

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICO - AMBIENTAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS  
APLICADOS A MOTORES DIESEL**

**POR: MARCOS GONÇALVES NOLETO**

**ORIENTADOR: ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA-PIRES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM  
CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO: ENM.DM-161A/2011**

**BRASÍLIA/DF: 20 DE ABRIL DE 2011.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICO - AMBIENTAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS  
APLICADOS A MOTORES DIESEL**

**MARCOS GONÇALVES NOLETO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. Armando Caldeira-Pires PhD. (ENM-UnB)  
(Orientadora)**

---

**Prof. Dr. Carlos Alberto Veras Gurgel, PhD. (ENM-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Profª Drª Sandra Maria da Luz, PhD. (Faculdade do Gama-UnB)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 20 DE ABRIL DE 2011.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

NOLETO, MARCOS GONÇALVES

Avaliação energético-ambiental de biocombustíveis aplicados  
a motores diesel. [Distrito Federal] 2011.

vii, 80p., 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2006

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- |                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| 1. Biocombustíveis | 2. Óleo de soja |
| 3. Etanol          | 4. Emissões     |
| I. ENM/FT/UnB      | II. Mestre      |

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

NOLETO, M. G. (2011). Avaliação energético-ambiental de biocombustíveis aplicados a motores diesel. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, ENM.DM-161A/2011, Brasília, DF, 80p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Marcos Gonçalves Noleto.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação energético-ambiental de biocombustíveis aplicados a motores diesel.

GRAU / ANO: Mestre / 2011

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Marcos Gonçalves Noleto

SQN 316 Bloco I apartamento 405 - Asa Norte

70.775-090 Brasília - DF - Brasil.

# Dedicatória

*“Como nos tempos mais recuados das civilizações mortas, temos de reafirmar que a maior necessidade da criatura humana ainda é a do conhecimento de si mesma.” (Emmanuel, O Consolador, 15ed., perg. 232)*

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

# Agradecimento

*“Qual é o papel do professor, diante de seus alunos, se não o é de um revelador? Ensina-lhes o que não sabem, o que não teriam nem tempo e nem possibilidade de descobrir por si mesmos, porque a ciência é a obra coletiva dos séculos e de uma multidão de homens que deram, cada um, o seu contingente de observações, e das quais se aproveitam aqueles que vêm após ele. O ensinamento é, pois, em realidade, a revelação de certas verdades científicas ou morais, físicas ou metafísicas, feitas por homens que as conhecem a outros que as ignoram, e que, sem isso, as teriam sempre ignorado. Mas o professor não ensina senão o que aprendeu: é um revelador de segunda ordem; o homem de gênio ensina o que descobriu por si mesmo: é o revelador primitivo; produz a luz que, gradualmente se vulgariza. Onde estaria a Humanidade sem a revelação dos homens de gênio, que aparecem de tempos em tempos?” (Allan Kardec, A Gênese, 53 ed., páginas 7 e 8)*

Agradeço que estiveram nesta jornada de trabalho e realizações. Mas, acima de tudo, agradeço a Deus, pois este me deu forças quando eu mais precisava.

# Resumo

Nos dias de hoje, as avaliações energéticas experimentais e as avaliações ambientais são tratadas de forma separada. Buscando uma forma inovadora para redução de emissões de gases de efeito estufa, o estudo em questão apresenta uma integração dos dados energéticos obtidos experimentalmente com os dados ambientais obtidos pelo *software GaBi 4* sobre biocombustíveis. Os combustíveis escolhidos para o estudo são: o óleo diesel (como padrão de referência do estudo), o óleo de soja puro e a mistura de óleo de soja e etanol (sendo uma alternativa ao ter dois biocombustíveis em sua composição). Os testes experimentais no motor diesel foram realizados e ao mesmo tempo os resultados ambientais foram obtidos. Com todos eles em mãos, criou-se um vínculo onde pôde-se cruzar os dados energéticos experimentais com os dados ambientais. Os resultados finais desse cruzamento mostraram que apesar do aumento de emissões e consumo específico dos biocombustíveis em relação aos combustíveis derivados do petróleo, a mistura de óleo de soja e etanol obteve os melhores resultados sob o aspecto de mudanças climáticas. No entanto, o óleo de soja obteve os melhores resultados sob a ótica de potenciais acidificação, eutrofização, toxicidade humana e terrestre. Para a obtenção de melhores resultados, propõe-se modificações no motor diesel e ao mesmo tempo novas metodologias de plantio ou até mesmo utilização de novas culturas para a obtenção dos biocombustíveis.

Palavras-chave: Biocombustíveis, óleo de soja, etanol, ACV, mudanças climáticas.

# Abstract

Nowadays, experimental energy assessments and environmental assessments are handled separately. Seeking an innovative way to reduce emissions of greenhouse gases, the study in question presents an integration of energy data obtained experimentally with the environmental data obtained by GaBi 4 software on biofuels. The fuel chosen for study are: the diesel (as a reference standard of the study), pure soybean oil and a mixture of soybean oil and ethanol (as an alternative to having two biofuels in your composition). Experimental tests were performed on the diesel engine while the environmental results were obtained. With all these, it created a link where we could cross the experimental energy data with environmental data. The final results of this cross showed that despite the increase in emissions and specific fuel consumption of biofuels compared to petroleum-based fuel, a mixture of soybean oil and ethanol showed better results in the aspect of climate change. However, soybean oil obtained the best results from the perspective of potential acidification, eutrophication, human toxicity and terrestrial. For best results, it is proposed modifications to the engine and at the same time new methods of cultivation or even utilization of new crops for the generation of biofuels.

Keywords: Biofuels, soy oil, ethanol, LCA, global warming.

# Lista de Figuras

1.1	Processos de transformação de biomassa atuais . . . . .	3
1.2	Matriz energética mundial de 2002 (MOREIRA, 2002) . . . . .	3
1.3	Projeção de energia elétrica gerada (IEA, 2008) . . . . .	4
1.4	Evolução histórica do uso de etanol no Brasil . . . . .	5
1.5	Histórico dos motores diesel utilizando os biocombustíveis . . . . .	7
2.1	Representação esquemática dos fluxos de energia primária, secundária, final e útil com a indicação das perdas nos centros de transformação e no uso final (ALVIM et al., 2009) . . . . .	12
2.2	Fluxograma de um combustível fóssil qualquer . . . . .	21
2.3	Fases de um estudo de ACV (COLTRO et al., 2007) . . . . .	22
3.1	Esquema da bancada de ensaios e instrumentação associada . . . . .	33
3.2	Instrumentação para a injeção de etanol . . . . .	37
3.3	Cadeia de impactos causada pela emissão de uma certa substância . . . . .	41
4.1	Consumo específico de combustível em função da rotação do motor . . . . .	45
4.2	Emissões de CO dos combustíveis analisados . . . . .	46
4.3	Emissão de NO <sub>x</sub> dos combustíveis analisados . . . . .	47
4.4	Emissão de CO <sub>2</sub> dos combustíveis analisados . . . . .	49
4.5	Etapas do beneficiamento do óleo de soja (PASSOS, 2004) . . . . .	50
4.6	Etapas do beneficiamento do etanol (PASSOS, 2004) . . . . .	51
4.7	Produção agrícola da cana-de-açúcar e da soja (BRASIL, 2008b) . . . . .	52
4.8	Área colhida da cana-de-açúcar e da soja (BRASIL, 2008b) . . . . .	53



4.9	Produtividade média da cana-de-açúcar e da soja (BRASIL, 2008b)	53
4.10	Fluxo mássico para a produção do óleo de soja	56
4.11	Fluxo mássico para a produção do etanol	56
4.12	Fluxo mássico para a mistura de óleo de soja e etanol	57
4.13	Fluxo mássico para a produção de diesel	57
4.14	Saída de emissões de CO <sub>2</sub> - casos de mistura diferentes de óleo de soja e etanol	60
4.15	Resultados de emissões de CO <sub>2</sub> versus potencial de mudanças climáticas	66
4.16	Resultados de emissões de CO versus potencial de mudanças climáticas	67
4.17	Resultados de emissões de NO <sub>x</sub> versus potencial de acidificação	68
4.18	Resultados de emissões de NO <sub>x</sub> versus potencial de eutrofização	69
4.19	Resultados de consumo específico versus potencial de toxicidade humana	70
4.20	Resultados de consumo específico versus potencial de toxicidade terrestre	71

# Lista de Tabelas

2.1	Questões ambientais relacionadas às atividades agroindustriais (FIGUEIREDO, 2008) . . . . .	24
3.1	Dados principais do motor diesel Yanmar BTD33 . . . . .	34
3.2	Tabela com as características do analisador de gases utilizado. . . . .	36
4.1	Características dos plantios da soja e da cana-de-açúcar com a visão produtiva e seus impactos ambientais (EMBRAPA, 2009b; EMBRAPA, 2009a) . . . . .	54
4.2	Resultados dos fluxos mássicos em geral obtidos dos combustíveis testados . . . . .	58
4.3	Resultados dos fluxos de emissões de CO <sub>2</sub> obtidos dos combustíveis testados . . . . .	59
4.4	Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de acidificação dos combustíveis testados . . . . .	61
4.5	Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de eutrofização dos combustíveis testados . . . . .	62
4.6	Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de toxicidade humana dos combustíveis testados . . . . .	63
4.7	Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de toxicidade terrestre dos combustíveis testados . . . . .	65
A.1	Problemas e soluções em potencial quanto o uso de óleos vegetais como combustíveis (HARWOOD, 1984; MA; HANNA, 1999) . . . . .	79
A.2	Visão geral dos biocombustíveis, matérias primas e processos usados na sua produção (EUROPEAN COMMISSION, 2006). . . . .	80

# Lista de Símbolos

OVEG	Programa Nacional de Energia de Óleos Vegetais
IDO	Indicador de Avaliação Operacional
IDG	Indicador de Avaliação de Gestão
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
SFC	Specific Fuel Consumption ou Consumo Específico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CML	Centre of Environmental Science Leiden University
GWP	Global Warming Potential
DCB	Diclorobenzeno

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	O <i>Proálcool</i> . . . . .	5
1.2	O Programa Nacional de Energia de Óleos Vegetais (OVEG) . . . . .	6
1.3	Objetivos do estudo . . . . .	8
1.4	Motivação . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica</b>	<b>10</b>
2.1	Indicadores de Eficiência Energética . . . . .	10
2.1.1	Indicadores termodinâmicos . . . . .	11
2.1.2	Indicadores físico-termodinâmicos . . . . .	13
2.1.3	Indicadores econômicos-termodinâmicos . . . . .	13
2.1.4	Indicadores econômicos . . . . .	13
2.2	O uso de óleos vegetais como combustíveis em motores diesel - aspectos técnicos	14
2.3	Mistura de óleo diesel e etanol e Fumigamento: alternativas quanto ao uso de óleo vegetal como combustível . . . . .	17
2.4	Indicadores de avaliação ambiental . . . . .	18
2.4.1	A importância de indicadores de avaliação ambiental . . . . .	18
2.4.2	Indicadores de avaliação ambiental - Normas ISO . . . . .	19
2.4.3	Seleção do indicador de avaliação ambiental . . . . .	19
2.5	Procedimentos de avaliação ao longo do ciclo de vida . . . . .	20
2.5.1	Características da avaliação de ciclo de vida . . . . .	21
2.5.1.1	Fases da avaliação de ciclo de vida – ACV: . . . . .	21

2.5.2	Impactos ambientais da agroindústria . . . . .	23
2.5.3	Avaliação de impactos ambientais . . . . .	23
2.5.4	Questões ambientais relacionadas à agroindústria . . . . .	24
2.5.5	Principais questões ambientais quanto a produção ao uso dos biocombustíveis . . . . .	25
2.6	Estudos anteriores sobre a avaliação ambiental de biocombustíveis . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>31</b>
3.1	Descrição da parte energética do estudo . . . . .	31
3.1.1	Condição-padrão de referência segundo a norma NBR ISO 3046/1 (1995)	32
3.1.2	Ajuste de potência efetiva líquida para as condições ambientes . . . . .	32
3.1.3	Caracterização dos instrumentos utilizados . . . . .	33
3.1.3.1	Motor Diesel utilizado . . . . .	34
3.1.3.2	Bancada dinamométrica . . . . .	34
3.1.3.3	Sistema de aquisição de dados . . . . .	35
3.1.3.4	Sistema de avaliação de gases . . . . .	36
3.1.3.5	Instrumentação para a injeção de etanol . . . . .	36
3.1.3.6	Cálculo da potência do motor . . . . .	37
3.1.3.7	Cálculo do Consumo Específico(SFC) . . . . .	37
3.1.3.8	Cálculo das emissões de CO e NO <sub>x</sub> . . . . .	38
3.1.4	Resolução do CONAMA quanto a emissão de gases por motores de compressão . . . . .	38
3.2	Descrição da parte ambiental do estudo . . . . .	39
3.2.1	Unidade funcional . . . . .	39
3.2.2	Fronteiras do sistema . . . . .	40
3.2.3	Alocação . . . . .	40
3.2.4	Descrição do <i>software GaBi 4</i> . . . . .	40
3.2.4.1	Descrição da Metodologia CML . . . . .	41
3.2.4.2	Descrição dos cenários gerados pelo <i>GaBi 4</i> . . . . .	43

<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>44</b>
4.1	Resultados do desempenho energético . . . . .	44
4.1.1	Consumo Específico - SFC . . . . .	44
4.1.2	Emissões de gases . . . . .	46
4.1.2.1	Emissões de CO . . . . .	46
4.1.2.2	Emissões de NO <sub>x</sub> . . . . .	47
4.1.2.3	Emissões de CO <sub>2</sub> . . . . .	48
4.2	Resultados do desempenho ambiental . . . . .	50
4.2.1	Produção agrícola . . . . .	51
4.2.2	Área colhida . . . . .	52
4.2.3	Produtividade média . . . . .	53
4.2.4	Características dos plantios da soja e da cana-de-açúcar . . . . .	54
4.2.5	Resultados da avaliação energético-ambiental do óleo de soja e do álcool	55
4.2.5.1	Fluxos mássicos dos biocombustíveis analisados . . . . .	55
4.2.5.2	Fluxos mássicos de emissões - total geral . . . . .	58
4.2.5.3	Fluxos de emissões de CO <sub>2</sub> . . . . .	59
4.2.5.4	Potencial de acidificação do solo . . . . .	61
4.2.5.5	Potencial de eutrofização do solo . . . . .	62
4.2.5.6	Potencial de toxicidade humana . . . . .	63
4.2.5.7	Potencial de toxicidade terrestre . . . . .	64
4.3	Avaliação energética versus avaliação ambiental . . . . .	65
4.3.1	Emissões de CO <sub>2</sub> e Potencial de mudanças climáticas . . . . .	66
4.3.2	Emissões de CO e Potencial de mudanças climáticas . . . . .	67
4.3.3	Emissões de NO <sub>x</sub> e Potencial de acidificação . . . . .	67
4.3.4	Emissões de NO <sub>x</sub> e Potencial de eutrofização . . . . .	68
4.3.5	Consumo específico e Potencial de toxicidade humana . . . . .	69
4.3.6	Consumo específico e Potencial de toxicidade terrestre . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>72</b>

<b>Referências bibliográficas</b>	<b>74</b>
<b>A Anexos</b>	<b>79</b>
A.1 Tabelas . . . . .	79

# 1 Introdução

As emissões de gases de efeito estufa provenientes do petróleo é um problema atual. No setor de transportes terrestres, os motores diesel são os maiores responsáveis pelas maiores emissões. No Brasil, o transporte de cargas é realizado, majoritariamente, por veículos pesados que utilizam motores de ignição por compressão (BRASIL, 2007).

O que contribui para a parcela de emissões do setor de transportes é a idade média da frota, em torno de 17 anos (BRASIL, 2008a). Veículos antigos podem proporcionar uma grande emissão de CO<sub>2</sub>. Este fato é comprovado pelo regime de operação de mercado livre do setor de transporte rodoviário, sem exigências para a entrada e saída do mercado. Logo, a falta de legislação específica no campo dos transportes para o exercício dessa atividade exerce influência nos dados de emissões (BRASIL, 2008a).

E o petróleo por ser um insumo que se caracteriza com forte inelasticidade de preço no curto prazo e substancial elasticidade de preço no longo prazo está diretamente ligado para as crescentes taxas de emissões de efeito estufa. Isso significa que uma forte elevação no preço provoca pequena alteração no consumo e emissões de gases de efeito estufa no curto prazo.

A produção da energia, através da queima de combustíveis derivados do petróleo para o uso do setor de transporte terrestre, é um mecanismo muito ocorrente no Brasil e no mundo. O crescimento econômico dos setores da indústria, torna indispensável o crescimento da frota automobilística para a logística de produtos oriundos destes setores. Como consequência, recentemente, cresceu as emissões dos gases de efeito estufa (MOREIRA, 2002).

Em vista a crescente emissão de gases de efeito estufa, o conceito de desenvolvimento sustentável - desenvolvimento através do uso de recursos naturais com o caráter sustentável, promovendo o bem estar de todos no planeta e para as futuras gerações - foi proposto e uma grande quantidade de estudos aplicados com base nesse conceito foram elaborados, visando alternativas para mitigação desses gases.

Uma das estratégias mais promissoras para a mitigação de gases de efeito estufa seria a gradual substituição dos derivados de petróleo por biocombustíveis líquidos.

E uma das alternativas possíveis de ser implementada seria a utilização da biomassa. Então, abre-se espaço para um novo modelo de agricultura voltado para a produção de energia. Esse modelo é reconhecido como a principal fonte de energia renovável mundial. A biomassa é uma boa opção de matéria-prima devido à três fatores principais (OZCIMEN; KARAOSMA-



NOGLU, 2004; JEFFERSON, 2006; CADENAS; CABEZUDO, 1998):

1. É um recurso renovável sustentável, visando um desenvolvimento crescente no futuro;
2. É observado as propriedades positivas durante o seu ciclo de vida, quanto às baixas emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e emissões muito baixas de compostos de enxofre;
3. Aparenta possuir potencial e vantagens econômicas com relação a aumentos nos preços de combustíveis fósseis.

A partir do conceito de biomassa, o termo biocombustível se refere basicamente a um líquido ou um gás combustível, produzido predominantemente a partir de biomassa (REIJNDERS, 2006). Os biocombustíveis, em geral, são vantajosos devido a certos aspectos como:

- Sustentabilidade;
- Redução dos gases de efeito estufa;
- Desenvolvimento regional, social e agrícola;
- Confiabilidade quanto ao seu provimento.

E assim, os países desenvolvidos começaram o emprego de tecnologias eficazes para conversão de bioenergia. Com esse progresso e melhorias na produção, atualmente os biocombustíveis são produzidos a custos mais competitivos em relação aos combustíveis fósseis (PUHAN et al., 2005).

