BROOKS, 2010. 23
Figura 15: Eficiência x Tipo de Combustível. Fonte: BROOKS, 2010 24
Figura 16: Tipo de combustível x eficiência operando a) 200 psi e b) 120 psi. Fonte: GHORBANI, 2012. 24
Figura 17: Relação entre a eficiência e o excesso de ar. Fonte: BROOKS, 2010. 25
Figura 18: Relação da eficiência com a temperatura ambiente. Fonte: BROOKS, 2010. 26
Figura 19: Planta piloto, usada no projeto. Fonte: VALDMAN, 2010. 28
Figura 20: Digrama P&ID da planta pilto usada no projeto 31
Figura 21: Arquitetura de automação do projeto Fonte: VALDMAN, 2010. 33
Figura 22: Tela gráfica do sistema supervisório. Fonte: VALDMAN, 2010. 34
Figura 23: Etapas do algoritimo para o cálculo da eficiência. Fonte: MOSCOSO e QUEIROZ, 2011. 37
Figura 25: Créditos e Perdas Utilizados no Calculo da Eficiência 43
Figura 26: Fluxograma para o calculo da eficiência 47
Figura 28: Eficiência da Caldeira com Biodiesel a partir dos dados experimentais 53

Figura 29: Eficiência da Caldeira com Mistura de 50% de Diesel e 50% de Biodiesel a partir dos dados experimentais 54
Figura 31: % de Variaçao de P1 x Ef(%) 55
Figura 31: % de Variaçãode P2 x Ef(%) 57
Figura 32: % de Variaçaõ de P3 x Ef(%) 58
Figura 33: % de Variação de C1 x Ef(%) 59
Figura 34: % de Variação de C2 x Ef(%) 60
Figura 35: Impacto negativo do crédito devido ao calor sensível do combustível 61
Figura 37: % de Variação de C3 x Ef(%) 62
Figura 40: Impacto da Variação da Temperaura do Ar de Combustão 64
Figura 41: Impacto da Variação da Umidade do Ar na eficiência 65
Figura 42: Perdas de calor sensível pelos gases de combustão em base seca (kcal/Kg) 67
Figura 43: Perda de calor sensível pelos gases de combustão devido a água (kcal/kg) 67
Figura 44: Perda de calor pelas paredes por tipo de combustível. 68
Figura 45: Crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (Kcal/kg). 69
Figura 46: Crédito devido ao calor sensível do combustível (Kcal/Kg) 69
Figura 47: Crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão (Kcal/Kg) 69
Figura 48: Comparação da Mudança da Temperatura do Ar de Combustão 70
Figura 49: Comparação da Mudança da Umidade do Ar 70
Figura 50: Poder Calorífico x Eficiência da Caldeira (%) 71
Figura 51: Tipo de Combustível x Ef(%) 73
Figura 52: Média de Emissão de CO por tipo de combustível. 76
Figura 53: Danos causados a saúde pela exposição de CO (SEINFELD, 1986) 77
Figura 54: Emissão de CO_2 por tipo de combustível 78
Figura 55: Emissão de NOx 79
Figura 56: Emissão de SO_2 81

Lista de Tabelas

Tabela 1 Caracteristicas tecnicas da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010. 29
Tabela 2 Caracteristicas de operação da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010..... 30
Tabela 3: Variáveis contínuas disponíveis na instrumentação fieldbus da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010..... 35
Tabela 4: Variáveis discretas disponíveis na instrumentação analógica/CLP/fieldbus da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010. 35
Tabela 5: Variáveis calculadas e variáveis de entrada manual disponíveis no sistema SCADA da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010. 35
Tabela 6: Exemplo de Planilha Auxiliar de Variação 38
Tabela 7: Variaveis de Entrada. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011 44
Tabela 8: Variáveis Intermediarias. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011 45
Tabela 9: Variáveis de Saída. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011..... 46
Tabela 10: Constantes para o cálculo da entalpia. Fonte: ASME-PTC4, 2008..... 48
Tabela 11: Propriedades dos Combustíveis. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011 .. 52
Tabela 12: Mínimos e Máximos ao se Alterar C2..... 60
Tabela 13: Mínimos e Máximos ao se Alterar C3..... 62
Tabela 15: Tipo de Combustíveis. Fonte: Moscoso e Queiroz, 2011..... 73
Tabela 16: Desvio Padrão das emissões de CO..... 76
Tabela 17: Desvio Padrão das emissões de CO_2..... 78
Tabela 18: Desvio Padrão das emissões de NOx 79

Lista de abreviatura

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CLP	Controlador lógico programável
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPU	C*entral processor unit* (unidade central de processamento)
EQ	Escola de Química
GE	General Electric
ISA	International Society of Automation
LADEQ	Laboratório de Engenharia Química
PCI	Poder Calorífico Inferior
P&ID	*Piping and instrumentation* (diagrama de instrumentação e processos)
SCADA	*Supervisory control and data acquisition* (sistema de supervisão e aquisição de dados)
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VBA	*Visual Basic for Applications*

Lista de Símbolos

ΔHc	Variação da entalpia do combustível
α	Porcentagem de excesso de ar
AR_{TEO}	Ar teórico
AR_{REAL}	Ar real utilizado na combustão
C1	Crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (Kcal/Kg)
C2	Crédito devido ao calor sensível do combustível (Kcal/Kg)
C3	Crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão
CHGPAR	Incremento mudado no valor de um parâmetro
CP_{COMB}	Capacidade térmica específica do óleo combustível
DENS	Densidade do óleo combustível
Ef	Valor da eficiência calculada com o valor original do parâmetro.
EXC_{AR}	Excesso de ar de combustão
GAS_{REAL}	Gás real de combustão em base seca
H_{AR}	Entalpia do ar à temperatura do ar de combustão em base seca
Hc	Entalpia do combustível
H_{CO}	Entalpia do CO à temperatura do gás de combustão
H_{CO2}	Entalpia do CO2 à temperatura do gás de combustão
H_{H2O}	Entalpia da água à temperatura do gás de combustão
H_{N2}	Entalpia do N_2 à temperatura do gás de combustão em base seca
H_{O2}	Entalpia do O_2 à temperatura do gás de combustão em base seca
H_{SO2}	Entalpia do SO_2 à temperatura do gás de combustão em base seca
H_{UMID}	Entalpia da umidade do ar à temperatura do ar de combustão
H_{GAS}	Entalpia do gás de combustão em base seca
K_3	Coeficiente associado ao combustível,
P1	Perda de calor sensível pelos gases, em base seca (Kcal/kg)
P2	Perda de calor sensível pelos gases devido à água (Kcal/Kg)
P3	Perda de calor pelas paredes (adimensional)
PCHGPAR	Porcentagem alterada no valor do parâmetro
PCI	Poder calorífico inferior do combustível (Kcal/Kg)
P_{CARBO}	Porcentagem em massa de carbono no combustível
P_{ENXO}	Porcentagem em massa de enxofre no combustível
P_{H2O}	Porcentagem em massa de água no combustível
P_{HIDRO}	Porcentagem em massa de H_2 no combustível

P_{NITRO}	Porcentagem em massa de N_2 no combustível
P_{OXIO}	Porcentagem em massa de O_2 no combustível
Q_{comb}	Vazão do Combustível
QrS	Entrada no balanço de energia
QrE	Saídas no balanço de energia
QrP	Perdas no balanço de energia
RECALCEF	Valor da eficiência recalculado com o parâmetro e o incremento
RSENSCO	Coeficiente relativo de sensibilidade
UMID	Umidade absoluta do ar
Ta	Temperaturas ambiente (°F)
t_{AR}	Temperatura do ar de combustão
t_{COMB}	Temperatura do combustível
t_G	Temperatura do gás de combustão
Ts	Temperatura stack(°F).
Xavg	Valor da media aritmética do parâmetro
y	Fração molar de oxigênio no gás combustível
Z_{CO}	Porcentagem em massa de CO no gás de combustão, base seca
Z_{CO2}	Porcentagem em massa de CO_2 no gás de combustão, base seca
ZO_2	Porcentagem em massa de O_2 no gás de combustão, base seca
Z_{N2}	Porcentagem em massa de N_2 no gás de combustão, base seca
Z_{SO2}	Porcentagem em massa de SO_2 no gás de combustão, base seca

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Apresentação do Problema e Motivação

Diante das crescentes demandas de vapor geradas pelas grandes indústrias, há uma necessidade maior de se controlar as perdas nos processos de produção. Dentro desse contexto, saber quais variáveis são mais importantes para que se possa avaliar as variáveis que influenciam no processo de geração de vapor, se faz necessário.

Mudanças no setor de energia causam desregulamentação, acarretando o crescimento de mudanças rápidas na geração de energia, levando a implementação de requisitos mais rigorosos nos sistemas de controle de processos. A necessidade de se manter os processos operando bem, mesmo com grandes mudanças nas condições de funcionamento, faz com que ocorra a incorporação de mais conhecimento do processo aos sistemas (ÅSTRÖM, 2000).

Observa-se em diversos estudos, como os de Åström (2000), Marques (2005) e Seborg (2011), a importância do controle e da necessidade de se ter a planta operando na sua maior produtividade. O controle avançado é definido por Quachio (2013), como a utilização de algoritmos sofisticado, baseados em modelos matemáticos de processos industriais, que tem por objetivo o aumento da produção e/ou redução dos insumos necessários.

Conclui-se então que as palavras controle avançado e eficiência energética andam juntas. À medida que os estudos avançam em busca de um controle mais eficiente obtendo-se, cada vez mais, processos mais eficientes. O constante crescimento e a modernização das indústrias faz com que, novos estudos sejam desenvolvidos, de modo a buscar melhorias contínuas no processo.

Aumentar a capacidade de produção é uma das formas de atender ao crescente aumento de demanda de vapor. A maximização da produção através do controle/aumento da eficiência é um modo eficaz de se obter melhores resultados.

Com o objetivo de melhorar a eficiência na geração de vapor, a presente dissertação visa, através de uma análise de sensibilidade, identificar as variáveis que apresentam maior influência no controle operacional de uma caldeira fogotubular.

Para exemplificar a necessidade do controle, inicialmente, pode-se usar um instrumento qualquer descalibrado na caldeira. Esse fato gerará uma perda de eficiência, permitindo identificar qual dos instrumentos presentes no processo pode gerar maior impacto na eficiência. Esta avaliação indicará o instrumento que deverá receber uma maior atenção de forma a apresentar menores erros. Também poderá ser identificado qual desses instrumentos presentes na planta pode gerar um prejuízo maior.

1.2. Objetivo

Na maioria das indústrias, a caldeira é um dos principais equipamentos, sendo responsável pela geração de vapor para acionamento de maquinas térmicas, aquecimento de produtos, purga de segurança, auxílio no processo de destilação, entre outras tantas utilidades.

Dentro do contexto da importância e complexidade da geração de vapor, da necessidade de confiabilidade no processo e de se buscar novos combustíveis para o crescente mercado, a presente dissertação tem como objetivo o estudo da eficiência de uma caldeira fogotubular de pequeno porte, utilizando diesel/biodiesel e misturas desses combustíveis com diferentes porcentagens de excesso de ar de combustão. Além disso, este estudo busca identificar a variável que tem maior impacto na eficiência assim como analisar o impacto energético e ambiental da alteração do combustível na eficiência.

Através dos dados históricos do funcionamento da caldeira, foi realizada uma análise de sensibilidade das variáveis da eficiência buscando avaliar a eficiência ao se alterarem os dados da operação visando definir a(s) variável(eis) de maior impacto.

Por fim, realizar uma análise comparativa dos impactos ambientais causados pela queima de diesel e biodiesel.

1.3. .Organização do Trabalho

Os capítulos desta dissertação estão dispostos da seguinte forma:

O Capítulo 2 tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica sobre caldeiras, seu modo de funcionamento e os tipos de controle possíveis de serem aplicados. Para finalizar são apresentadas metodologias de cálculo da eficiência da caldeira e alguns estudos que destacam a importância da análise de sensibilidade

O Capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida no trabalho, desde a apresentação do processo utilizado, obtenção dos dados, a forma como foi calculada a eficiência do processo e procedimento da análise de sensibilidade das variáveis.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões obtidos nesta dissertação. Primeiramente são apresentados os resultados de análise de sensibilidade da eficiência para a operação da caldeira com diesel. Um estudo do impacto das mudanças simultâneas de parâmetros do processo na eficiência. Em seguida é feita uma análise comparativa da sensibilidade da caldeira com diesel, biodiesel e uma mistura desses componentes com diferentes porcentagens de excesso de ar. Posteriormente, são expostos os efeitos dos tipos de combustíveis na eficiência da caldeira. Por fim, o capítulo apresenta os resultados da análise das emissões de poluentes obtidas nos experimentos usando diferentes tipos de combustíveis e a análise dos impactos ambientais causados por essas emissões.

Finalmente, o Capitulo 5 apresenta as conclusões do estudo realizado e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

O presente capítulo tem como objetivo introduzir conceitos básicos necessários para o entendimento desta dissertação. Inicialmente será feita uma breve descrição sobre caldeiras e seu funcionamento assim como os tipos de caldeiras existentes.

Em seguida será feita uma descrição da instrumentação e do controle em caldeiras. Nessa parte será apresentado de forma sucinta a instrumentação industrial básica utilizada em caldeiras e alguns tipos de controles que podem ser aplicados.

O capítulo fará também uma breve introdução sobre a eficiência de caldeiras, sobre quais as variáveis que estão envolvidas nesse conceito e apresentará a norma ASME PTC-4 existente relativa à eficiência e estudos sobre a importância das principais variáveis do processo.

2.1. Caldeiras

Caldeiras são todos os equipamentos que, utilizando a energia química liberada durante a combustão de um combustível, promovem a mudança de fase da água em estado líquido para vapor (LORA, 2004). Pode também ser definidas como equipamentos que se destina a gerar vapor através da troca térmica entre o calor gerado pela queima do combustível e a água.

A necessidade da geração de vapor surgiu com a revolução industrial visando mover máquinas e turbinas para geração de energia (termoelétricas). Com o passar do tempo e a evolução nas caldeiras, as mesmas passaram a ter aplicações também em outros setores tais como: acionamento de máquinas térmicas, geração de potência mecânica e elétrica, aquecimento em processos, alimentação de autoclaves para esterilização de materiais diversos, cozimento de alimentos, entre outras funções.

Para que se tenha uma ideia da importância da geração de vapor na matriz energética, a Figura 1 apresenta o gráfico da capacidade instalada de geração de energia nacional retirada do Balanço Energético Nacional de 2012 (EPE, 2012), onde é possível observar o crescimento, mais acentuado ao longo dos últimos anos das usinas termoelétricas no país.

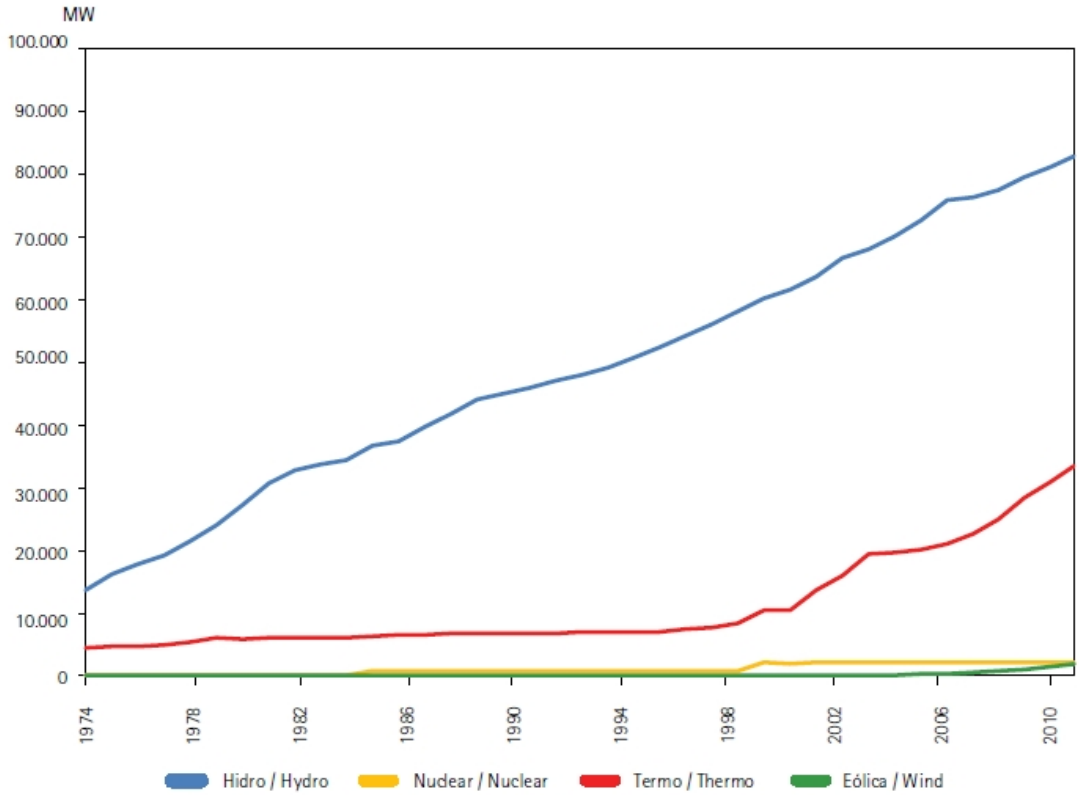

Figura 1: Capacidade nacional instalada de geração de energia eletríca Fonte: EPE, 2012.

O funcionamento de uma caldeira pode ser compreendido através de dois sistemas simultâneos: o primeiro é o sistema vapor-água e o segundo é o sistema combustível-ar-gás de combustão. O funcionamento da caldeira pode ser descrito então através da junção desses dois sistemas, ou seja, a água entra na caldeira e recebe o calor da queima do combustível e se aquece, gerando-se vapor. O combustível e o ar de combustão são misturados para e seguem para a câmara de combustão onde ocorrerá a queima. A energia química liberada na reação é convertida em energia térmica para o aquecimento da água (BEGA, 2003).

Através da Figura 2 é possível visualizar um diagrama básico do funcionamento da caldeira, onde é possível ver claramente os dois sistemas descritos anteriormente.

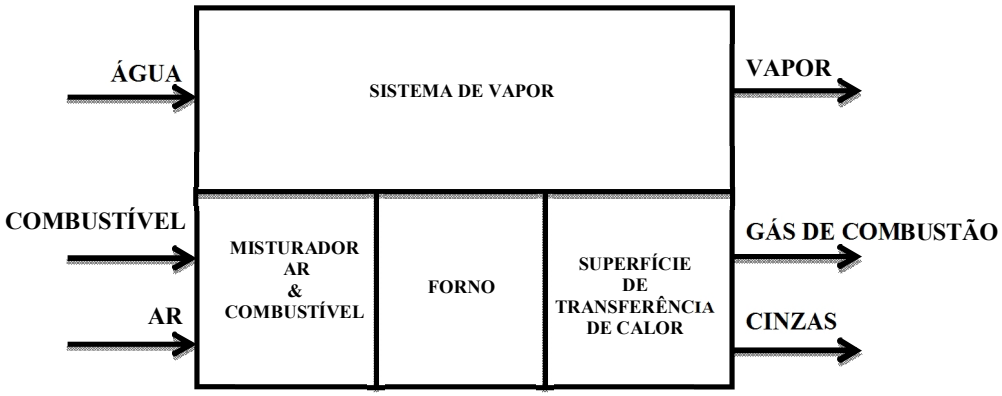

Figura 2: Diagrama básico de uma caldeira. Fonte: GILMAN, 2010.

A classificação de caldeiras é extensa e bastante diversa com relação às formas de classificação. Segundo Fontoura (2010), as caldeiras podem ser classificadas quanto a:

- Tipo de Fluido que passa nos tubos: flamotubulares ou fogotubulares;
- Fonte de Calor: Elétricas; com câmaras de combustão; de recuperação;
- Movimentação da água nos Tubos: circulação natural ou forçada;
- Pressão da Câmara de Combustão: pressão positiva ou negativa;
- Tiragem: tiragem forçada, induzida ou balanceada;
- Pressão de Operação: subcríticas; supercríticas;
- Tipo de Combustível: combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos.

Dentre as classificações apresentadas anteriormente, existem dois pontos importantes a serem estudados: primeiramente o tipo de combustível, e posteriormente o modo operacional que trata do tipo de fluido que passa nos tubos, flamotubular ou fogotubular, cuja classificação é a forma mais comum de se diferenciar as caldeiras.

2.2. *Tipo de Combustíveis*

Como já descrito anteriormente, as caldeiras necessitam de uma fonte de calor para que seja possível a vaporização da água. Os combustíveis de uma forma geral são segregados por sua origem, fósseis ou vegetais, e pelo seu estado físico, ou seja, uma caldeira pode ser alimentada por um combustível sólido, como o carvão, líquido, como o diesel, ou gasoso como o caso de caldeiras abastecidas com gás natural. A Figura 3 mostra essas classificações dos combustíveis.

ORIGEM	COMBUSTÍVEL BÁSICO	DERIVADO
FÓSSEIS	PÉTROLEO	GLP GASOLINA ÓLEO DIESEL ÓLEO COMBUSTÍVEL
	GÁS NATURAL	
	CARVÃO MINERAL	GASES MANUFATURADOS
VEGETAIS	CANA-DE-AÇÚCAR	BAGAÇO DE AÇUCAR ALCOOL ETÍLICO
	LENHA	CARVÃO VEGETAL GASES MANUFATURADOS
	RESÍDUOS VEGETAIS	BIOGÁS

Figura 3: Tipos de Combustíveis e sua origem. Fonte: BIZZO, 2003.

Os estudos de Bizzo (2003) mostra que durante muitos anos, os derivados de petróleo apresentaram características importantes tais como baixo custo por conteúdo energético, disponibilidade, facilidade de transporte e armazenamento, possibilidade de utilização dentro de tecnologias disponíveis, baixo custo operacional e de investimento e se tornaram o tipo mais utilizado de combustível industrial.

Nas ultimas décadas, no entanto, outros tipos de combustíveis têm sido utilizados e pesquisados, principalmente aqueles que produzem menor impacto ambiental em relação aos combustíveis fósseis (BIZZO, 2003).

A oferta interna de energia no Brasil ao longo dos anos foi e continua sendo predominantemente de petróleo e seus derivados, todavia, se observa uma crescente utilização de novos combustíveis como os derivados da cana-de-açúcar, da soja entre outros (como o biodiesel) (EPE, 2012). O comportamento da oferta interna de energia pode ser observado através da Figura 4.

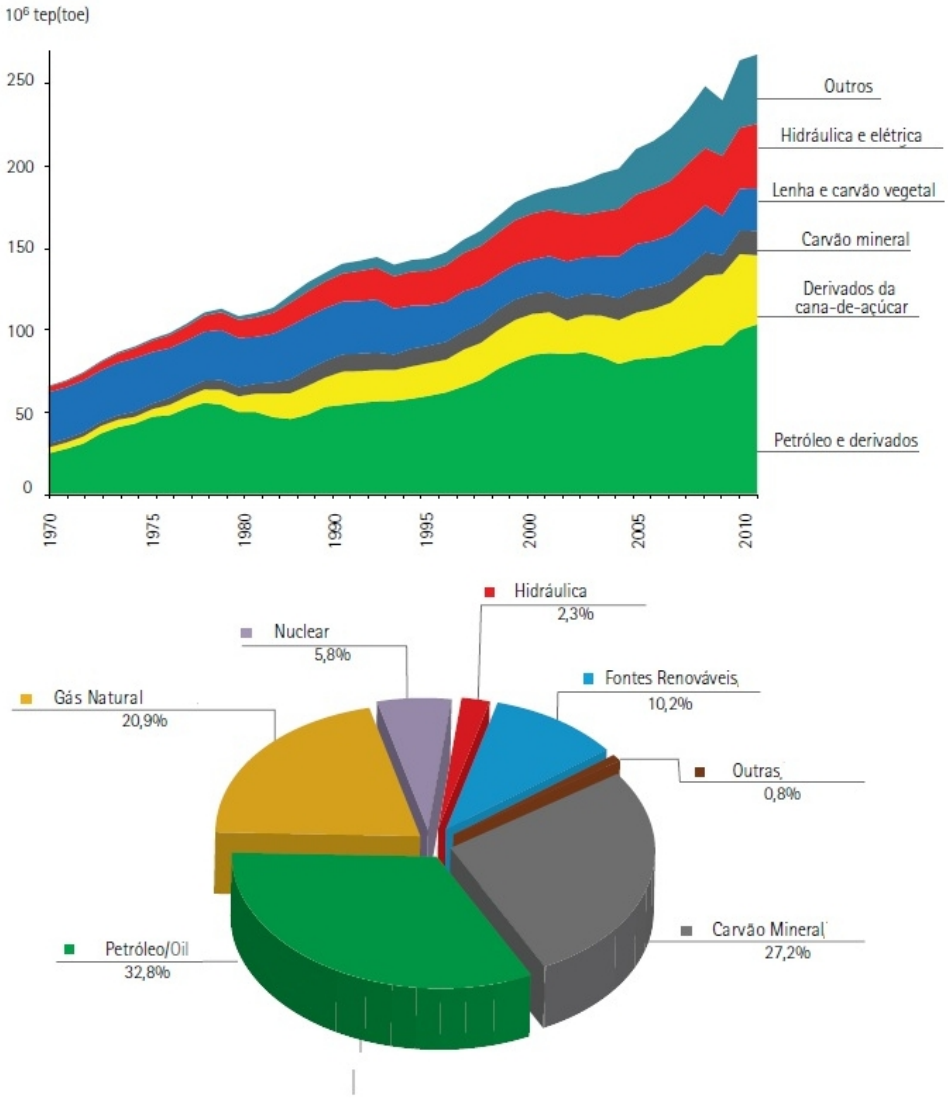

Figura 4: Oferta Nacional de Energia. Fonte: EPE, 2012

Dentre as formas de combustível, o ponto mais importante a ser considerado na escolha do combustível, é a capacidade que um determinado combustível possui durante a sua combustão, em liberar energia, ou seja, o seu poder calorífico de um combustível. Com esse contexto pressupõem-se então, que quanto maior a energia liberada durante a queima mais propícia será a utilização do combustível nas caldeiras.

Os combustíveis de uma forma geral, como o diesel, a gasolina e o gás natural são formados principalmente por carbono e hidrogênio que possuem o poder calorífico de 8.140Kcal/kg e 28.700Kcal/kg respectivamente. Com isso, quanto maior a quantidade de hidrogênio presente no combustível maior será seu poder calorífico (SOUZA, 2007). Portanto, ao se falar de geração de energia a partir da queima de um combustível (termoelétricas), se sabe que quanto maior o poder calorífico mais energia será liberada e melhor será a troca térmica para a vaporização da água.

2.3. Caldeiras Flamatubulares e Aquatubulares

Caldeiras flamotubulares ou fogotubulares são aquelas onde os produtos gasosos resultados da queima do combustível circulam pelas partes internas dos tubos de troca de calor, que por sua vez, estão totalmente cobertos externamente pela água em sua forma líquida. Nesse sistema, a transferência de calor ocorre em toda a área da superfície tubular (FONTOURA, 2010).

De acordo com Ferreira (2008), o vapor nas caldeiras fogotubulares é gerado pelo calor transferido dos gases quentes da combustão, através das paredes metálicas dos tubos, para a água que fica circundando estes tubos. À medida que os gases da combustão fluem através dos tubos, eles são resfriados pela transferência de calor para a água.

As caldeiras flamotubulares não produzem vapor superaquecido, uma vez que, a troca térmica ocorre apenas entre o tubo aquecido e a água. Para que seja gerado vapor superaquecido é necessária uma troca de calor adicional entre os gases e o vapor já gerado, mais comumente encontrado em caldeiras aquatubulares.

As caldeiras fogotubulares são equipamentos bem simples, no entanto, devido a problemas de construção e competitividade econômica, possuem uma capacidade de geração de vapor reduzida. Sua aplicação é limitada a pequenas e medias vazões de vapor (até 10ton/h) e a pressão não muito maior que 10kgf/cm^2 (BEGA, 2003)

A Figura 5 mostra um exemplo de uma caldeira fogotubular com tubos horizontais. Pode-se também encontrar caldeiras com tubos verticais.

