

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA

PAULO MÁRCIO MENEZES DE SOUZA

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE CO₂ DECORRENTES DO USO DE
BIODIESEL**

São Paulo - SP

2013

PAULO MÁRCIO MENEZES DE SOUZA

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE CO₂ DECORRENTES DO USO DE
BIODIESEL**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para obtenção do título de especialista em Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.

Área de Concentração:

Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai.

São Paulo - SP

2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Paulo Márcio Menezes

Estudo das emissões de CO₂ decorrentes do uso de biodiesel / P.M.M. de Souza. -- São Paulo, 2013.

60 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

**1. Dióxido de carbono (Emissão; Estudo) 2. Biodiesel
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Minha Querida Família que sempre me incentiva e apoia em todos os momentos da vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me proporcionado uma vida com equilíbrio para traçar objetivos e cumprir metas desafiadoras.

Aos professores do curso, por se dedicarem e nos incentivarem o tempo todo.

À Professora Dra. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai pela contribuição no desenvolvimento da monografia.

Aos meus colegas de curso, que tornaram os momentos agradáveis no desenvolvimento das atividades.

À minha esposa Cyleni, que sempre me incentivou a participar do curso e me apoiou em todos os momentos.

RESUMO

A queima de combustíveis líquidos fósseis em motores de combustão interna é uma das principais fontes causadoras do aumento da concentração de GEE e do aumento médio da temperatura do planeta. Dentre os gases de efeito estufa, destaca-se o gás carbônico, fato que tem sido motivo de crescente preocupação em nível mundial.

O uso de biodiesel, em mistura com óleo diesel, em motores do ciclo diesel contribui para a redução das emissões atmosféricas de CO₂.

Neste trabalho realizou-se um estudo da emissão de gás carbônico (CO₂) na queima de biodiesel de soja utilizado em motores do ciclo diesel, nas proporções de 2, 5, 20 e 100%.

Os resultados mostram que a redução mais significativa de emissões de CO₂ ocorre para a mistura de diesel e biodiesel na proporção de 20%.

Palavras-chave: biodiesel, dióxido de carbono, emissões, efeito estufa

ABSTRACT

The burning of fossil liquid fuels in internal combustion engines is one of the main sources of increased concentrations of greenhouse gases (GHG) and the average increase in global temperature. Among the greenhouse gases, there is carbon dioxide, a fact that has been of growing concern worldwide.

The use of biodiesel blended with diesel fuel in diesel engines contributes to the reduction of emissions of CO₂.

In this work we carried out a study of the emission of carbon dioxide (CO₂) from burning soy biodiesel used in diesel engines, the ratios of 2, 5, 20 and 100%.

The results show that the most significant reduction in CO₂ emissions occurs for the mixture of diesel and biodiesel in a proportion of 20%.

Keywords: biodiesel, carbon dioxide, emissions, greenhouse

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emissões gasosas da combustão do biodiesel B20 em um motor de combustão interna	26
Figura 2 - Efeito do nível de mistura do biodiesel sobre as emissões de CO ₂	27
Figura 3 - Emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira (2011)	28
Figura 4 - Emissões per capita de CO ₂ (2009)	28
Figura 5 - Emissões relativas na produção de energia elétrica (2009).....	29
Figura 6 - Ações de emissões globais de gases de efeito estufa Antropogênicos	30
Figura 7 - Ciclo renovável de carbono na produção e uso de biocombustíveis	31
Figura 8 - Potencial de produção das oleaginosas por estado	34
Figura 9 - Matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel (perfil nacional)	36
Figura 10 - Ciclo aberto do carbono do diesel e ciclo fechado do carbono do biodiesel.....	36
Figura 11 - Rotas tecnológicas para produção de bioenergia	37
Figura 12 - Fluxograma de massa, no processo de transesterificação	38
Figura 13 - Fluxograma do processo de produção de biodiesel	38
Figura 14 - Produção mundial de biodiesel em 2008	41
Figura 15 - Demanda obrigatória de biodiesel no Brasil	42
Figura 16 - Evolução anual da produção, da Demanda compulsória e da capacidade nominal autorizada pela ANP no País	43
Figura 17 - Emissões de CO ₂ em relação ao combustível utilizado	48
Figura 18 - Emissões de CO ₂ / tonelada ano	49
Figura 19 - Emissões de CO ₂ por tipo de combustível para a frota brasileira a diesel no período entre Dezembro / 2002 à Janeiro / 2008	51
Figura 20 - Mton de CO ₂ vs número da frota de veículos a diesel no Brasil	52

Figura 21 - Projeções sobre a redução de CO ₂ entre os anos de 2010 e 2025	53
Figura 22 - Emissões evitadas no ciclo de vida das misturas B2 e B5	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução das porcentagens de biodiesel na mistura	21
Tabela 2 - Características de alguns vegetais com potencial para a produção de biodiesel	35
Tabela 3 - Comparação entre ésteres metílico e etílico	40
Tabela 4 - Composição típica de éster metílico de óleo de soja	47
Tabela 5 - Veículos brasileiros a diesel produzidos entre Dezembro / 2002 e Janeiro / 2008	50
Tabela 6 - Projeções para as frotas de veículos a diesel no Brasil	51
Tabela 7 - Emissões de GEE e emissões evitadas em misturas B2 e B5 (kg CO ₂ eq / kg de Combustível)	54
Tabela 8 - Emissões evitadas de CO ₂ em misturas B2 e B5	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
B2	Combustível com concentração de 2% de Biodiesel
B5	Combustível com uma concentração de 5% de Biodiesel
B20	Combustível com uma concentração de 20% de Biodiesel
B100	Combustível com uma concentração de 100% de Biodiesel
BEN	Balanco Energético Nacional
BES	Biodiesel Etílico de Soja
BMS	Biodiesel Metílico de Soja
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CH ₄	Metano
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono ou gás carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DOU	Diário Oficial da União
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FETRANSPOR	Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gases
HC	Hidrocarbonetos
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrogênio
IPCC	International Panel on Climate Change
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material Particulado
NBB	National Biodiesel Board
NO	Óxido Nitríco
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio Troposférico
PAN	Peroxiacetilnitrato
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
S	Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 REVISÃO DA LITERATURA	15
1.1 Principais Poluentes	15
1.2 O Biodiesel	19
1.3 Legislação.....	21
1.4 Benefícios ambientais, sociais e econômicos com a utilização do biodiesel no Brasil.....	24
1.5 Formação de biomassa e conversão em biocombustíveis	30
1.6 Matérias-primas	32
1.7 Produção de biodiesel	37
2 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.1. Cálculo das emissões de CO ₂ de acordo com o combustível.....	46
3.1.1. Diesel	47
3.1.2. Biodiesel de soja	47
3.1.3. Biodiesel de óleos de fritura usados.....	48
3.2. Cálculo das emissões de CO ₂ dos veículos	49
4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	58

INTRODUÇÃO

A comunidade científica internacional vem demonstrando haver uma correlação positiva entre o aumento da concentração de gases causadores do efeito estufa e o aumento médio da temperatura do planeta, fato apontado como responsável pelo aumento das adversidades e alterações climáticas na superfície terrestre, como secas, inundações e degelo das calotas polares. A queima de combustíveis líquidos fósseis em motores de combustão interna é uma das principais fontes causadoras desse aumento, pois nela são liberados gases de efeito estufa - GEE para a atmosfera, principalmente o gás carbônico, fato que tem sido motivo de crescente preocupação em nível mundial.

A predominância dos combustíveis de origem fóssil na matriz de transportes brasileira é significativa, apesar de o país ser um exemplo mundial na implementação de programas de biocombustíveis.

O biodiesel, biocombustível derivado de fontes renováveis para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão, contribui para a redução da temperatura global do planeta e dos custos com a saúde humana, proporciona emprego e renda, é totalmente miscível em óleo diesel mineral, aumenta a lubricidade desse combustível melhorando o desempenho do motor, é biodegradável e atóxico.

A utilização do biodiesel produzido no Brasil permite reduzir a dependência das importações de óleo diesel, o que representa uma vantagem estratégica do ponto de vista econômico gerando divisas para o País, já que o diesel é o combustível que abastece toda a logística rodoviária brasileira.

O biodiesel pode ser produzido a partir de diversas matérias primas, tais como óleos vegetais, gorduras animais, óleos e gorduras residuais. Pode, também, ser usado puro ou em mistura com o diesel mineral, em diversas proporções.

A tecnologia mais utilizada atualmente para a produção do biodiesel é a transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais como processo principal (com metanol e etanol).

Diante das vantagens apontadas, o governo incluiu o biodiesel na matriz energética Brasileira através da Lei nº 11.097, publicada em 13 de janeiro de 2005 que definiu volume mínimo obrigatório da mistura do biocombustível no diesel mineral. Dessa forma, o biodiesel está inserido em um novo ciclo do setor nacional de energia e reforça a promoção do uso de fontes renováveis e a diversificação da matriz energética.

É neste contexto que o presente trabalho realizou uma revisão bibliográfica sobre o estudo da emissão de gás carbônico (CO_2) na queima de biodiesel de soja utilizado em motores do ciclo diesel, nas proporções de 2, 5, 20 e 100%.

São objetivos do presente trabalho:

- a) Levantar dados sobre a identificação das oleaginosas e subprodutos (óleo de fritura) utilizados na produção de biodiesel,
- b) Levantar dados sobre a quantidade de CO_2 emitida pelos motores do ciclo diesel na queima de óleo diesel e de misturas de óleo diesel e biodiesel nas proporções de 2, 5, 20 e 100%.

A queima de biodiesel, em mistura com óleo diesel, em motores do ciclo diesel contribui para a redução das emissões atmosféricas de CO_2 .

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Principais Poluentes

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 001 de 23.01.1986, “impacto ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem: a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais”.

O ar atmosférico é composto por cerca de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, sendo o restante (1%) composto por gases como o argônio, dióxido de carbono e outros gases. Esta mistura de gases que compõe a atmosfera possui, naturalmente, uma determinada concentração típica de compostos. A poluição ambiental é caracterizada como uma acentuação ou incremento dos níveis desta concentração, que sejam capazes de atingir concentrações nocivas ao ambiente.

As fontes de poluição podem ser classificadas em móveis, quando produzem poluentes de forma dispersa no espaço (por exemplo, veículos) e estacionárias, quando produzem cargas pontuais de poluentes (por exemplo, chaminé de uma fábrica).

Os poluentes atmosféricos podem de uma forma geral ser classificados em primários e secundários. Os primários são emitidos diretamente da fonte poluidora para a atmosfera e os secundários são formados na atmosfera por meio de reações químicas entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera (AMARAL *et al.*, 2011).

Alguns poluentes possuem ação global, enquanto outros afetam, principalmente, a região na qual são emitidos e outros possuem caráter local.

Dentre os poluentes primários emitidos à atmosfera pela combustão do óleo diesel, encontram-se os óxidos de enxofre (SO_x), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), além de material particulado (MP), que são extremamente prejudiciais à saúde e comprometem a qualidade do ar (FETRANSPOR, 2011).

Alguns dos principais poluentes secundários são: ozônio troposférico (O_3), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aldeídos, peroxiacetilnitratos - PAN (AMARAL *et al.*, 2011), que não serão abordados neste estudo.

Os SO_x são formados a partir da reação entre o enxofre (S), contido no óleo diesel, e o oxigênio (O_2), após a combustão. O enxofre encontra-se no diesel sob a forma de mercaptanas, substâncias extremamente nocivas ao meio ambiente local. Elas são emitidas pela descarga dos motores diesel, principalmente em partidas e desacelerações, e quando não estão ajustados ou regulados. Quando liberado na média atmosfera, os SO_x reagem com a água, na forma de vapor ou condensada, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), que contribui para a formação de chuva ácida. Pelo fato de possuir concentrações praticamente nulas de composto de enxofre em sua composição, o biodiesel pode contribuir de forma acentuada para diminuição da poluição atmosférica e melhoria da saúde da população (FETRANSPOR, 2011).

Os NO_x são resultantes, principalmente, dos processos de combustão, que ocorrem na presença de oxigênio e nitrogênio presentes no ar. Também pode ser gerado por descargas elétricas. O óxido nítrico - NO, sob a ação de luz solar se transforma em dióxido de nitrogênio - NO_2 e tem papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos como o ozônio (AMARAL *et al.*, 2011).

Outro poluente emitido pela queima do diesel é o monóxido de carbono (CO), composto gerado nos processos de combustão incompleta de combustíveis fósseis e outros materiais que contenham carbono em sua composição (AMARAL *et al.*, 2011).

Os hidrocarbonetos resultam da queima incompleta de combustíveis e de sua evaporação (AMARAL *et al.*, 2011). Os HC reagem com o NO_x , na presença de radiação solar, ocasionando o smog fotoquímico, que traz como resultado o O_3 como poluente secundário (FETRANSPOR, 2011).

Considera-se MP, o conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. Pode ser inalável (quando seu diâmetro é menor que $2,5 \mu\text{m}$) ou não-inalável (FETRANSPOR, 2011).

O dióxido de carbono, um GEE, resultante principalmente das reações de combustão completa do carbono presente nos combustíveis é um poluente que possui ação global. Sua presença na atmosfera traz consequências severas, principalmente no que se refere às mudanças climáticas (AMARAL *et al.*, 2011).

São também considerados GEE, o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4), o vapor d'água e os clorofluorocarbono (CFC) (AMARAL *et al.*, 2011).

O caso do CO_2 é diferente em comparação com outros agentes poluentes. As emissões geradas durante a combustão de biodiesel em motores de combustão interna ou caldeiras são "recicláveis" através da fotossíntese vegetal. O CO_2 é liberado para a atmosfera quando o biodiesel é queimado e é reciclado pelo crescimento das plantas, que são posteriormente transformadas em combustível. Assim, o biodiesel também contribui para mitigar o aquecimento global (CORONADO *et al.*, 2009).

Os gases de efeito estufa são poluentes de ação global, provocam efeitos a nível planetário, principalmente através de desequilíbrios climáticos, tendo em vista que o aumento de sua concentração na atmosfera traz consequências sentidas globalmente. As mudanças na quantidade de gases de efeito estufa e aerossóis da atmosfera, na radiação solar e nas propriedades da superfície terrestre alteram o equilíbrio energético do sistema climático. As evidências obtidas por meio de observações de todos os continentes e da maior parte dos oceanos mostram que

muitos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas regionais, principalmente pelos aumentos de temperatura (AMARAL *et al.*, 2011).