A disponibilidade de recursos de biomassa está na agricultura e silvicultura. Outras fontes de biomassa são constituídas de materiais não aproveitados em construção civil, indústrias de madeira e da cana-de-açúcar. Os processos de transformação de recursos de biomassa em combustíveis estavam se tornando uma realidade. A Figura 1.1 caracteriza os processos de conversão de biomassa atuais.

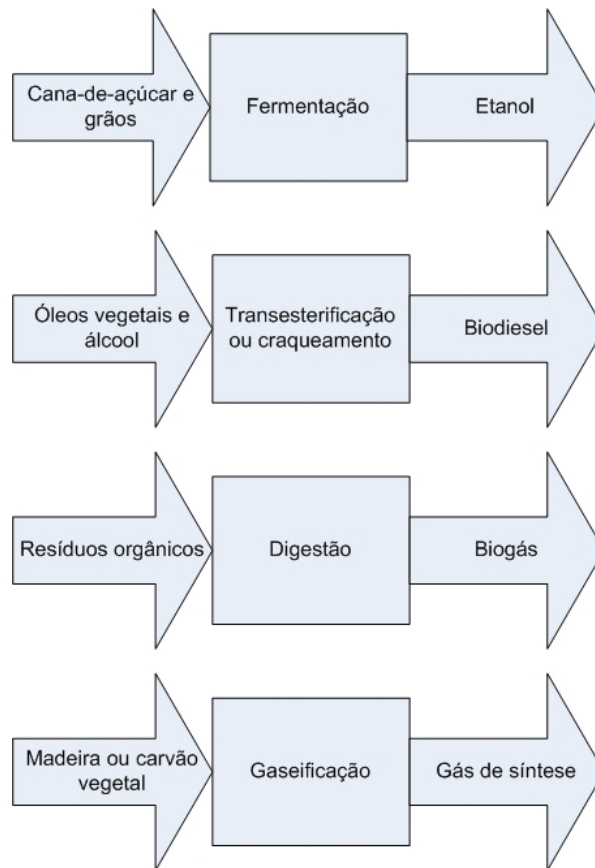


Figura 1.1: Processos de transformação de biomassa atuais

Estes processos de conversão de biomassa são processos de primeira geração de biocombustíveis. O interesse em reduzir as emissões em escala global é considerado como um fator positivo e ao mesmo tempo desafiador. E o uso fontes renováveis para a geração de energia (motriz, elétrica e etc) se fez necessária. Antes, só havia uma pequena participação das fontes alternativas que era fundamentada pela falta de competitividade comercial. Esta exigindo mais adiante uma melhoria tecnológica, caracterizada pela Figura 1.2.

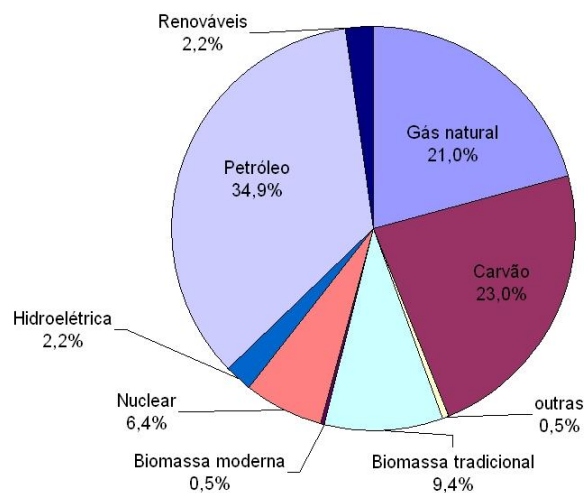


Figura 1.2: Matriz energética mundial de 2002 (MOREIRA, 2002)

Buscando um desafio onde aumenta-se a produção de biocombustíveis com processos inovadores e tecnologias sustentáveis e sem afetar a produção de alimentos, a União Europeia iniciou uma série de pesquisas no campo de produção de energia sob forma sustentável - que são os biocombustíveis de segunda geração.

Os países que integram a União Europeia mostram preocupação com a vulnerabilidade do mercado de petróleo e com o cumprimento dos critérios de emissões de CO<sub>2</sub> de acordo com o tratado de Kyoto (EUROPEAN COMMISSION, 2006).

Diante desse desafio, seria necessário (enquanto suportada a aplicação atual de biocombustíveis da primeira geração) promover a transição para a segunda geração de biocombustíveis. Essa segunda geração de biocombustíveis pode ser produzida a partir de uma gama de matérias primas, como caracteriza a Tabela A.2. Outra vantagem da segunda geração de biocombustíveis é o fato de não afetar a cadeia alimentícia, ajudando a reduzir custos quanto a emissão de CO<sub>2</sub>.

O Brasil atualmente está com uma crescente demanda de produção de energia elétrica. Uma alternativa viável de produção de energia elétrica é por biomassa e outras fontes renováveis. E com a projeção de 2030, a energia elétrica gerada a partir de usinas hidrelétricas possuirão uma grande participação. Somando todas as formas de geração de energia elétrica, o total fica em mais de 700 TWh.

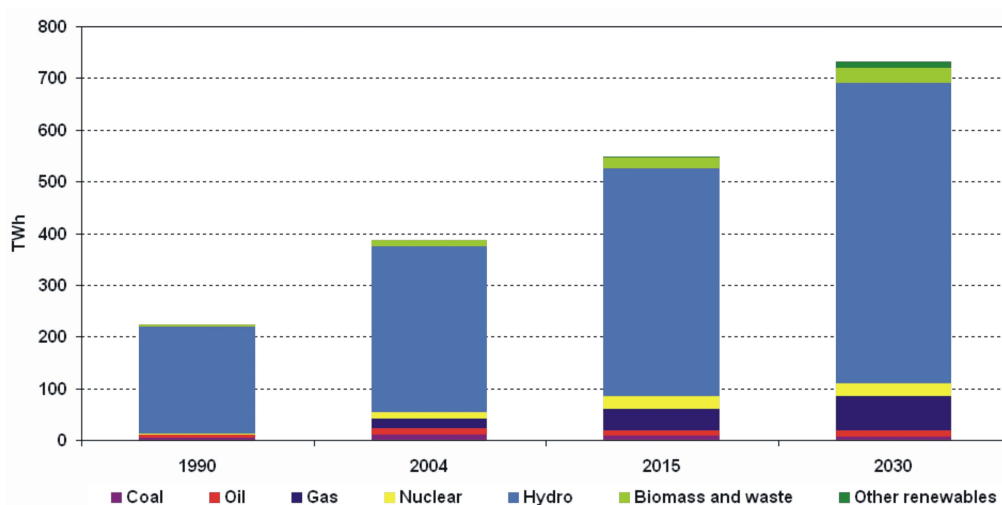


Figura 1.3: Projeção de energia elétrica gerada (IEA, 2008)

O Brasil que estava acompanhando as evoluções tecnológicas dos países europeus desde 1940, também realizou estudos para a utilização de biocombustíveis. Este possui uma série de pesquisas conhecidas pelo mundo. As mais importantes para o estudo em questão são o Proálcool e Programa Nacional de Energia de Óleos Vegetais (OVEG).

## 1.1 O Proálcool

O etanol é conhecido por muitas décadas como combustível de origem agrícola (AGARWAL, 2007). Henry Ford projetou o seu modelo (Ford T) com a expectativa de que o etanol, obtido por materiais biologicamente renováveis, este seria uma grande fonte de combustível automotivo. Porém, a gasolina emergiu como o combustível dominante para transportes no começo do século XX. As desvantagens da gasolina em relação ao álcool são:

- Tem uma taxa de octanagem menor do que o etanol;
- É muito mais tóxico do que o etanol;
- Muito mais perigoso na hora de manusear;
- Possui uma maior taxa de emissão de poluentes.

Com a crise do petróleo em 1973, o Brasil implantou o programa *Proálcool* em 1975. Nesta época, houveram estudos e a implantação de carros movidos a etanol anidro. Este programa foi um sucesso na época, ocorrendo uma substituição em larga escala na frota brasileira de carros movidos à gasolina para carros movidos à álcool. A disponibilidade de álcool nesse período rendeu a pesquisadores a possibilidade de estudos da alcoolquímica sobre a viabilidade da produção de óxido de etileno e monômeros a partir do etanol.

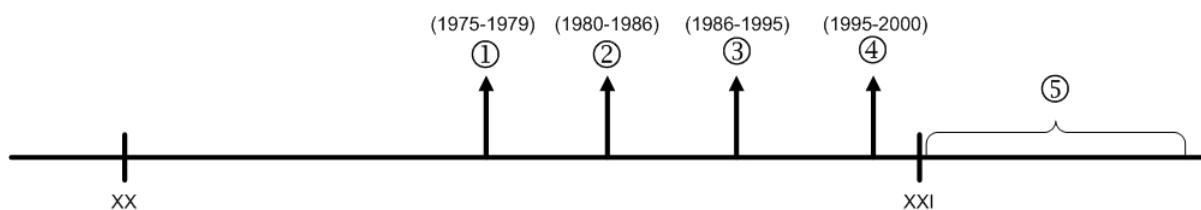


Figura 1.4: Evolução histórica do uso de etanol no Brasil

Do *Proálcool*, se destacam cinco fases distintas (BIODIESELBR, 2006):

1. Fase Inicial (1975–1979): o esforço foi dirigido sobretudo para a produção de álcool anidro para a mistura com gasolina. Nessa fase, o esforço principal coube às destilarias anexas. A produção alcooleira cresceu de 600 milhões de L/ano (1975-76) para 3,4 bilhões de L/ano (1979-80). Os primeiros carros movidos exclusivamente a álcool surgiram em 1978.
2. Fase de Afirmação (1980–1986): o segundo choque do petróleo (1979-80) triplicou o preço do barril de petróleo e as compras desse produto passaram a representar 46% da pauta de importações brasileiras em 1980. São criados organismos como o Conselho

Nacional do Álcool–CNAL e a Comissão Executiva Nacional do Álcool–CENAL para agilizar o programa.

3. Fase de Estagnação (1986–1995): a partir de 1986, o cenário internacional do mercado petrolífero é alterado. Os preços do barril de óleo bruto caíram de um patamar de US\$ 30 a 40 para um nível de US\$ 12 a 20. Esse novo período, é denominado “contra-choque do petróleo”. Na política energética brasileira, seus efeitos foram sentidos a partir de 1988, coincidindo com um período de escassez de recursos públicos para subsidiar os programas de estímulo aos energéticos alternativos.
4. Fase de Redefinição (1995–2000): Os mercados de álcool combustível, tanto anidro quanto hidratado, encontram-se liberados em todas as suas fases de produção, distribuição e revenda sendo os seus preços determinados pelas condições de oferta e procura. De cerca de 1,1 milhão de toneladas de açúcar que o país exportava em 1990 passou-se à exportação de até 10 milhões de toneladas por ano (dominando o mercado internacional e barateando o preço do produto). Dadas as externalidades positivas do álcool e com o intuito de direcionar políticas para o setor sucroalcooleiro, foi criado, por meio do decreto de 21 de agosto de 1997, o Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool–CIMA.
5. Fase atual: Trinta anos depois do início do Proálcool, o Brasil vive agora uma nova expansão dos canaviais com o objetivo de oferecer, em grande escala, o combustível alternativo. A nova escalada não é um movimento comandado pelo governo, como a ocorrida no final da década de 70. A corrida para ampliar unidades e construir novas usinas é movida por decisões da iniciativa privada, convicta de que o álcool terá, a partir de agora, um papel cada vez mais importante como combustível, no Brasil e no mundo.

O Brasil é o país mais avançado, do ponto de vista tecnológico, na produção e no uso do etanol como combustível (BIODIESELBR, 2006). A produção mundial de álcool aproxima-se dos 40 bilhões de litros, dos quais presume-se que mais 25 bilhões de litros sejam utilizados para fins energéticos. O Brasil responde por 15 bilhões de litros deste total. O álcool é utilizado em mistura com gasolina no Brasil, EUA, UE, México, Índia, Argentina, Colômbia e no Japão (CALDEIRA-PIRES et al., 2006).

## **1.2 O Programa Nacional de Energia de Óleos Vegetais (OVEG)**

A ideia de utilizar óleos vegetais nos motores Diesel não é nova. Estes constituem uma promissora matéria-prima para a substituição do óleo diesel, sem que fossem necessárias modificações nos motores. O panorama estratégico brasileiro se caracterizou devido contingências técnicas, econômicas e políticas, pela necessidade de redução do petróleo importado e a pela emissão de gases poluentes. Neste contexto, os combustíveis alternativos têm-se apresentado

como importante componente para a redução de consumo de derivados de petróleo (BRASIL, 1985).

Focalizando a substituição do óleo diesel, por óleos vegetais, estes últimos figuram entre os possíveis combustíveis alternativos, uma vez que mostraram promissores resultados, apresentados na literatura (VENANZI et al., 1984; VILLAR et al., 1984; SANTOS; SOUZA, 1984; SOARES et al., 2002) A Figura 1.5 caracteriza a evolução histórica quanto ao uso de biocombustíveis no Brasil e no mundo.

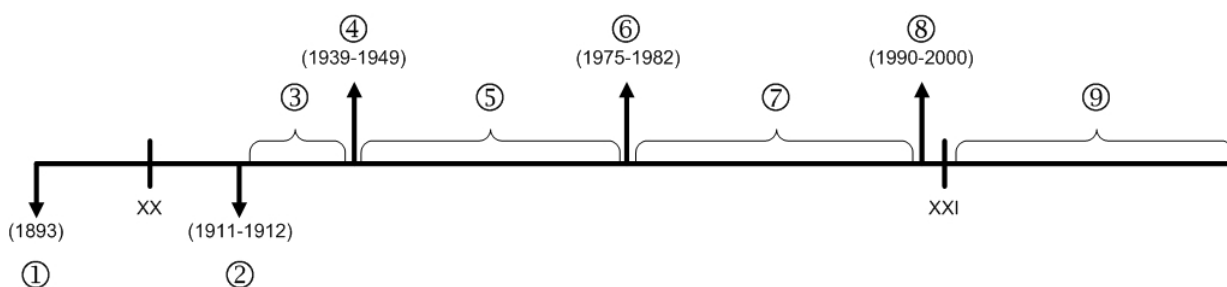


Figura 1.5: Histórico dos motores diesel utilizando os biocombustíveis

Cada número na figura acima caracteriza um momento histórico. De acordo com BiodieselBR (2006):

1. Início da utilização de óleos vegetais (em fases de testes) nos primeiros motores diesel como combustíveis.
2. Rudolf Diesel previu que o motor Diesel alimentado por óleos vegetais no futuro, e ajudará no desenvolvimento agrário dos países que vierem a utilizá-lo. Previu também que poderia parecer insignificante hoje em dia. Mas com o tempo iria se tornar tão importante quanto o petróleo e o carvão.
3. Diante da descoberta de Rudolf Diesel, a primeira referência sobre o assunto no Brasil foi a palestra dada por Joaquim Bertino de Moraes Carvalho, no Clube de Engenharia do Rio de Janeiro, em 1923.
4. Os primeiros usos do óleo vegetal transesterificado (Biodiesel) realizados na África do Sul antes da 2ª Guerra Mundial. No Brasil, na década de 1940, há registro de ensaios realizados pelo Instituto Nacional de Tecnologia - INT e outros órgãos governamentais utilizando diversas oleaginosas.
5. A abundância de petróleo aliada aos baixos custos dos seus derivados acarretou no primeiro desinteresse dos estudos e uso de óleos vegetais.

6. Com a crise do petróleo, a implementação do Programa Nacional de Energia de Óleos Vegetais - Projeto OVEG foi inicializada. Neste projeto foi testada a utilização de biodiesel e de misturas combustíveis em veículos que rodaram mais de 1 milhão de quilômetros.
7. Porém ocorreu o desinteresse por parte das autoridades brasileiras, essas alegando custos elevados na produção de óleos vegetais.
8. No entanto, nova retomada de interesse ao uso de óleos vegetais como combustíveis devido à pressões ambientalistas e a introdução do conceito de desenvolvimento sustentável.
9. Observa-se a existência de vários programas para a produção de óleos vegetais. Em dezembro de 2003, o Governo Federal instituiu, por meio de Decreto Presidencial, a Comissão Executiva Interministerial encarregada de implantar ações direcionadas à produção e ao uso de óleo vegetal, como fonte alternativa de energia.

### **1.3 Objetivos do estudo**

Em observância com estudos de mudanças climáticas e a contribuição do setor de transportes nas emissões de gases de efeito estufa, o objetivo do presente trabalho é propor uma metodologia de avaliação energético e ambiental para biocombustíveis. Atualmente, a elaboração e discussão dos resultados das avaliações energéticas e ambientais são tratados, de certa forma, em dois campos separados. Buscando elaborar uma metodologia onde estes dois desempenhos são complementares, promove-se uma certa integração. A partir dessa integração dos desempenhos enérgicos e ambientais, uma série de análises de resultados é mostrada de forma simples, não somente para uma rápida análise mas aberta para diversos tipos de análises.

A partir dos resultados das avaliações energéticas e ambientais, é proposto o uso de análises a partir de ferramentas computacionais, dados obtidos experimentalmente e de trabalhos anteriores. Com as conclusões destas análises, em primeira vista, as melhorias são:

- Otimização dos processos de produção do combustível;
- Minimização das quantidades de emissões de poluentes;
- Minimização da ação dos processos causadores de mudanças ambientais.

Para início do estudo, três combustíveis foram selecionados: o óleo diesel (como referência), a mistura de óleo de soja e etanol - sob a forma de fumigamento, e em último lugar, o óleo de soja.

## 1.4 Motivação

A principal motivação foi a ausência de outros estudos onde as avaliações energéticas experimentais em motores diesel em consonância com avaliações ambientais. Outra motivação para o estudo é devido a atual baixa contribuição da biomassa encontrada em na matriz energética do Brasil. Observa-se que ainda existe na matriz energética uma forte presença de combustíveis convencionais no setor de transportes e geração de energia elétrica.

Logo, o estudo em questão seguirá o seguinte roteiro:

- O capítulo 2 será a fundamentação teórica, onde foi apresentados estudos relacionados quanto ao uso de óleo de soja em motores diesel, estudos de motores diesel utilizando o fumigamento e finalizando estudos de avaliações de ciclo de vida para a produção de biocombustíveis;
- O capítulo 3 será a apresentação da metodologia do trabalho. Nela está vínculo de união das avaliações energéticas experimentais em motores diesel com as avaliações ambientais obtidas pelo *software GaBi 4* - este utilizando a metodologia CML;
- O capítulo 4 será apresentado os resultados e discussões onde ao final deste capítulo foi obtido o cruzamento de dados das avaliações energéticas experimentais e ambientais;
- E finalizando, o capítulo 5 onde será as conclusões e propostas para estudos futuros.



