

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Estudo da utilização do biodiesel na geração de vapor para a
agroindústria**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Cristina Harumi Shintani
Fabiano Yasuda

Orientador: Prof. Dr. Eitaro Yamane

São Paulo

2006

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Estudo da utilização do biodiesel em gerador de vapor na
agroindústria**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Cristina Harumi Shintani
Fabiano Yasuda

Orientador: Prof. Dr. Eitaro Yamane

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

**São Paulo
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Yasuda, Fabiano

Estudo da utilização do biodiesel na geração de vapor para a agroindústria / F. Yasuda, C.H. Shintani. -- São Paulo, 2006.
97 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1.Geradores de vapor 2.Biodiesel I.Shintani, Cristina Harumi
II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Mecânica III.t.**

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo.....	2
1.2.	Metodologia	2
2.	O BIODIESEL	3
2.1.	Disposições gerais.....	3
2.1.1.	Definição	3
2.1.2.	Histórico.....	3
2.1.2.1.	Cenário brasileiro	3
2.1.2.2.	Programas de biodiesel no mundo	5
2.1.2.2.1.	União Européia	5
2.1.2.2.2.	Estados Unidos.....	5
2.1.2.2.3.	Outros países	6
2.1.3.	Matéria-prima.....	6
2.1.3.1.	Grupos de matéria-prima.....	6
2.1.3.2.	Óleos vegetais	7
2.1.3.2.1.	Hbio: um nova solução	7
2.1.3.3.	Óleos e gorduras animais	8
2.1.3.4.	Óleos e gorduras residuais	8
2.1.3.5.	Óleos de frituras	9
2.1.4.	Principais insumos agrícolas	10
2.1.4.1.	Mamona	12
2.1.4.2.	Soja.....	12
2.1.4.3.	Dendê	13
2.1.5.	Regulamentação	13
2.1.5.1.	Definição de propriedades.....	13
2.1.5.2.	Norma Brasileira	15
2.1.5.3.	Normas européia e norte-americana.....	16
2.2.	Análise econômica	18
2.2.1.	Custo de produção e formação do preço do biodiesel.....	18
2.2.1.1.	Mamona	19
2.2.1.2.	Dendê	19
2.2.1.3.	Soja.....	20
2.2.1.4.	Glicerina.....	21
2.2.2.	Formação do preço do óleo diesel no Brasil	21
2.2.3.	Incentivos	21
2.2.3.1.	Programas de Apoio Financeiro a Investimentos em Biodiesel [25]	22
2.2.3.2.	Subsídios	23
2.3.	Aspectos sociais	25
2.3.1.	Mamona	25
2.3.2.	Soja.....	25
2.3.3.	Dendê	26
2.3.3.1.	Agropalma.....	26
2.3.3.2.	Programa Familiar.....	26
2.4.	Aspectos tecnológicos	27
2.4.1.	Processo produtivo	27
2.4.2.	Glicerol: mercados e perspectivas.....	30

2.5.	Estudo das características de combustão do biodiesel	31
2.5.1.	Emissões.....	31
2.5.2.	Balanço Energético	34
2.5.3.	Análise química/ energética	34
2.5.4.	Poder carburante dos óleos vegetais	35
3.	GERADOR DE VAPOR.....	40
3.1.	Definição	40
3.2.	Classificação	41
3.2.1.	Flamotubulares	41
3.2.2.	Aquatubulares	43
3.2.3.	Caldeiras mistas	44
3.2.4.	Caldeiras de recuperação de calor.....	45
3.3.	Componentes principais	45
3.4.	Ciclo Rankine.....	50
3.5.	Eficiência de um gerador de vapor.....	51
3.6.	Aplicação do gerador de vapor na agroindústria.....	54
3.6.1.	Secagem de amido de mandioca	54
3.6.2.	Obtenção dos produtos de palma	54
3.6.3.	Produção avícola de corte [40].....	55
4.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	57
4.1.	Mecanismos de transferência de calor	57
4.1.1.	Condução	57
4.1.2.	Convecção.....	59
4.1.3.	Radiação.....	64
4.1.3.1.	Radiação da chama.....	65
4.1.3.2.	Radiação dos gases.....	66
5.	MEMORIAL DE CÁLCULOS	71
5.1.	Dimensionamento do gerador de vapor	71
5.1.1.	Feixe de tubos – economizador.....	73
5.1.1.1.	Convecção.....	73
5.1.1.2.	Radiação dos gases.....	78
5.1.2.	Câmara	80
5.1.2.1.	Convecção.....	81
5.1.2.2.	Radiação dos gases.....	84
5.1.2.3.	Radiação da chama.....	87
5.1.3.	Balanço geral.....	89
5.2.	Comparação dos resultados para o diesel e biodiesel	90
5.3.	Discussão dos resultados.....	93
	CONCLUSÃO	95
	BIBLIOGRAFIA.....	96

Lista de Figuras

Figura 2.1 Classificação de óleos com suas respectivos grupos de origem	6
Figura 2.2 Potencial de produção de biodiesel no Brasil	10
Figura 2.3 Variação do preço do óleo diesel [20]	18
Figura 2.4 Desembolso BNDES para fontes renováveis	22
Figura 2.5 Diagrama da reação de transesterificação.....	28
Figura 2.6 Processo simplificado de produção do biodiesel	29
Figura 2.7 Gráfico de emissões da mistura de biodiesel com petrodiesel [15].....	31
Figura 3.1 Esquema de funcionamento da caldeira flamotubular.....	42
Figura 3.2 Esquema de funcionamento da caldeira aquatubular.....	44
Figura 3.3 Representação dos componentes do gerador de vapor [35].....	45
Figura 3.4 Ciclo de rankine superaquecido.....	51
Figura 3.5 Esquema de determinação do consumo de combustível.....	52
Figura 3.6 Fluxograma do processamento de frango	56
Figura 4.1 Condutividade térmica de aços e ligas.....	58
Figura 4.2 Coeficiente básico de transmissão de calor por convecção	61
Figura 4.3 Fator de propriedade F _{pp} para gases	62
Figura 4.4 Fator de propriedade F _{pp} para ar.....	62
Figura 4.5 Fator arranjo para gases ou ar	63
Figura 4.6 Fator de profundidade.....	64
Figura 4.7 Gráfico para a determinação do fator de radiação	66
Figura 4.8 Correção de fator para a emitância do CO ₂	67
Figura 4.9 Fator de correção para emitância da água.....	67
Figura 4.10 Emitância do dióxido de carbono a 1 atm	68
Figura 4.11 Emitância para o vapor de água a 1 atm	69
Figura 4.12 Fator de correção da emitância	70
Figura 5.1Esquema de uma caldeira aquatubular compacta	72
Figura 5.2 Arranjo dos tubos na câmara de combustão	82
Figura 5.3 Diagrama esquemático da caldeira aquatubular	83
Figura 5.4 Temperatura adiabática da chama em função do excesso de ar	88

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Histórico do biodiesel no Brasil.....	4
Tabela 2.2 Tipos de óleos vegetais e suas aplicações	7
Tabela 2.3 Especificações do óleo diesel e do biodiesel de óleo de frituras.....	9
Tabela 2.4 Características de alguns vegetais com potencial para produção de biodiesel	11
Tabela 2.5 Área estimadas para a produção de B5	11
Tabela 2.6 Dados das principais oleaginosas do Estado da Bahia. Safra 2004/2005	11
Tabela 2.7 Especificação geral para o biodiesel B20 pela ANP [1] e ABNT [19] ...	16
Tabela 2.8 Regulamentação do biodiesel para o mercado norte-americano	17
Tabela 2.9 Regulamentação do biodiesel para o mercado europeu	17
Tabela 2.10 Custos de produção, de oportunidade e valor de indiferença para óleos	24
Tabela 2.11 Comparaçao dos testes em ônibus de transporte coletivo	33
Tabela 2.12: Características fisico-químicas do biodiesel de várias espécies vegetais e do diesel.....	36
Tabela 2.13 Características e propriedades complementares do biodiesel	37
Tabela 2.14 Propriedades dos éster metílico e etílico	39
Tabela 5.1 Quadro comparativo entre obiodiesel e o GV adaptado ao petrodiesel ...	90
Tabela 5.2 Quadro comparativo entre o petrodiesel e o GV adaptado ao biodiesel ..	91
Tabela 5.3 Quadro comparativo entre o petrodiesel e o biodiesel utilizando o mesmo equipamento	92

RESUMO

Com a freqüente oscilação nos preços dos combustíveis derivados de petróleo e a elevada volatilidade dos insumos agrícolas, despertou-se o interesse de explorar o tema do biodiesel, que apresenta potencial para contribuir significativamente em ambos os casos, além de agregar benefícios de cunho social e ambiental. Inserindo no contexto nacional, a rica biodiversidade brasileira possibilita a obtenção do diesel vegetal com as mais variadas matérias-primas, tornando o campo de pesquisas extenso e, ao mesmo tempo, interessante. Por outro lado, traz dificuldades para se atingir uma padronização das propriedades do biodiesel nacional e, infelizmente, a maior parte dos estudos se limita ainda à pesquisa para a obtenção do biodiesel aplicado a motores de combustão interna. É nesse contexto desafiador e de grande relevância que o desenvolvimento deste trabalho foi motivado. A viabilização do biodiesel regional rumo a um desenvolvimento sustentável pode ser atingido através do surgimento de novas aplicações e métodos de produção, somando também a segurança para os agricultores, pois teriam a estabilização dos preços no mercado e até mesmo demanda crescente e consequente valorização. Assim, o trabalho é baseado em uma aplicação prática do biodiesel em gerador de vapor na agroindústria, verificando a viabilidade qualitativa do processo em questão. Logicamente, o biodiesel ainda não se apresenta economicamente competitivo, mas com apoio de incentivos e pesquisas sinaliza um futuro promissor, como já é visível no caso de combustíveis destinados a motores.

ABSTRACT

Considering the frequent fuel prices oscillation and the agriculture volatileness, the interest in exploring the biodiesel subject comes up, due its contribution possibility in both of them, beyond adding social and environment benefits. Besides the Brazilian biodiversity widens the raw materials range, which becomes the research more extensive, and, at the same time, interesting. On the other hand, it brings difficulties to reach a national biodiesel standardization, and, unfortunately, most of the studies is still focus on internal combustion engines. So, the development of this piece of work was motivated in this challenging relevant environment. A sustainable development could be reached through new applications and technology production improvement, because, as a result, the price market becomes flatter and its demand and worth increases. Thus, this work is based on a biodiesel application in agroindustrial vapor generator, checking the qualitative viability out. The biodiesel doesn't presents economically competitive enough, but it predicts a promising future if incentives and researches are counted on, as it already happens in the internal combustion engines.

1. INTRODUÇÃO

O biodiesel, definido pela norma ASTM D6751/2002 como “combustível composto de mono-alquil-éster de cadeia longa de ácidos graxos, derivado de óleos vegetais ou gorduras animais, designado B100”, é um tema atraente devido à sua capacidade de contribuir em inúmeros campos simultaneamente. Com a frequente oscilação nos preços dos combustíveis derivados de petróleo e a elevada volatilidade dos insumos agrícolas, apresenta potencial para contribuir significativamente em ambos os casos, além de trazer benefícios de cunho social e ambiental.

Inserindo no contexto nacional, o Brasil apresenta uma demanda de cerca de 45 bilhões de litros de diesel, sendo parte importado e, paradoxalmente, apresenta uma rica biodiversidade que possibilita a obtenção do diesel vegetal com as mais variadas matérias-primas.

Embora esta variabilidade torne o campo de pesquisas extenso, traz dificuldades em uma padronização do óleo, que de uma ótica otimista, amplia o campo de aplicações. Como a demanda por óleos combustíveis destinados aos motores de combustão interna é elevada, este foi o primeiro foco de pesquisa de âmbito internacional. Porém, algumas iniciativas em outras áreas já podem ser observadas em diversos campos, como será apresentado.

Assim, uma humilde contribuição é proposta neste trabalho: um estudo de caso de utilização do biodiesel na geração de vapor aplicado à agroindústria, traçando um quadro comparativo entre a utilização do biocombustível e o uso do diesel tradicional.

1.1. Objetivo

O estudo teve como foco a viabilidade da aplicação do biodiesel em geradores de vapor aquatubular compacto aplicado à agroindústria.

1.2. Metodologia

Inicialmente, foi necessária uma ampla busca de informações a respeito do biodiesel, verificando as novas descobertas e o comportamento do mercado. Entretanto, a busca de informação sobre o biodiesel foi árdua, devido à escassez de estudos aprofundados disponíveis em diferentes campos, pois, como muitos estudos ainda estão em processo de patenteação, ou seja, estão longe de cair em domínio público, as novas tecnologias não são divulgadas, tornando o material disponível superficial e desatualizado. Outro fator prejudicial é que, infelizmente, a maior parte das frentes de pesquisa ainda se restringe ao processamento do biodiesel, devido à variação de propriedades.

O passo seguinte foi uma reflexão acerca de toda a informação filtrada, levando-se em consideração fatores como: localização da matéria-prima e de sua utilização, desempenho e se o estudo poderia gerar otimizações significativas no setor estudado.

Todo o estudo foi acompanhado e direcionado pelo professor doutor e orientador Eitaro Yamane, chefe do Departamento de Engenharia Mecânica, cuja área de atuação concentra-se em processos de transferência de calor e a sistemas de conversão de energia. Outros auxílios importantes foram provenientes de discussões com o professor mestre Maurício Assumpção Trielli, que trabalha também no desenvolvimento de motores de combustão interna e combustível alternativos, inclusive o biodiesel, o professor doutor Francisco Emílio Baccaro Nigro Nascimento, que, entre outras atividades, trabalha no desenvolvimento de motores de combustão interna e de Martin Gutjahr Junior, responsável pelo Departamento de Engenharia, na área de equipamentos térmicos da Setal Óleo e Gás.

Com o material reunido e seguindo diretrizes dos mesmos já citados, foi suficiente para a realização de um estudo de viabilidade na agroindústria, conforme apresentado ao longo deste trabalho. A referência da literatura é bastante didática, tornando-a acessível aos mais leigos.

2. O BIODIESEL

2.1. Disposições gerais

2.1.1. Definição

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) define através do artigo 2 da resolução 042, de 24/11/2004: o Biodiesel B100 é composto de alqui-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais, complementada pela lei nº 11.097 de 13 de janeiro de 2005: “o biodiesel, também conhecido como diesel vegetal, é um biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.” [1]

No processo chamado transesterificação, além da obtenção do biodiesel, obtém-se também como subproduto a glicerina, o qual representa cerca de 10%.

2.1.2. Histórico

Para se ter uma idéia da importância do biodiesel, é necessário contextualizá-lo no cenário político-econômico mundial. Assim, será apresentado um breve histórico do biodiesel e dos biocombustíveis que lhe antecederam.

2.1.2.1. Cenário brasileiro

Para se ter uma idéia da importância do biodiesel, será apresentado um breve histórico do biodiesel e dos biocombustíveis que lhe antecederam, segundo os principais marcos, além de contextualizá-lo no cenário político-econômico mundial.

Tabela 2.1 Histórico do biodiesel

Descrição	Resultado
1973: A crise energética de 1973	
Os acelerados e incontidos aumentos dos preços do petróleo geraram uma nova consciência mundial a respeito da produção e consumo de energia, especialmente quando originária de fontes não renováveis, como é o caso dos combustíveis fósseis.	Dedicação mundial à superação da crise, basicamente, definidos em dois grupos de ações: conservação ou economia de energia e usos de fontes alternativas.
1975: Proalcool	
Pro-álcool brasileiro, o qual é considerado o maior programa de produção e de uso de biocombustíveis no mundo. A cana-de-açúcar tem o mais alto retorno para os agricultores por hectare plantado. O custo de produção do açúcar no país é baixo (inferior a US\$ 200/toneladas), podendo competir no mercado internacional. Tal mercado é, entretanto, volátil e apresenta grandes oscilações de preços.	De 1975 a 2000, produção: 5,6 milhões de veículos a álcool hidratado. Substituiu por uma fração de álcool anidro (entre 1,1% a 25%) um volume de gasolina pura em mais de 10 milhões de veículos, evitando: emissões em cerca de 110 milhões de toneladas de carbono, a importação de cerca de 550 milhões de barris de petróleo e, ainda, proporcionando uma economia de divisas da ordem de US\$ 11,5 bi. Em 2003, a tecnologia de motores flex fuel deu novo fôlego ao consumo de álcool, apresentando projeções de cerca de 75% dos carros vendidos em 2006.
1977: Concepção do prodiesel	
O Prof. Dr. Expedito Parente inicia seus estudos pioneiros que resultaram na primeira proposta da aplicação de óleos vegetais transesterificados como combustível do ciclo diesel.	Primeiro sucedâneo vegetal para o óleo diesel do petróleo. Testado em motor de carro, conseguia o mesmo resultado de um veículo movido a diesel, com a vantagem de não ser poluente e obtido de fonte renovável.
Criação da Prodiesel 30/10/1980	
Primeira tentativa de implantação de um programa nacional de biodiesel, com fôlego para ser energeticamente equivalente a pelo menos quatro vezes o Pro-álcool brasileiro.	Em 1984, aborto do biodiesel brasileiro. Alguns modelos de viabilização propostos, todavia há falta de interesse pelas autoridades de Energia e diminuição dos preços do petróleo
Primeira patente mundial: 5/12/1980 - Prodiesel	
Professor Doutor Expedito de Sá Parente da Universidade Federal do Ceará (UFC) obteve o PI – 8007957: Processo de produção de combustível a partir de frutos ou sementes oleaginosas.	Patente entrou em domínio público pelo tempo e desuso e não houve os devidos incentivos ao desenvolvimento da nova tecnologia.
1988: Ressurgimento na Europa	
Principalmente na Europa e América do Norte, o assunto prosperou	A Alemanha já possui atualmente cerca de 2000 bombas de B100 (biodiesel puro) e uma produção anual de cerca de 2 bilhões de biodiesel a um custo de aproximadamente 12% menor do que o petrodiesel.
1998: Retomada Brasileira	
A dependência externa do petróleo e as demandas ecológicas geraram uma nova consciência mundial a respeito da produção e consumo de energia, especialmente, quando originária de fontes não renováveis, como é o caso dos combustíveis fósseis.	O Brasil retoma os estudos, depois de assistir os países ditos de primeiro mundo se lançaram posteriormente ao programa e avançando em passadas largas, principalmente Alemanha e França.
2002: Criação da Probiodiesel	
O biodiesel está na pauta das discussões sobre combustível limpo no mundo todo e na ordem do dia como um dos temas de maior interesse do governo federal e de empresas nacionais e multinacionais.	O governo federal lançou o Pro-biodiesel, Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel, que ganhou ânimo no governo atual como iniciativa para a inclusão social e benefícios ao meio ambiente. Agora, os incentivos estão voltando.
2004: Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel	
Lançamento do PNPB inseriu esse combustível na matriz energética nacional. Define percentual de mistura do biodiesel ao diesel, sendo obrigatória a mistura de 2% de biodiesel ao diesel (B2) a partir do exercício de 2006.	O percentual de 2% de inclusão de biodiesel representa 800 milhões de litros anuais. A participação do Nordeste nesse mercado está na ordem de 15%, o que significa 120 milhões de litros anuais. Acredita-se que este patamar poderá ser atingido em 2007 ou 2008, dependendo do esforço que possa ser dedicado ao agronegócio da mamona.
2006: Contexto atual do biodiesel no Brasil	
Alguns postos já disponibilizaram o biodiesel para os consumidores. Iniciativas privadas, associadas a centros de desenvolvimento apresentam resultados positivos	Já sinaliza bons indicadores para um futuro promissor, tanto na área de motores de combustão como em outras.

2.1.2.2. Programas de biodiesel no mundo

De uma forma sintética, serão apresentados alguns dos pontos essenciais sobre o andamento do maior programa de biodiesel do mundo, que ocorre na União Européia, além de dados de programas ao redor do mundo.

2.1.2.2.1. União Européia

No final de 2003, a capacidade instalada na Europa era de cerca de 2,5 a 2,7 Mt e objetiva a substituição de 5,75% em 2010 do diesel usado para transportes e 20% em 2020, segundo o programa de biodiesel da União Européia.

A maior parte do óleo vegetal deste programa vem do cultivo da colza ou a couve-nabiça. No momento, os custos de produção de óleo vegetal são, em média, cerca de duas vezes superiores ao do mineral. Para atingir a meta de 2010, o subsídio em forma de isenção de impostos seria de aproximadamente 2,5 bilhões/ ano.

Outro problema relacionado é a questão das grandes áreas de cultivo. A UE precisaria de cerca de 5,5 M ha para atingir 3,2 a 4 % de biodiesel no diesel mineral.

2.1.2.2.2. Estados Unidos

O programa americano de biodiesel é bem menor que o europeu e apresenta diferenças importantes. A principal matéria-prima é a soja, complementada com óleos de fritura. De acordo com o *National Biodiesel Board*, em 2002, a produção foi de 50 milhões de litros de biodiesel, usados basicamente como B20. Atualmente há mais de 12 empresas produtoras, com uma capacidade da ordem de 200 mil toneladas anuais.

Como o diesel americano possui uma menor carga tributária, apenas a renúncia fiscal não permite viabilizar o biodiesel. Assim, foram adotados incentivos diretos à produção, o *Commodity Credit Corporation Bioenergy Program*, que subsidia a aquisição de matérias-primas para fabricação de etanol e biodiesel, e atos normativos que determinam um nível mínimo de consumo de biocombustíveis, por órgãos públicos e frotas comerciais, definido no *Energy Policy Act (EPAct)*. [2] [3]

2.1.2.2.3. Outros países

Durante os anos 90 se desenvolveu na Nicarágua um projeto para biodiesel a partir do óleo de pinhão-manso *Jatropha curcas*, bastante similar à mamona, capaz de produzir cerca de 1.100 l/ha. Com apoio financeiro e capacitação austríaca, envolvendo entidades públicas e universidades nicaraguenses, implantaram-se 1.013 ha de cultivos em pequenas unidades em 400 km² e uma planta capacitada para 8 mil toneladas anuais de biodiesel. Apesar de bons indicadores iniciais, o projeto foi encerrado após os dois primeiros anos de colheita e alguma produção de biodiesel. Segundo seus gestores, o principal responsável foi o modelo de produção, envolvendo muitos agentes, uma logística complexa e uma gestão ineficiente, que provocaram uma longa crise social, resolvida com o perdão das dívidas pelo Estado.

Já na China, segundo o Professor Ji Xing, cinco unidades transesterificadoras de óleo de colza e óleo de fritura usado produzem um volume de biodiesel entre à produção americana e européia, atendendo as especificações similares à americana, pela norma ASTM D6751. A empresa *Hainan Zhenghe Bio Energy Company* investiu US\$ 5 mi para uma produção anual de 45 mil ton. [4] [5]

2.1.3. Matéria-prima

2.1.3.1. Grupos de matéria-prima

Uma das vantagens do biodiesel é sua diversidade de matérias primas:

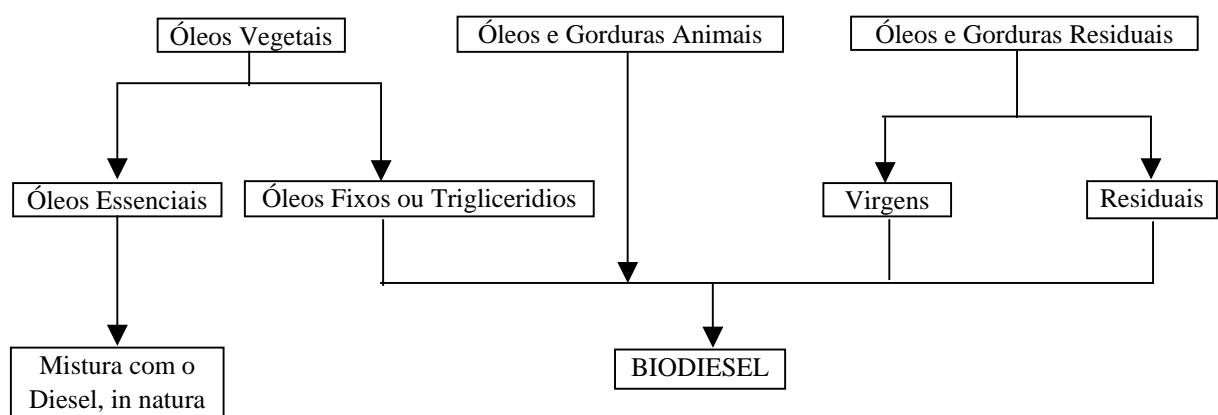


Figura 2.1 Classificação de óleos com suas respectivos grupos de origem

2.1.3.2. Óleos vegetais

Os óleos vegetais podem ser tanto óleos fixos como essenciais, conforme pode ser observado na tabela 2.2:

Tabela 2.2 Tipos de óleos vegetais e suas aplicações

	Óleos vegetais	
	Óleos fixos ou triglicerídicos	Óleos essenciais
Aplicação	Constituem matéria-prima para a produção de biodiesel	A maioria pode ser mistura com o óleo diesel mineral e/ou biodiesel, in natura, em motores diesel Não são matérias primas de biodiesel, pois são voláteis, constituídos de misturas de terpenos, terpanos, fenóis, e outras substâncias aromáticas
Exemplos	Grão de amendoim, polpa do dendê, amêndoas do coco de dendê, praia e babaçu, bagaça de mamona, semente de colza, girassol, maracujá, linhaça e tomate, polpa de abacate, caroço de oiticica e algodão, entre muitos outros vegetais em forma de sementes, amêndoas ou polpas	Óleo de pinho, casca de laranja, andiroba, marmeiro e de casca da castanha de caju (lcc) e outros que encontram-se originariamente impregnando os materiais ligno-celulósicos como as madeiras, as folhas e as cascas de vegetais, com a finalidade de lubrificar suas fibras

Um exemplo a ser destacado foi a produção de diesel vegetal a partir de óleo de semente de maracujá, cujo ensaio foi encomendado pela *Agrolusa* (Agro-industrial Luiz Guimarães AS), o qual produzia grandes quantidades de suco desta fruta. Foi estabelecido um programa de produção de 1.000 litros por semana durante 6 meses. O biodiesel de maracujá movimentou a frota daquela empresa durante todo um semestre, porém foram identificados usos mais nobres e lucrativos: a indústria de cosméticos. [6]

2.1.3.2.1. Hbio: um nova solução

O novo produto, inserido num programa comparado ao 'Pró-álcool', já teve sua patente solicitada pela Petrobrás ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), e é obtida através da hidrogenação de uma mistura de 10% de óleo vegetal no mineral, que pode ser de até 18%, enquanto o biodiesel é óleo vegetal sem glicerina. Resulta em um combustível menos poluente e de melhor qualidade, já que

levará maior quantidade de cetano e menor teor de enxofre, o qual é bastante reduzido mesmo se comparado ao recém lançado diesel 500 da Petrobrás.

Tanto o H-Bio quanto o diesel comum terão em sua fórmula a adição do biodiesel. Assim, continua em vigor a obrigatoriedade prevista em lei de adição de 2% e posteriormente 5% de biodiesel. A meta é aumentar gradualmente a porcentagem de biodiesel até que o H-Bio se torne desnecessário. A estimativa do governo é de que em 256 mil m³ de H-Bio seja usado 1,2 milhão de toneladas de soja, equivalente a 6 bi litros de óleo vegetal, como palma e dendê. [4] [7] [8] [9]

2.1.3.3. Óleos e gorduras animais

Os óleos e gorduras de animais possuem estruturas químicas semelhantes aos dos óleos vegetais, sendo moléculas triglicerídicas de ácidos graxos. As diferenças estão nos tipos e distribuições dos ácidos graxos combinados com o glicerol. Constituem exemplos de gorduras de animais, possíveis de serem transformados em biodiesel: sebo bovino, óleo de peixe, óleo de micotó, banha de porco, entre outras matérias graxas de origem animal.

2.1.3.4. Óleos e gorduras residuais

Além dos óleos e gorduras virgens, constituem também matéria-prima para a produção de biodiesel, os óleos e gorduras residuais, resultantes de processamentos domésticos, comerciais e industriais. Os volumes ofertados de sebo de animais, especialmente de bovinos, nos países produtores de carnes e couros, são bem generosos, como é o caso do Brasil.