Segundo o relatório do IPCC - International Panel on Climate Change, “o dióxido de carbono é o gás de efeito estufa antrópico mais importante (...) e o crescimento da sua concentração na atmosfera tem se agravado nos últimos 10 anos, ultrapassando em muito a faixa natural dos últimos 650.000 anos. (...) A principal fonte de aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono desde o período pré-industrial se deve ao uso de combustíveis fósseis, com a mudança no uso da terra contribuindo com uma parcela menor, mas significativa.” (BRANCO *et al.*, 2009).

Os GEE auxiliam no aquecimento e manutenção da temperatura no planeta, formando um “cobertor” que força parte da energia proveniente do sol a ficar retida nas proximidades da Terra, viabilizando a vida no planeta. A energia proveniente do sol chega ao planeta em ondas curtas, e tem parte absorvida principalmente pela superfície da Terra. Essa energia é redistribuída pela circulação atmosférica e oceânica e radiada ao espaço em comprimentos de ondas mais longos (radiação infravermelha). Sem o efeito estufa natural estima-se que a superfície da Terra teria temperatura média cerca de 30°C inferior a observada hoje. De uma forma geral, existe um equilíbrio entre radiação recebida e devolvida e qualquer fator que altere este equilíbrio, atuando tanto na chegada como na saída da radiação, pode ser fonte de alteração do clima. Esta mudança na energia disponível para o sistema Terra é expressa em termos de forçamento radiativo (perturbação do balanço da energia incidente e da energia emergente do planeta Terra, medida em watts/M²/período), podendo ser positiva, causando o aquecimento da troposfera e da superfície da Terra, ou negativa, causando o resfriamento da troposfera e da superfície da globo terrestre). A variação da concentração de gases na atmosfera tem diminuído a capacidade de resfriamento do planeta, causando um forçamento radiativo que tende a aquecer a baixa atmosfera e a superfície, intensificando o efeito estufa natural. O total de aquecimento irá depender da elevação das concentrações dos GEE, suas respectivas propriedades radiativas e as concentrações destes gases já presentes na atmosfera. Modelos meteorológicos de previsão que avaliam GEE, atividade solar, propriedades da superfície e alguns aspectos dos aerossóis levaram

à melhora de estimativas quantitativas do forçamento radiativo (AMARAL *et al.*, 2011).

Desta forma, destaque tem sido dado aos poluentes globais, isto é, GEE, em função do amplo reconhecimento científico de que sua concentração atmosférica tem aumentado ao longo do tempo, em função de atividades humanas. As concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram significativamente em consequência das atividades antropogênicas desde 1750, e agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos. Os aumentos globais da concentração de dióxido de carbono se devem principalmente ao uso de combustíveis fósseis e às mudanças no uso da terra. Já os aumentos da concentração de metano e óxido nitroso são devidos principalmente à agricultura (AMARAL *et al.*, 2011).

1.2 O Biodiesel

Os biocombustíveis de modo geral, apresentam impactos ambientais positivos, em comparação com os combustíveis de origem fóssil no processo de combustão dos motores e também porque seu processo de produção tende a ser mais limpo. Além disto, parte do CO₂ emitido pelos veículos é reabsorvida no desenvolvimento das plantações das matérias-primas utilizadas na produção dos biocombustíveis. Isto faz com que as emissões do CO₂ sejam parcialmente compensadas. Neste sentido, a adoção dos biocombustíveis pode representar um dos principais mecanismos de combate ao aquecimento global.

O Brasil tem muito a contribuir para o combate ao aquecimento global, pois possui uma matriz energética com 46% de fontes renováveis, enquanto que no mundo só utiliza 15% destas. Isto faz com que o país possua uma posição de destaque no cenário mundial por sua estratégia em agroenergia, que representa mais da metade desta fonte renovável (FERRÉS, 2010). Um dos principais casos de sucesso foi o do programa do etanol, lançado, inicialmente, com o objetivo de diminuir a dependência do petróleo importado pelo Brasil. Além do etanol, o Brasil também desenvolve outra

importante iniciativa para expandir a produção de biocombustíveis: o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB).

Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES (2008, p. 25), “a bioenergia pode ser definida como toda e qualquer forma de energia associada a formas de energia química acumulada mediante processos fotossintéticos recentes”. Alguns exemplos de fontes de bioenergia são: lenha e resíduos de serrarias, o carvão vegetal, o biogás resultante da decomposição anaeróbia de lixo orgânico e outros resíduos agropecuários, bem como os biocombustíveis líquidos, como o bioetanol e o biodiesel, e a bioeletricidade, gerada pela queima de combustíveis como o bagaço e a lenha.

De acordo com o Artigo 6º, inciso XXIV da Lei nº 11.097/2005 o biodiesel é definido como “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.”

Já a Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP nº 7, de 19 de março de 2008, define no Artigo 2º, inciso I: “biodiesel - B100 - combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais conforme a especificação contida no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução.”

Na definição americana, segundo o National Biodiesel Board - NBB (2012), o biodiesel é um mono-alquil-éster de cadeia longa de ácidos graxos, derivado de óleos vegetais ou gorduras animais em conformidade com as especificações ASTM D6751 para uso em motores diesel.

Pode-se considerar que biodiesel é um combustível de fonte renovável derivado de óleos vegetais, como girassol, mamona, soja, babaçu colza (canola), palma (dendê), pinhão manso, amendoim e outras oleaginosas, ou de gorduras animais, usado em motores a diesel, em qualquer concentração de mistura com o diesel que visa substituir total ou parcialmente o combustível de origem fóssil em motores de ciclo Diesel. O produto apresenta baixa toxidez, é isento de enxofre e de compostos

aromáticos e possui propriedades semelhantes ao diesel comum, além de baixo risco de explosão, ótima lubrificidade, dentre outras vantagens (COSTA NETO *et al.*, 2000).

O biodiesel pode ser usado puro ou em mistura com o óleo diesel em qualquer proporção. Mundialmente passou-se a adotar uma nomenclatura bastante apropriada para identificar a concentração do biodiesel na mistura. A nomenclatura empregada para as misturas de biodiesel-diesel mineral (B_n) refere-se a Blend (B) e ao percentual de biodiesel na mistura (n). Por exemplo, o B2, B5, B20 e B100 são combustíveis com uma concentração de 2%, 5%, 20% e 100% de Biodiesel, respectivamente.

1.3 Legislação

A Lei nº 11.097, publicada em 13 de janeiro de 2005, introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira e ampliou a competência administrativa da ANP, que passou, desde então, a denominar-se Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. A partir da publicação da citada lei, a ANP assumiu a atribuição de regular e fiscalizar as atividades relativas à produção, controle de qualidade, distribuição, revenda e comercialização do biodiesel e da mistura óleo diesel-biodiesel (B_n).

A mistura de biodiesel no Brasil segue o determinado pela Lei nº 11.097/2005 e pela Resolução do Conselho Nacional de Política Energética - CNPE nº 2, de 27 de abril de 2009. A primeira estabeleceu a mistura obrigatória de 2% de biodiesel no diesel convencional a partir de 2008 e 5% a partir de 2013.

Tabela 1 - Evolução das porcentagens de biodiesel na mistura (FERRÉS, 2010).

Ano	Mistura
2005	2% Autorizado
2008	2% Obrigatória
2008, 2º semestre	3% Obrigatória
2009, 2º semestre	4% Obrigatório
2010	5% Obrigatório

Já o CNPE determinou o aumento desse percentual para 4% a partir de julho de 2009. Percentuais de mistura entre 4% e 5% são permitidos, porém são de caráter voluntário, ou seja, dependem da viabilidade econômica da operação.

A seguir, são apresentados os principais requisitos legais associados ao biodiesel:

Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005

Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências.

Decreto nº 5.448, de 20 de maio de 2005

Regulamenta o § 1º do art. 2º da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, e dá outras providências.

Portaria MME nº 483, de 3 de outubro de 2005

Estabelece as diretrizes para a realização pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP de leilões públicos de aquisição de biodiesel.

Resolução ANP nº 14, de 11 de maio de 2012

Estabelece a especificação do biodiesel contida no Regulamento Técnico ANP nº 4/2012 e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional.

Resolução ANP nº 41, de 26 de outubro de 2010

Altera a Resolução ANP nº 02, de 29 de janeiro 2008 que, mediante prévia autorização da ANP, permite a utilização de biodiesel e de suas misturas com óleo diesel B, em teores diversos do autorizado pela legislação vigente, destinados ao uso específico.

Resolução ANP nº 40, de 24 de dezembro de 2008

Estabelece no Regulamento Técnico ANP nº 06/2008 a especificação do óleo diesel de referência para ensaios de avaliação de consumo de combustível e emissões veiculares para homologação de veículos automotores, ciclo diesel.

Resolução ANP nº 07, de 19 de março de 2008

Estabelece a especificação do biodiesel a ser comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional. Alterou a especificação para comercialização do biodiesel.

Resolução ANP nº 2 de 29 de janeiro de 2008

Dispõe sobre a utilização de biodiesel, B100, e de suas misturas com óleo diesel.

Resolução ANP nº 35, de 09 de novembro de 2007

Estabelece no Regulamento Técnico ANP nº 05/2007 a especificação do óleo diesel de referência para ensaios de consumo de combustível e emissões veiculares para homologação de veículos automotores ciclo diesel.

Resolução CNPE nº 06, de 16 de setembro de 2009

Estabelece em cinco por cento, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, de acordo com o disposto no art. 2º da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005.

Resolução CNPE nº 02, de 27 de abril de 2009

Estabelece em quatro por cento, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, de acordo com o disposto no art. 2º da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005.

Resolução CNPE nº 02, de 13 de março de 2008

Estabelece em três por cento, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, nos termos do art. 2º da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005.

Resolução CNPE n° 3, de 23 de setembro de 2005

Reduz o prazo de que trata o § 1º do art. 2º da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, e dá outras providências.

Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986

Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.

Desde 1º de janeiro de 2010, o óleo diesel comercializado em todo o Brasil contém 5% de biodiesel. Esta regra foi estabelecida pela Resolução CNPE nº 6/2009 que aumentou de 4% para 5% o percentual obrigatório de mistura de biodiesel ao óleo diesel. A contínua elevação do percentual de adição de biodiesel ao diesel demonstra o sucesso do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel e da experiência acumulada pelo Brasil na produção e no uso em larga escala de biocombustíveis.

1.4 Benefícios ambientais, sociais e econômicos com a utilização do biodiesel no Brasil

A produção e o uso do biodiesel no Brasil propiciam o desenvolvimento de uma fonte energética sustentável sob os aspectos ambiental, econômico e social e também trazem a perspectiva da redução das importações de óleo diesel, gerando divisas para o País (FERRÉS, 2010).

Além da diminuição da dependência do diesel importado, o biodiesel traz outros efeitos indiretos de sua produção e uso, como o incremento a economias locais e regionais, tanto na etapa agrícola como na indústria de bens e serviços. Com a ampliação do mercado do biodiesel, milhares de famílias brasileiras são beneficiadas, principalmente agricultores do semi-árido brasileiro, com o aumento de renda proveniente do cultivo e comercialização das plantas oleaginosas utilizadas na produção do biodiesel (FERRÉS, 2010).

Outro benefício para a sociedade, resultante da ampliação do uso do biodiesel, é o efeito positivo sobre o meio ambiente, acarretando a diminuição das principais emissões veiculares em comparação ao diesel derivado do petróleo.

Para uma avaliação mais precisa dos benefícios ambientais do biodiesel, é necessário levar em conta todo seu ciclo de vida, envolvendo a produção de sementes, fertilizantes, agrotóxicos, preparo do solo, plantio, processo produtivo, colheita, armazenamento, transporte e consumo desse combustível renovável. Quanto ao efeito estufa, deve-se avaliar a quantidade de gases emitida em todas as fases desse ciclo e deduzi-la do volume capturado na fotossíntese da biomassa utilizada como matéria-prima.

Segundo Penteado (2005), a utilização do biodiesel representa um ganho ambiental significativo, tanto no que se refere à redução das emissões, quando do uso em motores ciclo diesel, quanto ao balanço de CO₂, emitindo na queima e absorvido no crescimento da cultura agrícola utilizada como matéria-prima na sua produção.

A utilização do biodiesel apresenta diminuição de emissões de CO₂, reduzindo o efeito estufa: 1 tonelada de biodiesel significa uma redução de 2,5 toneladas de CO₂ (PENTEADO, 2005).

No caso do biodiesel de soja, o benefício de redução nas emissões foi quantificado por Garcia (2007). De acordo com o autor, em relação ao diesel de petróleo, o biodiesel puro de soja reduz as emissões em:

- 67% de hidrocarbonetos (HC);
- 48% de monóxido de carbono (CO);
- 78% de dióxido de carbono (CO₂);
- 47% de material particulado;
- 100% de óxidos de enxofre (SO_x).

Apesar da questão dos NO_x , considerados os dados apresentados (ou seja, observa-se uma desvantagem no uso do biodiesel pois aumenta suas emissões em relação ao diesel de petróleo) e dado o contexto atual de combate às causas das mudanças climáticas, o biodiesel se encaixa na categoria de combustíveis limpos, pois reduz as emissões de GEE, além de advir de fontes renováveis. Com esses benefícios, o biodiesel contribui para que se mantenha em níveis elevados, a participação de fontes limpas na sua matriz energética.

A Figura 1 apresenta os percentuais de emissões gasosas de combustão. No caso da combustão do biodiesel, as emissões são muito baixas do que as do diesel convencional com a exceção de NO_x . Deve-se observar que o valor de 100% é considerado o nível de emissões do motor a diesel (CORONADO *et al.*, 2009).