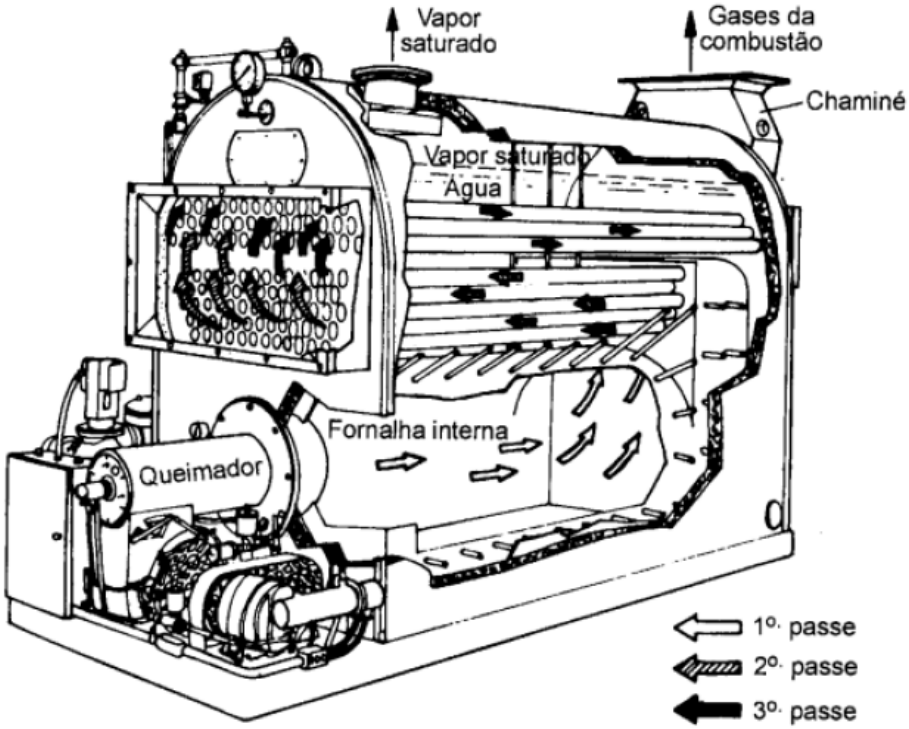

Figura 5: Caldeira Flamotubular. Fonte: BEGA, 2003

As caldeiras aquatubulares possuem o funcionamento inverso ao das caldeiras flamotubulares. Ou seja, nestas caldeiras a água passa dentro dos tubos que estão envoltos pelos gases gerados pela queima do combustível. Sua aplicação é voltada para sistemas de médio e grande porte, onde se trabalha com médias e altas pressões.

Por possuir a vantagem de ter um sistema adicional que gere vapor superaquecido, as caldeiras aquatubulares são mais comumente encontradas nas indústrias. O processo para a geração de vapor superaquecido consiste na incorporação de uma seção tubular, também denominado na literatura como “tubulão”, onde o vapor após sua saída da zona de evaporação troca novamente calor com os gases mais quentes e se aquece até temperaturas em torno de 400°C.

A capacidade de produção dessas caldeiras pode ser de 750 ton./h de vapor ou na ordem de 15 a 150 ton/h, com pressões até 90-100 bar para aplicações industriais (BIZZO, 2003). A Figura 6 apresenta um exemplo de uma caldeira aquatubular.

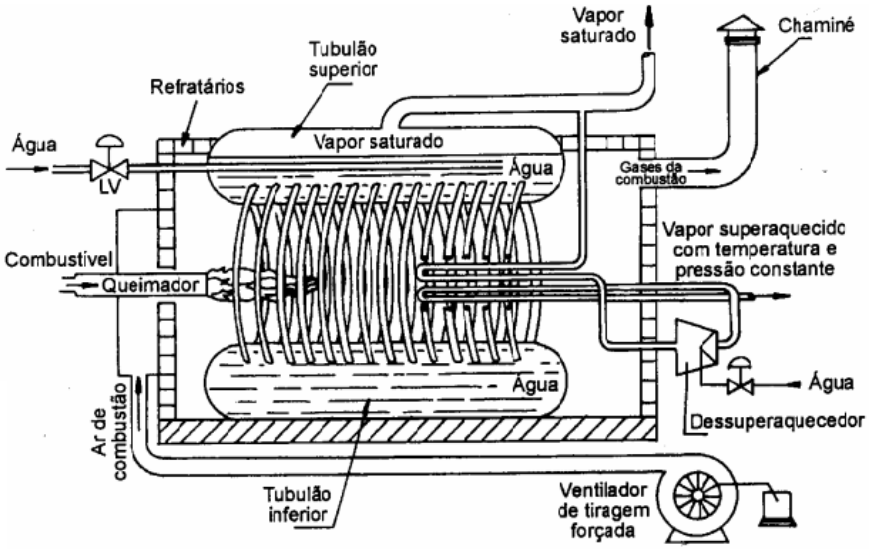

Figura 6: Caldeira Aquatubular. Fonte: BEGA, 2003.

2.4. *Funcionamento das Caldeiras*

Como já descrito anteriormente, as caldeiras possuem como função a geração de vapor através da troca de calor entre os gases gerados pela queima do combustível com a água em estado líquido. Consequentemente, se observa que para que ocorra o aquecimento do vapor, existem zonas de trocas térmicas. A Figura 7 mostra o efeito da pressão na absorção de calor num gerador de vapor e as zonas térmicas.

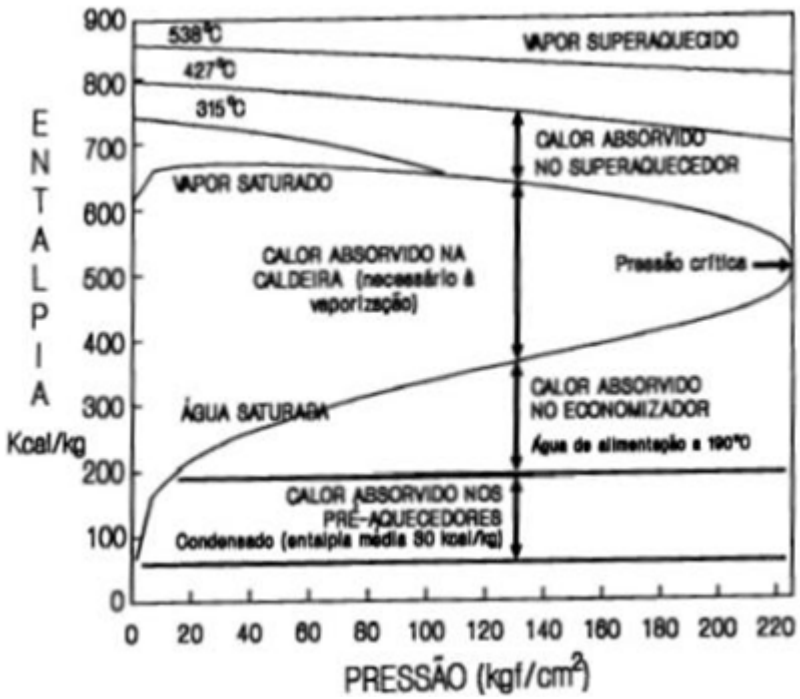

Figura 7: Zonas de Trocas Termicas. Fonte: MARQUES, 2005.

De acordo com o constatado por Marques (2005) a entalpia de vaporização diminui com o aumento da pressão, determinando que em caldeiras de alta pressão a superfície de troca para a vaporização seja menor que numa caldeira de baixa pressão.

Outro fator importante no dimensionamento das caldeiras é a superfície de troca térmica. Sabe-se que quanto maior a área de troca térmica mais eficiente tende a ser o sistema. Com essa visão é importante considerar o fato de que um sistema será mais eficiente quando projetado com uma maior quantidade de tubos com diâmetros menores do que com um número menor de tubos de maiores diâmetros.

Ainda, de acordo com Marques (2005), a forma de absorção de calor, o meio absorvedor, a temperatura de absorção, o tempo de contato entre os gases e a especificação dos materiais dos tubos usados são fatores importantes no projeto de uma caldeira.

2.5. Instrumentação e Controle de Processo

A instrumentação e o controle de processos têm como objetivo manter as variáveis de processo tais como, temperatura, pressão, vazão e composição, operando nos valores projetados. Contudo, os processos são dinâmicos em sua natureza, e as mudanças estão sempre ocorrendo e se a ação apropriada não ocorrer como resposta a essas alterações, as variáveis importantes relacionadas à segurança, qualidade do produto, e taxas de produção podem não alcançar as condições de projeto novamente (SMITH, 2005).

2.5.1 Importância e Definições

Instrumentação e controle de processos são partes importantes para o funcionamento das plantas industriais. Fatores como a crescente demanda no desempenho do processo e na qualidade do produto, a definição de processos operacionalmente independentes de interferências do operador humano e a substituição das tarefas monótonas e repetitivas executadas pelo operador por tarefas mais especializadas são determinantes para a evolução do estudo da automação industrial (ISERMANN, 2006).

A fim de aumentar a produtividade, acompanhar a qualidade do produto, diminuir os impactos ambientais e principalmente diminuir as perdas do processo, se observa uma crescente necessidade em se estudar a dinâmica do processo e investir no seu

controle. Para que o controle do processo ocorra, se faz necessário o uso dos instrumentos de controle e medição do processo.

Acompanhar as variáveis de processo, tais como temperatura, pressão, vazão e nível ao longo do tempo, é de fundamental importância para a otimização e para o aumento da produtividade. (OLSSON; SCHULZE; NIELSEN, 1998).

Ao analisar o que é encontrado nas grandes indústrias hoje, se observa um grande avanço tecnológico no acompanhamento do processo. Até pouco tempo atrás o que se encontrava eram tecnologias de acompanhamento mais lentas e com menor precisão e confiabilidade. Com o passar do tempo passou-se a poder confiar mais no controle do processo.

Quando se fala de controle de processo pode-se descrevê-lo como dois subconjuntos: um formado pelos elementos locais e outro pelos elementos virtuais. Os elementos locais são aqueles que estão diretamente instalados no processo, ou seja, estão no campo e os virtuais são caracterizados por aqueles que não estão instalados localmente no processo, e estão na sala de controle.

As malhas de controle são os conjuntos de instrumentos que combinados, representam a implementação prática da estratégia de controle adotada. Podem ser identificadas pelos elementos componentes do circuito de atuação da informação e pelas variáveis e sinais envolvidos no controle adotado (VALDMAN, FOLLY e SALGADO, 2008).

A Figura 8 apresenta um esquema básico de controle utilizado em uma malha de controle contínuo analógica, especificando a característica de troca de informação entre cada elemento do processo (VALDMAN, 2010).

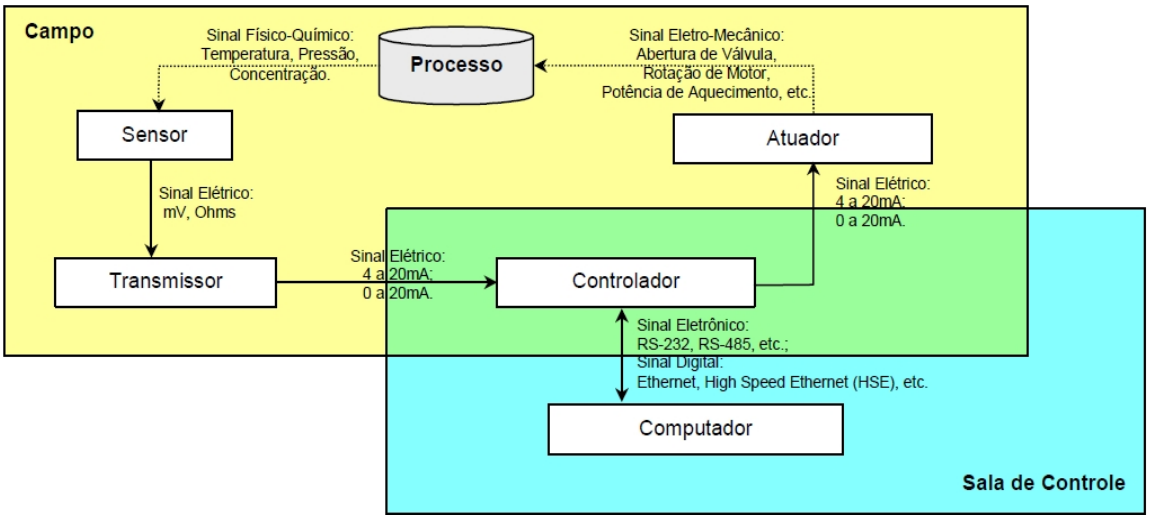

Figura 8: Esquema básico de instrumentação analógica. Fonte: VALDMAN, 2010.

A existência de uma normalização dos símbolos e identificações dos instrumentos de medição e controle do processo, que inclui símbolos e códigos alfa numéricos, torna possível e mais eficiente a comunicação das pessoas envolvidas nas diferentes áreas de uma planta de manutenção, operação, projeto e processo (RIBEIRO, 2004). A norma para essa regularização é elaborada pela *American National Standards Institute* (ANSI) em parceria com a *International Society of Automation* (ISA) (ISA, 1992) e é denominada ISA 5.1 – Normas e simbologias de instrumentação.

2.5.2. Controle em Caldeiras

Para alcançar um bom funcionamento, as caldeiras devem ter suas variáveis dinâmicas, tais como a pressão e temperatura do vapor controlada. A unidade de produção de vapor é um dos sistemas mais críticos em unidades industriais, isto porque a taxa de geração de vapor afeta diretamente o desempenho e embora a produção de vapor varie durante a operação as variáveis de saída, devem ter os seus valores respeitados (MORADI, 2009).

O controle do funcionamento de caldeiras pode ser feito de forma simples, onde as operações são feitas manualmente ou de maneira complexa, envolvendo diversas malhas de controle.

A estratégia de controle adotada define a filosofia básica de controle, consequentemente definirá a ligação entre os instrumentos e os equipamentos viabilizando assim o controle adotado (VALDMAN, FOLLY, SALGADO, 2010).

Diversos pesquisadores como Bega (2003), Dukelow (1991) e Marques (2005) discutem em seus estudos sobre o controle em caldeiras. Todos os estudos abordam o controle em caldeiras aquatubulares, sendo assim os exemplos de controle referidos nesse projeto estarão dentro desse contexto.

Bega (2003), em seu livro sobre instrumentação de caldeiras, apresenta algumas sugestões para o controle da caldeira alimentada por combustível líquido. Para caldeiras aquatubulares, o autor sugere que a variável que deve ser mantida constante é a pressão de vapor. E para que isso ocorra, deve-se variar a vazão do combustível e do ar de combustão injetados nos queimadores. Quanto maior a vazão de combustível e de ar, maior será a troca de calor e, consequentemente, maior será a produção de vapor.

De acordo com os autores citados anteriormente, os controles mais importantes encontrados nas caldeiras podem ser resumidos como os enumerados abaixo:

- Controle de nível do tubulão;
- Controle de vazão de água de alimentação da caldeira;
- Controle de vazão de vapor gerado;
- Controle de pressão do vapor produzido;
- Controle de vazão de ar de combustão;
- Controle de vazão de combustível;
- Controle de excesso de ar.

Os próximos tópicos desse Capítulo apresentarão alguns exemplos de controle de combustão sugeridos por Bega (2003) para caldeiras.

2.5.2.1. *Controle de Combustão de Forma Simplificada Através Com Medição de Vazão de Ar e do Combustível*

A Figura 9 exemplifica um modelo simplificado de controle para a caldeira. A malha é composta pelos elementos físicos; medidores de vazão de ar de combustão e de combustível, um medidor de pressão do vapor e dois relés controladores de pressão e de vazão.

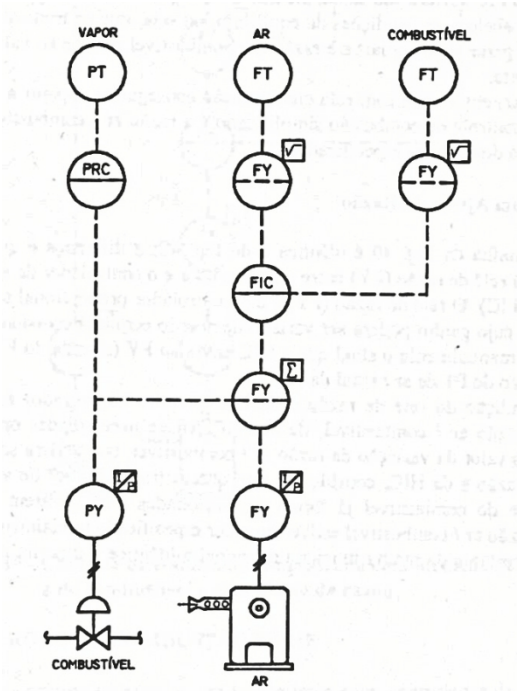

Figura 9: Controle Simplificado com medição de vazão de ar e do combustível. Fonte: BEGA, 2003.

Os transmissores de vazão são dimensionados de modo a fornecer saídas iguais quando a razão ar/combustível estiver no valor especificado, o controlador de pressão, por sua vez mantém a pressão de vapor através da atuação na válvula de combustível e no relé somador e o somador recebe sinais dos dois controladores e envia o resultado para o damper de ar (BEGA, 2003).

2.5.2.2. Controle de combustão em série com combustível seguindo ar e ar seguindo combustível

A diferença dessa malha para o modelo simplificado é que nesse caso o controle é feito com dois conjuntos transmissor/controlador de vazão, um para o ar de combustão e o outro para o combustível juntamente com a malha de pressão de vapor.

A Figura 10 mostra os dois tipos de configuração possível para a combustão em série.

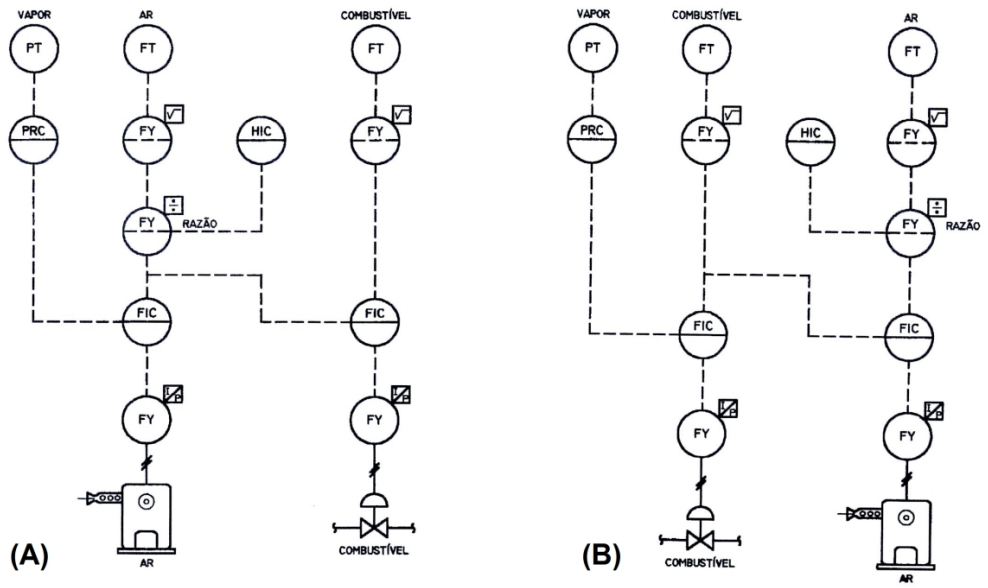

Figura 10:Controle de conbustão em série – (a) combustível seguido de ar (b) ar seguido de combustível. Fonte: BEGA, 2003.

Para o sistema (a) da Figura 10, o controlador de pressão destaca o ponto de ajuste do controlador de vazão de ar de combustão, enquanto a vazão de ar medida é enviada como ponto de ajuste de controlador de vazão de combustível. Para o sistema (b), o controlador de pressão destaca o ponto de ajuste do controlador de vazão do combustível, enquanto a vazão de ar do combustível medida é enviada como ponto de ajuste para do controlador de vazão de ar de combustão (BEGA, 2003).

Ambas as configurações apresentam vantagens e desvantagens. A primeira possui como principal desvantagem a possibilidade de operação insegura, uma vez que, a carga de ar de combustão será reduzida antes do combustível, além de apresentar uma resposta lenta à variação da vazão, já que a malha de ar de combustão é lenta. O segundo sistema, apresenta respostas mais rápidas, porque a malha de combustível é mais rápida, no entanto, assim como a primeira configuração pode operar de forma insegura, quando ocorrer o aumento da vazão das cargas, a vazão do combustível irá aumentar antes da vazão de ar.

2.5.2.3. Controle de Combustão em Paralelo

A malha de combustão em paralelo é composta por duas malhas de controle de vazão de combustível e ar de combustão independente, e uma malha de pressão de vapor.

O ponto de ajuste para esse controle é variado paralelamente e simultaneamente pelo controlador de pressão. O controlador de vazão de ar de combustão atua diretamente

no *damper* de ar e o controlador de combustível atua diretamente na válvula de combustível, de forma a manter as vazões de acordo com o ponto de ajuste dado pelo controlador de pressão. A configuração em cascata desse sistema aumenta a velocidade de resposta da malha e diminui as variações na pressão de vapor, uma vez que as malhas de ar e combustível absorverão as variações das vazões, antes que estas venham a influenciar a variável controlada (BEGA, 2003).

A Figura 11 representa esse controle.

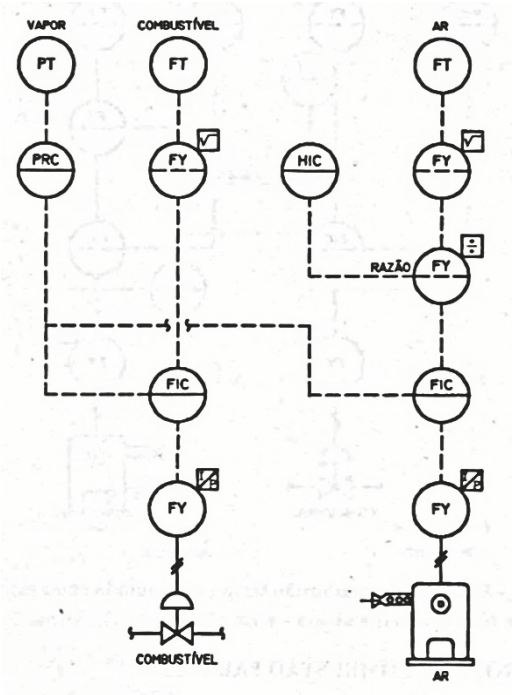

Figura 11: Controle de combustão em paralelo. Fonte: BEGA, 2003.

2.5.2.4. Controle de combustão com Limites Cruzados com Analisador de Oxigênio:

O controle de combustão de limites cruzados é um sistema mais complexo, que utiliza dois relés seletores de sinal alto e baixo. Com a utilização dos reles seletores é possível operar utilizando uma demanda menor de excesso ar, sem que ocorram problemas de combustão.

A Figura 12 mostra a malha para o controle por limites cruzados com o analisador de oxigênio.

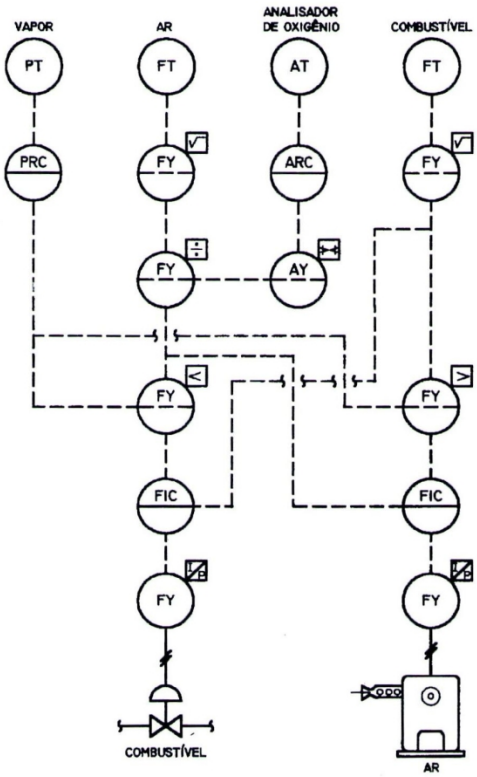

Figura 12: Controle de combustão cruzado com analisador de oxigênio. Fonte: BEGA, 2003.

Nesse sistema a porcentagem de oxigênio no gás de combustão é medida continuamente e enviada ao controlador de oxigênio, que compara o valor medido com o ponto de ajuste e atua no relé de razão, que por sua vez irá variar o sinal de vazão de ar enviado ao controlador de vazão mantendo assim o excesso de ar desejado.

2.6. Eficiência em Caldeira

A eficiência térmica da caldeira é a medida em função da transferência do calor gerado pela queima de combustível para a água. Um dos principais desafios associados à operação, manutenção e controle das caldeiras está relacionado com a maximização da eficiência.

Diversos fatores operacionais podem afetar a eficiências das caldeiras, ou seja, a escolha do combustível, o controle da variação do excesso de ar a ser utilizado, as temperaturas do combustível e do gás de combustão são parâmetros de fundamental importância para a otimização do processo.

De acordo com Dukelow (2005) alguns valores de eficiências podem ser esperados para determinadas condições de operação. Para operação utilizando carvão com 4% e 3% de excesso de ar espera-se uma eficiência de 88% e 89% respectivamente. Em

uma operação usando óleo como combustível com 3% e 2% de excesso de oxigênio espera-se eficiências de 87% e 87,5%. E para operação utilizando gás com 1,5% e 1% de excesso de ar os valores da eficiência diminuem para 82% e 82,5%.

A Figura 13 apresenta a variação da eficiência com a vazão de vapor gerada e o incremento do custo do vapor pela vazão de vapor gerada segundo Dukelow (2005).

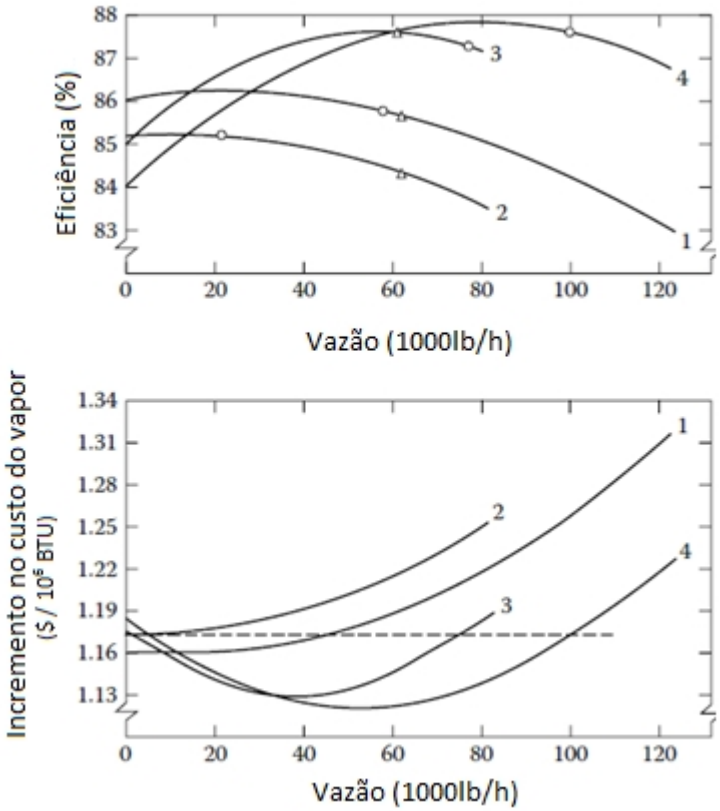

Figura 13: Eficiência de caldeiras. Fonte: DUKELOW, 2005

Como pode ser observado na Figura 13, a eficiência da caldeira varia principalmente na faixa de 80% a 90% para diferentes combustíveis (como carvão e óleo). É possível verificar também que a perda de pequenas porcentagens da eficiência geram grandes perdas econômicas.

Dukelow e Liptak (2005) apresenta em seus estudos dois métodos para o cálculo da eficiência: o primeiro, o método direto que envolve a razão entre a vazão de calor transferida para a água (entalpia da saída do vapor, vazão mássica da água) e a vazão do calor gerado pela queima do combustível (vazão mássica do combustível). O método indireto utiliza análise do combustível, gás combustível entre outros dados para contabilizar todas as perdas. O valor final da eficiência é obtido através da subtração das perdas do maior valor de aquecimento do combustível dividido por esse mesmo valor.

Para Dukelow (1991) o método indireto é mais confiável uma vez que não se baseia nos valores medidos do fluxo de vapor e combustível e por considerar as maiores perdas de calor.

Através dessas considerações a eficiência pode ser aproximada através da Equação 1. A Equação 1 assume valores fixos para diversas variáveis relacionadas as perdas de calor de acordo com o tipo de combustível usado.

Equação 1: Eficiência aproximada segundo DUKELOW (2005)

$$E = 100\left[1 - 10^{-3}\left(0{,}22 + \frac{K^{*}y}{1 - {}^{y}/_{0{,}21}}\right)(T_s - T_a) - \frac{\Delta H_c}{H_c}\right]$$

O coeficiente associado ao combustível (K3) pode assumir os seguintes valores: 1,01 para carvão, 1,03 para óleo, e 1,07 para gás natural. O termo ΔHc/Hc também relacionado ao combustível é usado assumindo os valores de 0,02, 0,05 e 0,09 para carvão, óleo e gás natural respectivamente.

A norma que regula as caldeiras é a ASME PTC-4 nela são apresentados dois métodos de calculo da eficiência. A norma pode ser aplicada a caldeiras operadas com combustíveis como o carvão, petróleo e geradores de vapor a gás, bem como geradores de vapor disparados por outros combustíveis composto por hidrocarbonetos. O primeiro é o método de entrada e saída calculado através da razão entra a saída e a entrada multiplicados por 100, conforme
Equação 2.

Equação 2

$$Ef(\%) = 100 * \frac{Saída}{Entrada}$$

Os dados das entradas e saídas são determinados através dos valores gerados pela instrumentação da caldeira e pelas informações de entrada do sistema. O cálculo da eficiência através desse método requer medições diretas e precisas da produção e das entradas do processo. Dentre as informações necessárias para o calculo estão informações como o fluxo de água na entrada da caldeira, vazão de vapor na saída, pressão e temperatura do fluido de trabalho, vazão de combustível entre outras.