## 2 Fundamentação teórica

São apresentados neste capítulo os conceitos de indicadores energéticos, ambientais e de avaliação de ciclo de vida aplicados na produção de biocombustíveis.

Os estudos experimentais quanto ao uso de biocombustíveis em motores diesel também são apresentados.

Também são apresentados os estudos de ACV, observando as formas de obtenção dos biocombustíveis envolvidos, propondo uma eficiência energético-ambiental do “berço ao túmulo”. Ou seja, desde a sua fase agrícola até a sua utilização de fato nos motores de ignição por compressão.

### 2.1 Indicadores de Eficiência Energética

Segundo Patterson (1996), podem ser detectados quatro grupos mais influentes de indicadores de eficiência energética:

1. Termodinâmico;
2. Físico-termodinâmico;
3. Econômico-termodinâmico;
4. Econômico.

O primeiro grupo refere-se às análises segundo as leis da termodinâmica, da eficiência da transformação de uma forma de energia em outra; o segundo avalia os insumos energéticos necessários para produzir um determinado bem ou serviço. Nesse caso, a energia que entra no sistema em unidades termodinâmicas convencionais e a energia que sai do sistema é mensurada em unidades físicas; o terceiro é um indicador híbrido no qual o produto do processo a preços de mercado e a energia que entra é mensurado por unidades termodinâmicas convencionais; o quarto indicador mede as mudanças na eficiência energética em valores monetários da energia que entra, e que sai do sistema.

### 2.1.1 Indicadores termodinâmicos

Segundo Abreu (2003), os indicadores termodinâmicos têm sido o caminho mais natural para mensurar a eficiência energética. Porém, as medidas termodinâmicas de eficiência energética não são tão satisfatórias para medir a eficiência energética quanto podem parecer.

Um atrativo para usar esse método é a possibilidade de calcular “função estado” do processo. Isso significa o que se produz por medidas únicas e objetivas pode ser representado por um processo em um meio ambiente particular (descrito por temperatura; pressão; concentração, fórmula química; espécie nuclear; magnetização; etc.). Ou seja, para qualquer mudança nas condições físicas resultantes da dinâmica de alguns processos, as mudanças associadas, aos valores da “função estado”, podem ser unicamente medidas ou atribuídas (PATTERSON, 1996).

A Primeira Lei da Termodinâmica, também conhecida como Princípio de Conservação de Energia, pode ser descrita como “A soma da energia mecânica e da quantidade de calor (que é igual à energia total) de um sistema isolado é constante” (GOLDEMBERG, 1983). Nesse caso a energia total do sistema inicial é igual à energia do sistema final, qualquer que seja o caminho seguido pelo sistema para passar do estado inicial ao final. A energia total do sistema é função do estado deste e não do caminho pelo mesmo para chegar a esse estado.

O que está contido nesta definição é apenas o fato de que energia se conserva, mas não a melhor forma de se usá-la (GOLDEMBERG, 1983). A utilização desse lei não propicia uma ideia realista das melhorias que podem ser realizadas em um dado sistema. Tal eficiência também não leva em consideração a qualidade da energia nem na entrada ou na saída do sistema.

A Segunda Lei da Termodinâmica parte do princípio de que as diferentes formas de energia têm qualidades que lhes são características. Essas formas de energia não podem ser livremente convertidas. A energia flui sempre de uma maneira tal que a entropia do sistema aumente (GOLDEMBERG, 1983). Isso acontece, porque a conversão do estoque de energia interna da biosfera (recursos fósseis, físseis e “fundíveis”) passa necessariamente, pelo ciclo térmico irreversível e portanto acelera a entropização (exceção a esta regra é a célula de combustível)

Abreu (2003) diz que as fontes energéticas apresentam-se em diferentes formas na natureza, em distintos níveis de refinamento que vão da lenha à nuclear. Em uma avaliação global de um sistema energético é conveniente expressar todas as formas de energia de maneira unificada. Para definir o indicador de eficiência energética mais adequado a ser desenvolvido é importante caracterizar o tipo de energia utilizada para a avaliação do sistema.

Pode-se classificar as fontes energéticas em primárias e secundárias. Estas são produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta. Alguns exemplos são o petróleo, gás natural, carvão mineral e lenha. Outras formas de energia primária para produção de energia elétrica são: hidráulica, eólica, solar e nuclear.

Os produtos primários passam por um processo de transformação que os convertem em formas mais adequadas para os diferentes usos. O local onde se realiza este processo é denominado genericamente de centro de transformação. Neste centro são obtidos produtos de uso direto, como a gasolina, o óleo Diesel, o querosene, o gás liquefeito e outros classificados como energia secundária. Em alguns casos, uma fonte secundária, como o óleo combustível obtido do petróleo, passa por um outro centro de transformação onde é convertido em eletricidade (Ver Figura 2.1).

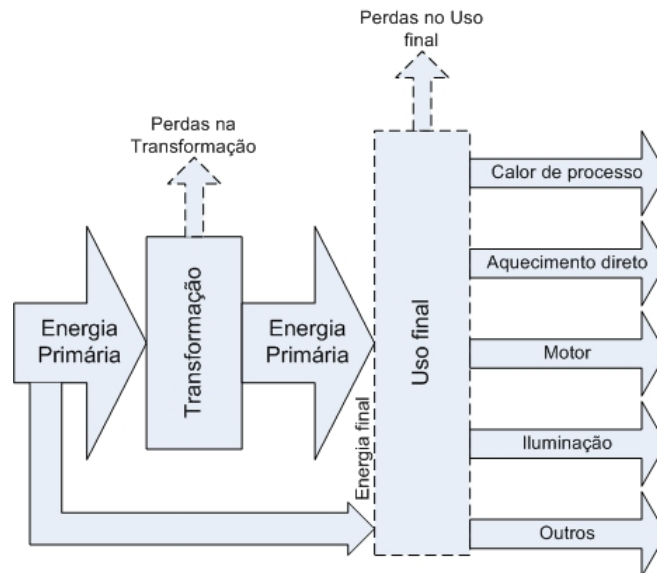


Figura 2.1: Representação esquemática dos fluxos de energia primária, secundária, final e útil com a indicação das perdas nos centros de transformação e no uso final (ALVIM et al., 2009)

Pode-se definir a energia final como aquela recebida pelo usuário nos diferentes setores, seja na forma primária, ou secundária. A energia final representa a forma em que a energia é comercializada.

Em cada unidade produtiva, industrial ou agrícola, ou em outro setor de consumo, como o residencial, comercial ou público, a energia pode ter diferentes usos como motriz, iluminação, aquecimento, etc.

Pode-se notar na Figura 2.1 que a energia final inclui a energia primária de uso direto. Em um esquema mais completo deve-se considerar ainda outros tipos de perdas, exportações e importações nas diversas etapas, bem como ajustes metodológicos ou de dados.

Em um balanço de energia útil os usos são agrupados em:

- Força Motriz;
- Calor de Processo;
- Aquecimento Direto;

- Iluminação;
- Eletroquímica;
- Outros.

Para elaborar um balanço de energia útil é necessário dispor, para cada atividade, da energia final utilizada por fonte energética. Para cada uma das fontes é necessária a distribuição pelos diferentes usos e rendimentos em cada um desses usos. A soma dos valores em energia útil tem a vantagem de levar em conta os diferentes rendimentos, para um mesmo uso dos diferentes tipos energéticos.

### **2.1.2 Indicadores físico-termodinâmicos**

Esses indicadores têm a vantagem de, usando medidas físicas e termodinâmicas, poderem mensurar objetivamente qual o consumo requerido pelo uso final. Por ter a possibilidade de contabilizar o produto final, em quantidades físicas, podem ser prontamente comparados e analisados em séries temporais.

Para medir a eficiência energética, o indicador físico-termodinâmico não é tão direto devido à chamada ligação produtiva. A dificuldade está na localização e análises das diferentes entradas e saída de energia na produção.

Esse indicador é restrito para medir a eficiência energética geral do processo. Sua base restringe comparar somente serviços que tem o mesmo uso final (PATTERSON, 1996).

### **2.1.3 Indicadores econômicos-termodinâmicos**

Esses indicadores são híbridos porque a energia que entra será mensurada em unidades termodinâmicas e na saída do sistema em valor monetário. Podem ser aplicados em diversos níveis de agregação das atividades econômicas: setorial, industrial ou a nível nacional.

O problema desse indicador, para comparação entre países, está na composição do Produto Interno Bruto (PIB) ou Produto Nacional Bruto (PNB), que são calculados segundo a metodologia da ONU. Tais indicadores são adaptados teoricamente à realidade de cada país.

### **2.1.4 Indicadores econômicos**

Esses indicadores têm como característica principal a mensuração da energia de entrada e saída em valor monetário. O maior problema desse indicador é a determinação do valor monetário da energia de entrada. O maior problema é criar um “preço ideal”, porém esse

valor se torna instável e precisa ser recalculado ao longo do tempo. Outra ideia seria a de construir uma medida para o “custo da energia conservada”. Essa medida teria a vantagem de informar o público, de quanto em valores monetários, com a implantação de medidas de eficiência energética.

Esse método de “preço ideal” não leva em consideração as variáveis exógenas que podem influenciar na eficiência energética, como políticas econômicas, sociais e energéticas de cada país, diferentes recursos naturais e diferenças climáticas. Os preços ideais provavelmente seriam determinados a partir dos parâmetros encontrados nos países desenvolvidos, onde as melhores tecnologias e informações estão disponíveis e acessíveis ao consumidor. Essa hipótese, porém não funciona nos países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos, porque estes não têm acesso às melhores tecnologias disponíveis ou estas não são adequadas à realidade social e econômica desses países.

## **2.2 O uso de óleos vegetais como combustíveis em motores diesel - aspectos técnicos**

Muitas publicações históricas demonstraram que óleos vegetais apresentam um comportamento satisfatório como combustível ou como fonte de combustíveis, apesar do seu custo elevado (KNOTHE et al., 2006).

O uso de óleos vegetais em motores de combustão interna por compressão têm sido um tema para vários pesquisadores a mais de vinte anos (como é visto nos trabalhos de Demirbas e Balat (2006), Agarwal (2007), Venanzi et al. (1984), Nwafor (2004) e Villar et al. (1984)). Uma das grandes vantagens de se usar os óleos vegetais é a propriedade de não conter enxofre, compostos aromáticos e metais na sua composição química. Utilizando os óleos vegetais como combustíveis gera uma redução na formação de chuva ácida por óxidos de enxofre. Outra vantagem é a ausência de corrosão nas partes internas do motor, devido a formação de ácidos oriundos dos óxidos de enxofre. Porém, constataram que ao usar óleos vegetais como combustível acarretaram em diminuição de potência, aumento do consumo específico e aumento nas emissões de monóxido de carbono (CO). Agarwal (2007) em seu estudo mostra outras vantagens e desvantagens do uso de óleo vegetal como combustível. As principais vantagens são:

- Os óleos vegetais são combustíveis líquidos produzidos a partir de fontes renováveis;
- Eles não sobrecarregam o ambiente sob o ponto de vista de emissões;
- Os óleos vegetais tem o potencial para uma produção a parte devido às suas propriedades de fixação de nitrogênio no solo;
- A produção de óleos vegetais requer menos energia de entrada na produção;

- Os óleos vegetais possuem maior energia contida do que outras fontes de energia como o álcool;
- Os preços dos óleos vegetais no mundo são competitivos com o óleo diesel extraído a partir do petróleo;
- A combustão do óleo vegetal tem emissões menores do que o óleo diesel;
- A produção do óleo vegetal é simples diante da extração do petróleo.

Já as principais desvantagens são:

- Em alguns países a sua produção em grandes escalas ainda não é possível;
- Se faz necessário um trabalho de pesquisa e desenvolvimento, a longo prazo, para áreas rurais sob o aspecto de processos tecnológicos.

Os óleos vegetais utilizados como combustíveis já foram sugeridos e testados como uma das alternativas de combustíveis para os motores diesel. Bhattacharyya e Reddy (1994) diz respeito a trabalhos na literatura onde o uso de óleos vegetais como combustíveis em motores por compressão estacionários. Vários óleos são descritos de maneira individual com um comparativo. Como um dos aspectos de comparação este trabalho coloca a viscosidade cinemática como uma propriedade física de escolha do melhor óleo para utilização como combustível. A viscosidade cinemática de óleo vegetais é cerca de uma ordem de grandeza superior à do óleo diesel. Isso causa problemas de atomização do combustível na câmara de combustão do motor, acarretando sérios problemas operacionais como a ocorrência de depósitos em suas partes internas. Indo um pouco mais além, Pugazahvadivu e Jeyachandran (2005) demonstrou o uso de óleos de frituras como combustível. No entanto, os resultados obtidos levaram a conclusão de que só é possível utilizá-los em breves tempos de operação.

Confirmando os estudos do colega anteriormente acima descritos, Ramadhas et al. (2004) expõe os problemas quanto ao uso de óleo vegetais como combustíveis. Neste estudo, o autor descreve os problemas encontrados em seus testes. Os problemas mais marcantes são:

- Qualidade da ignição;
- Baixa viscosidade dos óleo vegetais;
- Poder calorífico não muito alto;
- Baixa temperatura do combustível na linha de admissão do motor.

Além dos problemas de viscosidade dos estudiosos acima, Altin et al. (2001), Santos e Souza (1984), Soares et al. (2002), Almeida et al. (2002), Nwafor (2004), Harwood (1984), Ma

e Hanna (1999) comentam os diversos efeitos quanto ao uso a longo prazo de óleo vegetal como combustível. Esses problemas, seus efeitos e solução locais são caracterizados pela Tabela A.1. Afirmam que os efeitos da alta viscosidade do óleo vegetal reduzem a atomização e a névoa formada pelo bico injetor. Devido aos efeitos redutores de formação de névoa e atomização, a formação de depósitos de gomas e contaminação de óleo lubrificante são problemas encontrados em seus testes de bancada. Tendo em vista estes problemas, os autores sugerem os seguintes procedimentos para a minimização dos danos causados pelos óleos vegetais:

- Transformar o óleo vegetal em éster (biodiesel);
- Misturar o óleo vegetal com o óleo diesel em proporções em que o motor não sofra com os problemas apresentados acima;
- Aquecer o óleo vegetal, assim proporcionando uma diminuição na viscosidade cinemática do óleo vegetal. Com isso reduziria os problemas de atomização do combustível no motor.

Ao examinar sob o ponto de vista de exaustão dos gases a partir da combustão do óleo vegetal, Agarwal e Agarwal (2007) propõem a ideia de redução de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Seguindo os procedimentos para redução de danos ao motor causados pela combustão do óleo vegetal, o autor demonstra a redução de emissões de gases de efeito estufa. Na mesma linha de procedimentos de redução de danos causados pela combustão de óleo vegetal, Soares et al. (2002) realiza testes de longa duração em um motor diesel estacionário acoplado com um gerador (75 kVA) de energia elétrica. O total de horas de teste foi em torno de 400 horas. Tendo como objetivo do trabalho atender a pequenas comunidades na Região Norte do Brasil, o autor sugere após os seus estudos as seguintes recomendações:

- Aquecimento do óleo vegetal para a temperatura de 80°C;
- Início e parada de operação utilizando óleo diesel, para a minimização dos problemas de carbonização e de entupimento dos bicos injetores;
- Troca do óleo lubrificante a cada 100 horas de uso, devido à alta contaminação que o óleo vegetal proporciona.

Pimentel e Belchior (2009) em seus estudos realiza o seu experimento de forma semelhante ao seu colega logo acima mencionado, e obtêm os seguintes resultados:

- O aumento do débito de combustível e do avanço de injeção aumentou o desempenho do motor;
- Houve aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>, HC, CO e NO<sub>x</sub>;

Este conclui que algumas alterações de operação são necessárias para um desempenho similar quando se utiliza o óleo diesel como combustível.

## **2.3 Mistura de óleo diesel e etanol e Fumigamento: alternativas quanto ao uso de óleo vegetal como combustível**

Juntamente quanto ao uso de óleos vegetais como combustíveis, a prática do fumigamento (o uso de uma certa quantidade etanol ou metanol misturado no óleo diesel) tornou-se uma objeto de pesquisa nos anos de 1970. Mas a partir dos anos de 1980, os estudos dessa mistura foram mais amplamente pesquisados. Hansen et al. (2005) em seus estudos menciona que a mistura de óleo diesel e etanol é uma atrativa alternativa de combustível devido a um benefício ambiental que esta proporciona: a redução de emissões de particulados ou fuligem. Ao longo de seus estudos, o autor demonstra que a mistura ideal é torno de 10% em volume da mistura. Afirma o autor também que nas fases de operação utilizando essa mistura não houve considerável mudanças no desempenho do motor. Porém, os efeitos colaterais percebidos pelo autor foram:

- Alto consumo de etanol;
- Baixo ponto de ignição.

Nos estudos de He et al. (2003) complementando informações dos estudos acima, afirmam que ao adicionar etanol no óleo diesel e utilizando essa mistura na combustão de um motor diesel produz os seguintes efeitos:

- Redução do número de cetano;
- Redução na temperatura de queima em relação a somente o óleo diesel;
- Redução na viscosidade cinemática;
- Redução de emissões de compostos aromáticos.

O autor percebe também outros fatores, tais como:

- Em operações de plena carga, as misturas de óleo diesel e etanol produzem menores emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{NO}_x$ ;
- E pequenos aumentos nas emissões de CO, acetaldeídos e outras emissões de etanol não completamente queimado.

Outro estudo (CAN et al., 2004), afirma que a mistura de óleo diesel e etanol usada como combustível em um motor diesel com turbocompressor, proporciona reduções de CO, fuligem



e emissões de SO<sub>2</sub>. Em contra partida, as emissões de NO<sub>x</sub> houveram um acréscimo de aproximadamente 12,5% (para 10% de etanol na mistura) e 20% (para 15% de etanol na mistura). Este pesquisador também afirma que as misturas provocam uma redução de potência dos motores.

Abu-Qudais et al. (2000) demonstra que os efeitos da fumigação (que é uma adição de etanol diretamente na admissão do motor) são ótimas quanto é colocado em torno de 20% em volume. Demonstra também que o fumigamento é um método melhor a ser utilizado em relação as misturas. Com o fumigamento, o autor mostra que houve um acréscimo de 7,5% na eficiência térmica e 55% nas emissões de CO. Houve redução de 51% de emissões de partículas (fuligem).