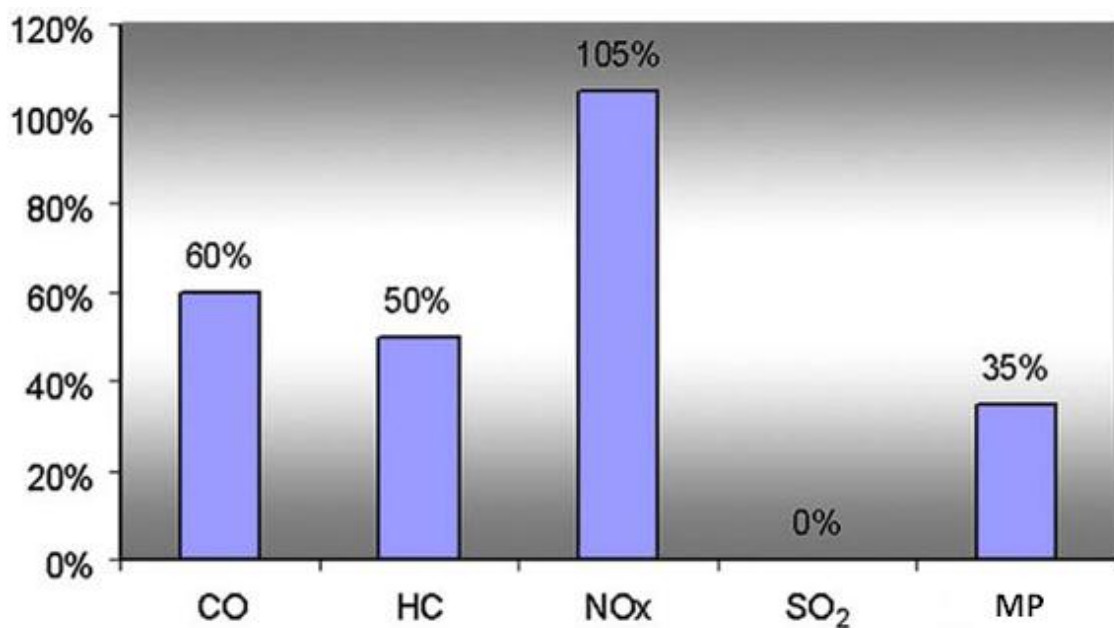


Figura 1 - Emissões gasosas da combustão do biodiesel B20 em um motor de combustão interna (CORONADO *et al.*, 2009).

Observa-se que a redução do dióxido de enxofre foi de 100%, resultado esperado, uma vez que o biodiesel, por sua origem vegetal, não contém enxofre. As emissões de CO provenientes da combustão em motores movidos a B20 foram 40 a 50% menores do que as do diesel convencional; isto acontece devido à presença de moléculas de oxigênio no biodiesel, que contribuem para uma combustão mais completa. As emissões de MP foram reduzidas para 35 a 45% em comparação com a operação com diesel. Uma diminuição no teor de hidrocarbonetos não queimados,

devido à combustão completa também ocorre, porque as correntes do carbono-hidrogênio e oxigênio nos ésteres auxiliam na formação de CO_2 e de água, ao contrário do que ocorre com o óleo diesel (CORONADO *et al.*, 2009).

A Figura 2 mostra o efeito dos níveis de mistura do biodiesel sobre as emissões de CO_2 (CORONADO *et al.*, 2009).

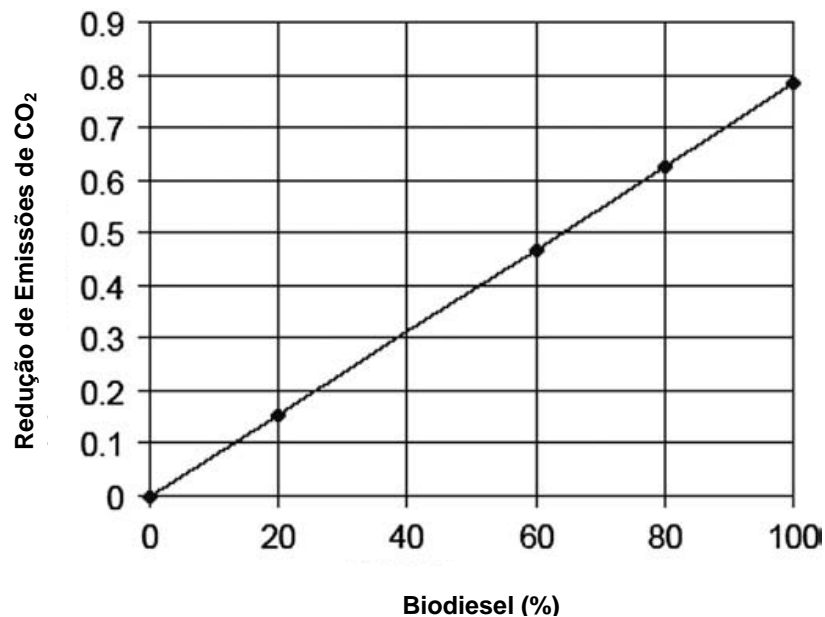


Figura 2 - Efeito do nível de mistura do biodiesel sobre as emissões de CO_2 (CORONADO *et al.*, 2009).

A questão da contribuição para efeito estufa deve ser tratada à parte das demais emissões de poluentes, pois depende essencialmente da fonte de energia utilizada para o transporte e, em menor escala, da tecnologia adotada. Assim, mesmo que se utilizem veículos elétricos, cuja emissão no transporte é zero, os efeitos sobre o fenômeno de aquecimento global poderão ocorrer, caso a energia seja gerada por usinas termoelétricas a óleo diesel, gás natural ou carvão mineral.

Em 2011, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 395,8 Mt CO_2 -eq, sendo que o segmento de transportes correspondeu por 48,5% deste total, conforme apresentado na Figura 3 (BRASIL, 2012).

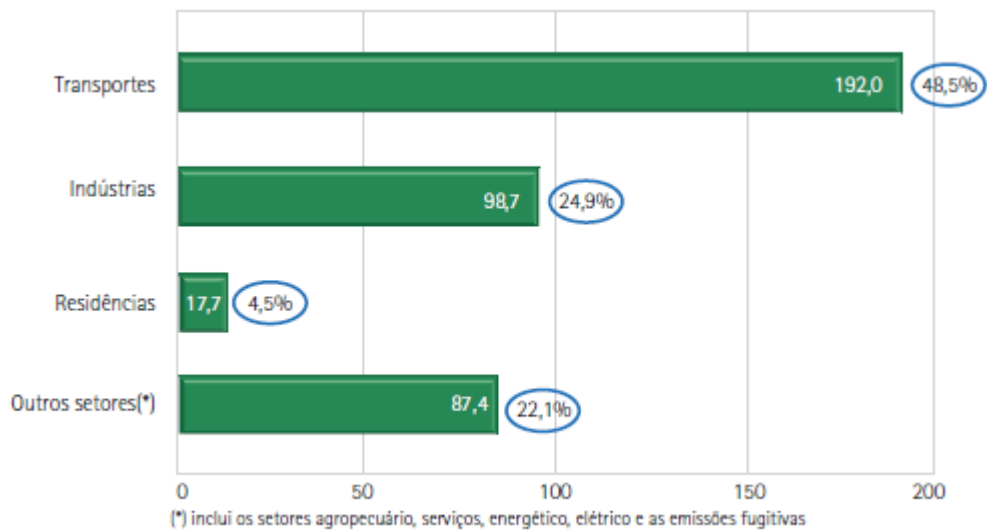


Figura 3 - Emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira, em Mt CO₂ (2011)
(BRASIL, 2012).

No caso do Brasil, produzindo e consumindo energia, cada brasileiro emitiu, em média, 4 vezes menos CO₂ do que um europeu, 9 vezes menos do que um americano e menos da metade do que emitiu um chinês. Em 2011, as emissões per capita brasileira aumentou de 1,8 para 2,0 tCO₂ / hab. A Figura 4 apresenta as emissões per capita de CO₂ no ano de 2009 (BRASIL, 2012).

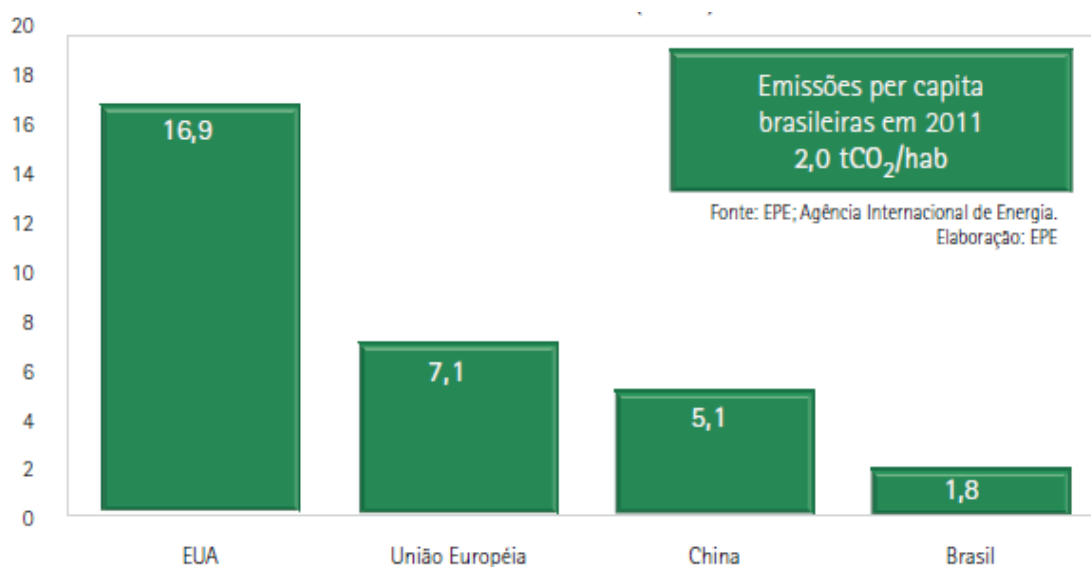


Figura 4 - Emissões per capita de CO₂ (2009) (BRASIL, 2012).

De acordo com BRASIL (2012), em 2009, para produzir 1 TWh, o setor elétrico brasileiro emitiu 8 vezes menos CO₂ do que o setor elétrico americano, 5 vezes menos que o europeu e 12 vezes menos do que o chinês. Em 2011, a intensidade de carbono na economia brasileira reduziu de 64 para 56 kg CO₂ / MWh, conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5 - Emissões relativas na produção de energia elétrica (2009) (BRASIL, 2012).

Entre as muitas atividades humanas que produzem GEE, a utilização da energia representa, de longe, a maior fonte de emissões, como mostrado na Figura 6. A energia representa mais de 80% das emissões de GEE antropogênicos globais, resultantes da produção, transformação, manipulação e consumo de todos os tipos de *commodities* de energia. Fatias menores correspondem a agricultura, que produz principalmente CH₄ e N₂O de gado doméstico e cultivo de arroz, e para processos industriais não relacionados com a energia, a produção de gases fluorados principalmente e N₂O. Responsável por cerca de 95% da energia relacionada as emissões de CO₂, a energia representa, assim, cerca de 80% da emissão dos GEE antropogênicos globais. Esta percentagem varia muito por país, de acordo com diversos modelos energéticos praticados (QUADRELLI *et al.*, 2007).

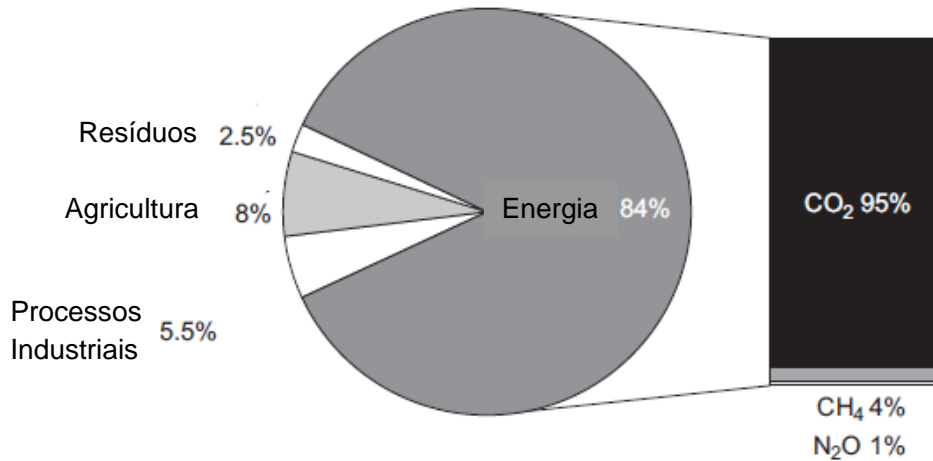
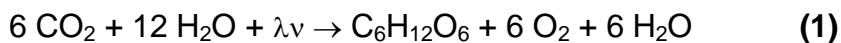


Figura 6 - Ações de emissões globais de gases de efeito estufa antropogênicos
(QUADRELLI *et al.*, 2007).

1.5 Formação de biomassa e conversão em biocombustíveis

A fotossíntese é a síntese de carboidratos e de outros compostos orgânicos de elevado conteúdo energético, a partir de substâncias de baixo potencial energético, existentes na atmosfera, como o dióxido de carbono e a água. Ela pode ser representada pela seguinte reação 1, na qual é a energia dos fótons:



onde $\lambda\nu$ = energia do fóton

No processo de fotossíntese, por meio da clorofila, a energia solar é armazenada nos tecidos vegetais (celulose, lipídio, proteína, lignina, etc.), que constituem a energia química potencial. A Figura 7 apresenta o ciclo renovável de carbono referente à produção e uso de biocombustíveis.