O outro método apresentado é denominado como balanço de energia, ou seja, o método se baseia no balanço de energia do sistema, representado pela Equação 3 inserido na definição de eficiência, apresentada na Equação 4.

Equação 3

$$Entrada + Créditos = Saídas + Perdas$$

Equação 4

$$Ef(\%) = 100 * \left[\frac{Entrada - Perda + Crédito}{Entrada}\right]$$

$$Ef(\%) = 100 * \left[1 - \frac{(Perdas - Créditos}{Entradas}\right]$$

Esse método requer a identificação e a medição de todas as perdas e créditos existentes no sistema. Possui como principal vantagem a possibilidade de se identificar as perdas para determinar possíveis melhorias na unidade de produção. No entanto, apresenta como desvantagem a necessidade de mais medições.

Ao se comparar os dois métodos, pode-se identificar que o método de entrada e saída possui como principais vantagens com relação ao método de balanço de energia o fato de requerer menos parâmetros medidos e não requerer estimativas de perdas que não são medidas, no entanto requer a medição precisa da vazão do combustível, do vapor gerado e suas propriedades (ASME PTC-4, 2008).

2.7. Análise de Sensibilidade

Diversos estudos mostram a importância de se saber as variáveis que interferem na eficiência do processo, uma vez que o conhecimento das mesmas permite a manipulação do mesmo para a obtenção de melhores resultados.

Dentro desse contexto, Brooks (2010) apresenta um estudo da importância de algumas variáveis no calculo da eficiência.

1. Temperatura dos gases de combustão.

É a temperatura dos gases de combustão que saem da caldeira, ou seja, é a temperatura dos gases residuais após a troca térmica. A temperatura do gás de combustão deve ser um valor real, ou seja, um valor medido, para que o cálculo da eficiência seja um reflexo do uso do combustível da caldeira.

A Figura 14 apresentada por Brooks (2010) mostra a relação entre a temperatura dos gases de combustão e a eficiência teórica para caldeiras com diferentes tipos de combustíveis gasosos.

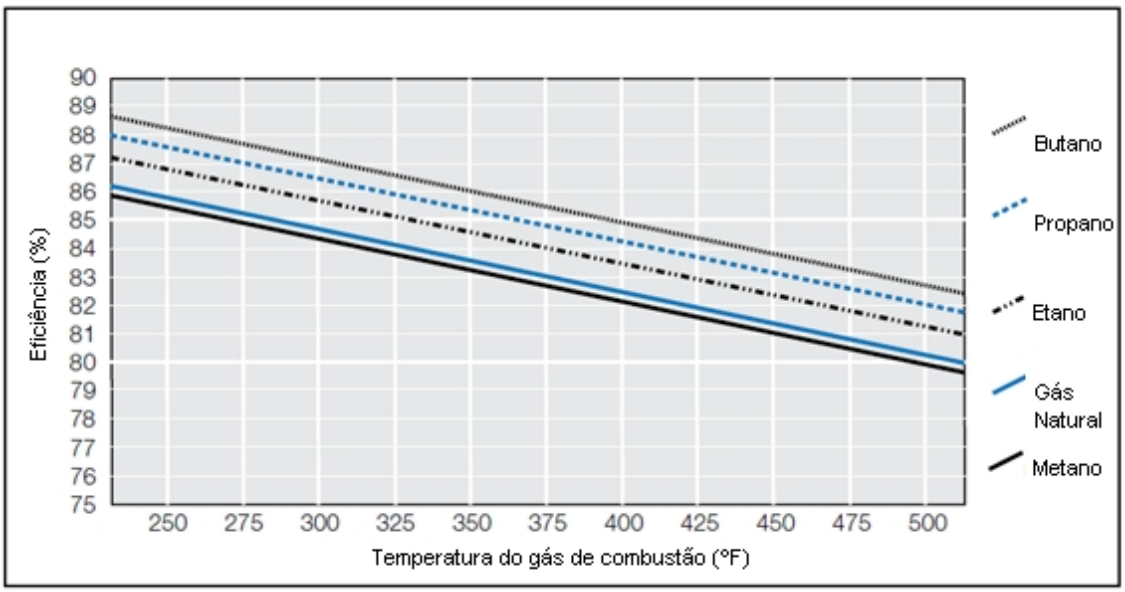

Figura 14: Eficiência X Temperatura do gás de combustão para diferentes combustíveis. Fonte: BROOKS, 2010.

Pode-se observar graficamente, os valores máximos que podem ser obtidos de eficiência para um determinado combustível a uma determinada temperatura.

Independente do combustível utilizado é possível verificar que quanto menor a temperatura dos gases de combustão maior será a eficiência da caldeira. Por exemplo, operando com gás natural para obter cerca de 85% de eficiência é necessário que a temperatura esteja em torno de 140ºC.

2. Especificações do combustível

A especificação do combustível usado também altera a eficiência do processo. Combustíveis líquidos, como o óleo, são mais utilizados do que os combustíveis gasosos. Essa preferência ocorre, porque a presença de hidrogênio nos combustíveis gasosos gera mais vapor d'água, vapor este que utiliza energia à medida que muda de fase no processo de combustão, ocasionando maiores perdas de energia quando se queima o combustível resultando em menor eficiência.

A Figura 15 indica o efeito da relação hidrogênio/carbono em cinco diferentes combustíveis gasosos. Para a mesma condição de operação a eficiência varia

consideravelmente com base unicamente da razão hidrogênio/carbono, mostrando assim a importância da análise do combustível durante o projeto de uma caldeira.

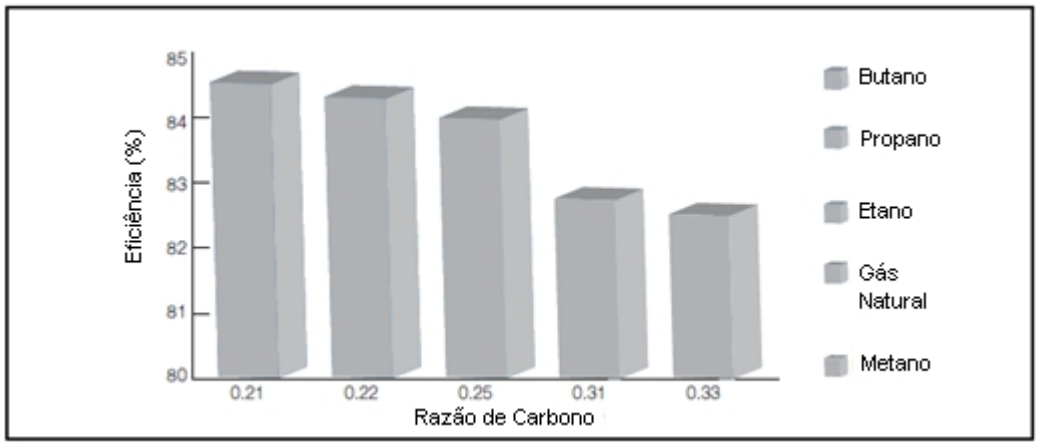

Figura 15: Eficiência x Tipo de Combustível. Fonte: BROOKS, 2010.

Ghorbani (2012) conduziu um estudo que buscava comparar o impacto do uso de diferentes combustíveis na eficiência da caldeira. Em seu estudo foram testados dois níveis de energia para três tipos de combustível (diesel, biodiesel de óleo de soja e de óleo de girassol), mostrados na Figura 16, onde conclui que a caldeira é mais eficiente com diesel para níveis altos de energia e para níveis menores de energia o biodiesel é mais eficiente.

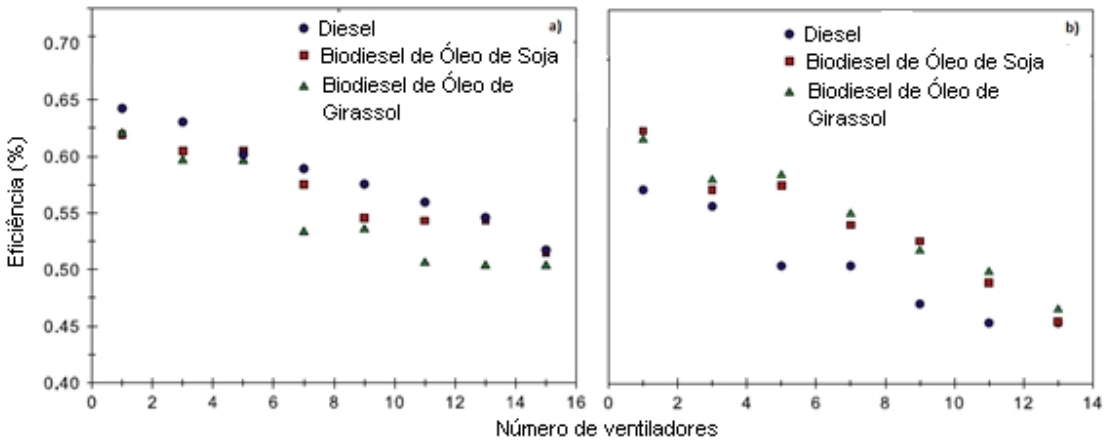

Figura 16: Tipo de combustível x eficiência operando a) 200 psi e b) 120 psi. Fonte: GHORBANI, 2012.

3. Excesso de ar

O excesso de ar é essencial para que ocorra a combustão completa na caldeira, no entanto, qual seria a quantidade ideal para uma maior eficiência? Vários estudos como o de Valdman (2010), relatam a importância de se conhecer seu processo para se determinar a quantidade ótima de excesso de ar que deverá ser usado.

O valor de excesso de ar que deve ser utilizado depende de diversos fatores como o tipo de combustível, tipo de queimador, características e preparação do combustível, tipo de câmara de combustão, da carga e da malha de controle (BEGA, 2003).

Dukelow e Liptak (1991), Bega (2003) e Gilman (2005) expõem em seus trabalhos alguns valores de referência para excesso de ar na combustão de caldeiras para diferentes combustíveis, conforme mostrado a seguir:

- Gás natural: 7-15%;
- Óleo combustível: 3-15%;
- Carvão: 25-40%.

A Equação 5 proposta por Pinheiro (1995), propõe um calculo para o excesso de ar que independe do combustível utilizado:

Equação 5

$$\propto = \frac{20{,}9}{20{,}9 - (\%O_2 - \frac{\%CO}{2})}$$

Segundo Brooks (2010), o excesso de ar também é queimado, portanto quanto colocado acima do necessário, rouba energia que poderia estar sendo utilizada para a vaporização da água. A Figura 17 mostra exatamente essa relação, que quanto maior a quantidade de excesso de ar menor será a eficiência da caldeira.

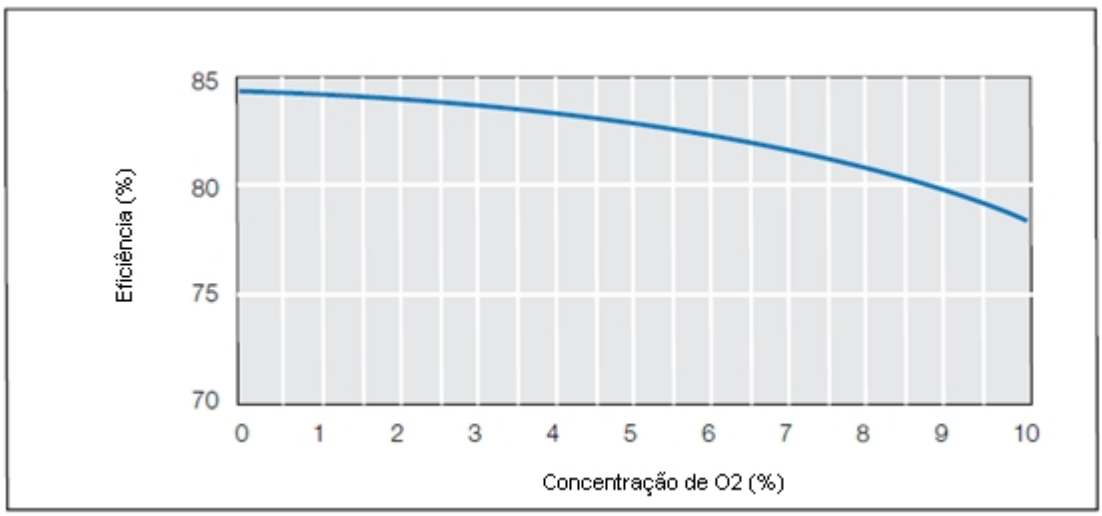

Figura 17: Relação entre a eficiência e o excesso de ar. Fonte: BROOKS, 2010.

Todos os autores citados em seus estudos convergem para a ideia de que o excesso de ar é um ponto critico, uma vez que pode ser benéfico por um lado e prejudicial por outro.

Um valor elevado de excesso de ar pode diminuir a temperatura da chama e consequentemente reduz a eficiência térmica, por outro lado, um valor reduzido de excesso de ar, resultará em uma combustão incompleta, que levará a formação de CO, fumaça e fuligem (NIKIEL, 2010).

4. Temperatura ambiente.

Ambientes com grande diferença de temperatura causam um grande impacto na eficiência. Como pode ser observado na Figura 18, ao se variar um ou dois graus a mudança na eficiência é pequena, no entanto, grandes mudanças na temperatura do ambiente afetam drasticamente a eficiência da caldeira, uma vez que pode aumentar a perda pelas paredes da caldeira.

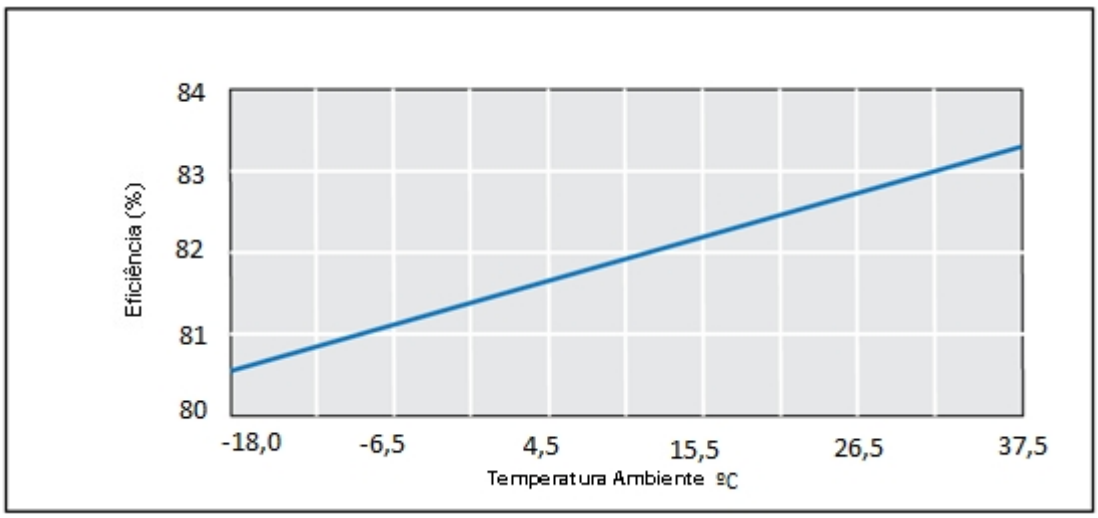

Figura 18: Relação da eficiência com a temperatura ambiente. Fonte: BROOKS, 2010.

Capítulo 3 – Metodologia

O presente capítulo inicialmente irá apresentar um detalhe da planta semi-industrial utilizada para a obtenção de dados para o desenvolvimento do projeto. Serão apresentados o fluxograma do projeto (P&ID), a arquitetura de automação e o sistema SCADA utilizado para obtenção dos dados da operação da planta e construção da um banco de dados com o histórico da operação da caldeira.

Em seguida será feita uma descrição sobre o procedimento adotado para o cálculo da eficiência da caldeira e a metodologia elaborada e utilizada para o desenvolvimento da análise de sensibilidade da eficiência da caldeira. Será mostrado o tratamento dos dados e os métodos usados para a análise das variáveis que fazem parte do cálculo da eficiência.

3.1 Caldeira Fogotubular

A presente dissertação utilizou para seu desenvolvimento dados históricos obtidos pelos testes experimentais de Valdeman (2010) elaborados em uma caldeira fogotubular vertical de pequeno porte, modelo CV-VDM-500, fabricada no ano de 2003. A Figura 19 apresenta a planta semi-industrial utilizada que está localizada na Central de Utilidades do LADEQ/EQ/UFRJ.

Figura 19: Planta piloto, usada no projeto. Fonte: VALDMAN, 2010.

A planta piloto é composta por quatro tanques de armazenamento de combustível, um tanque de armazenamento de água, um tanque de mistura e alimentação da caldeira, uma bomba de alimentação de combistível, um soprador, uma caldeira e uma linha de vapor saturado. O queimador da caldeira é alimentado pelo diesel, biodiesel ou mistura de diesel e biodiesel através de uma bomba e o ar é bombeado através de um soprador em proporções de 10%, 20% e 30% de excesso.

Ao se dar inicio a ignição o combustível é queimado e transfere calor para a água que está na caldeira, aquecendo-a e gerando vapor saturado que passa então pela linha de vapor para ser distribuído para utilização. O excesso de vapor gerado é então liberado para atmosfera através do uso de um silenciador e um tanque de retenção de líquido. A água da caldeira é reposta, conforme a demanda de vapor exigida, através da bomba de alimentação de água que bombeia do tanque de armazenamento (VALDMAN, 2010).

As caldeiras fogotubulares apresentam como vantagem em relação as caldeiras aquatubulares o fato de possuírem fácil construção à baixos custos, além de serem caldeiras robustas, podendo ser operadas com água com tratamentos mais brandos e podem operar com qualquer tipo de combustível, seja em estado líquido, gasoso ou sólido (ASSIS, 2009).

A Tabela 1 apresenta algumas características técnicas da caldeira utilizada nesse trabalho (VALDMAN, 2010).

Tabela 1 Caracteristicas tecnicas da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010.

Variável	Valor
Capacidade de Produção de Vapor, com água a 20°C	500 kg/h
Potencia térmica nominal	0,3 MW
Característica do Vapor	Saturado
Pressão máxima de trabalho	8,00 kgf/cm²
Categoria	B*
Combustível principal	Óleo diesel
Combustível auxiliar	Não possui
Tiragem	Forçada por insuflação
Superfície de aquecimento	22,80 m²
Número de Passes	01 (um)
Câmara de combustão	01 (um)
Tubos de 1 ½ “ de diâmetro com 1,938m	94 (noventa e quatro)
Volume médio de água durante o uso normal	0,6 m³
Vaporização específica por m³ de superfície de aquecimento	25 kgv/h
Dimensão da Chaminé	300 mm de diâmetro
Área média da Chaminé	900 cm²

A caldeira possui um sistema de controle, composto por um controlador dedicado, que é responsável pela lógica de controle, de intertravamento e de segurança. Quando necessário, nos casos de emergência, este controlador interrompe a alimentação de combustível, impossibilitando seu funcionamento, retornando apenas quando o operador acionar um botão no painel de comando local, reconhecendo a ocorrência da falha e após o restabelecimento da condição diagnosticada. O intertravamento existente é acionado quando a pressão excede o limite de segurança, ou em situação onde ocorra o apagamento da chama durante o período de queima ou quando ocorre falta de água na caldeira (VALDMAN, 2010).

**caldeiras alimentadas com fluidos combustíveis com temperatura inferior a 200ºC*

A Tabela 2 apresenta as características técnicas do combustível e de oxigênio utilizados na caldeira.

Tabela 2 Caracteristicas de operação da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010.

Variável	Valor
Vazão de combustível	26 kg/h
Vazão de oxigênio	10% - 30% de excesso de ar
Vazão de vapor saturado	~ 500 kg/h
Composição do combustível	Óleo Diesel/Biodiesel/Mistura

3.2 Diagrama P&ID

O digrama P&ID nos permite ter uma ideia melhor do processo e das variáveis analisadas. O P&ID mostrado na Figura 20 foi elaborado no padrão da norma ISA 5.1 (2009).

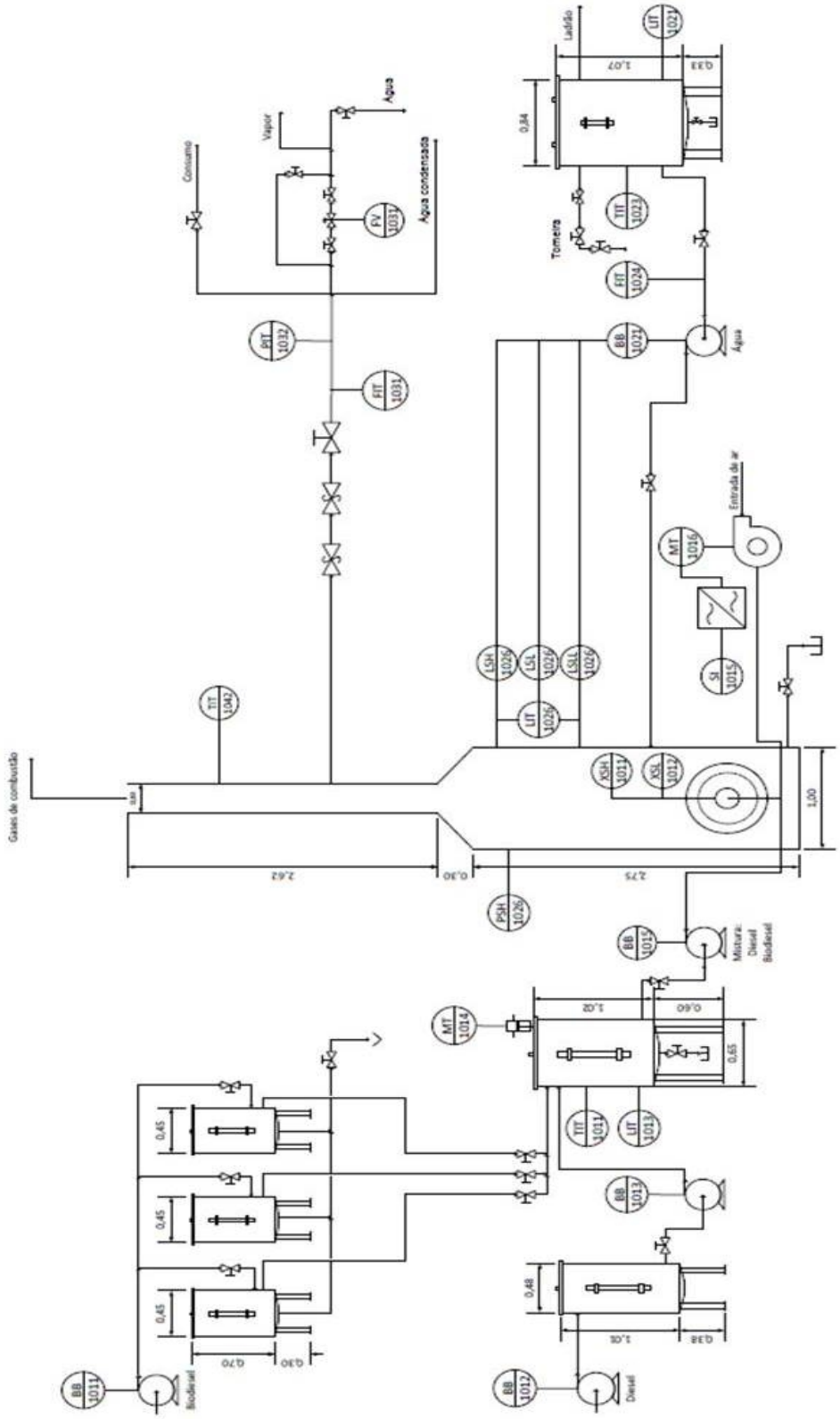

Figura 20: Digrama P&ID da planta pilto usada no projeto

3.3 Arquitetura de Automação

A arquitetura de automação instalada na planta é composta por instrumentos *fieldbus* para acompanhamento das variáveis contínuas, um controlador *liga/desliga* dedicado ao controle da queima e da água de reposição para manutenção do intertravamento de segurança, um controlador lógico programável para conversão das variáveis discretas ao protocolo de instrumentação padrão *fieldbus* e um sistema SCADA para monitorar e supervisionar todo o processo. A lógica de controle automático da caldeira utilizada é feita pelo controlador dedicado, cujos sinais de atuação não podem ser acessados pelo operador. Portanto, a automação instalada na planta permite apenas a garantia da segurança do processo, além da monitoração e supervisão das variáveis de processo disponibilizadas na rede de comunicação *fieldbus* (VALDMAN, 2010).

A Figura 21 mostra a arquitetura de automação vigente na planta, sendo está composta por:

1. Controlador: responsável pela automação da caldeira, ou seja, pela partida da caldeira (acionamento do soprador para a purga inicial, a abertura das válvulas de combustível e o centelhamento para dar início ao processo de queima), diagnóstico de falha (a falha de chama, a pressão alta na caldeira e o nível muito baixo de água na caldeira) e manutenção da segurança e controle do ciclo de combustão.

2. Controlador lógico programável (PLC): responsável pelo monitoramento das variáveis envolvidas no diagnóstico de falha e por disponibilizá-las na rede de instrumentação *fieldbus* utilizada para o monitoramento *online*.

3. Transmissores *fieldbus*: instrumentos responsáveis por enviar as informações da planta para o sistema supervisório.

4. Sistema supervisório (SCADA): responsável pelo acompanhamento do processo através de telas gráficas, pelo armazenamento de dados, e geração de relatórios. Através do SCADA é possível verificar qualquer desvio na operação da planta. No item 3.4 o sistema será melhor detalhado.

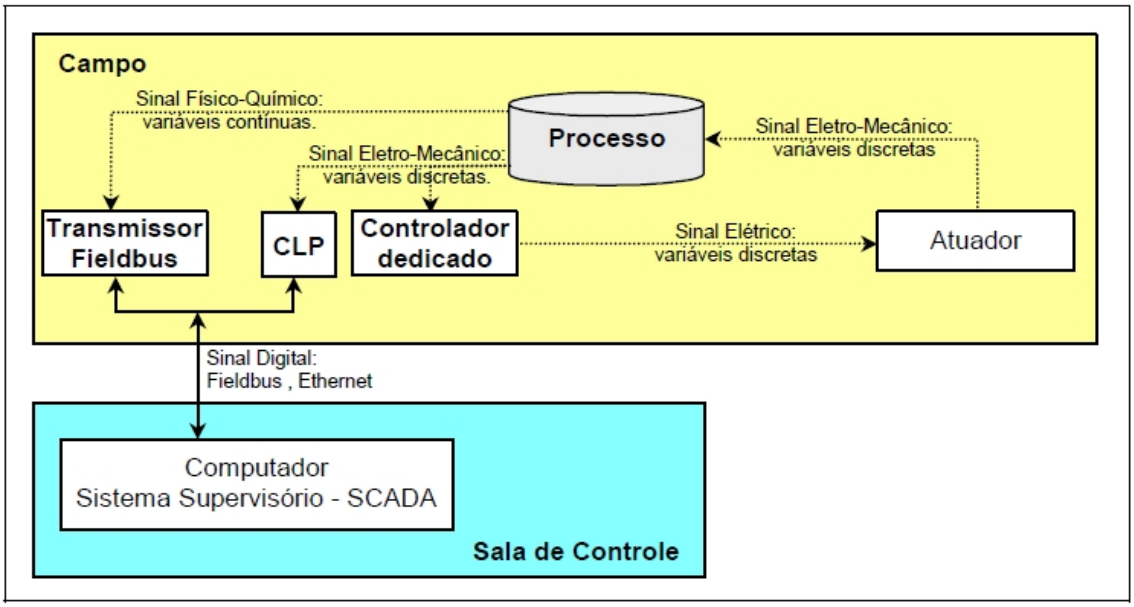

Figura 21: Arquitetura de automação do projeto Fonte: VALDMAN, 2010.

O controlador utilizado na planta piloto foi fabricado pela Landis&Staefa, empresa especializada em controladores utilizados na queima de óleo combustível e foi fornecido e instalado junto com os equipamentos físicos da caldeira, pela empresa Servenge. O controlador lógico programável (PLC) é um equipamento modular e os transmissores *fieldbus* utilizados na planta piloto são da empresa SMAR Equipamentos Industriais Ltda.

O PLC é composto por uma fonte de alimentação, um módulo de CPU, um cartão com até 16 variáveis discretas de entrada e um módulo de conversão *fieldbus*. Dentre os transmissores *fieldbus*, estão os transmissores de temperatura, nível e pressão. O sistema SCADA utilizado na planta foi o iFixProficy®, software da empresa GE IntelligentPlatforms, uma ramificação da empresa General Electric, dimensionado para monitorar até 300 variáveis de processo simultaneamente, entre as variáveis discretas, contínuas e calculadas (VALDMAN, 2010).

3.4 Sistema SCADA

O sistema supervisório SCADA é o responsável pelo monitoramento do processo, é composto por uma tela principal (Figura 22) que replica o processo e a instrumentação instalada na planta, permitindo assim uma visão geral do processo e do andamento do mesmo.