Um exemplo a ser citado foi o processamento de uma partida de 200 litros de óleo de peixe proveniente da Bélgica, matéria-prima enviada pela DeSmet. Como a matéria-prima era originária de peixes, foi produzido assim, de forma inédita, óleo diesel animal, o qual fez funcionar muito bem um motor diesel, à semelhança dos óleos diesel de origem vegetal.

2.1.3.5. Óleos de frituras

Os óleos de frituras representam um potencial de oferta surpreendente. Um levantamento da oferta de óleos residuais de frituras, (produção > 100kg/mês), revela um valor da oferta brasileira superior a 30.000 toneladas anuais.

Nye [11] investigou a reação de transesterificação de óleos de fritura. O maior rendimento foi obtido com o metanol em meio alcalino, utilizando hidróxido de potássio como catalisador. Alguns dos ésteres de menor viscosidade foram selecionados para testes preliminares em motores do ciclo diesel. O éster metílico obtido em meio básico, os ésteres etílicos e butílico obtidos em meio ácido apresentaram pouca ou nenhuma fumaça na exaustão.

Segundo testes de Mittelbach e Tritthart, [12] a utilização de biodiesel de óleos de fritura em motores do ciclo diesel apresentou bons resultados, realizados em bancada dinanométrica e em veículo de carga média com motor turbinado a diesel, conforme apresentado na tabela 2.3. Por outro lado, a avaliação da emissão de gases demonstrou que houve um aumento relativo na liberação de gases nitrogenados, particularmente quando o biocombustível foi comparado ao diesel convencional. Mesmo sendo um biodiesel de óleo parcialmente oxidado, suas características foram bastante próximas às do óleo diesel convencional.

Tabela 2.3 Especificações do óleo diesel e do biodiesel de óleo de frituras

Características	Óleo diesel	Biodiesel
Densidade 15°C (kg/m³)	0,849	0,888
Ponto inicial de destilação (°C)	189	307
10%	220	319
20%	234	328
50%	263	333
70%	286	335
80%	299	337
90%	317	340
Ponto final de destilação (°C)	349	342
Aromáticos (%), v/v	31,5	nd
Carbono (%)	86,0	77,4
Hidrogênio (%)	13,4	12
Oxigênio (%)	0,0	11,2
Enxofre (%)	0,3	0,03
Índice de cetano	46,1	44,6
Número de cetano	46,2	50,8
Valor calórico (MJ/kg)	42,3	37,5

2.1.4. Principais insumos agrícolas

A figura a seguir apresenta uma representação das localizações das principais matérias-primas do biodiesel. [13]

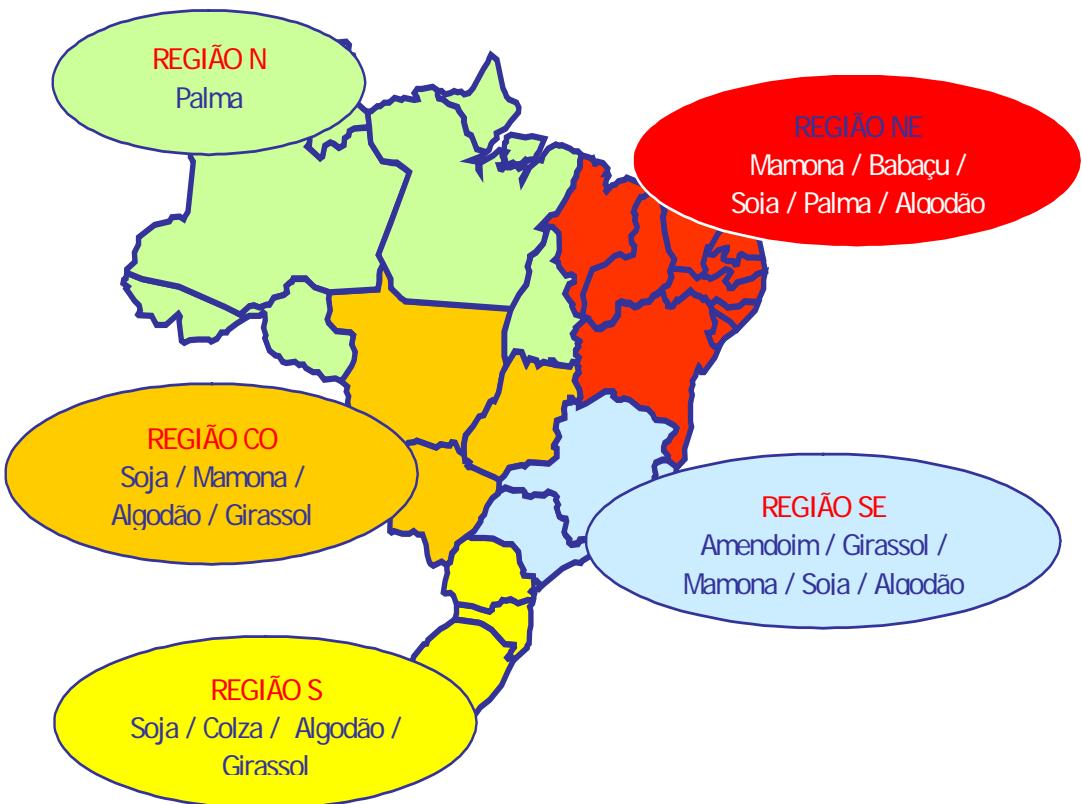


Figura 2.2 Potencial de produção de biodiesel no Brasil

Quanto às matérias-primas mais promissoras para utilização, deve-se referir aos estudos recentes da Embrapa para levantar os cultivos e as aptidões regionais, sendo mencionados a soja para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, a mamona para o Nordeste e o dendê para a região Amazônica. Girassol, amendoim e outros assim como as palmáceas tropicais são sempre mencionadas como viáveis. Alguns estudos apontam perspectivas interessantes para as oleaginosas aparentemente inusitadas e pouco citadas, como o abacate (*Persea americana*), com uma produtividade estimada em 1200 litros por hectare. [5]

A tabela 2.4 indica para as espécies mais mencionadas o potencial para produção de óleo, considerando valores de produtividade e teor de óleo de variedades comuns. Já a tabela 2.5 é ilustrativa quanto às necessidades de áreas, nas diversas

regiões do Brasil, para suprir 5% do diesel (B5) com oleaginosas locais, de acordo com o zoneamento da Embrapa. Portanto, usando apenas soja, dendê e mamona, seria necessário cerca de 3 mi hectares. A área de expansão possível para grãos é de pelo menos 90 milhões de hectares. As áreas aptas para o dendê atingem, na Amazônia, cerca de 70 milhões de hectares, com alta aptidão em cerca de 40%.

Tabela 2.4 Características de alguns vegetais com potencial para produção de biodiesel

Nome popular	Nome científico	Origem	Conteúdo	Meses	em óleo (t/ha)
Dende	<i>Elaeis guineensis N.</i>	Amêndoas	26	12	3,0 - 6,0
Babaçu	<i>Attalea speciosa M.</i>	Amendoas	66	12	0,4 - 0,8
Girassol	<i>Helianthus annus</i>	Grão	38 - 48	3	0,5 - 1,5
Colza	<i>Brassica campestris</i>	Grão	40 - 48	3	0,5 - 0,9
Mamona	<i>Ricinus communis</i>	Grão	43 - 45	3	0,5 - 1,0
Amendoim	<i>Arachis hipogaea</i>	Grão	40 - 50	3	0,6 - 0,8

Tabela 2.5 Área estimadas para a produção de B5

Região	Óleo vegetal para B5		Área 1.000 ha
	1.000 m ³	Matéria-Prima	
Sul	7.200	Soja	600
Sudeste	15.840	Soja	1.320
Nordeste	5.400	Mamona	600
Norte	3.240	Dende	35
Centro-oeste	4.320	Soja	360
Total	36.000		2.915

Para comparação, a área de expansão possível para grãos é avaliada, nos cerrados, em cerca de 90 M ha; e as áreas aptas para dendê atingem, na Amazônia, cerca de 70 M ha, dos quais cerca de 40% com alta aptidão.

Como as fontes do biodiesel são inúmeras, apresenta-se uma relação da área plantada, produção e produtividade das principais oleaginosas do país, além da porcentagem de óleo.[14]

Tabela 2.6 Dados das principais oleaginosas do Estado da Bahia. Safra 2004/2005

Oleaginas	Área plantada (mil ha)	Produção (mil kg)	Produtividade (kg/ha/ano)	Teor de óleo (%)
Mamona	172	129	750	45
Soja	870	2349	2700	18
Algodão	233,1	488	3450	15
Dendê	41690	164	3963	20
Girassol	-	-	1557	42

2.1.4.1. Mamona

Considerando-se o valor do produto, a mamona tem sido indicada como uma das poucas opções agrícolas rentáveis para as regiões árida e semi-árida do Nordeste, independente do uso para biodiesel. Além disso, no nordeste há aproximadamente 45 milhões de hectares de terras agronomicamente aptas ao seu cultivo. Mesmo com seu potencial, ainda existe um déficit na produção de óleo de mamona, o que tem obrigado o país a importar o produto. A Bahia liderou sua produção em 2005, com 135 mil ton, o que correspondendo a 90% da produção nacional.

Ela é obtida, na sua maioria, em unidades pequenas de produção agrícola, até 15 ha. Neste caso, seria essencial o fortalecimento da base agrícola com maior número de variedades, mas tratar-se-ia de programa muito mais voltado a atender aspectos sociais do que às necessidades de energia. Deve-se considerar a alternativa de exportação do óleo para usos não energéticos.

A Embrapa concluiu recentemente que há 458 municípios no Nordeste aptos para produzir mamona, dos quais 189 são da Bahia. Segundo Marcello Brito, diretor comercial da Agropalma, os produtores de mamona não terão a mesma oportunidade que os de dendê no exterior, pois o combustível de mamona não se classifica nas especificações internacionais de biodiesel. [15] [16]

2.1.4.2. Soja

A soja conta com uma base agrícola variada e tecnologia adequada, além de uma enorme experiência da produção como cultura extensiva, de grandes áreas. O cultivo da soja ocupa no Brasil pouco mais de 20 milhões de hectares e dispõe de 100 milhões de hectares aptos para expansão. [5]

Cerca de 70% da soja brasileira é destinada à exportação. Em 2003, para a produção de 52 M t soja, com produtividade de 2,8 t/ha, a parcela convertida em óleo resultou em 5,4 M t. A utilização de B5 em todo o diesel no Brasil, se baseada em soja apenas, utilizaria cerca de 9 M t grãos em 3 M ha para 1,8 M m³ de óleo. Resultaria também em 7,2 M t de óleo.

O maior obstáculo enfrentado atualmente pelos sojicultores é devido à valorização da moeda nacional, resultando em prejuízos devido aos financiamentos

obtidos para obtenção de maquinário quando o dólar estava supervalorizado e tendo que pagá-los com suas safras a um valor em dólar equivalente reduzido. Porém, esse problema atinge a agricultura em geral. Vale lembrar que a soja está incluída no programa H-bio da Petrobrás (conforme citado anteriormente).

2.1.4.3. Dendê

O dendê, independente de programas para biodiesel, deve merecer muita atenção. Sua produção mundial deverá ultrapassar a de soja no final da década. No conjunto, a demanda por óleos vegetais, principalmente de soja e dendê, é bem maior do que o crescimento populacional no mundo. Porém o Brasil produz 0,5% do total mundial, mesmo apresentando o maior potencial mundial. A atual oferta de variedades é adequada apenas para a pequena produção. A expansão do plantio exigirá o fortalecimento da pesquisa agronômica. [17]

O Pará é o maior produtor brasileiro de dendê, com uma produção de 729 mil toneladas. Estima-se que o Estado tenha cinco milhões de hectares de áreas propícias à cultura do dendê. A Agropalma responde por 75% da produção de dendê e por todo o processamento do biodiesel. Como referência, o primeiro produtor, a Malásia, usa 3,3 M ha para produzir 11,2 M t óleo. O Brasil, com cerca de 0,05 M ha, produz 0,10 M t óleo.

2.1.5. Regulamentação

2.1.5.1. Definição de propriedades

A Agência Nacional do Petróleo define as propriedades as quais são necessárias para a determinação do desempenho do produto e seu impacto ambiental, nas finalidades em que é mais comumente utilizado. No caso, a regulamentação é do B20. A seguir algumas das propriedades mais importantes que caracterizam os combustíveis: [1] [18]

- Enxofre

O teor de enxofre depende da origem do petróleo e do processo de produção. É limitado por atuar em processos de corrosão e causar emissões poluentes.

➤ Viscosidade

A viscosidade de um fluido é a medida da sua resistência ao escoamento a uma determinada temperatura. É uma das características de maior importância do óleo combustível, que determinará as condições de manuseio e utilização do produto.

➤ Água e Sedimentos

O excesso desses contaminantes poderá causar problemas nos filtros e queimadores bem como formar emulsões de difícil remoção. A presença de água é também uma das responsáveis pela corrosão nos tanques de estocagem. Na presente especificação, ela é determinada somando-se os resultados obtidos nos ensaios de água por destilação e sedimentos por extração.

➤ Ponto de Fulgor

É definido como a menor temperatura na qual o produto se vaporiza em quantidades suficientes para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar-se momentaneamente quando se aplica uma centelha sobre a mesma. É um dado de segurança para o manuseio do produto e uma ferramenta utilizada para detectar a contaminação do óleo combustível por produtos mais leves.

➤ Densidade Relativa a 20/4°C

É a relação entre a massa específica do produto a 20°C e a massa específica da água a 4°C. Como dado isolado tem pouco significado no que se diz respeito ao desempenho de queima do óleo combustível. No entanto, associado a outras propriedades, pode-se determinar o poder calorífico superior e desta maneira permitir a determinação da eficiência dos equipamentos onde está sendo consumido.

➤ Ponto de Fluidez

É a menor temperatura na qual o óleo combustível flui quando sujeito a resfriamento sob condições determinadas de teste. Estabelece condições de manuseio e estocagem do produto. Especificam-se limites variados para esta característica, dependendo das condições climáticas das regiões.

➤ Vanádio

Metal encontrado com freqüência no petróleo, tem seu limite especificado para óleos combustíveis prevenir a formação de depósitos por incrustação nas superfícies externas de tubos aquecidos, que causam a corrosão e a perda da eficiência térmica dos equipamentos.

➤ Outros fatores

Dois outros parâmetros que merecem especial atenção são: a estabilidade à oxidação, sobretudo em climas quentes, é relevante para assegurar que mesmo após armazenado em condições normais, o biodiesel mantenha sua especificação adequada; e a cetanagem, medida que assegura a boa combustão em motores de ignição por compressão, é medida em poucos laboratórios, entre os quais refinarias da Petrobras, Cenpes e IPT/SP, onde se adota, na falta de medições diretas, uma correlação com a densidade, expressão naturalmente válida para o diesel mineral.

2.1.5.2. Norma Brasileira

No Brasil, a Portaria 255/2003 da Agência Nacional de Petróleo (ANP) estabeleceu uma especificação preliminar do biodiesel, com algumas premissas, considerando o uso em misturas até 20% (B20) e obrigatória a mistura de 2% de biodiesel ao diesel (B2) a partir do exercício de 2006.. São especificações similares à européia e americana, com alguma flexibilização para atender às características de matérias-primas nacionais, conforme as Normas Brasileiras Registradas -NBR e Métodos Brasileiros -MB da Associação Brasileira de Normas Técnicas -ABNT e dos métodos da American Society for Testing and Materials -ASTM, observando-se sempre os de publicação mais recente.

Também foram definidos o regime tributário – diferenciado para tipos de agricultura (familiar ou comercial), as oleaginosas prioritárias para servirem de matéria-prima e as regiões que receberão incentivos pelos seus cultivos inseridos nesta cadeia de produção. Foi outorgado na Lei 11.097 em seu artigo 8º, à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a responsabilidade pela regulação, contratação e fiscalização das atividades econômicas integrantes do biodiesel.

Tabela 2.7 Especificação geral para o biodiesel B20 pela ANP [1] e ABNT [19]

Características	Unidades	Limites	Métodos	
			ABNT NBR	ASTMD
Ponto de fulgor, mín.	°C	100,0	14598	93
Água e sedimentos, máx.	% volume	0,050	-	2709
Viscosidade a 40°C,	mm ² /s	Anotar	10441	445
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020	9842	874
Enxofre total, máx.	% massa	0,001	-	5453
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14359	130
Número de Cetano, mín.	-	45	-	613
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	função da região e do mês	14747	6371
Resíduo de carbono, máx.	% massa	0,05	-	4530
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,80	14448	664
Glicerina livre, máx.	% massa	0,02	-	6584
Glicerina total, máx.	% massa	0,38	-	6584
Aspecto	-	Límpido e isento de impureza	-	-
Destilação; 95% vol. recuperado, máx.	°C	360	-	1160
Massa específica a 20°C	kg/m ³	Anotar	7148, 14065	1298
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,5	-	-
Índice de iodo, máx.	% massa	Anotar	-	-
Monoglicerídeos, máx.	% massa	1,00	-	6584
Diglicerídeos, máx.	% massa	0,25	-	6584
Triglicerídeos, máx.	% massa	0,25	-	6584
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	10	-	-
Fósforo, máx.	mg/kg	10	4951	4951
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.	h	6	-	-

2.1.5.3. Normas européia e norte-americana

A fim de normalizar as propriedades e características do biodiesel duas instituições criaram especificações, para atender o mercado norte-americano, a ASTM D6751 e europeu, prEN 14214, colocando limites a algumas características do combustível. Como é possível verificar nas tabelas abaixo, existem algumas pequenas diferenças entre as especificações, além da principal distinção: a prEN 14214 (2002) restringe a utilização do metanol no processo de transesterificação do óleo para a obtenção do éster, biodiesel, ao passo que a ASTM (2002) permite a utilização tanto do etanol quanto do metanol.

Tabela 2.8 Regulamentação do biodiesel para o mercado norte-americano

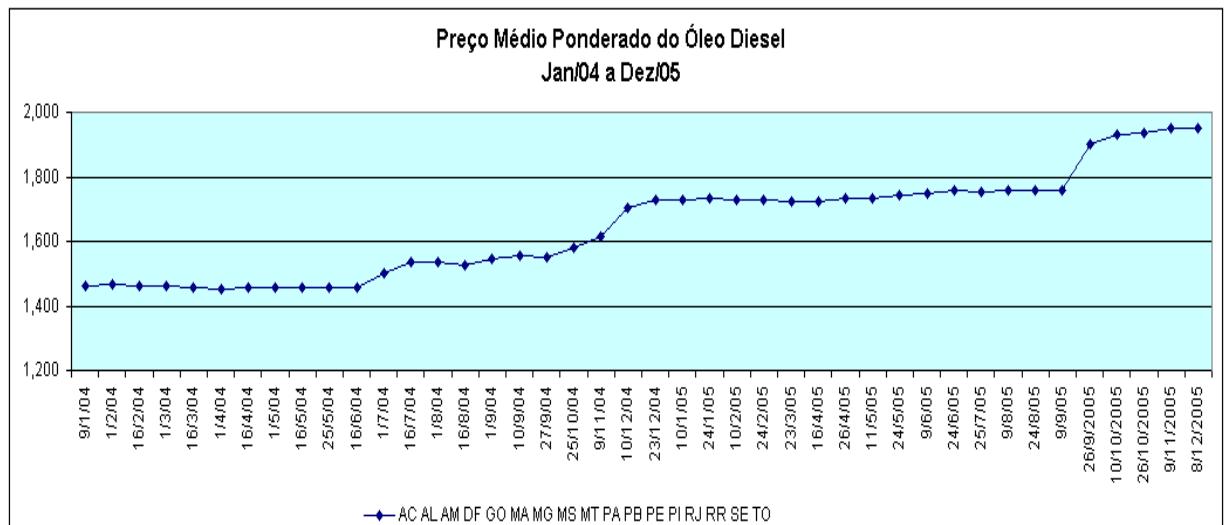
Propriedades	Unidade	Método de ensaio	Limites
Ponto de fulgor	°C	D93	> 130,0
Água e sedimentos	% Vol.	D2709	< 0,050
Viscosidade cinemática a 40°C	mm ² /s	D445	1,9 – 6,0
Cinzas sulfatadas	% peso	D874	< 0,020
Enxofre	% peso	D5453	< 0,050
Corrosividade ao cobre		D130	Nº 3 max
Número de cetano		D613	> 47
Ponto de névoa		D 2500	Reportar
Resíduo de carbono	% peso	D 4530	< 0,050
Acidez	mg KOH / g	D 664	< 0,800
Glicerina livre	% peso	D6584	< 0,020
Glicerina total	% peso	D6584	< 0,240
Fósforo	% peso	D4951	< 0,001
Temperatura de destilação	°C	D1160	< 360

Tabela 2.9 Regulamentação do biodiesel para o mercado europeu

Propriedades	Unidades	Limites		Método de ensaio
		Mín	Máx	
Ester	% (m/m)	96,5 b		prEN 14103
Densidade a 15 °C	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675
				EN ISO 12185
Viscosidade a 40 °C	mm 2/s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Ponto de fulgor	°C	120	–	ISO/DIS 3679 e
Enxofre	mg/kg	–	10,0	prEN ISO 20846
				prEN-ISO 20884
Residuo de carbono (para 10% de destilação)	% (m/m)	–	0,30	EN ISO 10370
Número de cetano		51,0		EN ISO 5165
Cinzas Sulfatadas	% (m/m)	–	0,02	ISO 3987
Água	mg/kg	–	500	EN ISO 12937
Contaminação total	mg/kg	–	24	EN 12662
Corrosividade ao cobre (3 h at 50 °C)		Classe 1		EN ISO 2160
Estabilidade a oxidação, 110 °C	Horas	6,0	–	prEN 14112
Acidez	mg KOH/g		0,50	prEN 14104
Índice de iodo			120	prEN 14111
Ester metílico de ácido linoléico	% (m/m)		12,0	prEN 14103
Ester metílico polisaturado (>=4 dupla ligações)	% (m/m)		1	
Metanol	% (m/m)		0,20	prEN 14110
Monoglicerídeo	% (m/m)		0,80	prEN 14105
Diglicerídeo	% (m/m)		0,20	prEN 14105
Triglicerídeo	% (m/m)		0,20	prEN 14105
Glicerol livre	% (m/m)		0,02	prEN 14105
				prEN 14106
Glicerol total	% (m/m)		0,25	prEN 14105
Metais grupo 1(Na+K)	mg/kg		5,0	prEN 14108
				prEN 14109
Group II metais grupo 2 (Ca+Mg)	mg/kg		5,0	prEN 14538
Fósforo	mg/kg		10,0	prEN 14107

2.2. Análise econômica

O petrodiesel apresenta uma grande variação no seu preço e consequentemente no seu fornecimento. Nos dois últimos anos o preço do diesel vem subindo, apresentando uma variação aproximada de 35%, bem acima dos índices de inflação registrados no mesmo período, que foram de 7,4% e 6,2% respectivamente, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, [21] num total acumulado de 14,1%. Portanto, torna-se bastante complicado a elaboração e implatação de projetos que dependam fortemente do custo do combustível.



Distribuidora e à Ale Combustíveis. [22] [23] O governo ainda estuda a abertura de mercado do biodiesel, pois seu valor não pode ser nem igual ao diesel, cerca de R\$1,03/l nas distribuidoras, nem igual ao que a Europa paga pelo biocombustível (R\$ 4/l).

Segundo um estudo realizado na UESC, foram determinados os custos de produção através das informações de despesas. Para se empregar a mamona e o dendê torna-se necessária a expansão das áreas de cultivo e a melhoria no nível de produtividade. Todos os indicadores econômicos analisados indicam viabilidade do investimento em unidades produtoras de biodiesel e potencialidade de expansão dessa nova atividade no estado da Bahia, tanto pelos aspectos de expansão agrícola dos cultivos, quanto pela disponibilidade de tecnologia para implantação de tais unidades.

2.2.1.1. Mamona

O óleo de mamona é muito utilizado no mundo, em diversos segmentos da indústria química e de alimentos. Os preços atingidos no mercado internacional são relativamente estáveis nos últimos dez anos. Em 1996, o preço para o óleo bruto era de US\$ 0,90/ kg e de US\$ 1,03/ kg em 2002. O óleo processado, refinado ou desodorizado, atingia pelo menos 50% a mais. [4]

2.2.1.2. Dendê

Em meados de 2003, o óleo de palma cru subiu de US\$ 400/ t para US\$ 500/t, e o óleo refinado (RBD) ficou em US\$ 0,70/ kg (posto EUA). [24] Nas melhores plantações, com grandes investimentos em tecnologia, como o caso da Agropalma, o custo da produção do óleo de palma atualmente é inferior aos US\$ 200/ t, a um patamar próximo à média mundial, com uma meta de alcançar em cinco anos um custo igual ou inferior a US\$ 170/ t, nível atingido por alguns plantios na Malásia. Não se tem informação do custo esperado para a produção de biodiesel.

Poderia ser muito competitivo se o processamento ficasse em 15- 20% do custo final, mas o maior problema seria o custo de oportunidade. O óleo refinado tem

grande número de aplicações, entre as quais a oleína e a estearina. A demanda está muito forte em razão da entrada dos mercados asiáticos da China e Índia.

Um interessante co-produto do óleo de palma, que pode melhorar as condições de viabilidade, é a energia elétrica, através de sistemas de co-geração com turbinas a vapor e utilizando os resíduos sólidos atualmente sem aplicação. Os potenciais disponíveis para esta tecnologia apontam para a auto-suficiência energética das plantas de produção de óleo e a geração de excedentes comercializáveis de eletricidade.

2.2.1.3. Soja

No processamento para óleo, a soja produz o óleo e a torta. A partição de custos do insumo entre os dois produtos é sempre arbitrária e uma das formas usuais de distribuir os custos comuns é considerar o valor de mercado. Isto leva a uma enorme flutuação do custo do biodiesel, mas é a ótica correta para o produtor. [5]

Os valores atuais da Abiove são um custo do biodiesel de R\$1,11 a R\$1,35/ l, estimado para as seguintes condições: unidade produtora de 400 t diárias, no interior do Sudeste, sem impostos (ICMS) custo do óleo de soja bruto (valor de mercado): US\$ 427/ t (2002) a US\$ 522/ t (2003). Os valores de 2002 foram atualizados com o aumento do preço do óleo de soja no mercado internacional. Estimativas de custos de processamento da ordem de US\$ 10 a tonelada podem ser consideradas otimistas, embora se trate de plantas de grande porte (400 t/ dia), ao comparar com os valores de outras fontes como:

- ✓ US\$ 88 a tonelada, no estudo de uma planta na Costa Rica para 20 mil ton/ano de éster metílico de palma, com investimento de US\$ 5 milhões, adotando Processo AXENS Esterfip, do Instituto Francês do Petróleo.
- ✓ US\$ 62 a 250 a tonelada, na avaliação da Agência Internacional de Energia, respectivamente para plantas de grande e pequeno porte.

Preliminarmente, para as condições brasileiras, se for considerado o custo de investimento e operação de uma unidade produtora de biodiesel para cerca de 20 mil toneladas anuais, parece razoável adotar um custo de processamento de US\$ 80 por tonelada de biodiesel produzido.

2.2.1.4. Glicerina

Entre 1995-2003, os preços oscilaram entre US\$ 1.08/ lb e US\$ 0.60/ lb, com tendência, nos últimos anos, para US\$ 1.00/ lb. Porém, os excedentes de glicerina derivada do biodiesel poderão levar a grandes reduções no preço, eliminando parte da produção de glicerina de outras fontes, hoje de 0,8 a 1,0 M t/ ano. Com as reduções substanciais de preço, deverão também entrar no mercado de outros polióis, em particular o sorbitol. [4]

Buscam-se novas aplicações de grandes volumes para glicerina no mundo, e isto provavelmente se dará nos intermediários para plásticos, como o propanodiol - PDO, contudo não são soluções de curto prazo.

2.2.2. Formação do preço do óleo diesel no Brasil

Conforme dados mais recentes da ANP, e considerando a legislação tributária no Decreto nº 4.565, de 1º de janeiro de 2003, os preços médios do diesel no Brasil são:

- Consumidor (1,388 R\$/l; variando bastante conforme a região).
- Distribuidor (1,288 R\$/l; incluindo ICMS, variável entre os estados, margem da distribuidora e os custos de logística).
- Refinaria (0,965 R\$/l; incluindo tributos federais, Cide/PIS/Cofins de 0,218 R\$/l).