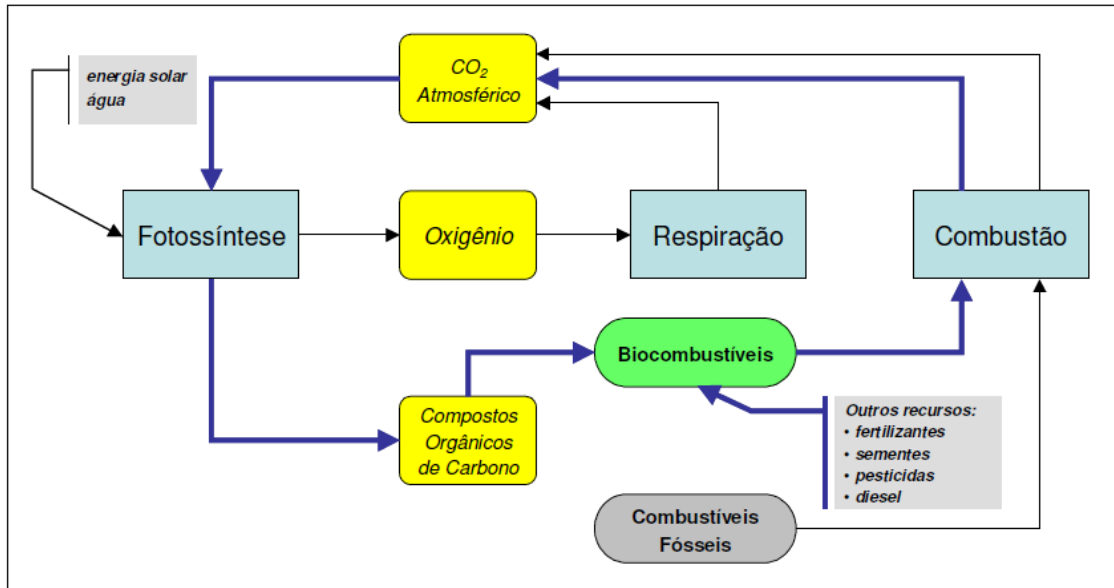


Figura 7 - Ciclo renovável de carbono na produção e uso de biocombustíveis (EPE, 2012).

Os principais fatores que afetam a fotossíntese são a radiação solar, a temperatura e a disponibilidade de água, além dos nutrientes. A produtividade bruta de biomassa também varia significativamente com a latitude geográfica, que está associada à disponibilidade de energia solar e temperatura. A expansão territorial do Brasil é favorecida pela conjugação de todos estes fatores (EPE, 2012).

No caso dos combustíveis derivados de biomassa renovável, a quantidade de dióxido de carbono emitida na combustão é compensada pela absorção deste gás através da fotossíntese no crescimento da planta energética da espécie vegetal, desde o plantio até a colheita. Entretanto, tanto na produção da biomassa como na produção do biodiesel, são consumidas substâncias e materiais que utilizaram recursos fósseis nas suas etapas de extração, produção e transporte até o ponto de consumo (EPE, 2012).

Através da fotossíntese são produzidas plantas como a cana-de-açúcar, a soja, a mamona, a palma africana (dendê), a mandioca, o babaçu, o eucalipto, o pinus e outras espécies vegetais das quais é possível a produção de biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos por meio de diferentes processos de conversão, economicamente adequados a cada aplicação, como o etanol, o biodiesel, o metanol da madeira, o carvão vegetal, o biogás e o hidrogênio. Cada uma das alternativas

tecnológicas está associada a um rendimento energético vinculado às condições em que ela é empregada (EPE, 2012).

1.6 Matérias-primas

Na produção do biodiesel pode ser utilizada uma grande variedade de matérias-primas, na sua maioria óleos vegetais como a soja, o algodão, a palma, amendoim, canola, girassol, açafrão, coco, além das gorduras de origem animal, geralmente o sebo e os óleos de descarte, como os óleos utilizados nas frituras (FERRÉS, 2010).

No entanto, todos os óleos vegetais apresentam estruturas moleculares levemente diferentes entre si, o que confere, a cada um deles, características únicas quanto às suas propriedades físico-químicas, tais como: ponto de fusão, calor e peso específicos, viscosidade, solubilidade, reatividade química e estabilidade térmica. São estas propriedades que determinam o comportamento dos óleos quando se tenta queimá-los como se fosse diesel mineral (FERRÉS, 2010).

Para se escolher qual a melhor matéria-prima para esta produção considera-se os fatores geográficos como fundamentais. Atualmente o maior problema da produção do biodiesel é o seu custo, ainda muito alto quando comparado aos combustíveis fósseis, como o petróleo. Porém, este alto custo de produção pode ser parcialmente compensado pelo uso de matérias-primas de menor valor agregado, utilizando-se para isso inovações tecnológicas.

Dezenas de espécies vegetais presentes no Brasil podem ser usadas na produção do biodiesel, tais como: soja, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim, mamona e pinhão-manso, dentre outras. De acordo com ANP (2012), o óleo vegetal *in natura* é bem diferente do biodiesel, que deve atender à especificação estabelecida pela Resolução ANP n° 7/2008.

Embora o país possua grande diversidade de insumos agrícolas para a produção de óleos vegetais e, conseqüentemente, de biodiesel, muitas culturas ainda têm caráter extrativista, não havendo plantios comerciais que permitam avaliar suas reais potencialidades. Diante deste aspecto, a soja (que representa 74% da produção brasileira de óleos e gorduras), o dendê, o coco, o girassol e a mamona são as principais opções (FERRÉS, 2010).

Apesar de a soja ser a espécie de maior cultivo no Brasil, há outras espécies vegetais que merecem destaque, tais como o dendê (palma), o babaçu e o girassol. Na Figura 8, estão apresentadas as principais culturas relacionadas às suas respectivas áreas de melhor adaptação do país.

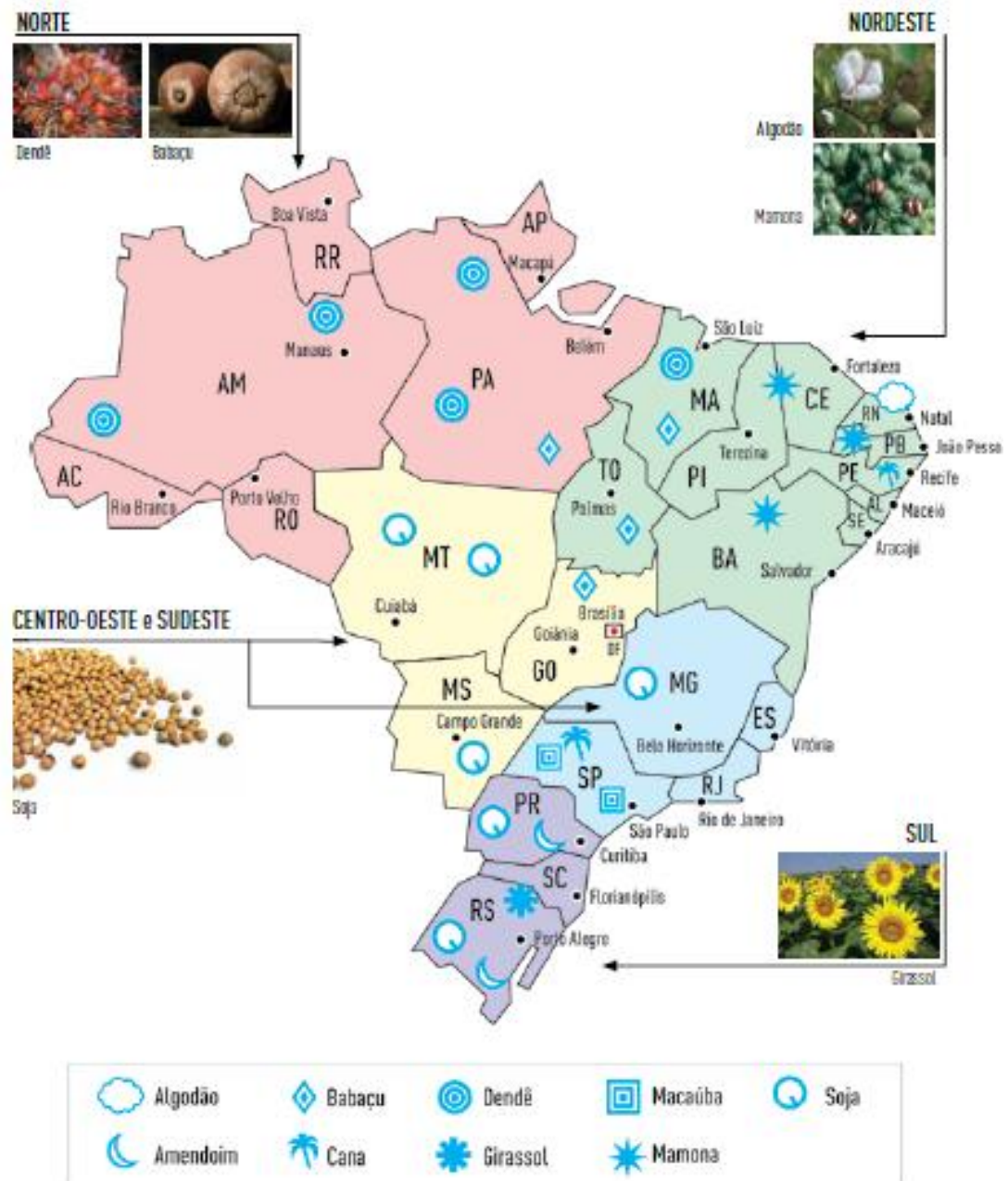


Figura 8 - Potencial de produção das oleaginosas por estado (FETRANSPOR, 2011).

A Tabela 2 indica, para as principais espécies de oleaginosas, o potencial para produção de óleo considerando valores de produtividade e teor de óleo de variedades comuns (PENTEADO, 2005).

Tabela 2 - Características de alguns vegetais com potencial para a produção de biodiesel (PENTEADO, 2005).

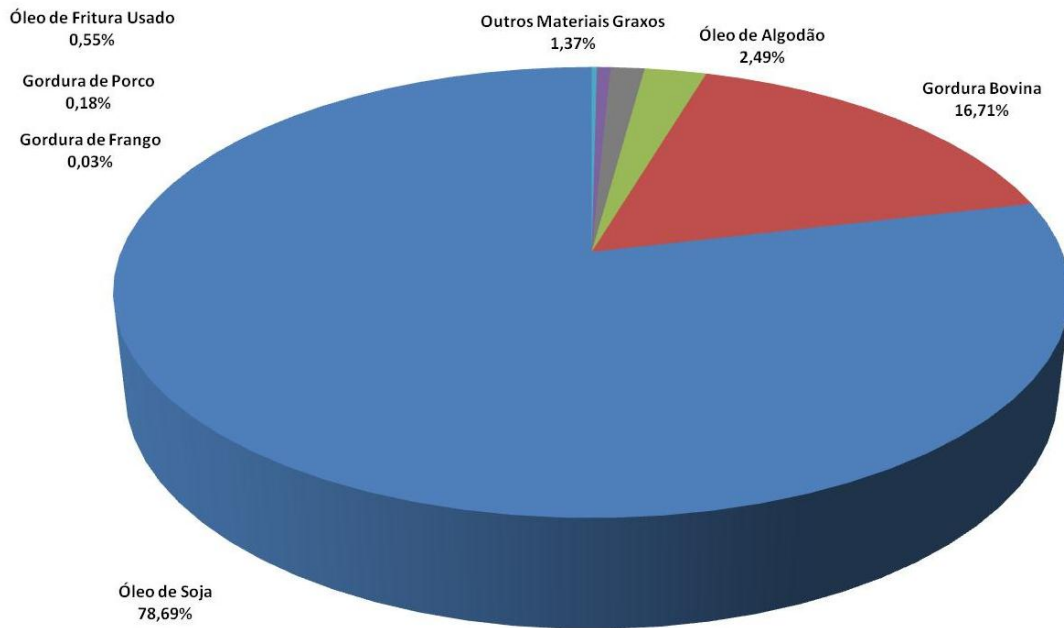
Espécie	Origem do Óleo	Conteúdo de Óleo (%)	Meses de Colheita	Rendimento em Óleo (t/ha)
Dendê (<i>Elaeis guineensis</i> N.)	Amêndoa	26	12	3,0-6,0
Babaçu (<i>Attalea speciosa</i> M.)	Amêndoa	66	12	0,4-0,8
Girassol (<i>Helianthus annuus</i>)	Grão	38-48	3	0,5-1,5
Colza (<i>Brassica campestris</i>)	Grão	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
Soja (<i>Glycine max</i>)	Grão	17	3	0,2-0,6

Apesar de óleo de soja indicar um rendimento baixo (0,2 - 0,6 ton / ha), os artigos pesquisados para este trabalho, sobre a quantidade de CO₂ emitida pelos motores do ciclo diesel na queima de misturas de óleo diesel e biodiesel, concentraram-se nesta oleaginosa.

Segundo ANP (2012), é possível também, usar mais de uma fonte vegetal no mesmo biodiesel. A mamona, por exemplo, se usada em mistura com outros óleos, agrega propriedades ao produto final, como a redução do ponto de congelamento, sem alterar as especificações exigidas pela ANP.

De acordo com AMARAL (2009), em 2020 o Brasil deverá colher em torno de 105 milhões de toneladas de soja. O país poderá contar com 20 milhões de toneladas de óleo de soja, isso sem contar com o desenvolvimento de outras oleaginosas, tais como girassol e colza, que deverão passar por um momento de grande crescimento nos próximos anos, incentivadas pela demanda por óleo do biodiesel.

A Figura 9 apresenta a participação das matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel referente ao perfil nacional (Boletim Mensal de Biodiesel, 2012).



Mês de referência: Julho/2012

Figura 9 - Matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel (perfil nacional) (Boletim Mensal de Biodiesel, 2012).

Considera-se que as plantas oleaginosas consomem CO_2 para o seu desenvolvimento, o biodiesel reduz significativamente o acúmulo de CO_2 na atmosfera por possuir um ciclo de carbono praticamente fechado. A Figura 10 compara o ciclo aberto do carbono do diesel e o ciclo fechado do carbono do biodiesel.

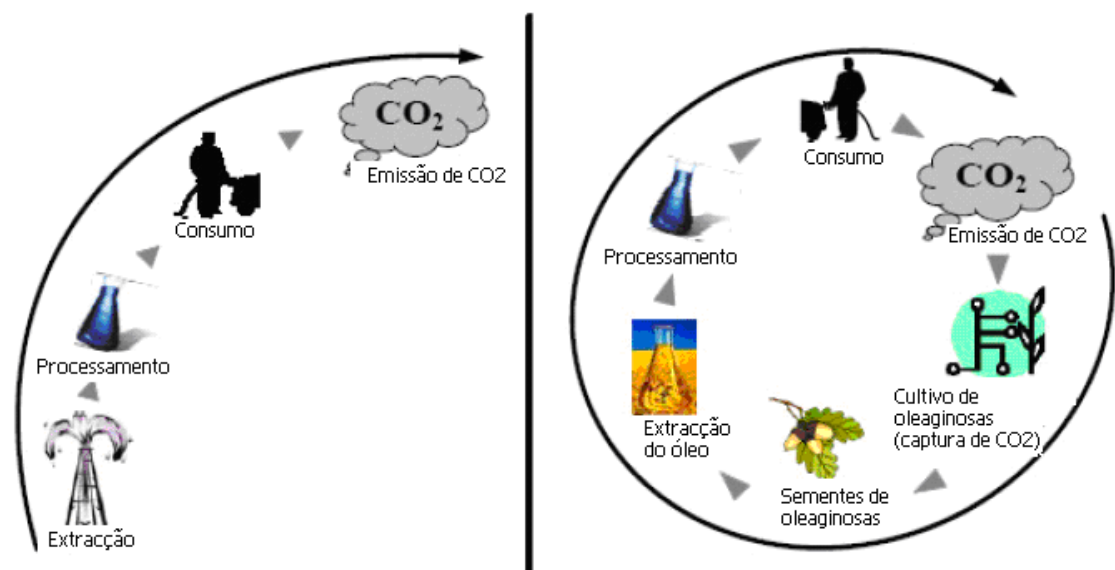


Figura 10 - Ciclo aberto do carbono do diesel e ciclo fechado do carbono do biodiesel (ENCARNAÇÃO, 2008).