## **2.4 Indicadores de avaliação ambiental**

Muitos indicadores têm sido formulados para qualificar e/ou quantificar a situação das mais diversas áreas de interesse humano, tais como na saúde (índice de natalidade, índice de mortalidade), educação (índice de repetência, índice de analfabetismo), economia (renda per capita), sociologia (índice de desenvolvimento humano) e no meio ambiente (qualidade do ar). Estes indicadores não exprimem de modo adequado a qualidade dos temas em sua totalidade, mas podem servir de referência para abordá-los e tratá-los em seus aspectos mais sensíveis (FIESP, 2009).

A avaliação ambiental também não pode ser quantificada de forma absoluta, tendo em vista a diversificada relação que existe entre a atividade industrial e o meio ambiente. O meio ambiente, simultaneamente, é fonte de matéria-prima, energia, água e outros insumos, depositário dos resíduos e efluentes que dela saem e onde ocorrem os impactos.

Assim, os indicadores de avaliação ambiental devem ser formulados considerando os diversos aspectos dessa relação de dependência e interferência. Na construção desses indicadores, pode-se ponderar variáveis com dados da própria dinâmica industrial, que dizem respeito à quantidade ou valor de sua produção, quantidade de mão-de-obra, valor agregado, entre outros. A análise dessas relações possibilita realizar avaliações não só de avaliação ambiental mas também de produtividade e competitividade.

### **2.4.1 A importância de indicadores de avaliação ambiental**

O setor produtivo, gradualmente, incorpora custos relacionados à questão ambiental, implicando necessidades de mudanças significativas nos padrões de produção, comercialização e consumo. Estas mudanças respondem a normas e dispositivos legais rígidos de controle (nacionais e internacionais), associados a um novo perfil de consumidor (FIESP, 2009).

Baseado nesta assertiva busca-se uma relação harmônica com o meio ambiente, mediante a

adoção de práticas de controle sobre:

1. Os processos produtivos;
2. O uso de recursos naturais renováveis e não renováveis;

## **2.4.2 Indicadores de avaliação ambiental - Normas ISO**

A integração dos princípios da sustentabilidade, por meio de procedimentos de conservação e controle, aos critérios de avaliação de uma organização produtiva, foi impulsionada a partir de meados da década de 1990, com a divulgação das primeiras normas da série ISO 14000.

Na norma NBR ISO 14031, descrevem-se tipos de indicadores ambientais a serem considerados (com os seus devidos aspectos):

- Indicador de avaliação operacional (IDO): Este indicador fornece informações relacionadas às operações dos processos produtivos com reflexos na sua avaliação ambiental, tais como o consumo de água, energia ou matéria-prima;
- Indicador de avaliação de gestão (IDG): Fornece informações relativas a esforços de gestão que influenciam positivamente na sua avaliação ambiental. Um exemplo seria a possível redução do consumo de materiais e/ou melhorias em questões administrativas de resíduos sólidos, mas sempre mantendo os mesmos valores de produção.

## **2.4.3 Seleção do indicador de avaliação ambiental**

A escolha do indicador ambiental adotado para o presente trabalho, fundamenta-se em alguns aspectos, tais como:

- Objetivos da avaliação;
- Abrangência de suas atividades, produtos e serviços;
- Condições ambientais locais e regionais;
- Aspectos ambientais significativos;
- Requisitos legais e outras demandas da sociedade;
- Capacidade de recursos financeiros, materiais, e humanos para o desenvolvimento das medições.

Em função destes aspectos, devem ser diagnosticados os elementos ambientais. São relacionados com atividades, produtos e serviços. Estes elementos são prioritários para iniciar um processo de avaliação. Esse espectro de indicadores de avaliação ambiental poderá ser ampliado, caso se julgue necessário considerar outras variáveis.

Portanto, o presente trabalho apresenta como indicador a avaliação de ciclo de vida. Serão abordados suas características, sua metodologia e suas fases para a realização de um estudo de avaliação de ciclo de vida (ACV), assim como as particularidades de sua aplicação na agricultura até o destino do produto final.

## **2.5 Procedimentos de avaliação ao longo do ciclo de vida**

A avaliação ambiental para sistemas energéticos tem repercussão mundial nos dias atuais. A sociedade tem necessitado um novo estabelecimento de parâmetros adequados para o processo dos sistemas energéticos. A inclusão de novos parâmetros para os sistemas energéticos em geral visa obter mecanismos adequados para maximizar o potencial positivo e minimizar o potencial negativo destes sistemas.

Tais sistemas se caracterizam por conter aspectos de ordem econômico-político-social. As demandas da sociedade com respeito à proteção do meio ambiente e as incertezas decorrentes de uma economia de mercado são exemplos de fatores que fazem a necessidade de novas técnicas de avaliação de sistemas energéticos.

Uma destas técnicas é a avaliação de ciclo de vida. Este mecanismo pode dar uma rápida avaliação dos padrões de consumo de energia, destacando o caráter insustentável e/ou desigual dos padrões atuais. Ainda mais, pode-se aplicar os conceitos de sustentabilidade à energia.

De forma geral, a Figura 2.2 caracteriza o ciclo de vida de um combustível fóssil qualquer. Toma como base o diagrama para escolha dos devidos indicadores energéticos e ambientais para o estudo em questão. Assim pode-se ter por comparação com as avaliações dos biocombustíveis mencionados no início do estudo.

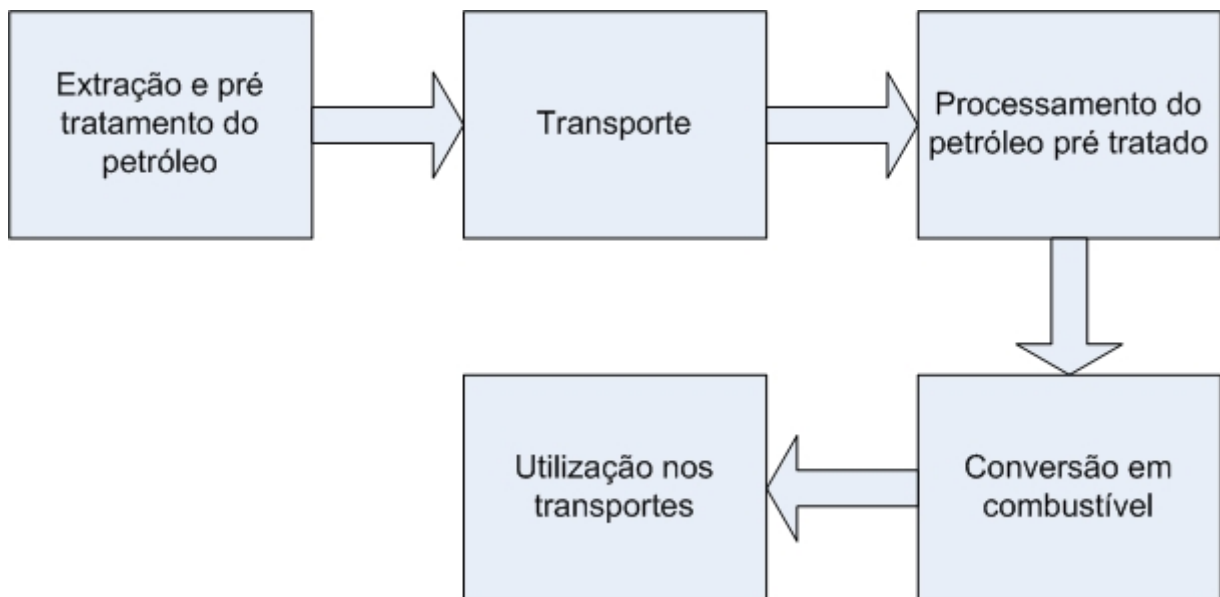


Figura 2.2: Fluxograma de um combustível fóssil qualquer

### 2.5.1 Características da avaliação de ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta utilizada para examinar minuciosamente as etapas de produção de produtos ou serviços. A partir dessa avaliação, permite-se o gerenciamento de recursos naturais envolvidos no processo de produção e identificação dos pontos críticos de um determinado processo.

O ciclo de vida de um produto é iniciado na extração dos recursos naturais para sua produção - o berço - e termina quando os materiais, resíduos retornam para a natureza - o túmulo - sendo, portanto, também conhecida como avaliação do “berço ao túmulo” (CALDEIRA-PIRES et al., 2006).

#### 2.5.1.1 Fases da avaliação de ciclo de vida – ACV:

O estudo de ACV é dividido em quatro fases (COLTRO et al., 2007), conforme apresentado na Figura 2.3.

- Primeira fase: definição do objetivo e escopo. São definidos o propósito do estudo e sua amplitude, envolvendo decisões importantes sobre as fronteiras e a unidade funcional.
- Fase de avaliação de Inventário: informações sobre o sistema de produto são levantadas e as entradas e as saídas consideradas relevantes para o sistema são quantificadas.
- Fase de avaliação de impacto: os dados e as informações gerados da avaliação de inventário são associados a impactos ambientais específicos, de modo que o significado destes

impactos potenciais possa ser avaliado.

- Fase de interpretação: os resultados obtidos nas fases de avaliação de inventário e de avaliação de impacto são combinados e interpretados de acordo com os objetivos definidos previamente no estudo.

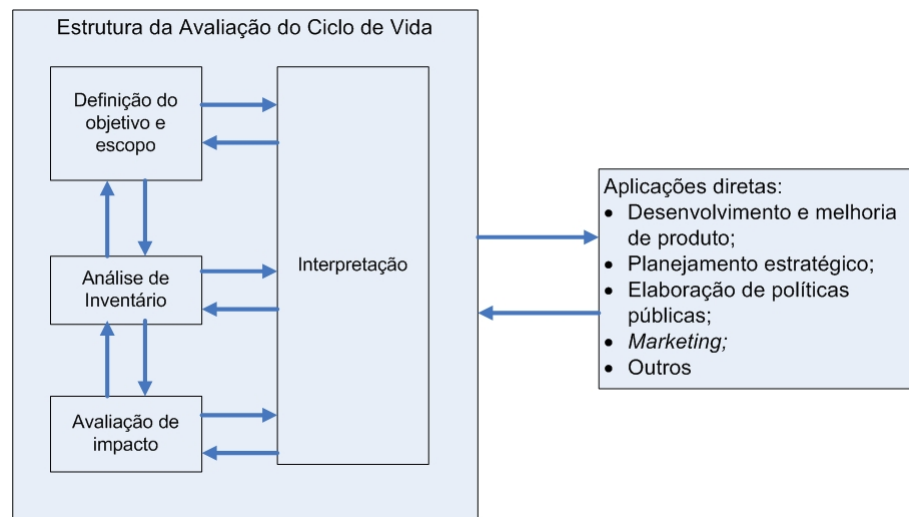


Figura 2.3: Fases de um estudo de ACV (COLTRO et al., 2007)

Para o início dos estudos de ACV, parte-se com a definição do objetivo e escopo do estudo. Também são determinados a unidade funcional, as fronteiras do sistema, as estimativas e limitações, os métodos de alocação e as categorias de impacto consideradas no estudo. O objetivo e escopo incluem a definição do contexto do estudo ao qual estão associados, a quem e como os resultados serão comunicados.

A ACV também serve de base para o gerenciamento do ciclo de vida. O conceito de gerenciamento do ciclo de vida considera o ciclo de vida do produto como um todo e otimiza a interação entre o projeto do produto, a produção e as atividades do ciclo de vida. Projetar os produtos levando em conta seu ciclo de vida é um dos desafios enfrentados atualmente. Assim, os esforços feitos para aumentar a eficiência dos processos ao longo do ciclo de vida não implicam somente em estender a responsabilidade entre as partes envolvidas.

Sendo assim, o objetivo do gerenciamento do ciclo de vida é proteger os recursos naturais e maximizar a eficiência por meio da ACV, do gerenciamento dos dados do produto, de suporte técnico e, inclusive, da avaliação de custo do ciclo de vida.

Logo, a ACV possibilita a visualização de todas as interfaces das diversas etapas do ciclo de vida com o meio ambiente.

## **2.5.2 Impactos ambientais da agroindústria**

Segundo a Resolução CONAMA n.º 1, de 17/02/1986, impacto ambiental é definido como “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia, resultantes das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: 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; a qualidade dos recursos ambientais”.

Segundo Figueiredo (2008) é necessário para a caracterização dos impactos ambientais ao agronegócio sob duas visões: a avaliação dos impactos ambientais e avaliação das questões ambientais relacionadas à agroindústria.

## **2.5.3 Avaliação de impactos ambientais**

O estudo de avaliação de impactos ambientais é aconselhável pela legislação brasileira para a avaliação de projetos de desenvolvimento em diversas áreas. A avaliação de impactos ambientais é uma importante ferramenta para a avaliação dos impactos inerentes às inovações tecnológicas, esta avaliação possibilita alterações nos processos tecnológicos de forma a torná-los mais eficientes na utilização dos recursos naturais mais apropriados às características sociais do ambiente onde a tecnologia será utilizada.

Na seção a seguir, caracterizada na Tabela 2.1, mostra os problemas ambientais que surgem nas diversas atividades agroindustriais. São estes problemas ambientais que geram os impactos ambientais mais comuns no mundo.

## 2.5.4 Questões ambientais relacionadas à agroindústria

Tabela 2.1: Questões ambientais relacionadas às atividades agroindustriais (FIGUEIREDO, 2008)

Parâmetro	Causas	Questões ambientais
Fauna e Flora	desmatamento uso intensivo de agrotóxicos  queimadas exploração de espécies sem manejo introdução de espécies transgênicas	perda da biodiversidade contaminação ambiental por agrotóxicos
Solo	mecanização agrícola exposição prolongada do solo às intempéries do clima uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes disposição inadequada de resíduos sólidos irrigação inadequada (água salobra e excesso de água)	compactação erosão contaminação do solo por resíduos sólidos contaminação ambiental por agrotóxicos acidificação, salinização e sodificação
Água	Consumo de água lançamento de efluentes  lançamento de resíduos sólidos em corpos d'água uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes	escassez hídrica poluição da água (nutrientes, metais, resíduos de agrotóxicos)
Ar	emissão de poluentes (CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> )	mudança climática
Uso de recursos naturais não renováveis	consumo de combustíveis fósseis e outras fontes excessivas de matéria e energia	depleção de fontes não renováveis de matéria e energia
Alimento	uso intensivo de agrotóxicos  uso de aditivos não nutricionais no processamento de produtos agroindustriais	contaminação ambiental por agrotóxicos contaminação direta de alimentos pelo uso de aditivos

Vários trabalhos foram desenvolvidos nos últimos anos sobre as questões ambientais associadas às atividades agroindustriais. Estas, por sua vez, são potenciais causadoras de danos

aos seres vivos, especialmente ao homem. As questões ambientais relacionadas às atividades agroindustriais algumas delas são de escala global. Outras estão ligadas a dinâmica global e outras estão ligadas a dinâmica ambiental regional.

### **2.5.5 Principais questões ambientais quanto a produção ao uso dos biocombustíveis**

As principais questões ambientais relacionadas quanto a produção e uso dos biocombustíveis são (FIGUEIREDO, 2008):

Sob o aspecto local:

1. **Perda da biodiversidade:** O principal fator de perda da biodiversidade mundial é o desmatamento de áreas florestadas. Acrescenta-se a esses fatores o uso indiscriminado de agrotóxicos e a erosão dos solos agrícolas, degenerando-os e contribuindo para a ocupação de novas áreas pelas atividades agropecuárias.
2. **Erosão:** A definição de erosão é o processo de deslocamento de partículas do solo pela ação da água ou do vento. A erosão causa a perda da camada fértil do solo, acarretando o assoreamento de corpos d'água. A principal causa da erosão é o desmatamento de áreas de vegetação nativa, expondo o solo às intempéries do clima.
3. **Compactação do solo:** A caracterização da compactação do solo é pela agregação das partículas do solo, com a redução do espaço por elas ocupado. Esta questão ambiental resulta na redução da infiltração de água, da penetração das raízes no solo, no aumento da susceptibilidade do solo à erosão. As principais causas da compactação do solo é devido a mecanização e as operações de preparo do solo agrícola.
4. **Salinização e Sodificação do solo:** A salinidade de solos deve-se ao acúmulo de sais solúveis ou sódio trocável no solo. Os sais frequentemente acumulados no solo são os cloretos e os sulfatos de sódio, cálcio e magnésio. Solos sódicos causam a dispersão da argila, dificultando a drenagem e formando uma camada impermeável. Esse processo está associado a fatores naturais de formação do solo e ao seu uso. Em regiões áridas e semi-áridas é comum a acumulação de sais no perfil do solo. A salinização é também associada à prática da agricultura irrigada com água de elevado teor de sais, em locais onde o lençol freático está próximo à superfície e com técnicas inadequadas.
5. **Contaminação ambiental por agrotóxicos:** Os agrotóxicos são substâncias sintéticas utilizadas na produção de alimentos, no campo e na agroindústria, com a finalidade de alterar a composição da flora e da fauna. Um exemplo é o uso de agrotóxicos para acabar como determinado tipo de praga que assola um tipo de lavoura. Estes preservam um



produto agropecuário da ação de seres vivos considerados nocivos. O uso de agrotóxicos acarreta a contaminação do solo, da água, do ar, dos alimentos e dos seres vivos.

6. **Contaminação ambiental por resíduos:** Podem ser sólidos e semi-sólidos. Estes resíduos, são resultantes de atividade industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. O destino incorreto de resíduos sólidos é uma fonte de contaminação do solo, proliferação de insetos e roedores, odores, poluição hídrica (quando os detritos são carregados pelo escoamento superficial ou lixiviados para as reservas subterrâneas) e atmosférica (a matéria orgânica em decomposição libera gases como o metano), acarretando sérios riscos à saúde humana e a outras espécies.
7. **Acidificação do solo:** A acidificação do solo consiste na remoção de cátions  $\text{Ca}^{2+}$  (cálcio),  $\text{Mg}^{2+}$  (magnésio),  $\text{K}^+$  (potássio) e  $\text{Na}^+$  (sódio) do complexo de troca catiônica (CTC) do solo, com a substituição por  $\text{Al}^{3+}$  (alumínio trocável) ou  $\text{H}^+$  (hidrogênio). Solos ácidos possuem baixa saturação por bases, ou seja, saturação menor que 50%. A acidez reduz a fertilidade do solo e torna-o mais susceptível a erosão. A remoção de cátions se dá principalmente pela lixiviação, embora também ocorram perdas devido à extração pelas plantas e erosão do solo. A adição de ácido ao solo se deve principalmente a dois fatores: fertilização de áreas agrícolas com amônia, que introduz íons hidrogênio quando da nitrificação do amônio, e chuva ácida, que acrescenta ao solo ácidos nítrico e sulfúrico.
8. **Desertificação:** Compreende-se por desertificação a degradação da terra nas regiões áridas e semi-áridas, oriundas de diversos fatores, podendo-se ressaltar as mudanças climáticas e as atividades humanas.
9. **Escassez hídrica:** A definição de escassez hídrica é a ocorrência de eventos sistemáticos de falta de água em uma região, mesmo para o abastecimento humano. As principais causas da escassez hídrica é devido a crescente demanda de água e o desperdício na sua distribuição e consumo. Um fator natural é o clima na ocorrência da escassez hídrica. A escassez hídrica será tanto maior em uma região de baixa precipitação quanto menor for a disponibilidade efetiva de água.
10. **Poluição das águas:** Este tipo de poluição é ocorrente pelo lançamento de efluentes de agroindústrias, ricos em matéria orgânica e nutrientes, e pelo transporte difuso de compostos orgânicos e inorgânicos das áreas agrícolas que utilizam agroquímicos, através de processos erosivos. Para um futuro estudo, a poluição térmica estará dentro deste aspecto ambiental.