Retirando os impostos, obtém-se um valor de realização de R\$ 0,747/ l, cerca de US\$ 0,25/l. Esses preços variam entre os diversos mercados. Além disso, são 5% inferiores no Nordeste e 4% mais caros na região Centro-Oeste, baseados no preço de oportunidade do produto importado e nas distâncias dos pontos de oferta. [15]

2.2.3. Incentivos

Apesar do biodiesel ser uma realidade, não há uma tributação adequada, pois o mesmo é taxado com Imposto de Comercialização de Mercadorias e Serviços – ICMS no valor entre 17% e 18% ao passo que o diesel comum, derivado do petróleo é entre 12% e 18%. Evidentemente, a utilização do biodiesel ainda não é devidamente estimulada, já que em 2004 apresentava um preço de custo variando entre R\$ 0,85 e R\$ 3,00 tornando-o incompetitivo comercialmente.

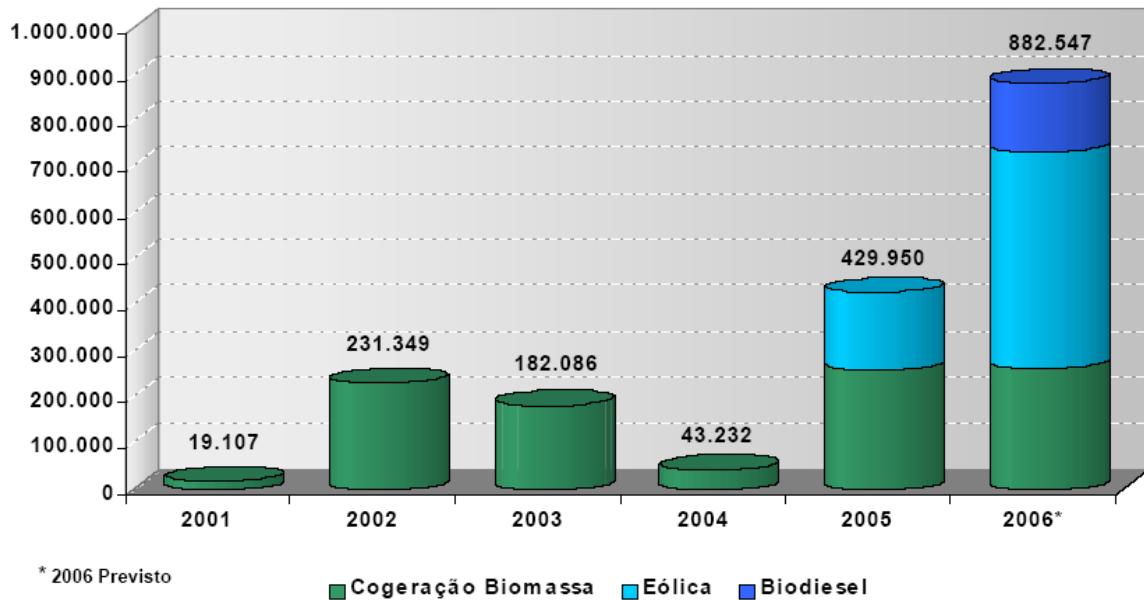


Figura 2.4 Desembolso BNDES para fontes renováveis

Por outro lado, existem alguns incentivos governamentais de financiamento de equipamentos para a aplicação do biodiesel através do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. [25]

2.2.3.1. Programas de Apoio Financeiro a Investimentos em Biodiesel [25]

O programa tem como objetivo apoiar investimentos em todas as fases da produção de biodiesel (fase agrícola, produção de óleo bruto, produção de biodiesel, armazenamento, logística e equipamentos para a produção de biodiesel), sendo que, em relação às fases agrícola e de produção de óleo bruto, podem ser apoiados projetos desvinculados da produção imediata de biodiesel, desde que seja formalmente demonstrada a destinação futura do produto agrícola ou do óleo bruto para a produção de biodiesel., além de apoiar investimentos em beneficiamento de co-produtos e subprodutos do biodiesel, tais como a glicerina e a torta de mamona.

O Programa prevê, ainda, a possibilidade de financiar a aquisição de máquinas e equipamentos homologados para uso de biodiesel ou óleo vegetal bruto.

Um dos fatores determinantes das condições de financiamento é o selo “Combustível Social”, que é concedido pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário

- MDA a produtores de biodiesel que promovam a inclusão social de agricultores familiares fornecedores de matérias-primas.

A taxa de juros que incide sobre o valor do financiamento para micro, pequenas e médias empresas e pessoas físicas que apresentem projetos com selo “Combustível Social” é de 1% a.a, enquanto que as que não tiverem o selo, 2% a.a. Já as grandes empresas com projetos com selo: 2% a.a e as sem selo: 3% a.a.

O nível de participação do agente financeiro e beneficiária se restringem em até 90% dos itens passíveis de apoio, para projetos com selo “Combustível Social” e até 80% para projetos sem selo “Combustível Social”.

2.2.3.2. Subsídios

O custo médio de produção no Brasil é ainda maior quando comparado com os maiores do mundo, Malásia, Indonésia e Colômbia, mais por diferenças nas taxações de produtos e serviços. Por exemplo, os encargos trabalhistas: na Malásia essas taxações incidem cerca de 50% sobre o salário; na Indonésia 30%; Colômbia, 60%; e no Brasil, acima de 100%. São relevantes, ainda, os custos de adubação e impostos diretos sobre o produto. Na comparação dos custos sem taxas o Brasil é extremamente competitivo. Somando-se esta razão ao elevado custo do biodiesel, os subsídios tornam-se imprescindíveis para o desenvolvimento do diesel vegetal.

O Valor de Indiferença para o Produtor (VIP) de biodiesel é a soma do custo de oportunidade do óleo com os custos de processamento do óleo para biodiesel. Em princípio, este é o valor que um produtor de biodiesel espera receber por seu produto, para não ter perdas na comercialização da matéria-prima e ainda ter de agregar algum custo de processamento para vendê-lo. A diferença entre o VIP e o custo do diesel sem impostos na refinaria é o valor do subsídio a ser pago: parte como renúncia fiscal, mas uma parte significativa, como no caso da mamona, com subsídios mais diretos. [5] [26]

Mesmo no caso da soja, que conta com subsídio mínimo, apenas a renúncia fiscal não seria suficiente para atingir o VIP. O dendê é um caso interessante: o custo de produção é baixo, equivalente ao do diesel mineral sem impostos, mas o custo de oportunidade do óleo torna necessário um subsídio direto maior que o da soja.

A mamona parece ser difícil a sua viabilização, mas por excelentes razões: o produto tem alto valor de mercado, competindo com a aplicação como biodiesel. O custo de oportunidade para os óleos de dendê e soja é relativo a volumes elevados (acima de 20 milhões de toneladas) enquanto para a mamona o mercado é menor (~ 800 mil toneladas, para os preços atuais).

O impacto de uma grande oferta, neste caso, poderá reduzir os preços e, eventualmente, aumentar o volume. Portanto, o custo de oportunidade para o óleo de mamona seria diferente, com o aumento da produção.

Tabela 2.10 Custos de produção, de oportunidade e valor de indiferença para óleos

Matéria-prima	Custo de Produção		Custo de Oportunidade		Valor de indiferença para o produtor	
Mamona	0,43	0,57	0,92	0,94	0,99	1,01
Soja			0,37	0,46	0,38	0,47
Dendê	0,17	0,20	0,44	0,52	0,55	0,65

Segundo esta avaliação preliminar, a viabilização do B5, sem afetar os preços dos combustíveis ao consumidor, implica em um subsídio respectivamente de US\$ 0,74; US\$ 0,13 e US\$ 0,30 para cada litro de biodiesel produzido de mamona, soja e dendê. Considerou-se apenas o nível inferior da faixa de valores de indiferença para o produtor de biodiesel, frente a um preço de realização (ex-impostos) do óleo diesel de US\$ 0,25 por litro. É relevante observar que a estimativa utilizou o valor médio do diesel no Brasil, onde ocorre grande variação de preços, principalmente nas regiões mais isoladas.

Os preços ao consumidor de diesel na Alemanha e EUA são, respectivamente, da ordem de 0,96 e 0,39 US\$/l; e os custos sem impostos de biodiesel, da colza e da soja, são também, respectivamente, 0,63 e 0,58 US\$/l. Em outras palavras, por conta dos elevados impostos, o diesel mineral é tão caro na Alemanha que basta a renúncia fiscal para viabilizar o biodiesel. O mesmo não ocorre nos EUA, como visto anteriormente, existe uma política de uso compulsório de biodiesel.

2.3. Aspectos sociais

2.3.1. Mamona

Ao se avaliar a proposta de produção de mamona no Nordeste, e se considerar a evolução das pequenas unidades familiares para assentamentos, ou unidades “cooperativas” onde um suporte comum de sementes, insumos e comercialização estaria disponível, a Embrapa estimou a utilização de 15 ha/ trabalhador. [22]

Isto geraria uma renda líquida de R\$ 200/ ha, receita de R\$ 0,50/ kg bagas, menos custos de operações agrícolas e insumos. Pratica-se hoje cerca de R\$ 0,67, e coloca-se como objetivo um preço de R\$ 0,60. Em alguns casos há garantias de preço “mínimo” de R\$ 0,40/ kg bagas. O consorciamento com feijão reduz a produtividade de mamona mas aumenta a renda para R\$ 700,00/ha. Também, neste caso, a estimativa de empregos refere-se apenas ao emprego direto na área agrícola.

Conforme dados da Conab, a produção de mamona na safra 2004/05 cresceu 50,7%, para 161,7 mil toneladas. No Nordeste, o aumento foi de 47,5%, para 154,1 mil toneladas. O programa do governo já envolve 100 mil famílias assentadas e a meta é atrair mais 200 mil famílias até 2008, com plantio de 400 mil hectares.

2.3.2. Soja

O agronegócio da soja gera empregos diretos para 4,7 milhões de pessoas em diversos segmentos, de insumos, produção, transporte, processamento e distribuição, e nas cadeias produtivas de suínos e aves. Trata-se de uma produção de 52 milhões de toneladas em 20 milhões de hectares, no total, diretos e indiretos, quatro hectares por pessoa. [5]

Nas últimas safras, graças aos bons resultados técnicos e aos preços pagos, muitos produtores têm conseguido rentabilidades superiores a 40%, em torno de R\$ 1.000/ha. A soja responde por quase metade da produção brasileira de grãos. Tem, portanto, grande participação tanto na macro como na microeconomia do país. Cerca de 70% é exportada, contribuindo com 11% da receita de exportações.

Uma estimativa da Abiove com base no Modelo de Geração de Empregos do BNDES para a Indústria de Óleos Vegetais, indica para o uso de B5, cerca de 1,5 M t, a geração de 200 mil empregos diretos e indiretos.

2.3.3. Dendê

São muito adequados dois exemplos apresentados por uma empresa com tecnologia avançada do Pará. Eles quantificam as operações em unidade de cultura extensiva e no esquema de assentamentos familiares com participação dos Governos Federal e Estadual.

2.3.3.1. Agropalma

A Agropalma possui cerca de 33 mil hectares plantados, com 25 mil em produção plena, opera com 3 mil empregos diretos. Em 2003, pagou mais de R\$ 100 milhões em impostos, salários, compras de insumos etc. Os valores não incluem os empregos e recursos indiretos. [5]

2.3.3.2. Programa Familiar

O modelo agrícola do Programa de Agricultura Familiar de Dendê, iniciada em 2002, é uma das raras experiências do Brasil, onde se tem a questão da inclusão social vinculada ao dendê. O projeto foi criado com o objetivo de se implantar um sistema de agricultura familiar, com cultura perene, capaz de gerar uma renda mensal às famílias da região do Alto Moju, a 105 km de Belém. A iniciativa tem o apoio do grupo Agropalma, da Prefeitura Municipal de Moju, do Basa e da Embrapa. [15] [27]

Hoje beneficia, diretamente, 150 famílias ligadas a duas associações daquela região: a Associação de Desenvolvimento Comunitário da Soledade e a Associação de Desenvolvimento Comunitário do Ramal Arauai.

Executivo estadual disponibilizou 7.500 hectares de terras, sendo três áreas de produção (com 500 hectares cada) e seis mil hectares destinados à reserva legal. Cada lote de dez hectares é administrado por um pequeno produtor. O programa beneficiará as famílias durante um ciclo produtivo de 25 anos.

Os resultados positivos foram possíveis em função de um arranjo estratégico, por meio do qual o produtor responde apenas com o ônus de 50% do custo de produção, relativo à parte do custeio financiado pelo FNO/Basa. O restante, como o preparo de área e o fornecimento de mudas, o qual custa cerca de R\$7,50 a muda, está sob a responsabilidade da Agropalma, a um custo zero para o pequeno agricultor. Assim, o produtor terá uma renda líquida mensal entre três e cinco

salários mínimos, a partir do período de colheita (4º ano), considerando uma produtividade de 19 ton/ha e um preço de venda de, no mínimo, R\$ 70,00/ ton.

Esse preço de venda foi garantido em 2002, por meio de um contrato de exclusividade de fornecimento de frutos de dendê entre o grupo Agropalma e os produtores da Associação de Desenvolvimento Comunitário do Ramal Arauai, responsáveis pelo cultivo do dendê na área 1 do programa. No período de pré-colheita, os produtores do programa receberam financiamento de dois salários mínimos bimestrais do Basa para manter os lotes em perfeitas condições técnicas.

Estima-se que numa área de 10 hectares, cada família obtenha uma renda bruta anual de R\$ 40.000,00. Caso o manejo seja realizado somente por ele e sua família, a renda líquida anual poderá ultrapassar os R\$ 15.000,00.

2.4. Aspectos tecnológicos

Como um sucedâneo do óleo diesel, o mercado potencial para o biodiesel é determinado pelo mercado do derivado de petróleo. A demanda atual de diesel no Brasil é da ordem de 45 milhões m³, dos quais cerca de 75% são destinados ao transporte. A importação de diesel corresponde a um dispêndio anual da ordem de US\$ 1 bilhão.

2.4.1. Processo produtivo

Existem duas maneiras de obtenção do biodiesel: através do processo de gaseificação da biomassa, não utilizado no Brasil, e do transesterificação de triglicerídeo com um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol) formando um éster mais um glicerol (glicerina), processo este que vem sendo empregado no Brasil.

O triglicerídeo reage com o álcool formando o glicerol (glicerina) e 3 ésteres, de acordo com o óleo vegetal utilizado neste processo, que podem ser iguais ou diferentes (os ésteres são formados conforme as características de cada “ramificação” do triglicerídeo). Embora esta reação tenha um alto rendimento (em torno de 90% segundo Yazaki) [28] a quantidade de éster depende muito da oleaginosa utilizada.

Evidentemente, utiliza-se catalisadores para acelerar esta reação, no caso o mais utilizado é a soda cáustica (NaOH), pois é muito solúvel em óleos vegetais.

Entretanto, é necessário controlar o teor de água envolvida no processo, pois seu excesso resulta em formação de sabão. Este método pode ser melhor compreendido observando a figura 2.5.

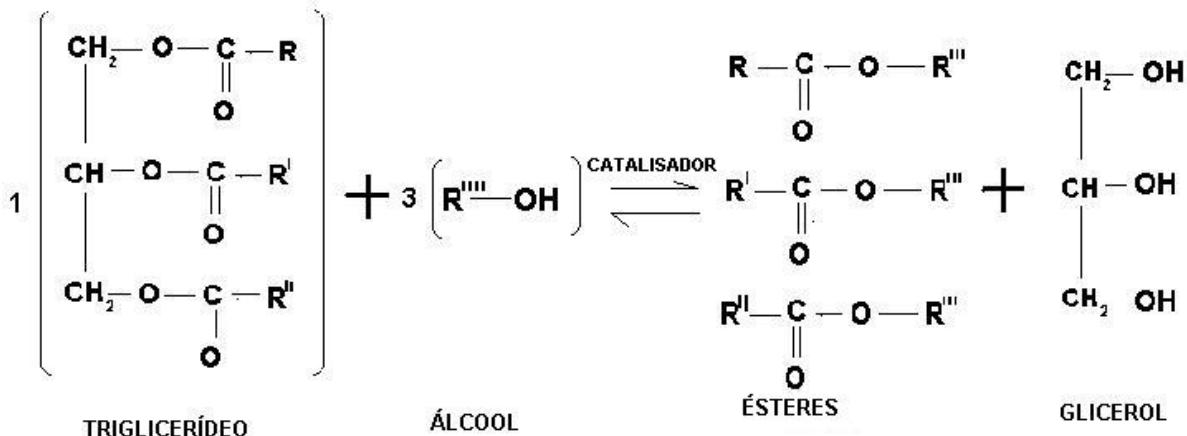


Figura 2.5 Diagrama da reação de transesterificação

Após a obtenção e purificação do óleo vegetal a partir das sementes ou amêndoas, geralmente mediante operações de Trituração, laminação, cozimento e extração do óleo bruto, pode ser efetuada sua conversão em biodiesel. De uma forma simplificada, as etapas típicas em um processo de transesterificação, no presente estado de desenvolvimento, são:

- Álcool e o catalisador são misturados em um tanque com um agitador;
- Óleo vegetal é colocado em um reator fechado contendo a mistura álcool/catalisador. O reator é usualmente aquecido à aproximadamente 70°C para aumentar a velocidade da reação, que leva entre 1 a 8 horas;
- Ao final da reação, quando se considera convertido um nível suficiente de óleo vegetal, os ésteres (biodiesel) e a glicerina são separados por gravidade, podendo ser adotadas centrífugas para agilizar o processo;
- O álcool em excesso é separado do biodiesel e da glicerina por evaporação sob baixa pressão (evaporação flash) ou por destilação. O álcool recuperado volta ao processo;
- O biodiesel deve ser purificado e em alguns casos, lavado com água morna para remover resíduos de catalisador e sabões.

A glicerina oriunda da reação é separada dos ésteres formados através da decantação pois apresenta um maior valor de massa específica. Logo em seguida é feita a recuperação do álcool ainda restante nos produtos resultando em biodiesel e glicerina, obviamente após seus respectivos processos de purificação e destilação.

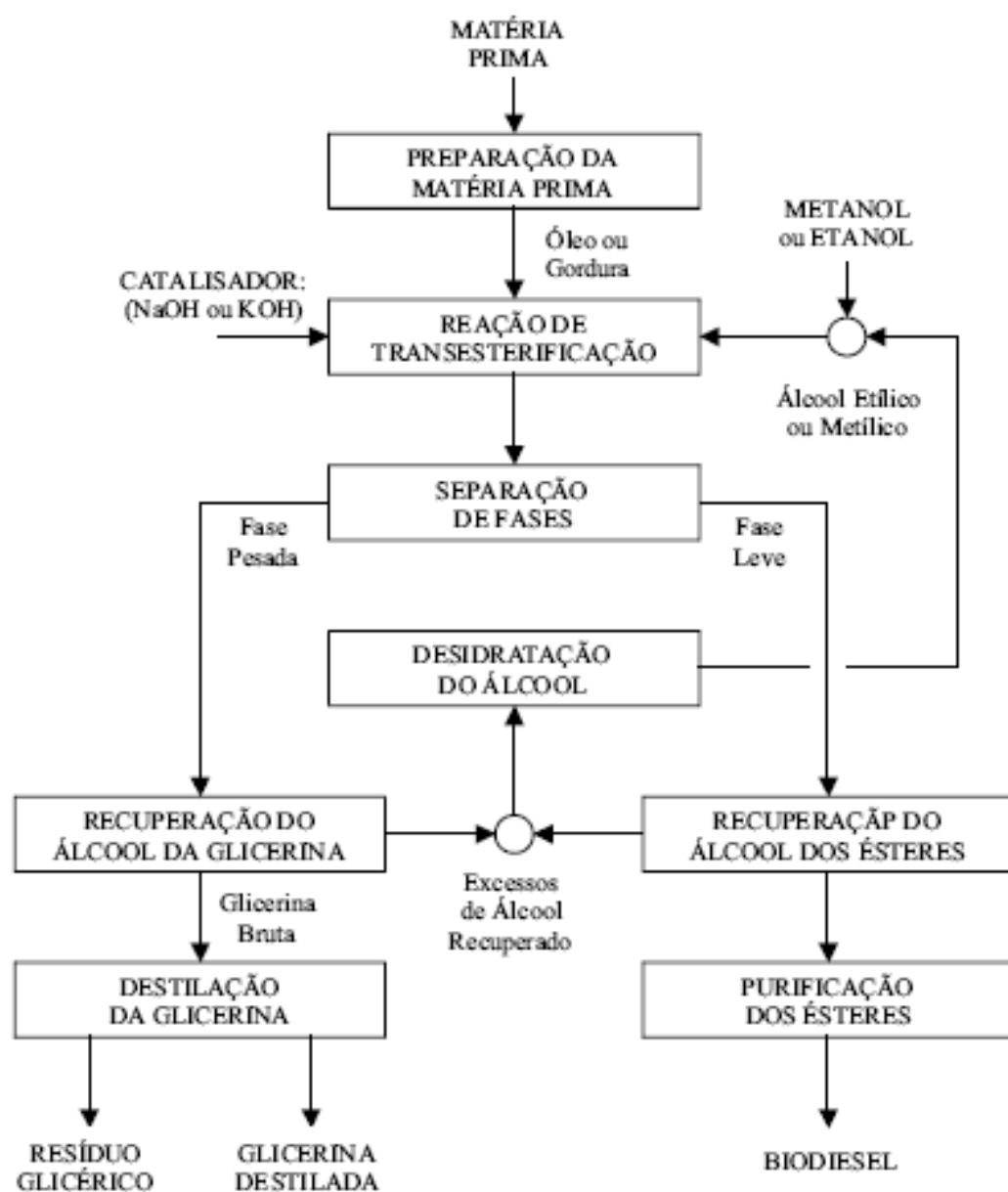


Figura 2.6 Processo simplificado de produção do biodiesel

2.4.2. Glicerol: mercados e perspectivas

O Glicerol é produzido por via química ou fermentativa. Tem uma centena de usos, principalmente na indústria química. Os processos de produção são de baixa complexidade tecnológica. Assim, torna-se viável o reaproveitamento deste resíduo advindo do processamento do biodiesel. [4]

As aplicações principais hoje são: síntese de resinas, ésteres (18%), aplicações farmacêuticas (7%), cosméticos (40%) e alimentício (24%). A demanda é crescente mais nos mercados de uso pessoal e higiene dental e alimentos, onde o produto tem maior pureza e valor. Corresponde a 64% do total. Em alimentos, a demanda de glicerina e derivados cresce em 4% ao ano.

Exemplos de aplicação:

- ✓ Faz parte da composição de cápsulas, supositórios, anestésicos, xaropes e emolientes para cremes, maquiagens e pomadas, antibióticos e anti-sépticos;
- ✓ Torna as fibras do tabaco mais resistentes;
- ✓ Amacia e aumenta a flexibilidade das fibras têxteis.
- ✓ Lubrifica máquinas processadoras de alimentos, fabricação de tintas e resinas, fabricação de dinamite;
- ✓ Umectante e para conservar bebidas e alimentos tais como refrigerantes, balas, bolos, pastas de queijo e carne, ração animal seca.

É possível que o glicerol venha a tomar parte dos mercados de sorbitol, principal matéria-prima destas aplicações, se os preços caírem nos próximos anos em função de superprodução, esperada pela adoção do biodiesel, com demanda estimada em 300 mil t por ano.

Outro mercado muito importante, e exclusivo, que provavelmente vai se desenvolver com a maior oferta de glicerol, é a aplicação deste para a síntese de moléculas de alto valor agregado. Entre estas está o PDO (propanodiol), a partir de fermentação do glicerol, para uso em plásticos, matéria-prima do futuro para fermentações de: 1,3 propanodiol e dihidroxiacetona.

2.5. Estudo das características de combustão do biodiesel

2.5.1. Emissões

Como o biodiesel é um combustível com maior grau de pureza que o diesel, seus produtos de combustão são praticamente isentos de óxidos metálicos encontrados nos derivados de petróleo, além de emitir uma baixíssima quantidade de compostos sulfurosos, responsáveis pela posterior formação de ácidos, através da reação com condensados da água. Logo, o biodiesel apresenta boas características para sua utilização em geradores de vapor, já que este tipo de processo requer longos períodos de operação podendo acarretar corrosão na chaminé.

Embora o biodiesel apresente bons valores de emissões de monóxido de carbono e outros óxidos de enxofre, sua emissão de óxidos de nitrogênio são bastante elevadas se comparadas com o diesel derivado de petróleo. Estes compostos nitrogenados são bastante danosos à camada de ozônio, contribuindo com sua destruição.

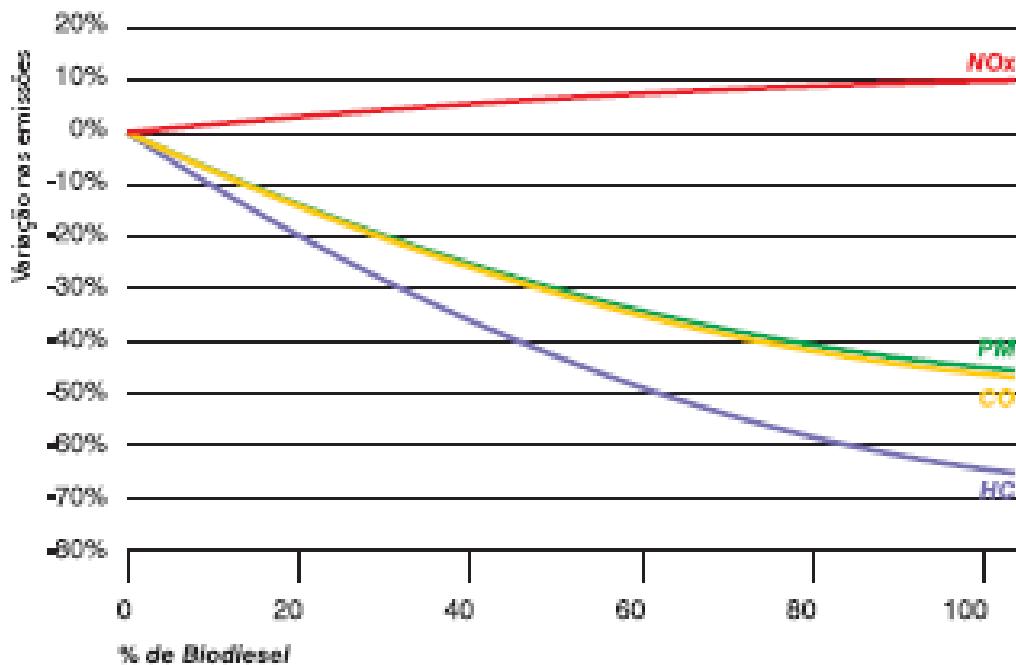


Figura 2.7 Gráfico de emissões da mistura de biodiesel com petrodiesel [15]

A seguir serão apresentadas algumas análises feitas utilizando o biodiesel em motores de combustão interna, a fim de estabelecer critérios e parâmetros para emissões oriundos do processo de combustão do diesel vegetal. [29]

A emissão de hidrocarbonetos proveniente do biodiesel de óleo de soja é, de um modo geral, inferior ao diesel convencional. Por exemplo, em motores turbinados que utilizam trocadores de calor para aquecer o ar de admissão em baixas cargas, ocorre uma redução nominal de 40%. Além disso, ao serem comparadas as emissões de fumaça, os menores índices corresponderam ao consumo de óleo transesterificado, principalmente acima de 4000 rpm.

No caso da combustão do biodiesel, acredita-se que a emissão de aldeídos pode atingir valores 5 a 10 vezes maiores que os obtidos na combustão do diesel. Apesar disso, o número de mutações no teste de Ames foi em média três vezes menor para o óleo vegetal do que para o óleo diesel.

O odor proveniente da queima dos ésteres de óleo vegetal, sensivelmente diferente daquele do óleo diesel, tem sido considerado como aceitável por algumas pessoas e enjoativo por outras. Por outro lado, a ausência de enxofre confere ao biodiesel uma grande vantagem.

Recentemente, foram realizados testes na frota de transporte coletivo de Curitiba. O biodiesel de óleo de soja foi misturado ao diesel convencional na proporção de 20%, apresentando uma redução média de fumaça em torno de 35%.