1.7 Produção de biodiesel

A conversão de biomassa em biocombustíveis pode ser obtida através de várias rotas tecnológicas. Elas podem ser a partir de tecnologias químicas - processos termoquímicos e processos bioquímicos, que alteram a composição da matéria-prima para fornecer produtos mais compatíveis com os usos finais e por processos físicos, puramente mecânicos, sendo este último o utilizado para a produção de biodiesel conforme apresentado na Figura 11.

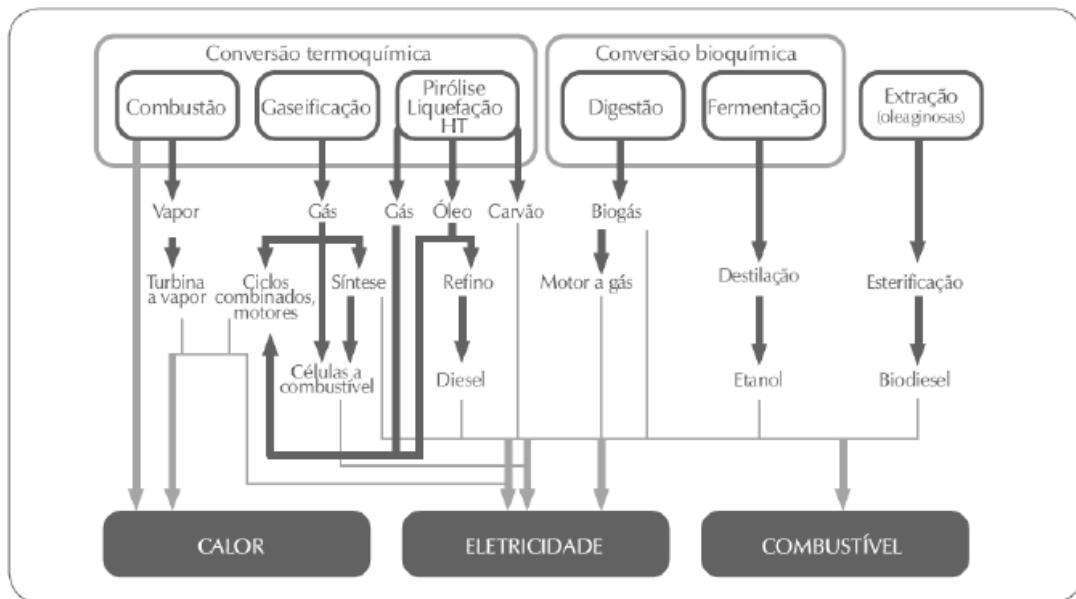


Figura 11 - Rotas tecnológicas para produção de bioenergia (BNDES, 2008).

O processo mais comum de obtenção de biodiesel é através da transesterificação onde o óleo ou gordura (triglicerídeo) reage com um álcool simples (metanol ou etanol), formando ésteres (metílico ou etílico), que constituem o biodiesel, e glicerol (PENTEADO, 2005):

Óleo ou Gordura + Metanol → Ésteres Metílicos + Glicerol (Rota Metílica)

Óleo ou Gordura + Etanol → Ésteres Etílicos + Glicerol (Rota Etílica)

A Figura 12 ilustra através de um fluxograma de massa, o processo de transesterificação.



Figura 12 - Fluxograma de massa, no processo de transesterificação (PENTEADO, 2005).

A produção de biodiesel através da transesterificação envolve as etapas de preparação da matéria prima, reação, separação de fases, recuperação e desidratação do álcool, e purificação dos ésteres e da glicerina (Figura 13).

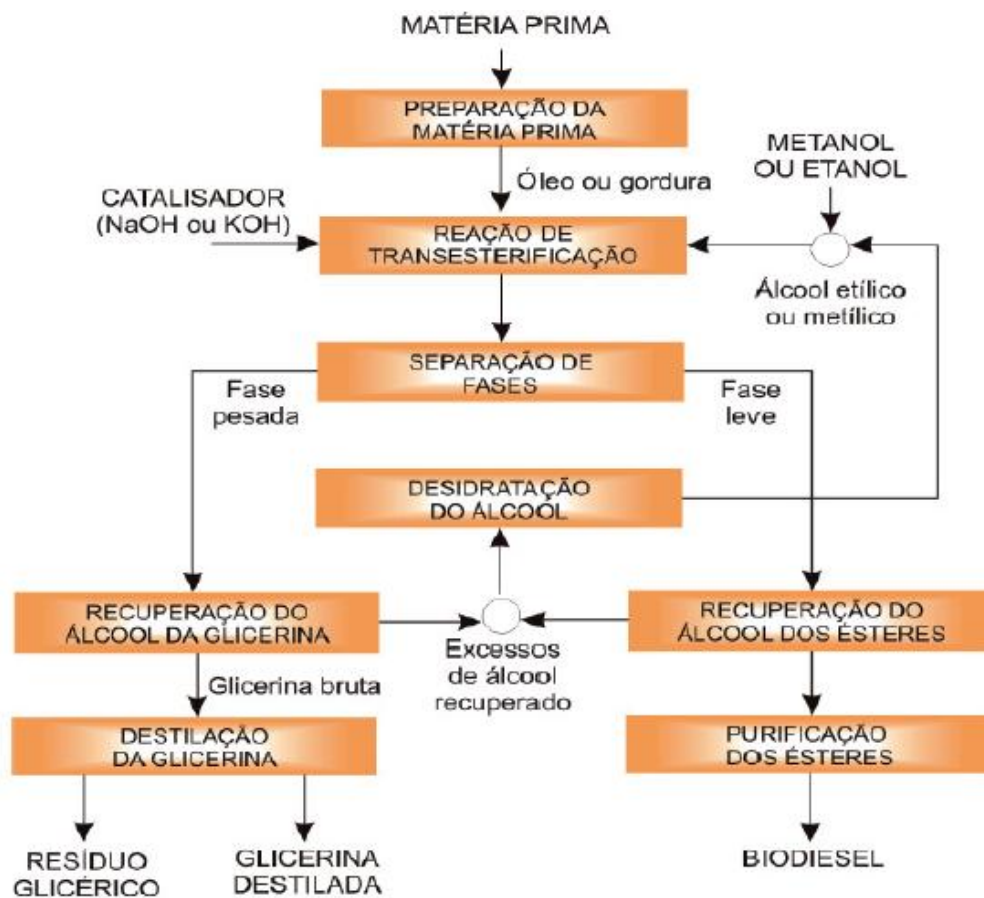


Figura 13 - Fluxograma do processo de produção de biodiesel (EMBRAPA, 2009, p. 14).

O objetivo dessa reação é separar a glicerina do óleo vegetal. A presença de glicerina torna o óleo vegetal muito viscoso sendo assim prejudicial ao motor. A glicerina formada possui valor agregado, sendo usada por indústrias farmacêuticas, de cosméticos e de explosivos.

O biodiesel produzido pode ser obtido a partir de qualquer óleo vegetal, gordura animal e de espuma de esgoto. No Brasil, os óleos vegetais mais comumente usados são os óleos de soja, milho, mamona, girassol, amendoim, algodão, palma, entre outros. O biodiesel é produzido a partir do óleo da palma e babaçu (região Norte), soja, girassol e amendoim (regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste) e mamona (semi-árido nordestino), entre outras matérias-primas de origem vegetal (ANEEL, 2008).

Os óleos de fritura representam um potencial de oferta significativo, porém precisam passar por processos de purificação antes da transesterificação. Tais óleos têm origem em indústrias de produção de alimentos, nos restaurantes comerciais e institucionais e lanchonetes.

Segundo Encarnação (2008), para obter um resultado satisfatório, os óleos devem ser processados com baixo teor de ácidos graxos livres e umidade de forma evitar a formação de produtos saponificados que diminuem eficiência de conversão. Dessa forma, para adequar a matéria prima a parâmetros de umidade e acidez aceitáveis para o processo, há uma etapa de preparação anterior à reação. Nessa etapa, a matéria prima é neutralizada através de uma lavagem com uma solução alcalina de hidróxido de sódio ou de potássio, seguida de uma operação de secagem ou desumidificação.

O produto formado pela reação de transesterificação possui duas fases nas quais a mais pesada é composta pela glicerina e a mais leve é o biodiesel. Ambos estão contaminados com excesso de álcool, água e catalisador. A glicerina e o biodiesel são separados por decantação e/ou por centrifugação. Na fase pesada ocorre a recuperação do álcool da glicerina e na recuperação leve ocorre a recuperação do álcool dos ésteres.

O álcool é recuperado dos produtos formados (biodiesel e glicerina), é reutilizado no processo. Depois de recuperado o álcool ainda contém quantidades significativas de água, necessitando ser desidratado por destilação.

O biodiesel produzido deve passar por uma lavagem e, posteriormente, é desumidificado visando retirar contaminantes como catalisador, glicerol e álcool que possam ainda estar retidos no produto.

A glicerina bruta pode ser purificada para obter um valor de mercado mais favorável, uma vez que ainda apresenta água, álcool e impurezas inerentes à matéria prima.

Os catalisadores mais empregados são o hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH).

A transesterificação etílica é considerada mais complexa que a metílica, além de ser mais lenta. A possibilidade de utilização de álcool etílico na produção de biodiesel é de grande interesse, considerando as condições particulares do Brasil, onde são produzidos volumes expressivos de etanol e a preços competitivos. No mundo, há a predominância do uso da transesterificação pela rota metílica. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre ésteres metílico e etílico (PENTEADO, 2005):

Tabela 3 - Comparação entre ésteres metílico e etílico (PENTEADO, 2005).

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 @ 40°C	7,2% superior ao éster metílico
$\Delta\%$ potência frente ao diesel	2,5% menor	4% menor
$\Delta\%$ consumo frente ao diesel	10% maior	12% maior

Além das vantagens da grande oferta e ser oriundo de biomassa, o etanol representa maior potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa.

Entre os diversos países que produzem o biodiesel, o Brasil é, atualmente, um dos maiores produtores mundiais, como pode ser observado na Figura 14.

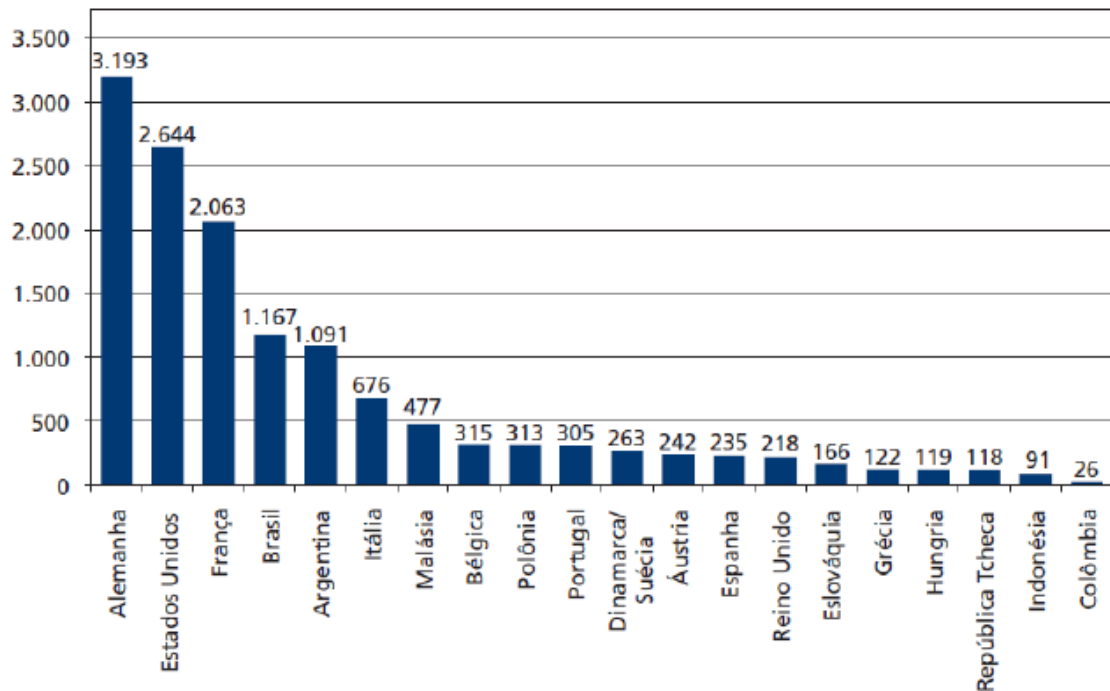


Figura 14 - Produção mundial de biodiesel em 2008 (em milhões de litros)
(FERRÉS, 2010).

Como pode ser observado na Figura 15, os percentuais de mistura de biodiesel no diesel convencional estabelecidos na legislação crescem gradativamente de maneira a permitir que o mercado se ajuste às condições de oferta e demanda.