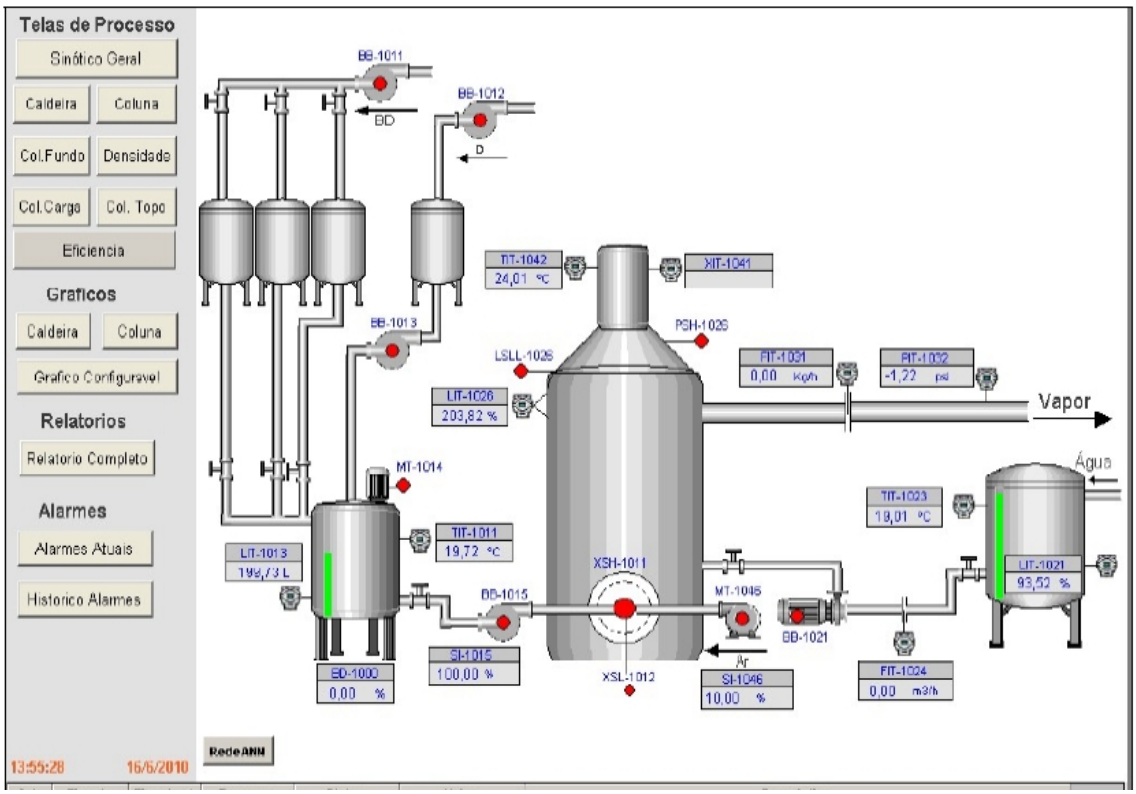

Figura 22: Tela gráfica do sistema supervisório. Fonte: VALDMAN, 2010.

O sistema também é composto por telas para apresentação de gráficos de tendência, que permitem acompanhamento dos dados em tempo real e dados de histórico, telas de alarmes para diagnóstico de falhas e telas específicas para emissão de relatórios através de planilhas eletrônicas (VALDMAN, 2010).

O sistema SCADA foi configurado de forma a monitorar e armazenar todas as variáveis de processo disponíveis a ele, por meio da instrumentação instalada em intervalos de 1 segundo ao longo do experimento.

As variáveis monitoradas são apresentadas nas tabelas: Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e estão dividas em variáveis discretas, continuas e calculadas.

Tabela 3: Variáveis contínuas disponíveis na instrumentação fieldbus da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010.

TAG	Descrição	Faixa de medida
LIT-1013	Nível do tanque de alimentação de combustível	37,50 a 353,00 L
LIT-1021	Nível do tanque de alimentação d eágua	0 a 100 %
LIT-1026	Nível da caldeira	0 a 100 %
FIT-1024	Vazão de água de alimentação	0 a 5,2 m³h
FIT-1031	Vazão de vapor	0 a 500 Kg/h
PIT-1032	Pressão de vapor da linha	0 a 100 psi
TIT-1011	Temperatura do óleo combustível	0 a 100°C
TIT-1023	Temperatura da água de alimentação	0 a 400°C
TIT-1042	Temperatura dos gases residuais	0 a 100°C
AIT-1001	Analisador de gases na chaminé	-

Tabela 4: Variáveis discretas disponíveis na instrumentação analógica/CLP/fieldbus da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010.

TAG	Descrição
BB-1011	Bomba de alimentação de combustível dos tanques de armazenamento
BB-1012	Bomba de alimentação de diesel dos tanques de armazenamento
BB-1013	Bomba de alimentação de diesel ao tanque de mistura
MT-1014	Motor de agitação do tanque de mistura
PSH-1026	Alarme do pressostato de alta
LSLL-1026	Alarme de nível baixo de água
BB-1015	Bomba de alimentação de combustível à caldeira
BB-1021	Bomba de alimentação de água à caldeira
MT-1016	Soprador
XSL-1012	Alarme de falha de chama
XSH-1011	Queimador ligado

Tabela 5: Variáveis calculadas e variáveis de entrada manual disponíveis no sistema SCADA da caldeira. Fonte: VALDMAN, 2010.

TAG	Descrição	Faixa de medida
SI-1046	Ajuste de excesso de ar para a caldeira	0 a 100%
COMB	Proporção de biodiesel na mistura	0 a 100%
DENS	Densidade da mistura	0 a 1,0 kg/m³
PCALOR	Poder Calorífico	0 a 5,0 KJ/Kg
TMFIT-1031	Totalização do vapor produzido	0 a 999999 Kg/h
CA_EF	Eficiência da caldeira	0 a 100%

3.5 Dados Históricos

Para o desenvolvimento do presente projeto foram usados os dados históricos armazenados ao longo dos testes experimentais, que envolviam a variação do combustível e das porcentagens de excesso de ar. Para a coleta dos dados foi utilizada a instrumentação instalado na planta industrial.

Os dados utilizados são referentes a 10 experimentos sendo: dois com diesel puro, um experimento para misturas com as porcentagens de 20%, 30%, e 50% de biodiesel no diesel, dois para as misturas de 40% e 60% de biodiesel e um com 100% de biodiesel.

Os testes experimentais feitos por Valdman (2010) foram efetuados para todos os combustíveis com porcentagens de 30%, 20% e 10% de excesso de ar, aplicadas em intervalos sucessivos de uma hora, gerando dados suficientes para a criação de um banco de dados em Excel com as medições listadas nas tabelas 3, 4 e 5.

Em trabalho posterior, Moscoso e Queiroz (2011) desenvolveram um algoritmo em Excel, para o cálculo da eficiência da caldeira *offline* utilizando como referência a norma ASME PTC-4. O método utilizado para o cálculo da eficiência foi o balanço de energia, onde todas as perdas e créditos existentes no processo foram identificadas.

A Figura 23 (Moscoso e Queiroz, 2011) mostra as etapas feitas pelo algoritmo desenvolvido. A partir dos dados de entrada são calculados as perdas e créditos do processo, para enfim se obter a eficiência da caldeira.

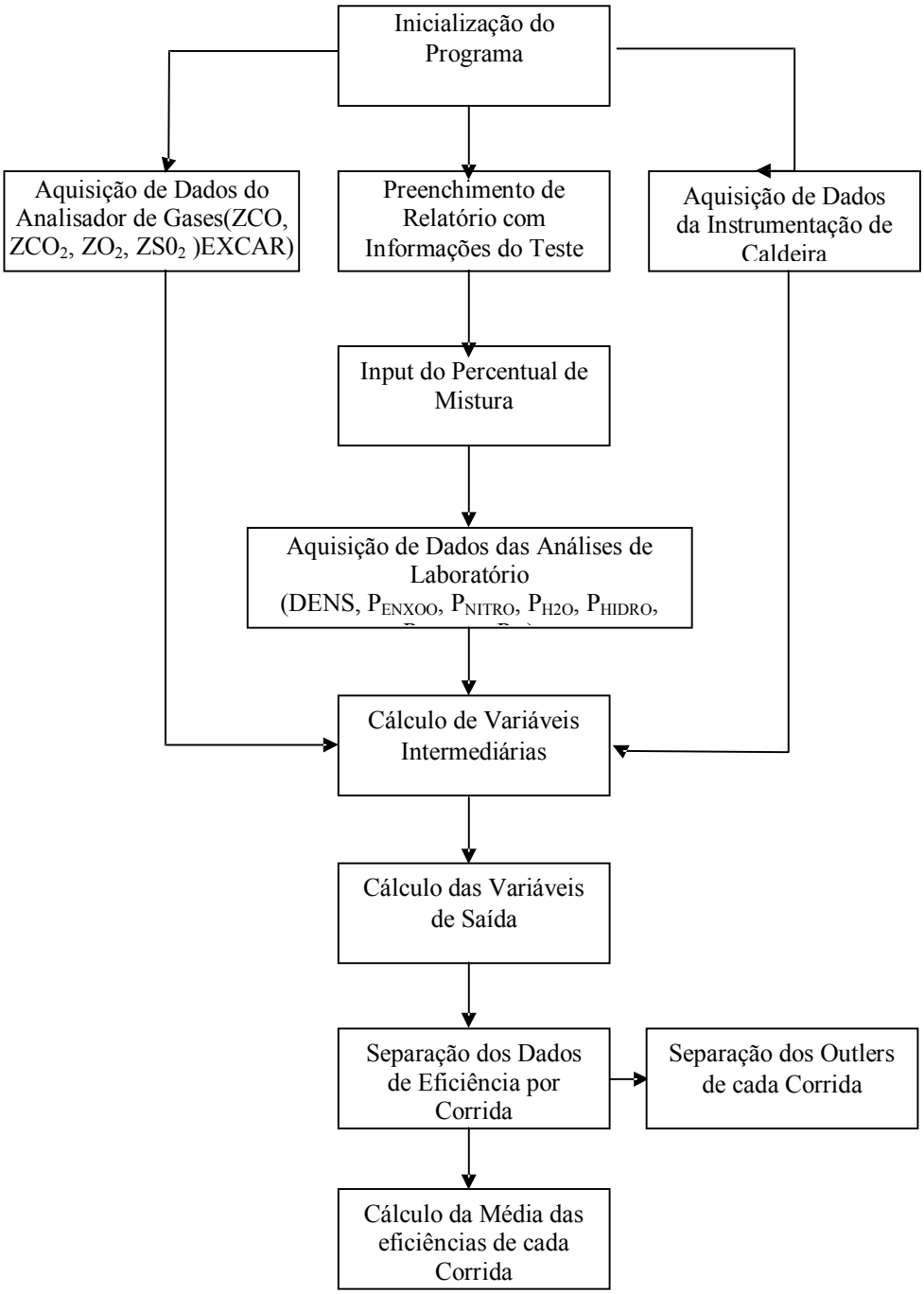

Figura 23: Etapas do algoritimo para o cálculo da eficiência. Fonte: MOSCOSO e QUEIROZ, 2011.

Para o desenvolvimento do presente projeto, o algoritmo desenvolvido em VBA, *Visual Basic for Applications,* por Moscoso e Queiroz (2011) recebeu novos incrementos de modo que, fosse possível analisar o impacto da mudança das perdas e dos créditos na eficiência.

3.6 Análise de Sensibilidade

3.6.1. Método Gráfico

Com o objetivo de se estudar o impacto das variáveis envolvidas no cálculo da eficiência foram adotados dois métodos de análise: o método gráfico e o sugerido pela norma ASME PTC-4 (2008).

O primeiro método adotado foi o gráfico, elaborado a partir dos dados das corridas. Foi realizado o cálculo da eficiência e o resultado obtido foi utilizado como referencial para a condição considerada normal para a operação da caldeira.

Para que fosse possível observar graficamente o impacto de alterações nos parâmetros e comparar qual gerava uma maior variação na eficiência, buscou-se padronizar a proporção de alteração nas variações. Para manter a mesma proporção de variação para todos os parâmetros foram criadas planilhas auxiliares conforme mostrado na tabela 6, onde o valor normal de operação foi multiplicado nas seguintes proporções: 0,08, 0,1, 0,2, 0,5, 0,6, 0,8, 0,9, 1,1, 1,2, 1,4, 1,5, 2, 2,5, 3,5 e 5.

Valor base	0,08	0,1	0,2	0,5	0,6	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,4	1,5	2	2,5	3,5	5
2083,93	166,7146	208,3933	416,7866	1041,966	1250,36	1667,146	1875,54	2083,933	2292,326	2500,719	2917,506	3125,899	4167,866	5209,832	7293,765	10419,66
1997,31	159,7847	199,7308	399,4617	998,6542	1198,385	1597,847	1797,578	1997,308	2197,039	2396,77	2796,232	2995,963	3994,617	4993,271	6990,579	9986,542
2015,96	161,2764	201,5955	403,191	1007,978	1209,573	1612,764	1814,36	2015,955	2217,551	2419,146	2822,337	3023,933	4031,91	5039,888	7055,843	10079,78

Tabela 6: Exemplo de Planilha Auxiliar de Variação

A partir da planilha auxiliar, as informações dos valores dos parâmetros obtidas foram inseridas na planilha de cálculo da eficiência, recalculando o valor da eficiência para cada proporção e porcentagem de ar.

Primeiramente foram feitos testes nas perdas e nos créditos das corridas com diesel, de modo a determinar qual o parâmetro apresenta maior efeito na eficiência. Posteriormente, analisou-se o impacto da mudança simultânea desses parâmetros na eficiência, a fim de observar os possíveis efeitos de interação, ou seja, qual seria o efeito quando vários créditos ou perdas variassem simultaneamente. Por fim, determinou-se qual variável medida, ou calculada que deveria receber maior atenção durante a operação da caldeira, uma vez que essa variável seria responsável pelas maiores perdas de eficiência.

Os resultados obtidos para a eficiência de cada teste, com diferentes porcentagens de excesso de ar, foram usados para a geração dos gráficos contendo as informações de eficiência média com 10%, 20% e 30% de excesso de ar versus % de variação do parâmetro. Com os gráficos gerados (que serão apresentados no Capítulo 4) foi possível visualizar o impacto dessas variações na eficiência da operação e desempenho da caldeira para cada perda e crédito.

Uma vez observado que método permite ajustar e responder satisfatoriamente o resultado da mudança de uma determinada variável no cálculo da eficiência, seguiu-se a etapa de análise comparativa de sensibilidade. A análise comparativa dos impactos na eficiência da caldeira operando com diesel, biodiesel e a mistura desses combustíveis foi realizada para observar o comportamento diante da mudança do combustível.

Como o método gráfico era apenas qualitativo, verificou-se a necessidade de se aplicar um método que mostrasse quantitativamente essa mudança na eficiência, para obter resultados numéricos, de forma a permitir a determinação das variáveis relevantes para que a caldeira opere com maior eficiência.

3.6.2. Método Segundo a ASME PTC-4

Para essa segunda etapa, optou-se por utilizar o método de análise de sensibilidade sugerido pela norma ASME PTC-4 (2008). De acordo com a norma, pode-se calcular um coeficiente de sensibilidade, que representa o efeito absoluto ou relativo de um determinado parâmetro sobre a eficiência da caldeira. Por meio desse coeficiente é possível então, medir a variável que apresenta maior impacto no resultado final.

O cálculo ocorre a partir de uma perturbação arbitrária em um determinado parâmetro. Primeiramente é calculado o incremento no valor de um parâmetro através da Equação 6 e, em seguida, é calculado o coeficiente absoluto de sensibilidade através da Equação 7. Posteriormente, pela Equação 8 é calculado o coeficiente relativo, que é definido como a razão entre a porcentagem da alteração no resultado pela porcentagem da alteração no parâmetro.

Equação 6: Incremento no valor do par

$$CHGPAR = \frac{(PCHGPAR * Xavg)}{100}$$

Equação 7: Coeficiente absoluto de sensibilidade

$$ASENSCO = \frac{(RECALCEF - Ef)}{CHGPAR}$$

Equação 8: Coeficiente relativo de sensibilidade

$$RSENSCO = \frac{(ASENSCO * Xavg)}{Ef}$$

3.7 Eficiência da Caldeira

Até 2008, o número total de utilização de caldeiras industriais no mundo somaram 578.200 unidades e o cálculo mais representativo da eficiência da caldeira se tornou de extrema importância para a manutenção do desempenho da caldeira. O teste de eficácia da caldeira é uma forma produtiva para identificar os problemas da caldeira e melhorar a sua eficiência (LV, 2012).

A eficiência da caldeira é definida como a razão entre as entradas e saídas da caldeira, ou seja, a razão entre as perdas e créditos que ocorrem durante a operação. O presente trabalho foi desenvolvido baseado nas equações vigentes na norma ASME PTC-4 – "*Fired Steam Generators*" (2008).

A norma apresenta dois métodos para o cálculo da eficiência: o primeiro o modelo de entrada / saída e o segundo o método de balanço de energia. Para o desenvolvimento desta dissertação foi utilizado o segundo método: o de balanço de energia.

3.7.1. Método de Balanço de Energia

O método utilizado possui como vantagens: a precisão, pelo fato de que as medições primárias tais como temperatura do gás combustível e suas propriedades, poderem ser feitas de modo preciso; pequena incerteza associada, uma vez que as perdas medidas representam apenas uma pequena fração da energia total; identificação das perdas, pois permite identificar as perdas ao longo do processo (ASME PTC-4, 2008).

A Equação 9 apresentada na norma mostra o balanço de energia considerado para o desenvolvimento do cálculo da eficiência.

Equação 9

$$SAÍDA = ENTRADA - PERDAS$$

$$QrS = QrE - QrP$$

A entrada do processo por sua vez é definida pela

Equação 10

$$QrE = Poder\ Calorífico + Crédito$$

Sendo a eficiência representada pela Equação 11:

Equação 11

$$Ef = 100\ x\ \frac{Saída}{Entrada}\ (\%)$$

Substituindo a saída e a entrada na formula da eficiência obtém-se a Equação 12

Equação 12

$$Ef = 100X\ \frac{Entrada - Perdas}{PCI + Créditos}\ (\%)$$

Organizando as fórmulas se obtém as equações 13 e 14.

Equação 13

$$Ef = 100\ x\ \frac{PCI + Créditos\ - Perdas}{PCI +\ Créditos}\ (\%)$$

Equação 14

$$Ef = 100\ x\left(1 - \frac{Perdas}{PCI +\ Créditos}\right)\ (\%)$$

O método de balanço de energia requer o levantamento de todas as perdas e créditos existentes. A Figura 24 resume todas as fontes de energia térmica relacionadas ás entradas/ saídas e perdas/ créditos levantados pelo comitê elaborador da norma. É possível identificar os créditos e perdas aplicáveis aos testes realizados, tais como: crédito devido ao ar de combustão seco, crédito devido ao calor sensível dos combustíveis e perdas devido a umidade do ar entre outras variáveis.

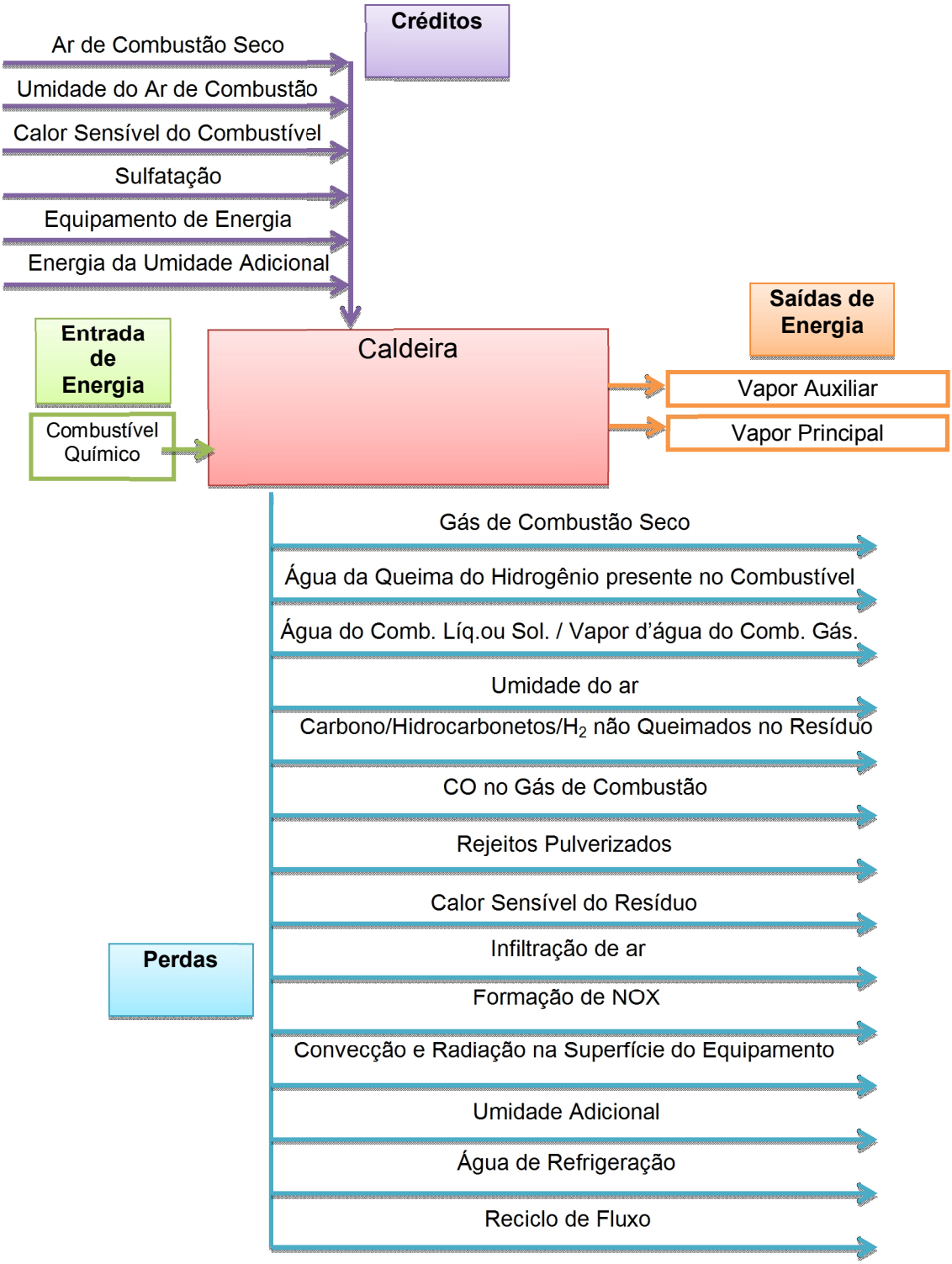

Figura 24: Fluxograma de Entradas/ Saídas de Energia e de Perdas/ Créditos segundo a norma ASME-PTC-4 (2008).

A Figura 25 é uma forma mais resumida das perdas e créditos apresentados na norma, apresentando apenas os que se referem ao projeto. Primeiramente foram desconsiderados as perdas e créditos que não se aplicam e em seguida, os mesmos foram agrupados, como o caso das perdas referentes a umidade do ar e da água formada pela presença de hidrogênio no combustível, as quais foram resumidas na perda de calor sensível pelos gases em base seca.

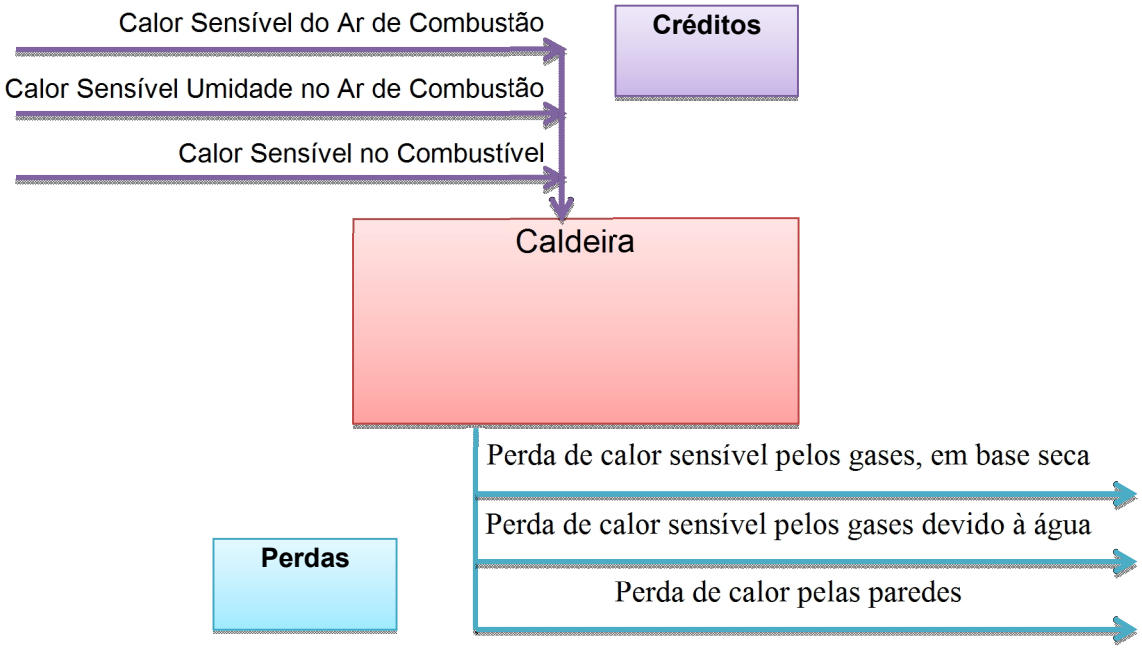

Figura 25: Créditos e Perdas Utilizados no Calculo da Eficiência

Juntando o balanço de energia do processo e expandindo a equação da eficiência em termos de perdas e créditos do processo de acordo com o descrito na Figura 25, a Equação 15, apresentada abaixo, para o cálculo da eficiência é gerada.

Equação 15

$$Ef(\%) = 100 * \left(1 - P_3 - \frac{P_1 + P_2}{PCI + C_1 + C_2 + C_3}\right)$$

Para que fosse possível o cálculo da eficiência, as variáveis que compõe as perdas e créditos da Equação 15 foram divididas em três grupos:

1. Variável de Entrada:

São as variáveis definidas no inicio do processo que são *inputs* para o projeto. A Tabela 7 apresenta essas variáveis.

Tabela 7: Variaveis de Entrada. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011

Variável	Descrição	Unidades
DENS	Densidade do óleo combustível	d60/602
P_3	Perda de calor pelas paredes	-
UMID	Umidade absoluta do ar	Kg de água/Kg de ar
P_{NITRO}	Porcentagem em massa de N_2 no combustível	% m/m
P_{CARBO}	Porcentagem em massa de carbonono combustível	% m/m
P_{ENXO}	Porcentagem em massa de enxofre no combustível	% m/m
P_{H2O}	Porcentagem em massa de água no combustível	% m/m
P_{HIDRO}	Porcentagem em massa de H_2 no combustível	% m/m
Z_{CO2}	Porcentagem em massa de CO_2 no gás de combustão, base seca	% m/m
ZO2	Porcentagem em massa de O_2 no gás de combustão, base seca	% m/m
Z_{CO}	Porcentagem em massa de CO no gás de combustão, base seca	% m/m
Z_{SO2}	Porcentagem em massa de SO_2 no gás de combustão, base seca	% m/m
EXC_{AR}	Excesso de ar de combustão	kg de ar/kg de comb.
PCI	Poder calorífico inferior do combustível	Kcal/kg
t_{AR}	Temperatura do ar de combustão	^oC
t_{COMB}	Temperatura do combustível	^oC
t_G	Temperatura do gás de combustão	^oC

As variáveis de entrada por sua vez podem ser divididas em quatro fontes:

- *Análise de Laboratório*: as análises geraram os dados de densidade do combustível, poder calorífico e porcentagem mássica dos componentes do combustível.

- *Dados do Analisador:* os dados oriundos do analisador forneceram a porcentagem mássica dos componentes do gás de combustão.

- *Instrumentação da caldeira:* os dados da instrumentação fornecem informações como temperaturas, nível da caldeira e vazão de vapor.

- *Fixados:* alguns valores foram previamente definidos e fixados como a perda de calor pelas paredes e a umidade absoluta do ar.

2. Variáveis Intermediárias:

São as variáveis calculadas a partir dos dados de entrada que servirão para o cálculo das perdas e créditos. A Tabela 8 apresenta essas variáveis.

Tabela 8: Variáveis Intermediarias. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011

Variável	Descrição	Unidades
CP_{COMB}	Capacidade térmica específica do óleo combustível	Kcal/(kg .^{0}C)
H_{UMID}	Entalpia da umidade do ar à temperatura do ar de combustão	Kcal/kg
Z_{N2}	Porcentagem em massa de N_2 no gás de combustão, base seca	% m/m
P_{OXIO}	Porcentagem em massa de O_2 no combustível	% m/m
H_{AR}	Entalpia do ar à temperatura do ar de combustão em base seca	Kcal/kg
H_{CO}	Entalpia do CO à temperatura do gás de combustão	Kcal/kg
H_{CO2}	Entalpia do CO2 à temperatura do gás de combustão	Kcal/kg
H_{GAS}	Entalpia do gás de combustão em base seca	Kcal/kg
H_{H2O}	Entalpia da água à temperatura do gás de combustão	Kcal/kg
H_{N2}	Entalpia do N_2 à temperatura do gás de combustão em base seca	Kcal/kg
H_{O2}	Entalpia do O_2 à temperatura do gás de combustão em base seca	Kcal/kg
H_{SO2}	Entalpia do SO_2 à temperatura do gás de combustão em base seca	Kcal/kg
AR_{TEO}	Ar teórico	Kg de ar/kg de comb.
AR_{REAL}	Ar real utilizado na combustão	Kg de ar/kg de comb.
GAS_{REAL}	Gás real de combustão em base seca	kg de ar/Kg de comb.

