UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**ESTUDO COMPARATIVO DA COMBUSTÃO DE SEBO BOVINO E
DIESEL EM FORNALHA CALORIMÉTRICA
FLAMOTUBULAR**

Osiris Cárdenas

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

Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Josmar Davilson Pagliuso

Este exemplar trata-se da versão corrigida. A versão original encontra-se disponível junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP

São Carlos

2011

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

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

C122e Cárdenas, Osiris
Estudo comparativo da combustão de sebo bovino e diesel em fornalha calorimétrica flamotubular / Osiris Cárdenas ; orientador Josmar Davilson Pagliuso. -- São Carlos, 2011.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia Mecânica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Transferência de calor. 2. Queimador.
3. Combustíveis alternativos. 4. Sebo. 5. Emissões poluentes. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro OSIRIS CÁRDENAS.

Tese defendida e julgada em 25/04/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **JOSMAR DAVILSON PAGLIUSO - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Associado **SERGIO RODRIGUES FONTES**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Dr. **MILTON NORIO SOGABE**
(Centro Tecnológico de Saneamento Básico / CETESB)

APROVADO

Prof. Dr. **CAIO GLAUCIO SANCHEZ**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Associado **MARCELO AREIAS TRINDADE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedicatória

A minha mãe, Rosa Helena Pulido de Ardila Cárdenas, "In Memoriam", a minha esposa, Lygia Cárdenas, e aos meus filhos Viviane, Vinicius e Cristiane.

A minha madrinha, Ethel, e ao grande amigo Vinicius Tarrago Vargas, "In Memoriam", que me apoiaram nos momentos mais difíceis de minha vida.

A todos os meus fiéis amigos que me acompanham não importando o tempo ou a presença corporal, e sim a valiosa amizade.

Agradecimentos

A Deus, que vem me dando muitas graças ao longo da minha vida.

Ao Professor Dr. Josmar Davilson Pagliuso, por todo o apoio e conhecimento transmitidos.

Ao CNPq, pela fornalha (Projeto CNPq 460283/01-4) que permitiu a realização do trabalho de pesquisa.

Ao Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos – Escola de Engenharia de São Carlos, por toda a infraestrutura e acolhimento.

Aos Professores Doutores do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Antonio Moreira dos Santos, Fernando Eduardo Milioli, Josmar Davilson Pagliuso, Paulo Seleguin e Sérgio Rodrigues Fontes.

Ao Professor Doutor Geraldo Lombardi, pela oportunidade de convívio, sempre incentivando e apoiando os alunos.

Ao Professor Doutor e amigo Woodrow Nelson Lopes Roma, pela imensa ajuda e contribuição para o presente trabalho, e certamente, a futuros trabalhos que virão.

A Professora Doutora Janete Crema, pelo apoio e compreensão.

Aos técnicos, Donizete Luchesi, Hélio J. D. Trebi, José F. Torres, Roberto Lourenço e Roberto Prativiera.

A bibliotecária Elena da Biblioteca Central da USP, pelo apoio e dedicação.

Aos companheiros de trabalho, Anderson, Adilson, Carlos, Deuzuita,

A Eugênio, Ivonete, Gustavo, Julio, Marcus, Mário, Paula e Rodrigo.

Resumo

OSIRIS, C. (2011). **Estudo da transferência de calor em fornalha flamotubular utilizando como combustível o sebo bovino**. 63p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Neste trabalho, avaliou-se a queima do sebo bovino por meio de uma fornalha calorimétrica flamotubular instrumentada que opera à pressão atmosférica. Como parte do trabalho experimental, foram analisadas as curvas de rendimento térmico da queima do combustível, sebo bovino, e verificou-se seu comportamento quanto à transferência de calor e emissão de gases. Experimentalmente, a fornalha calorimétrica foi remodelada e adaptada para operar com sebo bovino, incorporando-se a esta um elemento de aquecimento prévio, trata-se de um queimador desenvolvido no NETeF possuindo um sistema de alimentação com aquecimento para o combustível, já que o sebo se encontra no estado sólido a temperatura ambiente. O queimador utilizado no experimento foi do tipo misto. Os resultados das medições do poder calorífico do sebo bovino mostraram-se altos: 39.985,5 kJ/kg (dados obtidos no laboratório do NETeF), fazendo com que o sebo se torne uma fonte menos poluente.

Palavras-chave: Queimador. Transferência de calor. Combustíveis alternativos. Sebo, emissões poluentes.

Abstract

OSIRIS, C. (2011). **Study of heat transfer in the flame tube furnace using beef tallow**. 63p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

In this study, we evaluated the burning of tallow by a calorimetric flamotubular instrumented furnace which operates at atmospheric pressure.

As part of the experimental work, the curves of thermal efficiency of fuel combustion (beef tallow) were analyzed, and it was possible to set their composition toward the transfer of heat and gas emissions. Experimentally, the calorimetric furnace was remodeled and adapted to operate with beef tallow by incorporating an element of this preheating, it is a burner developed in NETeF and it has a system to supply heating for fuel, as the tallow is solid at room temperature. The burner used in the experiment was of mixed type. The results of measurements of the calorific value of beef tallow were shown to be high: 39985.5 kJ / kg (data obtained in the laboratory of NETeF), causing the fat to become a viable source.

Key words: Burner. Heat transfer. Alternatives fuels. Tallow. CO₂ emissions.

Lista de Figuras

Figura 1- Distribuição dos principais usos do sebo bovino no país.....	16
Figura 2- Representação esquemática das estruturas de chama de difusão em função da velocidade, mostrando a transição laminar / turbulenta	22
Figura 3- Representação esquemática do sistema experimental	32
Figura 4- Esquema funcional do queimador desenvolvido no NETeF	33
Figura 5- Fornalha calorimétrica e equipamentos auxiliares.....	35
Figura 6- Analisadores de gases Horiba – Laboratório NETeF.....	38
Figura 7- Chaminé	39
Figura 8- Viscosidade dinâmica versus temperatura do sebo bovino	44
Figura 9- Vaso aberto de Cleveland	45
Figura 10- Curva TG/DTG do sebo bovino em atmosfera de nitrogênio	46
Figura 11- Representando as temperaturas da fornalha para a queima de diesel referente ao teste D1, coeficiente do ar teórico $\lambda=1,127$	58
Figura 12- Representando as temperaturas da fornalha para a queima de diesel referente ao teste D2, coeficiente do ar teórico $\lambda=1,163$	58
Figura 13- Representando as temperaturas da fornalha para a queima de diesel referente ao teste D3, coeficiente do ar teórico $\lambda=1,150$	59
Figura 14- Representando as temperaturas da fornalha para a queima de sebo referente ao teste S1, coeficiente do ar teórico $\lambda=1,143$	59
Figura 15- Representando as temperaturas da fornalha para a queima de sebo referente ao teste S2, coeficiente do ar teórico $\lambda=1,130$	60
Figura 16- Representando as temperaturas da fornalha para a queima de sebo referente ao teste S3, coeficiente do ar teórico $\lambda=1,126$	60
Figura 17- Concentrações de CO ₂ e O ₂ % gerados na combustão do Diesel durante o teste D1	64
Figura 18- Concentrações de CO ₂ e O ₂ % gerados na combustão do Diesel durante o teste D2	64
Figura 19- Concentrações de CO ₂ e O ₂ % gerados na combustão do Diesel durante o teste D3	65
Figura 20- Concentrações de CO ₂ e O ₂ % gerados na combustão do Sebo durante o teste S1.....	65
Figura 21- Concentrações de CO ₂ e O ₂ % gerados na combustão do Sebo durante o teste S2.....	66
Figura 22- Concentrações de CO ₂ e O ₂ % gerados na combustão do Sebo durante o teste S3.....	66
Figura 23- Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Diesel durante o teste D1	68

Figura 24- Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Diesel durante o teste D2	69
Figura 25- Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Diesel durante o teste D3	69
Figura 26- Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Sebo durante o teste S1	70
Figura 27- Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Sebo durante o teste S2	70
Figura 28- Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Sebo durante o teste S3	71
Figura 28- Filtro usado nos testes do óleo diesel	72
Figura 29- Filtro usado nos testes do sebo	72

Lista de Tabelas

Tabela 1- Composição dos ácidos graxos em biocombustíveis	24
Tabela 2- Resultado das emissões utilizando sebo bovino	25
Tabela 3- Limites de emissão para poluentes	28
Tabela 4- Unidades analisadoras Horiba Enda	37
Tabela 5- Algumas propriedades sebo bovino	40
Tabela 6- Análise elementar do sebo bovino	41
Tabela 7- Poder calorífico superior do sebo bovino	42
Tabela 8- Viscosidade versus temperatura	43
Tabela 9- Composição dos ácidos graxos do sebo bovino	47
Tabela 10- Propriedades termodinâmicas do gás	47
Tabela 11- Tabela das entalpias de formação	48
Tabela 12- Tabela interativa de temperatura.....	49
Tabela 13- Cálculo para obtenção da massa molecular dos gases de combustão do sebo bovino	50
Tabela 14- Propriedades do Diesel	51
Tabela 15- Cálculo da média ponderada das massas moleculares dos gases de combustão do diesel	51
Tabela 16- Propriedades do Sebo.....	56
Tabela 17- Medidas feitas na fornalha usando diesel e sebo, corridas D1, D2, D3, S1, S2 e S3	57
Tabela 18- Comparação da temperatura da chama medida nos ensaios com diesel e com sebo	61
Tabela 19- Coeficiente global de transferência de calor por câmara	62
Tabela 20- Concentrações médias de CO ₂ e O ₂ nos testes com sebo e diesel	67
Tabela 21- Comparação das concentrações de CO ₂ e O ₂ nos gases de combustão	67

Tabela 22 -Taxas de emissão de óleo de xisto versus sebo	71
Tabela 23 -Comparação dos fatores de emissão do CO e HCT	72
Tabela 24 -Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida D1	74
Tabela 25 -Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida D2	74
Tabela 26 -Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida D3.....	74
Tabela 27 -Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida S1	75
Tabela 28 -Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida S2	75
Tabela 29 -Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida S3	75

Lista de Símbolos

ASME – The American Society of Mechanical Engineers

BPF – Boas Práticas de Fabricação

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

HC – Hidrocarbonetos

NO – Óxido Nítrico

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

Nu_m – Número de Nusselt Médio

O₂ – Oxigênio

Pr – Número de Prandtl

Re – Número de Reynolds

HCT – Hidrocarbonetos Totais

SMA – Secretaria de Estado do meio Ambiente SP.

T_E – Temperatura da água de entrada °C

T_G – Temperatura Média dos gases °C

T_M – Temperatura Média da Água °C

T_{onset} – Temperatura de Início

T_S – Temperatura da água de saída °C

U – Coeficiente Global de Transferência de Calor, W/m²°C

λ - Razão entre o ar utilizado e o ar estequiométrico

Sumário

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	15
1.1 Introdução	15
1.2 Objetivos	17
1.3 Objetivos específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	19
2.1 Introdução	19
2.2 Combustão	20
2.3 Definições e classificações dos principais fenômenos relacionados com a combustão.....	22
2.4 Teoria da combustão.....	23
2.5 Temperatura de chama adiabática	23
2.5.1 Composição dos ácidos graxos.....	24
2.6 Poder Calorífico.....	25
2.7 Uso do sebo como combustível	25
2.8 Composição dos produtos de combustão	26
2.9 Reações químicas principais.....	27
2.10 Gases de exaustão	27
2.11 Tipos de chamas de combustão.....	28
2.12 Nebulização.....	29
2.13 Chama difusiva turbulenta.....	29
2.14 Queimadores para fornalha flamotubular	29
3 EXPERIMENTAL	31
3.1 Descrição geral do sistema experimental.....	31
3.1.1 Queimador.....	33
3.1.2 Fornalha calorimétrica	34
3.1.3 Medidas de vazão	36
3.1.4 Alimentação de combustível.....	36
3.1.5 Medidas de temperatura.....	36
3.1.6 Análise de gases	37
3.1.7 Procedimento experimental (Metodologia para variar o fator de excesso de ar) ..	39
3.2 Propriedades do sebo	40
3.2.1 Análise elementar.....	41
3.2.2 Poder calorífico	42
3.2.3 Viscosidade	42
3.2.4 Ponto de fulgor	44
3.2.5 Curva termogravimétrica	45
3.3 Metodologias de cálculo	46
3.3.1 Temperatura de chama adiabática.....	47
3.3.2 Tempo de residência dos gases.....	49
3.3.3 Equação da combustão para o sebo	50
3.3.4 Equação da combustão para o diesel	50
3.3.5 Coeficiente global de transferência de calor.....	52

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Introdução	55
4.2 Propriedades do sebo bovino	55
4.3 Parâmetros gerais dos testes	56
4.4 Temperaturas	57
4.4.1 Perfis da temperatura	57
4.4.2 Temperatura da chama	61
4.4.2.1 Medida	61
4.4.2.2 Temperatura calculada da chama adiabática	61
4.5 Transferência de calor	61
4.6 Emissões	63
4.6.1 Concentração de CO ₂ e O ₂ nos produtos de combustão	63
4.6.2 Concentrações médias de CO ₂ e O ₂	66
4.6.3 Verificação das medidas de CO ₂ e O ₂	67
4.6.4 Emissões de CO e HCT	68
4.6.5 Fatores de emissão de CO e HCT	72
4.7 Material particulado	72
4.8 Tempo de residência dos gases na fornalha	73
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	76
5.1 Conclusões	76
5.2 Sugestões	77
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A	81
ANEXO A	82

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

A mudança climática que observamos hoje é consequência da evolução tecnológica que teve seu início no período anterior ao da revolução industrial, quando a atmosfera da Terra era pouco afetada pelas atividades humanas, por exemplo, estima-se que continha perto de 280 ppm (partes por milhão) de CO₂. Com o advento das máquinas e queima de carvão e petróleo, o nível de CO₂ aumentou consideravelmente, chegando a 315 ppm na década de 1950. Atualmente temos algo em torno de 380 ppm, o que contribuiu para o aquecimento da atmosfera do planeta (MCKIBBEN, 2007).

Hoje é preocupação principal dos pesquisadores a busca de produção de energia com a menor taxa de emissão de gases poluentes numa campanha conhecida como produção verde ou energia limpa. Os combustíveis usados desde a época da revolução industrial são os combustíveis fósseis, liderados pelo carvão e seguido pelo petróleo. São ainda hoje os principais componentes da matriz energética mundial.