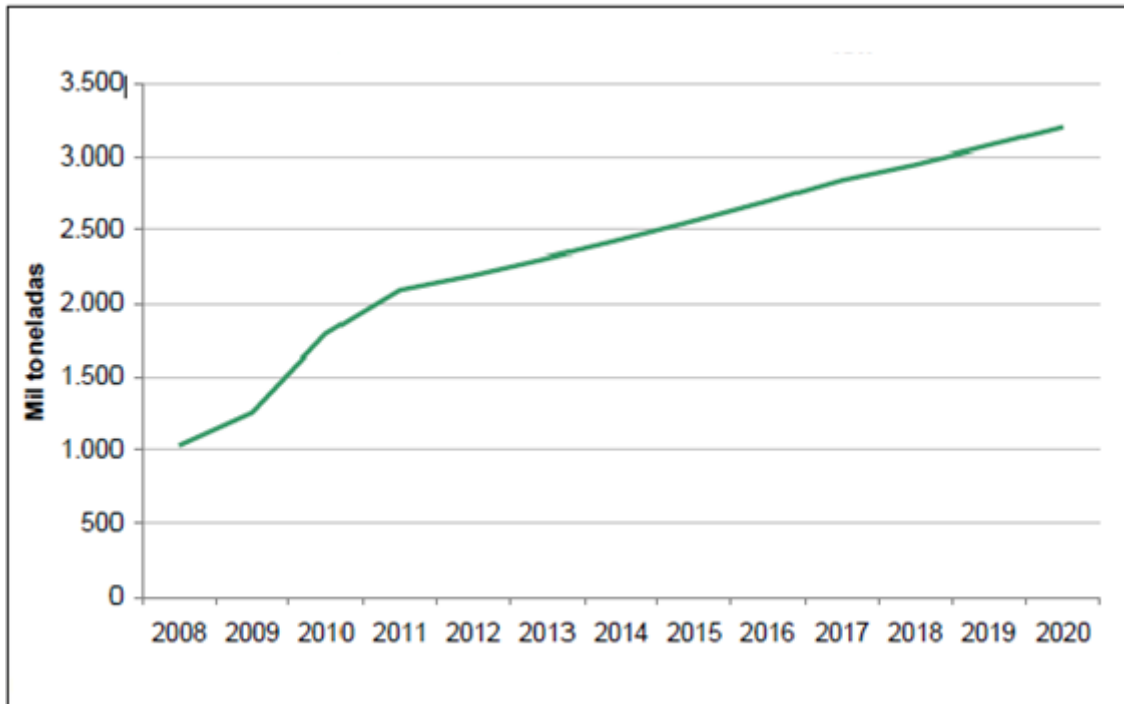


Figura 15 - Demanda obrigatória de biodiesel no Brasil (GARCIA, 2007).

Já em 2008, foram utilizadas em torno de 1 milhão de toneladas de biodiesel. Esses valores devem crescer gradualmente até atingir 3,1 milhões de toneladas em 2020. Essa produção exigirá um volume equivalente de óleos vegetais (GARCIA, 2007).

Na Figura 16, é apresentada a evolução anual da produção, comparando com a demanda compulsória e com a capacidade nominal autorizada pela ANP no País (Boletim Mensal de Biodiesel, 2012). Percebe-se que no ano de 2011, a produção anual de biodiesel ultrapassou ligeiramente a demanda compulsória de biodiesel, ao passo que a capacidade nominal acumulada autorizada pela ANP ainda demonstra estar ociosa.

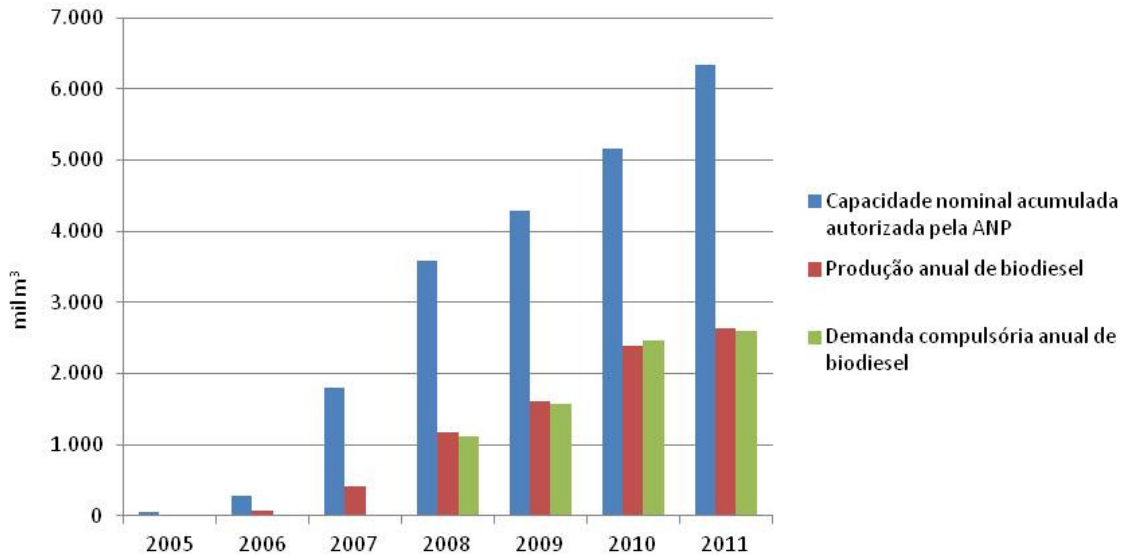


Figura 16 - Evolução anual da produção, da demanda compulsória e da capacidade nominal autorizada pela ANP no País (Boletim Mensal de Biodiesel, 2012).

De acordo com ANP (2012), o Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de biodiesel do mundo, com uma produção anual, em 2010, de 2,4 bilhões de litros e uma capacidade instalada, no mesmo ano, para cerca de 5,8 bilhões de litros.

A venda de diesel B_n é obrigatória em todos os postos que revendem óleo diesel, sujeitos à fiscalização pela ANP. Segundo ANP (2012), a adição de até 5% de biodiesel ao diesel de petróleo foi amplamente testada, dentro do Programa de Testes coordenado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT, que contou com a participação da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA. Os resultados demonstraram, até o momento, não haver a necessidade de qualquer ajuste ou alteração nos motores e veículos que utilizem essa mistura e sem a necessidade de abertura de novas áreas de vegetação nativa. De acordo com GARCIA (2007), esse aumento na produção irá demandar apenas mais 8 milhões de hectares, pois será baseado primordialmente no aumento da produtividade agrícola.

A predominância dos combustíveis de origem fóssil na matriz de transportes brasileira é ainda significativa, a despeito de o país ser, inquestionavelmente, um exemplo mundial na implementação de programas de biocombustíveis. Em 2011, o setor de transportes consumiu um total de 74,2 milhões de Tonelada Equivalente de Petróleo - tep de combustíveis, sendo 47,3% de óleo diesel, 27,2% de gasolina,

14,1% de etanol, 4,7% de querosene de aviação, 2,2% de gás natural e 4,6% dos demais combustíveis (BRASIL, 2012). A tep é utilizada na comparação do poder calorífico de diferentes formas de energia com o petróleo. Uma tep corresponde à energia que se pode obter a partir de uma tonelada de petróleo padrão. (ANEEL, 2008).

Os indicadores apresentados mostram que o Brasil dispõe de matérias-primas em volume adequado para atendimento das necessidades do programa no longo prazo sem prejuízo aos demais fins dos óleos vegetais, alimentícios e industriais.

A comercialização do biodiesel nacional ocorre através de leilões realizados pela ANP desde 2005. Nos leilões, refinarias compram o biodiesel para misturá-lo ao diesel derivado do petróleo. O objetivo inicial dos leilões foi gerar mercado e, desse modo, estimular a produção de biodiesel em quantidade suficiente para que refinarias e distribuidores pudessem compor a mistura (Bn) determinada por lei.

Os leilões continuam sendo realizados para assegurar que todo o óleo diesel comercializado no país contenha o percentual de biodiesel determinado em lei.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido embasado em literatura científica, utilizando-se informações disponíveis em bases de dados especializadas como: Science Direct, Portal de Busca Integrada SIBi/USP, Portal CAPES, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, em livros, teses, dissertações, legislações e em sites oficiais.

As seguintes etapas foram observadas:

- Revisão da literatura;
- Coleta de dados da literatura;
- Análise dos dados.

A partir da coleta de dados da literatura, comparou-se os resultados obtidos por autores que avaliaram a quantidade de emissões de CO₂ emitida pelos motores do ciclo diesel na queima de óleo diesel e de misturas de óleo diesel e biodiesel em diversas proporções.

Os cálculos das emissões de CO₂ de acordo com o tipo de combustível foram realizados baseados no procedimento proposto por Coronado *et al.* (2009)

Os fatores de emissão de CO₂ foram calculados para os combustíveis comumente usados no mercado brasileiro, incluindo o biodiesel (puro e misturado com o combustível diesel convencional). A quantidade média de CO₂ emitida por um automóvel por ano foi calculada para os combustíveis. Usando os dados reportados pela ANFAVEA (2008) e pelo Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN (2008), as emissões de CO₂ do diesel e a redução de tais emissões no caso da utilização de biodiesel (puro ou uma mistura) foram calculadas. Foram feitas projeções para os próximos 10 e 15 anos (tomando-se como referência inicial o ano de 2008) para os veículos automotores no Brasil em relação a suas emissões de CO₂.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A disponibilidade de dados é mais abundante para a soja do que para as demais oleaginosas. Dessa forma, utilizou-se nesta análise os dados dos trabalhos de Coronado *et al.* (2009) e EPE (2012) que foram considerados mais significativos e completos

Coronado *et al.* (2009), compararam os resultados encontrados para motores movidos à diesel puro e biodiesel de soja nas proporções B2, B5, B20 e B100.

Os autores pesquisados não testaram motores movidos à óleo de fritura usado, talvez em função da diferença entre a quantidade teórica calculada de emissões de CO₂ do biodiesel de óleo de soja não ser significativa (2,48 versus 2,492 tonelada CO₂ / m³ biodiesel de óleo de fritura usado). Apesar de identificar o potencial de reutilização do óleo de fritura para a produção de biodiesel, percebe-se que este resíduo proveniente do processamento industrial de alimentos para refeições industriais é desprezado e/ou parcialmente aproveitado de maneira muitas vezes inadequada no Brasil. Conforme descrito por Costa Neto *et al.* (2000), para a implantação de um programa de substituição parcial de óleo diesel por biodiesel de óleo de fritura dependeria da criação de um eficiente sistema de coleta de óleos usados, o que certamente encontra-se distante da realidade brasileira. Além disso, devido à compatibilidade observada dentre os ésteres obtidos de óleo novo e usado, pode-se perfeitamente recomendar que, em processos industriais de produção de biodiesel, óleos vegetais de descarte sejam diretamente incorporados ao óleo de soja bruto, anteriormente ao processo de transesterificação.

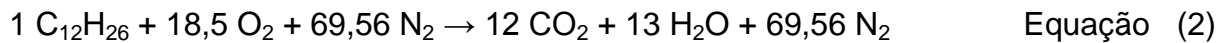
3.1. Cálculo das emissões de CO₂ de acordo com o combustível

As quantidades de CO₂ emitidas para a atmosfera que constituem um importante parâmetro a ser determinado em processos de combustão, foram adotados de Coronado *et al.* (2009).

3.1.1. Diesel

Densidade: 0,864 t / m³ (diesel de petróleo)

Reação estequiométrica:



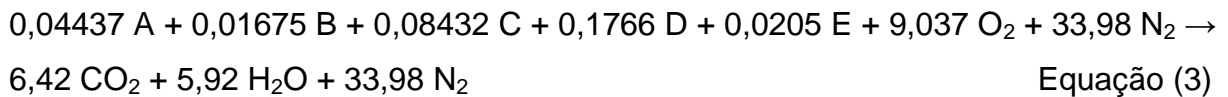
Emissão: 528 toneladas CO₂ / 196,76 m³ diesel ou 2,683 toneladas CO₂ / m³ diesel

3.1.2. Biodiesel de soja

Densidade: 0,878 t / m³ (transesterificação com metanol)

Peso Molecular Médio (éster metílico de óleo de soja): 292,2 g / g mol (Tabela 4)

Reação estequiométrica:



onde A, B, C, D e E, estão indicados na Tabela 4.

Emissão: 282,45 toneladas CO₂ / 113,88 m³ biodiesel ou 2,48 toneladas CO₂ / m³ biodiesel

Tabela 4 - Composição típica de éster metílico de óleo de soja (CORONADO *et al.*, 2009).

Ácido Graxo	Peso (%)	PM (g)	Fórmula
Palmitico	12	270,46	C ₁₅ H ₃₁ CO ₂ CH ₃
Esteárico	5	298,52	C ₁₇ H ₃₅ CO ₂ CH ₃
Oléico	25	296,50	C ₁₇ H ₃₃ CO ₂ CH ₃
Linoléico	52	294,48	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH=CH CH ₂
Linolenico	6	292,46	CH ₃ (CH ₂ CH=CH) ₃ (CH ₂) ₇ CO ₂ CH ₃

3.1.3. Biodiesel de óleos de fritura usados

Densidade: 0,878 t / m³ (biodiesel)

Peso Molecular Médio (óleo de fritura usado): 283,8 g / g mol

Reação estequiométrica:



Equação (4)

Emissão: 283,8 toneladas CO₂ / 113,88 m³ biodiesel ou 2,492 toneladas CO₂ / m³ biodiesel

De acordo com Coronado *et al.* (2009), um estudo de 1998 do ciclo de vida do biodiesel, co-patrocinado pela Departamento de Energia dos Estados Unidos da América - EUA e do Departamento de Agricultura dos EUA, concluiu que o biodiesel reduz as emissões líquidas de CO₂ em 78,45% em relação ao diesel mineral. Considerando-se que o biodiesel dispõe de ciclo fechado de carbono, os autores citaram que as emissões de CO₂ são significativamente menores com biodiesel. Portanto, considerando esse aspecto, no caso da utilização de B100 (biodiesel forma pura), o resultado é: 0,578 ton CO₂ / m³ de biodiesel. A Figura 17 apresenta, de forma resumida, as emissões de CO₂ de acordo com o combustível utilizado.