Quanto à emissão de poluentes a partir de biodiesel de óleo usado em frituras, Mittelbach e Tritthart [12] observaram que os níveis de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e materiais particulados foram inferiores ao diesel. No teste com motor estacionário e principalmente, com o motor em movimento, houve redução de 50% desses poluentes. Embora a emissão de gases nitrogenados tenha sido superior, tal comportamento não foi diferente daquele observado para outros tipos de ésteres provenientes de matérias-primas não utilizadas previamente em frituras.

Os principais compostos policíclicos aromáticos presentes nas emissões foram o fluoranteno e o pireno, que constituíram cerca de 70% do total analisado. Porém, foi também detectada a presença de outros componentes minoritários, como o criseno, benzos, pirenos, entre outros. No que tange a estes compostos, as emissões oriundas do biodiesel de óleo de fritura foram aproximadamente 28% superiores às do óleo diesel, mas, de acordo com os autores, não atingiram níveis considerados como críticos pela legislação europeia.

Testes com biodiesel de óleo usado em frituras foram realizados em ônibus do transporte coletivo da cidade de Curitiba, pela Prefeitura Municipal através da Companhia de Urbanização (URBS). O ônibus da marca Mercedes-Benz com motor 355 turbinado e potência de 238 CV percorreu o total de 915 km em condições normais de trabalho, numa mistura B20. O teste apresentou desempenho normal, exceto por um leve odor de óleo de frituras expelido pelo escapamento. A média de consumo de biocombustível (2,1 km/l) esteve na faixa de normalidade para veículos desse porte. A maior diferença verificada foi com relação a emissão de fumaça, cuja redução média foi 41,5%, medido em escala Bosch.

Na tabela 2.11 é apresentado as análises efetuadas pela Empresa Filtroil (Campina Grande do Sul, PR), que verificou que o biodiesel de óleo de fritura apresentou maior viscosidade e densidade que o óleo diesel. Entretanto, essa diferença foi significativamente reduzida na mistura B20, cujas características apresentaram-se muito próximas às do óleo diesel puro, inclusive em relação aos seus pontos de fulgor e de combustão. Além disso, esse valor situa-se abaixo ao dos valores dos óleos combustíveis, comumente utilizado nos processos de geração de vapor. Conforme já previsto anteriormente, a ausência de sedimentos revelou que o biodiesel estava livre de impurezas sólidas. [30]

Tabela 2.11 Comparação dos testes em ônibus de transporte coletivo

Características	Biodiesel puro	Diesel puro	Mistura B20	Normas
Viscosidade (cSt, 40°C)	5,14	3,05	3,54	ABNT MB-293
Ponto de fulgor (°C)	151	38	34	ABNT MB-50
Ponto de combustão (°C)	191	45	43	ABNT MB-50
Densidade (g/cm³)	0,8828	0,8359	0,8449	NBR -7148
Sedimentos	negativo	negativo	negativo	ABNT MB-38
Cloreto e sulfatos	negativo	negativo	negativo	NBR-5779
Umidade (ppm)	1390	58	350	NBR-5755

2.5.2. Balanço Energético

Estudos de custos energéticos conduzidos para o etanol no contexto brasileiro, indicam que para cada unidade de energia investida na agroindústria canavieira, são produzidas cerca de 8,3 unidades de energia renovável. [4]

Para o biodiesel foram efetuadas diversas avaliações do balanço energético considerando o uso de soja e colza como matéria-prima, nas condições européias e americanas, indicando relações produção/consumo de energia sempre entre 2 e 3.

Para as condições brasileiras, alguns estudos precursores do balanço energético na produção de biodiesel foram realizados nos anos 80. Avaliando o biodiesel de soja, Goldemberg determinou uma relação produção/consumo de 1,42. Uma avaliação preliminar mais recente para o biodiesel de soja, sem ter em conta os subprodutos, estimou uma demanda energética de 30 MJ por litro de biodiesel, resultando em uma relação produção/consumo de 1,4311. Apesar disso, a soja se mostra uma boa oportunidade neste momento pois seu preço está em queda recentemente atuando com um preço em torno de U\$ 14,00.

Para o dendê e a macaúba, Martins e Teixeira [31] apresentaram, respectivamente, 5,63 e 4,20, confirmando o potencial das palmáceas como matéria-prima, tanto pela maior produtividade como pelos resíduos com valor energético.

2.5.3. Análise química/ energética

Para converter óleos vegetais em combustíveis, o processo predominante é a transesterificação em meio alcalino, onde se fazem reagir os triglicérides com um álcool, produzindo glicerina e ésteres dos ácidos graxos do óleo vegetal. [4]

Os processos para conversão de óleos vegetais em combustíveis podem usar transesterificação ou craqueamento. A transesterificação, por sua vez, pode empregar catalisadores alcalinos, ácidos ou enzimáticos, e etanol ou metanol. Com as tecnologias atuais, pode-se concluir que a transesterificação alcalina é a rota mais interessante, embora haja desenvolvimentos em processos térmicos. A transesterificação etílica apesar de mais complexa que a rota metílica, poderá atingir níveis equivalentes de qualidade. A matéria-prima é importante na decisão sobre o uso de catálise ácida ou básica. A catálise enzimática, que promete algumas vantagens, como menos subprodutos, está em fase inicial de desenvolvimento.

2.5.4. Poder carburante dos óleos vegetais

A avaliação da qualidade carburante de óleos vegetais requer a determinação analítica de, principalmente, seu poder calorífico, índice de cetano, curva de destilação, viscosidade e ponto de névoa. Do poder calorífico do (bio)combustível depende do trabalho máximo possível através da combustão, enquanto o índice de cetano define o poder de autoinflamação e combustão do óleo. Comparados ao óleo diesel, os óleos vegetais apresentam menor calor de combustão e índice de cetano similar, ao redor de 40 e valores de viscosidade bastante elevados, podendo excedê-lo em até 100 vezes, como no caso do óleo de mamona. [32]

Os óleos combustíveis derivados do petróleo são estáveis à temperatura de destilação, mesmo na presença de excesso de oxigênio. Ao contrário, nos óleos vegetais que contêm triacilgliceróis de estrutura predominantemente insaturada, reações de oxidação podem ser observadas até à temperatura ambiente e o aquecimento próximo a 250°C ocasiona reações complementares de decomposição térmica, cujos resultados podem inclusive levar à formação de compostos poliméricos mediante reações de condensação.

A presença de compostos poliméricos aumenta a temperatura de destilação e o nível de fumaça do motor, diminui a viscosidade do óleo lubrificante e acarreta diminuição da potência pela queima incompleta de produtos secundários, o que não é observado com o biodiesel, cuja mistura é destilada integralmente a temperaturas inferiores a 350°C. [33]

Pode-se dizer que o biodiesel tem as seguintes características:

- ✓ É virtualmente livre de enxofre e aromáticos;
- ✓ Alto número de cetano;
- ✓ Teor médio de oxigênio em torno de 11%;
- ✓ Maior viscosidade e maior ponto de fulgor que o diesel convencional.

O biodiesel necessita de algumas características técnicas que podem ser consideradas imprescindíveis: reação de transesterificação deve ser completa, acarretando ausência total de ácidos graxos remanescentes e de alta pureza, contendo apenas traços de glicerina, catalisador residual ou álcool excedente da reação.

A reação de síntese, geralmente empregada a nível industrial, utiliza uma razão molar óleo:álcool de 1:6 na presença de 0,4% de hidróxido de sódio ou de potássio, porque o meio básico apresenta melhor rendimento e menor tempo de reação do que o meio ácido. Por outro lado, o excesso de agente transesterificante (álcool primário) faz-se necessário devido ao caráter reversível da reação. A Tab. 2.12 apresenta as principais características físico-químicas do biodiesel de várias origens e do petrodiesel, enquanto a Tab. 2.13 apresenta algumas características complementares usualmente atribuídas ao biodiesel, em comparação com o diesel convencional. [29]

Tabela 2.12: Características físico-químicas do biodiesel de várias espécies vegetais e do diesel

Características	Origem do biodiesel					Óleo
	Mamona	Babaçu	Dendê	Algodão	Piqui	diesel*
Poder calorífico (kcal/kg)	9046	9440	9530	9520	9590	10824
Ponto de névoa (°C)	-6	-6	6	nd	8	1
Índice de cetano	nd	65	nd	57,5	60	45,8
Densidade a 20°C (g/cm³)	0,9190	0,8865	0,8597	0,8750	0,8650	0,8497
Viscosidade a 37,8°C (cSt)	21,6	3,9	6,4	6,0	5,2	3,04
Inflamabilidade (°C)	208	nd	nd	184	186	55
Ponto de fluidez	-30	nd	nd	-3	5	nd
Destilação a 50% (°C)	301	291	333	340	334	278
Destilação a 90% (°C)	318	333	338	342	346	373
Corrosividade ao cobre	0	0	0	0	0	2
Teor de cinzas (%)	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,014
Teor de enxofre (%)	0	nd	nd	0	0	0,24
Cor (ASTM)	1,0	0	0,5	1,0	1,0	2,0
Resíduo de carbono						
Conradson (%)	0,09	0,3	0,02	nd	0,01	0,35

Tabela 2.13 Características e propriedades complementares do biodiesel

Características	Propriedades Complementares
Características químicas apropriadas	Livre de enxôfre e compostos aromáticos, alto número de cetanos, ponto de combustão apropriado, excelente lubricidade, não tóxico e biodegradável
Ambientalmente benéfico	Nível de toxicidade compatível ao sal ordinário, com diluição tão rápida quanto a do açúcar (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)
Menos poluente	Reduz sensivelmente as emissões de (a) partículas de carbono (fumaça), (b) monóxido de carbono, (c) óxidos sulfúricos e (d) hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
Economicamente competitivo	Complementa todas as novas tecnologias do diesel com desempenho similar e sem a exigência da instalação de uma infraestrutura ou política de treinamento
Reduz aquecimento global	O gás carbônico liberado é absorvido pelas oleaginosas durante o crescimento, o que equilibra o balanço negativo gerado pela emissão na atmosfera
Economicamente atraente	Permite a valorização de sub-produtos de atividades agro-industriais, aumento na arrecadação regional de ICMS, aumento da fixação do homem no campo e de investimentos complementares em atividades rurais
Regionalização	Pequenas e médias plantas para produção de biodiesel, podem ser implantadas em diferentes regiões do país, aproveitando a matéria prima disponível em cada local

Freedman [34] e colaboradores demonstraram que a alcoólise com metanol é tecnicamente mais viável do que a alcoólise com etanol, particularmente se esse corresponde ao etanol hidratado, cujo teor em água (4-6%) retarda a reação. O uso de etanol anidro na reação efetivamente minimiza este inconveniente, embora não implique em solução para o problema inerente à separação da glicerina do meio de reação que, no caso da síntese do éster metílico, pode ser facilmente obtida por simples decantação.

Uma série de óleos etanolisados de composição química variada, cujas características físico-químicas encontram-se na tabela 2.12, foram testados nesta etapa do Programa Nacional de Óleos Vegetais. Os resultados indicaram que as propriedades dos ésteres foram semelhantes às do óleo diesel, exceto pelo ponto de inflamabilidade. Enquanto o ponto de fulgor indica a temperatura mínima na qual o óleo forma com o ar uma mistura inflamável, o ponto de inflamação representa a temperatura na qual o óleo queima durante um tempo mínimo de cinco segundos. Sendo assim, esta propriedade também se reflete no mecanismo de atomização do

jato de combustível, cuja eficiência dependerá dos queimadores utilizados na câmara de combusão e do processo de combustão.

Verificou-se também que algumas características do biodiesel de óleo de mamona foram totalmente diferentes daquelas das demais, particularmente em relação à viscosidade. Tal característica foi atribuída à presença de um maior teor de hidroxi-ácidos no óleo de mamona, cuja ocorrência se reflete em outras propriedades coligativas como a densidade e a viscosidade do óleo vegetal. Quanto às propriedades físico-químicas de ésteres etílicos, em comparação com aquelas dos respectivos óleos vegetais de origem, a reação de transesterificação diminuiu o ponto de névoa do biocombustível, assim como sua densidade, cor, viscosidade e índice de cetano. O poder calorífico permaneceu relativamente constante, indicando pouca ou nenhuma influência da reação sobre esta propriedade, enquanto que a volatilidade aumentou conforme os dados extraídos das respectivas curvas de destilação.

À exceção do índice de cetano, a reação de transesterificação produziu um efeito favorável sobre todas as propriedades fisico-químicas do óleo, reduzindo inclusive o seu impacto ambiental conforme demonstrado pelos valores assumidos pelo resíduo de carbono Conradson.

A transesterificação ocorre em uma seqüência de três subreações consecutivas e reversíveis, com di e monoglicerídeos como intermediários, e as proporções estequiométricas são três moles de álcool por mol de triglicerídeo, óleo vegetal. Entretanto, algum excesso de álcool é necessário para aumentar o rendimento da conversão e permitir a posterior separação dos ésteres do glicerol. [4]

A transesterificação etílica é significativamente mais complexa que a metílica. O aumento do tamanho da cadeia do álcool acarreta uma maior sofisticação ao processo e parte dos parâmetros do processo deve ser revista. Devido ao caráter azeotrópico do etanol, o processo de recuperação de álcool é também mais complexo e dispendioso. A possibilidade de utilização de álcool etílico na produção de biodiesel é de alto interesse, não apenas por ser menos agressivo ambientalmente que o álcool metílico, como também considerando o volume expressivo de etanol produzido no Brasil, de um modo sustentável e a preços competitivos. Não obstante, alguns afirmam que o processo etílico já estaria pronto para operar comercialmente. A tabela a seguir apresenta uma comparação entre ésteres metílico e etílico. [15]

Tabela 2.14 Propriedades dos éster metílico e etílico

Propriedade	Éster metílico	Éster etílico
Conversão (óleo → biodiesel)	97,5%	94,3%
Glicerina total no biodiesel	0,87%	1,40%
Viscosidade	3,9 a 5,6 cSt a 40°C	7,2% superior ao éster metílico
Potência frente ao diesel %	2,5% menor	4% menor
Consumo frente ao diesel %	10% maior	12% maior

A transesterificação pode ser conduzida na presença de catalisadores ácidos, básicos e enzimáticos, simples ou complexos. O emprego de catalisadores ácidos, dentre os quais o ácido sulfúrico é o mais empregado, leva a cinética muita lenta de reação quando comparada ao uso de catalisadores básicos. Já a catálise básica por sua vez leva a excelentes rendimentos, muitas vezes superiores a 90%. Contudo, seu emprego apresenta como inconvenientes a grande sensibilidade à presença de água e ácidos graxos livres, que mesmo em teores bastante reduzidos afetam o rendimento da reação, consomem o catalisador e levam à formação de géis e sabões. Tais exigências dificultam a utilização de óleos de frituras usados, cujo teor de ácidos graxos normalmente ultrapassam o índice 2 de acidez. Além disso, a separação do biodiesel do restante reacional é uma tarefa complexa e exige várias etapas de separação e neutralização, para atingir a especificação correta.

Um dos parâmetros mais importantes na especificação do biodiesel é exatamente o teor máximo de glicerina, de 0,5% na proposta brasileira, e de 0,25% nas normas americanas e européias, que deve ser baixo para evitar a formação de depósitos na câmara de combustão, e a produção de teores elevados de acroleína nos gases de escapamento.

O emprego de enzimas como catalisadores oferece vantagens frente aos catalisadores ácidos e básicos, como a menor sensibilidade à presença de água, recuperação do catalisador e separação do biodiesel. No entanto, apresentam altos custos.

3. GERADOR DE VAPOR

3.1. Definição

Os geradores de vapor, também chamados de caldeiras, são equipamentos que transformam a água em estado líquido para o estado de vapor (superaquecido ou saturado) através da queima de combustíveis ou de outras fontes de calor (energia elétrica, calor residual, energia nuclear entre outras).

A faixa de temperaturas até 170 °C utiliza vapor saturado até 10 kgf/cm², cuja temperatura de saturação é 183 °C. Nesta faixa está a grande maioria de pequenos e médios consumidores de vapor. Maiores temperaturas são possíveis a custa do aumento da pressão de saturação, o que implica num maior custo de investimento devido à necessidade de aumento da resistência mecânica e requisitos de fabricação e inspeção do gerador de vapor. O limite da temperatura de vapor saturado é o ponto crítico, a 374 °C e 218 atmosferas.

Não é vantajoso utilizar-se vapor superaquecido para processos de aquecimento a temperaturas mais altas, já que se perde a facilidade de controle de temperatura e se diminui drasticamente a disponibilidade de energia por unidade de massa ou volume de vapor. Vapor superaquecido é utilizado e produzido para geração de energia elétrica ou mecânica em ciclos termodinâmicos, e neste caso a limitação de temperaturas de trabalho fica por conta dos materiais de construção empregados. Na indústria, pode-se arbitrar uma faixa representativa de utilização de geradores de vapor em relação à pressão de trabalho. Considera-se baixa pressão até 10 kgf/cm², média pressão de 11 a 40 kgf/cm² e alta pressão para valores maior que 40 kgf/cm².

Grandes caldeiras, as quais são utilizadas tanto para geração própria de energia elétrica quanto para processos de aquecimento, estão limitadas a pressões da ordem de 100 kgf/cm². Existem caldeiras de maiores pressões, destinadas às grandes centrais termoelétricas ou complexos industriais, representando poucas unidades se comparado com as milhares de pequenas caldeiras em operação. [35] [36]

3.2. Classificação

As caldeira podem ser classificadas da seguinte forma: [36]

3.2.1. Flamotubulares

Também denominadas de tubos de fumaça, é basicamente composto por um vaso de pressão por onde passam tubos, os quais que estão mergulhados em água e dentro de um recipiente isolado termicamente, com gases de combustão, escoando internamente.

Constituem-se da grande maioria das caldeiras de capacidades média ou baixa (da ordem de até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 bar), chegando algumas vezes a 15 ou 20 bar. Dessa forma, sua aplicação está limitada a pequenos aparelhos para a indústria: criação de atmosferas neutras, lavanderias de grande dimensão, limpeza e esterilização. Outra aplicação é servir como GV auxiliar em centrais termoelétricas, como a de Sines em Portugal, com capacidade de vaporização de 23 t/h.

As caldeiras flamotubulares horizontais constituem-se de um vaso de pressão cilíndrico horizontal, com dois tampos planos (os espelhos) onde estão afixados os tubos e a fornalha. Caldeiras modernas tem diversos passes de gases, sendo mais comum uma fornalha e dois passes de gases.

A saída da fornalha é chamada câmara de reversão e pode ser revestida completamente de refratários ou constituída de paredes metálicas molhadas. Câmara de reversão molhada produz melhores rendimentos térmicos pela diminuição de perdas de calor ao ambiente, porém são mais complicadas construtivamente e consequentemente mais caras.

As fornalhas das caldeiras flamotubulares devem ser dimensionadas para que a combustão ocorra completamente no seu interior, para não haver reversão de chama que vá atingir diretamente os espelhos, diminuindo a vida útil da caldeira. A fornalha também se constitui de um corpo cilíndrico e está completamente imersa em água. Pela sua própria concepção, caldeiras flamotubulares modernas só queimam combustíveis líquidos ou gasosos, devido à dificuldade de se instalar grelhas para combustíveis sólidos. Para queima de combustíveis sólidos em caldeiras de pequena capacidade utilizam-se as caldeiras mistas.

Desde as primeiras caldeiras do século 17, até os modelos atuais, as caldeiras flamotubulares passaram por sucessivos desenvolvimentos até a atual concepção de uma fornalha e mais dois passes de gases de combustão. A grande aceitação deste tipo para pequenas capacidades está associada principalmente no seu baixo custo de construção, em comparação com uma aquatubular de mesma capacidade. Por outro lado, o grande volume de água que acondiciona limita, por questões de segurança, as pressões de trabalho e a qualidade do vapor na condição de vapor saturado.

Uma caldeira flamotubular moderna possui câmara de reversão molhada e fornalha corrugada. A água acumulada no corpo da caldeira funciona como um pulmão de vapor, respondendo a súbitas flutuações de demanda com pouca queda de pressão de vapor, sendo adequada para aplicações onde o consumo é variável.

A eficiência térmica destas caldeiras está na faixa de 80 a 90%, sendo difícil se atingir maiores valores pela dificuldade de se acrescentar equipamentos adicionais de recuperação de calor.

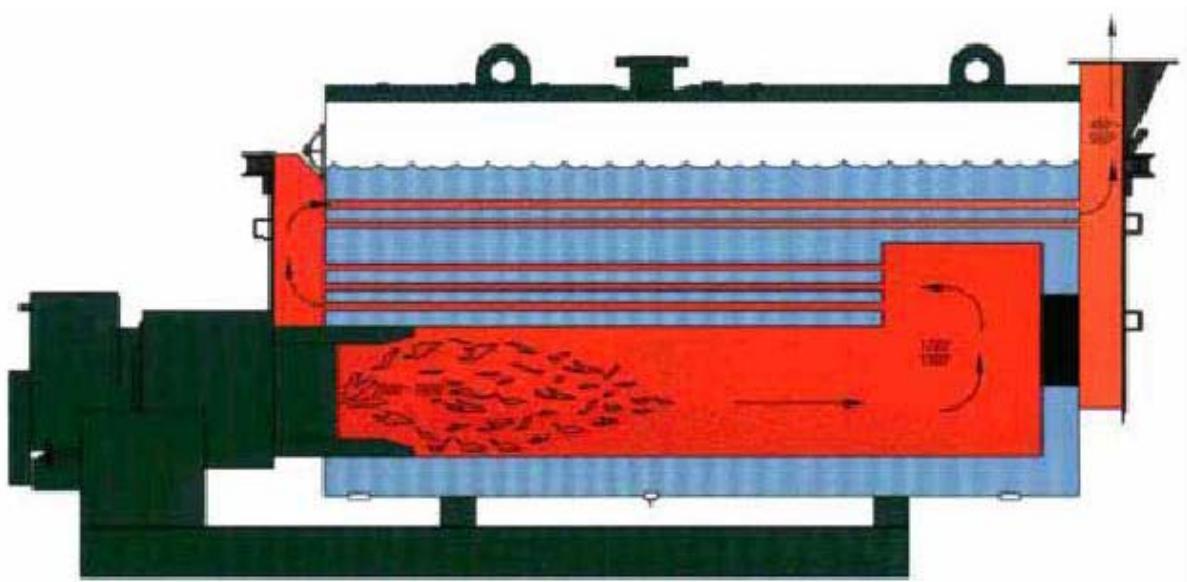


Figura 3.1 Esquema de funcionamento da caldeira flamotubular

3.2.2. Aquatubulares

Neste tipo a água escoa internamente aos tubos trocando calor com os gases de combustão que por sua vez passam por fora dos tubos. Dessa forma, não há limite de capacidade, o que não acontece com as flamotubulares, pois nestas quanto maior o vaso e a pressão de trabalho mais robusto o vaso terá que ser. [37]

Além disso, flamotubulares apresentam algumas restrições quanto a geração de vapor superaquecido, pois como é composto de um vaso de pressão onde coexiste água em estado líquido e vapor, torna-se complicado obter um vapor que esteja acima da saturação, ao passo que nos aquatubulares não existe esta restrição. Entretanto, as caldeiras flamotubulares são mais compactas e apresentam uma maior facilidade construtiva consequentemente um preço inferior. Portanto, a escolha da caldeira depende muito da aplicação.

Suas principais aplicações se resumem em: produção de eletricidade ou até mesmo de recuperação de calor, como o GV desenvolvido pela Siemens Power Generation Group em associação com a Babcock Borsig Power, através de um ciclo combinado Gás-Carvão; propulsão mecânica; fonte de calor para processos industriais diversos; aproveitamento energético dos efluentes da industria do papel.

Os tubos podem ser retos ou curvados. As primeiras caldeiras aquatubulares utilizavam tubos retos, solução hoje completamente abandonada, apesar de algumas vantagens, como a facilidade de limpeza interna dos tubos. A caldeira de tubos curvados, interligando os balões, proporcionam arranjo e projeto de câmaras de combustão completamente fechada por paredes de água, com capacidades praticamente ilimitadas. Dada a maior complexidade construtiva em relação às caldeiras flamotubulares, as aquatubulares são preferidas somente para maiores capacidades de produção de vapor e pressão, exatamente onde o custo de fabricação do outro tipo começa a aumentar desproporcionalmente.

Em relação ao modo de transferência de calor no interior de caldeira existem normalmente duas secções: a secção de radiação, onde a troca de calor se dá por radiação direta da chama aos tubos de água, os quais geralmente delimitam a câmara de combustão e a secção de convecção, onde a troca de calor se dá por convecção forçada, dos gases quentes que saíram da câmara de combustão atravessando um banco de tubos de água.

Não há limite físico para capacidades. Encontram-se hoje caldeiras que produzem até 750 t/h de vapor com pressões até 3450 atm. Para aplicação industrial, as capacidades variam da ordem de 15 a 150 t/h, com pressões até 90 a 100 bar.

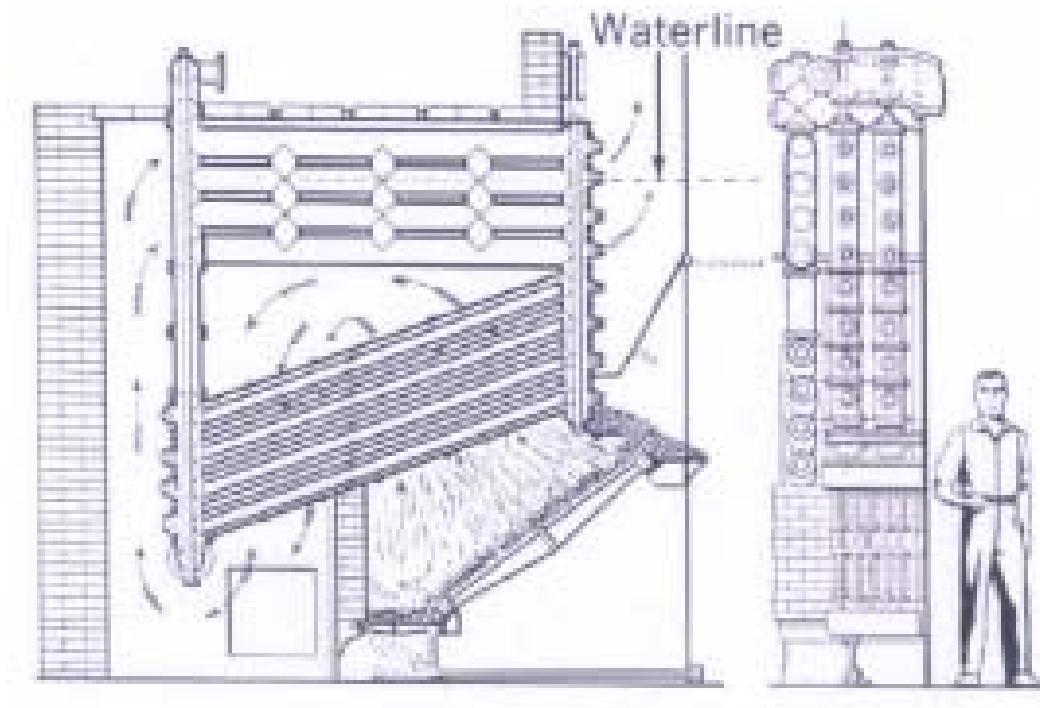


Figura 3.2 Esquema de funcionamento da caldeira aquatubular

3.2.3. Caldeiras mistas

A necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras de pequena capacidade fez surgir uma solução híbrida que são as caldeiras mistas. Basicamente são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água. Na antecâmara se dá a combustão de sólidos através de grelhas de diversos tipos possibilitando assim o espaço para os maiores volumes da câmara de combustão necessários a combustão de sólidos, principalmente em grandes tamanhos, tais como lenha em toras, cavacos, etc, além da possibilidade de retirada de cinzas por baixo das grelhas (o cinzeiro).

Estas não reúnem todas as vantagens da aquatubular, como a segurança, maior eficiência térmica, porém, é uma solução prática e eficiente quando se tem

disponibilidade de combustível sólido a baixo custo. Possibilidade ainda a queima de combustível líquido ou gasoso, com a instalação de queimadores apropriados.

O seu rendimento térmico é menor que o das flamotubulares, devido a perda de calor pela antecâmara. Dificilmente as paredes frontais e traseira são revestidas de tubos, devido a dificuldade construtiva pelo pequeno tamanho da caldeira.