Sob o aspecto global:

1. **Mudança Climática:** Define-se como mudança climática é a qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo, devida à variabilidade natural ou decorrente da atividade

humana. Essa mudança deve-se a variações na quantidade de gases de efeito estufa, alterando o equilíbrio energético do sistema climático. Os principais gases de efeito estufa, em ordem de importância, são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ). As atividades agroindustriais contribuem para a geração de gases de efeito estufa pelos seguintes processos: transformação de florestas em áreas agrícolas e de pastagem, reduzindo o carbono orgânico total armazenado; queima de combustíveis fósseis; disposição de resíduos orgânicos em lixões ou aterros; consumo de fertilizantes; criação de animais herbívoros (que pelo processo de fermentação entérica, liberam o gás metano); decomposição anaeróbica de resíduos de animais e cultivo de arroz com o método de inundação.

## **2.6 Estudos anteriores sobre a avaliação ambiental de biocombustíveis**

O desenvolvimento do agronegócio no Brasil acompanhou o crescimento da produção de grãos, iniciado em larga escala a partir de meados da década de 70. Antes, a economia agrícola do país era, predominantemente, por culturas de café e açúcar. Pouca importância se dava à utilização a imensa base territorial brasileira na produção de grãos. A produção de alimentos básicos era voltado para a subsistência, e aos poucos, os excedentes eram dirigidos ao mercado. Esses eram insuficientes para formar uma forte cadeia do agronegócio dentro dos moldes hoje dirigidos (COELHO, 2008).

Os estudos de ACV tiveram início na década de 60 com a crise do petróleo. Os primeiros estudos tinham por objetivo, calcular o consumo de energia e, por isso, eram conhecidos como “análise de energia”. Estes estudos envolviam a elaboração de um fluxograma de processo com balanço de massa e de energia.

O interesse por estudos de ACV enfraqueceu após a crise do petróleo. E ressurgiu na década de 80 em decorrência do crescente interesse pelo meio ambiente. A partir de 1990, os estudos de ACV se expandiram e foram impulsionados pelas normas ISO 14040 e consequente aumento do número de estudos (COLTRO et al., 2007).

Uma das características vantajosas da ACV quando se usa os óleos vegetais como combustíveis é o balanço energético positivo. O balanço energético consiste na energia consumida no processo de produção (incorporada aos materiais de consumo e equipamentos) e a energia consumida pelo combustível produzido.

Para Narayanaswamy et al. (2003), a ACV quantifica entradas como energia, água, nutrientes e insumos químicos e quantifica saídas como grãos, resíduos, óleo e fumaça. A partir desses

dados, o autor analisa o desempenho ambiental pelo uso de entradas e desprendimento de saídas. A contribuição relativa dos vários estágios da cadeia para a produção total proporciona quais devem ser as medidas a serem tomadas para um perfil ambiental desejado.

A avaliação de ciclo de vida apresenta muitos detalhes ambientais de uma típica cadeia produtiva de grãos. Mendonça (2007) fez uma análise detalhada, de entradas e saídas para cada estágio do ciclo de vida ajuda a identificar aspectos mensuráveis importantes do meio ambiente. Logo, para uma ACV de cultivo agrícola são considerações relevantes:

- o uso de energia fóssil, água e materiais tóxicos na produção;
- suprimento do grão ou semente envolvido.

A energia considerada será a soma total utilizada na produção, distribuição e transporte de todo montante consumido no processo. Pesticidas e herbicidas são uma categoria importante no ciclo. A energia elétrica utilizada também será fator de influência quando gerada para consumo de óleo ou gás, pois produz emissões e resíduos.

O desenvolvimento sustentável requer métodos e ferramentas para medir e comparar os impactos ambientais a partir de atividades humanas para a provisão de bens e serviços. Os impactos ambientais incluem aqueles a partir de emissões para o ambiente e através do consumo de recursos, assim como as outras intervenções humanas (como exemplo o uso do solo). Estas emissões e consumos contribuem para uma ampla magnitude de impactos, como por exemplo a mudança climática, eutrofização, acidificação e o estresse toxicológico na saúde humana e dos ecossistemas (REBITZER et al., 2004). Usuários e pesquisadores de muitos domínios de conhecimento vêm juntos que a análise de ciclo de vida é uma forma de calcular os indicadores de potenciais impactos ambientais mencionados. Estes impactos estão ligados de alguma forma aos produtos, sempre observando na identificação de oportunidades na prevenção de poluição e redução do consumo de recursos quando se considera todo o ciclo de vida do produto.

Os estudos de Wahlund et al. (2002) alertam quanto aos riscos de mudanças climáticas quanto ao uso de combustíveis fósseis. Recomenda-se a troca gradual de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis (biocombustíveis). Para tanto, eles investigam uma nova abordagem para melhorar o desempenho quanto ao uso de biomassa, baseado em usinas de cogeração. O sistema estudado é uma usina convencional baseada no uso de biomassa, com a integração de calor e potência. A energia total do sistema é analisada sob a perspectiva de redução de CO<sub>2</sub> e eficiência energética. Os resultados preliminares mostram que o sistema tem um grande potencial de redução de CO<sub>2</sub> e um aumento da eficiência energética. Além disso, os fatores não técnicos foram estudadas através de entrevistas, mostrando que o critério principal por trás do investimento é o potencial para a lucratividade.

Nos estudos de Kim e Dale (2005), a avaliação de ciclo de vida foi realizada na produção de grão de milho visando a produção de biocombustíveis. Assumiram também que a biomassa

dos grãos é utilizada para produzir biocombustíveis (etanol e biodiesel). A unidade funcional foi definida como 1 hectare de terra cultivável. A biomassa produtora para biocombustíveis é comparada ao desempenho ambiental nos diferentes tipos de monocultura. As funções externas são alocadas, introduzindo um produto alternativo das culturas. O consumo de energia não renovável, o impacto do efeito estufa, acidificação e eutrofização são considerados como impactos ambientais potenciais. Os benefícios observados da cultura de milho são:

1. Produção de nitrogênio a níveis baixos para cargas ambientais da terra,
2. Taxa de produção de etanol mais alta por unidade terra cultivável, e
3. Recuperação de energia por resíduos através da fermentação (ricos em lignina).

Quando a biomassa dos sistemas é utilizada para produção de etanol, observa-se os benefícios ambientais em termos de consumo de energia não renovável e o impacto do efeito estufa. Sendo assim a biomassa então utilizada para biocombustíveis economizaria energia de recursos não renováveis, reduzindo a emissão de gases de estufa.

Murphy e McCarthy (2005) investigam o uso de etanol derivados de dois tipos de biomassa: o tipo 1 - originários de resíduos e sobras -, e o tipo 2 - da energia obtida da lavoura. A tecnologia envolvida para a produção de etanol a partir da energia produzida da lavoura é consolidada; a mesma coisa não se pode dizer para a geração de etanol a partir dos resíduos. Muitas propostas são discutidas para a produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica, mas estas não estão ainda para uma escala industrial. A produção de etanol é analisada de duas formas: etanol a partir de beterraba, e etanol a partir de sobras de papel. Concluiu-se que o etanol produzido a partir de beterraba foi o que obteve o pior resultado no quesito econômico. Isto se deve porque o único detalhe foi ter que comprar a beterraba enquanto as sobras de papel é uma matéria-prima abundante em qualquer grande cidade. As economias não se aplicam somente neste aspecto: grandes usinas produzem etanol a preços mais baratos.

Subramanian et al. (2005) tratam sobre a política e planejamento sobre questões para utilização de etanol e biodiesel em motores diesel. Analisa-se benefícios ambientais, a auto-suficiência de energia e o impulsionamento da economia rural. O foco principal deste artigo está no transporte e no refino, na disponibilidade de terra para produção de biodiesel e nas fontes potenciais para biodiesel e etanol. Para a disponibilidade de etanol são feitas estimativas para seu consumo (como combustível de transporte e medidas medicinais) necessárias para aumentar a disponibilidade de etanol no seu país para um futuro próximo.

No trabalho de Mattson et al. (2000), o método de análise de ciclo de vida é selecionado para observar três tipos de culturas para a produção de óleos vegetais: Óleo de canola (oriunda da Suécia), óleo de soja (oriunda do Brasil) e o óleo de palma (oriunda da Malásia). Os resultados a partir desse estudo levam a crer que os indicadores de erosão do solo, matéria orgânica do

solo, estrutura do solo, pH do solo, quantidade de potássio e fósforo no solo, e o impacto da biodiversidade são boas opções de escolha como indicadores ambientais. Estes indicadores podem mostrar uma boa impressão quanto a fertilidade do solo e biodiversidade. No entanto, observar apenas estes indicadores resulta em uma mistura de informações que dificultam a uma explicação clara dos fenômenos ambientais envolvidos. A análise das lavouras usando essa metodologia incluem não somente descrições quantitativas, mas também uma descrição qualitativa.

## 3 Metodologia

A metodologia deste trabalho possui uma particularidade: consiste na inovação quanto aos procedimentos dos estudos de motores a diesel levando em consideração as origens e os processos de obtenção dos biocombustíveis analisados. Dessa forma os parâmetros termodinâmicos já utilizados em estudos experimentais anteriores - como pressão, temperatura - seriam complementados com parâmetros ambientais, analisando toda uma gama de integrantes industriais, transportadores e transformadores de energia.

Dentro dessa particularidade, observa-se as origens e os processos de obtenção dos biocombustíveis analisados. Nesta situação se fez necessária o uso de estudos anteriores de avaliação do ciclo de vida dos biocombustíveis, onde procura-se observar o termo “eficiência ambiental” com a maior atenção.

Logo, a metodologia deste estudo anuncia a integração das informações obtidas através das avaliações energéticas (pelo uso de conceitos termodinâmicos) e avaliações ambientais (pela avaliação do ciclo de vida dos biocombustíveis em questão). Também anuncia-se aqui os combustíveis utilizados para o estudo: diesel (como parâmetro de comparação), óleo de soja (em seu estado puro) e a mistura de óleo de soja e etanol por meio do fumigamento (como caráter inovador).

### 3.1 Descrição da parte energética do estudo

Em primeiro lugar, um estudo da norma NBR ISO 3046/1 (1995) quanto a testes de motores diesel se fez necessária. A obtenção de parâmetros secundários como potência e consumo específico se encontra nesta norma.

Logo após, realiza-se toda a caracterização do aparato experimental, descrevendo os componentes utilizados para a obtenção dos dados.

Finalizando a parte energética do estudo, demonstra-se toda a parte de caracterização de cálculo de potência do motor, consumo específico e emissões de CO e NO<sub>x</sub>.

### 3.1.1 Condição-padrão de referência segundo a norma NBR ISO 3046/1 (1995)

Com a finalidade de obter a potência e o consumo de combustível dos motores, devem ser utilizadas as seguintes condições-padrões de referência:

- pressão barométrica local ( $p_r$ ): 100 kPa;
- temperatura do ar ( $T_r$ ): 298 K (25 °C);
- umidade relativa ( $\phi_r$ ): 30%;
- temperatura do fluido de arrefecimento do ar de alimentação ( $T_{cr}$ ): 298 K (25 °C)

### 3.1.2 Ajuste de potência efetiva líquida para as condições ambientes

Para que o motor seja operado sob as condições diferentes das condições-padrão de referência dadas na seção 3.1.1, a potência efetiva líquida de saída e o consumo de combustível devem ser ajustados a partir das condições-padrão de referência pelas seguintes fórmulas:

$$P_x = \alpha P_r \quad (3.1)$$

$$b_x = \beta b_r \quad (3.2)$$

$$\alpha = K - 0,7(1 - K) \left( \frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (3.3)$$

$$K = \left( \frac{p_x + a\phi_x p_{sx}}{p_r + a\phi_r p_{sr}} \right)^m \left( \frac{T_r}{T_x} \right)^n \left( \frac{T_{cr}}{T_{cx}} \right)^q \quad (3.4)$$

Nas equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4:

- $P_r$ : potência efetiva sob as condições-padrão de referência;
- $P_x$ : potência efetiva sob as condições consideradas;
- $p_r$ : pressão barométrica total padrão de referência;
- $b_r$ : consumo de combustível sob as condições-padrão de referência;
- $b_x$ : consumo de combustível sob as condições consideradas;

- $\eta_m$ : rendimento mecânico;
- $p_{sr}$ : pressão de saturação do vapor sob as condições-padrão de referência;
- $p_{sx}$ : pressão de saturação do vapor sob as condições consideradas;
- $\phi_r$ : umidade relativa padrão de referência;
- $\phi_x$ : umidade relativa da condição considerada;
- $T_r$ : temperatura absoluta do ar padrão de referência;
- $T_{cx}$ : temperatura absoluta do ar considerada.

Já os valores  $\eta_m$ ,  $a$ ,  $m$ ,  $n$  e  $q$  escolhidos foram:

- $\eta_m = 0,80$ : por ausência estabelecida pelo fabricante;
- $a = 0$ : o ajuste de potência independe da umidade;
- $m = 1$ ,  $n = 0,75$  e  $q = 0$ : obtidos da Tabela 1 da norma NBR ISO 3046/1 (condição do motor considerado: não turboalimentado e potência limitada por excesso de ar)

### 3.1.3 Caracterização dos instrumentos utilizados

Todo o aparato experimental foi montado segundo a Figura 3.1 com o objetivo de se ter uma edição confiável nos ensaios realizados.

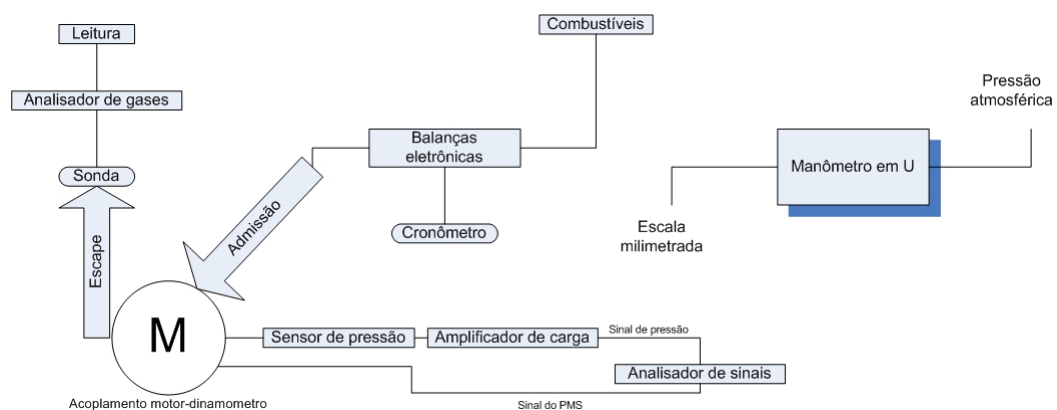


Figura 3.1: Esquema da bancada de ensaios e instrumentação associada

Nesta etapa do projeto preparou-se a bancada de ensaios e realizaram-se os testes para a caracterização do motor e os testes utilizando como combustíveis o óleo de soja e a mistura de óleo de soja e etanol. Na mistura de óleo de soja e etanol houve o uso de duas balanças eletrônicas (ambas iguais), onde em cada balança mediu-se o consumo de óleo de soja e na outra balança o consumo de etanol



### 3.1.3.1 Motor Diesel utilizado

O motor utilizado nos testes utilizando os combustíveis foi do tipo diesel, da marca Yanmar modelo BT33. As características deste motor se encontram na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados principais do motor diesel Yanmar BT33

Potência DIN A (cv)	23,6 (1800 RPM) 30,0 (2600 RPM)
número de cilindros	3
Diâmetro do Pistão	90 mm
Curso do Pistão	90 mm
Cilindrada	1717 cc
Taxa de compressão	17,3:1
Rotação nominal do motor (RPM)	1800/2600
Capacidade do tanque de combustível	25 L
Capacidade do óleo lubrificante-motor	9 L
Filtro de ar	seco
Capacidade de água de refrigeração - motor+radiador	8,2 L
Espaço nocivo	0,98-1,18 mm
pressão do bico injetor	$210 \pm 10 \frac{kg}{cm^2}$
tempo de injeção (a PMS)	$26 \pm 1$ graus (F.I.C)
pressão do óleo lubrificante	$2,5-3,5 \frac{kg}{cm^2}$
Dimensão (Comprimento $\times$ Largura $\times$ Altura)	1045 $\times$ 694 $\times$ 964

### 3.1.3.2 Bancada dinamométrica

A bancada dinamométrica é composta de um dinamômetro hidráulico SCHENK, modelo D210-1e (210 kW), 600 N.m, 10000 RPM. Junto com essa bancada existe toda uma instrumentação para o monitoramento das condições de funcionamento do motor. Essa instrumentação é composta dos seguintes elementos:

- Duas balanças de precisão de 0,01 g para a medição de perda mássica de combustível;
- Indicador de carga em KP;
- Indicadores de temperatura: termopares indicam a temperatura dos gases de exaustão;
- Manômetro em “U”: determinação da pressão atmosférica do ambiente;
- Balança: indicação do torque disponível no eixo cardã;

### 3.1.3.3 Sistema de aquisição de dados

Para o monitoramento das condições de operação do motor, foi medida a pressão dinâmica no interior do cilindro e o ponto morto superior.

A pressão no interior do cilindro foi adquirida através de um sensor piezelétrico 6001 da Kistler, instalado no cabeçote do motor. Para amplificar os sinais provenientes do sensor utilizou-se o amplificador de carga Kistler tipo 5011.

O ponto morto superior é obtido por um sensor ótico instalado no eixo do dinamômetro. Este dispositivo consiste em um emissor e um receptor ótico instalados em um disco perfurado preso ao eixo. O furo feito no disco representa o ponto morto superior.