Esses combustíveis provocam grande impacto na atmosfera, pois geram gases de efeito estufa de forma cumulativa, aumentando sua concentração e consequentemente o forçamento radiativo e a temperatura.

Nas últimas décadas vem ganhando força o uso de combustíveis renováveis, impulsionado no Brasil pelo programa Pró Álcool, uma das primeiras experiências no mundo em uso de um combustível renovável em larga escala.

O combustível renovável é caracterizado pela reciclagem do carbono na natureza. O carbono emitido, por exemplo, pela queima do álcool, é absorvida pela cana de açúcar, matéria prima do álcool, durante sua fase de crescimento. Dentro dessa mesma definição enquadram-se os biocombustíveis que são produzidos a partir de matéria orgânica incluindo os subprodutos animais usados na produção do biodiesel.

Desde os tempos pré-históricos a carne faz parte da dieta do ser humano, quer seja como principal fonte de alimento quer como suplemento e está presente no dia-a-dia da alimentação da população mundial até os dias de hoje.

Atualmente a carne é processada industrialmente antes de ser disponibilizada para consumo. Essa industrialização implica em subprodutos, entre eles o sebo, que pode ser utilizado como matéria prima para cosméticos, sabão, fertilizantes, ração etc. Se não utilizado ou tratado adequadamente, subprodutos transformam-se em poluentes, com potencial risco para o ambiente.

Na figura 1 é apresentada uma distribuição dos principais usos do sebo bovino na qual se pode observar que os principais usos são: 5% para a fabricação de sabão, 10% como combustível, 15% como componente de ração e 70% para outros fins. Nesses 70% alguns possíveis usos podem ser citados, por exemplo, em culinária, na fabricação de velas, como fundente para solda, como ingrediente na indústria de couro, como lubrificantes na indústria de laminados e outros. De acordo com a figura 1 a fração referente ao combustível é pequena, apenas 10 %. Com técnica e conhecimentos corretos tem o potencial de ser expandida.

Figura 1 - Distribuição dos principais usos do sebo bovino no país
Fonte - Embrapa (2007)

O sebo bovino tem propriedades que o qualificam potencialmente como combustível e assim pode ser utilizado na produção de energia de forma direta ou indireta. O uso do sebo como matéria prima para produção de biodiesel é um exemplo de forma indireta.

Para utilização direta pela queima em fornalhas necessita caracterização mais minuciosa quanto à qualidade e facilidade de queima, transferência de calor da chama e emissão de poluentes atmosféricos. É importante quantificar as

emissões de gases e material particulado para a atmosfera, de modo a estar seguro de que seu comportamento ambiental é benéfico ou pelo menos adequado.

A queima correta do sebo é um exemplo de descarte seguro na natureza. Ou seja, além de ser uma forma de diminuir a emissão acentuada de CO_2 para a atmosfera, evita a geração de passivo ambiental ou de descarte clandestino, o que o tornaria um agente poluidor.

Sendo assim, este trabalho pode ser uma contribuição relevante para o problema ambiental, notadamente a mudança climática, pois estuda a substituição do óleo combustível por sebo bovino, comparando a eficiência de cada um destes combustíveis nos aspectos mencionados acima, ou seja, ambiental e técnico, como combustível industrial.

Apesar do diesel não ser normalmente usado como combustível industrial por seu custo elevado, ele foi escolhido para comparação neste trabalho por representar um padrão alto, visto que sua queima é mais simples, eficiente e menos poluente do que a do óleo combustível, que seria o competidor natural do sebo bovino.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar o uso do sebo como combustível industrial considerando os aspectos ambientais e técnicos.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar as propriedades do sebo como combustível;
- Determinar as emissões atmosféricas de gases poluentes e material particulado durante o processo de combustão do sebo;
- Estudar os processos de transferência de calor da chama para as paredes da fornalha calorimétrica;
- Comparar os itens acima com um combustível de alta qualidade para o uso industrial, nesse caso, o óleo diesel.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Nos dias de hoje, com tantos problemas de emissões para o meio ambiente, a procura por combustíveis alternativos para minimização da poluição, vem se destacando nas pesquisas. Dentro desta linha surgiu a oportunidade de pesquisar os resíduos provenientes de abatedouros e frigoríficos do país, em substituição aos combustíveis a base de hidrocarbonetos como óleos, BPF (óleo de baixo ponto de fluidez).

Segundo Bellaver e Zanotto (2004), o sebo bovino é o resultado de resíduos de tecidos de bovinos, que são processados em digestores, munidos de agitadores que irão extrair as gorduras por prensas, centrifugá-las ou extraí-las por solventes orgânicos. As Fontes de gorduras devem ser todas de origem bovina e sem uso de antioxidantes.

O sebo bovino, resultado da indústria frigorífica, é uma substância, material de propriedade oxigenado.

Segundo Globo Rural Online (2011), o rebanho brasileiro soma cerca de 169,9 milhões de cabeças de gado espalhadas em mais de 170 milhões de hectares com pastagens. Esses dados foram coletados pelo IBGE durante o censo de 2006.

Em 2009 o rebanho bovino somou 205,3 milhões de cabeças de gado e o ritmo de abates em 2010 cresceu acentuadamente: 29.265 milhões de cabeças abatidas, segundo dados divulgados pelo IBGE (TAGUCHI, 2011).

Atualmente, das 29.265 milhões de cabeças de gado abatidas no Brasil em 2010 que representam um crescimento de 4,3% em relação a 2009; 40% são feitos pelos frigoríficos JBS e Marfrig.

Hoje, cada vez mais estamos procurando combustíveis alternativos que agridam menos a natureza, emitindo elementos menos poluentes para a atmosfera. O sebo bovino tem nível de enxofre desprezível e, por isso, pode-se trabalhar com temperaturas abaixo de 150°C na saída da chaminé das caldeiras, podendo aumentar a eficiência. A temperatura da saída dos gases nas chaminés é mantida

acima de 150°C para evitar a condensação, quando do uso de combustíveis que contêm enxofre, que provocam o problema de ácidos corrosivos (MCPHAIL, 2002).

2.2 Combustão

Segundo o artigo Tallow as a heating fuel (2002), da Food Science Australia, o sebo bovino tem um ponto de fusão entre 50° e 60°C. Caldeiras a óleo podem ser transformadas para queimar sebo. Existem alguns pontos importantes ao transformar uma caldeira para operar com sebo: A) as tubulações com sebo devem ser acessíveis e as mais curtas possíveis; B) o sebo deve ser limpo, filtrado ou centrifugado. C) as temperaturas do sebo nas tubulações devem estar acima dos 90°C a fim de prevenir resíduos aderentes nos filtros. A temperatura de tanque do sebo a 120°C possibilitará uma viscosidade boa para nebulização; D) se linhas aquecidas e isoladas termicamente são usadas, é possível operar unicamente com o sebo sem a necessidade de dar a partida ou parada do processo com um combustível regular.

Segundo Pagliuso (1984, p.28),

Chama-se ar teórico à menor quantidade possível de ar, tal que possa fornecer o oxigênio necessário para a oxidação do carbono, hidrogênio, ou qualquer outro elemento oxidável no combustível, de uma forma completa. Quando se obtêm combustão completa utilizando o ar teórico, os produtos de combustão não contêm oxigênio. Nas aplicações práticas a combustão completa dificilmente é obtida, ainda que utilizada uma quantidade de ar bem acima do ar teórico.

De acordo com Serfaty (2010), define-se combustão como uma reação química exotérmica entre duas substâncias dita combustível e comburente, ocorrendo à alta temperatura. Então, a combustão é um processo químico em que um oxidante reage com um combustível para liberar a energia térmica, geralmente na forma de gases, produtos da combustão à altas temperaturas. Pequenas quantidades de outras energias também são desenvolvidas durante o processo de combustão: energia eletromagnética (luz), energia elétrica (íons ou elétrons livres) e energia mecânica (ruído).

Usamos muitos materiais como comburente, mas o oxigênio do ar ainda é o mais empregado. A combustão vai ser considerada completa se as substâncias

combustíveis apresentarem uma forma mais oxidada e, de incompleta, se essa oxidação das substâncias for parcial.

Segundo Pagliuso¹ (2006, informação pessoal), o uso do sebo bovino como combustível possui atrativos econômicos e ambientais, principalmente quando se considera a reciclagem do carbono que reduz o impacto do uso dos combustíveis sobre a mudança climática.

A combustão do sebo é de difícil controle se os equipamentos utilizados não são projetados para seu uso (tubulação quente e não isolada, válvula de esfera, possível filtragem inadequada), podendo ocasionar apagamento da chama. O apagamento de chama é um acontecimento que provoca emissão elevada de CO e gases orgânicos, pois o sebo não queimado na fornalha entra nas regiões menos quentes da caldeira onde o processo de oxidação torna-se lento e a sua conversão para CO₂ e água não tem tempo para ocorrer.

Ainda segundo Serfaty (2010), no processo de combustão são produzidos vários poluentes tais como enxofre (resultado do dióxido de enxofre e a partir desse, trióxido de enxofre), nitrogênio, oxigênio (produzindo aldeídos). A fuligem e o monóxido de carbono aparecem como resultado de uma combustão incompleta (não desejada).

No início de uma combustão temos que observar a energia de ativação. O início de uma combustão será mais fácil se essa energia de ativação for a menor possível. A combustão começa com um método de ignição, uma operação denominada escorvamento, que introduz um combustível com menor energia de ativação para o início da reação da combustão.

Segundo Siegel e Howell (1972), “determinar o efeito da fuligem em chamas de radiação se resume em dois requisitos, o primeiro é determinar a distribuição da fuligem na chama e a segunda é conhecer as propriedades radioativas da fuligem”.

Segundo Borman e Ragland (1998), os efeitos da temperatura, pressão e tipo de combustível na fuligem ainda não estão categorizados por cada modelo.

As chamas pré-misturadas mostram uma redução de fuligem com a temperatura, enquanto as chamas de difusão mostram um acréscimo.

¹ Informação fornecida por Prof.Dr. Josmar Dalvison Pagliuso, em nov. 2006, retirada de relatório apresentado pelo mesmo.

2.3 Definições e classificações dos principais fenômenos relacionados com a combustão

Para obtermos chama estável em um queimador e manter a ignição continuada em uma mistura ar combustível, evitando a extinção da chama, segundo Dutton (1994), devemos ter a velocidade da mistura ar combustível igual à velocidade da frente de chama.

Porém quando temos a velocidade da mistura ar combustível menor que a velocidade da frente de chama aparece o fenômeno conhecido como retrocesso da chama, no qual a chama adentra à tubulação que transporta a mistura.

No caso em que temos a velocidade da mistura ar combustível maior que a velocidade da frente de chama temos o fenômeno do descolamento da chama, que é o afastamento da chama em relação ao bocal do queimador.

Podemos observar todos esses aspectos em função da velocidade da chama, no esquema apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática das estruturas de chama de difusão em função da velocidade, mostrando a transição laminar / turbulenta

Fonte - Adaptado de Hottel e Hawthorne (1949 *apud* GRIFFITHS; BARNARD, 1995)

2.4 Teoria da combustão

O triângulo do fogo, combustível, oxigênio e temperatura, é a representação gráfica para que uma combustão ocorra. Para isso, são necessários esses três elementos. Para que tenhamos uma boa combustão são necessários os três T's: temperatura, tempo e turbulência.

2.5 Temperatura de chama adiabática

Segundo Shapiro e Moran (2002) a temperatura obtida pelos produtos da combustão na operação adiabática da fornalha é denominada Temperatura de chama adiabática ou temperatura de combustão adiabática. Ela pode ser determinada pelo uso dos princípios de conservação de massa e de energia. Para ilustrar este procedimento, ele admite que tanto o ar de combustão quanto os produtos de combustão formem misturas ideais de gases. O balanço de energia em uma base molar de combustível dada por:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{n}_c} - \frac{\dot{W}}{\dot{n}_c} = \bar{h}_p - \bar{h}_R \quad (1)$$

simplifica-se para:

$$\bar{h}_p = \bar{h}_R \quad (2)$$

em que:

$\bar{h}_p$ e $\bar{h}_R$ simbolizam, respectivamente, as entalpias dos produtos e dos reagentes por mol de combustível.

Que pode ser escrito como:

$$\sum_P n_s \bar{h}_s = \sum_R n_e \bar{h}_e \quad (3)$$

em que o índice **e** denomina as correntes de entrada de combustível e de ar, e o índice **s**, os produtos de combustão na saída.

Já, segundo Van Wylen (2003), a temperatura de chama adiabática ocorre no processo em que o trabalho é nulo e as variações de energia cinética ou potencial

são nulas e esta é a máxima temperatura que pode ser atingida pelos produtos da combustão. A máxima temperatura da chama adiabática que pode ser atingida, para um dado combustível e certo estado (p e T) nos reagentes, ocorre quando a mistura é estequiométrica. A temperatura adiabática da chama pode ser controlada pelo excesso de ar que é utilizado. Isso é importante, por exemplo, nas turbinas a gás, onde a temperatura máxima admissível é determinada por considerações metalúrgicas.

2.5.1 Composição dos ácidos graxos

Na Tabela 1, Glaude et al. (2010) mostram a composição de quatro biocombustíveis provenientes de óleos vegetais e o quinto caso com a composição do biocombustível proveniente do sebo (BF5), com os dados fornecidos em mol%.

Tabela 1 – Composição dos ácidos graxos em biocombustíveis

Nome	Formula ^a	BF1	BF2	BF3	BF4	BF5
		Colza	Girassol	Soja	Palma	Sebo
Ácido Mirístico	C ₁₄ :O	0	0	0	1	4
Ácido Palmítico	C ₁₆ :O	5	6	10	44	27
Ácido Esteárico	C ₁₈ :O	3	5	4	6	24
Ácido Oleico	C ₁₈ :1,Δ9	59	18	23	38	40
Ácido Linoleico	C ₁₈ :2,Δ9,12	21	69	53	10	3
Ácido Linoleico	C ₁₈ :3,Δ9,12	9	1	8	0,5	0,5
Ácido Eicosanóico	C ₂₀ :O	0,5	0,5	1	0,5	0,5
Ácido Gadoleico	C ₂₀ :1,Δ9	1	0,5	0,5	0	1
Ácido Bênico	C ₂₂ :O	0,5	0	0,5	0	0
Ácido Erúcico	C ₂₂ :1,Δ9,13	1	0	0	0	0

Fonte – Glaude et al. (2010) (Tradução do autor)

Na fórmula C_x: y, Δz, x é o número de átomos de carbono no ácido original, y é a ligação dupla na molécula, e z é a posição da ligação dupla na cadeia de alquila relativa a função ácido.