3.2.4. Caldeiras de recuperação de calor

Alguns processos de fabricação geram gases de processo ou de combustão com temperatura alta o suficiente para se recuperar calor destes. Como exemplo, gases de alto forno ou gases de processos de fabricação de amônia, ou produtos de combustão de incineradores e fornos de alta temperatura. Neste caso, a caldeira pode ser tanto aquatubular como flamotubular, valendo ainda a escolha pela capacidade de produção de vapor, optando-se pela aquatubular para maiores capacidades.

3.3. Componentes principais

Caldeiras flamotubulares são geralmente equipamentos montados em base única e poucos acessórios além dos necessários são acrescentados. Grandes geradores de vapor podem possuir mais componentes além dos que já foram citados.

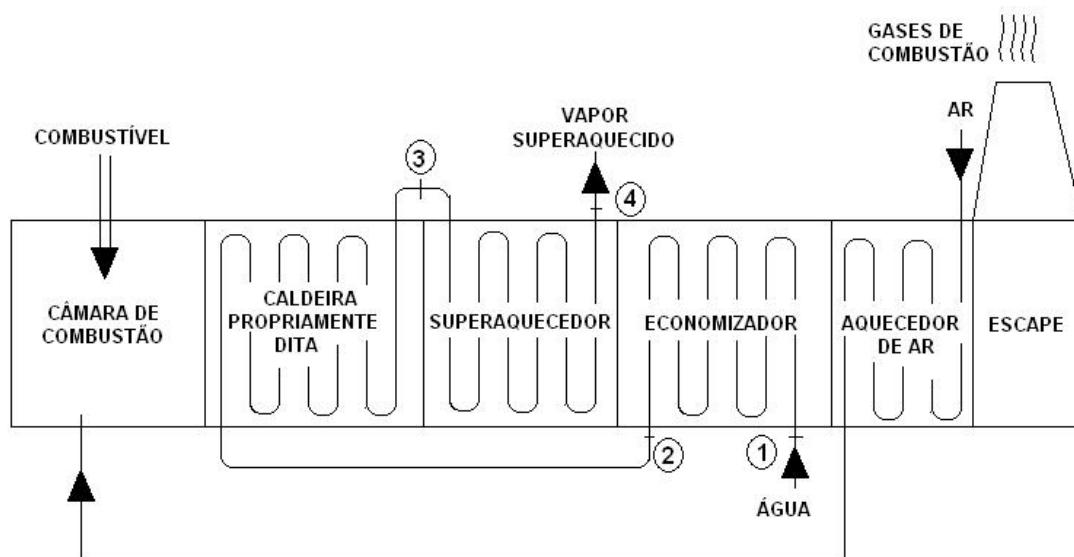


Figura 3.3 Representação dos componentes do gerador de vapor [35]

Os principais componentes são:

➤ **Câmara de combustão**

Na câmara de combustão é onde ocorre o processo de queima do combustível, óleo ou gás, na realidade a combustão se inicia na fornalha e termia na câmara, porém muitas vezes a fornalha e a câmara se confundem sendo um só elemento.

➤ **Economizador**

É um trocador de calor gás-líquido que, através do calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira, aquecem a água de alimentação até a temperatura de saturação e em seguida vai para a caldeira propriamente dita. O aproveitamento do calor sensível dos gases traz um aumento de eficiência térmica do equipamento.

Como o fluido está em estado líquido, este componente situa-se um pouco mais distante da câmara de combustão, pois proporcionam um maior valor para o coeficiente de troca de calor quando comparados com os gases.

Devido ao baixo coeficiente de troca de calor por convecção no lado dos gases, geralmente os economizadores são compostos por tubos aletados. Em relação à instalação, devem estar localizados após a última superfície de convecção do gerador de vapor. São basicamente usados em médias e grandes instalações. O custo adicional comparado com o ganho de rendimento térmico não viabiliza a utilização em pequenas caldeiras.

➤ **Caldeira Propriamente dita**

Responsável pela troca de calor entre os gases e o fluido saturado. Nesta parte praticamente não há variação de temperatura, já que só ocorre a mudança de fase.

➤ **Superaquecedor**

Aqui ocorre o aquecimento do vapor saturado em um trocador de calor instalado dentro da própria caldeira, que foi extraído do tubulão superior, na caldeira propriamente dita, em vapor superaquecido. Os superaquecedores podem ser de natureza apenas convectiva, ou seja, recebe calor somente por convecção térmica, ou de irradiação, e neste caso, estão localizados dentro da própria câmara de combustão, ou na saída desta, de maneira que receba calor por radiação da chama ou da grelha.

A temperatura de superaquecimento varia com a carga da caldeira, já que a troca de calor não é acompanhada de mudança de fase como na vaporização.

Equipamentos de convecção aumentam a temperatura de superaquecimento com o aumento da carga da caldeira, pois os coeficientes de troca de calor, que geralmente apresentam baixos valores, tendem a aumentar com as maiores velocidades dos gases e também do vapor dentro dos tubos.

Superaquecedores de irradiação tem a temperatura de saída diminuída com o aumento da produção de vapor. A irradiação de calor varia pouco com a carga de produção de vapor. Em baixa carga, a velocidade do vapor é mais baixa e consequentemente os coeficientes de transferência de calor também.

Para manter a temperatura de saída do superaquecedor constante, projetaram-se unidades mistas com secções de radiação e convecção.

O controle fino da temperatura de superaquecimento pode ser feito de diversas maneiras:

- ✓ Controle da taxa de radiação:

Através do controle da posição angular dos queimadores de óleo ou gás, direcionando a chama radiante ao superaquecedor, ou controle da capacidade de combustão dos queimadores mais próximos ao superaquecedor.

- ✓ Desvio de gases passando pelo superaquecedor:

Através de uma válvula de desvio regulável automaticamente.

- ✓ Utilização de dessuperaquecedor (ou atemperador):

Na saída do superaquecedor, o qual através da injeção direta de água líquida controla a temperatura de saída do vapor superaquecido. Neste caso o superaquecedor tem que ser projetado para temperatura de saída maior que o necessário, a fim de permitir margem de controle. A temperatura de saída do atemperador é então controlada pela vazão de água injetada.

O atemperador é atualmente o método mais utilizado, pois proporciona ótimo controle e rápida resposta com a variação da carga, e independe do tipo de superaquecedor, seja de radiação, de convecção ou misto.

➤ Aquecedor de ar

Os pré-aquecedores de ar elevam a temperatura do ar de combustão antes de sua entrada nos queimadores ou fornalha, através da troca de calor com os gases de exaustão da caldeira. Além da vantagem de aumento de rendimento térmico por diminuição das perdas nos gases de exaustão, o ar pré-aquecido melhora o desempenho dos queimadores ou da fornalha, pois aproveita o calor residual dos gases de combustão. Ar pré-aquecido aumenta a estabilidade de chama, a temperatura interna da câmara de combustão, aumentando, portanto, a troca de calor por radiação, permitindo a utilização de menor excesso de ar. O fato de se utilizar também o calor sensível dos gases de combustão não impede seu uso conjunto com o economizador, o qual quando usado, deve vir antes do pré-aquecedor, já que existem limitações quanto a temperatura máxima do ar de combustão conforme o tipo de queimador e combustível utilizado.

Pré-aquecedores de ar são trocadores de calor gás-gás, e os tipos mais utilizados são: tubulares, regenerativos rotativos e de placas.

Os pré-aquecedores de ar regenerativos rotativos se utilizam do armazenamento de calor sensível em elementos vazados de um rotor rotativo, o qual girando a baixa rotação (2 a 4 rpm), alternam cada elemento em contacto com os gases quentes saindo da caldeira e o ar frio sendo aquecido. Sempre existe uma pequena mistura de ar e gases de combustão, já que é difícil efetuar-se uma construção perfeitamente estanque entre as correntes de fluxo que atravessam o rotor. Devido a sua complexidade construtiva, tais pré-aquecedores somente são viáveis em grandes unidades de geração de vapor.

➤ Chaminé

Este componente promove a circulação dos gases no gerador de vapor através da retirada dos gases de combustão, que são lançados ao meio ambiente, geralmente a uma altura suficiente para dispersão dos mesmos. Este efeito chamado de tiragem, pode ser natural ou forçado através de ventiladores e exaustores. Com a tiragem natural não há gasto de energia, todavia com a utilização de equipamentos para retirada dos gases há um maior controle.

➤ **Outros componentes:**

✓ **Bomba de água**

Responsável pela alimentação do gerador de vapor. Seu dimensionamento depende da pressão e da vazão de operação. Em caldeiras de alta pressão é bastante comum encontrar bombas de deslocamento positivo, pois estas apresentam uma melhor performance para pressões elevadas.

✓ **Queimador**

Componente que tem como função à regulagem da queima de combustível e controle da mistura ar-combustível.

Para aplicações com o biodiesel deve ser bem analisado, pois este gera uma boa quantidade de NOx quando queimado em altas temperaturas.

✓ **Manômetro**

Mede a pressão dentro da caldeira, sendo o mais utilizado o manômetro de Bordon por ser mais confiável (não precisa de energia).

✓ **Indicador de nível de água**

Este é outro instrumento de controle, caso o reservatório da caldeira esteja vazio, a temperatura do equipamento pode se elevar muito e comprometer o gerador.

✓ **Válvulas**

São elementos fundamentais no controle da caldeira. Caso haja alguma parada ou manutenção do equipamento é possível fazer sem maiores problemas.

✓ **Válvula de segurança**

São também conhecidas como válvulas de alívio, que abrem quando a pressão ultrapassa os valores admissíveis de projeto.

✓ **Soprador de fuligem e desincrustadores**

São componentes de limpeza e são utilizados para melhorar a performance do equipamento removendo a sujeira depositada na superfície da área de troca.

✓ **Separador de líquido**

Garante a geração de vapor saturado, já que se situa próximo à saída do gerador de vapor “retendo” os líquidos.

✓ **Coletor de partículas volante**

Atua como filtro dos produtos de combustão, indispensável se utilizado biomassa ou combustível sólido.

✓ **Atemperador**

É um controlador das condições do vapor na saída do gerador, este controle normalmente é feito adicionando água ao vapor.

✓ **Cinzeiro**

Em caldeiras de combustíveis sólidos, é o local onde se depositam as cinzas ou pequenos pedaços de combustível não queimado.

✓ **Exaustor**

Faz a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia para vencer as perdas de carga devido a circulação dos gases.

A caldeira pode ainda ter equipamentos de limpeza dos gases, tais como filtros, ciclones ou precipitadores eletrostáticos para captação de material particulado ou ainda lavadores de gases para captação de gases ácidos: SO_x, NO_x, etc...

3.4. Ciclo Rankine

Nos ciclos termodinâmicos é bastante comum encontrar o processo de aquecimento de água como uma das etapas do ciclo, evidentemente apenas nos casos onde a água é o fluido de trabalho. Para o caso de geração de vapor, o ciclo a ser considerado é o Rankine superaquecido. Neste processo, o fluido de trabalho (água) é aquecido até atingir a temperatura de saturação, vaporiza-se e em seguida é aquecido novamente até atingir a temperatura requerida.

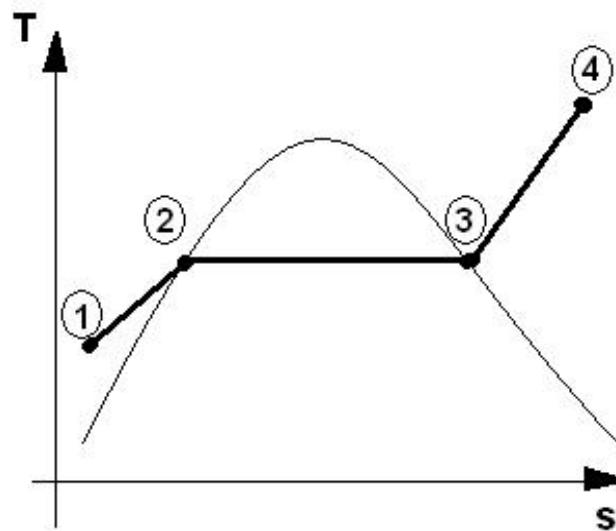


Figura 3.4 Ciclo de rankine superaquecido

De 1 → 2 Aquecimento da água líquida – Economizador

De 2 → 3 Vaporização da água líquida saturada – Caldeira propriamente dita

De 3 → 4 Aquecimento do vapor – Superaquecedor

Devido aos diferentes estados da água durante o processo de geração de vapor, as etapas de aquecimento de líquido, vaporização e aquecimento do vapor são feitos em componentes separados, a fim de obter maior eficiência na troca de calor.

3.5. Eficiência de um gerador de vapor

A troca de energia entre a fonte de calor e a água a vaporizar é feita com um rendimento que depende do tipo e princípio de funcionamento do GV. No caso dos GV's elétricos as perdas são devidas apenas a não se conseguir um isolamento do reservatório que contém a fonte de calor e a água, o processo de transferência de calor é totalmente eficiente. São estes os GV's mais eficientes, se devidamente isolados termicamente.

Nos geradores de vapor convencionais (a queima de combustível fóssil), a transferência de calor já não é tão eficiente. As perdas podem ser divididas em:

- ✓ Perda de calor nos gases de combustão na saída;
- ✓ Mistura ar combustível;
- ✓ Composição do combustível;

- ✓ Estado de limpeza dos tubulares;
- ✓ Perdas por combustível não queimado – presença de CO e H₂ nos gases de saída e/ou presença de muito C nas cinzas;
- ✓ Perdas de calor por formação de escórias aderentes – maior resistência térmica e/ou presença de combustão incompleta;
- ✓ Perdas de calor por condução e radiação – depende do isolamento do GV

Para garantir eficiências elevadas, é aconselhável manter monitorizados os seguintes parâmetros:

- ✓ Composição do combustível;
- ✓ Qualidade na forma de entrega do combustível;
- ✓ Composição dos gases, á saída
- ✓ Entrada indesejada de ar
- ✓ Estado de limpeza do exterior dos tubos do GV
- ✓ Temperaturas do ar de combustão e dos gases á saída
- ✓ Desempenho e configuração da chama
- ✓ Distribuição da temperatura, entre as paredes aquecidas
- ✓ Conteúdo de combustível nas cinzas

Segundo Yamane, [35] uma boa forma de estimar o consumo de combustível é através do poder calorífico já que este vapor representa a diferença de entalpia de formação dos produtos e a entalpia de formação dos reagentes:

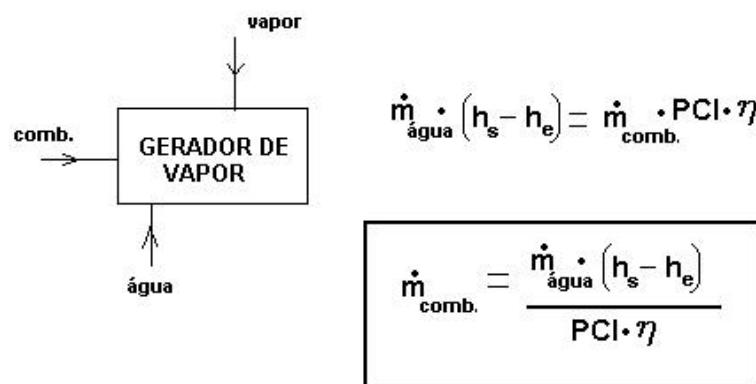


Figura 3.5 Esquema de determinação do consumo de combustível

O valor do rendimento pode ser estimado considerando perdas na fornalha e na superfície de troca de calor:

Na fornalha:

$$h_f = \frac{\text{calor produzido na fornalha}}{\text{possível calor produzido na combustão}} = \frac{PCI - (P_1 + P_2 + P_3)}{PCI}$$

Onde:

P₁: Perda de calor sensível das cinzas e por combustível impregnado nas cinzas;

P₂: Perda por formação de fuligem e coque volante;

P₃: Perdas por gases combustíveis na saída da chaminé (CO, H₂ e hidrocarbonetos)

Na superfície de troca:

$$h_s = \frac{\text{calor aproveitado pela superfície de troca}}{\text{calor produzido na fornalha}} = \frac{h_f \cdot PCI - (P_4 + P_5)}{h_f \cdot PCI}$$

Onde:

P₄: Perda por calor sensível na chaminé;

P₅: Perdas de calor para o meio externo.

E o rendimento total pode ser obtido pelo produto dos dois rendimentos, na fornalha e na superfície de troca. Apesar do valor do rendimento depender de vários parâmetros pode-se ter uma boa noção através da análise do poder calorífico. Utilizando esta forma proposta é possível dizer que o biodiesel apresenta uma produção de calor próxima ao do diesel convencional e outros óleos combustíveis derivados de petróleo, pois embora o biodiesel tenha um PCI em torno de 37470 kJ/kg e o óleo diesel é 42960 kJ / kg, O éster apresenta uma maior oxigenação em sua cadeia proporcionando uma melhor eficiência na combustão. [35]

3.6. Aplicação do gerador de vapor na agroindústria

O vapor é indispensável para a geração de energia, secagem, aquecimento de processos, reforma catalítica, evaporação, destilação, cozimento, pasteurização, concentrando-se em indústrias sucroalcooleiras e energia. A seguir, alguns exemplos:

3.6.1. Secagem de amido de mandioca

Em Agosto de 2002, foi inaugurada a Unidade de Assis Chateaubriand, no Oeste do Paraná, a mais nova vedete da Cooperativa Agrícola Mista Vale do Piquiri Ltda.: a amidonaria C.Vale. Os sete mil metros quadrados de área construída dessa unidade ultramoderna exigiram investimentos de cerca de R\$ 10 milhões.

Sua produção é voltada para amidos modificados de mandioca, destinados aos setores alimentício, papel e têxtil. Com capacidade para moer 400 toneladas de raiz, a indústria foi concebida com projeto de expansão para 800 toneladas/dia.

O combustível que gera vapor para a caldeira - para secagem da fécula vem de cavacos de eucalipto, retirados do plantio próprio de 1.440 hectares mantido pela Cooperativa. No final do processo de produção, a água residual é tratada a partir de uma tecnologia norte-americana, com microorganismos naturais ambientalmente correto (consórcio microbiano) - em cinco lagoas planejadas para, no final de 28 dias, direcionar o esgoto para o rio que passa ao fundo: o Piquiri. [38]

3.6.2. Obtenção dos produtos de palma

O primeiro passo do processamento produz o óleo bruto. Em seguida, o processo de prensagem produz uma torta, que é processada no transportador onde ocorre a secagem da fibra. A fibra seca é utilizada como combustível na caldeira a vapor, na primeira fase de refino do óleo de palma, o pré-tratamento ácido. Em seguida, o branqueamento do óleo é feito sob vácuo, gerado por um conjunto de ejetores/ condensadores, acionados por vapor. A última etapa consiste na destilação do óleo, através de um trocador de calor de placas, é aquecido com vapor de baixa pressão. Em seguida, é bombeado através de um trocador regenerativo de calor, onde troca calor com o óleo que sai. Em outro trocador, é aquecido com fluido térmico ou vapor saturado de alta pressão, até a temperatura de destilação/desodorização, de

onde é bombeado através do trocador regenerativo, que aquece o óleo a ser destilado, e em seguida, em outro trocador é resfriado com água.

O óleo refinado, já frio, recebe uma dosagem de antioxidante, passando, em seguida, por um dos filtros de polimento final. Os ácidos graxos destilados são condensados em um lavador de gases, através de um fluxo de óleo ácido que é bombeado em circuito fechado, passando por uma troca de calor.

A última fase é o fracionamento do óleo de palma, resultando em produtos nas mais diversas aplicações: substituto do diesel, combustível para acionar carros com motores adaptados; lubrificante de perfuração em formações de rochas mais duras; produção de sabões, plastificadores, estabilizantes para plástico e cloreto de polivinila PVC. [39]

3.6.3. Produção avícola de corte [40]

A energia regularmente utilizada no processo produtivo é a elétrica, sendo a lenha e o óleo diesel utilizados na caldeiraria, para a produção de vapor, nas seguintes fases: escaldagem, que é composta por um tanque com água morna, com a finalidade de uma prévia lavagem da ave e o afrouxamento das penas, para facilitar a depenagem e obtenção da cola e gelatina a partir do colágeno.

O fluxograma do processamento de frango é apresentado a seguir:

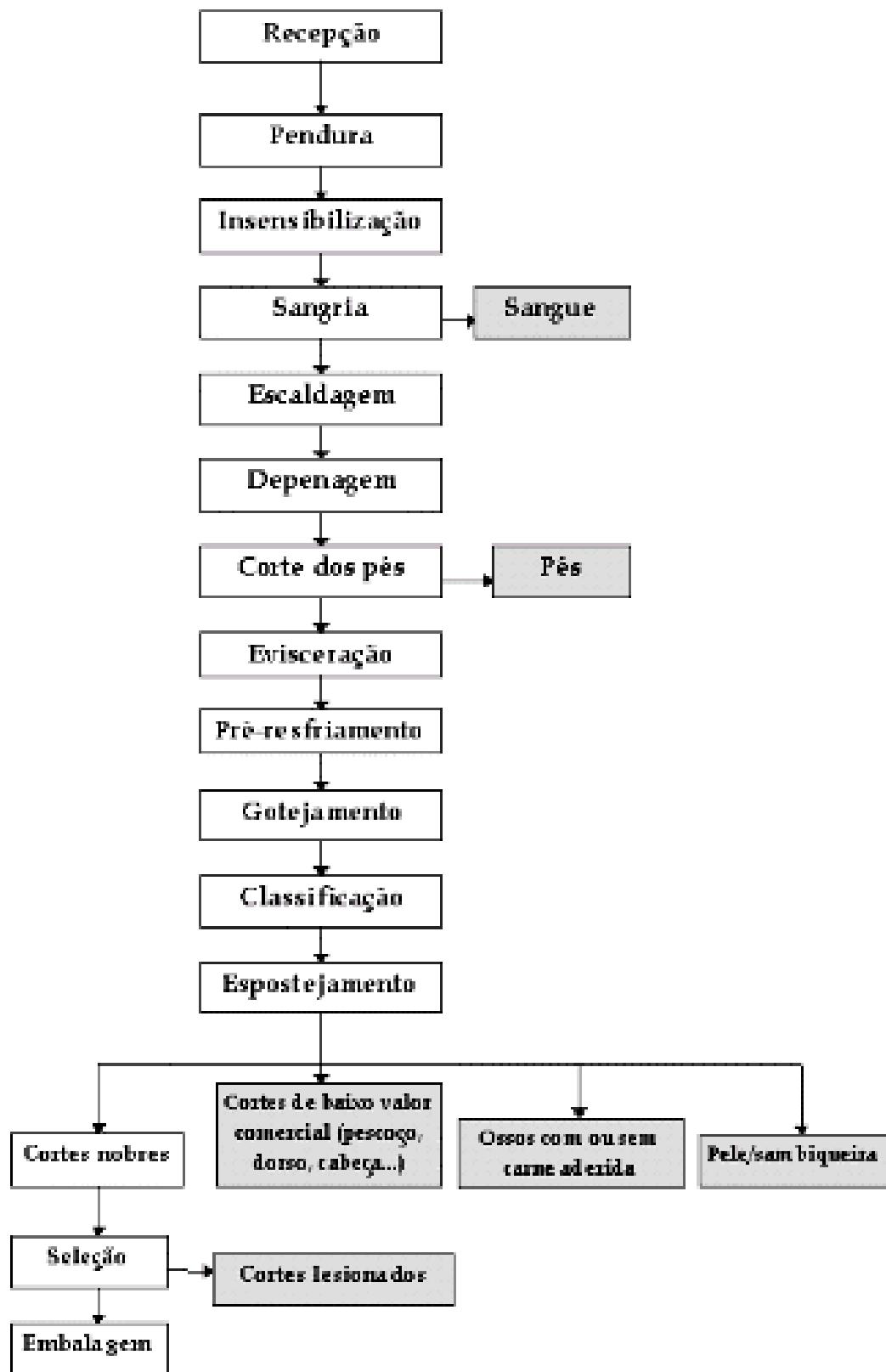


Figura 3.6 Fluxograma do processamento de frango

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. Mecanismos de transferência de calor

4.1.1. Condução

O fenômeno de condução de calor é definido, segundo Incropera, como: a condução está relacionada ao transporte de energia em um meio devido ao gradiente de temperatura, e o mecanismo físico envolvido é a movimentação aleatória dos átomos ou atividade molecular.

A condução pode ser analisada utilizando a equação da taxa de condução:

$$q_c = \frac{k * S * \Delta T}{l}$$

Onde:

q_c : Taxa de transferência de calor;

k : Condutibilidade térmica do material;

S : Superfície de troca;

$\Delta T = t_1 - t_2$: Diferença entre as temperaturas do lado quente e do lado frio;

l : Espessura do material.

No caso específico de transferência de calor em tubos, a espessura efetiva do material deve ser corrigida por:

$$l_e = 0,5 * D_o * \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)$$

Onde:

l_e : Espessura equivalente

D_o : Diâmetro externo

D_i : Diâmetro interno

Os valores de condutividade térmica variam de acordo com o material e também com a temperatura, para isso foi feito um gráfico, por alguns fabricantes de aço (Inconel Alloy 600, Huntington Alloy Products Division e The International Nickel Co.), com os valores da condutibilidade térmica de alguns dos principais materiais em função da temperatura:

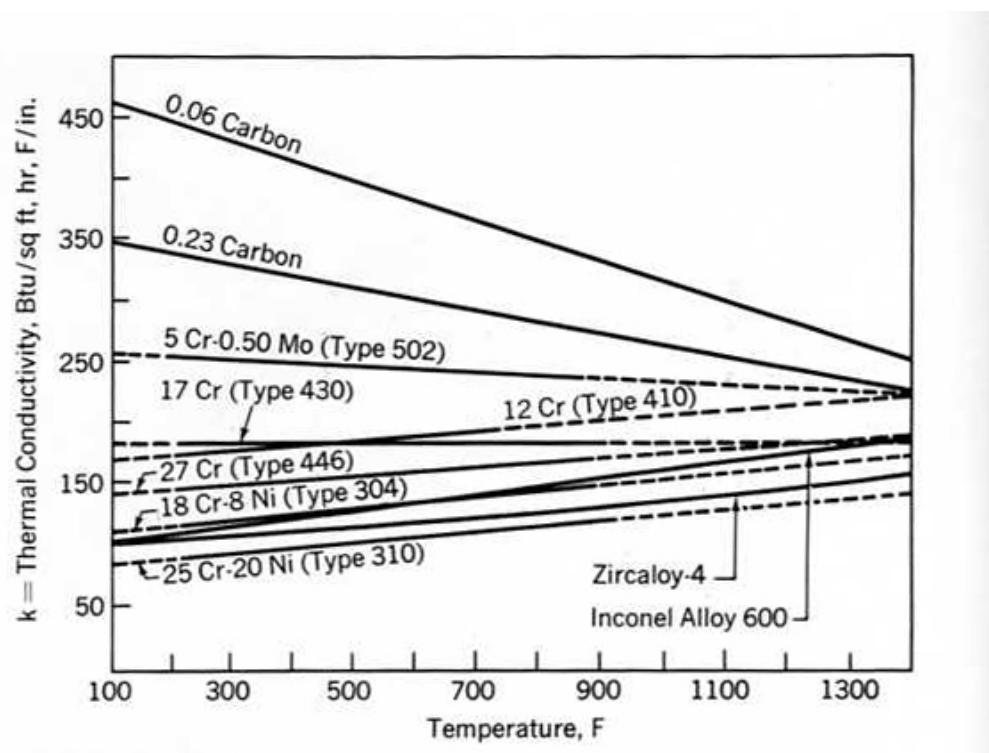


Figura 4.1 Condutividade térmica de aços e ligas

Outro fator importante a ser considerado na condução é a sujeira que pode se depositar na superfície de troca, diminuindo a taxa de transferência de calor (para trocadores de calor e caldeiras este fenômeno é conhecido como incrustação). Logo, caso haja a necessidade de determinar a quantidade de calor trocado após algum tempo de uma superfície de troca, é necessário conhecer a quantidade de substâncias incrustantes no fluido. Essa quantidade é de difícil determinação e seus valores são obtidos empiricamente e é denominado como fouling factor, ou fator de sujeira.

Existe uma associação de fabricantes de trocadores de calor denominada TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) [41] que apresenta alguns valores de fator de sujeira, entretanto este valores são apenas vistos como referência sendo que os valores “corretos” estão totalmente correlacionados com as condições de processo e da origem dos fluidos de troca.