A aquisição e o tratamento dos sinais foram realizados pelo analisador de sinais HP 35665A. Este aparato tem dois canais que permitem as aquisições dos sinais do sensor piezelétrico e do sensor ótico simultaneamente. O armazenamento dos sinais foi adquirido através de uma unidade leitora e gravadora de disquetes de 3,5 polegadas.

Os equipamentos utilizados na captura de sinais possui a seguinte descrição:

- Analisador dinâmico de sinais:
  - Hewlett Packard Modelo 35665A;
  - Dois canais, trabalhando na faixa de 102.4 *kHz* com um canal;
  - Resolução de 100, 200, 400 e 800 linhas;
  - $\pm 2,92\%$  de precisão da amplitude ou 0,025% da escala total;
  - Faixa de sensibilidade vertical de 31,7 *Vpk* a 3,99 *mVpk*;
  - Faixa de base de tempo de 1 *ns/div* a 5 *s/div*;
  - uso de trigger para controlar a aquisição;
- Amplificador de sinal:
  - Kistler Instruments AG;
  - Tipo: 5007;
- Sensor de pressão:
  - Kistler Instruments AG;
  - Modelo: 6001;
  - Faixa de operação: 0-250 *bar*;
  - Temperatura de operação: -196 °C a 350 °C;
  - Incerteza: 0,4%.

### 3.1.3.4 Sistema de avaliação de gases

Para a medição dos gases de exaustão foi utilizado um sistema portátil avaliação de gases. O modelo é do tipo *GreenLine 8000* adquirido da *EUROTRON instruments apud* (DANESI; JUNIOR, 2005). O sistema é formado por uma caixa com todos os equipamentos de controle, visor, impressora e um controle remoto.

O analisador está preparado para a medição de CO, CO<sub>2</sub> e HC pelo método infravermelho e O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> pelo método eletroquímico. As resoluções e as faixas de operação são indicadas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Tabela com as características do analisador de gases utilizado.

Parâmetro	Faixa de operação	Resolução
O <sub>2</sub>	0-25%	0,10%
CO	0-20000ppm	1ppm
NO	0-4000ppm	1ppm
NO <sub>2</sub>	0-1000ppm	1ppm
SO <sub>2</sub>	0-4000ppm	1ppm
CO	0-15,00%	0,01%
CO <sub>2</sub>	0-20,00% ppm	0,01%
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	0-5,00%	0,01%
Temp. ar		0,1°C

### 3.1.3.5 Instrumentação para a injeção de etanol

Para a bateria de testes onde se injetava etanol no coletor de admissão, a pressurização ocorre como é mostrado na Figura 3.2 (DANESI; JUNIOR, 2005). O valor de pressão vai até 3 bar. Por um controlador de frequência e amplitude de pulsação do bico injetor instalado no coletor de admissão, aumenta-se a quantidade de etanol injetada no coletor até se atingir o limite máximo, ou seja, ocorrência de detonação.

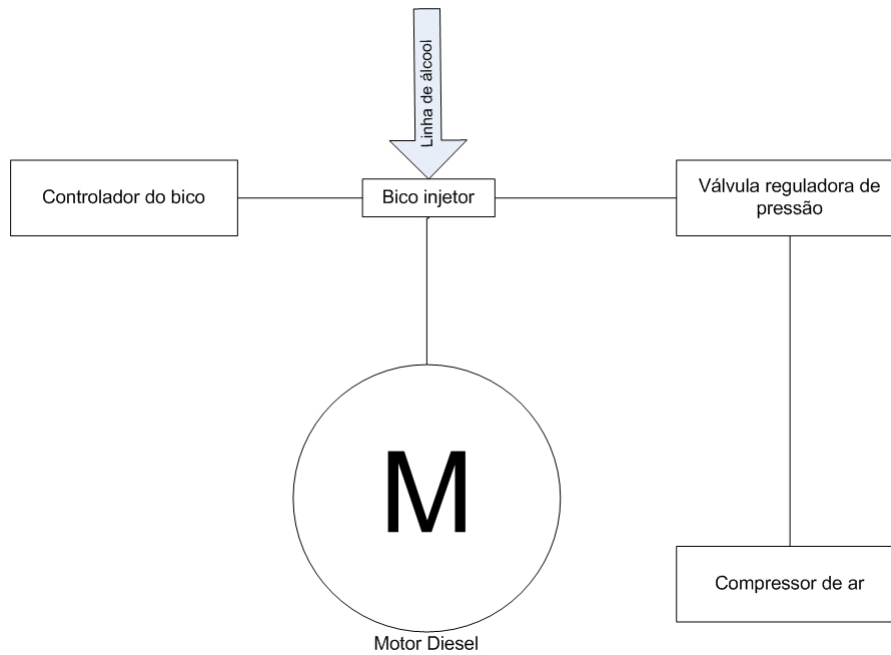


Figura 3.2: Instrumentação para a injeção de etanol

### 3.1.3.6 Cálculo da potência do motor

A determinação da potência do motor procedeu da seguinte maneira:

1. Coleta dos dados iniciais do dinamômetro: comprimento do braço (R [m]) do dinamômetro - 0,72 m;
2. Leitura da balança do dinamômetro (F [N]) e rotação do motor (n [Hz]).

A partir das informações acima, calcula-se a potência do motor pelo fórmula:

$$P \text{ [kW]} = \frac{FRn}{9550} \quad (3.5)$$

A potência medida (resultante da Equação 3.5) é consequência da expansão dos gases de combustão no interior dos cilindros do motor, que impulsiona o pistão fazendo girar a árvore de manivelas contra a resistência oposta pelo freio.

### 3.1.3.7 Cálculo do Consumo Específico(SFC)

No estudo em questão foi realizado a coleta de diversos dados de carga e rotação. Com os dados em mãos foi possível gerar um gráfico de consumo específico do motor estudado.

Para o cálculo do consumo específico, foram utilizadas as equações 3.6 e 3.7.

$$b = \frac{\text{Massa consumida de combustível}}{\text{Tempo de consumo de combustível}} \left[ \frac{kg}{h} \right] \quad (3.6)$$

Onde  $b$  é o consumo horário. Medindo-se o consumo horário sob regime conhecido de carga, pode-se determinar o consumo específico, através da equação abaixo:

$$SFC = \frac{b}{P} \left[ \frac{kg}{kWh} \right] \quad (3.7)$$

O consumo específico de combustível é um parâmetro de comparação muito usado para mostrar quão eficientemente um motor está transformando combustível em trabalho. O emprego deste parâmetro tem maior aceitação que o rendimento térmico porque todas as variáveis envolvidas são medidas em unidades padrão: tempo, potência e peso.

### 3.1.3.8 Cálculo das emissões de CO e NO<sub>x</sub>

No estudo presente, a coleta de emissões de CO e NO<sub>x</sub> foi em [ppm]. Portanto, é possível ser expressa da seguinte forma:

$$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ mg de poluente}}{1 \text{ g de ar emitido}}$$

Calculam-se emissões específicas  $\left[ \frac{g}{kWh} \right]$  (para cada grama de ar) para todos os componentes individuais do seguinte modo:

$$\overline{NO_x} = \frac{10^{-3} \cdot NO_x}{W_{\text{ciclo}}} \left[ \frac{g}{kWh} \right] \quad (3.8)$$

$$\overline{CO} = \frac{10^{-3} \cdot CO}{W_{\text{ciclo}}} \left[ \frac{g}{kWh} \right] \quad (3.9)$$

Onde o trabalho do ciclo dos respectivos combustíveis,  $W_{\text{ciclo}}$ , é expresso em [kWh].

Os cálculos de emissões de poluentes na atmosfera são uma adaptação do texto existente no jornal oficial da União Europeia do dia 28 de abril de 2004, anexo III, localizado na página C102 E/329

### 3.1.4 Resolução do CONAMA quanto a emissão de gases por motores de compressão

Essa resolução foi o parâmetro de limites de emissões de gases poluentes para este estudo. É a partir dela que se pode fazer um comparativo sobre as vantagens da utilização de óleo vegetais e etanol como combustíveis em motores diesel.

Quanto as questões de emissão de gases em território brasileiro, segue logo uma parte de especificações para motores a diesel de acordo com a resolução do CONAMA (BRASIL, 1989).

RESOLUÇÃO/CONAMA/N.º 010 de 14 de setembro de 1989

Publicado no D.O.U, de 18/12/89, Seção I, Pág. 23.404

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, no uso das atribuições que lhe confere o inciso VI, do Art. 8º, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 e Art. 48, do Decreto nº 88.351, de 01 de junho de 1983, e

Art 1º - A partir de 01 de janeiro de 1993, a emissão de gases de escapamento por veículos automotores com motor do ciclo Diesel não deverá exceder os seguintes valores:

monóxido de carbono: 11,20 grama por quilowatt-hora;

hidrocarbonetos: 2,80 grama por quilowatt-hora;

óxidos de nitrogênio: 18,00 grama por quilowatt-hora;

Art 2º - A partir de 01 de janeiro de 1995, a emissão de gases de escapamento por veículos automotores com motor do ciclo Diesel não deverá exceder os seguintes valores:

monóxido de carbono: 11,20 grama por quilowatt-hora;

hidrocarbonetos: 2,80 grama por quilowatt-hora;

óxidos de nitrogênio: 14,40 grama por quilowatt-hora;

## **3.2 Descrição da parte ambiental do estudo**

Em complementação dos dados da parte energética do estudo, a parte ambiental se apresenta demonstrando o que ocorre antes e depois quando o combustível é queimado.

Conceitos de relacionados a avaliação de ciclo de vida (ACV) como unidade funcional, fronteiras do sistema, descrição do *software* utilizado e a metodologia utilizada por este são apresentados a seguir.

### **3.2.1 Unidade funcional**

Durante a definição do escopo do estudo de ACV, são especificadas claramente as diversas funções do sistema estudado. Logo após, é selecionada uma função e estabelece como a unidade funcional do sistema (NBR ISO 14040, 1997).

A unidade funcional estabelecida para este estudo foi a quantidade produzida e consumida de 2592,2 kg de biocombustível com as seguintes condições:

- um caminhão com capacidade de carga de 7500 kg, com uma distância percorrida de

10000 km transitando em uma estrada de trânsito pequeno - equivalente ao funcionamento do motor Yanmar modelo BTD33 à plena carga ;

- Inventários oriundos do *GaBi 4* (Diesel) e de Mendonça (2007) (óleo de soja e etanol);
- Para a produção da mistura de óleo de soja e etanol, a quantidade de óleo de soja foi de 60% e de etanol foi de 40%.

### **3.2.2 Fronteiras do sistema**

A fronteira do sistema determina limites para o estudo, definindo todos os processos elementares durante o estudo (COLTRO et al., 2007).

As fronteiras do estudo em questão engloba todo o processo produtivo dos biocombustíveis incluindo a utilização. Ou seja, tem início desde a fase de plantio da cultura, passando pela produção do biocombustível a partir da cultura utilizada no plantio e terminando com a queima desse.

### **3.2.3 Alocação**

Situações que requerem critérios de alocação ocorrem em estudos de ACV quando o ciclo de vida de produtos diferentes são interligados. Quando estes cenários ocorrem, a norma NBR ISO 14040 (1997) propõe que a fronteira do sistema seja expandida de modo que os co-produtos sejam incluídos no estudo ou o nível de detalhes do ciclo de vida seja ampliado, ajudando na identificação de dados relevantes que são específicos do produto (COLTRO et al., 2007).

Para a produção de óleo de soja não foi necessária alocação.

Porém para a produção da mistura óleo de soja e etanol se fez a necessária alocação, onde a produção de etanol foi alocada no sistema de produção de óleo de soja.

Portanto, todas as alterações quantitativas da produção de etanol foram correlacionadas no sistema de produção da mistura de óleo de soja e etanol.

### **3.2.4 Descrição do software *GaBi 4***

O software *GaBi 4* (<http://www.gabi-software.com/>) é utilizado para modelagem de produtos e sistemas a partir de qualquer ciclo de vida. Sua *interface* permite que os seus usuários possam criar modelos para todos os produtos, visualizar balanços de emissões, consumo de materiais e energia e gerar gráficos a partir dos resultados obtidos.

Este *software* inclui por volta de mil processos, predominantemente onde iniciam do “berço ao túmulo”. Além disso, o *software* pode realizar unidades de parametrização de processos dando apoio ao modelo desenvolvido.

O *software* possui um vasto banco de dados, no qual o CML 2001 foi utilizado como categoria para impactos ambientais na obtenção dos resultados deste estudo.

### 3.2.4.1 Descrição da Metodologia CML

O CML, ou “Manual Holandês de ACV” (TAKEDA, 2008), é um exemplo de utilização da abordagem de ponto médio em uma cadeia de impactos - “*midpoint*”.

A cadeia de impactos descreve o mecanismo ambiental das trocas (entre o sistema e o meio) até os danos em itens de valor como árvores, plantações, rios, e saúde humana, conforme o exemplo da Figura 3.3.

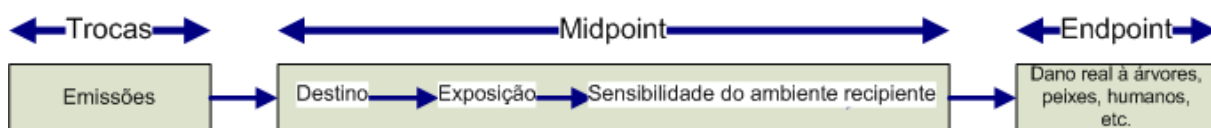


Figura 3.3: Cadeia de impactos causada pela emissão de uma certa substância

Conforme observado na Figura 3.3, a cadeia de impacto conecta uma troca ambiental (emissões) com um *endpoint*, algo que se destina a proteger. Para o estudo em questão, a emissão de gases de efeito estufa que causam o aquecimento global (*midpoint*) e relacionando também na sua causa as mudanças climáticas (*endpoint*). *Midpoint* refere-se a todos os elementos no mecanismo ambiental de uma categoria de impacto que estão entre as trocas ambientais e os *endpoints*.

O CML fornece uma lista de categorias de avaliação de impacto, agrupadas em:

1. Categorias obrigatórias de impacto (indicadores de categoria usado na maioria das ACV's);
2. Categorias de impactos adicionais (indicadores operacionais existem, mas não são comumente inclusos em estudos de ACV);
3. Outras categorias de impacto (não há indicadores operacionais disponíveis, tornando impossível incluir quantitativamente na ACV).

No caso de diversos métodos estarem disponíveis para categorias de impacto obrigatórias, um indicador de linha-base (*baseline*) é selecionado, baseado no princípio da melhor prática disponível. Estes indicadores de categorias em “nível *midpoint*” são de abordagem orientada a problemas. Indicadores de linha-base são recomendados para estudos simplificados.



Para o estudo em questão foram selecionadas as seguintes categorias para o estudo :

1. *Mudança Climática*: Esta categoria de impacto ambiental pode resultar em efeitos adversos na saúde do ecossistema, saúde humana e bem-estar material. A mudança climática se relaciona à emissões de gases estufa na atmosfera. O modelo de caracterização, assim como desenvolvido pelo *International Panel on Climate Change* (IPCC) é escolhido para o desenvolvimento dos fatores de caracterização. Fatores são expressos como Potencial Aquecimento Global para o horizonte de tempo de 100 anos (GWP100), em  $\frac{\text{kg de CO}_2 \text{ eq.}}{\text{kg de emissão}}$ . Portanto a abrangência geográfica desde indicador está em escala global.
2. *Toxicidade Humana*: Esta categoria se relaciona aos efeitos de substâncias tóxicas no ambiente humano. Riscos de saúde por exposição no ambiente de trabalho não são inclusos. Fatores de caracterização, Toxicidade Humana Potencial (HTP, em inglês), são calculados descrevendo destino, exposição e efeitos de substâncias tóxicas para um horizonte de tempo infinito. O escopo geográfico pode variar entre escala local ou global. O potencial é expresso em DCB eq., ou seja, em quantidades de Diclorobenzeno equivalente.
3. *Toxicidade Terrestre*: Esta categoria diz respeito a impactos de substâncias tóxicas em ecossistemas terrestres. Da mesma forma que a toxicidade humana, o potencial de toxicidade terrestre é expresso em DCB eq.
4. *Acidificação*: Substâncias acidificantes causam uma série de impactos ao solo, águas subterrâneas, águas superficiais, organismos, ecossistemas e materiais (construções). O potencial de acidificação é expresso como  $\frac{\text{kg de SO}_2 \text{ eq.}}{\text{kg de emissão}}$ . O horizonte de tempo é infinito e a escala geográfica varia entre escalas global e continental. Os fatores de caracterização são estendidos para o ácido nítrico, ácido sulfúrico, sulfeto de hidrogênio e o óxido nítrico.
5. *Eutrofização*: A eutrofização inclui todos impactos devidos à excessivos níveis de macronutrientes no meio ambiente, causados por diversas emissões de substâncias no ar, água e solo. Esta é expressa como  $\frac{\text{kg de PO}_4 \text{ eq.}}{\text{kg de emissão}}$ . O destino e a exposição não estão inclusas, o horizonte de tempo é infinito, e a escala geográfica varia entre o local e continental.

Para o estudo presente, a normalização é colocada como opcional para a ACV simplificada. Porém na ACV detalhada a normalização é obrigatória.

O fator de normalização para uma dada categoria de impacto e região é obtido multiplicando os fatores de caracterização por suas respectivas emissões. A soma desses produtos de todas as categorias de impactos dão o fator de normalização.

### **3.2.4.2 Descrição dos cenários gerados pelo *GaBi 4***

A descrição dos cenários gerados no *GaBi 4* inclui o estudo de impactos de diferentes condições de fronteiras, isso em termos de resultados de balanços. Primeiramente, aloca-se os valores iniciais para o cálculo. A partir desses valores, forma-se o cenário 1.

Em seguida, define-se os parâmetros para a formação dos cenários, que para o caso deste estudo o parâmetro selecionado é as diversas porcentagens de óleo de soja na mistura de óleo de soja e etanol. Isso tudo é realizado já com a base de dados pré determinada - base de dados oriundas de Mendonça (2007).

Assim é possível analisar as mudanças do potencial de aquecimento global (GWP) por meio das emissões de CO<sub>2</sub> eq. Através do mesmo método descrito acima para geração dos cenários é possível incorporar normalizações.

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo é apresentado os resultados de consumo específico e emissões de gases - CO, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> - resultando os estudos energéticos experimentais. As análises de emissões de gases teve como referência a resolução do CONAMA, descrita no capítulo 3, seção 3.1, subseção 3.1.4. A condição de coleta de dados dos combustíveis analisados foi a plena carga, onde foi possível determinar os dados de potência útil (corrigida de acordo com a norma NBR ISO 3046/1 (1995)) e o trabalho de ciclo de cada combustível. Como mencionado no capítulo 3, após toda a coleta de dados houve o tratamento dos dados coletados para quantificação do consumo específico e emissões gasosas de monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

Em concorrência, houve o estudo ambiental dos combustíveis utilizados na bancada de testes. Relembrando o capítulo 3, seguiu-se a coleta e organização de dados da parte ambiental.