2.6 Poder calorífico

É a quantidade de calor liberado pela queima total de uma unidade de combustível.

Existem duas definições para o poder calorífico do combustível, em função do estado físico que se considera para a água formada ao final da combustão e são conhecidos como “poder calorífico superior” (PCS) e “poder calorífico inferior” (PCI).

No PCS, considera-se que a água é condensada, logo o seu calor latente de vaporização é incluído no calor obtido da combustão. No PCI, a água formada permanece no estado gasoso, ficando excluído o seu calor latente de vaporização.

2.7 Uso do sebo como combustível

Rino e Mitamura (2007) descrevem que, no estado do Paraná, há mais ou menos 4 anos, a queima do sebo vem sendo utilizada como combustível, embora não exista lei regularizando o uso do sebo para esse fim. Segundo os autores as empresas locais descobriram que a produção de vapor tem uma redução do seu custo na ordem de 20 a 30%. Citam também que o sebo caracteriza-se por ser pastoso à temperatura ambiente e que sua queima tem sido feita em temperaturas acima de 40°C.

Mencionam algumas dificuldades para o uso desse material tais como: sua disponibilidade (como a indústria de sabão e margarina também utilizam o sebo provenientes do frigorífico, sua disponibilidade não é tão grande); a regulação do queimador e a qualificação dos fornecedores para padronização das características do sebo. A Tabela 2 mostra alguns parâmetros encontrados pelos autores.

Tabela 2 - Resultado das emissões utilizando sebo bovino

Caldeira	O₂	CO	NO_x	SO₂	CO₂	Excesso de ar	Eficiência
	%	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	%	%	%
23	10,70	79,01	120,15	8,71	7,55	104,38	78,60
24	6,50	10,83	134,97	1,70	10,70	45,00	78,40

Fonte - Rino e Mitamura (2007)

2.8 Composição dos produtos de combustão

Segundo Vlassov (2001), para se ter uma combustão completa temos que ter uma quantidade de ar em excesso, mais que a estequiométrica. Com apenas o ar estequiométrico na câmara, uma parte do local do volume, dentro da câmara, a distribuição do ar não é homogênea, ocasionando uma queima incompleta.

Pelo contrário, se tivermos uma combustão com excesso de ar, a queima será completa. No entanto, o ar em excesso esfria a câmara de combustão e os gases emitidos pela chaminé aumentam.

O excesso de ar é caracterizado pelo seu coeficiente:

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^0} \quad (4)$$

α = coeficiente de excesso de ar

V_{ar}^0 = Volume teórico de ar por unidade de combustível, em m^3/kg ou m^3/m^3

V_{ar} = volume real de ar na câmara de combustão em m^3/kg ou m^3/m^3 .

Desta forma podemos calcular o volume real do ar

$$V_{ar} = \alpha V_{ar}^0, \quad m^3/kg \quad ou \quad m^3/m^3 \quad (5)$$

Na combustão completa, os produtos de combustão apresentam os seguintes gases, além de alguns outros componentes em pequenas quantidades.

O oxigênio e nitrogênio do ar em excesso aparecem junto com os produtos da queima e os volumes dos gases formados são os mesmos calculados como na reação estequiométrica, Vlassov (2001).

Para combustíveis gasosos, fornece-se um excesso de ar em torno de 1 a 2%, enquanto que para combustíveis líquidos, entre 5 e 10%. Para combustíveis sólidos, como carvão não pulverizado, o excesso de ar pode chegar a 25% (GILL; CARVALHO, BASTOS-NETTO², 1987 *apud* CARVALHO JR.; MCQUAY, 2007). Em

² GILL, W.; CARVALHO, J.A.; BASTOS-NETTO, D. (1987). **Termodinâmica da combustão**. São José dos campos. São Paulo: INPA. (Publicação Interna, INPE-4244-RPI/175).

processos de incineração, é comum se trabalhar com excesso de ar acima de 100% (DEMPSEY; OPPELT, 1999).

2.9 Reações químicas principais

Segundo Bega (2003) combustível é a substância que está sendo queimada numa reação, e o oxigênio é o agente oxidante, ou seja, o comburente.

A combustão completa onde o combustível e o oxigênio interagem, resultando em CO₂ e água, e a combustão incompleta, onde seu resultado pode produzir tanto gás carbônico quanto monóxido de carbono e fuligem.

Podemos controlar uma combustão medindo seu teor de monóxido de carbono presentes nos gases dessa combustão. Na combustão ideal observamos que todo carbono se converte em dióxido de carbono.

2.10 Gases de exaustão

Segundo Bazzo (1995), o projeto de chaminé é fundamental por auxiliar o processo de tiragem e envolver parâmetros ligados ao controle ambiental. O controle da poluição atmosférica é uma preocupação permanente nos dias de hoje. Assim sendo, as chaminés passaram a ser projetadas de maneira tal a melhorar a dispersão de partículas sólidas e gases nocivos à saúde humana e ao ambiente.

A incineração é um processo que contém os limites mais rigorosos e emprega decomposição térmica à alta temperatura, maior que 900 °C. A Secretaria de Estado do Meio Ambiente SP, em sua Resolução SMA N° 79, apresenta os limites de emissão para poluentes a serem monitorados continuamente. Na Tabela 3 podemos observar esses limites em valores expressos em mg/Nm³ (miligrama por normal metro cúbico), base seca, corrigidos a 11% de O₂.

Tabela 3 - Limites de emissão para poluentes

Parâmetro	Limite de Emissão				
	Valor médio Diário	Valor médio de intervalos de 30 minutos do período de um dia	Valor médio de intervalos de 10 minutos do período de um dia	Valores médios de 30 minutos	
				97% do tempo	100% do tempo
Monóxido de carbono (CO) Período de um ano	50	100	150		
Hidrocarbonetos Totais, HCT (expresso como metano e não metano)	10	x	x	10	20
Óxidos de Enxofre (SOx), expresso em SO ₂	50	x	x	50	200
Material Particulado (MP)	10	x	x	10	30

Fonte - Secretaria de Estado do Meio Ambiente (2009)

2.11 Tipos de chamas de combustão

Segundo Carvalho Jr. e McQuay (2007, p.131)

Uma chama é pré-misturada quando o oxidante e o combustível já estão misturados antes da queima. O outro tipo é denominado chama de difusão, na qual o oxidante e o combustível estão inicialmente separados e a combustão ocorre em uma interface entre eles.

Um bom exemplo de chama prémisturada e de chama de difusão é o bico de Bunsen.

Em um queimador laminar a velocidade do gás é baixa próximo à parede e a medida que vai se deslocando para o centro vai aumentando tomando o formato de um perfil parabólico. Em todos os pontos na área de saída do tubo, a velocidade de escoamento é maior que a velocidade de queima. O perfil da chama tem forma cônica de tal forma que, na frente de chama, a componente normal da velocidade de escoamento é igual à velocidade de chama.

2.12 Nebulização

Para conseguir uma boa nebulização, deve-se reduzir a viscosidade e a tensão superficial do combustível. Essas reduções podem ser obtidas pelo **aquecimento do combustível (SIMÕES FILHO, 1988)**.

Segundo Bazzo (1995) os queimadores que utilizam o óleo como combustível são classificados em função da forma como a nebulização é produzida. O processo no caso dos queimadores de pressão direta também é conhecido como de nebulização mecânica. O óleo combustível submetido a pressões, que variam de 500 a 3000 kPa, tem seu trabalho de nebulização realizado devido à energia cinética do líquido. Fluindo pelos bicos injetores ganha movimento de rotação e é lançado em gotas muito pequenas no interior da câmara de combustão.

2.13 Chama difusiva turbulenta

Segundo Carvalho Jr. e McQuay (2007), chamas de difusão turbulenta, tipo jato de gás, são muito utilizadas na indústria. Os combustíveis gasosos são sempre preferenciais aos combustíveis líquidos ou sólidos devido à necessidade de menor excesso de ar e da menor quantidade de poluentes atmosféricos formados durante a combustão.

Segundo Griffiths e Barnard (1995) se a velocidade no bocal é aumentada, a chama laminar aumenta sua altura quase que linearmente até que uma mistura turbulenta ocorra. Isso ocorre na ponta da chama e depois se desloca para baixo a medida que aumenta a velocidade. O comprimento da chama também diminui nessa região e o limite visível se espalha lateralmente. Pode existir um momento no qual tanto a altura da chama quanto a posição de transição irão permanecer no mesmo estágio, mesmo que se aumente a velocidade na altura do bocal.

2.14 Queimadores para fornalha flamotubular

Queimador é o aparelho que processa a queima do combustível numa dada fornalha. Sua principal função é fornecer uma mistura apropriada entre o ar e o combustível a fim de que a chama permaneça estável. Ele também deve determinar

a quantidade de combustível e ar em proporções que estejam dentro do limite para uma boa ignição.

Uma das funções essenciais do queimador é a de não permitir que haja retorno e nem descolamento de chama.

Queimadores, na sua essência, são dispositivos mecânicos que têm a capacidade de realizar a oxidação de combustíveis que possuam constituintes passíveis de serem oxidados (PAGLIUSO, 1984).

O combustível mais fácil de para ser queimado é o gasoso. De forma geral, os combustíveis líquidos ou sólidos, devem ser transformados em líquidos e posteriormente em gás. Por exemplo: no caso do sebo bovino que, à temperatura ambiente se encontra no estado sólido (pastoso), ele deve ser aquecido para transformá-lo em líquido e a seguir nebulizado no queimador.

O queimador usado para se queimar sebo bovino e outros combustíveis pastosos ou muito viscosos necessita de uma bomba para injetar o sebo aquecido (liquefeito) à pressões que giram em torno de 500 a 1200kPa, um sistema de injeção de ar para efetuar a combustão e um bico atomizador, para transformar o sebo líquido em pulverizado para queima na fornalha.

Para que tenhamos uma viscosidade adequada para a atomização no bico do queimador, é necessário um aumento de temperatura de modo a enquadrar a viscosidade adequada para a melhor queima.

Lin e Chen (2002) estudaram os efeitos da umidade relativa e da temperatura nas características das fornalhas industriais. Eles perceberam que a eficiência da queima aumenta com o aumento da temperatura e umidade do ar de admissão. Segundo os autores a temperatura e umidade adequadas poderiam aumentar a eficiência da queima de fornalhas industriais. Os efeitos da temperatura do ar são mais perceptíveis do que os efeitos da umidade relativa.

3 EXPERIMENTAL

3.1 Descrição geral do sistema experimental

Na Figura 3 é apresentado um esquema geral do sistema experimental. Gases quentes são produzidos por um queimador que opera com sebo e diesel e escoam pela parte interna da fornalha, em contato com as paredes das câmaras calorimétricas.

Água fria entra no do duto de distribuição das câmaras, onde tem sua temperatura medida pelo termopar “Te” de entrada e é em seguida distribuída para as 12 câmaras calorimétricas que compõem a fornalha. Uma vez aquecida pela troca de calor com os gases de combustão que escoam por dentro da fornalha, a água é conduzida para a saída das câmaras calorimétricas onde as temperaturas são medidas pelos termopares “Ts”, um para cada câmara. Em seguida é conduzida ao coletor de descarga.

A vazão de água é regulada pelas 12 válvulas de controle e medida por placas de orifício. Nas câmaras calorimétricas de 1 a 4 as placas têm orifícios com diâmetro de 12 mm, nas demais o diâmetro é 9.6mm. As placas foram calibradas com balança e cronômetro.

As sondas de temperatura e composição dos gases coletam dados em cada uma das câmaras através de um ponto de amostragem que atravessa a parede. Os dados são enviados para os analisadores que processam as informações e em seguida para um sistema de aquisições de dados composto por um computador equipado com placa de aquisição e programa LabView da National Instruments Corporation.

Os produtos gerados na combustão são descarregados na atmosfera através de uma chaminé.

Figura 3 - Representação esquemática do sistema experimental.

3.1.1 Queimador

O queimador utilizado neste trabalho e descrito abaixo foi desenvolvido por Córdoba e Pagliuso, em 2010 (Figura 4).

Figura 4 - Esquema funcional do queimador desenvolvido no NETeF

O queimador é constituído por um Venturi, um tubo de aço e um bico injetor utilizado para nebulizar o combustível. O aparato requer um sistema de ignição, uma entrada de ar e um sistema óptico de segurança contra falha de chama. O queimador parte inicialmente com uma chama piloto alimentada por gás liquefeito de petróleo.

O ar primário que alimenta o queimador é produzido em uma instalação de ar comprimido das utilidades do NETeF e transportado por tubulação até sua aplicação. A descarga de ar de combustão é medida com placa de orifício com orifício de 14 mm, instalada em tubo com 16 mm de diâmetro. O escoamento de ar é forçado por meio de um compressor e sua vazão é regulada usando uma válvula tipo agulha .

O combustível sebo bovino, por ser sólido (pastoso) à temperatura ambiente, requer um pré-aquecimento em torno de 50 a 60 °C e é introduzido para a queima através de uma bomba de engrenagens. A bomba tem uma pressão máxima contínua de 25000 kPa, porém trabalha com pressões em torno de 600 kPa e vazão de 0,0002 m³/s.

A vazão depende da rotação do motor que aciona a bomba. O motor tem 1,1 kW de potência e rotação de 1750 rpm, controlada por um inversor de frequência.

Foi projetado um sistema de controle para manter o combustível pré-aquecido na região da combustão, composto por uma resistência elétrica que libera potência de 1kW sob tensão de 127 V.

O queimador foi construído na oficina do NETeF, sob orientação de Pagliuso, em 2010.

3.1.2 Fornalha calorimétrica

Na Figura 5 é mostrada a fornalha calorimétrica composta por 12 câmaras. Cada câmara contém uma área para troca de calor, formada por tubos concêntricos, o externo com diâmetro de 0,415 m e o interno com 0,305 m, formando uma câmara de água com espessura de 0,055 m entre os eles. Cada câmara possui uma placa de orifício para a medição da vazão de água que circula por ela. As placas de orifício foram calculadas segundo a American Society of Mechanical Engineers – ASME (1959) e calibradas no NETeF utilizando sistema gravimétrico. A fornalha foi construída em aço inoxidável AISI 304.

Os doze setores são montados em linha e a fornalha possui um comprimento total de 4,0 m e está montada a 0,78 m do chão. Na parte frontal da fornalha, está montado o queimador misto para queima de sebo bovino e diesel.