4.1.2. Convecção

A troca de calor pro convecção pode ser expressa através da seguinte fórmula:

$$q_c = Uc * S * \Delta T$$

Onde:

q_c : Taxa de transferência de calor por convecção;

Uc : Coeficiente de troca de calor por convecção;

S : Superfície de troca de calor;

ΔT : Diferença de temperatura do fluido ao longe e da superfície de troca.

O coeficiente de troca de calor por convecção no lado interno dos tubos, pode ser obtido através da correlação do adimensional Nusselt expresso pela relação de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^n$$

Lembrando que:

$$Nu = \frac{U_c * D}{k} \quad Pr = \frac{c_p * \mu}{k}$$

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

E o fator n vale 0,3 para resfriamento e 0,4 para aquecimento.

Apesar da importância da análise do escoamento interno, para geradores de vapor, geralmente o fluido que controla a troca de calor é o gás, que fica do lado externo dos tubos. Isso ocorre em virtude do menor coeficiente de troca de calor

proporcionado pelos gases. Portanto, torna-se de suma importância analisar a troca de calor do lado externo dos tubos, bem como a determinação do coeficiente de troca de calor por convecção do lado externo.

Da mesma forma que foram feitos os extensivos estudos de correlação de adimensionais em virtude da dificuldade de obtenção de valores confiáveis do coeficiente de troca de calor, foram feitos também para o lado externo:

$$\frac{U_{cc} * D_o}{k} = 0,287 * \left\{ \frac{G * D_o}{\mu} \right\}^{0,61} * \left\{ \frac{c_p * \mu}{k} \right\}^{0,33} * F_a \Rightarrow$$

$$\frac{U_{cc} * D_o}{k} = 0,287 * \left\{ \frac{G^{0,61} * c_p^{0,33} * k^{0,67}}{D_o^{0,39} * \mu^{0,28}} \right\} * F_a$$

Onde:

U_{cc} : Coeficiente de troca de calor por convecção (externo), Fig. 4.2;

D_o : Diâmetro externo;

k : Condutibilidade térmica do tubo;

G : Vazão mássica;

c_p : Calor específico a pressão constante;

μ : Viscosidade absoluta do fluido à temperatura ao longe;

T_b : Temperatura absoluta do fluido ao longe (Rankine,R, ou Kelvin, K:
depende das unidades de trabalho);

T_f : Temperatura média absoluta entre o fluido ao longe e a superfície de troca.

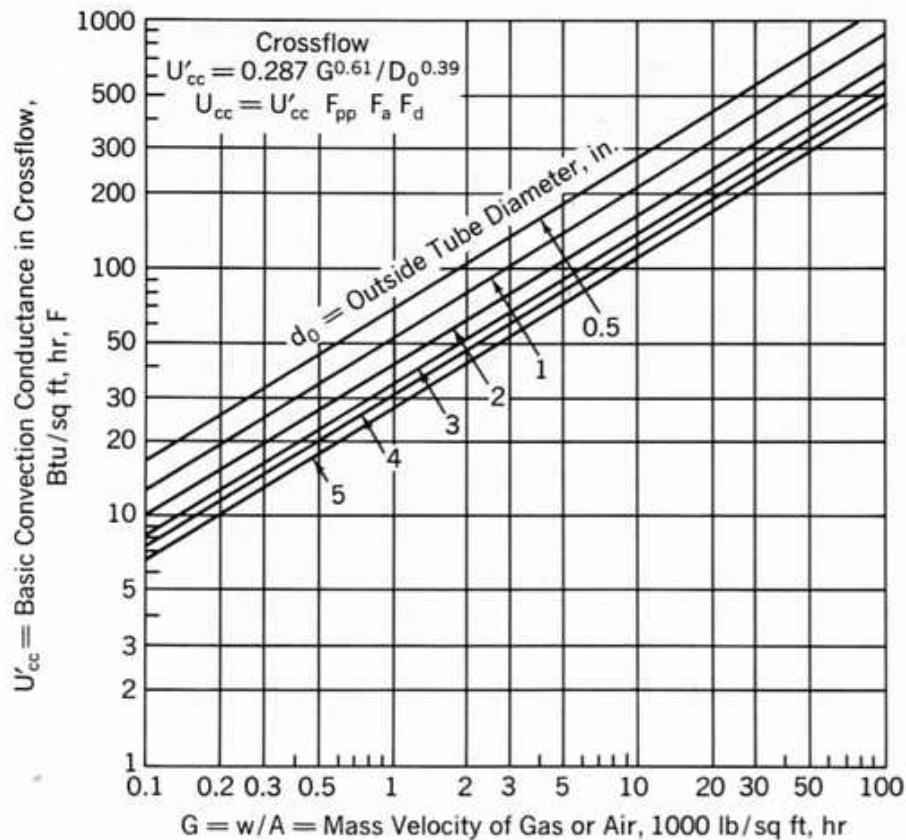


Figura 4.2 Coeficiente basico de transmissão de calor por convecção

Também para simplificação do cálculo no lado externo dos tubos, a equação acima pode ser apresentada:

$$U_{cc} = U'_{cc} * F_{pp} * F_a * F_d$$

Onde:

$$U'_{cc} = 0,287 * \frac{G^{0,61}}{D_o^{0,39}}$$

U'_{cc} : Coeficiente básico de toca de calor por convecção (externo);

F_{pp} : Fator de propriedades físicas, obtidos através das Fig. 4.3 e Fig. 4.4;

F_a : Fator de arranjo, determinado pela Fig. 4.5;

F_d : Fator de profundidade, pode ser obtido através da Fig. 4.6

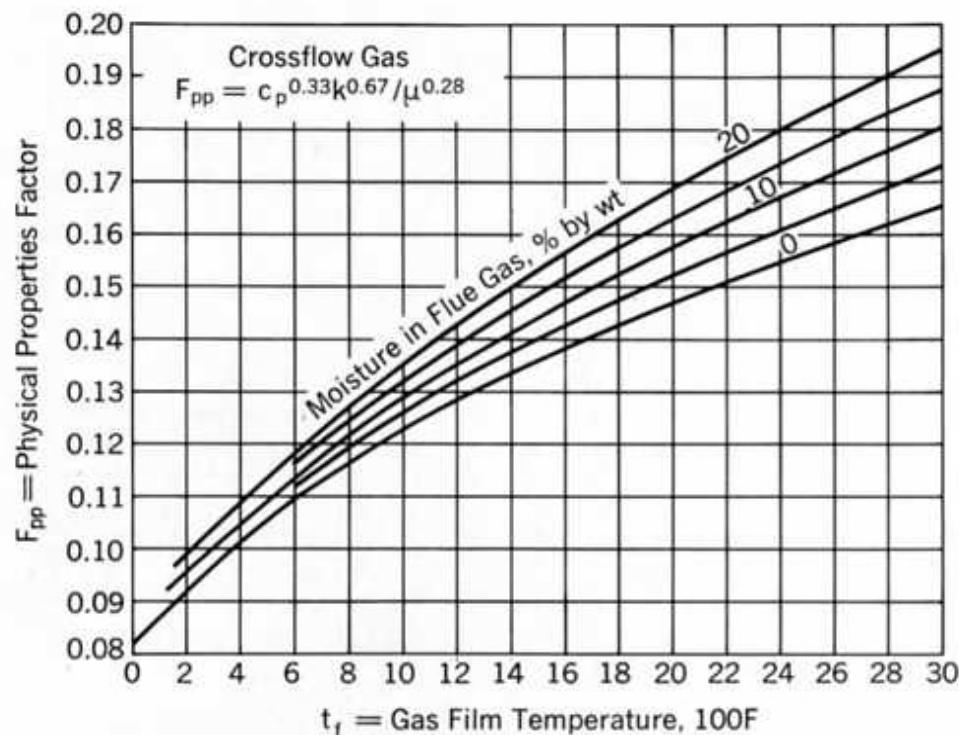


Figura 4.3 Fator de propriedade F_{pp} para gases

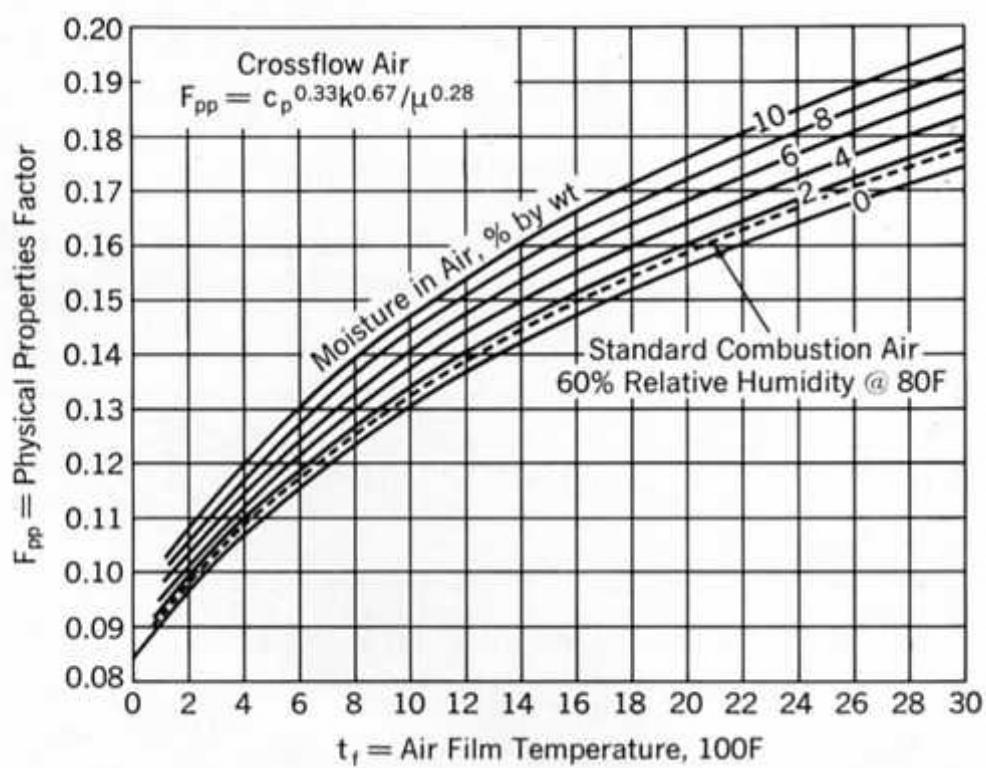


Figura 4.4 Fator de propriedade F_{pp} para ar

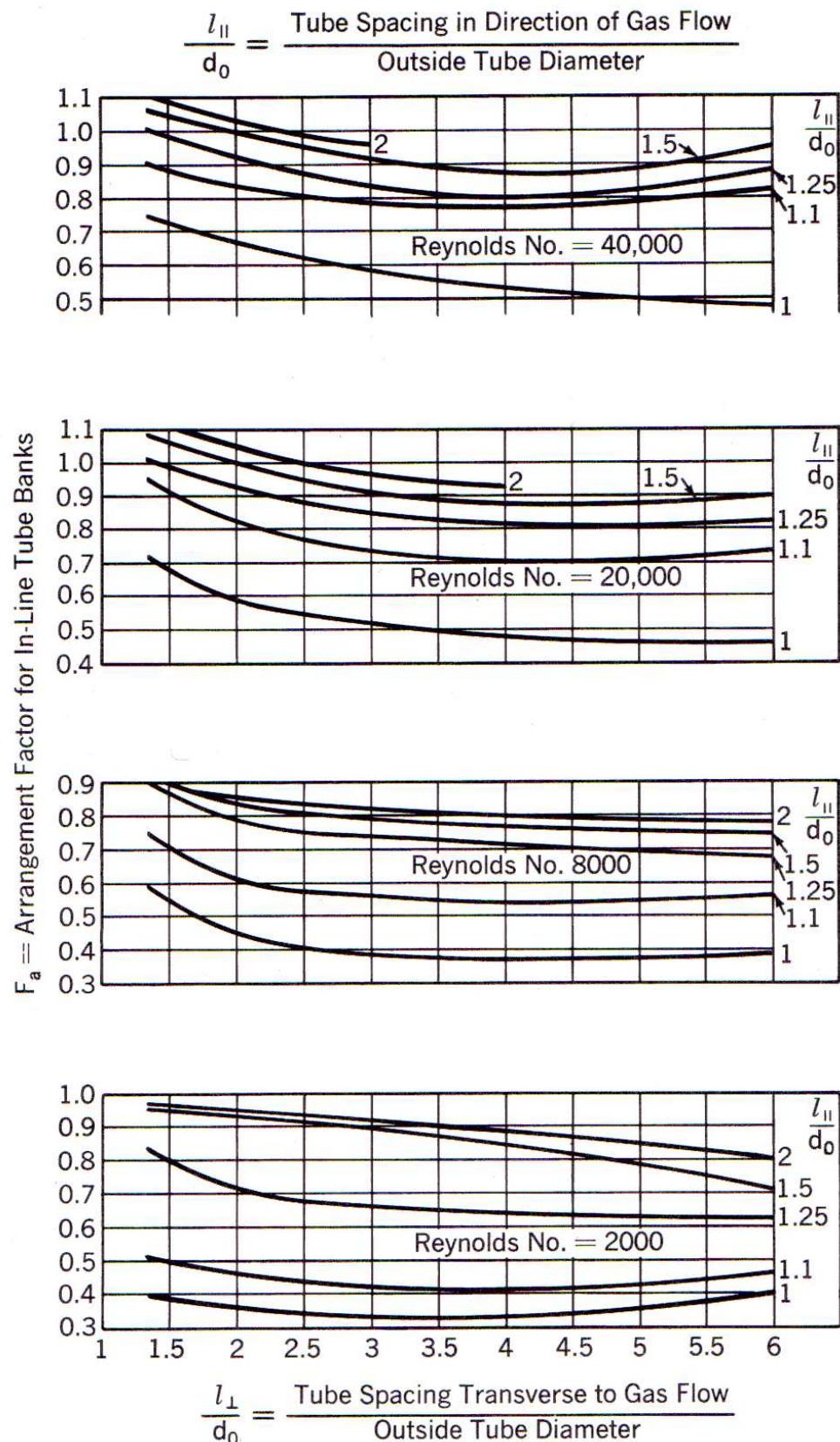


Figura 4.5 Fator arranjo para gases ou ar

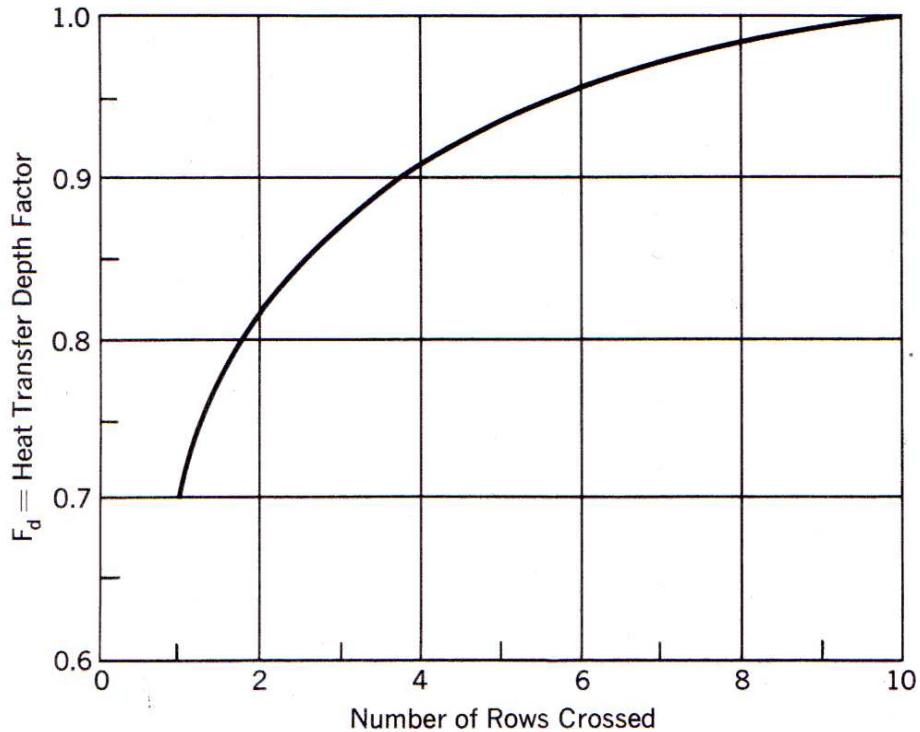


Figura 4.6 Fator de profundidade

4.1.3. Radiação

O processo de transferência de calor por radiação é bastante diferenciado dos demais em virtude de não requerer um meio para efetuar a troca de calor, entretanto, também depende do gradiente de temperatura dos corpos:

$$q_{r_{ch}} = \sigma * T^4$$

A equação acima relaciona a quantidade de radiação emitida por um corpo quente (corpo com temperatura diferente de zero kelvin), onde sigma (grego) é a constante de Stefan-Boltzmann.

Evidentemente, existem inúmeros outros fatores que influenciam na transferência de calor por radiação, entretanto a seguir serão introduzidos duas formas de troca de calor por radiação: Radiação de chamas e radiação de gases. Ambos, de grande importância no processo de geração de vapor.

4.1.3.1. Radiação da chama

A transferência de calor por radiação de chamas ocorre apenas na caldeira propriamente dita (parte do equipamento onde ocorre a vaporização da água), onde há maior necessidade de calor devido ao calor elevado calor latente da água.

A radiação por chamas pode ser expressa através da equação:

$$q_{r_{ch}} = p * \varepsilon_p * A * \sigma * \psi * (T_{ch}^4 + T_p^4)$$

Onde:

p = Parâmetro associado à emitância da chama, este fator é obtido experimentalmente e varia de 0,6 a 1,0 sendo que o valor 1,0 é quando a chama está bem avermelhada;

ε_p : Emitância da parede;

ψ : Fator de radiação, obtido graficamente através da figura 4.7, que depende da configuração em que se encontram os tubos;

T_{chama} : Temperatura da chama, normalmente para este valor adota-se a temperatura adiabática da chama (TAC);

T_p : Temperatura da parede.

Para a determinação do coeficiente de troca de calor por radiação utiliza-se a seguinte relação:

$$h_{r_{ch}} = \frac{q_{r_{ch}}}{A_{tubo} * (T_{ch} + T_p)}$$

Com o valor do coeficiente de troca de calor por radiação de chamas em mãos é possível estudar melhor os efeitos combinados não só dos fenômenos de radiação, mas como dos fenômenos de transferência de calor.

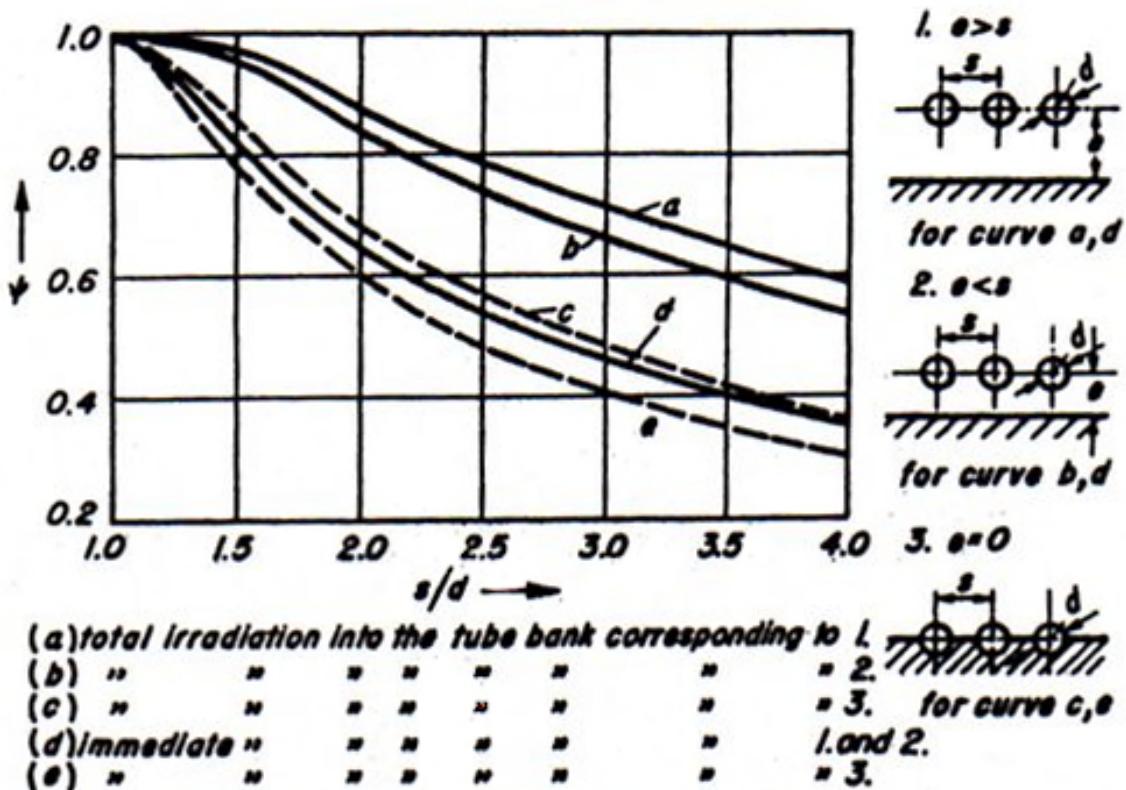


Figura 4.7 Gráfico para a determinação do fator de radiação

4.1.3.2. Radiação dos gases

Na combustão de derivados de carbono, obtém-se espécies químicas tais como água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, entre outras. Estas substâncias, diferentemente das moléculas monoatômicas, emitem radiação térmica em algumas faixas de comprimento de onde, e consequentemente trocam calor por radiação.

A transferência de calor por radiação de gases pode ser definida através da seguinte equação:

$$\frac{q_{r_g}}{A} = \sigma * \varepsilon_g(T_g) * T_g^4 - \sigma * \alpha_g(T_p) * T_p^4$$

Onde:

ε_g : Emissividade dos gases;

α_g : Absorvidade dos gases.

Para a determinação da emitância dos gases, utiliza-se a seguinte equação:

$$\varepsilon_g(T_g) = C_{CO_2} * \varepsilon_{CO_2} + C_{H_2O} * \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon$$

Onde os fatores expressos na equação podem ser obtidos através das figuras a seguir, utilizando como parâmetro as pressões parciais.