Definida a unidade funcional, as fronteiras dos sistemas, alocação, pôde dar início ao tratamento dos dados gerados para a quantificação dos impactos ambientais definidos pela metodologia CML.

Com os resultados da parte energética (experimental) e da parte ambiental, criou-se um vínculo (exposto no capítulo 3 na seção 3.2, subseção 3.2.1). A partir desse vínculo é possível fazer estudos onde associação de dados experimentais e dados gerados por computador são utilizados conjuntamente, gerando novos resultados.

Com os resultados obtidos dessa integração, é realizada a análise destes para observar as possíveis modificações para uma possível minimização de danos ambientais.

### 4.1 Resultados do desempenho energético

#### 4.1.1 Consumo Específico - SFC

Este parâmetro mede a razão entre o consumo horário de combustível e a potência. Logo tem-se um consumo por unidade de potência, que expressará a variação do consumo com a potência desenvolvida. Como mencionado no capítulo 3, é um parâmetro muito usado para mostrar quão eficientemente um motor está transformando combustível em trabalho.

A Figura 4.1 caracteriza o consumo específico dos três combustíveis analisados.

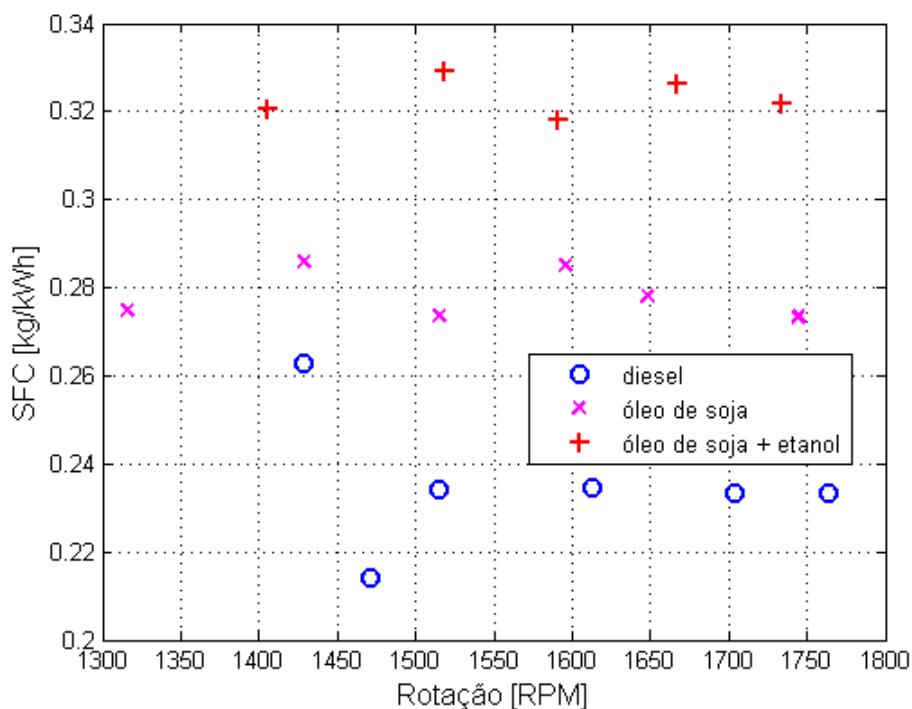


Figura 4.1: Consumo específico de combustível em função da rotação do motor

Observando a Figura acima, nota-se que o óleo diesel proporcionou o menor consumo específico. Para o estudo em questão, será a base de referência para as análises dos outros combustíveis estudados.

Como esperado no estudo de Ramadhas et al. (2004) devido a baixa qualidade de ignição, baixa viscosidade e poder calorífico não muito alto, acarretou no consumo específico elevado para o óleo de soja.

Aliado aos efeitos adversos que o óleo de soja proporciona, seguiu-se a previsão de He et al. (2003) em seu estudo de mistura de etanol com o óleo diesel. A mistura de óleo de soja e etanol acarreta no alto consumo de etanol e reduz o ponto de ignição. Logo, esses efeitos geram um alto consumo específico para a mistura de óleo de soja e etanol.

Realizando uma análise geral do comportamento dos combustíveis no motor sob o ponto de vista do consumo específico, o uso de combustíveis alternativos ao diesel possui uma eficiência menor em comparação ao diesel. Para uma minimização dos efeitos de alto consumo e baixa ignição dos combustíveis alternativos, se faz necessária uma série de modificações no motor (tais como modificações no tempo de ignição) para que estes possam ter os seus consumos específicos semelhantes ao consumo específico do óleo diesel.

## 4.1.2 Emissões de gases

As emissões de motores de combustão interna são os maiores contribuidores para a poluição do ar em áreas urbanas. Segundo Agarwal (2007), as emissões de veículos de combustão interna são classificados em duas categorias:

- Poluentes regulamentados: são caracterizados como poluentes regulamentados o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), o combustível que não foi queimado e hidrocarbonetos parcialmente oxidados. Os níveis desses poluentes são regidos de acordo com a legislação de cada país;
- Poluentes não regulamentados: são caracterizados como poluentes não regulamentados os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos-HPA, metano ( $\text{CH}_4$ ), aldeídos, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), outros traços de compostos orgânicos e depósitos de carbono.

### 4.1.2.1 Emissões de CO

A formação de monóxido de carbono (CO) é, em grande parte, devida a combustão incompleta de combustíveis fósseis no motor.

A Figura 4.2 caracteriza as emissões de CO dos combustíveis analisados.

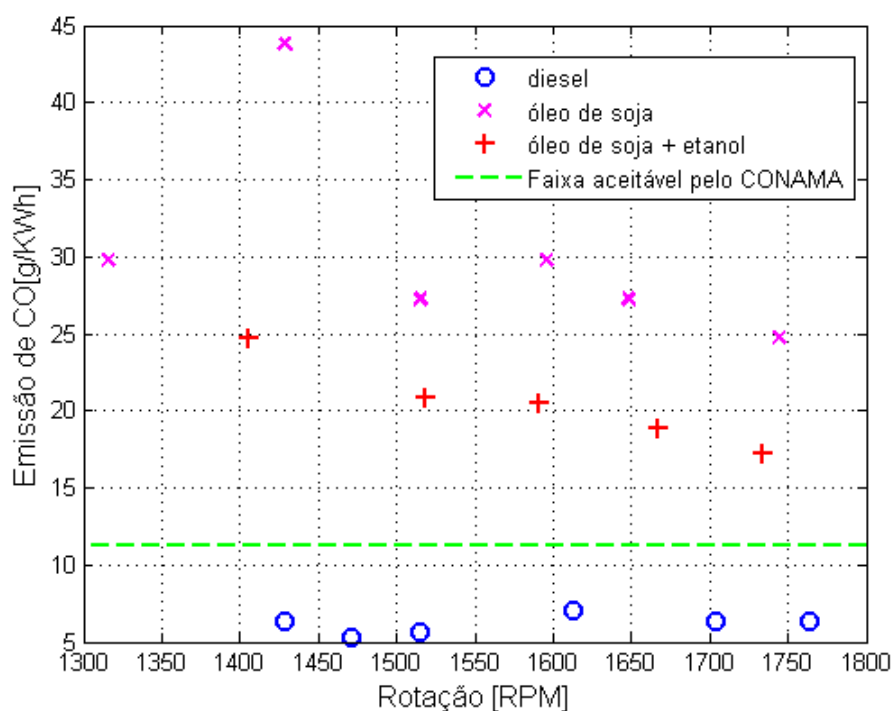


Figura 4.2: Emissões de CO dos combustíveis analisados

De mesma forma que ocorre na subseção 4.1.1, a Figura acima demonstra que o óleo die-

sel proporcionou as menores emissões de CO e dentro da faixa determinada pelo CONAMA. Assim, será também base de referência para as análises dos outros combustíveis estudados.

De acordo com o esperado obtido de He et al. (2003), a mistura de óleo de soja e etanol teve uma quantidade de emissões de gases menor do que ao combustível óleo de soja, porém ainda possui, comparativamente com o combustível óleo diesel, um alto nível de emissões. E ainda mais: está fora dos limites aceitáveis determinados pelo CONAMA.

De modo semelhante a mistura de óleo de soja e etanol, o óleo de soja é combustível que produz as maiores emissões de CO.

Ao realizar uma observação geral dos três combustíveis sob o ponto de vista de emissões de CO, o uso de combustíveis alternativos ao diesel possui uma quantidade de emissões maiores. Seguindo a mesma linha de raciocínio na subseção 4.1.1, se faz necessário uma série de modificações no motor para que as emissões dos combustíveis alternativos ao diesel possam ter as suas emissões dentro dos limites determinados pelo CONAMA.

#### 4.1.2.2 Emissões de $\text{NO}_x$

A formação de  $\text{NO}_x$ , de acordo com Almeida et al. (2002), é determinada pelas altas temperaturas de combustão.

A Figura 4.3 caracteriza as emissões de  $\text{NO}_x$  dos combustíveis analisados.

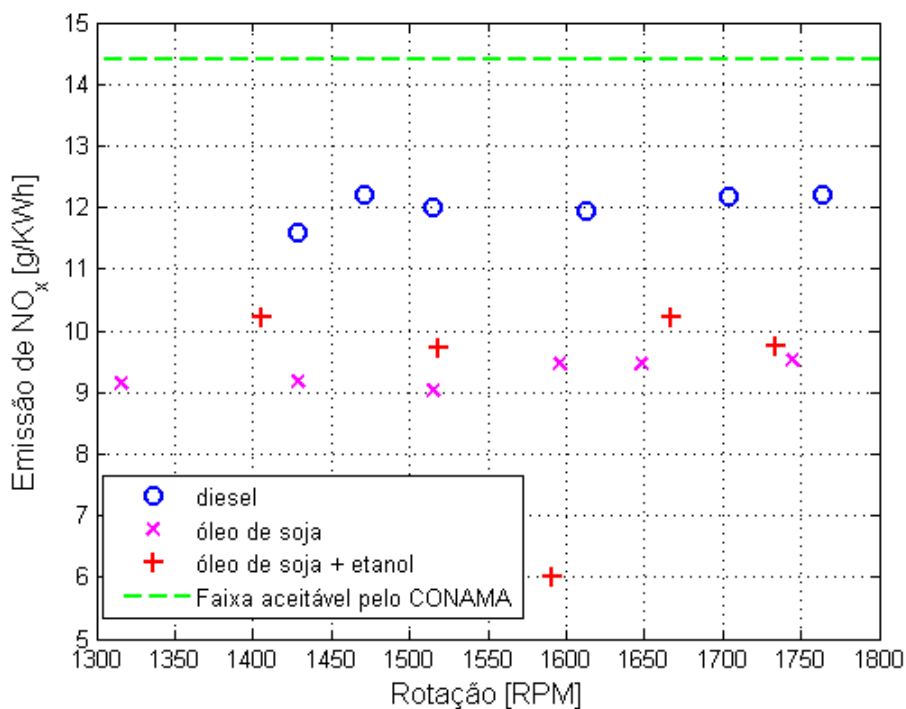


Figura 4.3: Emissão de  $\text{NO}_x$  dos combustíveis analisados

Na Figura acima, têm-se como base de referência a faixa emissões aceitável pelo CONAMA. Então, todas as análises de emissões de  $\text{NO}_x$  será baseadas nessa faixa de referência.

Confirmando os estudos de Almeida et al. (2002), as menores emissões de  $\text{NO}_x$  são do óleo de soja. Logo, dentre os três combustíveis analisados, o óleo de soja possui a menor temperatura na câmara de combustão. E por isso resultou nas menores emissões de  $\text{NO}_x$ .

Logo em seguida, com valores um pouco maiores, as emissões da mistura de óleo de soja e etanol. Uma explicação para uma elevação das emissões de  $\text{NO}_x$  foi a presença do álcool, elevando a temperatura na câmara de combustão.

E finalizando, o óleo diesel possui os maiores valores de emissão de  $\text{NO}_x$ , no entanto estando todos estes combustíveis dentro da faixa determinada pelo CONAMA.

Dentro de uma análise geral sob o ponto de vista de emissões de  $\text{NO}_x$ , o uso de combustíveis alternativos ao diesel possui uma menor quantidade de emissões de  $\text{NO}_x$ . Todos os fenômenos ocorridos no estudo das emissões de  $\text{NO}_x$  da mistura de óleo de soja e etanol e óleo de soja pura são devidos as baixas temperaturas de combustão que ocorrem dentro da câmara de combustão.

#### **4.1.2.3 Emissões de $\text{CO}_2$**

O  $\text{CO}_2$  é liberado na atmosfera quando um combustível é queimado em um motor de combustão interna (AGARWAL, 2007). Porém, este dióxido de carbono é reciclado nos tecidos orgânicos vegetais durante o crescimento destes. Apenas 40% ou menos de matéria orgânica é efetivamente removida dos campos (neste caso para a produção de etanol). O restante retorna ao solo como matéria orgânica, aumentando a fertilidade de solo e reduzindo a erosão.

A Figura 4.4 caracteriza as emissões de  $\text{CO}_2$  dos combustíveis analisados.

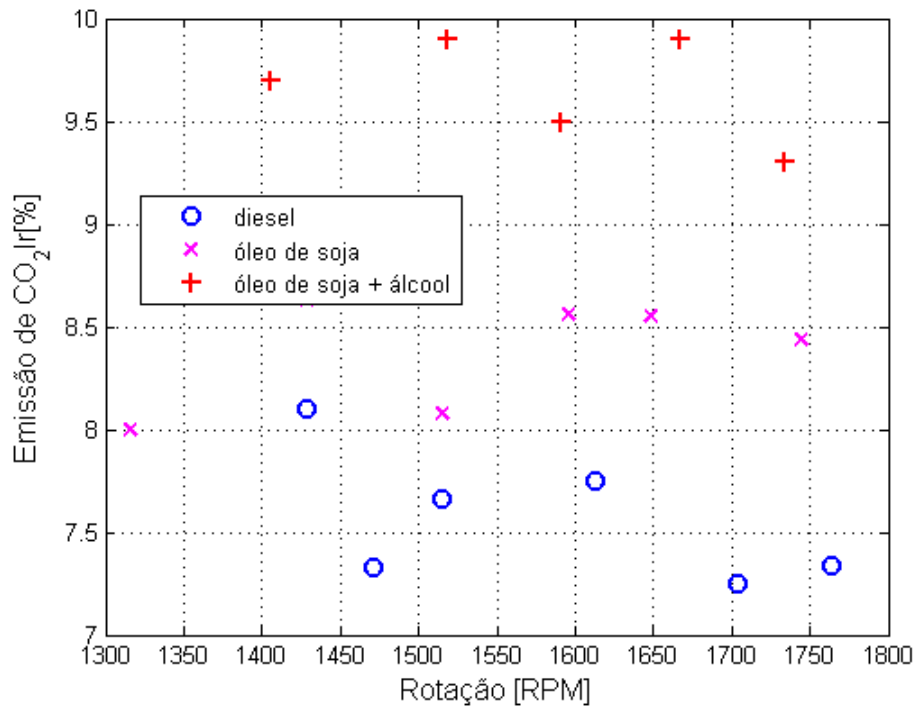


Figura 4.4: Emissão de CO<sub>2</sub> dos combustíveis analisados

Assim como nas emissões de CO, a Figura acima demonstra que o óleo diesel proporcionou as menores emissões de CO<sub>2</sub>. Então, será também a base de referência para as análises dos outros combustíveis estudados.

Confirmando com os resultados obtidos de He et al. (2003) e Almeida et al. (2002) as maiores quantidades emitidas de CO<sub>2</sub> foram oriundas dos combustíveis óleo de soja e mistura de óleo de soja e etanol. Segundo esses autores, a diferença de quantidade de emissões de cada combustível analisado se dá por terem diferentes números de poder calorífico, viscosidade, densidade e a presença de oxigênio em suas estruturas moleculares.

Portanto, segundo Almeida et al. (2002) para que as emissões de CO<sub>2</sub> dos combustíveis alternativos tenha níveis próximos do combustível óleo diesel, algumas recomendações são apresentadas:

- aumentar a pressão de injeção de combustível;
- instalar um turbocompressor no motor diesel para aumentar a temperatura e pressão na câmara de combustão;
- usar óleos lubrificantes especiais para motores que operam com óleos vegetais;



## 4.2 Resultados do desempenho ambiental

De modo geral, para se obter o óleo de soja e álcool em grandes quantidades atualmente no Brasil são necessários grandes áreas de colheita de soja e cana-de-açúcar. Portanto, caracteriza-se de forma simplificada (Figuras 4.5 e 4.6) as produções de óleo de soja e álcool.