A fornalha calorimétrica sofreu modificações para a realização dessa pesquisa que envolve o estudo comparativo da combustão de sebo e diesel.

Dentre as modificações destaca-se os coletores de admissão e descarga de água. O de admissão que era de aço galvanizado de 1” foi substituído por um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro. A razão é que o pequeno diâmetro da tubulação anterior dificultava a regulação individual das câmaras calorimétricas, que trabalham com escoamentos paralelos.

O mesmo fenômeno ocorria na parte superior, já com a água de saída aquecida, devido à transferência de calor. Com a troca da tubulação, também para um diâmetro de 100mm, porém de aço galvanizado, por conta das temperaturas mais elevadas o problema foi sanado e a interferência desapareceu. O aspecto da fornalha modificada pode ser observado na Figura 5.

O processo de fornecimento de água para o experimento é feito por bombas que enviam água para os calorímetros da fornalha via caixa d'água com tanque de armazenamento de 3m³. A água recebe calor e passa através de torres de resfriamento evaporativo, completando o sistema de resfriamento e fornecimento de água em circuito fechado.

Os recipientes que armazenam os combustíveis óleo diesel e sebo bovino são devidamente pré-aquecidos, assim como a linha que alimenta o queimador por uma distância de aproximadamente 1,5m que é também aquecida por resistência elétrica, evitando a solidificação do sebo.

Figura 5 - Fornalha calorimétrica e equipamentos auxiliares

3.1.3 Medidas de vazão

A instrumentação utilizada no experimento para medir a vazão nas câmaras calorimétricas, foi feita por meio de placas de orifício construídas segundo norma ASME. As placas de orifício são associadas à manômetros de tubo em U contendo água em seu interior e em posição vertical, num total de 12, correspondentes a cada câmara calorimétrica da fornalha. Na extremidade superior, os manômetros são interligados e recebem ar comprimido para estabelecer um nível adequado à leitura das diferenças de pressão.

3.1.4 Alimentação de combustível

Os combustíveis são armazenados em recipientes cilíndricos, calibrados e dotados de medidores de nível para avaliação do consumo. Os combustíveis são aquecidos por resistência elétrica acionada por controlador de temperatura. Após o aquecimento, eles são enviados para o queimador por meio de uma bomba de engrenagens e controlador eletrônico de rotação que regula a vazão de combustível.

3.1.5 Medidas de temperatura

A medida de temperaturas foi feita por meio de termopares tipo K (cromel-alumel), construídos no laboratório do NETeF. Foram utilizados quatorze termopares ao todo, cada um deles interligado com um cabo de compensação de até 12 metros. A cabeça de medida dos termopares foi feita através de solda sob gás inerte. A calibração foi feita com banho termostático, dentro de um sistema de aquecimento e resfriamento controlado por um circuito PID (*Proportional Interactive Derivative*) a fim de manter a temperatura uniforme e estável dentro de determinada faixa de temperatura.

Foram colocadas barras de alumina nos termopares das câmaras calorimétricas 2 a 5, a fim de fazer a medida mais próxima possível da chama. O valor medido é assim uma combinação de temperatura dos gases e radiação da chama.

No sistema de aquisição de temperaturas por termopar foi usado um computador equipado com uma placa de aquisição LABVIEW 7.1, 12 bit de 16 canais e um terminal de compensação T-21 ST LABVIEW 7.1 de 8 canais.

A temperatura de chama foi medida também através de um pirômetro manual, infravermelho Minolta/Land CYCLO OS 33 (Inglaterra).

3.1.6 Análise de gases

Os analisadores de gases empregados no experimento são descritos a seguir e na Tabela 4 é apresentado um resumo das unidades.

- Gases CO, CO₂ e SO₂ – Horiba Enda 1400 – modelo VIA – 510. Método: absorção de radiação seletiva no infravermelho.
- Hidrocarbonetos Totais HCT. Método: ionização de chama.
- Oxigênio – Horiba Enda 1400 – modelo MPA 510. Método: paramagnético.

Tabela 4 - Unidades analisadoras Horiba Enda

UNIDADES ANALISADORAS HORIBA ENDA 1400		
Modelo	Gases	Método
VIA – 510	CO, CO ₂ , SO ₂	Absorção de radiação no infravermelho
MPA – 510	O ₂	paramagnético
FIA - 510	HCT	Ionização de chama

Na calibração e operação dos analisadores são utilizados cilindros de gases especiais da Linde e White Martins sendo:

- mistura não inflamável sob pressão: dióxido de enxofre (SO₂) 500 ppm. micromol/mol e nitrogênio (balanço) liquefeito sob pressão;
- mistura não inflamável sob pressão: dióxido de carbono (CO₂) 8% volume, e nitrogênio (balanço);
- mistura gasosa sob pressão: oxigênio (O₂) 3,99 % volume e nitrogênio (balanço).
- Gás inerte não inflamável sob alta pressão: nitrogênio (N₂) 99,9% 4.6 (utilizado durante a operação do analisador de O₂).
- Hidrogênio, gás alta pressão, 4.5 FID (Detetor de ionização).
- Gás Metano (CH₄), 200 ppm para o HCT
- Gás Monóxido de Carbono (CO) 201 ppm.

Várias medidas preventivas devem ser tomadas. Uma delas é a acomodação dos cilindros que não estiverem sendo utilizados. Estes devem ser alocados em local próprio e somente deve ter seu capacete removido quando for utilizado.

As válvulas reguladoras dos referidos cilindros devem ser colocadas antes da calibração. Cada tipo de gás possui sua válvula equivalente e essas devem estar fechadas antes de serem alocadas no cilindro.

Na entrada dos gases a serem medidos existe um conjunto de filtros. As unidades de amostragem, responsáveis por filtrarem compostos de gases ácidos e por filtrar partículas presentes no gás, garantem um fluxo correto nos medidores. Esses filtros foram verificados e trocados, quando necessário, antes de cada experimento.

Para transportar os gases entre os pontos de coleta e os analisadores, foram utilizadas mangueiras de teflon. As mangueiras condensam água durante a medição, que deve ser removida a cada ensaio. Na Figura 6 podemos ver as unidades de amostragem e seus respectivos analisadores.

Figura 6 - Analisadores de gases Horiba – Laboratório NET

Antes de entrar no sistema de análise de gases, os produtos de combustão passam por um resfriador/condensador para a remoção da umidade e são bombeados para os analisadores por uma bomba de vácuo tipo ZA.32, 32/38 l/m, 0,20 kW, 50/60 Hz, 1483/1784 rpm, mantendo desta forma pressão positiva em quase toda a linha de amostragem, o que evita erros de leitura por diluição com ar.

Entre o condensador e a bomba é colocado o filtro AHLSTROM – grade 141 – 12,5 cm para verificação do material particulado.

Os gases são descarregados para a atmosfera pela chaminé, Figura 7, que tem base de alvenaria com dimensões 0,40 x 0,40m x 1,40 de altura. Essa base possui uma janela de inspeção para a verificação da chama. Acima da base está a chaminé de aço inoxidável com 0,20 de diâmetro interno e 4m de altura.

Figura 7 – Chaminé

Durante a queima a regulação do queimador e da relação ar/combustível foi feita observando-se a saída.

Reduz-se a entrada de ar até que apareça fumaça na chaminé. Em seguida, abre-se a admissão de ar lentamente, desaparecendo aos poucos a fumaça preta. Quando a fumaça preta estiver quase extinta, está no ponto ideal.

3.1.7 Procedimento experimental (Metodologia para variar o fator de excesso de ar)

Na indústria, o excesso de ar é definido como uma quantidade de ar acima da quantidade estequiométrica e na maior parte das vezes este excesso é necessário para concluir as reações do processo real de combustão.

O queimador utilizado possui uma bomba responsável pela e injeção do combustível. Esta bomba possibilita uma variação na quantidade de combustível injetado na câmara de combustão por meio da variação da rotação.

Antes de iniciar a queima do combustível, é necessário realizar uma série de ajustes e tomar alguns cuidados com o queimador a fim de obter sucesso nas medições dos gases de combustão.

Operando o sistema de queima da fornalha calorimétrica, verificamos que é necessário estar com os ajustes otimizados:

- excesso de ar na queima;
- atomização .

Para que tenhamos uma análise fiel da combustão, é necessário utilizarmos alguns instrumentos como:

- analisador de gases;
- termopares;
- termômetro e
- medir o consumo de combustível.

O excesso de ar é detectado na análise dos produtos de combustão.

3.2 Propriedades do sebo

O sebo é um composto de origem animal e várias de suas propriedades de interesse para a combustão foram determinadas neste trabalho, entre elas poder calorífico, ponto de fulgor, viscosidade dinâmica, análise elementar e curva termogravimétrica, como indicado na Tabela 5 e seções a seguir.

Tabela 5 - Algumas propriedades do sebo bovino

Características	Sebo Bovino
Poder calorífico superior (kJ/kg)	39.985
Ponto de fulgor (°C)	258
Viscosidade dinâmica a 60°C (cP)	29,63

3.2.1 Análise elementar

Para finalidade de cálculo da temperatura de chama adiabática os resultados da análise elementar do sebo bovino obtidos neste trabalho estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise elementar do sebo bovino

C%	H%	N%	O%(por diferença)
76,98	12,27	0,31	10,44
76,51	11,01	0,34	12,14

Como a medida dos valores referentes ao nitrogênio foi muito baixa, esses valores não serão considerados.

Cálculo:

$$C = \frac{76,98}{12} = 6,415 \quad (6)$$

$$H = \frac{12,27}{1} = 12,27 \quad (7)$$

$$O = \frac{10,44}{16} = 0,652 \quad (8)$$

Dividindo todos os elementos pelo menor valor temos:

$$C = \frac{6,415}{0,652} = 9,8314 \quad (9)$$

$$H = \frac{12,27}{0,652} = 18,8045 \quad (10)$$

$$O = \frac{0,652}{0,652} = 1 \quad (11)$$

Multiplicando tudo por dois a fórmula química obtida para o Sebo Bovino será:

3.2.2 Poder calorífico

Foram realizados dois ensaios no calorímetro IKA modelo C2000 do NETeF, cujo princípio é o de bomba calorimétrica, na qual a combustão é iniciada por meio de ignição elétrica. Após a ignição iniciada, a energia liberada como forma de calor se difunde pelas paredes da bomba até a água. O calor liberado é proporcional à variação de temperatura do sistema inteiro.

O poder calorífico do Sebo bovino se comparado com outro combustível tem valor pouco menor que o do óleo diesel que, segundo Vlassov (2001), é de 42,4 MJ/kg. O valor médio para o sebo foi 39,9 MJ/kg (Tabela 7).

Tabela 7 – Poder calorífico superior do sebo bovino

Análises	Valor obtido
1	40,1 MJ/kg
2	39,8 MJ/kg
Média	39,9 MJ/kg

À temperatura ambiente, o sebo encontra-se em estado sólido, necessitando de aquecimento prévio para ser queimado. Usualmente, a temperaturas superiores a 50°C o sebo bovino se comporta como um fluido em fase líquida.

3.2.3 Viscosidade

Com a finalidade de se obter maior segurança na comparação dos resultados obtidos com a literatura existente julgou-se importante o conhecimento das características físico químicas do sebo bovino. Assim procedeu-se à análises dessas características com destaque para a viscosidade.

A análise da viscosidade foi realizada com o aparelho Brookfield Digital Rheometer, modelo DV-III, com geometria de cilindros concêntricos. Foi usado o cilindro SC4-18 que fornece taxa de cisalhamento de 1.32N sobre amostra com volume de 8.0 ml. O equipamento pertence ao NETeF – USP São Carlos.

As medidas realizadas no viscosímetro foram efetuadas para cinco valores de temperatura, respectivamente: 40°C, 45°C, 50°C, 55°C e 60°C, controladas no banho termostático TE-2000, Tecnial, acoplado ao Rheometer, e apresentadas segundo o gráfico da Viscosidade Dinâmica Média em [cP] versus temperatura, que aparece na Figura 8.

Segundo Goodrum, Geller e Adams³ (2002 *apud* ADAMS, 2002), o sebo bovino mostrou propriedades reológicas muito semelhantes ao óleo combustível Nº 2. A viscosidade do sebo bovino na faixa de temperaturas é newtoniana.

A seguir (Tabela 8) temos os cinco pontos correspondentes para criação do gráfico viscosidade versus temperatura.

Tabela 8 - Viscosidade versus temperatura

	Viscosidade Dinâmica [cP] Y	Temperatura [Graus Celsius] X
1	43,912	39,911
2	36,443	44,752
3	29,988	49,978
4	24,917	55,105
5	21,041	59,928

³GOODRUM, J.W.; GELLER, D.P.; ADAMS, T.T. (2002). **The Rheological characterization of animal fats and their mixtures with #2 fuel oil**. Georgia: University of Georgia. Unpublishing results.

Figura 8 - Viscosidade dinâmica versus temperatura do sebo bovino

A viscosidade dos líquidos geralmente diminui com o aumento da temperatura e tal dependência é normalmente descrita pelo modelo da equação de Arrhenius (Eq. 2) (QUINTAS et al., 2006).

$$\eta = A \exp \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (14)$$

3.2.4 Ponto de fulgor

Foi feito ensaio do Ponto de fulgor no SST – Departamento de Transporte da USP. O ensaio foi realizado segundo a Norma Rodoviária DNER-ME 148/94, que é uma norma técnica que define o procedimento a ser utilizado para determinação dos pontos de fulgor e de combustão de produtos de petróleo e estabelece valores quanto à repetibilidade e reprodutibilidade. A norma não se aplica aos óleos combustíveis e produtos de petróleo que tenham ponto de fulgor em vaso aberto inferior à 79 °C.

O ensaio foi realizado em vaso aberto de Cleveland (Figura 9) e encontrado o valor médio de 258,6 °C.

Figura 9 - Vaso aberto de Cleveland

3.2.5 Curva termogravimétrica

A curva termogravimétrica e termogravimetria derivada, TG/DTG, do sebo bovino (Figura 10) foram obtidas a partir de testes feitos em analisador termogravimétrico TGA – 51 SHIMADZU, usando um cadinho de alumínio com taxas de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ e uma amostra com massa de 22,3 mg em uma faixa de temperatura de 25 a 600°C no laboratório do NETeF.