3. Variáveis de Saída:

São as perdas e créditos que servirão para o cálculo final da eficiência. A Tabela 9 apresenta essas variáveis.

Tabela 9: Variáveis de Saída. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011

Sigla	Descrição	Unidades
P_1	Perda de calor sensível pelos gases, base seca	Kcal/Kg
P_2	Perda de calor sensível pelos gases devido à água	Kcal/Kg
C_1	Crédito devido ao calor sensível do ar de combustão	Kcal/Kg
C_3	Crédito devido ao calor sensível do combustível	Kcal/Kg
C_4	Crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão	Kcal/Kg
Ef(%)	Eficiência da caldeira referida ao PCI	%

De modo a entender melhor o cálculo da eficiência, a Figura 26 apresenta a relação das variáveis que compõem este cálculo. Através do uso das cores é possível identificar os três grupos que foram descrito anteriormente. O grupo das variáveis de entrada representado em azul, o das variáveis intermediárias em vermelho e das variáveis de saída em verde. Sendo assim, é possível uma melhor visualização do impacto de cada uma dessas variáveis na eficiência.

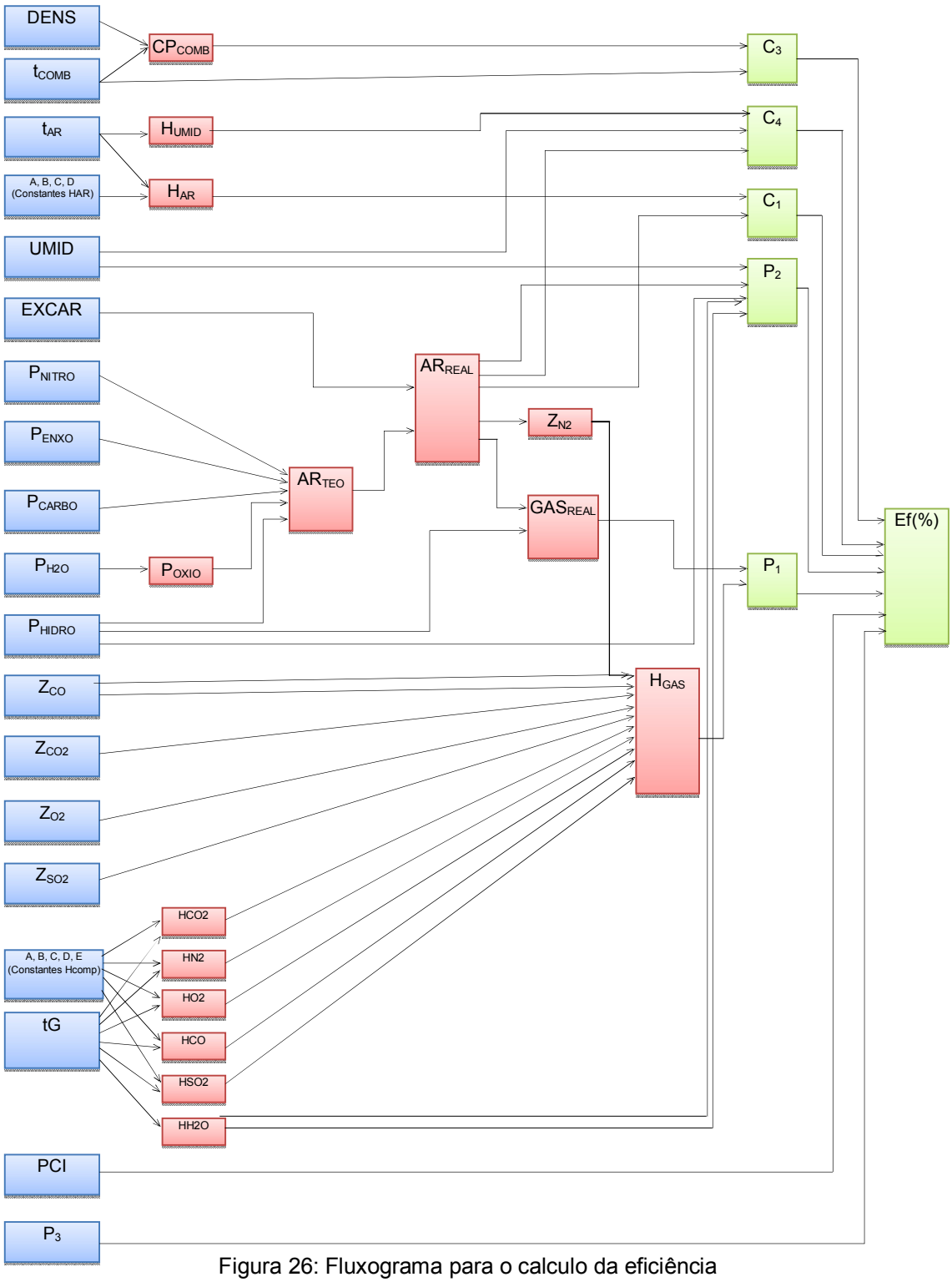

Figura 26: Fluxograma para o calculo da eficiência

3.8 Cálculo das Variáveis Intermediarias

As equações que serão apresentadas são baseadas na norma ASME-PTC-4 (2008).

Equação 16: Capacidade Térmica do Óleo Combustível (Kcal/(kg °C)

$$CP_{COMB} = \frac{1}{(DENS)^{0,5}} * (0,40074 + 0,0008115 * T_{COMB})$$

Equação 17: Entalpia da umidade do ar à temperatura do ar de combustão (Kcal/Kg)

$$H_{UMID} = (0,3462 * T) + (0,0000916 * T^2) + 14,05\ ln\left(T/_{100}\right) + 461,4$$

$$T = T_{AR} + 273,15$$

Equação 18: Entalpia do ar seco à temperatura do ar de combustão em base seca (Kcal/Kg)

$$H_{AR} = \frac{T_{AR} * [A + T_{AR} * \{B + T_{AR} * (C + T_{AR} * D)\}]}{28,85} - 71,0$$

$$T_{AR} = t_{AR} + 273,15$$

As entalpias do CO_2,CO, SO_2, O_2 e N_2 são calculadas pela mesma equação variando apenas as constantes conforme apresentado na Equação 19.

Equação 19: Entalpia dos componentes à temperatura do gás de combustão (Kcal/Kg)

$$H_{COMP} = Tg * [A + Tg * \{5x10^{-4} * B + Tg * (33,33x10^{-8} * C + (25,10x10^{-11} * D))\}] - E$$

$$Tg = tg + 273,15$$

As constantes A, B, C, D e E para cada componente são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Constantes para o cálculo da entalpia. Fonte: ASME-PTC4, 2008

Componente	A	B	C	D	E
CO2	5,14	15,40	-9,94	2,42	2133,94
N2	7,07	-1,32	3,31	-1,26	2076,00
SO2	5,85	15,40	-11,10	2,91	2336,35
O2	6,22	2,71	-0,37	-0,22	1971,24
CO	6,92	-0,65	2,80	-1,14	2056,79

Equação 20: Entalpia do gás de combustão, em base seca (Kcal/kg)

$$H_{GAS} = \frac{(H_{O2} * Z_{O2}) + (H_{CO2} * Z_{CO2}) + (H_{N2} * Z_{N2}) + (H_{CO} * Z_{CO}) + (H_{SO2} * Z_{SO2})}{(32 * Z_{O2}) + (44{,}01 * Z_{CO2}) + (28{,}016 * Z_{N2}) + (28{,}01 * Z_{CO}) + (64{,}06 * Z_{SO2})}$$

Equação 21: Porcentagem mássica de oxigênio no combustível (%m/m)

$$P_{OXIO} = 0{,}8881 * P_{H20}$$

Equação 22: Ar teórico (kgde ar/kg de combustível)

$$AR_{TEO} = (0{,}1144 * P_{CARBO}) + (0{,}34073 * P_{HIDRO}) + (0{,}042851 * P_{ENXO}) + (0{,}098085 + P_{NITRO}) - (0{,}042932 * P_{OXIO})$$

Equação 23:Ar real (kgde ar/kg de combustível)

$$Ar_{REAL} = AR_{TEO} + EXC_{AR}$$

Equação 24: Gás real (kgde gás/kg de combustível)

$$Gas_{REAL} = Ar_{REAL} + 1 - 8{,}937 * \frac{P_{HIDRO}}{100}$$

Equação 25: Porcentagem mássica de nitrogênio no gás de combustão

$$Z_{N2} = 0{,}79 * AR_{REAL}$$

3.9 Cálculo das variáveis de saída

As equações que serão apresentadas são baseadas na norma ASME-PTC-4.

Equação 26: Perda de Calor Sensível pelos gases em base seca (Kcal/kg)

$$P_1 = GAS_{REAL} * H_{GAS}$$

Equação 27: Perda de calor sensível pelos gases devido à água (Kcal/kg)

$$P_2 = \left(UMID * AR_{REAL} + \frac{8{,}937 * P_{HIDRO}}{100}\right) * (H_{H2O} - 608{,}2)$$

Equação 28: Perda de Calor Sensível pelos gases devido à água

$$P_3 = \frac{U_{EXT} * A_{EXT} * (t_{EXT} - t_{AMBS})}{P_{CI} * Q_{COMB}}$$

Equação 29:Crédito Devido ao Calor Sensível do Ar de Combustão

$$C_1 = AR_{REAL} * H_{AR}$$

Equação 30:Crédito Devido ao Calor Sensível do Combustível

$$C_3 = CP_{COMB} * (t_{COMB} - 25)$$

Equação 31:Crédito Devido ao Calor Sensível da Umidade do Ar de Combustão

$$C_4 = UMID * AR_{REAL} * (H_{UMID} - 608{,}2)$$

Capítulo 4 - Resultados

Este capítulo apresenta inicialmente a análise das variações de parâmetros que fazem parte do cálculo da eficiência da caldeira quando a mesma opera com diesel.

Depois é feita uma análise comparativa do impacto das mudanças operacionais na eficiência da caldeira em três tipos diferentes de combustível.

Em seguida são apresentados os resultados na forma gráfica para avaliação da relação entre a eficiência da caldeira, em função do combustível de alimentação da caldeira e o poder calorífico de cada um deles.

Por fim, são apresentadas as alterações das variáveis de processo que mais impactam na eficiência, e uma análise comparativa das emissões geradas pelo funcionamento da caldeira nas diferentes condições de operação estudadas.

4.1. Dados Históricos

Como descrito no capítulo anterior, com o objetivo de analisar o comportamento da eficiência da caldeira mediante mudanças operacionais, foram simuladas alterações no processo. Foram forçadas alterações no caso base, caso este gerado a partir dos dados experimentais originais, ou seja, alterações a partir dos dados obtidos durante as corridas da caldeira.

A Tabela 11 apresenta as propriedades dos combustíveis que foram utilizados para operar a caldeira. Para a determinação do teor dos componentes foram feitas análises em laboratório da composição principal dos combustíveis.

Tabela 11: Propriedades dos Combustíveis. Fonte: MOSCOSO E QUEIROZ, 2011

Fluido	Massa específica a 20°C (kg/m^3)	Teor de Enxofre (%)	Teor de Nitrogênio (%)	Teor de Água (%)	Teor de Carbono (%)	Teor de Hidrogênio (%)	PCI (Kcal/Kg)
Diesel	836,7	0,0529	0,08	0,01	86,22	13,77	10090
Biodiesel	882,1	0,000661	0,05	0,01533	76,87	12,34	8790
50% Bd - 50% Diesel	866	0,033	0,105	0,21065	81,41	13,27	9420

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os resultados da eficiência ao longo dos testes experimentais. Nas figuras são apresentados os dados obtidos nos testes realizados com 10%, 20% e 30% de excesso de ar. Esses valores de eficiência são os que servirão de base para determinação do comportamento do processo ao se variar as perdas e créditos.

A Figura 27 mostra os dados de eficiência obtidos para os testes com diesel.

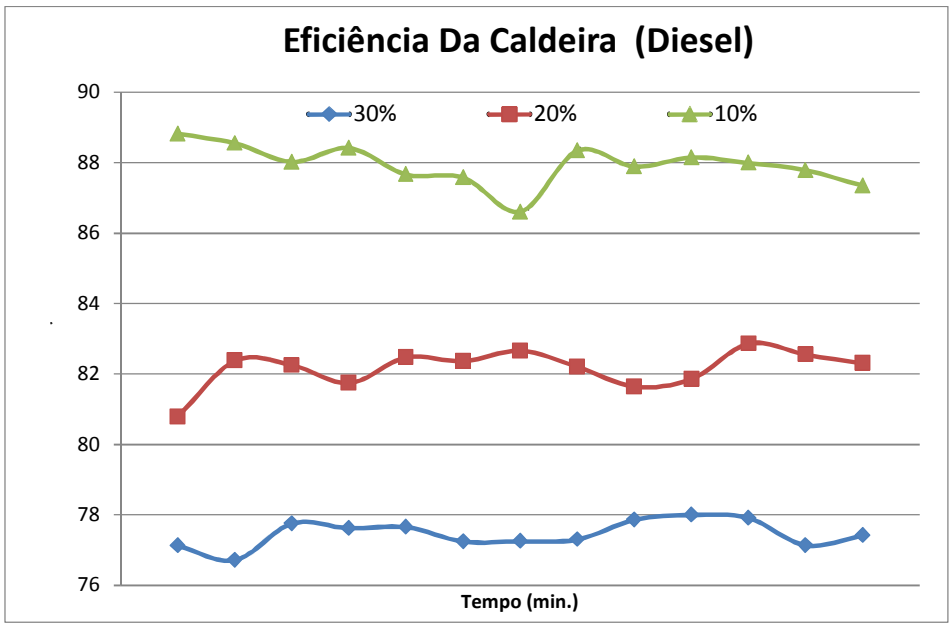

Figura 27: Eficiência da Caldeira com Diesel a partir dos dados experimentais

A Figura 28 representa a eficiência da caldeira operado com biodiesel.

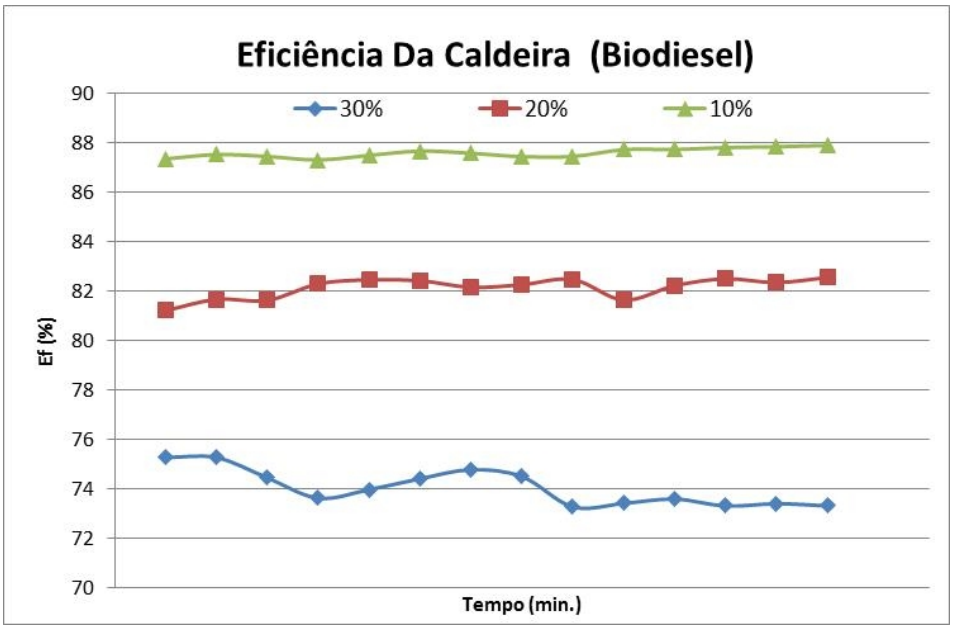

Figura 28: Eficiência da Caldeira com Biodiesel a partir dos dados experimentais

A Figura 29 apresenta o resultado ao se trabalhar com a mistura de 50% de diesel e 50% de biodiesel.

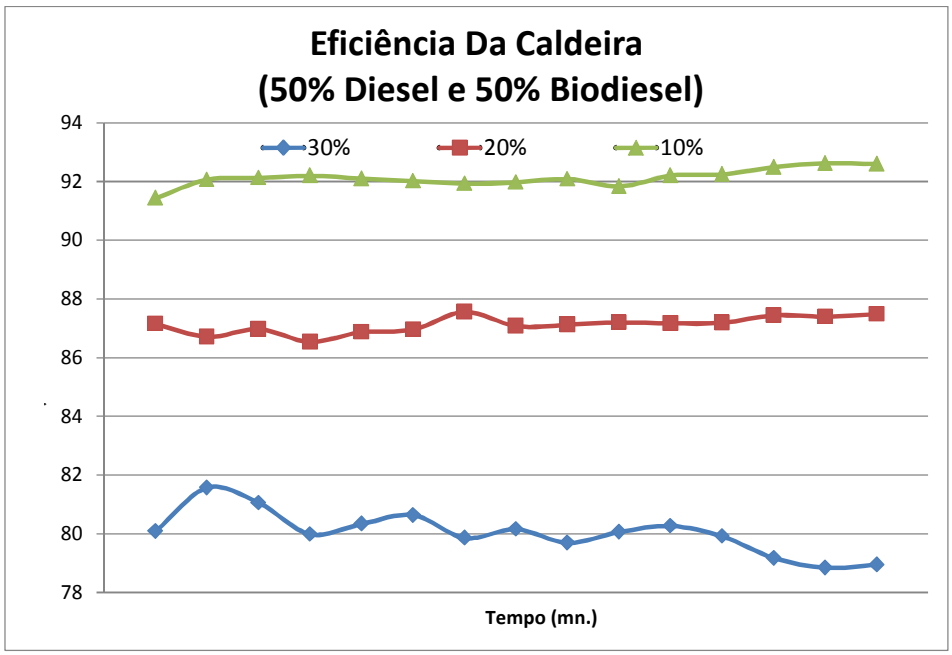

Figura 29: Eficiência da Caldeira com Mistura de 50% de Diesel e 50% de Biodiesel a partir dos dados experimentais

Analisando as figuras Figura 27Figura 28 e Figura **29** é possível constatar que as corridas com diesel apresentam um comportamento menos estável, ou seja, uma maior oscilação do que, os testes com mistura de diesel e biodiesel e do biodiesel puro. O teste relacionado a esse último combustível é o que apresenta um comportamento mais homogêneo.

Quando analisamos o comportamento dois três combustíveis para as três diferentes porcentagens de excesso de ar é possível constatar que para todos os casos as corridas com 10% de ar são as mais instáveis.

4.2. Análise das Perdas e Créditos Operando com Diesel

Primeiramente, serão apresentados os gráficos que mostram as variações individuais nas perdas e créditos para cada porcentagem de excesso de ar e o seu respectivo impacto na eficiência da caldeira. Depois serão apresentados os impactos das variações simultâneas.

4.2.1. *Perda de Calor Sensível Pelos Gases, em Base Seca - P1 (Kcal/Kg)*

A perda de calor sensível pelos gases, em base seca, é formada pela multiplicação da quantidade de gás real de combustão gerado por quilo de combustível e a entalpia do gás de combustão. Analisando os dados, verifica-se que as variáveis que compõem esta perda refletem em uma perda do calor que seria usado na troca térmica, ou seja, quanto de calor que foi gerado pela queima do combustível e está presente nos gases de combustão está sendo perdido, desconsiderando a umidade.

Para se observar a importância da perda de calor pelos gases na eficiência da caldeira, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 30. A linha vertical representa à média da corrida experimental (ponto de base dos dados).

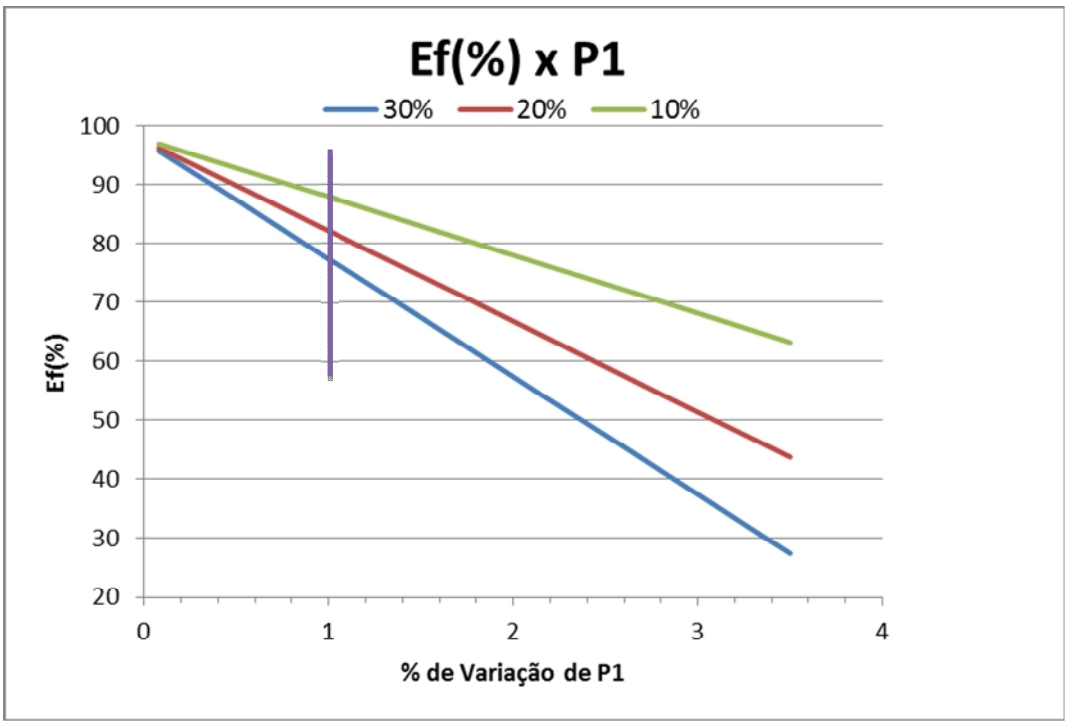

Figura 30: % de Variaçao de P1 x Ef(%)

Através da Figura 30, pode-se verificar primeiramente que o aumento da perda de calor dos gases em base seca causa um efeito negativo na eficiência e que a quantidade de excesso de ar na combustão influencia consideravelmente a eficiência da caldeira.

Para o gráfico com 30% de excesso de ar, é possível observar o maior delta na variação da eficiência para a mesma proporção de mudança nos valores de perda de calor pelos gases de combustão. Ou seja, ao se multiplicarem os valores da operação normal, conforme descrito no item 3.6, e descartando o último ponto, por considerar-se

que a eficiência não poderia ser negativa, observamos um decaimento da eficiência de 95,8 até cerca de 25%, gerando uma perda na eficiência de 70%.

Para as demais porcentagens de excesso de ar, se observa uma variação da eficiência menor, de cerca de 40% para 10% e 60% para 20% de excesso de ar, no entanto, o impacto na eficiência continua bastante significativo. Em geral, para todos os casos, pode-se verificar que ao aumentar significativamente essa perda, a eficiência sofre uma queda brusca.

Uma vez observada a importância desse parâmetro na eficiência da caldeira se deve então, buscar minimizar sempre a perda de calor sensível pelos gases em base seca. Como essa variável é função da composição do combustível e do excesso do ar, se conclui que uma vez definido o combustível, durante a operação, o excesso de ar é uma variável a ser controlada para a minimização da perda.

4.2.2. *Perda de Calor Sensível Pelos Gases Devido à Água - P2 (Kcal/kg)*

Através da Equação 27 descrita no item 3.9 é possível constatar que a perda de calor sensível pelos gases devido à água é função da umidade presente no ar de combustão e da porcentagem de hidrogênio presente no combustível, que, por sua vez, representa a quantidade de água que é possível formar durante a queima do combustível.

A Figura 31 exibe a relação da eficiência com essa perda para as diferentes porcentagens de excesso de ar analisadas. A linha vertical representa os dados experimentais.

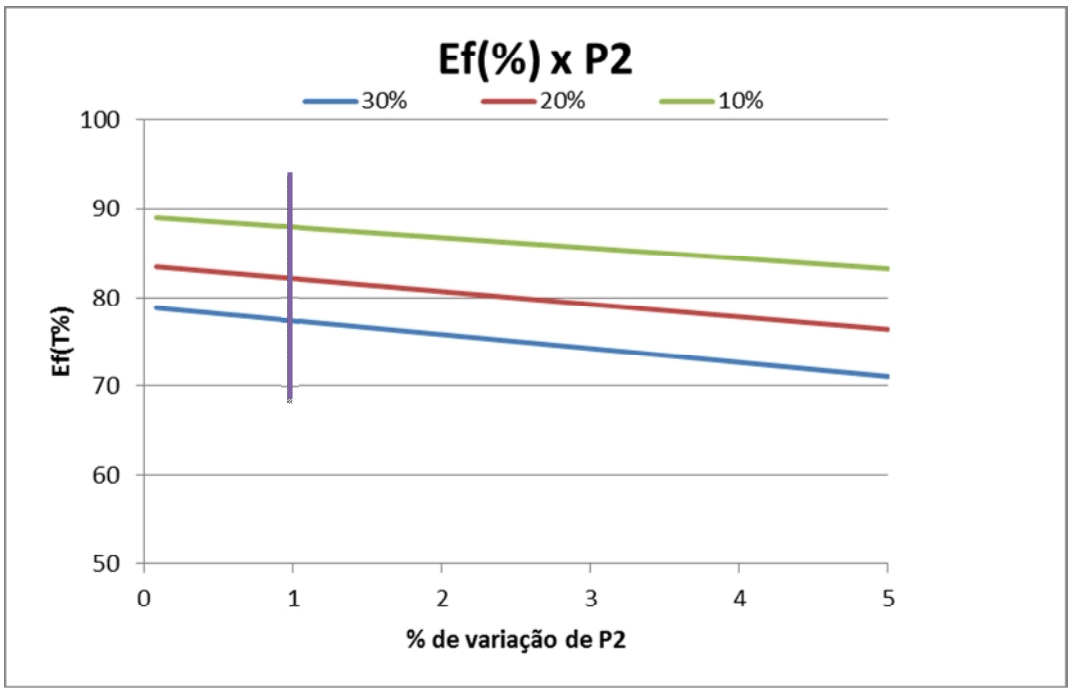

Figura 31: % de Variaçãode P2 x Ef(%)

A relação entre a perda de calor sensível pelos gases devido à água e a eficiência, também se apresenta como uma perda relevante ao processo. Assim como a perda dos gases em base seca à medida que se diminui o excesso de ar, aumenta-se a eficiência.

Contudo, o impacto na eficiência causado pela alteração da perda de calor sensível pelos gases devido à água causa um impacto menos significativo e mais homogênio, apresentando variações de cerca de 5-7% na eficiência.

A minimização dessa perda é fundamental para o processo e o parâmetro possível de minimizar seria a umidade do ar, o que poderia ocorrer através do aquecimento do ar de combustão. Assim como a primeira perda apresentada aqui também é possível observar a importância do controle ar/combustível.

4.2.3. *Perda de Calor nas Paredes - P3*

A perda de calor pelas paredes da caldeira é um parâmetro adimensional, que se dá através da radiação e convecção do calor de dentro para fora da caldeira. Sendo assim, é função da área da caldeira, da existência ou não de um material isolante e da temperatura externa (temperatura ambiente).

A Figura 32, apresenta o impacto na variação da eficiência quando se alteram valores de P3 para o excesso de ar de 30%, 20% e 10%. A linha vertical representa o ponto de base dos dados.