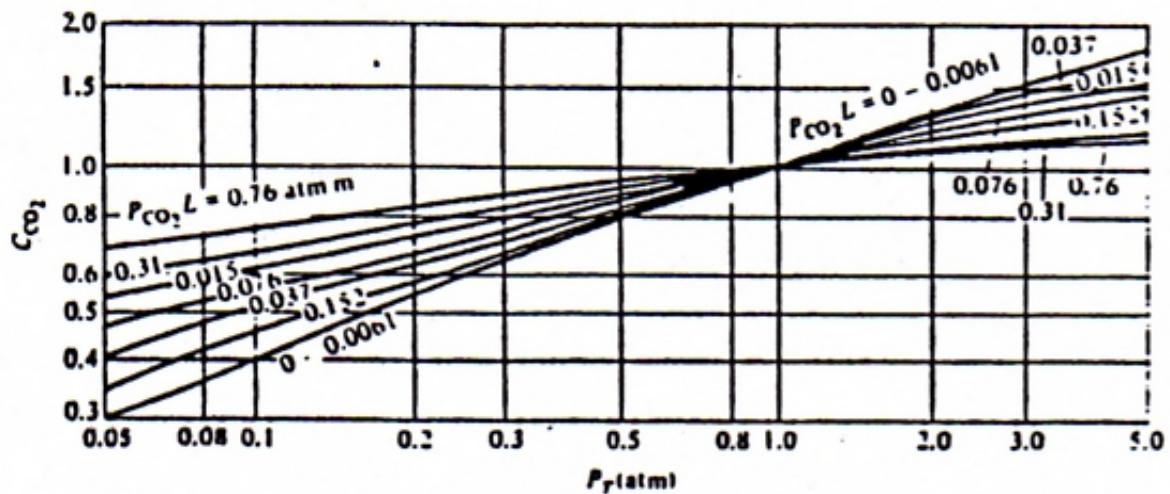


Figura 4.8 Correção de fator para a emitância do CO₂

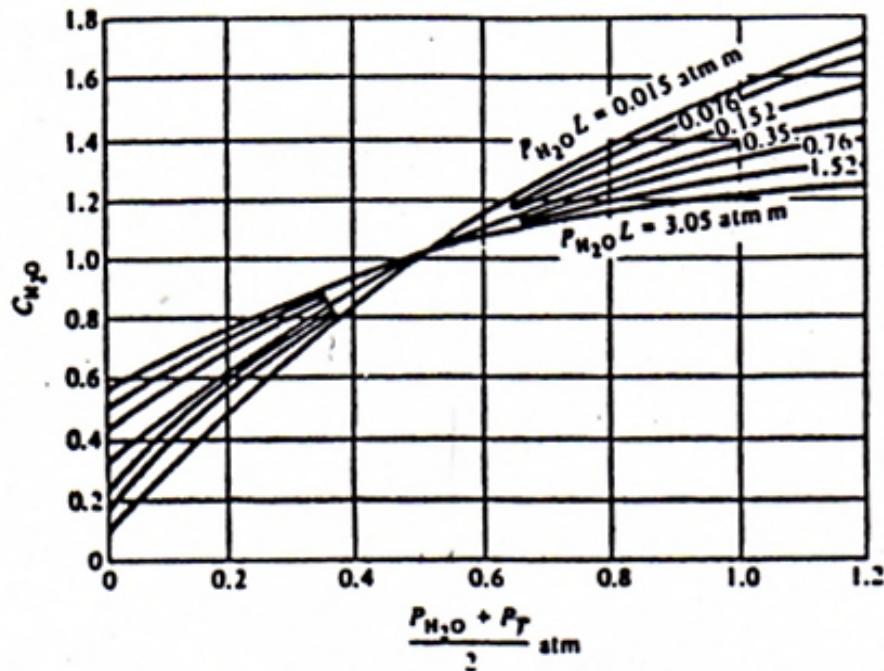


Figura 4.9 Fator de correção para emitância da água

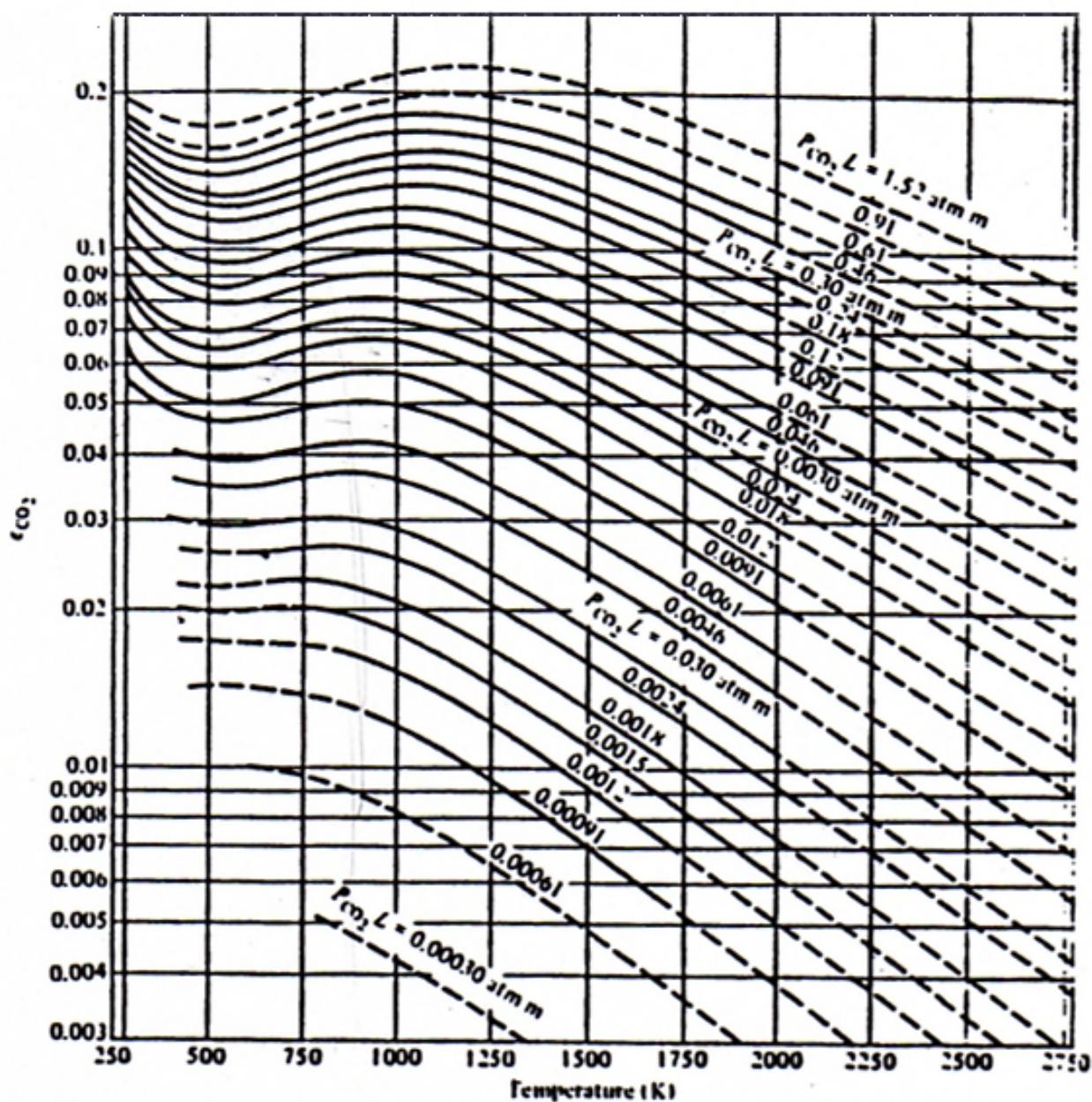


Figura 4.10 Emissânci a do dióxido de carbono a 1 atm

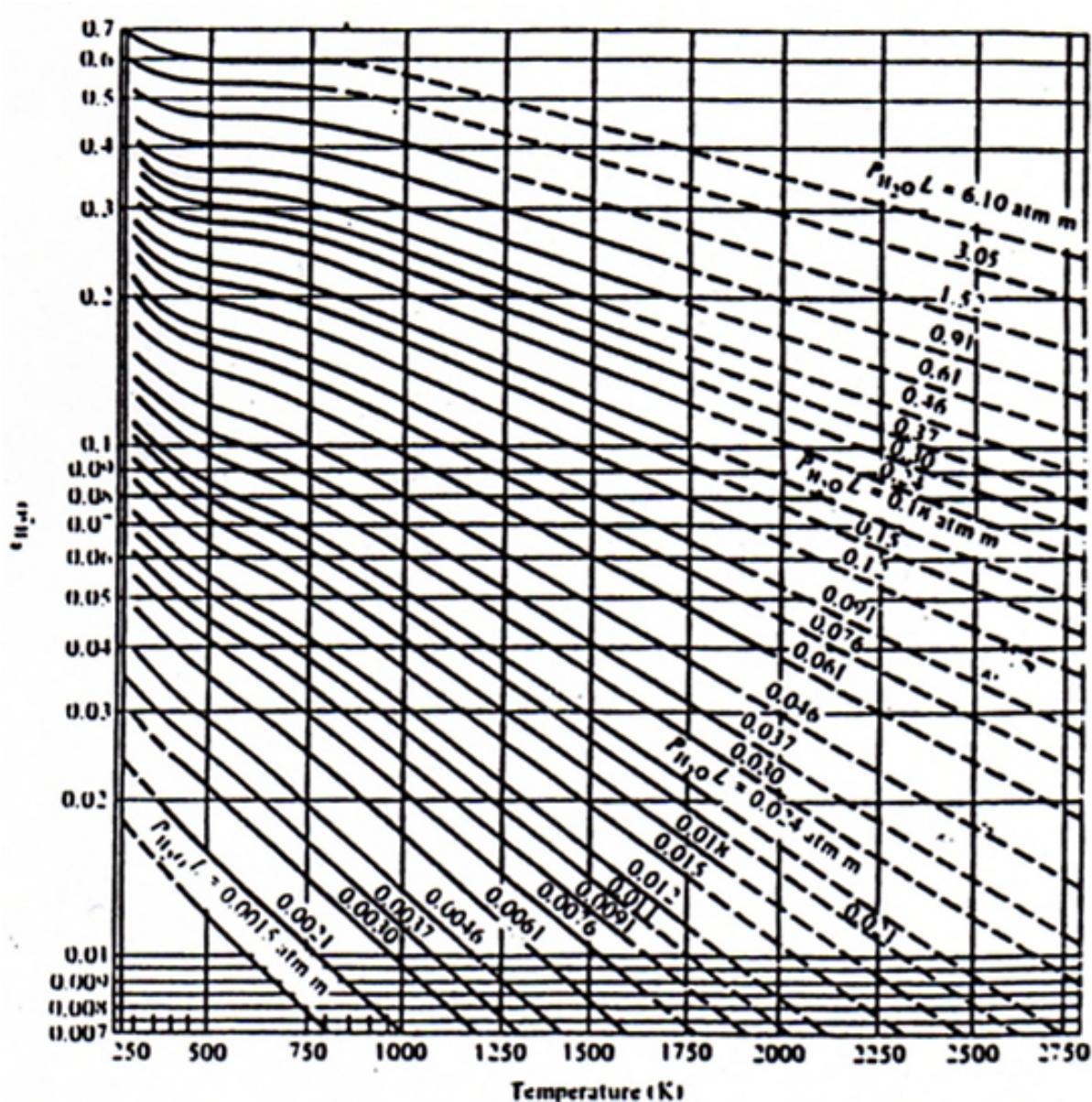


Figura 4.11 Emissância para o vapor de água a 1 atm

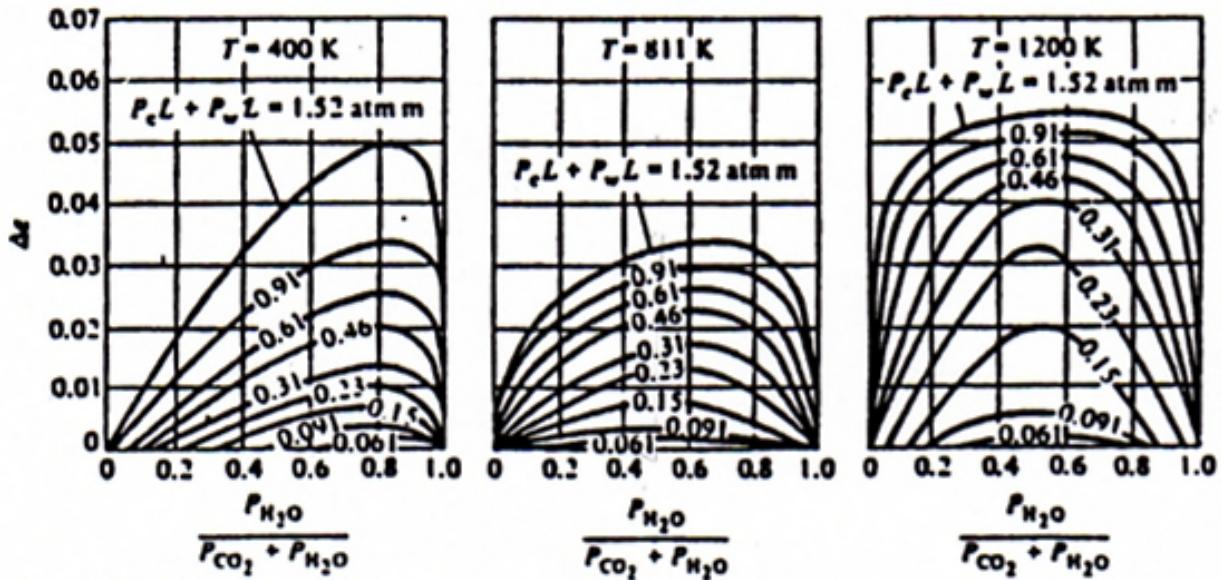


Figura 4.12 Fator de correção da emitância

Já para encontrar o valor da absorvidade dos gases, segue a equação:

$$\alpha_g(T_p) = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - \Delta\alpha$$

Onde:

$$\alpha_{CO_2} = C_{CO_2} * \varepsilon_{CO_2} * \left(\frac{T_{CO_2}}{T_s} \right)^{0,65}$$

$$\alpha_{H_2O} = C_{H_2O} * \varepsilon_{H_2O} * \left(\frac{T_{H_2O}}{T_s} \right)^{0,45}$$

Para determinação dos parâmetros necessários para o cálculo da absorvidade utilizam-se as mesmas figuras que foram utilizadas para a obtenção da emitância (evidentemente com os novos parâmetros corrigidos).

5. MEMORIAL DE CÁLCULOS

5.1. Dimensionamento do gerador de vapor [42] a [45]

Para este dimensionamento, foram cogitadas diversas capacidades e aplicações do gerador de vapor, entretanto foi adotada uma aplicação de bastante importância no setor pecuário, a graxaria. Como já explanado anteriormente, a graxaria consiste no reaproveitamento dos resíduos do abate de aves, para obtenção de óleo e farinha para rações animais.

Numa conversa com uma das empresas do setor, constatou-se que a necessidade média de vapor para o abate de 120 mil frangos por dia é em torno de 10 toneladas de vapor. Logo, para que seja possível uma posterior comparação, adotou-se a capacidade de 10,6 toneladas de vapor saturado a 5,0 MPa por hora, e com a água de alimentação a 25°C. Por se tratar de uma unidade relativamente pequena, será utilizada uma caldeira aquatubular compacta. Como mostra a Fig. 5.1.

Após já ter definido as condições do vapor, pode-se determinar os valores totais de calor que deverá ser fornecido na caldeira propriamente dita e no feixe de tubos que aquece a água até a saturação. Considerando-se as tabelas de entalpia do Van Wylen, $h_{ent} = 104,5 \text{ kJ / kg}$; $h_{sat} = 1154,2 \text{ kJ / kg}$; $h_{lv} = 1640,1 \text{ kJ / kg}$, obtém-se:

$$\begin{aligned} Q_{tubos} &= \dot{m}_{água} * (h_{sat} - h_{ent}) \Rightarrow \\ Q_{tubos} &= 3,0 * (1154,2 - 104,5) = 3149,1 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{caldeira} &= \dot{m}_{água} * h_{lv} \Rightarrow \\ Q_{caldeira} &= 3,0 * 1640,1 = 4920,3 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

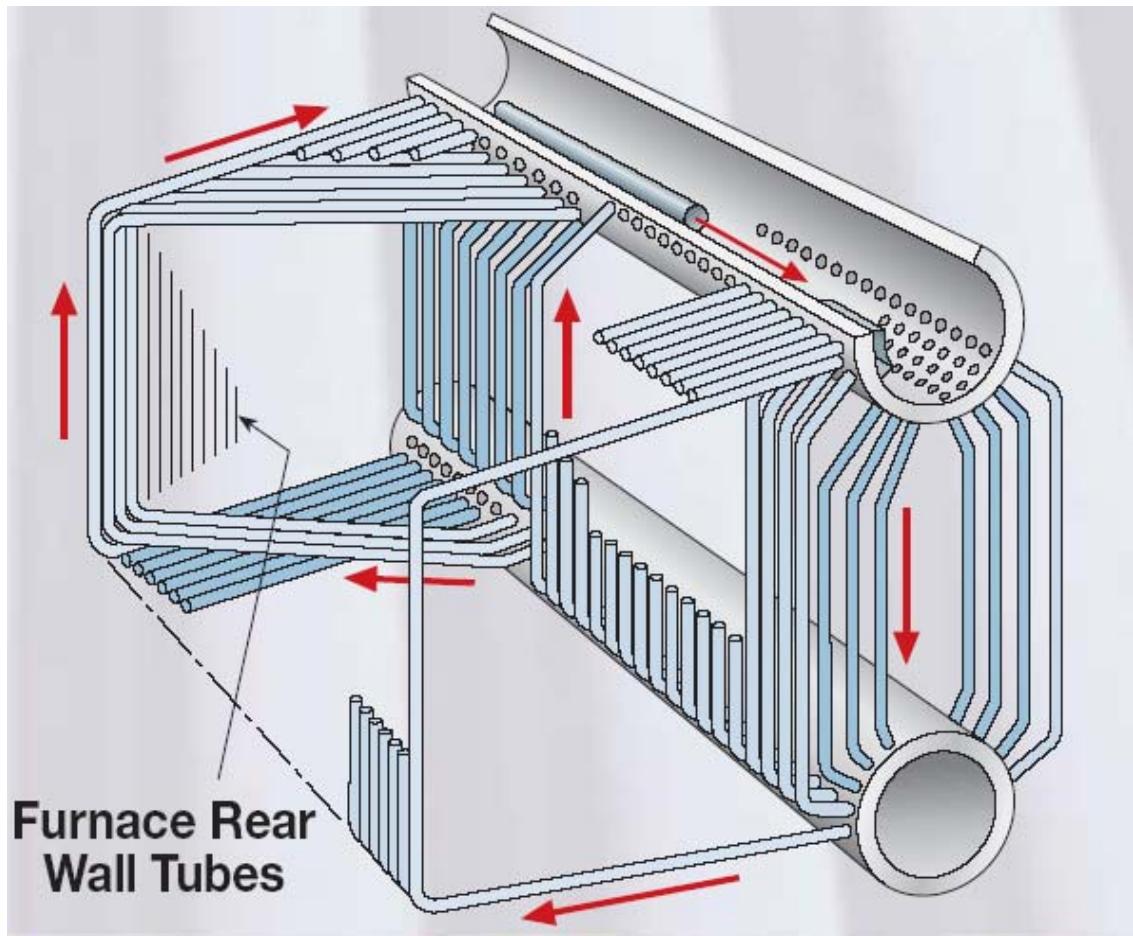
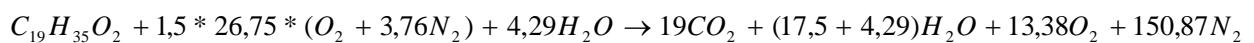


Figura 5.1Esquema de uma caldeira aquatubular compacta

Encontrando-se as taxas de calor requeridas para cada parte da caldeira, pode-se iniciar o estudo da combustão. O biodiesel, por se tratar de uma estrutura molecular pesada, torna-se difícil determinar os percentuais de composição de seus componentes, logo para este estudo será considerado um éster médio, $C_{19}H_{35}O_2$, onde $M_{C_{19}H_{35}O_2} = 295\text{kg / kmol}$.

Antes de realizar o cálculo estequiométrico, é necessário determinar qual a umidade que apresenta o ar. Com a temperatura de bulbo úmido $TBU = 32^\circ\text{C}$ e temperatura de bulbo seco $TBS = 23^\circ\text{C}$ para São Paulo, foi possível encontrar na carta psicométrica o valor da umidade absoluta, $0,014 \text{ kg água / kg ar}$. Será considerado também um excesso de ar de 50%. A seguir o balanço estequiométrico:



Depois de balanceada a reação de combustão, é possível obter a relação ar combustível:

$$AC = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = \frac{1,5 * 26,75 * (32 + 3,76 * 28) + 4,29 * 18}{295} = 18,93 \text{ kg - ar / kg - comb}$$

Através do software firecad, disponível online para alguns cálculos, determinou-se o valor do poder calorífico inferior $PCI = 8820 \text{ kcal/kg}$.

Consultando o site da Riello burners foi possível ter noções dos valores de rendimento de queima para combustíveis líquidos, que gira em torno de 65 a 75 %, logo foi adotado um valor de rendimento de 70% na queima do biodiesel para o excesso de ar de 50%, pois o mesmo apresenta características físicas semelhantes ao diesel.

$$\dot{m}_{comb} = \frac{Q_{tubos} + Q_{caldeira}}{\eta * PCI} = \frac{3149,1 + 4920,3}{0,70 * 8820 * 4,189} = 0,312 \text{ kg / s}$$

$$m_{gases} = (AC + 1) * m_{comb} = (18,93 + 1) * 0,312 = 6,22 \text{ kg - ar / s}$$

Estimada a vazão dos gases de combustão, já é possível iniciar os cálculos (propriamente ditos) para o gerador de vapor. Como já sabido, o cálculo e dimensionamento deste equipamento devem ser iterativos, pois envolve diversos mecanismos de transferência de calor e seus componentes.

5.1.1. Feixe de tubos – economizador

5.1.1.1. Convecção

Primeiramente, será calculada a convecção em função da temperatura de saída dos gases de combustão da caldeira para que seja possível estimar determinar (através do cálculo iterativo) o valor da temperatura de saída da caldeira propriamente dita para o feixe de tubos. Logo, foi feito o seguinte balanço no feixe de tubos:

$$Q_{gases} = Q_{água}$$

$$\dot{m}_{gases} * c_{p,gases} * (T_{T_IN} - T_{T_OUT}) = Q_{água}$$

Após algumas “chutes” para a temperatura de saída dos gases, foi possível determinar a temperatura de entrada dos tubos, que é a mesma da saída da câmara de combustão:

$$6,22 * 1,35 * (T_{T_IN} - 450) = 3149,1$$

$$T_{T_IN} = 838,3^\circ C$$

Paralelamente, a este cálculo foi feita a determinação do calor específico dos gases de combustão, utilizando correlações do Van Wylen:

$$CO_2 \rightarrow C_{p,CO_2} = -3,7357 + 30,529 * \theta^{0,25} - 4,1034 * \theta + 0,024198 * \theta^2$$

$$H_2O \rightarrow C_{p,H_2O} = 143,05 - 183,54 * \theta^{0,25} + 82,751 * \theta^{0,5} - 3,6989 * \theta$$

$$O_2 \rightarrow C_{p,O_2} = 37,432 + 0,020102 * \theta^{1,5} - 178,57 * \theta^{-1,5} + 236,88 * \theta^{-2}$$

$$N_2 \rightarrow C_{p,N_2} = 39,06 - 512,79 * \theta^{-1,5} + 1072,7 * \theta^{-2} - 820,4 * \theta^{-3}$$

Onde:

$$\theta = \frac{T(K)}{100};$$

E o valor do C_p é dado em kJ/kmol.

Determinado às temperaturas de entrada e saída de ambos os fluidos, pode-se iniciar o estudo da convecção nos tubos. Da equação simplificada para o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção:

$$U_{CC} = U'_{CC} * F_{PP} * F_a * F_D$$

$$U'_{CC} = 0,287 * \frac{(\dot{m}_{gases})^{0,61}}{(D_o)^{0,39}} = 0,287 * \frac{(6,22 * 2,2046)^{0,61}}{(1,25)^{0,39}} = 123,00 BTU / ft^2 * ^\circ F$$

Convertendo para o Sistema Internacional (SI): $U'cc = 705,50 \text{ W/m}^2\text{C}$

Como pode ser visto, o diâmetro externo utilizado foi estimado com bases nos cálculos iterativos desenvolvido. Para a determinação dos fatores que compõe o cálculo do coeficiente Ucc, é necessário obter a temperatura de filme:

$$T_f (\text{ }^\circ F) = \frac{T_p + T_\infty}{2}$$

Estimando a temperatura próxima ao do fluido que escoa internamente, e a temperatura do fluido ao longe a média da entrada e saída dos gases:

$$T_f (\text{ }^\circ F) = \left(\frac{T_{\text{água_IN}} + T_{\text{água_OUT}} + 20 + T_{\text{gases_IN}} + T_{\text{gases_OUT}}}{4} \right) * 1,8 + 32$$

$$T_f (\text{ }^\circ F) = \left(\frac{25 + 264 + 20 + 450 + 838,3}{4} \right) * 1,8 + 32 =$$

$$T_f (\text{ }^\circ F) = 1147,7 \text{ }^\circ F$$

Da Fig. 4.3, tem-se $F_{pp} = 0,128$

Para a obtenção do fator de arranjo é necessário determinar o número de Reynolds e o espaçamento entre os tubos. A seguir a arranjo esquemático da configuração do feixe de tubos:

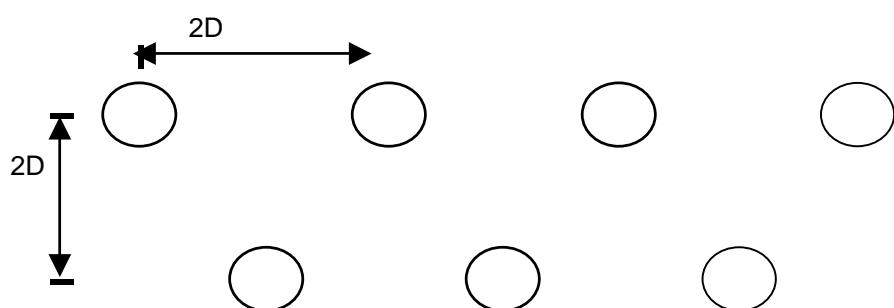


Figura 5.1 Arranjo do feixe de tubos

O adimensional de Reynolds é obtido através da equação:

$$\text{Re} = \frac{V * D}{\nu}$$

Onde:

D: diâmetro do tubo;

V: velocidade de escoamento do gás;

ν : viscosidade cinemática do fluido.

Para a determinação da velocidade serão necessários calcular a massa específica dos gases de combustão e a área seccional transversal por onde passa os gases. A área pode ser determinada seguindo o arranjo acima:

$$A_{\text{sec_trans}} = N_{\text{tubos / fila}} * H_{\text{altura}} * CL_{\text{esp_trans}}$$

$$A_{\text{sec_trans}} = 5 * 2,1 * 0,03175$$

$$A_{\text{sec_trans}} = 0,333m^2$$

A massa específica pode ser calculada considerando os gases de combustão como perfeitos deste modo à equação geral se aplica:

$$\rho = \frac{R * T_{\text{gases}}}{P} = \frac{287 * 935,7}{101325} = 0,377 \text{ kg/m}^3$$

Note que o foi aproximado o valor da constante R dos gases para o valor do ar. Logo a velocidade:

$$V = \frac{m_{\text{gases}}}{\rho * A_{\text{sec.trans}}} = \frac{6,22}{0,377 * A_{\text{sec.trans}}} = 49,4 \text{ m/s}$$

Finalmente, o número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{49,4 * 0,03175}{0,000025} = 62765$$

Com o número de Reynolds calculado e o arranjo definido pode-se determinar qual é o valor de F_a , que vale 1,05.

Já a determinação de F_p leva em consideração o número de colunas cruzadas. Neste caso o número de colunas é superior a 10 o que já determina que o coeficiente F_p seja igual a 1,0 (um).

Após calculado todos os fatores, determina-se U_{cc} :

$$U_{cc} = 705,50 * 0,128 * 1,05 * 1,0 = 94,82 W / m^2 {}^\circ C$$

Determinando a área de troca, e em seguida o calor convectivo:

$$A_{troca} = Ntubos * \pi * D * H_{altura} =$$

$$A_{troca} = 198 * 3,14159 * 0,03175 * 2,1 = 41,47 m^2$$

$$Q_{conv} = U_{cc} * A_{troca} * (T_{gases} - T_p) =$$

$$Q_{conv} = 94,82 * 41,47 * (935,7 - 164,5) =$$

$$Q_{conv} = 3111, KW$$

5.1.1.2. Radiação dos gases

Para a troca de calor pela radiação dos gases, será considerado um valor aproximado da temperatura da parede do tubo:

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = \sigma * [\varepsilon_g(T_g) * T_g^4 - \alpha_g(T_p) * T_p^4]$$

Onde:

$$T_p = 10^\circ C + T_{vapor} = \left(10 + \frac{(264 + 25)}{2} \right) = 437,7 K$$

$$\varepsilon_g(T_g) = C_{CO_2} * \varepsilon_{CO_2} + C_{H_2O} * \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon$$

Considerando a pressão total na câmara de combustão $P_{total} = 1atm$ e através da fração molar, as pressões parciais são:

$$P_{CO_2} = P_{total} * \frac{M_{CO_2}}{M_{total}} = 1atm * \frac{19}{202,03} = 0,0940atm$$

$$P_{H_2O} = P_{total} * \frac{M_{H_2O}}{M_{total}} = 1atm * \frac{21,79}{202,3} = 0,1078atm$$

Adotando-se como modelo o arranjo com espaçamento de 2,0 x diâmetro para a câmara de combustão, sendo $D = 31,75mm$:

$$Le = 2,8 * (D) = 2,8 * 0,03175 = 88,9mm$$

Onde:

Le : Comprimento equivalente para a radiação dos gases

$$P_{CO_2} * Le = 0,094 * 0,0889 = 0,0083atm.m$$

$$P_{H_2O} * Le = 0,1078 * 0,0889 = 0,0096atm.m$$

$$\frac{P_{H_2O} + P_t}{2} = \frac{0,1078 + 1}{2} = 0,554 \text{ atm}$$

Das Fig. 4.8 e Fig. 4.9, têm-se: $C_{CO_2} = 1,0$ e $C_{H_2O} = 1,1$

Utilizando os parâmetros $P_{CO_2} * Le = 0,0018 \text{ atm.m}$ e a temperatura dos gases de 1100°C ($1375,15\text{K}$), pode-se encontrar o valor de ε_g na Fig. 4.10, logo $\varepsilon_{CO_2} = 0,047$. Analogamente, pela Fig. 4.11, $\varepsilon_{H_2O} = 0,028$.

Para calcular o fator de correção de emitância, é preciso determinar alguns parâmetros:

$$P_{CO_2} * L + P_{H_2O} * L = 0,0083 + 0,0096 = 0,0179 \text{ atm.m}$$

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O} + P_{CO_2}} = \frac{0,1078}{0,1078 + 0,0940} = 0,52$$

Da Fig. 4.12, tem-se que $\Delta\varepsilon = 0$. Após calcular todos os termos:

$$\varepsilon_g = 1,0 * 0,047 + 1,10 * 0,028 - 0 = 0,078$$

$$\alpha_g(T_p) = C_{CO_2} * \dot{\varepsilon}_{CO_2} * \left(\frac{T_g}{T_p}\right)^{0,65} + C_{H_2O} * \dot{\varepsilon}_{H_2O} * \left(\frac{T_g}{T_p}\right)^{0,45} - \Delta\alpha$$

Utilizando a mesma figura da emitância para CO_2 , figura 4.11, porém com o valor corrigido:

$$\dot{\varepsilon}_{CO_2} = f\left(P_{CO_2} * L * \frac{T_p}{T_g}; T_p\right) = f(0,0039; 437,5) = 0,032$$

Analogamente para a água, com figura 4.12:

$$\dot{\varepsilon}_{H_2O} = f\left(P_{H_2O} * L * \frac{T_p}{T_g}; T_p\right) = f(0,0045; 437,5) = 0,028$$

Do mesmo modo, $\Delta\alpha = 0$, pois como o parâmetro de correção $\frac{T_p}{T_g}$ é inferior a 1,0 pode-se concluir pelo gráfico que o valor de correção da absorção será igual a zero.

$$\alpha_g(T_p) = C_{CO_2} * \varepsilon_{CO_2} * \left(\frac{T_g}{T_p} \right)^{0,65} + C_{H_2O} * \varepsilon_{H_2O} * \left(\frac{T_g}{T_p} \right)^{0,45} - \Delta\alpha \Rightarrow$$

$$\alpha_g(T_p) = 1,0 * 0,032 * \left(\frac{937,3}{437,7} \right)^{0,65} + 1,10 * 0,028 * \left(\frac{937,3}{437,7} \right)^{0,45} - 0 \Rightarrow$$

$$\alpha_g = 0,096$$

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = \sigma * [\varepsilon_g(T_g) * T_g^4 - \alpha_g(T_p) * T_p^4] \Rightarrow$$

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = \sigma * [0,066 * 937,3^4 - 0,0553 * 437,7^4] \Rightarrow$$

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = 119,6kW$$

5.1.2. Câmara

Os cálculos da radiação de gases de combustão e da convecção serão efetuados da mesma forma como foram feitos para o feixe de tubos. Portanto, o desenvolvimento a seguir será mais breve, porém foram ressaltados os pontos diferentes:

$$Q_{gases} = Q_{agua}$$

$$\dot{m}_{gases} * c_{p,gases} * (T_{T_IN} - T_{T_OUT}) = Q_{agua}$$

Após algumas tentativas

$$6,22 * 1,35 * (T_{T_IN} - 838,3) = 4920,3$$

$$T_{T_IN} = 883,9^\circ C$$

Para a determinação do C_p , foi utilizado as mesmas correlações do Van Wylen para a temperatura média dos gases dentro da câmara de combustão.