Uma análise das curvas mostra para o sebo um estágio de decomposição em $193,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ com uma perda de massa de 59,2%. Um segundo evento com se inicia em 372°C e mostra perda de massa de 32,4%. A última etapa de decomposição observada foi em $478\text{ }^{\circ}\text{C}$ apresentou uma perda de massa 9,6%, possivelmente referente à carbonização da gordura. A partir de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ não foi mais observada qualquer perda de massa.

Resultado semelhante foi descrito por Moura et al. (2006). Nesta temperatura pode-se notar que a amostra não apresentou cinzas, ou seja, após a decomposição térmica do sebo a curva TG indicou o valor zero para a massa final.

Figura 10 - Curva TG/DTG do sebo bovino em atmosfera de nitrogênio

3.3 Metodologias de cálculo

A metodologia do cálculo para obtermos a temperatura de chama adiabática foi a mesma utilizada por Shapiro e Moran (2002).

Utilizamos a composição dos ácidos graxos do sebo bovino e os correspondentes % em massa para cada ácido conforme Tabela 9, e as entalpias conforme Tabela 10.

Fazendo as transformações necessárias obtemos a equação 13 em kJ/kmol

$$[-671015] - \left[19,6 \left(\overbrace{-393520}^{CO_2} \right) + 18,8 \left(\overbrace{-241820}^{H_2O} \right) \right] = 11.588.193 \text{ kJ / kmol (combustível)} \quad (15)$$

Sabendo que a soma das entalpias dos produtos é igual à 11.588.193 kJ/kmol, o valor real da temperatura é encontrado no intervalo entre 2300K e 2500K.

Os valores da entalpia h para os gases foram obtidos da Tabela A.23 de Shapiro e Moran (2002) correspondente para CO_2 , H_2O e N_2 .

Após a interpolação do valor da entalpia de formação calculada na equação 13 realizada na Tabela 12 obtem-se o valor da temperatura de chama adiabática:

$$T_{ad} = 2146,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.3.1 Temperatura de chama adiabática

A composição do sebo segundo Bellaver e Zanotto (2004) em função dos principais ácidos graxos, é mostrados em percentual em massa na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição dos ácidos graxos do sebo bovino

Nome	Formula ^a	% Massa
Ácido Mirístico	C ₁₄ :O	3,9
Ácido Palmítico	C ₁₆ :O	29,9
Ácido Estearico	C ₁₈ :O	19,7
Ácido Oleico	C ₁₈ :1,Δ9	44,8
Ácido Linoleico	C ₁₈ :2,Δ9,12	1,7

Fonte – Adaptado de Bellaver e Zanotto (2004)

De acordo com Glaude et al. (2010), na Tabela 10, segundo as propriedades Termodinâmicas temos as entalpias de formação, $\Delta_f H_{298\text{ K}}^0$, para os seguintes ácidos:

Tabela 10 - Propriedades Termodinâmicas do gás

Espécie	$\Delta_f H_{298\text{ K}}^0$	$S_{298\text{ K}}^0$	$C_P^0(T)$						
			300 K	400 K	500 K	600 K	800 K	1000 K	1500 K
C ₁₄ :O	-157,81	192,42	87,49	109,90	129,63	146,74	173,56	191,28	201,94
C ₁₆ :O	-167,70	211,13	98,44	123,81	146,10	165,43	195,74	215,94	230,42
C ₁₈ :O	-177,60	229,85	109,37	137,73	162,59	184,12	217,90	240,60	258,92
C ₁₈ :1	-149,48	226,47	104,94	132,69	157,02	178,07	210,95	232,85	249,88
C ₁₈ :2	-120,84	224,25	101,97	128,98	152,66	173,14	205,10	226,31	241,97
C ₁₈ :3	-92,20	222,02	99,0	125,28	148,30	168,20	199,25	219,78	234,02
C ₂₀ :O	-187,49	248,56	120,34	151,59	179,04	202,82	240,10	265,22	287,41
C ₂₀ :1	-159,38	245,18	115,87	146,60	173,50	196,75	233,12	257,52	278,38
C ₂₂ :O	-197,38	267,27	131,27	165,52	195,53	221,50	262,26	289,90	315,91
C ₂₂ :1	-169,27	263,90	126,82	160,51	189,98	215,44	255,29	282,17	306,87

$\Delta_f H_{298\text{ K}}^0$ é expresso em kcal mol⁻¹ e $S_{298\text{ K}}^0$ e $C_P^0(T)$ são dados em cal mol⁻¹ K⁻¹

Fonte – Adaptado de Glaude et al. (2010)

Tomando as porcentagens do sebo na Tabela 9 e aplicando o correspondente ao calor de formação ($\Delta_f H_{298 K}^0$) da Tabela 10, gera-se Tabela 11.

Tabela 11 - Tabela das entalpias de formação

Nome	Formula	Tabela 5 $\Delta_f H_{298 K}^0$	Tabela 6 Sebo massa% Ponderação	Tabela 7 $\Delta_f H_{298 K}^0$
		Original		Parcial
Ácido Mirístico	C ₁₄ :O	-157,81	3,9	-6,1546
Ácido Palmítico	C ₁₆ :O	-167,70	29,9	-50,1423
Ácido Esteárico	C ₁₈ :O	-177,60	19,7	-34,9872
Ácido Oleico	C ₁₈ :1	-149,48	44,8	-66,9670
Ácido Linoleico	C ₁₈ :2	-120,84	1,7	-2,0543
			100 %	$\sum \cong -160,30$

$\Delta_f H_{298 K}^0$ é expresso em kcal/mol

Transformando para kJ/kmol, 1kcal = 4,186 [kJ kg⁻¹⁰C⁻¹], temos o $\Delta_f H_{298 K}^0$ do sebo será igual a= -671.015 kcal/kmol

$$[-671015] - \left[19,6 \left(\overbrace{-393520}^{CO_2} \right) + 18,8 \left(\overbrace{-241820}^{H_2O} \right) \right] = 11.588.193 kJ / kmol (combustível) \quad (17)$$

A Tabela 12 mostra o procedimento iterativo para três estimativas da temperatura.

Sabendo que a soma das entalpias dos produtos é igual à 11.588.193kJ/kmol, o valor real da temperatura é encontrado no intervalo entre 2300 e 2500K.

Os valores da entalpia h para os gases foram obtidos da Tabela A.23 do Shapiro e Moran (2002), obtendo-se os valores:

Para o CO₂ a 2300 K o h = 119035 e a 298 K h = 90364.

Para o CO₂ a 2500 K o h = 131290 e a 2550 K h = 134368.

Para o H₂O a 2300 K o h = 98199 e a 298 K h = 9904.

Para o H₂O a 2500 K o h = 108868 e a 2550 K h = 111565.

Para o N₂ a 2300 K o h = 75676 e a 298 K h = 8669.

Para o N₂ a 2500 K o h = 82981 e a 2550 K h = 84814.

Tabela 12 - Tabela interativa de temperatura

	2300K	2500K	2550K
19,6 $\left(\Delta \bar{h} \right)_{CO_2}$	2.149.552	2.389.750	2.450.078
18,8 $\left(\Delta \bar{h} \right)_{H_2O}$	1.659.946	1.860.523	1.911.227
105,28 $\left(\Delta \bar{h} \right)_{N_2}$	7.054.497	7.823.567	8.016.546
Σ	10.863.995	12.073.840	12.377.851

Após a interpolação do valor da entalpia de formação calculada na equação 17, realizada na Tabela 12 obtém-se o valor da temperatura de chama adiabática:

$$T_{ad} = 2.419,7K = 2.146,6^\circ C$$

3.3.2 Tempo de residência dos gases

O tempo de residência pode ser calculado pelo quociente do Volume da fornalha, **Vol**, dividido pela Vazão dos gases, **Q_{gás}**.

O Volume da fornalha, **Vol**, é obtido diretamente das dimensões da fornalha:

$$\phi = 305 \text{ mm} = 0,305\text{m} \therefore \phi_{int} = 0,305\text{m}$$

$$L = \text{Comprimento } 4,0 \text{ m}$$

$$Vol = A \times L$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L = 3,14 \times 0,305 \times 0,328 = 0,314 \text{ m}^2 \quad (18)$$

O cálculo da vazão **Q_{gás}** é obtido a partir do consumo de combustível que, aliado ao consumo de ar, fornece, após a queima, a descarga média dos gases provenientes da combustão. Para obter a vazão basta dividir descarga média dos gases de combustão pela massa específica média dos gases de combustão, $\rho_{gás}$.

A massa específica média dos gases de combustão pode ser obtida com aproximação muito boa pela equação dos gases perfeitos, já que os gases estão a temperatura e pressão distantes do ponto de evaporação. No uso da equação dos gases perfeitos necessita-se da massa molecular dos gases de combustão que pode

ser estimada pela média ponderada das massas moleculares de cada gás presente, usando os coeficientes obtidos da equação da combustão, como apresentado na equação (19) do sebo bovino.

3.3.3 Equação da combustão para o sebo

A Tabela 13 apresenta os cálculos para obtenção da massa molecular dos gases de combustão do sebo bovino:

Tabela 13 - Cálculo para obtenção da massa molecular dos gases de combustão do sebo bovino

Componentes	Coeficientes	Concentração Gases (%)	Massa Molecular	Produto
CO ₂	19,0	11,70	44	836
H ₂ O	18,0	11,09	18	324
O ₂	4,2	2,56	32	134
N ₂	121	74,65	28	3389
$\Sigma =$	162	100		4684

3.3.4 Equação de combustão para o diesel

O diesel é uma mistura complexa de hidrocarbonetos extraído do petróleo que tem a fórmula química geral C₁₃ H₂₈ e suas propriedades de interesse para este trabalho estão indicadas na Tabela 14.

É apresentada na equação 20 a fórmula estequiométrica para a combustão do diesel.

Tabela 14 - Propriedades do diesel

Propriedade	Valor	Unidade
Poder calorífico Superior	45,7	MJ/kg
Viscosidade cinemática (mm ² /s)	5,0 (15,6°C)	°C
Ponto de fulgor	70	°C
Densidade (g/cm ³)	0,840 (15,6 °C)	°C
Enxofre % em massa	0,83	%

Fonte: Adaptado de Jessen (1977) e Pera (1990)

Na Tabela 15 encontra-se um resumo dos cálculos para obter a massa molecular dos gases de combustão para o diesel.

Tabela 15 - Cálculo da média ponderada das massas moleculares dos gases de combustão do diesel

Componentes	Coefficientes	Concentração dos Gases (%)	Massa Molecular	Produto
CO ₂	13	9,49	44	572
H ₂ O	14	10,22	18	252
O ₂	16	11,68	32	512
N ₂	94	68,61	28	2632
$\Sigma =$	137	100		3968

$$Massa\ Molecular\ dos\ gases = \bar{M} = \frac{\Sigma(Coefficientes \times Massa\ Molecular)}{\Sigma Coefficients} = \frac{468436}{16227} = 28,87g \quad (21)$$

Massa Molecular dos gases, $\bar{M} = 28,87g$.

$$PV = nRT \quad (22)$$

$$n = \text{número de moles} = \frac{m}{\bar{M}} = \frac{\text{massa}}{\text{Massa molecular}} \quad (23)$$

como a massa específica é dada por $\rho = \frac{m}{V}$, a equação dos gases pode ser escrita como:

$$P \left(\frac{V}{m} \right) = \frac{RT}{\bar{M}} \quad (24)$$

ou:

$$\rho = \frac{\bar{M} \cdot P}{R \cdot T} \quad (25)$$

Transformando a pressão atmosférica para Pa (pascal)

$$P = \frac{694,2}{1000} \times 13600 \times 9,81 = 92617,39 \text{ Pa} \quad (26)$$

Aplicando as equações 15, 16 e 17 para cada câmara da fornalha obtemos os resultados apresentados nas Tabelas (20-21), que se encontram no capítulo 4.2, resultados e discussões, na página 67, resultante das corridas D1, D2, D3, S1, S2, S3.

3.3.5 Coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor entre a temperatura média dos gases T_G e a temperatura média da água T_M separados por uma parede cilíndrica sólida é definida segundo Kreith e Bohn (2003) por

$$q = U \ A \ (T_G - T_M) \quad (27)$$

Onde:

U = coeficiente global de transferência de calor, $\text{W/m}^2\text{°C}$

A = área da superfície de transferência de calor da câmara, m^2

T_G = temperatura média dos gases, °C

T_M = temperatura média da água, °C

Exemplo, extraído do Teste D₂ feito neste trabalho.

$$T_{\text{MH}_2\text{O}} = 36,34$$

$$T_{\text{MG}} = 269,18$$

$$A = \pi \ D \times L = 3,14 \times 0,305 \times 0,328 = 0,314 \text{ m}^2 \quad (28)$$

Transferência de calor para a água

$$q = \dot{m} c_p \Delta t \quad (29)$$

$$C_p = 4,184 \text{ kJ/kg °C}$$

$$q = 0,0999 \times 4,184 \times (37,89 - 32,84) = 2,11 \text{ kW}$$

$$q = U \ A \ \Delta T \quad (30)$$

$$U = \frac{q}{A(T_G - T_M)} = \frac{2,11 \text{ kW}}{0,314(257,03 - 35,36)} = 0,3032 \times 1000 = 30,32 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \therefore \quad (31)$$

$$U = 30,32 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ver a Tabela 19 referente aos coeficientes globais de transferência de calor na página 62, com os dados dos ensaios D1, D2, D3, S1, S2, S3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

Os ensaios para o diesel e o sebo foram feitos em sequência, aproveitando o diesel como partida para a introdução do sebo com a fornalha quente. É importante frisar que foi feita uma limpeza minuciosa para eliminar resíduos tais como água e óleo para evitar contaminar o teste seguinte. Foram realizados três testes completos com o diesel e com o sebo bovino, denominados respectivamente D1, D2, D3 e S1, S2, S3.

O experimento foi realizado em 3 dias diferentes sendo que, em cada dia foi queimado o óleo diesel durante 30 minutos e logo a seguir o sebo bovino durante outros 30 minutos. O diesel é queimado primeiro pois, serve também para aquecer o sistema, as tubulações que transportam o combustível dos recipientes até a entrada do queimador, para a queima do sebo que precisa estar em temperatura adequada para o escoamento.

Cada teste foi feito com a pressão de injeção controlada para ser mantida em valores predeterminados. Com isso a temperatura na câmara calorimétrica T_2 , setor próximo ao queimador, se mantém constante.

As medidas efetuadas nas seis corridas são apresentadas na Tabela 16.