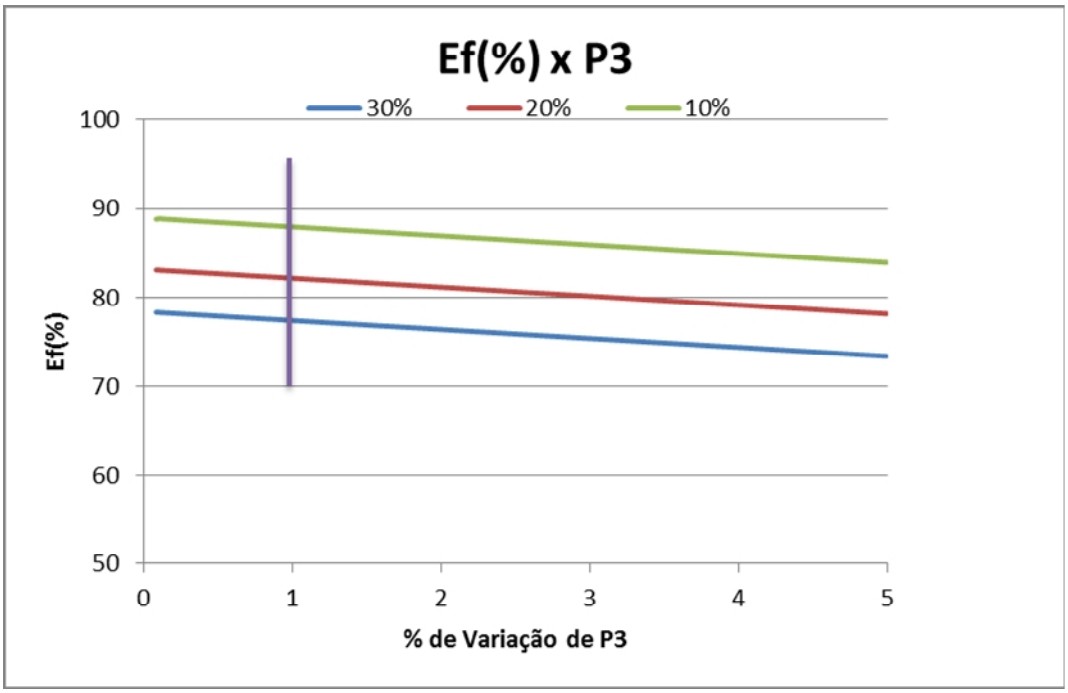

Figura 32: % de Variaçaõ de P3 x Ef(%)

É possível concluir que o delta máximo criado nas variações causa uma variação negativa na eficiência entre os extremos das variações feitas na perda de calor pela parede da caldeira de cerca de 5%.

Para se diminuir a perda de calor pelas paredes é recomendável a utilização de isolantes térmicos, evitando assim que ocorra perda de calor para o ambiente.

4.2.4. Crédito Devido ao Calor Sensível do Ar de Combustão - C1 (Kcal/kg)

O crédito devido ao calor sensível do ar de combustão é o ganho do processo que é unicamente função do ar de combustão, sendo representado pela equação de multiplicação da quantidade de ar teórico (Kg de ar/Kg de combustível) presente na reação de combustão e a entalpia do ar que, por sua vez, depende da temperatura em que o ar está sendo alimentado ao processo.

A Figura 33 apresenta as curvas que permitem a visualização da correlação entre a eficiência e o crédito devido ao calor sensível do ar de combustão. A linha vertical novamente representa o ponto base.

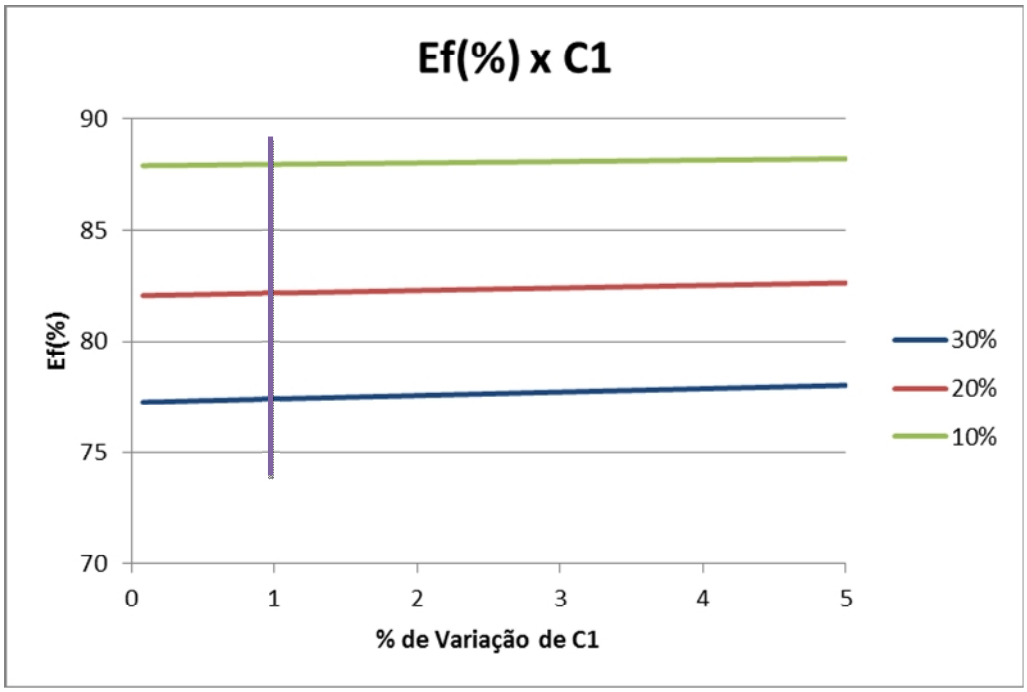

Figura 33: % de Variação de C1 x Ef(%)

Analisando o resultado obtido, é visível que, ao contrário das perdas, ao se aumentar o crédito, o efeito na eficiência é positivo e não negativo.

Para que fosse possível esse aumento do crédito devido ao ar de combustão, uma das ações necessárias seria o aquecimento do ar de combustão antes da alimentação na caldeira.

Apesar de alterar-se bruscamente o crédito nos dois extremos o decréscimo na eficiência não chega a 1%, sendo quase imperceptível a alteração, não sendo assim justificável o investimento para o aquecimento do ar de combustão para esse processo.

A prática de aquecimento do ar é largamente empregada nas caldeiras uma vez que gera um crédito para a eficiência e diminui-se uma possível perda de troca de calor entre o gás de combustão e o ar de combustão.

4.2.5. Crédito Devido ao Calor Sensível do Combustível - C2 (kcal/Kg)

O crédito devido ao calor sensível do combustível é originado da relação entre a capacidade térmica específica do óleo combustível e a temperatura do combustível. A Figura 34 mostra o impacto da mudança deste crédito na eficiência da caldeira, destacando o ponto original de dados.

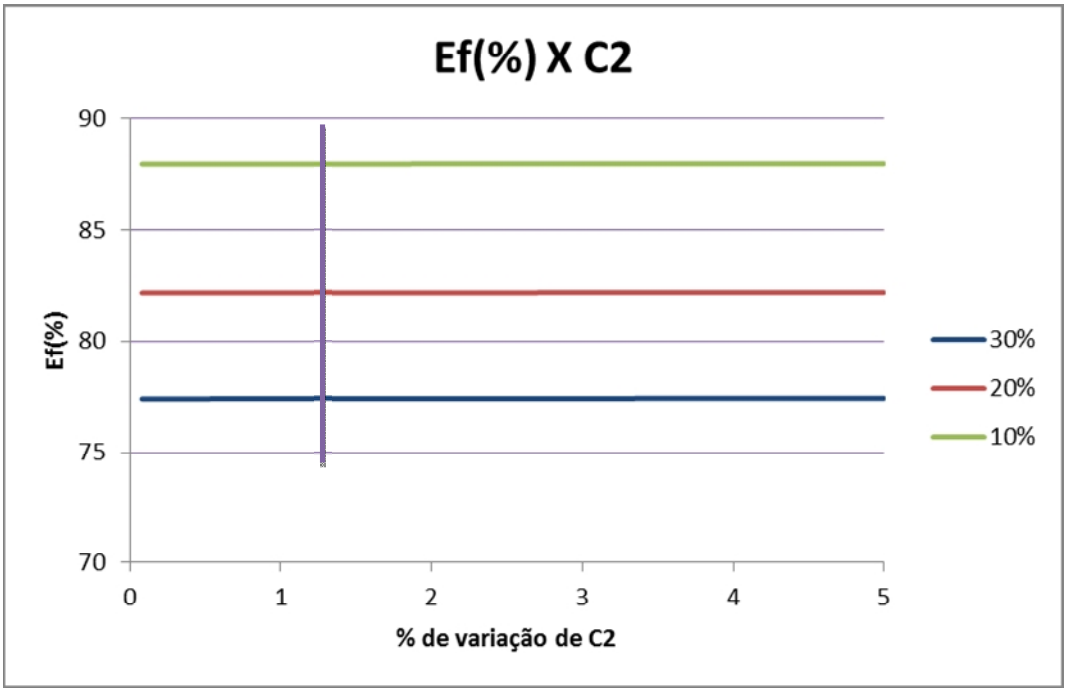

Figura 34: % de Variação de C2 x Ef(%)

Os gráficos mostram um comportamento quase que constante da eficiência ao se aumentar o crédito devido ao calor sensível do gás de combustão. Para melhor analisar os resultados, a Tabela 12 mostra os extremos obtidos ao se variar esse crédito.

Tabela 12: Mínimos e Máximos ao se Alterar C2

Excesso de ar / Eficiência	30%	20%	10%
Ef Min.(%)	77,42	82,18	87,94
Ef Max. (%)	77,45	82,20	87,96

As alterações no crédito devido ao combustível causam uma variação menor que 0,5% da eficiência do processo para todos os casos.

Visando aumentar esse crédito é necessária a instalação de um sistema de aquecimento do combustível anterior à injeção do mesmo no processo.

É importante que a temperatura de injeção de combustível seja controlada para que não entre nos injetores com uma temperatura menor do que a temperatura de referência que é de 25ºC, com isso, o que seria um crédito para o processo, não passe a ser uma perda a mais de energia.

A Figura 35 mostra o caso ocorrido em um dos testes operacionais realizados visando a criação do banco de dados do projeto. A planta do LADEQ não se possui um sistema de controle da temperatura de entrada do combustível e de aquecimento do mesmo.

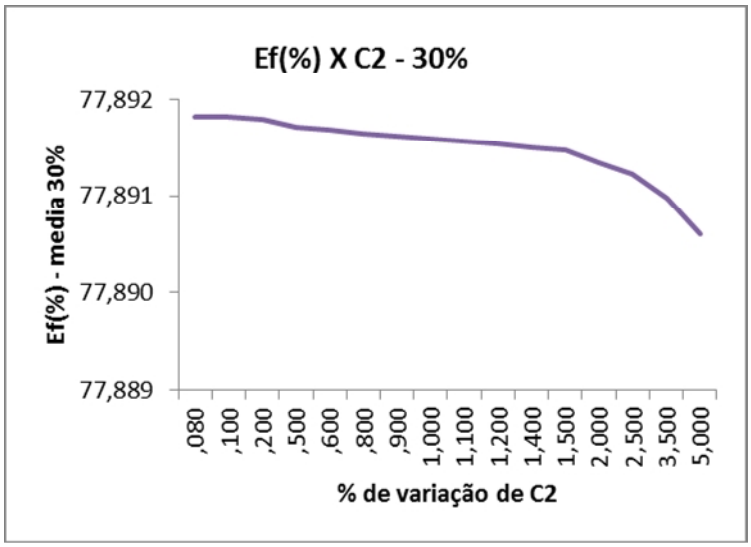

Figura 35: Impacto negativo do crédito devido ao calor sensível do combustível

Como o tanque de armazenamento está totalmente suscetível às variações de temperatura externa, é possível constatar que no dia do teste a temperatura externa estava menor do que a temperatura de referência de 25ºC usada no método fazendo assim com que a influencia do calor sensível do combustível se tornasse negativa.

Apesar de o ganho no processo ser mínimo com o aumento do crédito devido ao calor sensível do combustível, se observa que é necessário pelo menos um controle mínimo da temperatura de injeção do gás de combustão para que não se compute perda no processo.

4.2.6. Crédito Devido ao Calor Sensível da Umidade do Ar de Combustão - C3 (kcal/Kg)

O crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão é função da presença de água no ar de combustão, sendo assim originado da umidade do ar, da quantidade de ar teórica presente na reação e da entalpia do ar de combustão (temperatura do ar de combustão).

A Figura 36 ilustra a relação entre a eficiência e o crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão, com a sinalização dos dados experimentais.

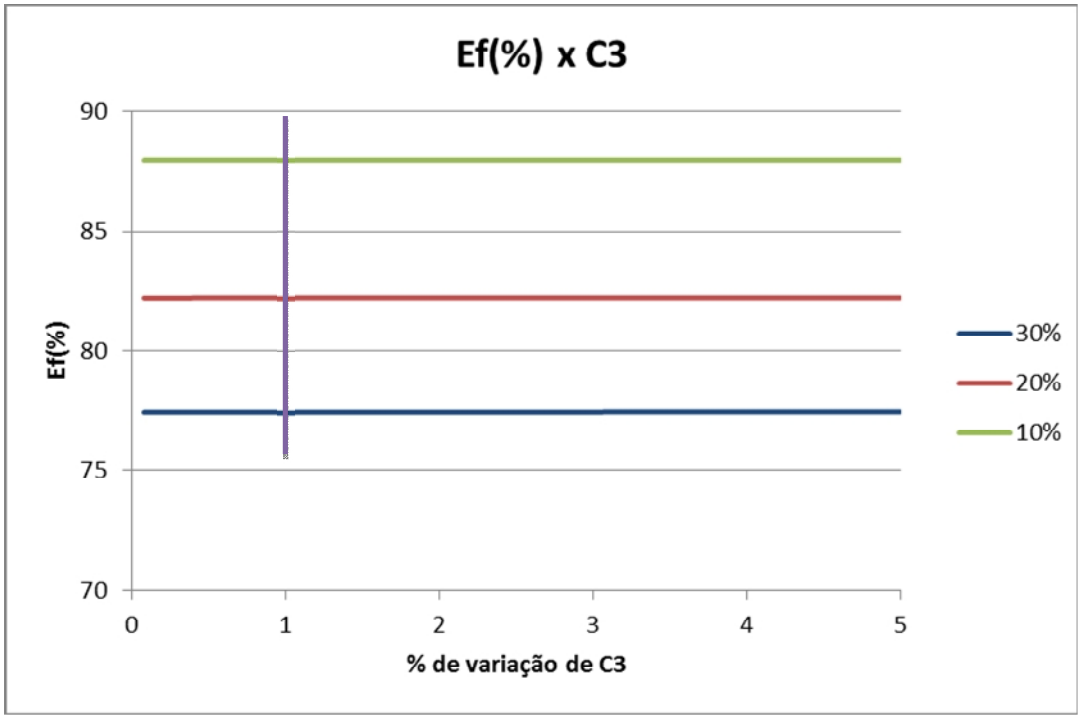

Figura 36: % de Variação de C3 x Ef(%)

Como o comportamento aparentemente é quase igual nos dois extremos do gráfico se optou por mostrar através da Tabela 13 os mínimos e máximos obtidos na eficiência.

Tabela 13: Mínimos e Máximos ao se Alterar C3

Excesso de ar / Eficiência	30%	20%	10%
Ef Min.(%)	77,42	82,18	87,94
Ef Max. (%)	77,44	82,19	87,95

O crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão apresenta o mesmo comportamento do crédito devido ao combustível. Contudo, pode-se observar

que a importância dessa variável na equação é ainda menos significativa do que todas as outras estudadas anteriormente apresentando uma variação na eficiência no máximo de aproximadamente 0,02% para a operação com 30% de excesso de ar.

O controle da umidade do ar para fins industriais se torna complexo uma vez que o processo faz uso da utilização do ar atmosférico e isso depende unicamente das condições ambientais, porém a temperatura do ar de combustão novamente se apresenta como a variável a ser controlada para que se obtenha um aumento da eficiência.

4.2.7. Comparação dos Impactos Gerados pela Análise de Sensibilidade Segundo a ASME PTC- (2008).

Para verificar os resultados obtidos pelo método gráfico, a Tabela 14 mostra o cálculo da análise de sensibilidade pelo método, segundo a norma ASME PTC-04 (2008). Nesse caso, conforme recomendado pela norma, são analisados apenas percentuais de mais ou menos 1%.

Tabela 14: Análise de sensibilidade da eficiência segundo ASME-PTC-04, 2008

-1%	RSENSCO		
P1	2,8679	2,0791	1,2491
P2	0,2282	0,1948	0,1473
P3	0,1435	0,1352	0,1263
C1	-0,0224	-0,0158	-0,0079
C2	0,00004	-0,0006	-0,0005
C3	-0,0005	-0,0004	-0,0002

+1%	RSENSCO		
P1	-2,3464	-1,7011	-1,0220
P2	-0,1867	-0,1594	-0,1205
P3	-0,1174	-0,1106	-0,1034
C1	0,0183	0,0129	0,0064
C2	-0,00003	0,0005	0,0004
C3	0,0004	0,0003	0,0002

Com a Tabela 14 é possível corroborar o resultado obtido pelo método gráfico. Onde as perdas apresentam maior impacto na eficiência. A perda de calor sensível devido aos gases em base seca (P1) apresenta o maior coeficiente relativo, logo pode-se concluir que é o parâmetro que apresenta maior efeito na eficiência.

4.3. Análise do Impacto Simulatâneo das Perdas e ou Créditos

Após a análise individual do impacto das perdas e créditos na eficiência, se analisou o impacto da mudança simultânea desses parâmetros na eficiência, a fim de se observar se haveria efeitos de interação.

Para a realização deste estudo, por meio da Figura 26: Fluxograma para o calculo da eficiência, avaliou-se qual / quais variáveis alteravam paralelamente alguma perda e ou crédito. Avaliou-se também, se a mudança em mais de um parâmetro ocasionaria o aumento ou a diminuição da eficiência, e se ocorreriam de forma linear ou não.

A temperatura do ar e a umidade do ar foram as variáveis observadas que alteravam simultaneamente o processo. A alteração da temperatura do ar de combustão acarreta mudanças no crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (C1) e no crédito devido ao calor do sensível da umidade do ar (C3). A mudança na umidade do ar altera o crédito devido ao calor do sensível da umidade do ar (C3) e a perda de calor sensível dos gases devido a água (P2).

Com isso, seguiu-se a mesma análise feita nas perdas e créditos individuais nessas duas variáveis, ou seja, a partir das alterações desses parâmetros operacionais se analisou o comportamento da eficiência.

4.3.1. *Análise da Mudança da Temperatura do Ar de Combustão.*

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos ao se variar a temperatura do ar de combustão. A linha vertical representa o ponto base dos dados.

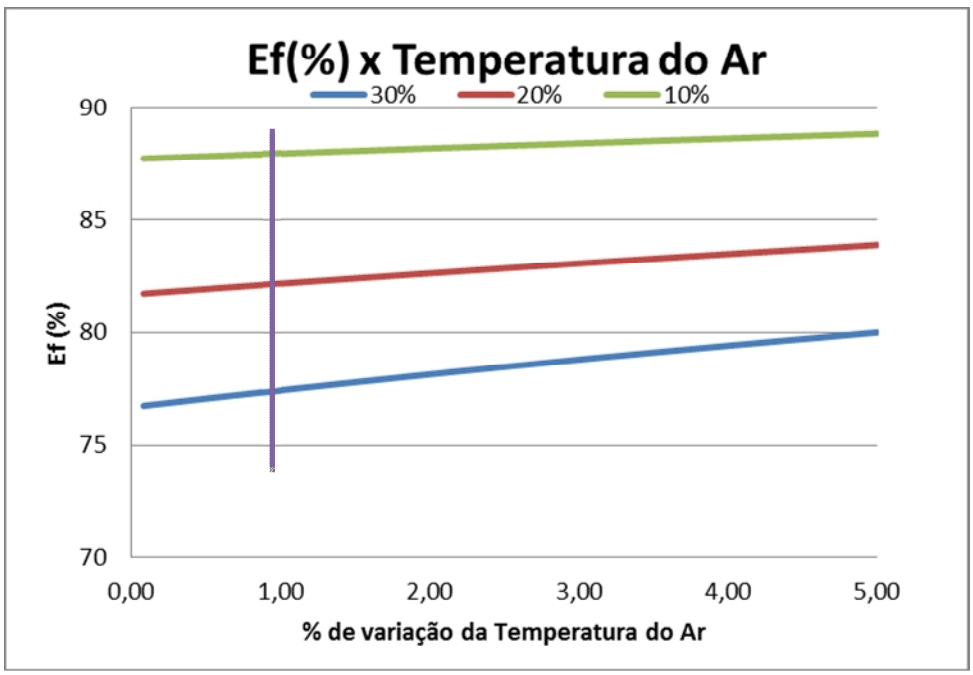

Figura 37: Impacto da Variação da Temperaura do Ar de Combustão

Uma vez constatado que o aumento dos créditos gera um aumento da eficiência ao se alterar simultaneamente dois créditos, observa-se a permanência do efeito positivo.

Ao se aquecer o ar de combustão se tem uma melhora na eficiência do processo para a operação. A eficiência máxima obtida ao se alterar individualmente cada um dos créditos é menor do que quando se maximiza a temperatura do ar de combustão. Sendo possível afirmar que o resultado da interação do aumento de dois créditos na eficiência é significativo.

4.3.3. Análise da Mudança da Umidade do Ar

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos da eficiência do processo em função da variação da umidade do ar do processo.

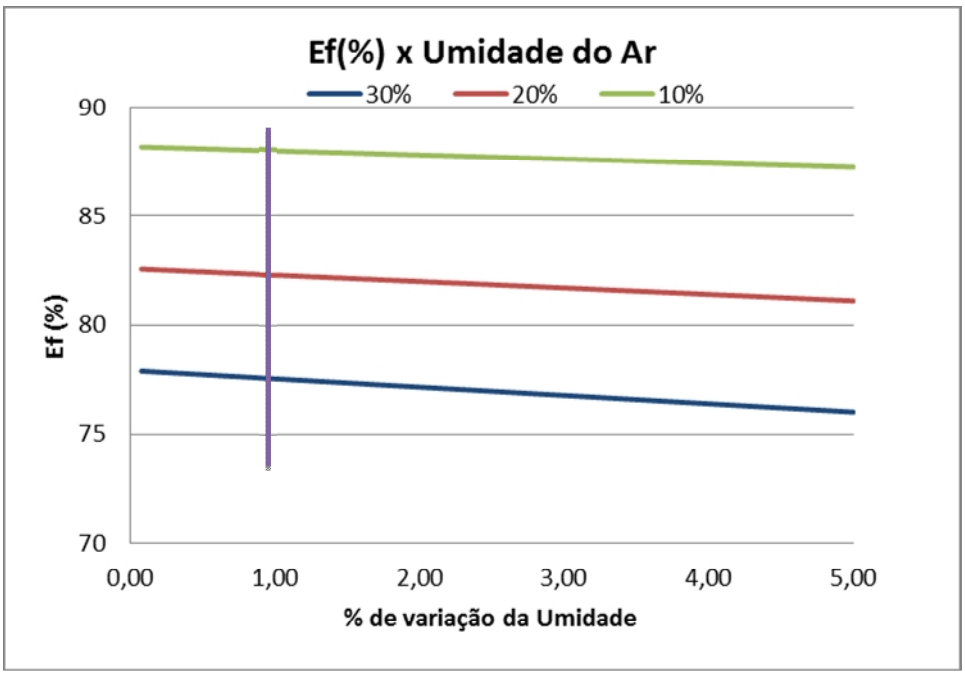

Figura 38: Impacto da Variação da Umidade do Ar na eficiência

A umidade do ar é a variável que influencia tanto no crédito devido ao calor sensível da umidade do ar quanto na perda do calor sensível dos gases devido a água e possui impacto positivo e negativo, respectivamente, na eficiência.

Na análise do impacto individual de cada perda e crédito na eficiência, constatou-se que o efeito positivo deste crédito era pequeno e o efeito negativo desta perda era

significativo. Com isso, por meio da Figura 38 é possível observar que o efeito final da iteração da mudança simultânea é negativo.

Ao se aumentar a umidade do ar de combustão se gera uma perda de eficiência ao processo. Está variável está diretamente relacionada ao meio ambiente e não ao processo. No entanto, sabe-se que ao longo do ano, a umidade do ar oscila bastante e por isso, é recomendado um leve aquecimento do ar, antes da injeção na caldeira. Com isso, é possível diminuir a quantidade de água presente no ar que fará a combustão.

4.4. Análise Comparativa das Alterações de Perdas e Créditos na eficiência utilizando diferentes combustíveis.

Este item descreverá os mesmos testes feitos com o diesel puro, para dois outros combustíveis: o biodiesel puro e uma mistura fornada de 50% de diesel e de 50% de biodiesel. O estudo foi feito visando analisar comparativamente o impacto nas perdas e créditos e corroborar o resultado obtido no item 4.2.

4.4.1. *Perdas pelo calor sensível dos gases de combustão em base seca*

A Figura 39 apresenta os resultados obtidos ao se variar proporcionalmente a perda devido ao calor sensível dos gases de combustão para a caldeira operando inicialmente com diesel, e em seguida, operando com 50% de diesel e 50% de biodiesel e apenas com biodiesel puro.

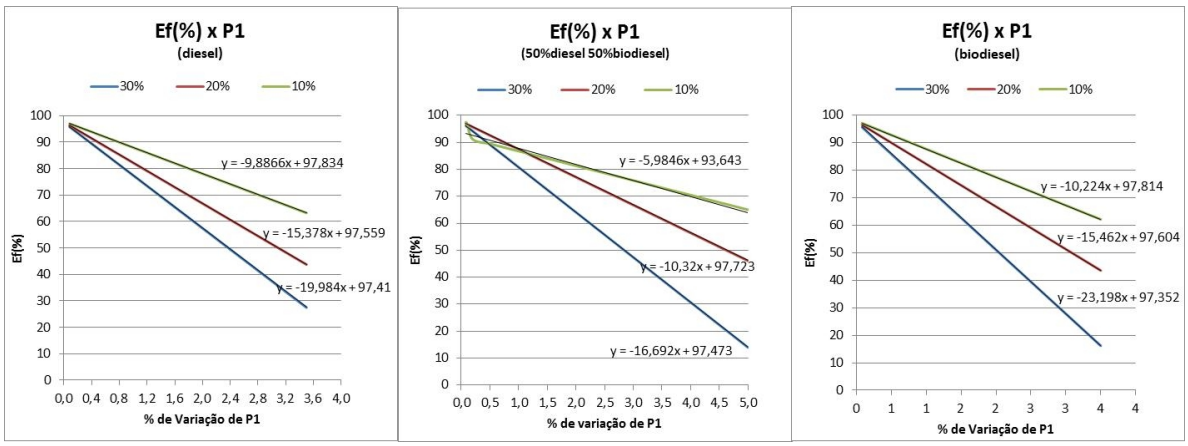

Figura 39: Perdas de calor sensível pelos gases de combustão em base seca (kcal/Kg)

Como já descrito anteriormente, a perda é função da composição do combustível e do excesso do ar, e ao compararmos os gráficos por tipo de combustível, primeiramente é possível corroborar que o excesso de ar é a variável a ser controlada e deve ser cuidadosamente controlada durante a operação da caldeira. Em seguida, constata-se, através das equações das retas ajustadas, um comportamento similar quando se opera com os combustíveis puros, e quando muda para a mistura, observa-se uma pequena mudança da inclinação da reta.

No entanto, é possível concluir que o impacto causado é o mesmo para os três combustíveis, ou seja, a minimização das perdas aumenta consideravelmente a eficiência do processo.

4.4.2. Perdas Pelo Calor Sensível dos Gases de Combustão Devido à Água

A Figura 40 exibe os gráficos referentes as variações na perda de calor sensível pelos gases devido a água para os três diferentes tipos de combustível.

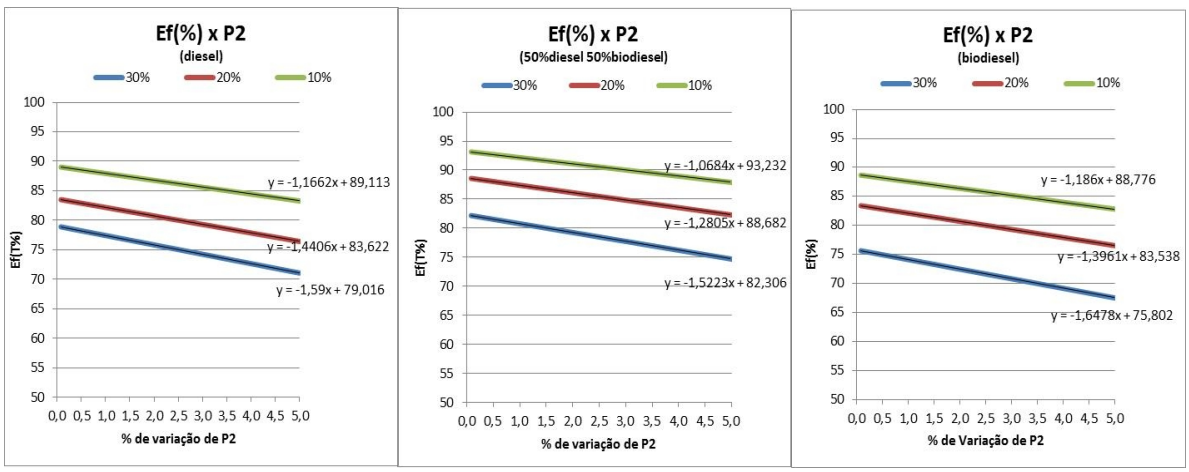

Figura 40: Perda de calor sensível pelos gases de combustão devido a água (kcal/kg)

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 43, observa-se um comportamento semelhante dos três tipos de combustíveis, apresentando apenas pequenas variações na eficiência. Sendo mais significante para a eficiência da caldeira, a alteração da variação de excesso de ar do que a alteração do combustível.