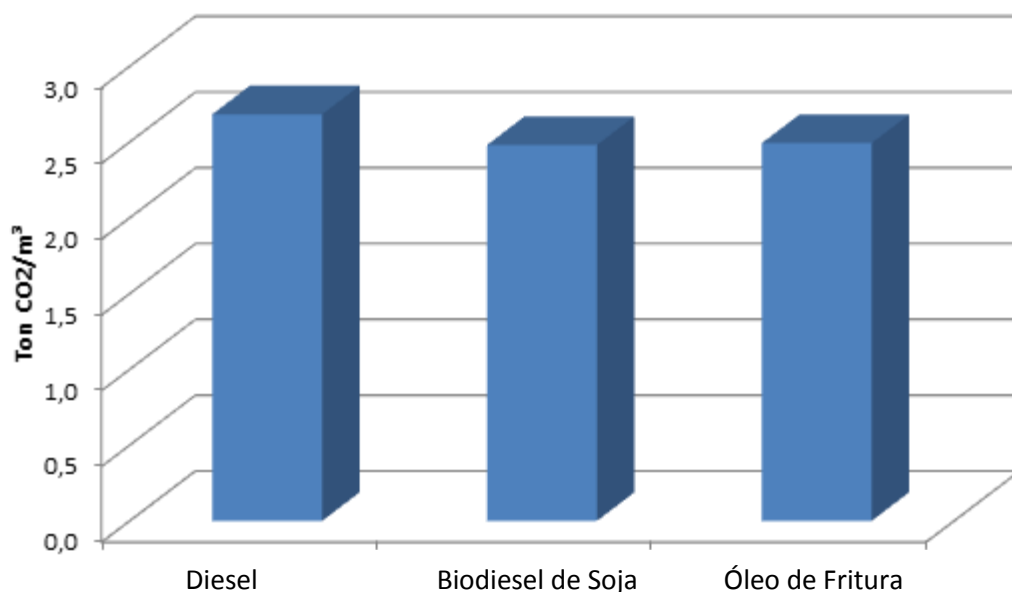


Figura 17 - Emissões de CO₂ em relação ao combustível utilizado

(Adaptado de CORONADO *et al.*, 2009).

3.2. Cálculo das emissões de CO₂ dos veículos

A fim de obter as emissões dos veículos em toneladas de CO₂ por ano, foi considerado o caso de um veículo a diesel que percorre 60.000 km / ano. Este parâmetro foi obtido considerando a distância média executada por um veículo diesel brasileiro por ano, também considerando os dados do ano de 2008 da ANP, e o número de veículos a diesel no Brasil, dada pelo DENATRAN (2008). Um consumo médio de 5 km / l (5.000 km / m³) foi considerado. Levando-se em conta todos estes parâmetros e os cálculos estequiométricos da seção anterior, um veículo a diesel vai liberar 32.202 toneladas de CO₂ por ano. A Figura 18 mostra as emissões de CO₂ em toneladas CO₂ / ano para os combustíveis analisados acima. Para o biodiesel, uma redução de 78,45% nas emissões de CO₂ (carbono reciclado) foi considerada.

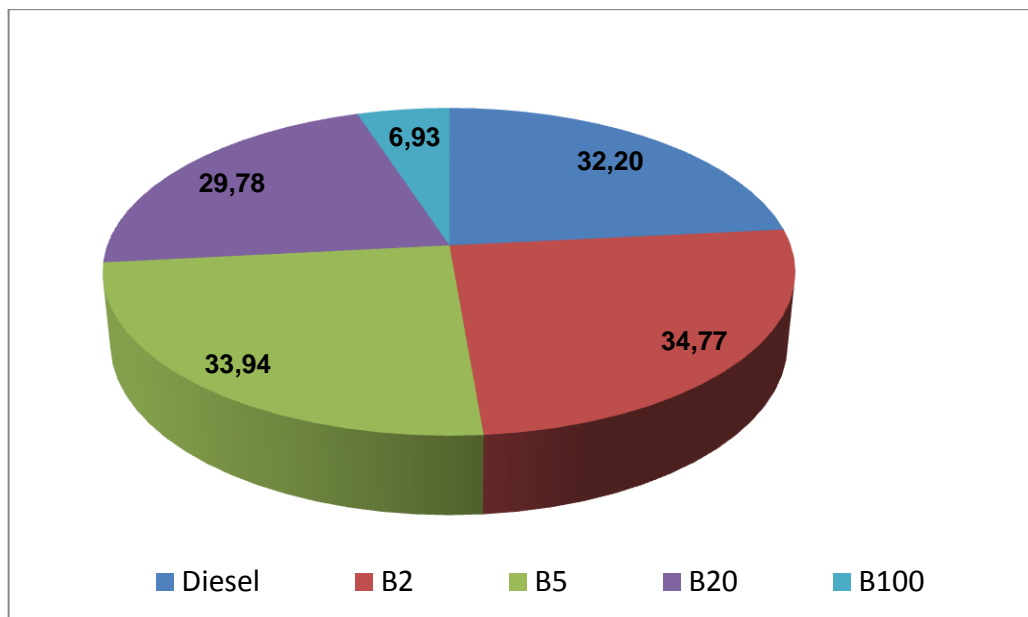


Figura 18 - Emissões de CO₂ / tonelada ano (Adaptado de CORONADO *et al.*, 2009).

As frotas a diesel nacionais para o período compreendido entre Dezembro / 2002 à Janeiro / 2008 são apresentadas na Tabela 5. Considerando-se que as frotas de gasóleo brasileira correm 60.000 km / ano (média brasileira para veículos a diesel, incluindo caminhões grandes e pequenos, ônibus e microônibus), utilizando diesel, 5 km / l (5.000 km / m³) consumo médio para o mesmo período, as emissões de CO₂ deveria atingir 87,95 Mton de CO₂ para este período. Por outro lado, se o diesel for

misturado com biodiesel em diferentes percentagens (2% - B2; 5% - B5, 20% - B20, 100% - B100), uma redução nas emissões de CO₂ deveria ocorrer. A Figura 19 compara as emissões de CO₂ em toneladas, quando o combustível diesel é de 100% e quando misturas de biodiesel são utilizadas, por dados correspondentes ao período entre Dezembro / 2002 e Janeiro / 2008. Uma diminuição nas emissões de CO₂ é claramente observada quando a percentagem de biodiesel aumenta.

Comparando-se os resultados encontrados por Coronado *et al.* (2009) com Garcia (2007) utilizando-se biodiesel puro (B100), percebe-se que a redução de emissões de CO₂ em relação ao diesel de petróleo foram muito similares, ou seja, em torno de 78%. Já para as misturas B2, B5 e B20, segundo Coronado *et al.* (2009), a redução nas emissões de CO₂ foram respectivamente, 1,6%, 3,9% e 15,7%.

Tabela 5 - Veículos brasileiros a diesel produzidos entre Dezembro / 2002 e Janeiro / 2008 (CORONADO *et al.*, 2009).

Tipo de Veículo	Dez/2002	Jan/2008	Diferença
Caminhão	1.544.190	1.853.746	309.556
Trator	211.603	306.713	95.110
Ônibus pequeno	156.228	216.065	59.837
Ônibus	295.509	377.252	81.743
Total	2.207.530	2.753.776	546.246

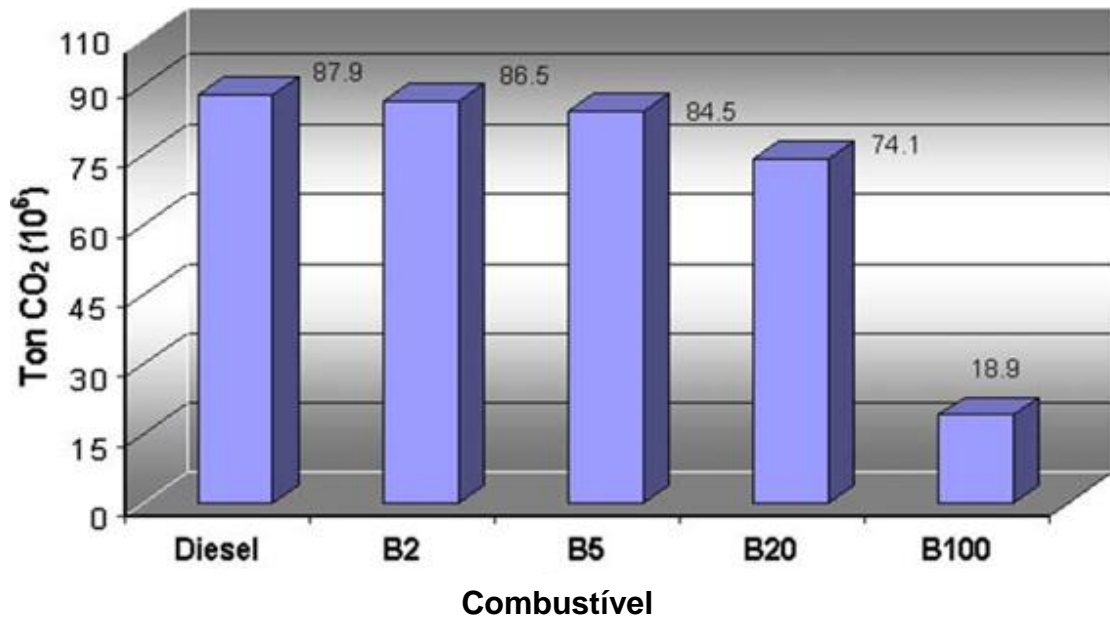


Figura 19 - Emissões de CO₂ por tipo de combustível para a frota brasileira a diesel no período entre Dezembro / 2002 à Janeiro / 2008 (CORONADO *et al.*, 2009).

Segundo Coronado *et al.* (2009), a expectativa da quantidade de CO₂ prevista para ser lançada pela frota nacional a diesel é de 826,2 Mton em 2015 e 2,3 bilhões de ton em 2025. A Tabela 6 e Figura 20 mostram detalhes sobre essas projeções.

Tabela 6 - Projeções para as frotas de veículos a diesel no Brasil (Adaptado de CORONADO *et al.*, 2009).

Ano	2015	2020	2025
Nº de Veículos (10 ⁶)	1.710	2.285	2.860
ton CO ₂ (10 ⁶) - Diesel	826,2	1471,9	2302,8
ton CO ₂ (10 ⁶) - B5	793,8	1414,2	2212,5
ton CO ₂ (10 ⁶) - B20	696,6	1241,0	1941,5

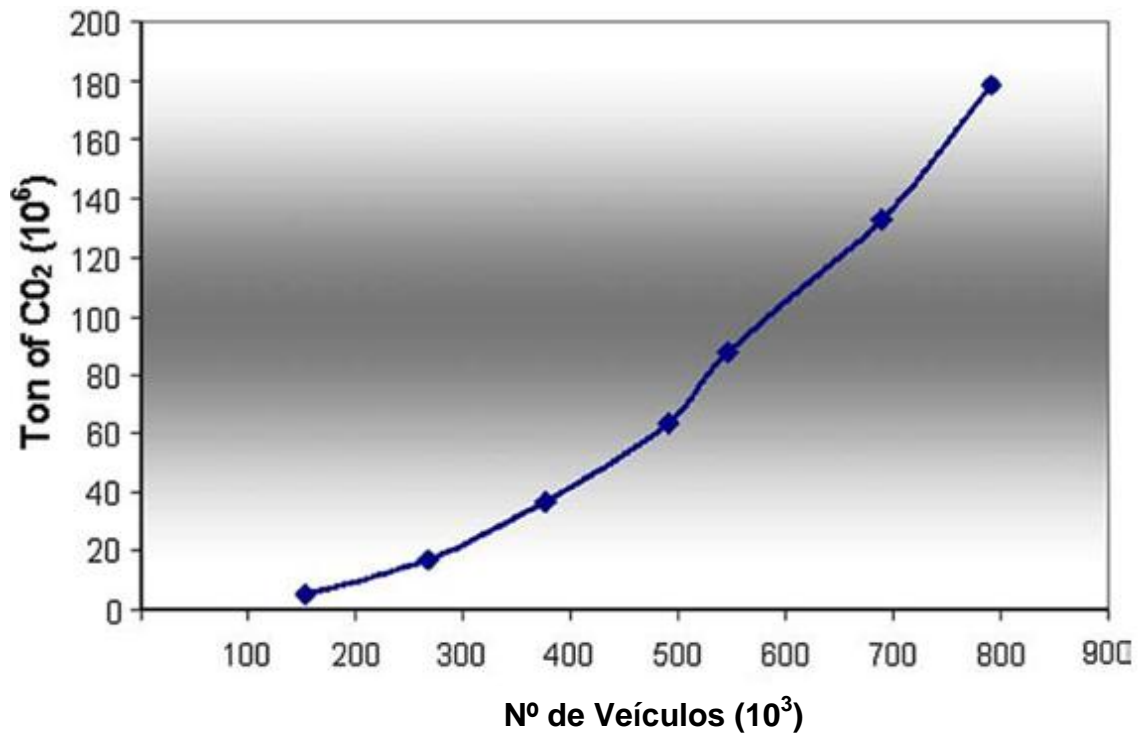


Figura 20 - Mton de CO₂ vs número de frotas de veículos a diesel no Brasil (CORONADO *et al.*, 2009).

Com B5, as projeções sobre a redução das emissões de CO₂ são 793,8 Mton, 1,4 e 2,2 bilhões de ton para 2015, 2020 e 2025 anos, respectivamente. Com B20, as projeções sobre a redução são 696,6 Mton, 1,2 e 1,9 bilhões de ton para o mesmo anos, respectivamente. Nota-se que ao basear-se nestas projeções futuras, a expectativa para a redução das emissões de CO₂ do Biodiesel B5 e B20 será de 3,9% e 16%, respectivamente. A Figura 21 mostra as reduções sobre as emissões.