4.2 Propriedades do sebo bovino

Uma série de propriedades do sebo, de interesse para processos de combustão foi levantada neste trabalho. A Tabela 16 mostra os resultados. Nota-se um poder calorífico elevado, de 40MJ/kg, com viscosidade relativamente alta de 29,6 cp a 60°C. O ponto de fulgor de 258°C indica segurança no manuseio. A densidade é 0,95 g/cm³.

Tabela 16 - Propriedades do sebo

Propriedade	Valor	Unidade
Poder calorífico Superior	39,98	MJ/kg
Viscosidade dinâmica (cp)	29,63 (60°C)	°C
Ponto de fulgor	258	°C
Temperatura de chama adiabática	2.146,6	°C
Densidade (g/cm ³)	0,95 (50 °C)	°C

4.3 Parâmetros gerais dos testes

Na Tabela 17 Podemos observar que o consumo de combustível foi diferente de teste para teste, com valores variando de 2,75 a 4,5 kg/h, o mesmo ocorrendo com assim como a descarga de ar. O coeficiente de ar teórico λ , que é a razão entre o ar utilizado e o ar estequiométrico, também foi variado entre os testes embora de forma pouco significativa.

Os valores das concentrações de CO encontram-se dentro dos limites de emissões, segundo a resolução SMA N^o 79 aqui utilizada como o parâmetro mais restritivo de comparação, assim como os valores dos HCT, salvo os ensaios D1 e S3 que mostram resultados um pouco acima. As concentrações de CO₂ e O₂ estão de acordo com o processo. Os demais parâmetros dos testes são apresentados no Apêndice A.

Tabela 17 - Medidas feitas na fornalha usando diesel e sebo, corridas D1, D2, D3, S1, S2 e S3

Parâmetro	D1	D2	D3	S1	S2	S3
Consumo de combustível (kg/h)	3,13	2,75	3,012	4,5	3,6	3,87
Descarga de ar (kg/h)	53	48	52	72	57	61
Razão estequiométrica ar/combustível	15/1	15/1	15/1	14/1	14/1	14/1
Razão utilizada ar/combustível	16,9/1	17,45/1	17,26/1	16/1	15,83/1	15,76/1
Coeficiente de ar teórico (λ)	1,127	1,163	1,150	1,143	1,130	1,126
Potência térmica (kW)	36,86	32,38	35,47	49,98	39,98	42,98
Temperatura da chama na fornalha ($^{\circ}$ C)	1267	1126	1150	1143	1096	1155
O ₂ (%)	4,60	5,73	4,73	4,38	4,45	4,25
CO ₂ (%)	9,42	9,82	9,82	9,72	10,21	10,20
CO (ppm)	45	70	62	28	68	100
HCT (ppm)	200	14	4,4	12,9	9,7	103
Material particulado (mg)	14,0	-	1,0	1,0	-	4,0

Para outros valores ver Apêndice A

4.4 Temperaturas

4.4.1 Perfis de temperatura

A temperatura média dos gases nos 12 módulos ao longo da fornalha decresce de maneira semelhante em todos os experimentos, como mostram as Figuras 11 a 16.

A curva não linear, com decréscimo acentuado da temperatura dos gases no início da fornalha e menos acentuado próximo à saída mostra que a transferência de calor por radiação vai se tornando menos significativa à medida que os gases percorrem a fornalha. Nos módulos próximos à saída (a partir do sexto módulo), onde a convecção prevalece o decréscimo torna-se linear.

Alguns testes mostram um ligeiro acréscimo na temperatura dos gases da Câmara 1 para a Câmara 2, o que indica que a reação química continua a ocorrer e entrega energia aos gases a uma taxa maior do que a água remove.

Figura 11 - Representando as temperaturas da fornalha para a queima de sebo referente ao teste D1, coeficiente do ar teórico $\lambda = 1,127$

Figura 12 - Representando as temperaturas da fornalha para a queima de sebo referente ao teste D2, coeficiente do ar teórico $\lambda = 1,163$

Figura 13 - Representando as temperaturas da fornalha para a queima de diesel referente ao teste D3, coeficiente do ar teórico $\lambda = 1,150$

Figura 14 - Representando as temperaturas da fornalha para a queima de sebo referente ao teste S1, coeficiente do ar teórico $\lambda = 1,143$

Figura 15 - Representando as temperaturas da fornalha para a queima de sebo referente ao teste S2, coeficiente do ar teórico $\lambda = 1,130$

Figura 16 – Temperaturas médias ao longo da fornalha para durante a queima de sebo, teste S3, coeficiente do ar teórico $\lambda = 1,126$

4.4.2 Temperatura de chama

4.4.2.1 Medida

Podemos observar na Tabela 18, que as temperaturas da chama do diesel apresentaram valores semelhantes às do sebo. Apesar dos ensaios D1 e S1 mostrarem valor mais alto para o diesel, os ensaios D3 e S3 mostraram o inverso, isto é valores mais altos para o sebo.

Tabela 18 – Comparação da temperatura da chama medida nos ensaios com diesel e com sebo

Diesel		Sebo	
Ensaio	Temperatura (°C)	Ensaio	Temperatura (°C)
D1	1267	S1	1143
D2	1126	S2	1096
D3	1150	S3	1155

4.4.2.2 Temperatura calculada da chama adiabática

Após a interpolação do valor da entalpia de formação obtida na equação 15, usando os dados apresentados na Tabela 12 obtém-se o valor da temperatura de chama adiabática para o sebo com o valor de:

$$T_{ad} = 2.419,7 \text{ K} = 2.146,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4.5 Transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor entre a temperatura média dos gases T_G e a temperatura média da água T_M separados por uma parede cilíndrica sólida é definido por:

$$q = U \cdot A \cdot (T_G - T_M) \quad (32)$$

Onde:

U = coeficiente global de transferência de calor, $\text{W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

A = área da superfície de transferência de calor da câmara, m^2

T_G = temperatura média dos gases, $^{\circ}\text{C}$

T_M = temperatura média da água, °C

Os resultados de cada módulo da fornalha são mostrados na Tabela 19. Pode-se observar na tabela que o coeficiente global de transferência de calor é maior nas quatro primeiras câmaras, possivelmente pelo efeito combinado de radiação e convecção, uma vez que a radiação que não é computada separadamente.

A temperatura dos gases foi medida por termopares diretamente expostos aos mesmos, e assim algum erro deve estar presente. Considerou-se que a construção e inserção de um pirômetro de sucção é complexa e pode levar a erros maiores do que aqueles que o pirômetro evita, dependendo da condição de trabalho.

Um escudo de radiação poderia ser usado para evitar o efeito deste modo de transferência de calor sobre o termopar, porém isto dependeria de geometria construtiva complexa. Ademais, refletividade elevada é vital para este tipo de dispositivo e esta rapidamente se perde, por oxidação e deposição de fuligem sobre o metal do escudo.

Tabela 19 – Coeficiente global de transferência de calor por câmara

Câmaras	D1	S1	D2	S2	D3	S3
	(W/m ² °C)	(W/m ² °C)	(W/m ² °C)	(W/m ² °C)	(W/m ² °C)	(W/m ² °C)
1	79,7	78,9	58,5	79,5	57,12	61,2
2	56,0	46,8	30,5	45,6	26,67	53,1
3	69,4	60,0	44,3	55,1	29,10	38,8
4	81,9	77,2	47,7	78,7	33,90	39,5
5	32,8	33,3	23,0	37,3	15,32	20,4
6	40,1	40,8	23,5	44,6	14,34	26,7
7	39,4	35,3	24,7	35,0	27,55	22,0
8	44,4	33,8	17,2	32,4	9,77	18,5
9	47,1	48,9	28,7	41,3	25,52	22,5
10	60,6	62,6	48,3	57,0	15,81	31,4
11	27,5	28,9	26,7	30,3	27,89	14,4
12	32,2	39,4	28,9	32,9	10,08	17,4
Médias	60,1	55,0	38,6	54,0	32,18	41,7

4.6 Emissões

Nesta seção serão apresentados os resultados de emissões consideradas poluentes.

4.6.1 Concentração de CO₂ e O₂ nos produtos de combustão

As Figuras 17 a 22 mostram as concentrações de CO₂ e O₂ na descarga de produtos de combustão ao longo do tempo para os testes com óleo diesel (D1, D2, D3) e sebo bovino (S1, S2, S3).

De modo geral as curvas mostram um processo estável, com pouca oscilação nas concentrações com o passar do tempo, exceto no teste S1 (Figura 20) onde estas oscilações foram um pouco maiores. A simetria, ou “espelhamento” das curvas, onde um aumento no O₂ corresponde a uma diminuição no CO₂ e vice versa, indica bom funcionamento da análise de gases, uma vez que a linha de amostragem, assim como os analisadores, foram mantidos com pressão positiva, para evitar a infiltração de ar e os erros a ela associado.

Para o diesel, a faixa de concentrações médias variou entre 9,42% e 9,82 % e a de O₂ entre 4,60 % e 4,73 %. Para o sebo, a variação do CO₂ foi de 9,72 % a 10,21% e a de O₂ entre 4,38 % e 4,45. Considera-se que são valores compatíveis com as propriedades dos combustíveis e demais condições dos ensaios realizados. A Tabela 20 mostra os resultados.

Figura 17 - Concentrações de CO₂ e O₂ % gerados na combustão do Diesel durante o teste D1

Figura 18 - Concentrações de CO₂ e O₂ % gerados na combustão do Diesel durante o teste D2

Figura 19 - Concentrações de CO₂ e O₂ % gerados na combustão do Diesel durante o teste D3

Figura 20 - Concentrações de CO₂ e O₂ % gerados na combustão do Sebo durante o teste S1

Figura 21 - Concentrações de CO₂ e O₂ % gerados na combustão do Sebo durante o teste S2

Figura 22 - Concentrações de CO₂ e O₂ % gerados na combustão do Sebo durante o teste S3

4.6.2 Concentrações médias de CO₂ e O₂

A Tabela 20 mostra os valores médios das concentrações de CO₂ e O₂ para os testes com diesel (D1 a D3) e sebo (S1 a S3).

Tabela 20 - Concentrações médias de CO₂ e O₂ nos testes com sebo e diesel

Teste N	C O ₂ (%vol)	Teste N	C O ₂ (%vol)	Teste N	O ₂ (%vol)	Teste N	O ₂ (%vol)
D1	9,42	S1	9,72	D1	4,60	S1	4,38
D2	9,82	S2	10,21	D2	5,73	S2	4,45
D3	9,82	S3	10,20	D3	4,73	S3	4,25

4.6.3 Verificação das medidas de CO₂ e O₂

Para finalidade de avaliação da qualidade do processo de amostragem e análise de gases, efetuou-se uma comparação entre os valores experimentais e aqueles que seriam esperados a partir da composição elementar do combustível e do teor de O₂ medido nos gases durante os testes. A Tabela 21 mostra os resultados.

Tabela 21 - Comparação das concentrações de CO₂ e O₂ nos gases de combustão

	Experimental			Esperado			Diferença (%)
	λ (adim)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	λ (adim)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	
D1	1,127	9,42	4,60	1,260	11,51	4,60	18,1
D2	1,163	9,82	5,73	1,347	10,72	5,73	8,4
D3	1,150	9,82	4,73	1,269	11,42	4,73	14,0
S1	1,143	9,72	4,38	1,247	12,47	4,38	22,0
S2	1,130	10,21	4,45	1,252	12,42	4,45	17,8
S3	1,126	10,20	4,25	1,238	12,57	4,25	18,8

Desvios de até 22% foram encontrados, o que pode ser atribuído a várias causas, entre elas imprecisões na análise elementar dos combustíveis e desvio na calibração do analisador de O₂.

4.6.4 Emissões de CO e HCT

As emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos totais (HCT) em função do tempo de teste, são mostradas nas Figuras 23 a 28, para os seis testes realizados.

Exceto no teste S3 com sebo (Figura 28) e de maneira menos acentuada no teste S1 com o mesmo combustível, os valores são estáveis ao longo dos testes e mostram bom funcionamento do queimador.

As oscilações apresentadas por um dos parâmetros tendem a ser reproduzidas pelo outro. Como ambos têm origens comuns, isto é, são afetados por excesso de ar, qualidade da mistura ar/combustível, tempo de residência e temperatura dos gases, isto indica bom funcionamento do sistema de análise de gases.

De modo geral, as concentrações de CO e HCT foram bastante baixas, tipicamente abaixo de 100 ppm para CO e abaixo de 20 ppm para HCT, indicando que o sebo atenderia à normas ambientais de tratamento térmico de resíduos, se necessário (resolução Conama 316).

Note que as curvas de SO₂ não foram incluídas nos gráficos porque suas medidas ficaram abaixo da sensibilidade dos analisadores.

Figura 23 - Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Diesel durante o teste D1

Figura 24 - Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do Diesel durante o teste D2

Figura 25 - Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do diesel durante o teste D3

Figura 26 - Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do sebo bovino durante o teste S1

Figura 27 - Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do sebo bovino durante o teste S2

Figura 28 - Concentrações de CO e HCT gerados na combustão do sebo bovino durante o teste S3

Para efeito de comparação, Pagliuso⁴ (2006) realizou testes em uma caldeira a óleo de tecnologia recente e sem qualquer alteração na regulação do sistema de combustão, usando o combustível original (óleo de xisto), e sebo bovino.

Tabela 22- Taxas de emissão na combustão de óleo de xisto e sebo

Parâmetro	Taxas de emissão (g/h)		Redução (%)
	Sebo	Óleo de xisto	
MP	19	84	78.0
NOx	2691	2889	6.9
SOx	0	2859	100.0
HCT	5	21	77.5
CO	170	866	80.4

Fonte: Pagliuso⁴ (2006)

Os resultados são mostrados na Tabela 22, onde nota-se grande diferença no valor dos parâmetros medidos com óleo de xisto e sebo bovino, com redução acentuada nas emissões de material particulado, óxidos de enxofre e monóxido de carbono. Neste trabalho a comparação foi feita com diesel, que como dito no início deste trabalho, não é o competidor natural do sebo no uso como combustível, mas sim um padrão alto escolhido para comparação. Assim os resultados são praticamente os mesmo com os dois combustíveis.

⁴ Informação fornecida por Prof.Dr. Josmar Dalvison Pagliuso, em nov. 2006, retirada de relatório apresentado pelo mesmo.

4.6.5 Fatores de emissão de CO e HCT

A Tabela 23 traz os fatores de emissão de CO e HCT para o sebo e o diesel. Podemos observar que os fatores de emissão são praticamente os mesmos para os dois combustíveis, exceto aqueles obtidos no teste S3, onde definitivamente houve anomalia de funcionamento do sistema de combustão como evidenciado pela Figura 28.