5.1.2.1. Convecção

Da mesma forma, será calculado o coeficiente Ucc:

$$U_{CC} = U'_{CC} * F_{PP} * F_a * F_D$$

$$U'_{CC} = 0,287 * \frac{(\dot{m}_{gases})^{0,61}}{(D_o)^{0,39}} = 0,287 * \frac{(6,22 * 2,2046)^{0,61}}{(2,5)^{0,39}} = 146,44 BTU / ft^2 * {}^oF$$

Convertendo para as unidades do Sistema Internacional (SI):

$$U'_{CC} = 840,22 W/m^2 \cdot ^\circ C$$

Como pode ser visto, o diâmetro externo utilizado foi estimado com bases nos cálculos iterativos desenvolvido. Para a determinação dos fatores que compõe o cálculo do coeficiente Ucc, é necessário obter a temperatura de filme:

$$T_f ({}^oF) = \frac{T_p + T_\infty}{2}$$

Estimando a temperatura próxima ao do fluido que escoa internamente, e a temperatura do fluido ao longe a média da entrada e saída dos gases:

$$T_f (\text{°} F) = \left(\frac{T_{\text{água_IN}} + T_{\text{água_OUT}} + 20 + T_{\text{gases_IN}} + T_{\text{gases_OUT}}}{4} \right) * 1,8 + 32$$

$$T_f (\text{°} F) = \left(\frac{25 + 264 + 20 + 838,3 + 883,9}{4} \right) * 1,8 + 32 =$$

$$T_f (\text{°} F) = 1544 \text{°} F$$

Da Fig. 4.8, tem-se $F_{pp} = 0,137$

Na caldeira no espaçamento entre os tubos existe uma espécie de uma membrana, para assegurar que o fluxo de calor siga uma direção desejada. Como mostrado a seguir:

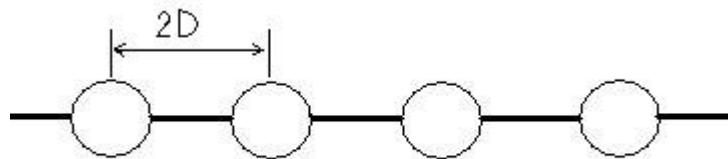


Figura 5.2 Arranjo dos tubos na câmara de combustão

O adimensional de Reynolds é obtido através da equação:

$$\text{Re} = \frac{V * D}{\nu}$$

Onde:

D: Diâmetro do tubo;

V: Velocidade de escoamento do gás;

v: Viscosidade cinemática do fluido.

O cálculo da área de escoamento difere um pouco dos tubos. Observe:

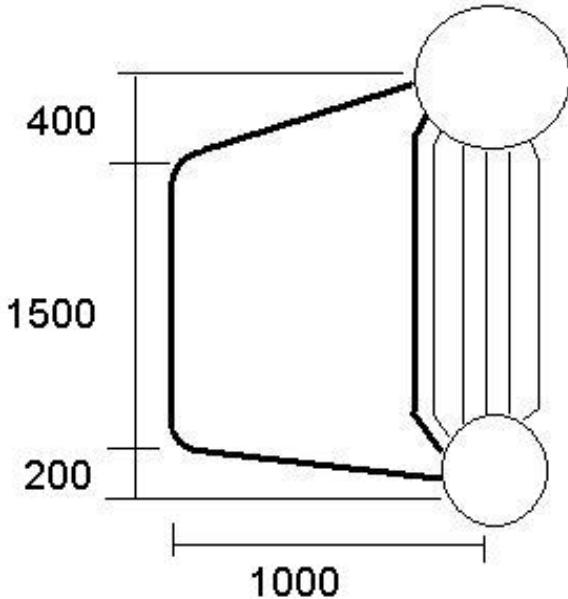


Figura 5.3 Diagrama esquemático da caldeira aquatubular

$$A_{sec_trans} = L * (H - 0,30)$$

$$A_{sec_trans} = 1,0 * (2,1 - 0,3)$$

$$A_{sec_trans} = 1,8m^2$$

A massa específica pode ser calculada considerando os gases de combustão como perfeitos deste modo à equação geral se aplica:

$$\rho = \frac{R * T_{gases}}{P} = \frac{287 * 1134,2}{101325} = 0,311kg / m^3$$

Note que o foi aproximado o valor da constante R dos gases para o valor do ar. Logo a velocidade:

$$V = \frac{m_{gases}}{\rho * A_{sec_trans}} = \frac{6,22}{0,311 * 1,8} = 8,99m / s$$

Finalmente, o número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{8,99 * 0,0635}{0,000025} = 22832$$

Com o número de Reynolds calculado e o arranjo definido pode-se determinar qual é o valor de F_a , que vale 1,05.

Da mesma forma do feixe, o número de colunas é superior a 10 o que já determina que o coeficiente F_p seja igual a 1,0 (um).

Após calculado todos os fatores, determina-se U_{cc} :

$$U_{cc} = 840,2 * 0,137 * 1,05 * 1,0 = 120,8 W / m^2 {}^\circ C$$

Determinando a área de troca, e em seguida o calor convectivo:

$$A_{troca} = \frac{N_{tubos} * D * (L_{tub_long} + L_{tub_curt})}{2} =$$

$$A_{troca} = 48 * 0,0635 * (3,6 + 2,1) = 8,68 m^2$$

$$Q_{conv} = U_{cc} * A_{troca} * (T_{gases} - T_p) =$$

$$Q_{conv} = 120,8 * 8,68 * (883,9 - 838,3) =$$

$$Q_{conv} = 307,9 KW$$

5.1.2.2. Radiação dos gases

Para a troca de calor pela radiação dos gases, será considerado um valor aproximado da temperatura da parede do tubo:

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = \sigma * [\varepsilon_g(T_g) * T_g^4 - \alpha_g(T_p) * T_p^4]$$

Onde:

$$T_p = 10^\circ C + T_{vapor} = \left(10 + \frac{(264 + 25)}{2} \right) = 547,1K$$

$$\varepsilon_g(T_g) = C_{CO_2} * \varepsilon_{CO_2} + C_{H_2O} * \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon$$

Como o excesso de ar é o mesmo:

$$P_{CO_2} = 0,0940atm$$

$$P_{H_2O} = 0,1078atm$$

Adotando-se como modelo o arranjo com espaçamento de 2,0 x diâmetro para a câmara de combustão, sendo $D = 63,5mm$:

$$Le = 1,26 * \left(\frac{D}{2} \right) = 1,26 * \left(\frac{0,0635}{2} \right) = 80,0mm$$

Onde:

Le : Comprimento equivalente para a radiação dos gases

$$P_{CO_2} * Le = 0,094 * 0,0800 = 0,0075atm.m$$

$$P_{H_2O} * Le = 0,1078 * 0,0889 = 0,0086atm.m$$

$$\frac{P_{H_2O} + P_t}{2} = \frac{0,1078 + 1}{2} = 0,554atm$$

Das figuras 10 e , têm-se: $C_{CO_2} = 1,0$ e $C_{H_2O} = 1,1$

Utilizando os parâmetros $P_{CO_2} * Le = 0,0075atm.m$ e a temperatura dos gases de 1134,2K, pode-se encontrar o valor de ε_g na figura 4.10, logo $\varepsilon_{CO_2} = 0,042$. Analogamente, $\varepsilon_{H_2O} = 0,018$.

Para calcular o fator de correção de emitância, é preciso determinar alguns parâmetros:

$$P_{CO_2} * L + P_{H_2O} * L = 0,0075 + 0,0086 = 0,0161 \text{ atm.m}$$

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O} + P_{CO_2}} = \frac{0,1078}{0,1078 + 0,0940} = 0,52$$

Da Fig. 4.12, tem-se que $\Delta\varepsilon = 0$. Após calcular todos os termos:

$$\varepsilon_g = 1,0 * 0,042 + 1,10 * 0,018 - 0 = 0,062$$

$$\alpha_g(T_p) = C_{CO_2} * \varepsilon_{CO_2} * \left(\frac{T_g}{T_p} \right)^{0,65} + C_{H_2O} * \varepsilon_{H_2O} * \left(\frac{T_g}{T_p} \right)^{0,45} - \Delta\alpha$$

Utilizando a mesma figura da emitância para CO_2 , Fig. 4.10, porém com o valor corrigido:

$$\varepsilon_{CO_2} = f\left(P_{CO_2} * L * \frac{T_p}{T_g}; T_p\right) = f(0,0036; 547,1) = 0,033$$

Analogamente para a água, com figura 4.11:

$$\varepsilon_{H_2O} = f\left(P_{H_2O} * L * \frac{T_p}{T_g}; T_p\right) = f(0,0042; 547,1) = 0,021$$

Do mesmo modo, $\Delta\alpha = 0$, pois como o parâmetro de correção $\frac{T_p}{T_g}$ é inferior

a 1,0 pode-se concluir pelo gráfico que o valor de correção da absorância será igual a zero.

$$\alpha_g(T_p) = C_{CO_2} * \dot{\varepsilon}_{CO_2} * \left(\frac{T_g}{T_p} \right)^{0,65} + C_{H_2O} * \dot{\varepsilon}_{H_2O} * \left(\frac{T_g}{T_p} \right)^{0,45} - \Delta\alpha \Rightarrow$$

$$\alpha_g(T_p) = 1,0 * 0,033 * \left(\frac{1134,2}{547,1} \right)^{0,65} + 1,10 * 0,018 * \left(\frac{1134,2}{547,1} \right)^{0,45} - 0 \Rightarrow$$

$$\alpha_g = 0,085$$

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = \sigma * [\dot{\varepsilon}_g(T_g) * T_g^4 - \alpha_g(T_p) * T_p^4] \Rightarrow$$

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = \sigma * [0,062 * 1134,2^4 - 0,085 * 547,1^4] \Rightarrow$$

$$\frac{Q_{rea.gas}}{A} = 41,9 kW$$

5.1.2.3. Radiação da chama

Em virtude, da dificuldade de obtenção de referencias da temperatura da chama do Biodiesel, utilizou-se como referência um estudo feito por Lapuerta que levantou uma curva relacionando a relação ar combustível com a temperatura adiabática da chama (TAC), com valores iniciais de pressão e temperatura iguais a 80 bars e 900k respectivamente. Para que fosse possível agregar estes valores no cálculo, foi traçada uma linha de tendência para os pontos coletados, na Fig. 5.4.

Portanto para um excesso de 50 %, a temperatura adiabática da chama $T_{chama} = 2187K$:

$$Q_{rad.chama} = \Psi * p * \varepsilon_p * A * \sigma * (T_{ch}^4 - T_{parede}^4)$$

Onde:

Ψ : Função do arranjo dos tubos. Da figura 24, $\Psi = 0,85$

p : Fator de chama, variando de 0,8 a 1,0. No caso, será considerado um valor intermediário $p := 0,9$

ε_p : Emissividade do material. Para o aço carbono, $\varepsilon_p = 0,80$

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, sendo $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W / m^2 K^4$

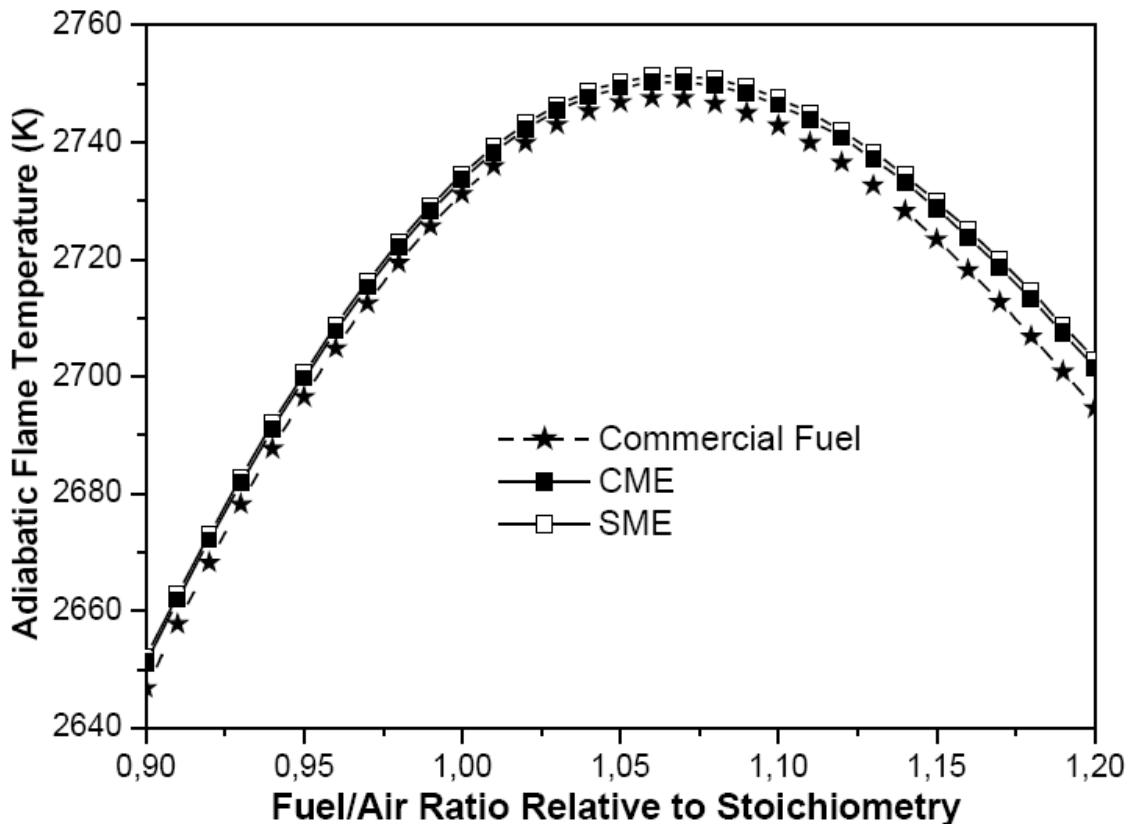


Figura 5.4 Temperatura adiabática da chama em função do excesso de ar

Estimando a temperatura do tubo em 10°C superior a temperatura do vapor:

$$T_p = (264 + 10 + 273,15)K = 547,15K$$

Pode-se determinar o valor do coeficiente de troca de calor por radiação de chamas por unidade de área:

$$\frac{Q_{rea.chama}}{A} = 0,85 * 0,90 * 0,85 * 5,67 \cdot 10^{-8} * (2187^4 - 547,15^4) \Rightarrow$$

$$\frac{Q_{rea.chama}}{A} = 1219,93 kW / m^2$$

Calor de radiação da chama:

$$Q_{rad_chama} = 1219,93 * 8,99 = 5658,8 kW / m^2$$

5.1.3. Balanço geral

$$\text{Feixe de tubos } Q_{\text{total_tubos}} = Q_{\text{rad_gas}} + Q_{\text{conv}}$$

$$Q_{\text{total_tubos}} = 119,6 + 3117,7 = 3237,3 \text{ kW}$$

$$\text{Overdesign_tubos} = \left(1 - \frac{Q_{\text{total_tubos}}}{Q_{\text{agua_sat}}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{3237,3}{3149,1}\right) * 100 = 2,8\%$$

$$Q_{\text{total_cald}} = Q_{\text{rad_gas}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad_chama}}$$

$$Q_{\text{total_cald}} = 41,9 + 307,9 + 5658,8 = 6008,6 \text{ kW}$$

$$\text{Overdesign_caldeira} = \left(1 - \frac{Q_{\text{total_cald}}}{Q_{\text{agua_vapor}}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{6008,6}{4920,3}\right) * 100 = 22,3\%$$

Evidentemente, todos os cálculos aqui apresentados são correlacionados, e, portanto devem ser calculados em conjunto. Os valores acima apresentados foram obtidos após extensivas tentativas e iterações.

5.2. Comparação dos resultados para o diesel e biodiesel

Analogamente aos cálculos feitos para o biodiesel, foram feitos os mesmos cálculos para o petrodiesel. Entretanto, para se ter uma comparação mais precisa foram mantidas as dimensões do equipamento.

Os resultados estão apresentados na Tab. 5.1., que representam os valores calculados para uma caldeira aquatubular com 246 tubos e com dimensões aproximadas de 3,0 m de altura, 2,0 m de largura e comprimento de 3,5 m. Nota-se para estas dimensões o gerador de vapor alimentado com biodiesel leva uma considerável vantagem, visto que os rendimentos foram considerados, em ambos os casos, iguais a 70 %.

Tabela 5.1 Quadro comparativo entre obiodiesel e o GV adaptado ao petrodiesel

Comparação dos resultados			
	Biodiesel	Petrodiesel	Unidade
PCI	36947	43308	KJ/kg
Excesso de ar	50	50	%
Temp da chama	2187	1951	K
vazão de comb	0,312	0,266	Kg/s
m AC	18,93	22,78	Kg ar/kg comb
T saída	450	450	°C
Q caldeira calc / req	1,22	0,8	
Q tubos calc / req	1,03	1,03	
Q total calc / req	1,15	0,89	

É importante ressaltar que esta unidade de geração de vapor foi projetada inicialmente para biodiesel e depois averiguada sua operação com o diesel convencional. A seguir serão apresentadas as mesmas comparações, entretanto a concepção original será para a utilização de petrodiesel e a verificação para biodiesel.

Tabela 5.2 Quadro comparativo entre o petrodiesel e o GV adaptado ao biodiesel

Comparação do petrodiesel com biodiesel			
	Biodiesel	Petrodiesel	Unidade
PCI	36947	43308	kJ/Kg
Excesso de ar	50	50	%
Temp da chama	2187	1951	K
vazão de comb	0,312	0,266	Kg/s
m AC	18,93	22,78	Kg ar/ kg comb
T saída	450	450	°C
Q caldeira calc / req	1,14	1,14	
Q tubos calc / req	1,72	1,12	
Q total calc / req	1,49	1,13	

Como é possível observar, mantendo as mesmas condições e alterando apenas as dimensões do equipamento, o biodiesel também atende as novas necessidades. Entretanto, nota-se também que o biocombustível apresenta um maior consumo se comparado com o diesel derivado de petróleo. As dimensões são: Altura 3,0 m; largura 2,8 m, comprimento 4,0 metros e número de tubos 279.

A seguir será feita a comparação do biodiesel com o petrodiesel utilizando o mesmo equipamento e ainda com os mesmos valores de consumo. Nesta comparação nota-se uma ligeira desvantagem do biodiesel para esta dimensão, pois o mesmo diesel convencional operando com um menor rendimento ele atende perfeitamente a demanda de geração de vapor.

Tabela 5.3 Quadro comparativo entre o petrodiesel e o biodiesel utilizando o mesmo equipamento

Comparação diesel e biodiesel consumo equivalente			
	Biodiesel	Petrodiesel	Unidade
PCI	36947	43308	kJ/kg
rendimento	70	60	%
Excesso de ar	50	50	%
Temp da chama	1892	2037,5	K
vazão de comb	0,312	0,31	Kg/s
m AC	18,93	21,33	Kg ar/ kg comb
T saída	450	450	°C
Q caldeira calc / req	1,71	1,08	
Q tubos calc / req	1,14	1,12	
Q total calc / req	1,49	1,11	

Das comparações acima foi possível observar que como o biodiesel apresenta maiores valores de temperatura de chama, logo o calor transferido por radiação da chama é maior, consequentemente pode-se recomendar a operação do biodiesel com um excesso de ar um pouco maior que diesel, desta forma diminui-se a temperatura de saída dos gases, contribuindo para a não formação de óxidos de nitrogênio.

5.3. Discussão dos resultados

Existe uma série de diferenças entre o diesel derivado de óleos vegetais e o diesel oriundo da destilação do petróleo. Estas distinções relacionadas às características do combustível que exercem grande influência nos rendimentos, nos poderes caloríficos e principalmente nos componentes do equipamento utilizado. Logo, o uso do biodiesel no lugar do petrodiesel deve ser muito bem analisado, exceto para a utilização do biocombustível a motores de combustão interna, pois já vêm sendo realizados diversos testes para esta aplicação onde se obtiveram resultados bastante satisfatórios nesta substituição. Já a utilização do diesel, derivado de fontes renováveis, em aplicações industriais, implicará em grandes estudos de adaptação do novo combustível aos equipamentos.

Bocais e queimadores são dimensionados levando em consideração vários fatores, em especial a viscosidade do fluido, deste modo como existe esta variação na viscosidade dos biocombustíveis provenientes de matérias-primas diferentes é necessário verificar os reais valores de viscosidade, para que seja possível uma ótima operação. Pois, as diferentes viscosidades podem causar a instabilidade resultando em ineficiência na geração de vapor.

A Riello, fabricante de queimadores industriais, já disponibiliza no mercado um pacote para adaptação dos equipamentos já existentes para a utilização do biodiesel.

Os materiais dos dutos de alimentação e exaustão também deverão ser observados, dependendo da concentração de componentes que reagem “agressivamente” com a parede do equipamento (antes ou depois da combustão) o material poderá ser danificado e consequentemente o equipamento também. Neste caso, o biodiesel leva uma vantagem, visto que não apresenta substâncias de enxofre em sua composição, grandes responsáveis pela corrosão das chaminés. Entretanto, deve-se estar atento quando se utiliza o B-100, biodiesel puro, pois necessita de mangueiras (de borracha) especiais, já que atua como solvente de materiais plásticos e sintéticos.

Outro ponto determinante de uma substância inflamável é o ponto de fulgor, que é a temperatura mínima que ocorre a formação de gases que ocasionam a

combustão. O biodiesel apresenta o ponto de 149 °C ao passo que o do petrodiesel é de 107 °C, de acordo com o Núcleo de Assusntos Estratégicos (NAE) logo o biodiesel oferece uma maior segurança no transporte e na armazenagem.

Em sua composição química o biodiesel tem um maior grau de oxigenação do que o do diesel derivado de petróleo, assim consegue-se uma combustão mais próxima da completa na utilização do biodiesel. Devido à melhor eficiência no processo de combustão, ocorre uma menor liberação de gases poluentes como o monóxido de carbono um dos responsáveis pelo o efeito estufa, notável nas grandes cidades.

Como já mencionado nas comparações, a queima do biodiesel esta suscetível a gerar óxidos de nitrogênio, bastante danoso à camada de ozônio. No entanto, a quantidade de Nox gerada é muito favorecida com a temperatura, logo o controle da temperatura é muito importante na utilização deste combustível.

CONCLUSÃO

O biodiesel, além de ser ambientalmente benéfico e de substituir a demanda de diesel, torna-se ainda mais atrativo no cenário brasileiro: sua abundância de terras e matérias-primas, resultando em um elevado potencial de produção. Porém, ainda não aparenta ser economicamente viável devido à escassa oferta de incentivos governamentais, inserindo-se a instabilidade cambial que atinge diretamente o agricultor, às reservas petrolíferas brasileiras que ainda não foram completamente exploradas e seus elevados custos, os quais exigem aprimoramento de tecnologia e estudos aprofundados.

Recentemente, as iniciativas de estudiosos, empreendedores e do governo estão auxiliando o desenvolvimento do biodiesel a entrar no ciclo da Economia do país, inserindo diferentes aspectos positivos simultaneamente, como a inclusão social, maior estabilidade à produção agrícola, utilização de fontes energéticas menos poluentes e renováveis.

Entretanto, deve-se ressaltar que os estudos não devem se restringir a viabilização da produção, mas também o seu destino. Como o selo social insere o pequeno e médio proprietário de forma mais efetiva na produção nacional, deve-se pensar também como estes produtores podem reaproveitar resíduos ou matéria-prima que tem disponível para gerar a energia de subsistência necessária, transformá-los em fornecedores para as indústrias ou ainda incentivar as próprias indústrias a terem uma produção e/ou processamento próprio do combustível.

As comparações feitas serviram para demonstrar a potencialidade e viabilidade técnica deste combustível. Entretanto, por se tratar de um estudo, foram calculados e mencionados apenas os pontos mais relevantes para que se pudesse obter análises e comparações consistentes.

Com os custos atuais do petróleo, o biodiesel ainda se apresenta como uma alternativa cara e economicamente não atrativa, porém este estudo se apresenta como comprovação de uma alternativa viável a uma fonte não renovável de energia, podendo num futuro próximo ser uma alternativa viável.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.anp.gov.br>
- [2] <http://www.biodieselmagazine.com>
- [3] <http://www.biodiesel.org>
- [4] <http://www.biodieselbr.com>
- [5] www.planalto.gov.br
- [6] www.rbb.ba.gov.br/arquivo/94.pdf
- [7] <http://www.panoramabrasil.com.Br>
- [8] <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u107824.shtml>
- [9] '<http://www.abrace.org.br/noticia.asp?IdClip=13487>
- [10] <http://www.paginarural.com.br>
- [11] Nye, M. J. T. W.; Williamson, S.; Deshpande, J. H.; J. Am. Oil Chem. Soc. 1983, 60, 1598
- [12] Mittelbach, M.; Tritthart, P.; J. Am. Oil Chem. Soc. 1988, 65, 1185
- [13] www.ahk.org.br
- [14] <http://www.rbb.ba.gov.br>
- [15] www.biodiesel.gov.br
- [16] PIRES, M. de M. et al. Biodiesel de Mamona: Uma avaliação econômica. In: Congresso Brasileiro de Mamona, 1., 2004, Campina Grande. Anais... Campina Grande: Embrapa, 2004. 1 CD-ROM.
- [17] <http://www.seprod.pa.gov.br>
- [18] <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>
- [19] www.abnt.org.br/
- [20] www.ntu.org.br
- [21] <http://www.ibge.gov.br>
- [22] www.biodeselbrasil.com.br
- [23] www.cori.rei.unicamp.br
- [24] www.cgee.org.br/arquivos/pe_19.pdf
- [25] www.bndes.gov.br/programas/infra/biodiesel.asp
- [26] www.upf.br/cepeac/download/rev_esp_2006_art4.pdf
- [27] www.amazonia.org.br/negocios/index.cfm?fuseaction=noticia&id=132229
- [28] YAZAKI, C. K. "Mitigação de poluentes em veículos que utilizam motores de ignição por compressão a partir do uso de combustíveis a base de óleos vegetais", EPUSP 2005.
- [29] www.scielo.br
- [30] Zagonel, G.; Costa Neto, P. R.; Ramos, L. P.; In: Anais do Congresso Brasileiro de Soja; Centro Nacional de Pesquisa de Soja; Empresa Nacional de Pesquisa Agropecuária; Londrina, PR, 17 a 20 de maio, 1999; p. 342

- [31] Martins, H., Teixeira, L.C., Balanço energético da produção de óleos vegetais transesterificados, III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1985.
- [32] www.fendel.com.br/opmar06.html
- [33] Ministério da Indústria e do Comércio, MIC; Produção de Combustíveis Líquidos a Partir de Óleos Vegetais; Secretaria de Tecnologia Industrial; Coordenadoria de Informações Tecnológicas; Brasília, DF, 1985.
- [34] Freedman, B.; Butterfield, R. O.; Pryde, E. H.; J. Am. Oil Chem. Soc. 1986, 63, 1375
- [35] YAMANE E. "Notas de aula da disciplina Geradores e turbinas a vapor", EPUSP 2006.
- [36] PERA H. "Geradores de vapor", Editora Fama 2º edição, 1990.
- [37] <http://www.aquaplan.com.br/caldeira.htm>
- [38] www.abam.com.br
- [39] VIÉGAS, Ismael J. M., MÜLLER, Antônio A.. Cultura do Dendezeiro na Amazônia - Malaysian Palm Oil promotion Council Latin America – MPOPC Brasileira. Disponível em: <<http://www.biodeselbr.com/plantas/palma/palma.htm>>. Acesso Agosto 2006
- [40] DINTEN, Carolina ª M.. O trabalho na avicultura de corte: Organização, tecnologia e resultados da produção, Campinas
- [41] www.tema.org
- [42] BABCOCK H. George; WILCOX Stephen. BABCOCK & WILCOX Steam – Its generation and use. The Babcock & Wilcox CompanyUSA 1978.
- Riello burners www.rielloburners.com
- [43] INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, Editora LTC, 5 ª edição, 2003.
- [44] WYLEN, Gordon J.Van; SONNTAG Richard E; BORGNAKKE, Claus. Fundamentos da termodinâmica, Editora Egard Blucher, 5ª edição, 2001.
- [45] WHITE, Frank M. Mecânica dos Fluidos, Editora Mc Graw Hill, 4ª edição, 1999.