4.4.3. Perdas de Calor Pelas Paredes por Tipo De Combustível.

Observa-se através da Figura 41, um comportamento ainda mais semelhante quando se analisa o impacto da perda de calor pelas paredes na eficiência, para os diferentes tipos de combustíveis. Concluindo-se que a eficiência tende a independer se o processo está sendo alimentado com diesel, biodiesel ou a mistura desses componentes.

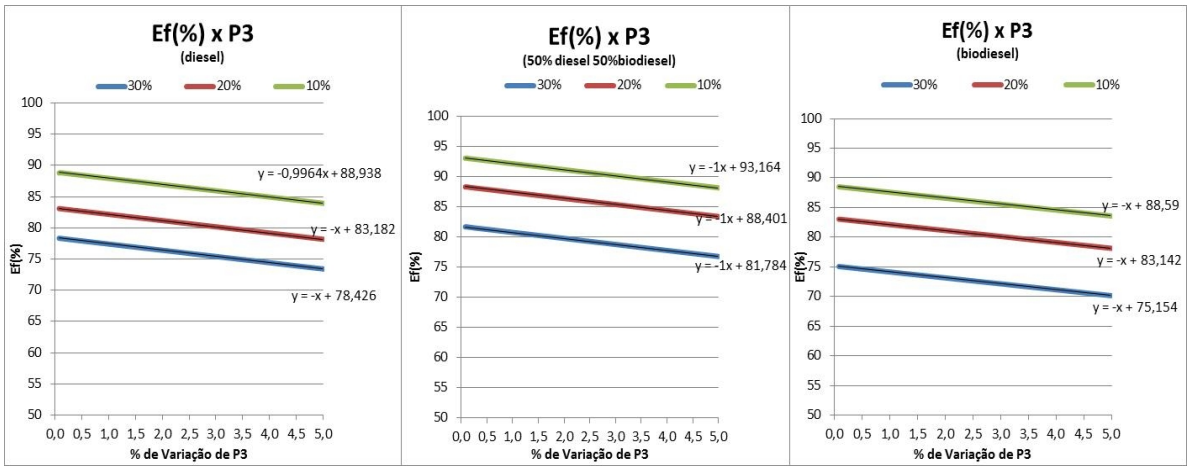

Figura 41: Perda de calor pelas paredes por tipo de combustível.

Para este caso é possível observar através da equação da reta que o coeficiente angular e consequentemente, a inclinação das retas estão praticamente iguais para os três casos.

4.4.4. Comparação dos Impactos Gerados pelos Créditos

A Figura 42, a Figura 43 e a Figura 44 apresentam respectivamente a relação entre a eficiência e os créditos devido ao calor sensível do ar de combustão, do combustível e da umidade do ar de combustão, por tipo de combustível.

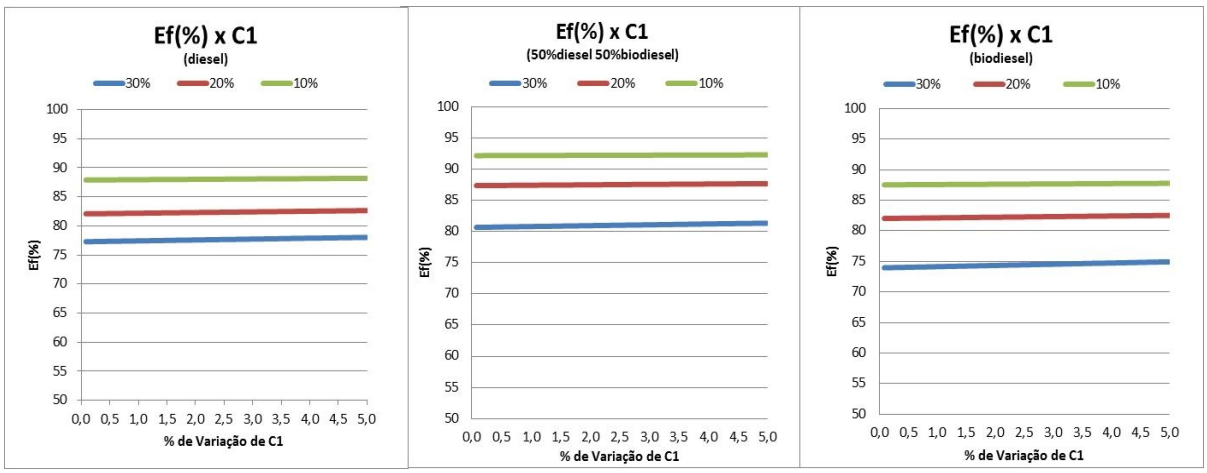

Figura 42: Crédito devido ao calor sensível do ar de combustão (Kcal/kg).

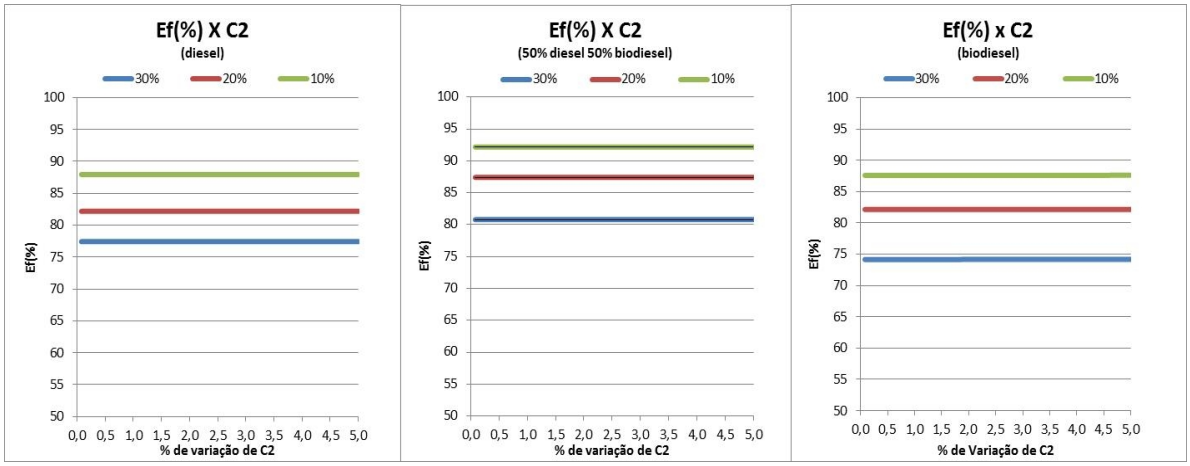

Figura 43: Crédito devido ao calor sensível do combustível (Kcal/Kg)

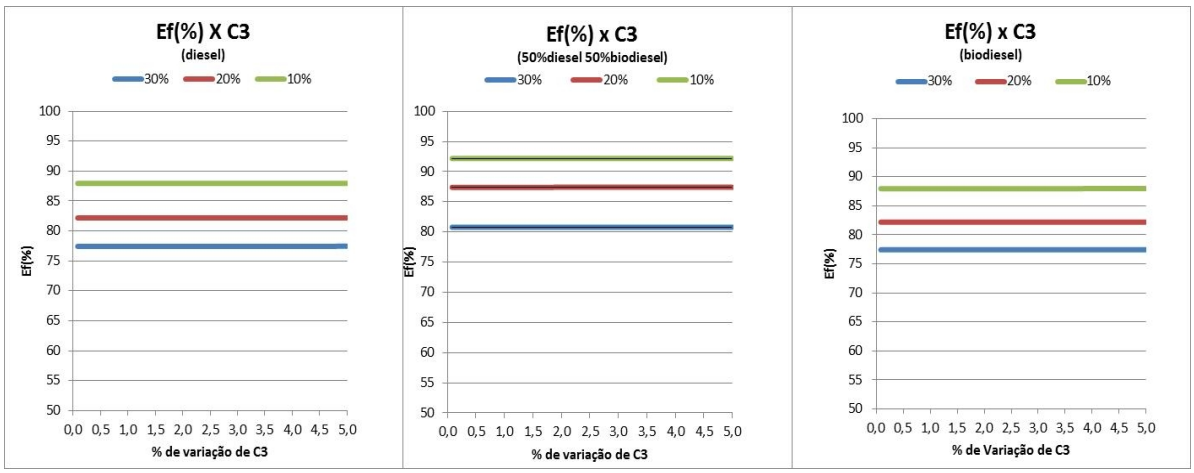

Figura 44: Crédito devido ao calor sensível da umidade do ar de combustão (Kcal/Kg)

Através da observação dos gráficos é possível validar os resultados obtidos, onde o impacto causado pela variação dos créditos pouco acrescenta no aumento da eficiência e a variação do combustível também pouco interfere na eficiência.

4.4.5. Comparação dos Impactos Gerados pela Mudança na Temperatura de Ar de Combustão e da Umidade por Tipo de Combustível.

A Figura 45 e a Figura 46 apresentam o resultado da análise comparativa de sensibilidade da eficiência da caldeira, diante das mudanças da temperatura do ar de combustão e da umidade de ar.

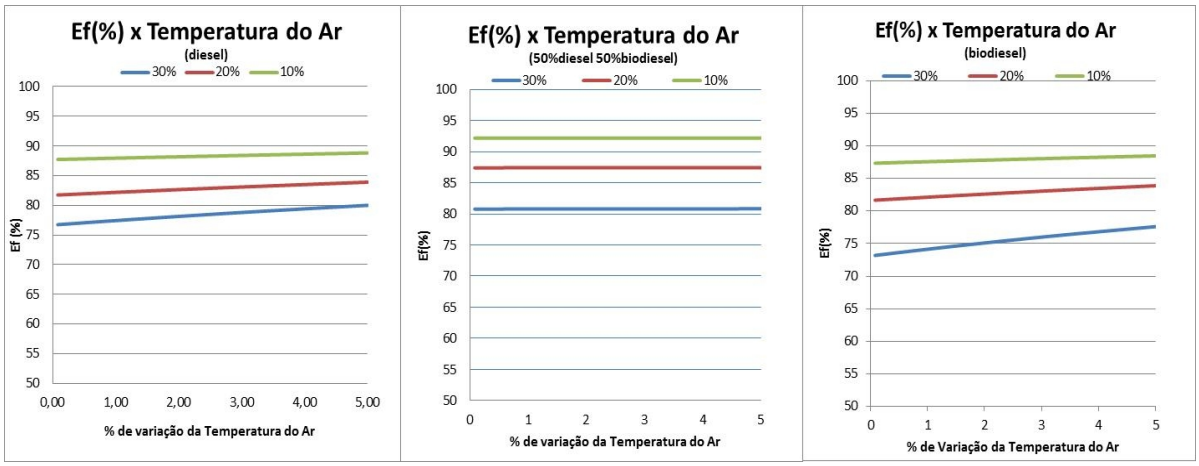

Figura 45: Comparação da Mudança da Temperatura do Ar de Combustão

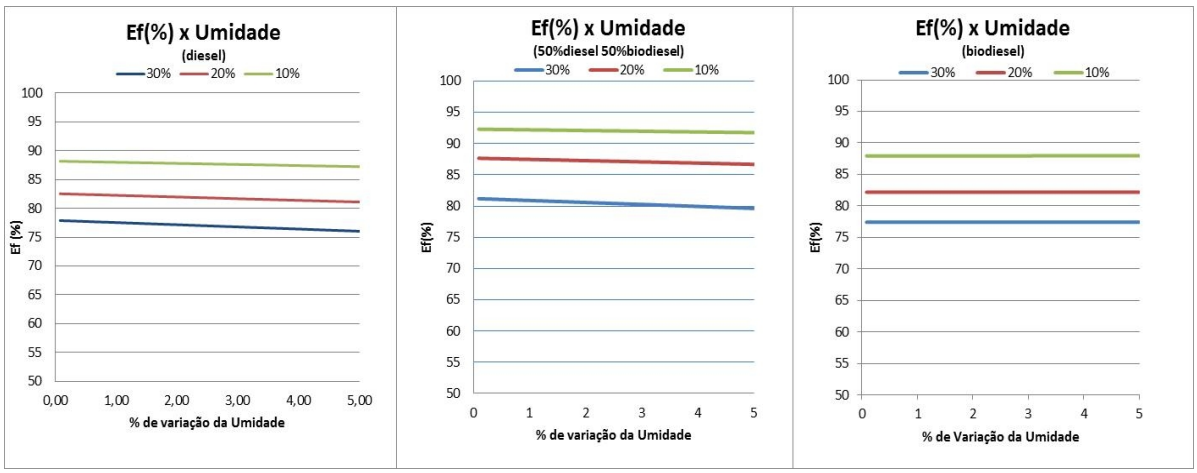

Figura 46: Comparação da Mudança da Umidade do Ar

Para a mudança na temperatura do ar de combustão é observado o mesmo comportamento do estudo com diesel e da operação da caldeira com o biodiesel. Para a mistura desses componentes, o comportamento se altera um pouco, ou seja, a mudança simultânea não gera um impacto positivo significante como nos demais combustíveis.

No caso de alteração de umidade do ar, o comportamento do diesel se repete para a mistura de 50% de diesel com 50% de biodiesel, porém para a eficiência do biodiesel o comportamento da mudança da umidade pouco influência.

4.5. Análise do Poder Calorífico Inferior na Eficiência

O poder calorífico de uma determinada substância representa a quantidade de energia liberada durante a combustão, podendo também ser definido como a propensão que um determinado combustível possui de queimar.

A partir da definição de poder calorífico, é de se esperar que o poder calorífico represente uma variável de grande importância no funcionamento de uma caldeira, e, por esta razão.

Para corroborar essa informação, seguiu-se o mesmo teste feito para as perdas e créditos com a mesma proporção de variação no poder calorífico, mesmo sabendo que o combustível permanecia o mesmo. O teste foi feito para avaliar o comportamento da eficiência frente a essa alteração. A Figura 47 expõe o resultado encontrado.

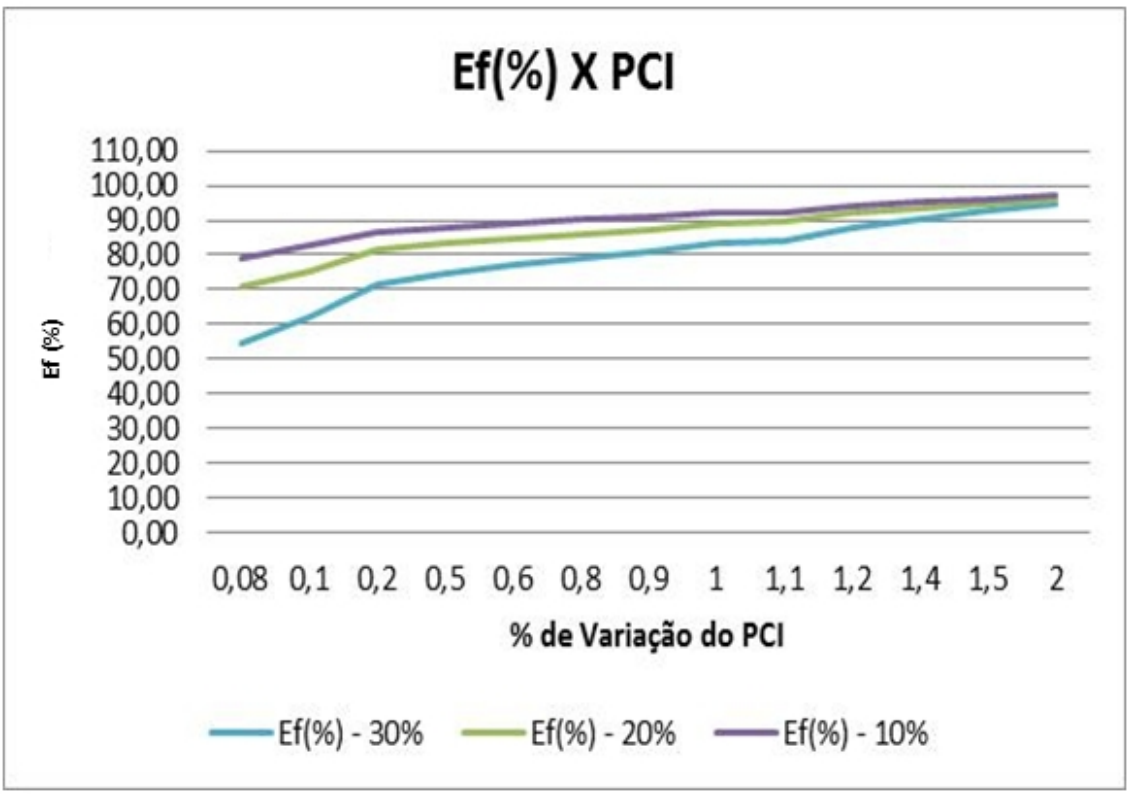

Figura 47: Poder Calorífico x Eficiência da Caldeira (%)

A proporção do impacto causado pela mudança no poder calorífico é a maior apresentada nos estudos realizados. Com a mesma proporção de alteração feita nas perdas e créditos, o reflexo na eficiência é o mais significativo.

É possível reconhecer que as alterações para valores pequenos do poder calorífico do diesel causam uma queda brusca na eficiência, contudo para o extremo oposto constata-se que o comportamento tende a se manter contínuo, ou mesmo pouco dependente da porcentagem de excesso de ar usado na reação de combustão.

4.6. Análise do Tipo de Combustível na Eficiência

Uma vez verificada que o poder calorífico é de grande importância no processo, ou seja, ao se aumentar o poder calorífico do combustível de alimentação da caldeira, obtém-se melhores resultados. Por esta razão, passou-se a analisar mais de perto essa variável do processo.

A determinação da composição de combustíveis em processos industriais ainda depende largamente de analisadores off-line, através de técnicas espectroscópicas (infravermelho), de análises de ressonância magnética (NMR) e/ou cromatográficas (GC) ou espectrometria de massas (MS). No entanto, diversos estudos estão sendo desenvolvidos como os sugeridos por Seborg (2011) e Paula (2012) onde os métodos indiretos e/ou de inferência (tais como "soft sensors" ou sensores virtuais) são usados para essa determinação.

A preocupação com a busca de novos combustíveis é uma fonte de estudos de diversos trabalhos acadêmicos vem sendo desenvolvidos principalmente no âmbito automotivo. Dentre os trabalhos desenvolvidos pode-se citar os de Knothe (2010), Lapuerta (2007), Ghorbani (2011 e 2012) e Souza et al (2009).

A partir do banco de dados histórico levantado pelos testes experimentais de Valdman et al. (2010), onde a caldeira foi testada experimentalmente com alguns combustíveis, construíram-se gráficos para que se pudesse analisar melhor a influência do poder calorífico na eficiência.

Foram testados os seguintes combustíveis na caldeira:

- diesel puro (dois tipos D1 e D2),
- biodiesel puro (Bd)
- diesel com 20% de biodiesel (DBd20)
- diesel com 30% de biodiesel (DBd30)
- diesel com 40% de biodiesel (DBd40)
- diesel com 60% de biodiesel (DBd50)

- diesel com 60% de biodiesel (DBd60)

A Tabela 15 apresenta o poder calorífico de cada combustível utilizado. As informações apresentadas foram obtidas através de testes em laboratório por Moscoso e Queiroz, 2011.

Tabela 15: Tipo de Combustíveis. Fonte: Moscoso e Queiroz, 2011.

Mistura	Percentual de Biodiesel (%)	PCI (Kcal/Kg)
D1	0	9974
D2	0	10090
D1Bd20	20	9940
D1Bd30	30	9637
D1Bd40	40	9528
D1Bd50	50	9420
D1Bd60	60	9253
Bd	100	8790

Como o poder calorífico é único para cada tipo de combustível é possível então analisar essa influencia através da Figura 48.

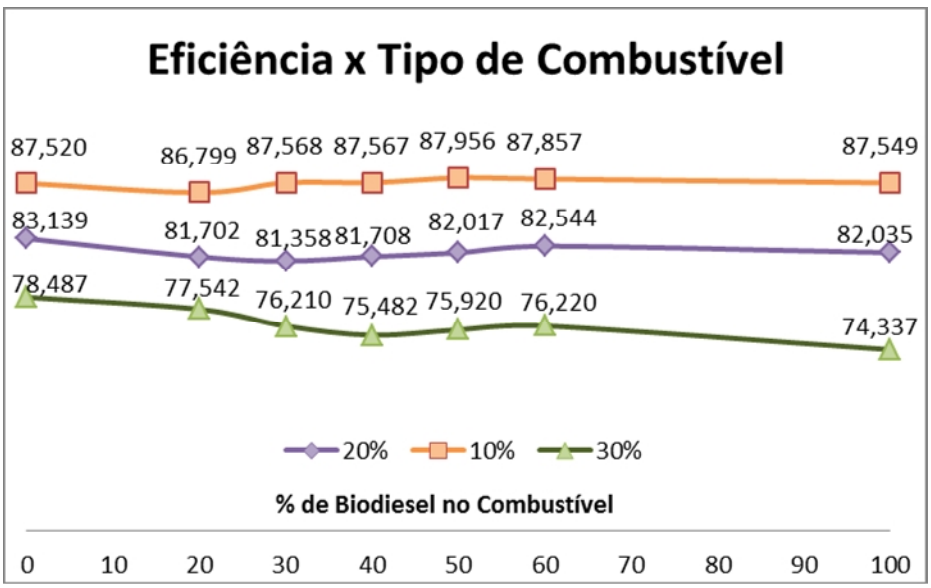

Figura 48: Tipo de Combustível x Ef(%)

Através da Figura 48 pode-se observar que a medida que se adiciona biodiesel, a eficiência se mantém praticamente no mesmo patamar quando se trabalha com excesso de ar de 10% e 20%, porém, não se observando nenhuma alteração significante.

Diferentemente do que ocorre com pequenas porcentagens de excesso de ar, quando a operação ocorre com 30% de excesso de ar, a adição de biodiesel diminui consideravelmente a eficiência da caldeira.

Ao se analisar a relação da eficiência com o poder calorífico de cada combustível empregado e comparando com a análise já descrita no item 4.6, conclui-se que, para pequenas variações de poder calorífico, o impacto na eficiência não é muito significante; com isso, em termos de eficiência, pode-se dizer que, quando se opera uma caldeira com diesel e biodiesel ou misturas desses dois combustíveis, se tem a mesma eficiência no sistema.

4.7. Análise dos Impactos Ambientais e Econômicos.

De acordo com Ghorbani (2012) existem três fatores importantes na gestão de unidades de geração de vapor (caldeiras):

- eficiência energética: maximização da eficiência da caldeira
- econômicos: minimização das perdas da caldeira
- ambiental: minimização as emissões de caldeiras

Uma vez que se determinaram eficiências similares ao se operar uma caldeira fogotubular com biodiesel e diesel e se definiram formas para minimização das perdas, buscou-se analisar os impactos ambientais causados pela queima desses combustíveis.

Dentre trabalhos desenvolvidos buscando o estudo sobre o monitoramento de caldeira fogotubular operando com biodiesel e diesel, destacam-se os trabalhos de Valdman (2010) e Paula (2012) cujo objetivo era respectivamente a construção um modelo on-line de monitoramento e um estudo sobre diagnostico do tipo de combustível de alimentação da caldeira.

4.7.1. Emissão de CO e CO_2

A eficiência da combustão pode ser verificada, analisando-se a quantidade de CO e CO_2 liberada na chaminé, que é diretamente relacionada com as Equações 32, 33 e 34.

Equação 32

$$C + O_2 = CO_2$$

Equação 33

$$2C + O_2 = 2CO$$

Equação 34

$$CO + {}^{1}/_{2}\, O_2 = CO_2$$

A quantidade de CO liberada é diretamente relacionada com a combustão completa do combustível, que por sua vez está interligada ao excesso de ar da combustão. Quando a combustão é completa (Equação 32), ocorre uma emissão maior de CO_2 do que de CO. Quando a combustão é incompleta (representada pelas equações 33 e 34), maior será a emissão de CO, e menor será a eficiência da combustão.

Para se favorecer a combustão completa é comumente utilizado um excesso de O_2 tornando mais favorável a reação, minimizando a quantidade de CO liberada. Com isso, é possível concluir que o principal fator a ser controlado durante a queima para que se tenha a menor emissão possível de monóxido de carbono é a relação ar/combustível.

A Figura 51 e a Tabela 16 apresentam os dados obtidos pelo analisador on-line localizado na chaminé da caldeira. Através dos dados obtidos verifica-se essa relação de emissão de CO com porcentagem de excesso de ar. Quanto menor o excesso de ar, mais incompleta é a reação de combustão e consequentemente maior a quantidade de CO emitida. Quando se analisa a relação de CO com o combustível utilizado, verifica-se que a queima de diesel apresenta uma média de emissão maior e uma maior instabilidade no sistema, fato este representado pelo desvio padrão maior na queima de diesel.

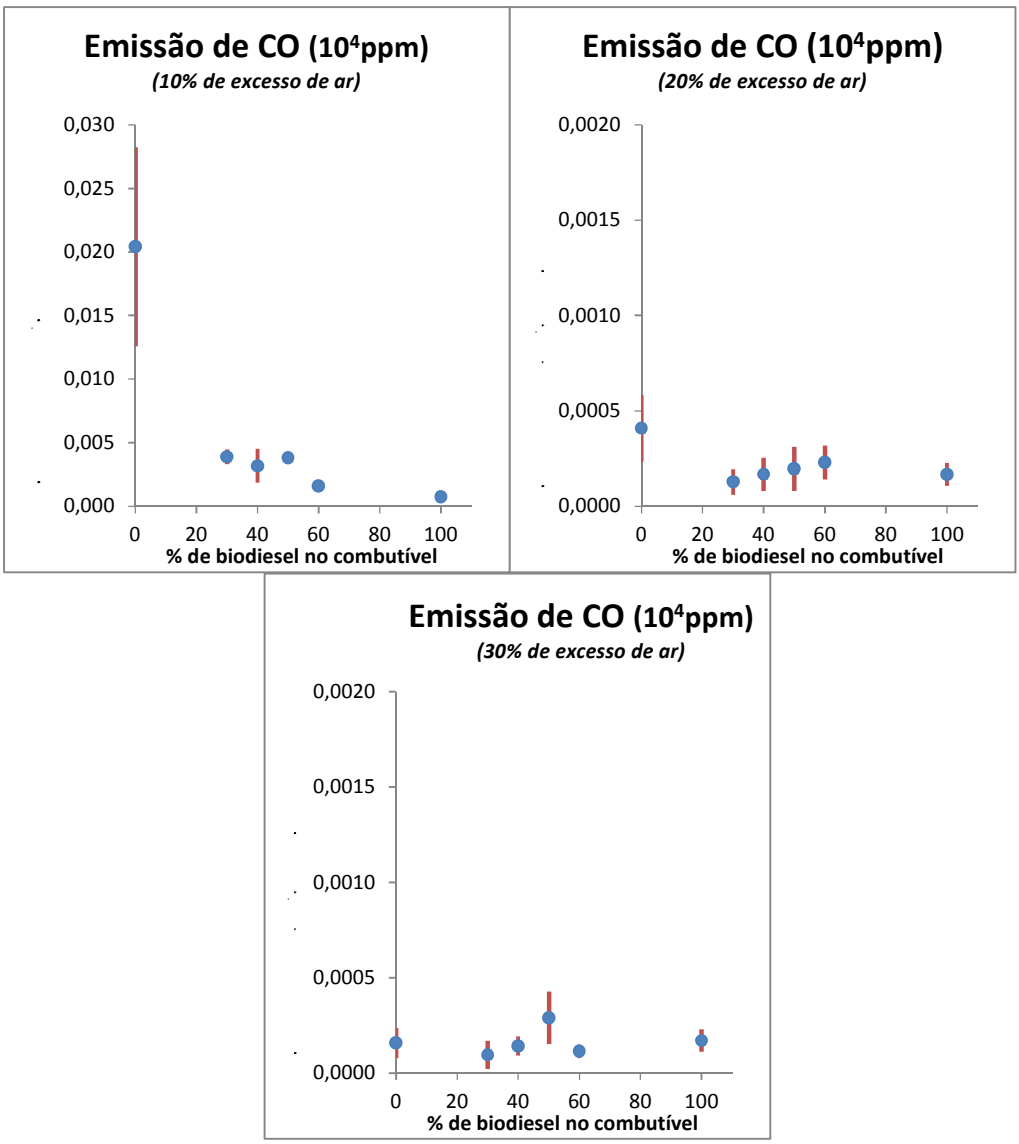

Figura 49: Média de Emissão de CO por tipo de combustível.

Tabela 16: Desvio Padrão das emissões de CO

% de biodiesel no combustível	Desvio Padrão		
	10%	20%	30%
0	0,007828	0,000174	0,000079
30	0,000579	0,000067	0,000073
40	0,001341	0,000088	0,000050
50	0,000429	0,000116	0,000137
60	0,000462	0,000090	0,000035
100	0,000094	0,000059	0,000059

A resolução CONAMA nº382 (2006) estabelece que para as fontes de emissão de poluentes gerados em processos de geração de calor, onde se enquadra a caldeira de

recuperação de calor, o limite estabelecido é de 80 mg/Nm³ de monóxido de carbono quantidade equivalente a aproximadamente 70ppm. Pelas análises feitas na chaminé da caldeira, as emissões acima do permitido ambientalmente ocorrem apenas quando se incinera diesel puro com baixa porcentagem de excesso de ar, com valores na faixa de 150 a 250ppm, constatando assim que a adição de biodiesel no combustível diminui a emissão desse poluente ficando inclusive abaixo dos limites ambientais.

O monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro. De acordo com Seinfeld (1986) os efeitos na saúde humana da emissão de CO começam a ser significantes para exposições acima de 100ppm, podendo causar dores de cabeça a exposições em concentrações menores ou mesmo ao falecimento quando exposto a concentração acima de 500ppm, como pode ser analisado pela Figura 50.

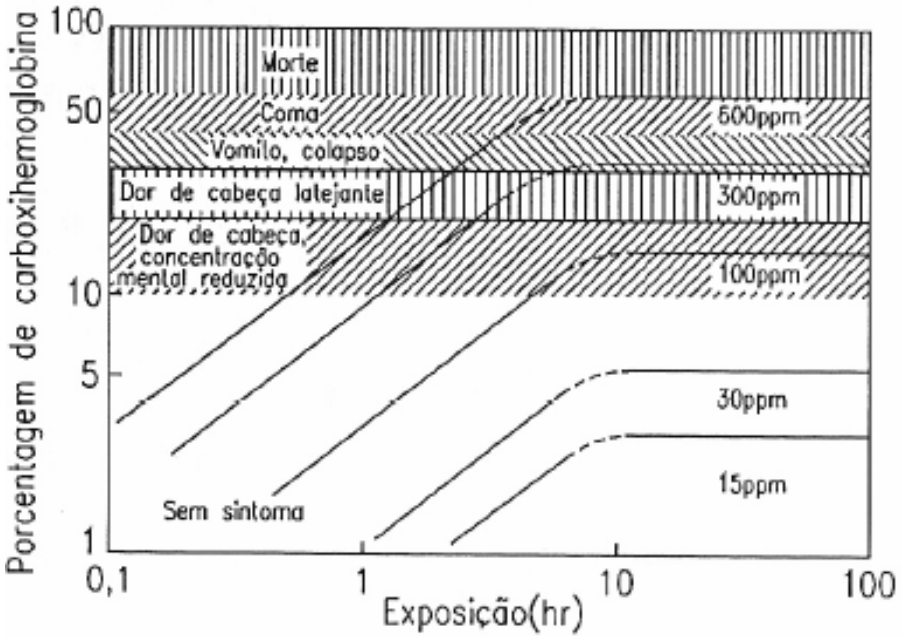

Figura 50: Danos causados a saúde pela exposição de CO (SEINFELD, 1986)

Por este motivo, de acordo com algumas legislações ambientais, como a SMA-079 (2009), toda caldeira deve ser provida de medição constante de CO na chaminé e uma vez que os níveis se apresentarem entre 100ppm e 500ppm a alimentação do combustível deverá ser cessada até que os níveis de emissão sejam normalizados.

Para corroborar o estudo, a Figura 51 e a Tabela 17 mostram os dados de emissão de CO_2 obtidas simultaneamente com os dados de emissão de CO.

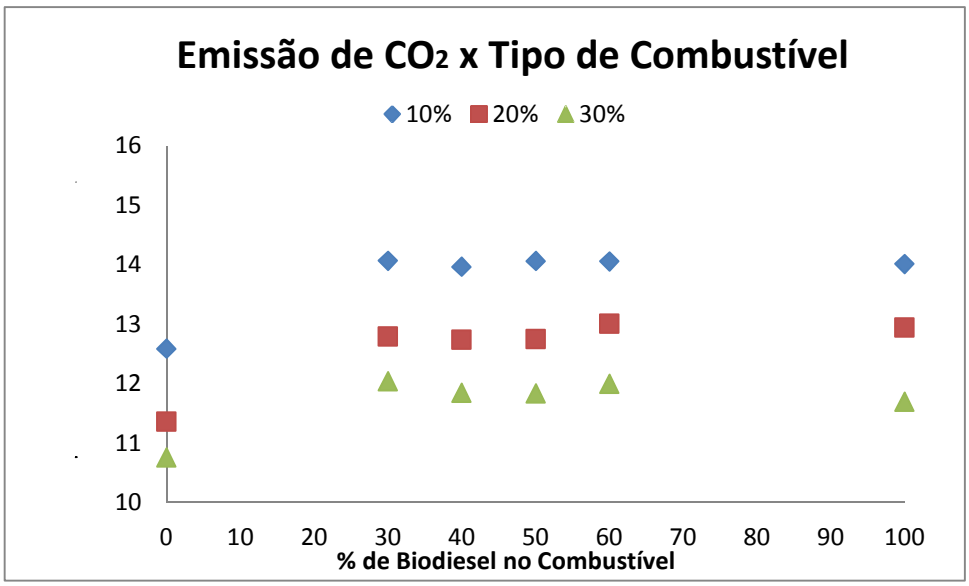

Figura 51: Emissão de CO_2 por tipo de combustível

Tabela 17: Desvio Padrão das emissões de CO_2

% de biodiesel no combustível	Desvio Padrão		
	10%	20%	30%
0	1,910	1,606	1,388
30	0,035	0,063	0,146
40	0,085	0,210	0,126
50	0,036	0,123	0,156
60	0,108	0,201	0,151
100	0,044	0,086	0,119

Uma vez que a emissão de CO e CO_2 são inversamente proporcionais, e que o diesel tem uma tendência maior do que o biodiesel de sofrer combustão incompleta se tem, por consequência, uma quantidade de CO_2 emitida pela queima do diesel menor do que a operação com queima de biodiesel.

4.7.2. Emissão de NOx

Outro poluente encontrado durante a queima são os óxidos de nitrogênio, componentes esses oriundos das reações paralelas que ocorrem na combustão incompleta. A reação de formação desses compostos é descrita pela Equação 35.

Equação 35

$$N_2 + O_2 = 2NO$$

Para processos de combustão com temperaturas elevadas (cerca de 1200ºC) pode-se também ocorrer a sequencia de equações abaixo.

Equação 36

$$O_2 = 2O^{\cdot}$$

Equação 37

$$N_2 + O^{\cdot} = NO^{\cdot} + N^{\cdot}$$

Equação 38

$$N^{\cdot} + O_2 = NO^{\cdot} + O^{\cdot}$$

Aproximadamente 95% das emissões dos óxidos de nitrogênio estão sob a forma de NO. Está gás é formado pela queima de combustíveis a altas temperaturas e não apresenta perigos a saúde humana, entretando ele reage com o oxigênio formando o NO_2 que é um gás invisível e tóxico. O dioxido de nitrogênio causa ardência nos olhos e nariz sendo prejudicial a vias respiratórias humanas (SANTOS, 2007).

A Figura 52 e a Tabela 18 apresentam as médias das emissões dos óxidos de nitrogênio e o desvio padrão (ambos por porcentagem de excesso de ar) que ocorreram nos testes realizados.

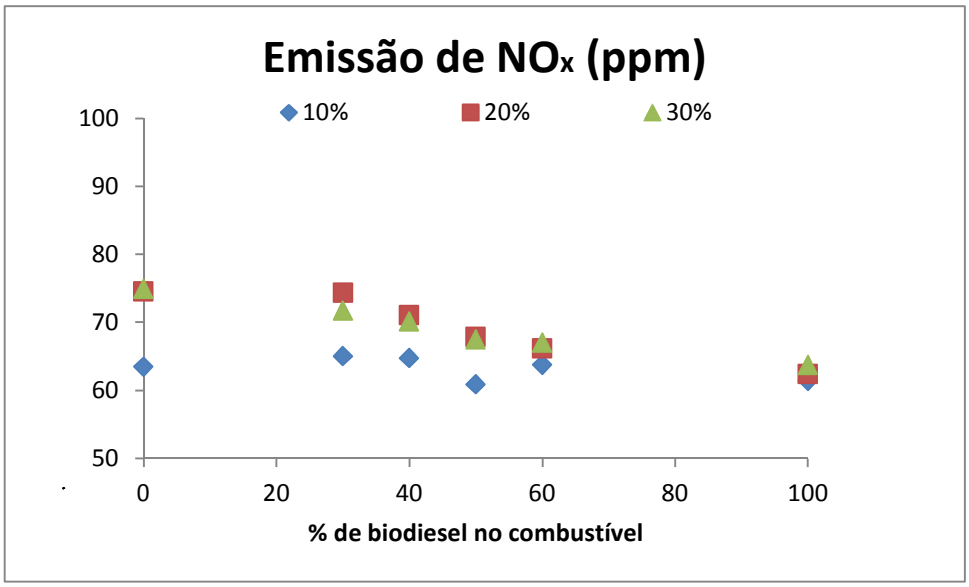

Figura 52: Emissão de NOx

Tabela 18: Desvio Padrão das emissões de NOx

% de biodiesel no combustível	Desvio Padrão		
	10%	20%	30%
0	0,208	0,469	0,192
30	0,309	0,244	0,166
40	0,543	0,587	0,609
50	0,368	0,174	0,145
60	0,318	0,438	0,466
100	0,088	0,379	0,467

Observa-se uma maior emissão para a operação com diesel do que quando se trabalha com biodiesel. À medida que se adiciona biodiesel no combustível a quantidade de NOx emitida tende a diminuir mesmo que numa proporção pouco significativa. É constato que a porcentagem de excesso de ar na operação pouco interfere na emissão deste poluente.

Em termos de legislação ambiental, o limite estabelecido é de 200 mg/Nm³, cerca de 110ppm. Limite este atingidos pela operação com ambos os combustíveis analisados.

O controle da combustão reduz as emissões de NOx, uma vez que auxilia a equalizar as condições de queima. Outro possível controle após combustão para a redução das emissões de NOx é a introdução de um reagente no gás de combustão para reagir com os NOx (LI, 2009). Um exemplo de reagente é a ureia. A quantidade de ureia a ser injetada varia conforme o processo. As equações abaixo mostram a neutralização com ureia.

Equação 39

$$CO(NH_2)_2 = NH_3 + CO_2$$

Equação 40

$$4NO + NH_3 + O_2 = 4N_2 + 6H_2O$$

4.7.3. Emissão de SO_2

Os óxidos de enxofre são outro grande problema comum durante a queima de combustíveis. Esses compostos possuem como principais fontes de geração, os automóveis e as termoelétricas e são formados pela reação do oxigênio com o enxofre, presente em alguns combustíveis, como o diesel.(Equação 41).

Equação 41

$$S + O_2 = SO_2$$

Através da Figura 53 é possível analisar o comportamento da emissão de SO_2 quando se adiciona biodiesel ao óleo diesel.

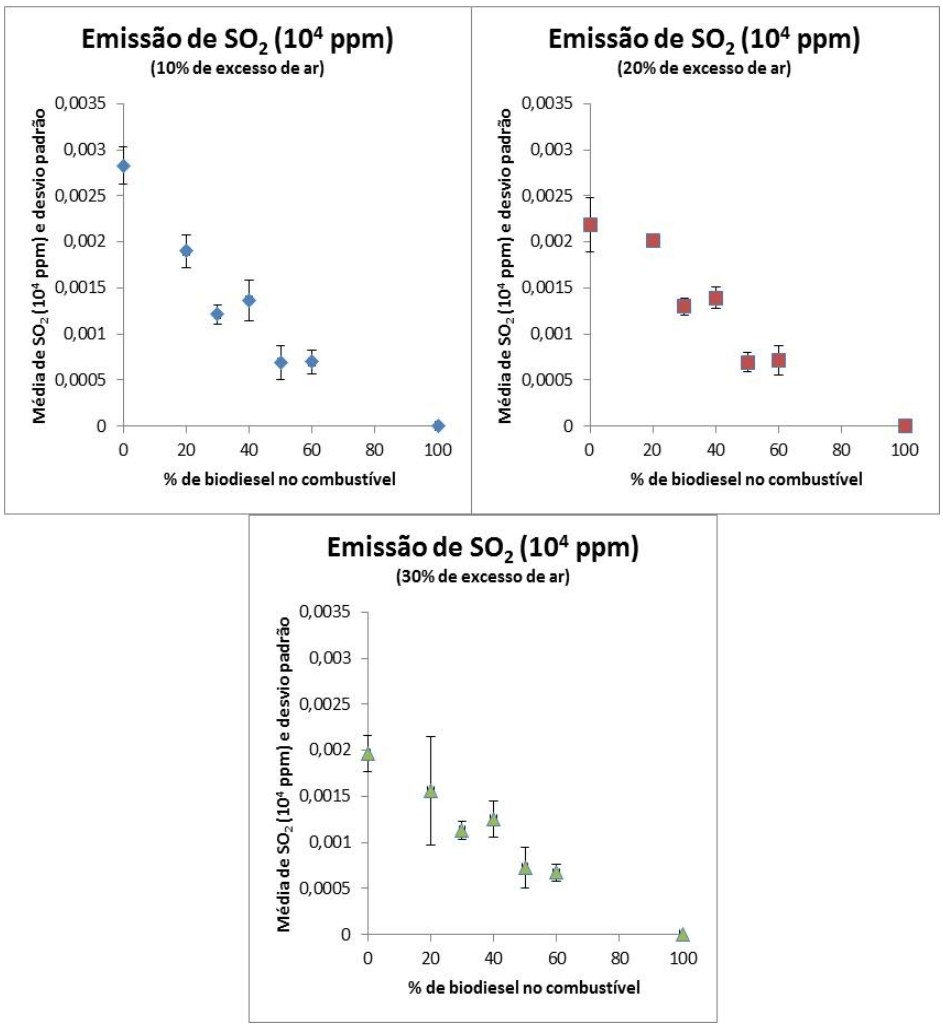

Figura 53: Emissão de SO_2

O enxofre contido no óleo diesel contribui para a lubricidade do combustível prevenindo possíveis problemas durante sua injeção. No entanto a oxidação do enxofre durante a combustão gera resíduos que causam a corrosão do sistema e a poluição do ar (SANTOS, 2007).

O dióxido de enxofre é prejudicial à saúde humana, podendo agravar as doenças respiratórias preexistentes e também contribui para seu desenvolvimento. É irritante do sistema respiratório, provocando tosse, sensação de falta de ar, respiração curta, rino-faringites, diminuição da resistência orgânica às infecções, bronquite crônica e enfisema pulmonar (CETESB, 2013).

O efeito ao meio ambiente desse poluente ocorre quando o SO_2 entra em contato com o vapor d'água da atmosfera formando H_2SO_4, conferindo um caráter ácido à chuva. O mesmo efeito é observado com o NOx que por sua vez forma HNO_3.

O biodiesel é isento de enxofre, logo a adição deste ao óleo diesel tende a diminuir a concentração da emissão desse poluente até zerar as emissões do mesmo ao se opera apenas com biodiesel.

Os testes realizados não levaram em considerações as emissões de material particulado e hidrocarbonetos, contudo Knothe (2010) verificou em seus estudos que a adição de biodiesel ao diesel reduz a emissão desses componentes.

Cada dia mais os limites de emissão estão sendo restringidos, como é o caso da emissão máxima de enxofre permitido nos países europeus que passaram de 50ppm para 10ppm (LAPUERTA, 2007), neste cenário, a adição de biodiesel ao diesel se faz cada vez mais necessário. É possível observar que a caldeira quando opera apenas com diesel pura estaria fora dos novos limites estabelecidos e para que fosse possível se enquadrar nos limites da legislação é necessária à adição de pelo menos 50% de biodiesel.

Como é bem conhecido, o biodiesel eleva o custo de matéria-prima quando comparado ao diesel, traduzindo num gasto a mais para o processo. O valor maior na comercialização do biodiesel pode ser atribuído ao processo de produção e de distribuição. O custo elevado do biodiesel tem sido um grande impedimento para a comercialização mais significante do biodiesel (KNOTHE, 2010).

Capítulo 5 - Conclusão

5.1. Conclusões

Com o estudo realizado, pode-se perceber que o impacto da alteração dos créditos, ou seja, da variação da temperatura do combustível, da temperatura do ar e da umidade do ar, pouco influência a eficiência. No entanto, é importante minimizar as perdas do processo. Mesmo as pequenas variações causam um impacto significativo na eficiência, sendo assim, o controle do processo para que essas perdas sejam devidamente observadas e melhoradas é de grande importância.

Mesmo os créditos possuindo uma pequena contribuição na eficiência, é relevante que se tenha um controle das variáveis do processo que estão diretamente ligadas a estes créditos. Como é o caso do sistema de controle de aquecimento do ar de combustão e do combustível, onde o controle da temperatura de injeção desses componentes no processo deve ser feito criteriosamente através da implementação de malhas de controle de temperatura e aquecedores.

O controle da temperatura de ar de combustão se apresenta importante, uma vez que se observou que ocorre um aumento significante na eficiência em função desta variável, pois a mesma altera simultaneamente o crédito devido ao calor sensível do ar de combustão e o crédito devido ao calor sensível da umidade do ar.

Além da temperatura do ar de combustão a umidade foi a variável que apresentou também um impacto simultâneo em dois parâmetros das perdas e créditos. Para os demais casos observou-se não haver interação entre eles. É possível, entanto, concluir que a perda de calor sensível pelos gases em base seca, a perda de calor

pelas paredes e o crédito devido ao calor sensível do combustível são totalmente independentes entre si.

A partir das conclusões descritas é possível constatar que a eficiência poderia ser calculada a partir da Equação 42, uma forma simplificada da Equação 15.

Equação 42

$$Ef(\%) = 100 * \left(1 - P_3 - \frac{P_1 + P_2}{PCI}\right)$$

Quando se concluiu que as perdas deveriam receber uma maior importância durante o controle do processo, passou-se então a definir quais variáveis que estariam relacionadas para que pudessem ser minimizadas.

Primeiramente a temperatura do gás de combustão apresenta-se novamente como uma variável a ser controlada no processo, no entanto, para que está variável possa ser controlada se faz necessário que a variável controlada seja a vazão de alimentação do combustível.

Por fim, a variável que se mostrou de maior relevância e que impacta significativamente a eficiência é a relação ar/combustível. Com isso é fundamental que toda caldeira deva possuir uma malha de controle para controlar esta relação.

Frente a todas as conclusões que envolvem a eficiência é possível dizer que a eficiência pode ser considerada uma variável de controle de processo, podendo ser utilizada como variável controlada e ter a vazão de ar/combustível como a variável manipulada do processo.

A eficiência do processo calculada pelo método de balanço de energia segundo a norma ASME PTC-4 do sistema pode também ser utilizada para detectar possíveis desvios/falhas no processo. O método possui como vantagem a possibilidade de detecção de perdas para que uma ação imediata de correção possa ser tomada minimizando maiores prejuízos ao processo.

Paralelamente ao controle das perdas e créditos do processo e, consequentemente das variáveis do processo, observou-se a influência do poder calorífico do combustível na eficiência, Este parâmetro se mostrou como a principal parcela no cálculo da

eficiência e é unicamente dependente do combustível que está sendo injetado na caldeira.

Para pequenas variações de poder calorífico, o impacto na eficiência não é muito significante; com isso, em termos de eficiência, pode-se dizer que, quando opera-se uma caldeira com diesel e biodiesel ou misturas desses dois combustíveis, se tem a mesma eficiência no sistema. Contudo pode-se dizer que a utilização de combustíveis alternativos a partir do biodiesel não geram grandes impactos na eficiência da caldeira.

Para o controle de emissões atmosféricas é possível perceber que o tipo de combustível utilizado influência consideravelmente o resultado das análises, contudo não se pode deixar de constatar que variáveis do processo como a temperatura de combustão, a quantidade de excesso de ar utilizado precisam também ser devidamente controladas para que se evitem emissões acima do limite estabelecido pela legislação.

Ao se constatar que o biodiesel poderia ser usado como fonte alternativa para a caldeira as vantagens ambientais da utilização desse combustível que levaram à diminuição da emissão de poluentes como CO e SO2 mostram que o biodiesel pode substituir com imponência o diesel.

À medida que se aumentava o excesso de ar a eficiência diminuía, no entanto, ao se trabalhar com apenas 10% de excesso de ar problemas ambientais aparecem. Pouco ar durante a combustão favorece a queima incompleta elevando as emissões de CO, NOx e SOx. Analisando a conjuntura de fatores é possível dizer que, dentre os estudos realizados o excesso de ar de 20% apresenta os melhores resultados quando se analisa a eficiência do processo e os impactos ambientais causados pela queima.

Com o estudo apresentado é então possível concluir que a utilização de biodiesel para alimentação de uma caldeira não só se mostrou eficiente para a geração de vapor como se mostrou uma alternativa ambientalmente melhor ao diesel.

Faz-se então necessária a instalação das malhas de controle conforme descrito abaixo para a melhora do processo:

- Controle de vazão de ar de combustão
- Controle de vazão de combustível
- Controle de excesso de ar.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para projetos futuros sugere-se:

1. Implementação da malha de controle de ar/combustível. O controle poderia ser feito de forma simplificada como descrito no item 2.5.2.1 ou de forma mais detalhada que já estaria levando a análise de gases na chaminé como a malha sugerida no item 2.5.2.4.

2. Implementação de uma malha de controle onde a eficiência da caldeira seria a variável controlada e a vazão de ar/combustível seria a variável manipulada do processo.

3. Uma vez que se determinou que as melhores condições operacionais para a eficiência do sistema e para as emissões atmosféricas são na faixa de 10-20% de excesso de ar, é recomendado um estudo para otimizar a porcentagem de excesso de ar na queima.

4. Elaboração de um estudo socioeconômico da utilização de misturas de biodiesel na alimentação de caldeiras.

5. Estudo dos impactos na planta (equipamentos) operando com misturas de biodiesel.

Bibliografia

I. AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. ANSI/ISA – 5.1, 2009

II. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Power Test Code 4.1 *Steam-Generating Units*. PTC 4.1, 2008.

III. ASSIS, Francisco. *Caldeiras*, Apostila do curso SENAI/Petrobrás, 2009. Disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAYFYAD/caldeiras-senac-petrobras. Acesso em 05/08/2013às 18:00.

IV. ASTRON, K.J. *Drum-boiler dynamics,* Automática, V.36, p. 363-378, 2000.

V. BEGA, E. A. *Instrumentação aplicada ao controle de Caldeiras*, 3. Edição, Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.

VI. BIZZO, A. Waldir. *Geração, Distribuição e Utilização de Vapor,* Apostila de curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, p.18, 68-73, 2003.

VII. BROOKS. Cleaver. *Boiler efficiency guide*, 2010. Disponível em: http://www.cleaver-brooks.com. Acesso m 04/03/2013 as 20:00h.

VIII. CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Emissões Veiculares.* Disponível em: www.cetesb.sp.gov.br. Acesso em: 27 agosto 2013.

IX. CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, nº:382, de 26 de dezembro de 2006

X. DUKELOW, Sam. G. *The control of boilers*, ISA-Instrumentation, Systems and Automation Society, 2ª edição, p 49 – 67, 1991.

XI. DUKELOW, Sam. G; LIPTÁK , Béla. G. et al. *Boiler Control and Optimization*; Béla, Control and Optimization of Unit Operations, p. 1572 – 1631, 2005

XII. EPE, Empresa Nacional Energética disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf, acessado em 16 de julho de 2013.

XIII. FERREIRA, Fábio de Oliveira. *Estudo do sistema de controle de caldeiras de centrais termelétricas*, Projeto de Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

XIV. FONTOURA, Daiane. *Caldeiras*, Trabalho do Curso de Tecnologia em Eletromecânica, CEFET, Minas Gerais, 2010.

XV. GILMAN; Jerry G.F. *Boilers control systems engineering,* .ISA-Instrumentation Systems, and Automation Society, 2ª edição, p 1-8 and 76-77, 2010.

XVI. GHORBANI, Afshin; BAZOOYAR, Bahamin; SHARIATI, Ahmad; JOKAR Seyyed Mohammad; NADERI, HadiAjami Ali. *A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler,* Energy, Vol.38, pp. 4725–4732, 2011.

XVII. GHORBANI, Afshin; BAZOOYAR, Bahamin. Optimization of the combustion of SOME (soybean oil methyl ester), B5, B10, B20and petrodiesel in a semi industrial boiler, Energy,V.44, p. 217 e 227, 2012.

XVIII. ISERMANN, R.; BALLÉ, P. *Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes*, Control Engineering Practice, V. 5, p. 709-719, 1997.

XIX. KNOTHE, Gerhard. *Biodiesel and renewable diesel: A comparison.* Progress in Energy and Combustion Science, V.36, p. 364–373, 2010.

XX. LAPUERTA, Magín et al. *Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. 2007.*

XXI. LI, Sen; XU, Tongmo; HUI, Shien; WEI, Xiaolin. *NOx emission and thermal* efficiency of a 300 MW e utility boiler retrofitted by air staging, Energy, V.86, p. 1797-1803, 2009.

XXII. LORA, Electo Eduardo Silva; ARRIETA, Felipe Raul Ponce; BESSA, Fernando Calide; ARADAS, Maria Eugênia Corria. *Caldeiras a vapor convencionais e de recuperação,*Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação, 1edição, Rio de Janeiro: Editora Interciência, V. 1, p. 171-248, 2004.

XXIII. LV, Tai; YU, Linghao; SONG, Jinmin. *A Research of Simplified Method in Boiler Efficiency, Test.* Energy Procedia, V.17, p. 1007-1013, 2012.

XXIV. MARQUES, Francisco de Assis Pinto. *Modelagem e controle de nível do tubulão de uma caldeir,.* Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciência em engenharia elétrica, Universidade Federal Do Rio de Janeiro, 2005.

XXV. MORADI, Hamed; BAKHTIARI-NEJAD, Firooz; SAFFARr-AVVAL; Majid. *Robust control of an industrial boiler system; a comparison between two approaches: Sliding mode control & H1 technique*. Energy Conversion and Management, V.50, p.1401–1410, 2009.

XXVI. MOSCOSO, Caio Tödling; QUEIROZ, Leonardo Gradin. *Estudo da Eficiência de Combustão em Sistemas de Monitoração e Supervisão de uma Caldeira*, Projeto Final do Curso de Engenharia Química, Universidade Federal Do Rio de Janeiro, 2011.

XXVII. NIKIEL, José Marcio. *Sistema de instrumentação e automação de caldeira com combustíveis alternativos*. Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciência em engenharia elétrica, Universidade Federal Do Rio de Janeiro, 2010.

XXVIII. OLSSON, L.; SCHULZE, U.; NIELSEN, J. *On-Line bioprocess monitoring – an academic discipline or an industrial tool?,* Analytical Chemistry, V.17, n. 2, p. 88-95, 1998.

XXIX. PAULA, Lívia Tomaz de Souza. *Análise de dados aplicada à avaliação de combustíveis para Caldeira semi-industrial operada com misturas Diesel/ biodiesel,* Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

XXX. PINHEIRO, P.C.C.; VALLE, R.M. *Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar.* II Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica, Rio de Janeiro, Rj, Anuais. Automação Industrial São Paulo, ABIQUIM, Associação Brasileira da Industria Química e Produtos Derivados, p.157-162, 1995.

XXXI. QUACHIO, Raphael; PINTO, Gilson Alexandre; PAVANELLI Paula Edilene; TIZZO, Livia. *Aumento da eficiência energética de um reator autoclave pra produção de polietileno utilizando controle avançado*; Controle&Instrumentação edição 181, 2013.

XXXII. SANTOS, Mauro Alves. *Inserção do Biodiesel na Matriz Energética Brasileira: Aspectos Técnicos e Ambientais Relacionados ao seu Uso em Motores de Combustão*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, p. 57-69, 2007.

XXXIII. SEBORG, Dale E.; MELLICHAMP, Duncan A.; EDGAR, III Thomas F.; DOYLE, Francis J. *Process Dynamics and Control.* 3nd Edition, John Wiley & Sons, 2011, 514 p.

XXXIV. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE – RESOLUÇÃO SMA-079, de 4 de novembro de 2009.

XXXV. SEINFELD, John H.. *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Polution*. John Wiley&Sons, 1986.

XXXVI. SOUZA, Gustavo Rodrigues; SANTOS, Antonio Moreira; FERREIRA, Sérgio Lucas; MARTINS, Keyll Carlos Ribeiro; MÓDOLO, Délson Luiz. *Evaluation of the performance of biodiesel from waste vegetable oil in a flame tube furnace;* Thermal Engineering, V.29, p. 2562‑2566, 2009.

XXXVII. SOUZA, Lívia Alves; *Poder Calorífico de Combustíveis*; Disponível em: http://www.mundoeducacao.com.br/quimica/poder-calorífico-combustiveis.htm Acesso em 29/07/2013 às 19:05h.

XXXVIII. STENGER, Nelson. *Comparativo entre Geradores Flamotubulares e Aquotubulares.* Disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAhDwAC/trabalho-gdv.Acesso em 22/11/2012 ás 22:30.

XXXIX. SMITH, Carlos A; CORRIPIO Armando B.. *Principles and Practice of Automatic Process Control,* 2° edição, John Wiley Sons, Inc, Ney York,2005.

XL. RIBEIRO, Marco Antônio. *Instrumentação,* 10° edição, Tek Treinamento & Consultoria Ltda, Salvador, 2004.

XLI. VALDMAN, Andrea. *Sistema de Automação para Monitoramento Online de Gases Residuais e Diagnóstico de uma Caldeira Operada com Misturas Diesel/Biodiesel,* Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

XLII. VALDMAN, Belkis; FOLLY, Rossana; SALGADO, Andrea. *Dinâmica, Controle e Instrumentação de processos*, Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2008.