Tabela 23 – Comparação dos fatores de emissão do CO e HCT

Teste N	CO (mg/MJ)	Teste N	CO (mg/MJ)	Teste N	HCT (mg/MJ)	Teste N	HCT (mg/MJ)
D1	9,2	S1	12,8	D1	4,4	S1	6,7
D2	29,5	S2	26,4	D2	5,8	S2	3,9
D3	25,3	S3	56,0	D3	1,3	S3	35,0

4.7 Material particulado

Para coleta de material particulado foram instalados filtros Ahlstrom Grade 141 - 12,5 cm na linha de análise de gases durante os testes D1, com óleo diesel e S1, com sebo bovino. As Figuras 29 e 30 mostram que há grande diferença de coloração entre os materiais coletados no teste com diesel e sebo. O diesel produz material particulado de coloração negra, possivelmente carbono não queimado e o sebo de coloração branca.

Figura 29– Filtro usado nos testes do óleo diesel

Figura 30 - Filtro usado nos testes do sebo

Para quantificar a massa de um e de outro, os filtros foram pesados, antes dos testes, em uma balança de precisão graduada em miligramas, com três casas decimais. Após os teste foram secos por 30 minutos em estufa com temperatura controlada e, logo após, esfriados por seis minutos e pesados novamente. O resultado é dado em miligramas após a diferença entre as duas pesagens e foi de 14 mg para o teste D1 com diesel e de 1mg para o teste S1 com sebo.

4.8 Tempos de residência dos gases na fornalha

O tempo de residência médio dos gases pode ser calculado pelo quociente do Volume da fornalha, **Vol**, dividido pela Vazão dos gases, **Q_{gás}**, conforme procedimento que pode ser visto na página 56. Os resultados são apresentados nas Tabelas 24 a 29 para cada módulo da fornalha calorimétrica e para ambos os combustíveis usados neste trabalho.

Como seria de se esperar, o tempo de residência nos módulos mais próximos ao queimador são menores, uma vez que o volume específico dos gases é maior. Isto decorre de que a temperatura nestes módulos é mais alta, mas a pressão e a descarga de gases são praticamente constantes ao longo de toda a fornalha.

Os valores para os módulos iniciais estão em torno de 0,6s, subindo para cerca de 1,6s no final da fornalha e não há grande variação entre os testes ou entre diesel e sebo.

O tempo de residência é mais crítico próximo a chama, onde as taxas de reação são mais elevadas, mas pode ser importante também nas regiões mais frias, onde pode haver a oxidação lenta do CO. O tempo de residência total dos gases na fornalha (doze módulos) está em torno de 15s. Este valor, associado ao perfil de temperatura e de concentração de CO, indica que a fornalha poderia ser mais curta.

Tabela 24 - Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida D₁

Câmaras													
D1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P (Pa)	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617
T (°C)	748	638	315	198	251	168	161	120	109	94	101	112	323
ρ (kg/m ³)	0,313	0,350	0,543	0,677	0,609	0,723	0,736	0,812	0,836	0,869	0,854	0,829	0,536
Q (m ³ /s)	0,039	0,035	0,023	0,018	0,020	0,017	0,017	0,015	0,015	0,014	0,014	0,015	
V (m ³)	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	
Tr (s)	0,621	0,696	1,077	1,344	1,208	1,436	1,460	1,612	1,659	1,724	1,695	1,645	Tr = 16,18

Tabela 25 - Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida D₂

Câmaras													
D2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P (Pa)	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191
T (°C)	707	727	463	296	344	92	146	104	91	76	90	94	323
ρ (kg/m ³)	0,328	0,321	0,436	0,565	0,520	0,880	0,766	0,852	0,883	0,920	0,885	0,876	0,539
Q (m ³ /s)	0,040	0,040	0,030	0,023	0,025	0,015	0,017	0,015	0,015	0,014	0,015	0,015	
V (m ³)	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	
Tr (s)	0,614	0,602	0,818	1,058	0,975	1,649	1,435	1,596	1,655	1,723	1,658	1,642	Tr = 15,42

Tabela 26 - Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida D₃

Câmaras													
D3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P (Pa)	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991
T (°C)	705	726	461	292	340	154	145	101	91	77	87	83	271
ρ (kg/m ³)	0,328	0,321	0,437	0,567	0,523	0,751	0,767	0,857	0,880	0,917	0,890	0,901	0,589
Q (m ³ /s)	0,043	0,044	0,032	0,025	0,027	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,016	0,016	
V (m ³)	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	
Tr (s)	0,563	0,551	0,750	0,975	0,898	1,290	1,317	1,472	1,511	1,575	1,529	1,548	Tr = 14,12

Tabela 27 - Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida S₁

Câmara													
S1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P (Pa)	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617	92617
T (°C)	689	719	362	198	253	171	165	124	109	88	102	111	295
ρ (kg/m ³)	0,334	0,324	0,507	0,683	0,612	0,724	0,735	0,810	0,843	0,891	0,859	0,838	0,567
Q (m ³ /s)	0,043	0,044	0,028	0,021	0,023	0,020	0,019	0,018	0,017	0,016	0,017	0,017	
V (m ³)	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	
Tr (s)	0,569	0,552	0,862	1,162	1,041	1,232	1,250	1,378	1,433	1,515	1,461	1,425	Tr = 13,88

Tabela 28 - Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida S₂

Câmara													
S2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P (Pa)	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191	93191
T (°C)	705	819	472	229	277	187	185	152	133	109	115	130	293
ρ (kg/m ³)	0,331	0,297	0,435	0,645	0,589	0,703	0,706	0,762	0,798	0,847	0,834	0,803	0,572
Q (m ³ /s)	0,043	0,048	0,033	0,022	0,024	0,020	0,020	0,019	0,018	0,017	0,017	0,018	
V (m ³)	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	
Tr (s)	0,562	0,504	0,738	1,095	1,000	1,194	1,199	1,293	1,355	1,438	1,415	1,364	Tr = 13,16

Tabela 29 - Cálculo do tempo de residência para cada câmara da fornalha, resultante da corrida S₃

Câmaras													
S3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P (Pa)	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991	92991
T (°C)	699	614	434	284	342	162	154	114	106	91	103	105	269
ρ (kg/m ³)	0,333	0,364	0,457	0,580	0,525	0,743	0,757	0,834	0,852	0,887	0,859	0,855	0,596
Q (m ³ /s)	0,045	0,041	0,033	0,026	0,028	0,020	0,020	0,018	0,018	0,017	0,017	0,017	
V (m ³)	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	
Tr (s)	0,541	0,592	0,743	0,943	0,854	1,208	1,232	1,357	1,385	1,443	1,398	1,391	Tr = 13,0

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O sebo bovino, à temperatura ambiente, encontra-se na fase sólida sendo necessário um preaquecimento em torno de 50 a 60°C para que flua pelas tubulações do sistema de combustão.

Durante os ensaios, o processo de combustão do sebo bovino mostrou-se estável. A filtragem do sebo ao longo dos experimentos mostrou-se imprescindível, assim como a limpeza da fornalha, antes de cada teste.

O sistema de aquecimento baseado em resistência elétrica foi um dos pontos fundamentais para a queima do sebo. A resistência, inserida dentro do queimador desenvolvido por Córdoba e Pagliuso aquece o combustível antes que este adentre ao queimador e otimiza a nebulização. Isso fez com que os valores de HCT e CO fossem reduzidos e não ocorressem mais interrupções.

O material particulado retido no filtro do ensaio com o óleo diesel mostrou valor da massa de 14 mg enquanto que o valor encontrado no sebo bovino foi de 1mg. A coloração do material particulado também foi diferente, negro para o diesel e branco acinzentado para o sebo.

Com excessão do material particulado, praticamente não se observou diferença significativa entre sebo e diesel. Cabe ressaltar que o diesel foi escolhido como padrão de comparação em lugar do óleo combustível que seria o competidor natural do sebo por ser um combustível de maior qualidade e representar desta forma um padrão alto de comparação. No uso industrial, esta diferença deverá ser acentuada e dúvida uma das grandes vantagens do sebo bovino sobre o óleo combustível será os valores desprezíveis das emissões de SOx.

Se enquadrado como resíduo, o sebo atenderia à Conama 316 nos parâmetros material particulado, CO, HCT e SOx pelo menos.

5.2 Sugestões

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Estender a análise de poluentes para matérias / substâncias ainda não regulamentados, entre eles acroleína, aldeídos, ácidos carboxílicos e PAH (Hidrocarbonetos poliaromáticos) e incluir NOx;
- Fazer análises comparativas dos efeitos biológicos dos produtos de combustão do sebo e diesel;
- Utilizar uma gama maior de excesso de ar;
- Fazer nebulização do combustível com vapor.

REFERÊNCIAS

ADAMS, T.T. (2002). **A Demonstration of fat and grease as an industrial boiler fuel. Georgia:** Universidade da Georgia; Engineering Outreach Service.

BAZZO, E. (1995). **Geração de vapor.** Santa Catarina: Ed.UFSC.

BEGA, E.A. (2003). **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras.** Rio de Janeiro: Interciência.

BELLAVER, C.; ZANOTTO, D.L. (2004). **Parâmetros de qualidade em gorduras e subprodutos protéicos de origem animal.** Disponível em: <http://www.qualyfoco.com.br/arquivos_publicacoes/arquivos/1266836195_Padrões_Ingredientes_de_Origem_Animal.pdf>. Acesso em: 20 mar.2010.

BORMAN, G.; RAGLAND, K.W. (1998). **Combustion engineering.** Singapore: McGrawhill.

CARVALHO JR., J.A.; McQUAY, M.Q. (2007). **Princípios de combustão aplicada.** Florianópolis: Ed.UFSC.

DEMPSEY, C.R.; OPPELT, E.T. (1999). **Incineração de resíduos perigosos:** uma revisão crítica. Tradução de Milton Norio Sogabe. São Paulo: Air & Waste Management Association. Seção Brasil.

DUTTON, J. (1994). **Fundamentals of gas utilization.** Canadá: Centennial College Press Scarborough.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2007). **Noções de ciência da carne.** Disponível em: <<http://www.cnpqc.embrapa.br>>. Acesso em: 15 fev. 2007.

GLAUDE, P.A. et al. (2010). Adiabatic flame temperature from biofuels and fossil fuels and derived effect on NOx emissions. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v.91, n.2, p.229-235, Feb.

GLOBO RURAL ONLINE. (2011). **Rebanho bovino brasileiro cresce 1,5% em 2009.** Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI189857-18079,00-REBANHO+BOVINO+BRASILEIRO+CRESCE+EM.html>>. Acesso em: 14 maio 2011.

GRIFFITHS, J.F.; BARNARD, J.A. (1995). **Flame and combustion.** London: Chapman & Hall.

JESSEN, P.F. (1977). Flammability of gases and related topics: the limits of flammability of gases and vapours. In: ROSE, J.W.; COOPER, J.R. (Ed.). Technical

data on fuel. 7thed. London: British National Committee World Energy Conference. Cap.5, p.282.

KREITH, F.; BOHN, M.S. (2003). **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Pioneira Thompson Learning.

LIN, C.; CHEN, W. (2002). **Emission characteristics of marine furnaces bruned at varying inlet air temperatures and humidity**. Taiwan: Department of Marine Engineering, National Taiwan Ocean University.

MCKIBBEN, B. (2007). Carbono nosso desafia: para enfrentar o aquecimento global, o primeiro passo é fazer as contas. **National Geographic**: Brasil, São Paulo, ano 7, n.91, p.51-55, out.

MCPHAIL, N. (2002). **Tallow as a heating fuel**. Australia: Food Science.

MOURA, K.R.M. et al. (2006). **Estabilidade térmica do sebo bovino e do biodiesel metílico e caracterização físico-química**. Paraíba: UFPB.

PAGLIUSO, J.D. (1984). **Combustíveis e combustão**. São Carlos: EESC/USP. Apostila.

PERA, H. (1990). **Geradores de vapor**: um compêndio sobre conversão de energia com vistas a preservação da ecologia. 2.ed. Paulo: Fama.

QUINTAS, M. et al. (2006). Rheology of supersaturated sucrose solutions. *Journal of Food Engineering*, Amsterdam, v.77, n.4, p.844-852, Dec.

RINO, C.A.; MITAMURA, S.S. (2007). Estudo comparativo das emissões atmosféricas de caldeiras a vapor na região de Londrina/PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.].

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. (2009). **Resolução SMA N° 79, DE 04 DE NOVEMBRO DE 2009**. Republicada no DOE de 7-11-2009, seção I, p.63-65.). Disponível em:<http://www.ambiente.sp.gpv.br/legislacao/estadual/resolucoes/2009_res_est_sma_79_republicada.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2011.

SERFATY, R. (2010). **Combustão e queimadores**. Disponível em:<<http://www.scribd.com/doc/37495430/ApostiladeMotoresdeCombustaoInterna>>. Acesso em: 15 jul. 2010.

SHAPIRO, H.; MORAN, M. (2002). **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC.

SIEGEL, R.; HOWELL, J.R. (1972). **Thermal radiation heat transfer**. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha.

SIMÕES, N.F. (1988). **Instrumentação para automatização em caldeira**. São Paulo: Acadêmica.

TAGUSHI, V. (2011). Esse boi continua magro. Dinheiro Rural, São Paulo, ano 7, n.79, p.40-41, maio.

TALLOW as heating fuel. (2002).Austrália: Food Science Austrália. Disponível em:<<http://www.redmeatinnovation.com.au/innovation-áreas/value-adding/co-products/mla-newsletters/tallow-as-fuel>>.Acessoem: 21 Ago. 2010.

VAN WYLEN, G.J.V.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. (2003).Reações químicas. In:_____.**Fundamentos da termodinâmica**.Tradução de Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Edgard Blucher. Cap.14, p.448-491.