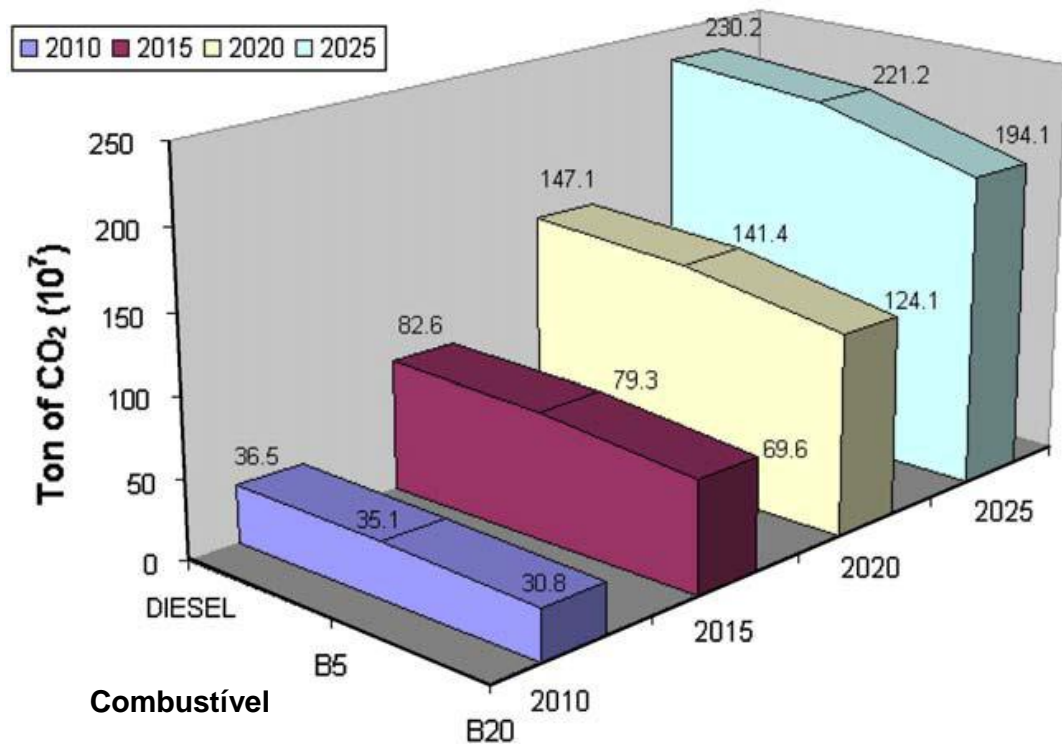


Figura 21 - Projeções sobre a redução de CO₂ entre os anos de 2010 e 2025

(CORONADO *et al.*, 2009).

Outro trabalho analisado foi o desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2012). Dentre as oleaginosas estudadas, optou-se por focar apenas o biodiesel de óleo de soja nas proporções B2 e B5, porém, estendendo as comparações, além do combustível produzido pela rota metílica, também o biodiesel obtido pela rota etílica.

No cálculo da redução de emissões de GEE, foi considerado que as misturas de biodiesel etílico e metílico, de soja até 5% em massa não alteram o rendimento do veículo. A emissão total no ciclo de vida do diesel é de 3,4919 kg CO₂ eq / kg de diesel (EPE, 2012). A Tabela 7 apresenta os resultados.

Tabela 7 - Emissões de GEE e emissões evitadas em misturas B2 e B5 (kg CO₂ eq / kg de Combustível) (Adaptado de EPE, 2012).

Combustível Puro Emissões		B2	Redução	Emissões Evitadas	B5	Redução	Emissões Evitadas
Diesel	3,49						
BES	0,46	3,429	1,7%	0,06	3,339	4,3%	0,15
BMS	0,57	3,432	1,7%	0,06	3,344	4,2%	0,15

Valor estimado como a média das intensidades de dióxido de carbono equivalente por conteúdos energético dos biodieseis etílico e metílico de soja.

Comparando-se os resultados encontrados por EPE (2012) com Coronado *et al.* (2009) utilizando-se biodiesel de soja B2, observa-se que a redução de emissões de CO₂ foi também próxima, ou seja, em torno de 2%.

O impacto do tipo de álcool utilizado na transesterificação nas emissões evitadas de gases de efeito estufa é pequeno, uma vez que a principal fonte de carbono no sistema são os óleos vegetais, com suas longas cadeias orgânicas. A Figura 22 apresenta as emissões evitadas no ciclo de vida das misturas B-2 e B-5.

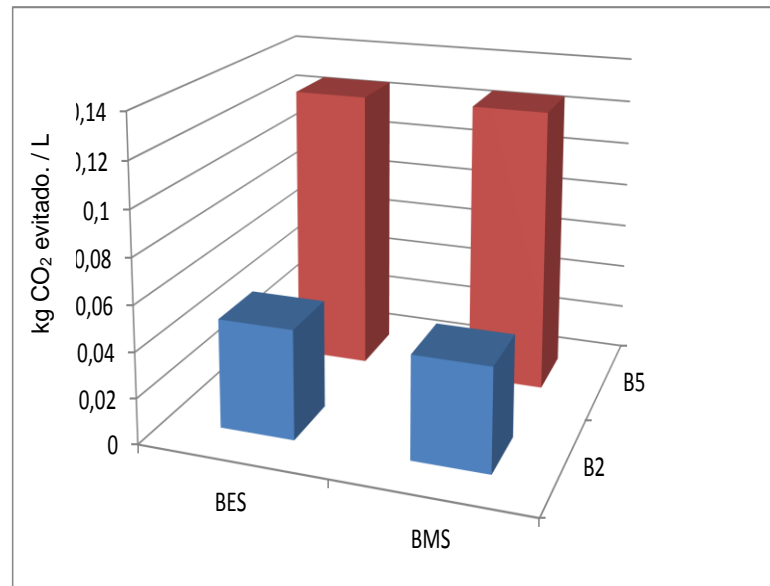


Figura 22 - Emissões evitadas no ciclo de vida das misturas B2 e B5 (Adaptado de EPE, 2012).

De acordo com EPE (2012), as emissões evitadas pelo uso do biodiesel puro em motores de ciclo Diesel e nas misturas 2% e 5% em substituição ao diesel de petróleo (emissão de 2,93 kg CO₂ / l) foram determinadas e resultaram nos valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Emissões evitadas de CO₂ em misturas B2 e B5 (kg CO₂ eq / L de Combustível) (Adaptado de EPE, 2012).

Biodiesel	Emissões Evitadas de CO ₂ (kg CO ₂ eq / litro)		
	B100	B2	B5
BES	2,53	0,051	0,128
BMS	2,43	0,049	0,123

Analisando os resultados encontrados por Coronado *et al.* (2009) e EPE (2012) utilizando-se biodiesel de soja com a mistura obrigatória atual B5, verifica-se que a redução de emissões de CO₂ ainda é pequena se comparadas com a redução significativa de 15,7% que a mistura B20 poderia proporcionar. Estes resultados sugerem um aumento no percentual obrigatório de biodiesel no diesel de modo que se avalie o rendimento do motor de combustão interna.

Embora exista grande diversidade de insumos agrícolas para a produção de óleos vegetal e conseqüentemente, de biodiesel, muitas culturas ainda têm caráter extrativista, não havendo plantios comerciais que permitam avaliar suas reais potencialidades. Diante deste aspecto, os resultados encontrados neste trabalho concentraram-se no óleo de soja.

Percebe-se que a produção anual de biodiesel no Brasil praticamente equivale à demanda compulsória de biodiesel, ao passo que a capacidade nominal acumulada autorizada pela ANP ainda demonstra estar ociosa.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização de biodiesel como combustível tem apresentado um potencial promissor no mundo inteiro. Em primeiro lugar, pela sua contribuição ao meio ambiente, com a redução, por exemplo, dos gases de efeito estufa, destacando o gás carbônico, e, em segundo lugar, como fonte estratégica de energia renovável em substituição ao óleo diesel. Dentre as matérias-primas mais utilizadas figura o óleo de soja.

Mundialmente, há a predominância do uso da transesterificação pela rota metílica, onde suas propriedades demonstram ser mais favoráveis do que as dos ésteres produzidos pela rota etílica. Mesmo sabendo-se que a transesterificação etílica é considerada mais complexa que a metílica, além de ser mais lenta, deveria ser avaliada a possibilidade de utilização de álcool etílico na produção de biodiesel por ser de grande interesse, considerando-se as condições particulares do Brasil. Além das vantagens da grande oferta e oriundo de biomassa, o etanol representa maior potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa, já que será 100% renovável.

O impacto do tipo de álcool utilizado na transesterificação nas emissões evitadas de gases de efeito estufa é pequeno (com ligeira vantagem para o biodiesel produzido pela rota etílica), uma vez que a principal fonte de carbono no sistema são os óleos vegetais, com suas longas cadeias orgânicas.

No atual modelo de transportes brasileiro, a influência das emissões dos motores a diesel é praticamente determinante da qualidade do ar. Para que as emissões possam ser reduzidas, requer-se combustível mais limpo e tecnologia avançada.

Os resultados demonstram que as reduções mais significativas nas emissões de CO₂ ocorrem quando utiliza-se a proporção a partir de 20 % de biodiesel (por exemplo B20). Porém, ainda não foi implantada nenhuma estratégia específica para a redução das emissões de CO₂ fóssil, exceto a adição atual obrigatória de biodiesel de 5% ao combustível.

Deve-se avaliar se a utilização da proporção de 20% de biodiesel não acarreta grandes dificuldades operacionais, ainda desconhecidas. Desta forma, mais uma vez, ressalta-se que o programa do biodiesel deveria incluir um programa de pesquisas mais aprofundado para se conhecer as efetivas diferenças entre os diversos tipos de biodiesel e o óleo diesel comum bem como as dificuldades operacionais resultantes de percentuais acima do estabelecido pela legislação atual.

Apesar do NO_x não ser objeto deste trabalho, observou-se a necessidade de estudos sobre as emissões deste agente poluente com maior profundidade.

REFERÊNCIAS

AMARAL, D. F. Desmistificando o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel. A visão da indústria brasileira de óleos vegetais. São Paulo, 2009., disponível em <<http://www.abiove.com.br>>, acesso em agosto de 2012.

AMARAL, P. C., CORREA, R. B., MOREIRA, H. M. Avaliação dos Benefícios Secundários de Projetos MDL: Contribuição ao Controle de Poluição e ao Desenvolvimento Local e Regional, 2011, disponível em <<http://www2.ifrn.edu.br>>, acesso em setembro de 2012.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional Elétrica de Energia 3 ed. - Brasília: Aneel, 2008. 236 p., disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

ANFAVEA. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2008, disponível em <<http://www.anfavea.com.br>>.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis., disponível em <<http://www.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

BNDES. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008, 316p.

BOLETIM MENSAL DE BIODIESEL - Agosto de 2012, disponível em <<http://www.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

BRANCO, G. M., BRANCO, A. M., BRANCO, F. C., MARTINS, M. H. B. Perspectivas de Alteração da Matriz Energética do Transporte Público Urbano por Ônibus: Questões Técnicas, Ambientais e Mercadológicas. Environtality - Tecnologia com Conceitos Ambientais Ltda. São Paulo, 2009, disponível em <<http://www.ntu.org.br>>, acesso em setembro de 2012.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2012 - Ano base 2011: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 51 p., disponível em <<https://ben.epe.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

CORONADO, C. R., CARVALHO Jr., J. A., SILVEIRA, J. L. Biodiesel CO₂ emissions: A comparison with the main fuels in the Brazilian market. Fuel Processing Technology. V. 90, Issue 2, 2009, p. 204-211, disponível em <<http://www.sciencedirect.com>>, acesso em agosto de 2012.

COSTA NETO, P. R., ROSSI, L. F. S., ZAGONEL, G. F., RAMOS, L. P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. Química Nova, v. 23, n. 4, 2000, p. 531-537.

DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito, 2008, disponível em <<http://www.denatran.gov.br>>.

D.O.U. de 14.01.2005. Lei nº 11.097/2005, disponível em <<http://www.planalto.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 24.05.2005. Decreto nº 5.448/2005, disponível em <<http://www.planalto.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 04.10.2005. Portaria MME nº 483/2005, disponível em <<http://www.mme.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 18.05.2012. Resolução ANP nº 14/2012, disponível em <<http://nxt.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 27.10.2010. Resolução ANP nº 41/2010, disponível em <<http://nxt.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 26.12.2008. Resolução ANP nº 40/2008, de 24.12.2008, disponível em <<http://nxt.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 20.03.2008. Resolução ANP nº 07/2008, disponível em <<http://nxt.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 30.01.2008. Resolução ANP nº 02/2008, disponível em <<http://nxt.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 12.11.2007 - retificado DOU de 07.12.2007. Resolução ANP nº 35/2007, disponível em <<http://nxt.anp.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 26.10.2009. Resolução CNPE nº 06/2009, disponível em <<http://www.mme.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 18.05.2009. Resolução CNPE nº 02/2009, disponível em <<http://www.mme.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 14.03.2008. Resolução CNPE nº 02/2008, disponível em <<http://www.mme.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 28.09.2005. Resolução CNPE nº 3/2005, disponível em <<http://www.mme.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

D.O.U. de 17.02.1986. Resolução CONAMA nº 001/1986, disponível em <<http://www.mma.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Considerações sobre Biodiesel como Biocombustível Alternativo ao Diesel. Documentos 93, novembro 2009.

Empresa de Pesquisa Energética. Estudos EPE - Potencial de Redução de Emissões de CO₂ em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis, disponível em <<http://www.epe.gov.br>>, acesso em agosto de 2012.

ENCARNAÇÃO, A. P. G. Geração de Biodiesel pelos Processos de Transesterificação e Hidroesterificação, Uma Avaliação Econômica - Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008. XX, 144f.

FERRÉS, D. H. S. Competitividade dos Biocombustíveis no Brasil: uma comparação entre os principais biocombustíveis - etanol e biodiesel. 2010. 167f. Dissertação (mestrado profissional: Campo de conhecimento: Economia da Agroenergia) - Fundação Getúlio Vargas, Escola de Economia de São Paulo, São Paulo, 2010.

FETRANSPOR - Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro. Biodiesel B20 - O Rio de Janeiro anda na frente. Rio de Janeiro, 2011, 104p.

GARCIA, J.R. O programa nacional de produção e uso de biodiesel brasileiro e a agricultura familiar na região nordeste. 2007. 165p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico: Área de Concentração Economia Agrícola e Agrária) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, Campinas, 2007.

NBB - National Biodiesel Board, disponível em <<http://www.biodiesel.org>>, acesso em agosto de 2012.

PENTEADO, M. C. P. S. Identificação de gargalos e estabelecimento de um plano de ação para o sucesso do Programa Brasileiro do Biodiesel. -- ed. rev. -- São Paulo, 2005, 159p. Dissertação (mestrado profissionalizante: Área de Concentração: Engenharia Automotiva) - Universidade de São, Escola Politécnica, São Paulo, 2005.

QUADRELLI, R.. PETERSON, S. The energy–climate challenge: Recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion. Energy Policy. V. 35, 2007, p. 5938-5952, disponível em <<http://www.sciencedirect.com>>, acesso em agosto de 2012.