Apêndice A

Quadro I de medidas:

	Sebo bovino	Óleo diesel
Pressão em (bar)	4,5	2,5
Pressão atmosférica (mm/Hg)	694,2	
Temperatura ambiente °C	25	
Ar primário (mm H₂O)	427	315

Quadro II de medidas:

	Sebo bovino	Óleo diesel
Pressão em (bar)	5,5	4,0
Pressão atmosférica (mm/Hg)	698,5	
Temperatura ambiente °C	23	
Ar primário (mm H₂O)	382	290

Quadro III de medidas:

	Sebo bovino	Óleo diesel
Pressão em (bar)	6,0	4,0
Pressão atmosférica (mm/Hg)	697,0	
Temperatura ambiente °C	23	
Ar primário (mm H₂O)	475	430

Anexo A

Planilha para cálculo do CO₂ + O₂

Combustível	Madeira		CO ₂ +O ₂ (%)	20,39	seco
Elemento/substância	Quantidade			20,07	úmido
	(mol/mol Cb)		O ₂ nos gases	18,52	%
C	3,67		O ₂ +N ₂ esteq.	24,77	
H	6,17				
O	0,02				
N	2,93				
S	0,00				
Cl	0,00				
H ₂ O	0,15				
Total	12,94				
□					
L	8,0				
O ₂ esteq.	5,2				
Substância	Concentração				
	(mol/mol Cb)	(% seco)	(% úmido)		
CO ₂	3,67	1,87	1,84		
CO	0,00	0,00	0,00		
SO ₂	0,00				
ClO	0,00				
O ₂	36,42	18,52	18,24		
N ₂	156,56	79,61	78,38		
H ₂ O _{pc}	3,09		1,54		
H ₂ O _{cb}	0,15				
Total seco	196,66		100,00		
Total úmido	199,74	100,00			

Fonte: Pagliuso (2009)

Coloração da chama em uma combustão

Segundo Simões Filho (1988), controle da chama e a sua coloração no processo contribuem para uma boa combustão:

- Chama muito branca → excesso de ar.
- Chama avermelhada é fuliginosa → combustão incompleta;
- Chama alaranjado-claro → ideal para caldeiras.

Apesar da chama ter boa coloração, mas contendo partículas luminosas, significa que o óleo não foi bem atomizado ou nebulizado.

Combustíveis alternativos – sebo bovino

Segundo Bellaver e Zanotto (2004, p.2),

(...) o sebo é o produto obtido a partir de resíduos de tecidos de bovinos, processados em digestores de batelada ou contínuos, munidos de agitadores para evaporar a umidade via aquecimento sobre pressão de vapor levando à extração de gordura por prensas, centrífugas ou pelo método de extração por solventes orgânicos. O sebo bovino acabado, à temperatura ambiente, apresenta-se pastoso, de cor esbranquiçada e com odor característico.

Na Tabela 29, é mostrada a composição básica do sebo bovino. Podemos observar a saturação de mais de 50% da estrutura molecular, o que lhe dará um alto número de cetano.

Tabela 29 - Composição básica do sebo bovino

Nº de átomos de Carbono	Ácido Carboxílicos	Fórmula	Sebo Bovino %
14	Mirístico	$C_{13}H_{27}COOH$	3,0
16	Palmítico	$C_{15}H_{31}COOH$	28,0
18	Estearico	$C_{17}H_{35}COOH$	25,0
18	Oléico	$C_{17}H_{33}COOH$	42,0
18	Linoleico	$C_{17}H_{31}COOH$	2,0

Fonte: Bellaver e Zanotto (2004)

Sendo assim, a fórmula molecular média do sebo bovino é $C_{54}, 96H_{106}, 16O_6$, o que dá uma massa molar média igual a 861,68 kg/k mol. Isto implica em melhor queima dentro da fornalha, resultando em níveis de fuligem desprezíveis. Portanto, mesmo se a combustão ocorrer, a quantidade de material particulado e de monóxido de carbono lançados na atmosfera será muito pequena.

Fundamentos Teóricos da Chaminé

Segundo Vlassov (2001) o transporte do ar dos gases para o ambiente é feito através do método da tiragem. Uma vez construída a instalação (composta de ventilador, exaustor e chaminé) esta pode funcionar com uma pressão menor que a atmosférica (rarefação ou depressão) ou pressão maior (sobrepessão).

Na tiragem forçada (método que aplicamos ao nosso trabalho), as perdas de pressão são superadas pela combinação de uma vazão de ar injetada para a combustão no queimador, que fluem pela fornalha até saírem pela chaminé. A vazão de ar controlada projeta uma força de pressão fazendo com que o interior da câmara possa forçar os gases a se deslocarem no sentido da chaminé.

A velocidade ótima do gases na saída da chaminé deve ser maior que 18 m/s.

Espessura da parede das Fornalhas para Caldeiras Flamotubular

Segundo Souza (2005), a American Society Mechanical Engineers - ASME (2005) diz que a espessura das fornalhas de caldeiras flamotubulares, cilíndricas planas não pode ser inferior a 8 mm. A máxima pressão de trabalho permitida (PMTP), deve ser determinada como indicado a seguir.

Nas fórmulas deste item, teremos as seguintes definições: P é a Pressão Máxima de Trabalho Permitida (PMTP) [MPa], D é o diâmetro externo da fornalha [mm], e é a espessura mínima da fornalha [mm] e L é o comprimento total da fornalha [mm]

a) Para fornalhas com Diâmetro Externo até 152 mm:

$$P = 96,5 \frac{(e - 1,65)}{D} \quad (15)$$

b) Para fornalhas com Diâmetro Externo de 152 mm a 460 mm e que o comprimento da fornalha não ultrapasse 4,5 vezes o diâmetro:

$$P = \frac{0,355}{D}(300e - 1,03L), \quad \text{para } L < 120e \quad (16)$$

Obs: Quando L for maior que 120 vezes a espessura, usamos:

$$P = \frac{7500e^2}{LD} \quad (17)$$

c) Para fornalhas com Diâmetro Externo de 152 mm a 460 mm e que o comprimento da fornalha é superior a 4,5 vezes o diâmetro:

$$P = \frac{68900e^3}{D^3}, \quad \text{para } e < 0,023D \quad (18)$$

Obs: Quando a espessura for maior que 0,023D, usamos:

$$P = \frac{119,28e}{D} - 1,90 \quad (19)$$

d) Para fornalhas com Diâmetro de 460 mm (externo) a 970 mm (interno) e cujos comprimentos não excedam 6 vezes o diâmetro:

$$P = \frac{0,355}{D}(300e - 1,03L), \quad \text{para } L < 120e \quad (20)$$

Obs: Quando L for maior que 120 vezes a espessura, usamos:

$$P = \frac{7500e^2}{LD} \quad (21)$$

e) Para fornalhas com Diâmetro de 460 mm (externo) a 970 mm (interno) e cujos comprimentos sejam superiores a 6 vezes o diâmetro:

$$P = \frac{0,355}{D} (300e - 6,18L), \text{ para } L < 120e \quad (22)$$

Obs: Quando L for maior que 120 vezes a espessura, usamos:

$$P = \frac{7500e^2}{6D^2} \quad (23)$$

Segundo Ganapathy (1982), caldeiras flamotubulares são amplamente usadas em plantas químicas, refinarias e sistemas de incineração. Nesses tipos de caldeiras, o fluxo de gás quente, que pode estar a uma pressão bem alta, enquanto a pressão baixa do vapor saturado é gerado fora dos tubos.

As caldeiras podem ser peças únicas ou com projeto de múltiplos passes. No modelo de passe simples de gás, o fluxo de gás quente passa por uma entrada e sai do outro lado. Se o comprimento da caldeira é uma preocupação devido à falta de espaço, o comprimento do tubo pode ser reduzido para a forma de dois tubos de gás.

Caldeiras flamotubulares são geralmente menos caras quando usadas para pequena capacidade, sistemas de vapor de baixa pressão comparados a tubos de água de caldeiras. A pressão do gás que cai com caldeiras flamotubulares é geralmente maior comparada ao tipo de tubo de água, quando usada para a mesma tarefa, onde pode ser feita de modo compacto com superfícies estendidas.

Caldeiras flamotubulares podem ter um projeto de concha única ou de tambor elevado. Caldeiras de uma única concha são menos caras comparadas às caldeiras de tambores elevados; se o fluxo de calor na saída dianteira é alto devido não só a uma temperatura interior elevada de gás mas também à um coeficiente alto de transferência de calor (como numa caldeira a gás reformada em plantas de hidrogênio), ou ambas as situações; ou se se quer obter um vapor mais puro, uma caldeira de tambor elevado com tubos de descida e de subida são usados.

Um sistema separado de tambores permite que se usem tambores internos como se requer, a fim de atingir a pureza do vapor desejada. Caldeiras com uma

única concha, por outro lado, têm um pequeno espaço para o vapor e um sistema elaborado de purificação não pode ser instalado no espaço disponível. Por isso, apenas pode ser gerado um vapor úmido com uma pureza de vapor de 2 a 3 ppm.

Abaixo, veremos as instruções para o uso de caldeiras flamotubulares:

1. Devem ser limitadas à pressão baixa de vapor, de no máximo 9652,8 kPa. Para a mesma pressão, a espessura necessária dos tubos aguentarem a pressão externa é muito maior comparada a tubos sujeitos a pressão interna. A espessura da chapa do tubo também aumenta com a pressão. Desta maneira, o tubo empurra o peso e o preço aumenta cada vez mais de acordo com temperaturas maiores comparada a projetos com caldeira aquatubulares.
2. Ser adequadas para maiores pressões de gás. Em projetos de hidrogênio, por exemplo, vapores de gás atravessam a uma temperatura muito alta, na ordem de 2068,4 a 4136,9 kPa. É fácil lidar com esses vapores em caldeiras flamotubular flamotubulares comparadas a projetos aquatubulares. As superfícies da caldeira têm de estar localizadas dentro de grandes vasos de pressão, se for usado um projeto aquatubular, encarecendo bastante o projeto.
3. Se o fluxo de gás é sujo e contém poeira é mais fácil lidar com o fluxo de gás em uma caldeira flamotubular, onde os tubos têm de ser limpos, já que numa caldeira aquatubular a cápsula bem como a superfície externa dos tubos ficam sujas e são difíceis de limpar. No entanto, o fluxo de gás despeja partículas como nos projetos de incineração de resíduos sólidos do município. Limpar a caldeira é mais fácil em caldeiras aquatubulares com a ajuda de sopradores de fuligem.
Se a saída frontal da chapa do tubo e o tubo interno são ligados numa caldeira flamotubular, a limpeza online é difícil. Uma maneira de lidar com a situação é usar uma caldeira de múltiplos passes. O primeiro passe pode ser projetado com tubos bem grandes e os passes subsequentes pode ter tubos menores.
4. Quando uma grande tarefa tem de ser transferida com um pequeno aperto, como em caldeiras de turbina a gás de escape; a área de superfície e ainda, o comprimento necessário e a queda da pressão do

gás, torna-se economicamente inviável para tal aplicação. Com caldeiras aquatubulares, pode-se usar tubos aletados para limpar situações e ainda fazer uma caldeira compacta com uma consequente baixa pressão de gás. Para comparação de velocidades, o coeficiente de transferência de calor dentro dos tubos é menos comparado aos tubos descobertos do lado de fora; ainda assim, os tubos externos das caldeiras aquatubulares, às vezes, são preferíveis aos das caldeiras flamotubulares.

- 5. Caldeiras flamotubulares podem lidar com temperaturas altas de gás da ordem de 1315,6 °C, se a chapa do tubo for projetada adequadamente. A chapa do tubo é alinhada com refratários e arruelas são usados para transferir o fluxo de calor na chapa do tubo dentro dos tubos onde a mistura de vapor e água os mantém resfriados. A Figura 2-2 mostra o arranjo. O uso de refratores minimiza o diferencial de temperatura através da chapa do tubo e ainda é recomendado quando a temperatura do gás excede os 982,22 °C.*
- 6. Uma alta pureza do vapor pode ser obtida usando um tambor elevado externo de vapor com ligações internas.*
- 7. Economizador e o super aquecedor pode ser adicionado como se pede. Numa caldeira aquatubular é fácil separar o evaporador e colocar o super aquecedor numa zona de temperatura mais fria além da seção da tela, enquanto que na caldeira piro-tubular a escolha do local só pode ser ou na entrada ou saída da caldeira. Uma alternativa seria construir duas caldeiras flamotubular com um super aquecedor no meio delas. Mas essa é uma proposta bastante cara.*

Desde que o volume de água e peso numa caldeira piro-tubular é parecida com a de uma caldeira aquatubular, a resposta para acrescentar as mudanças é melhor com as caldeiras aquatubulares, uma vez que as caldeiras piro-tubulares são lentas.

O valor ideal do CO₂ na queima é aquele que garante uma combustão completa com certa segurança. Para que haja poucas perdas de calor, o CO₂ deve ser o mais alto possível.

Na queima a óleo deve-se verificar o CO₂ com a medição de O₂ e da fuligem.

Recomenda-se ajustar o valor máximo de CO₂ e o menor valor de oxigênio com menor índice de fuligem.

A temperatura dos gases na base de uma chaminé em uma caldeira é um indicativo do quão bom é o seu rendimento.

Quanto maior a temperatura dos gases medidos, maiores serão as perdas de calor sensível pela chaminé. Caldeiras flamotubulares devem possuir temperaturas dos gases na base da chaminé em torno de 200 a 250 °C. Porém, nem sempre isso é possível.

Temperaturas acima de 250° C indicam que a transferência de calor na caldeira pode estar comprometida, indicando como uma das causas a necessidade de limpeza dos tubos de fumaça devido a depósito de fuligem. Neste caso, recupera-se esta energia aquecendo-se a água de alimentação de caldeiras para cada 6 °C de aumento de temperatura na água de alimentação. Assim, teremos economia de 1 % no combustível queimado.

Para pré-aquecimento do ar de combustão para cada 22 a 30 °C de aumento da temperatura do ar, obtém-se 1 % de economia de combustível.

Referências

AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS (2005). **ASME section I power boilers** – PED guide: supplement to guide for ASME stamp holders use of section I to meet EC pressure equipment directive (97/23/EC). New York: ASME. (STP-PT-002).

BELLAVER, C.; ZANOTTO, D.L. (2004). **Parâmetros de qualidade em gorduras e subprodutos protéicos de origem animal**. Disponível em: <http://www.qualyfoco.com.br/arquivos_publicacoes/arquivos/1266836195_Padrões_Inredientes_de_Origem_Animal.pdf>. Acesso em: 20 mar.2010.

GANAPATHY, V. (1982). **Applied heat transfer**. Tulsa: PennWell Books.

SIMÕES, N.F. (1988). **Instrumentação para automatização em caldeira**. São Paulo: Acadêmica.

SOUZA, G.R. (2005). **Avaliação experimental da transferência de calor em fornalha flamotubular utilizando como combustível o biodiesel e o óleo diesel**. 87p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

VLASSOV, D. (2001). **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Ed.UFPR.