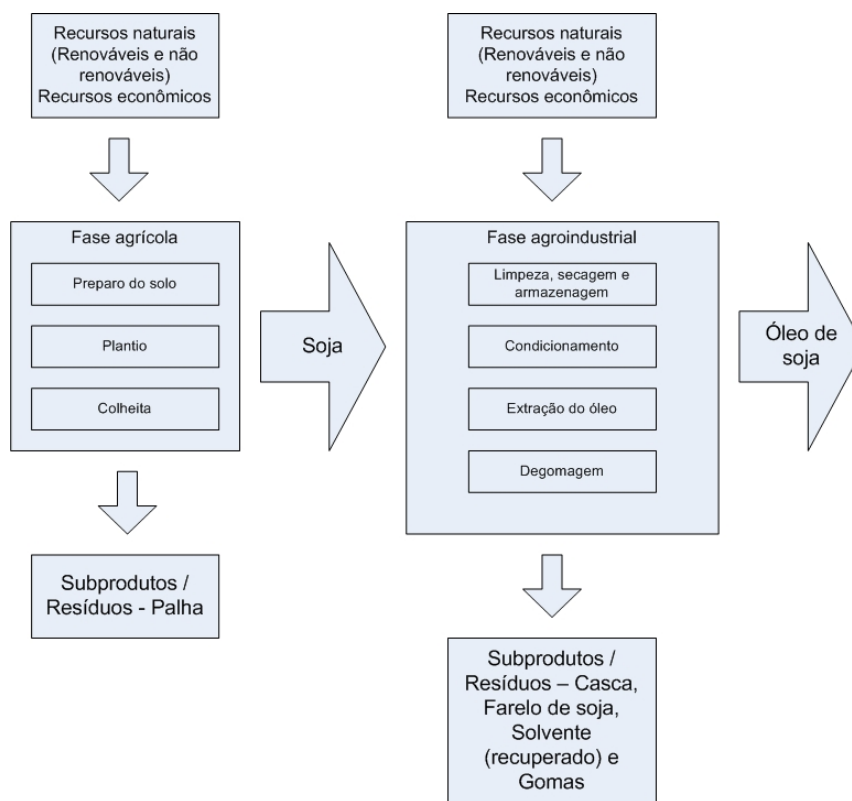


Figura 4.5: Etapas do beneficiamento do óleo de soja (PASSOS, 2004)

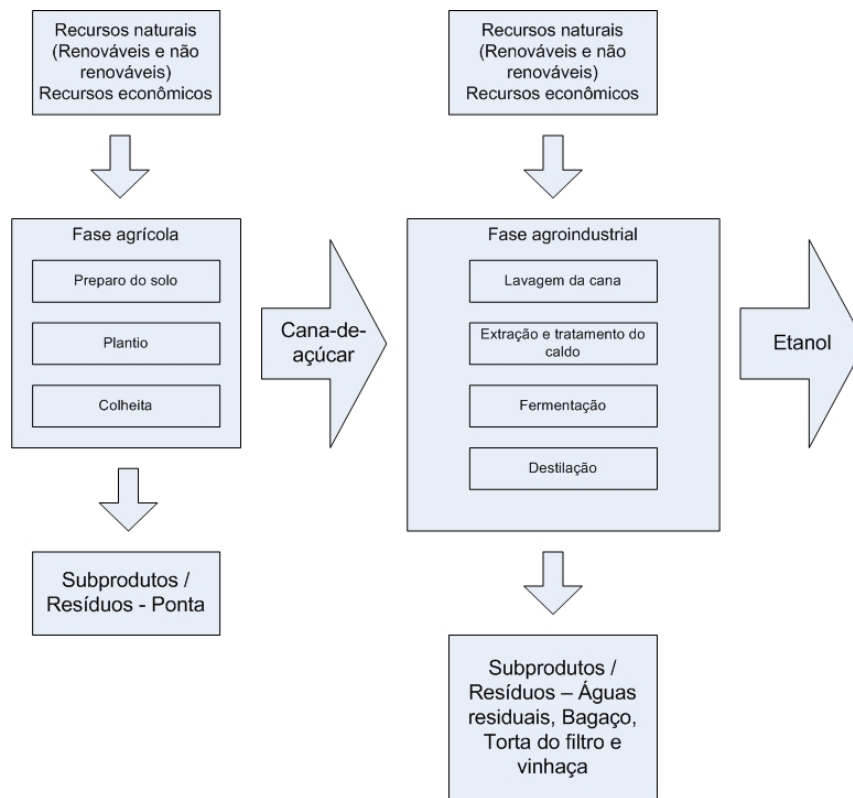


Figura 4.6: Etapas do beneficiamento do etanol (PASSOS, 2004)

Para iniciar os estudos de ACV, algumas informações sobre os cultivos de soja e de cana-de-açúcar são necessárias. Coltro et al. (2007) caracteriza essas informações complementares, que são:

- Produção agrícola;
- Área colhida;
- Produtividade média;
- Características dos cultivos da soja e da cana-de-açúcar;

#### 4.2.1 Produção agrícola

Percebe-se que desde 2003, ocorre uma crescente produção de cana-de-açúcar ao longo dos anos. Esse crescimento na produção de cana-de-açúcar se deve ao fato que os países desenvolvidos estão adotando o álcool em mistura com a gasolina como biocombustível em sua frota. Observa-se que a produção em 2003 passou de 400 milhões de toneladas para 500 milhões de toneladas em 2007. Já a produção de soja manteve-se estável ao longo dos anos analisados, ficando por volta de 50 milhões de toneladas.

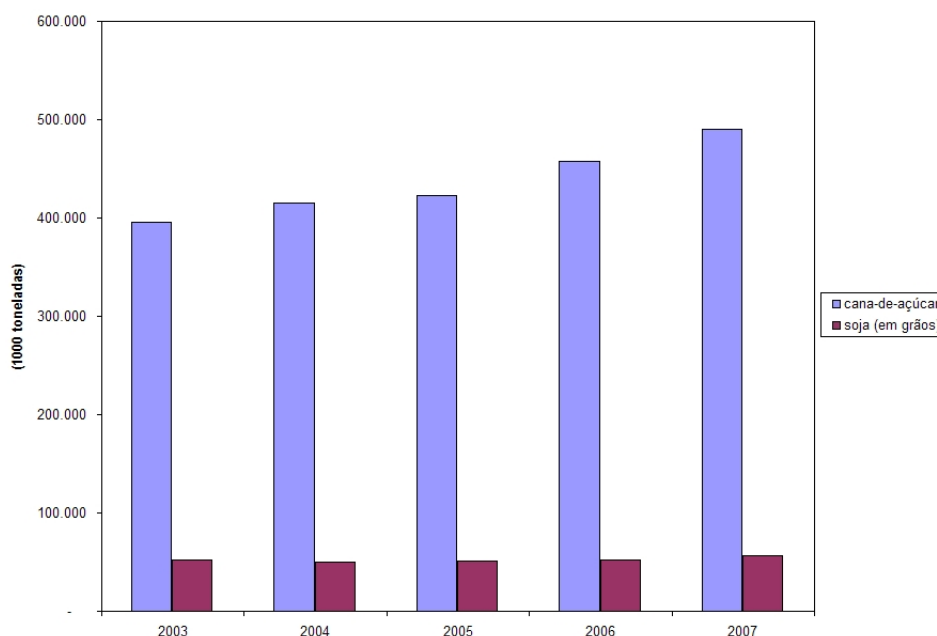


Figura 4.7: Produção agrícola da cana-de-açúcar e da soja (BRASIL, 2008b)

Este crescimento nas colheitas de cana-de-açúcar no país se devem a dois fatores (BRASIL, 2008b):

- crescimento da frota de veículos leves - na sua maioria os veículos *flex*;
- crescimento da demanda internacional de álcool anidro e hidratado.

No entanto, a produção de soja manteve-se estável ao longo dos anos ficando em torno de 50 milhões de toneladas. Uma das causas de sua estabilidade é devido a incerteza do mercado quanto à utilização de biodiesel a partir do óleo de soja.

## 4.2.2 Área colhida

A área colhida destas lavouras no Brasil é uma fonte adequada para a análise ambiental. A lavoura de cana-de-açúcar ficou estável, estando por volta de 5 milhões de hectares de área colhida. Já a soja teve um pico perto de 25 milhões de hectares no ano de 2005, mas no ano de 2007 resultou em 20 milhões de hectares de área colhida.

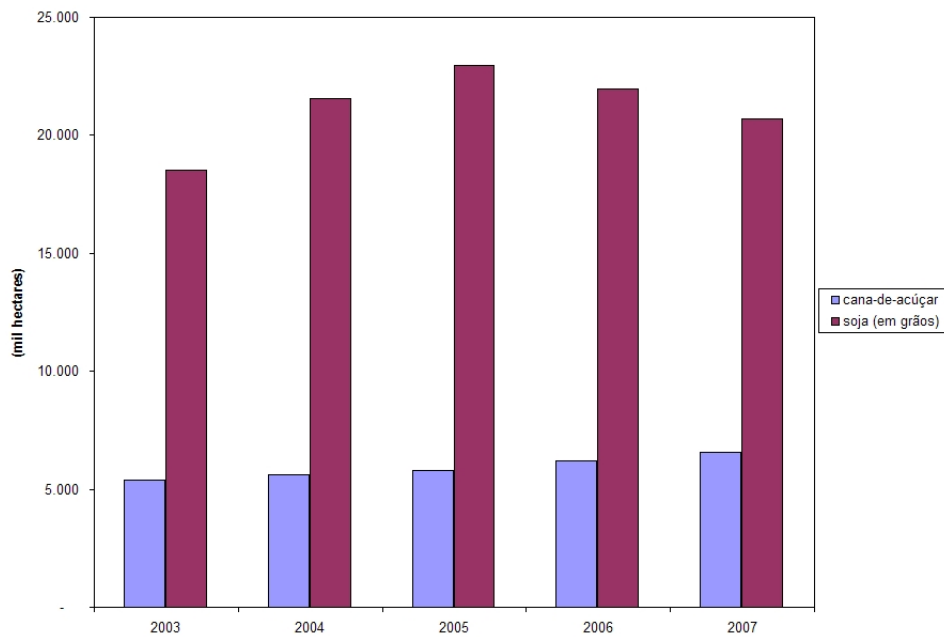


Figura 4.8: Área colhida da cana-de-açúcar e da soja (BRASIL, 2008b)

### 4.2.3 Produtividade média

A produtividade média é um dos mais importantes indicadores para a análise ambiental das lavouras envolvidas. Através deste indicador é possível determinar o quanto é produzido por área. Nota-se que a produção de cana-de-açúcar é em torno de  $70.000 \text{ kg/ha}$ . Já a soja possui uma baixa em relação a cana-de-açúcar. Essa produtividade é torno de  $5.000 \text{ kg/ha}$ .

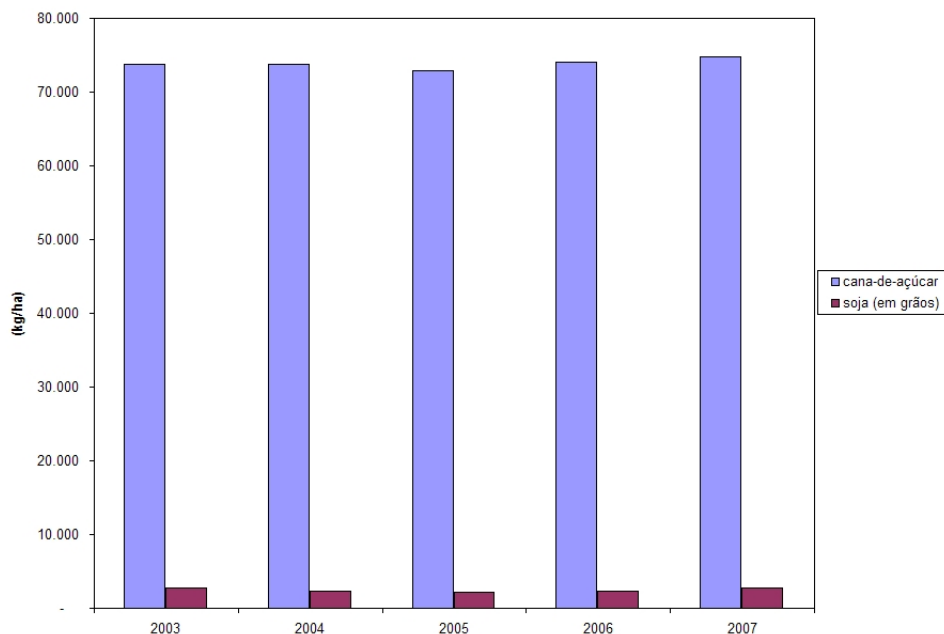


Figura 4.9: Produtividade média da cana-de-açúcar e da soja (BRASIL, 2008b)

## 4.2.4 Características dos plantios da soja e da cana-de-açúcar

A soja e a cana-de-açúcar são setores de exportação críticos para o Brasil e deverão ser impactados pelas atuais negociações da Organização Mundial do Comércio (OMC). Para tanto, o governo deverá instituir um conjunto de políticas internas a serem implementadas - seja de forma independente ou em conjunto - que possam ser identificadas em nível internacional.

Para os estudos de ACV neste trabalho foi necessário o conhecimento dos aspectos de produção dos plantios de soja e de cana-de-açúcar. Na tabela abaixo, é mostrado os aspectos produtivos da soja e da cana-de-açúcar envolvendo os impactos ambientais em suas respectivas culturas.

Tabela 4.1: Características dos plantios da soja e da cana-de-açúcar com a visão produtiva e seus impactos ambientais (EMBRAPA, 2009b; EMBRAPA, 2009a)

ASPECTOS PRODUTIVOS	CARACTERÍSTICAS DAS CULTURAS		IMPACTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS
	SOJA	CANA-DE-AÇÚCAR	
<b>Zoneamento Agroclimático:</b> definindo áreas menos sujeitas a riscos de insucessos devido à ocorrência de adversidades climáticas, o zoneamento agroclimático destas culturas constitui-se numa ferramenta de fundamental importância em várias atividades do setor agrícola.	Regiões com melhores distribuição e volume pluviométrico, como o Mato Grosso, apresentam menor risco à cultura de soja. Essa escolha se deve ao fato de que a região apresenta um menor probabilidade de perdas por ocorrência de déficit hídrico. Outro fator favorável para a escolha devem-se também as práticas do manejo do solo de da cultura que permitem às plantas superarem curtos períodos de adversidade climática.	Regiões que possuem uma temperatura média anual de 21°C ou superiores a esse limite e deficiência hídrica anual menor ou igual a 200mm, foram consideradas ótimas para o cultivo da cana-de-açúcar.	<b>Aspectos Locais:</b> perda da biodiversidade; erosão; compactação do solo;
<b>Variedades:</b> definindo a variedade mais adequada para a produção, determina-se a espécie do cultivo para a melhor produção de óleo e álcool.	Além de uma grande variação nas épocas de cultivo, as variedades de soja também registram diferenças no que diz respeito ao crescimento. Algumas crescem mais cedo, outras têm mais proteínas ou mais óleo, outras ainda são mais resistentes a pragas, outras às secas, outras têm mais tolerância ao sal. E existem uma variedade de cores e tamanhos.	Quando existe mais de uma variedade, o início da colheita deverá ser feito com a variedade de cana precoce, seguido da mediana e por último, as variedades tardias. No caso de áreas maiores e onde o corte é mecanizado, é aconselhável que se usem variedades que tenham capacidade de desfolha natural.	<b>Aspectos Globais:</b> mudanças climáticas. <b>Aspectos Locais:</b> erosão; contaminação por agrotóxicos; acidificação do solo; desertificação; escassez hídrica; poluição das águas; mudanças climáticas.
<b>Espaçamento no Plantio:</b> parâmetro que possibilita a produção dessas lavouras em boa parte do ano.	O espaçamento entre linhas na cultura da soja varia com o ciclo vegetativo do cultivar. Os cultivares precoces são semeados no espaçamento de 36 a 45cm. Para os demais cultivares precoces são semeados no espaçamento de 60cm que pode ser reduzido para 50cm se houver atraso do plantio. A densidade de semeadura é da ordem de 30 sementes por metro linear. A emergência de aproximadamente 25 plantas por metro linear é desejável.	O espaçamento entre os sulcos de plantio é de 1,40m e a sua profundidade de 20 a 25cm. A densidade do plantio é em torno de 12 gemas por metro linear de sulco, que, dependendo da variedade e do seu desenvolvimento vegetativo, corresponde a um gasto de 7 a 10 ton/ha.	<b>Aspectos Globais:</b> mudanças climáticas. <b>Aspectos Locais:</b> perda da biodiversidade; erosão; compactação do solo; acidificação do solo; desertificação; escassez hídrica; poluição das águas.
<b>Beneficiamento</b>	O processo de beneficiamento da soja, inicia-se com o esmagamento, no qual basicamente se separa o óleo bruto (aproximadamente 20 % do conteúdo do grão) do farelo, utilizado largamente com ração animal. O óleo bruto passa por um processo de refino até assumir propriedades ideais ao consumo como óleo comestível.	Já o processo de beneficiamento da cana-de-açúcar inicia-se com a retida do colmo (caule), que é esmagado, liberando o caldo que é concentrado pela fervura. A partir do caldo pode-se obter dois produtos: o açúcar e o etanol, este último através do processo fermentativo. O bagaço (resíduo) podem ser usadas como matéria prima para produção de energia elétrica, através da queima e produção de vapor em caldeiras que tocam turbinas, e etanol, através da hidrólise enzimática ou por outros processos que transformam a celulose em açúcares fermentáveis.	<b>Aspectos Globais:</b> mudanças climáticas. <b>Aspectos Locais:</b> contaminação ambiental por resíduos sólidos; poluição das águas.
			<b>Aspectos Globais:</b> mudanças climáticas.

Com a posse dessas informações complementares, os sistemas foram montados incluindo o cultivo agrícola nas fazendas comerciais, a colheita, o beneficiamento, a estocagem e o transporte por caminhões até o seu destino final (queima do combustível para o transporte de carga pré-definida no capítulo 3). Os dados da parte agrícola foram inseridos no *software GaBi 4*, este fornecendo campos para as entradas e saídas em cada módulo, relacionados aos cultivos da soja e da cana-de-açúcar. Determinando a montagem de cada módulo inserido em cada ciclo de vida, foram definidas as fronteiras de cada sistema de produção. A produção de fertilizantes, corretivos e pesticidas não foram incluídas nas fronteiras dos respectivos estudos, mas somente os seus respectivos consumos e transportes até a fazenda.

## **4.2.5 Resultados da avaliação energético-ambiental do óleo de soja e do álcool**

O estudo de ACV do óleo de soja e etanol teve como unidade funcional o quilograma. Como, no entanto, a seleção da unidade funcional dos produtos agrícolas não é clara pela literatura, foi considerado nesse estudo o quilograma pela versatilidade e o início de uma referência. Assim, obteve-se uma maior quantidade de dados sobre o ciclo de vida na produção destes biocombustíveis e uma análise mais construtiva sobre estes resultados.

### **4.2.5.1 Fluxos mássicos dos biocombustíveis analisados**

A análise dos fluxos mássicos é uma importante ferramenta associada à Ecologia Industrial (TANIMOTO, 2004). O modelo de fluxo mássico é baseado na análise de entradas e saídas, através do balanço de massa. Assim as ferramentas de análise do comportamento produtivo devem observar a equalização entre a quantidade de matéria que entra na linha de produção e a quantidade de produto gerada. Sendo o ponto referencial para a entrada de matéria-prima, a quantidade de produto que viabiliza o empreendimento.

Uma das vantagens de ter a análise de fluxos mássicos como ferramenta de ecologia industrial é que ela fornece suporte para tomadas de decisão (em níveis globais, regionais ou para melhoria da eficiência da produção de forma local). Esta análise também fornece dados para o cálculo de custos de produção e funciona na identificação de “Indicadores Ambientais” para um determinado sistema de produção.

Ao analisar o metabolismo de um sistema em termos de energia ou matéria, ou seja para o estudo em questão, o fluxo mássico entre esse sistema e seu ambiente, pode-se fazer uma revisão geral em termos de matéria, ou selecionar determinados fluxos de materiais ou substâncias químicas de um produto. Normalmente essas análises são feitas pela comparação entre as taxas de produção e as taxas de consumo de determinados recursos dentro do sistema de referência

(VALE; SABLONSKI, 2006).

As Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 caracterizam os fluxos mássicos dos biocombustíveis estudados:

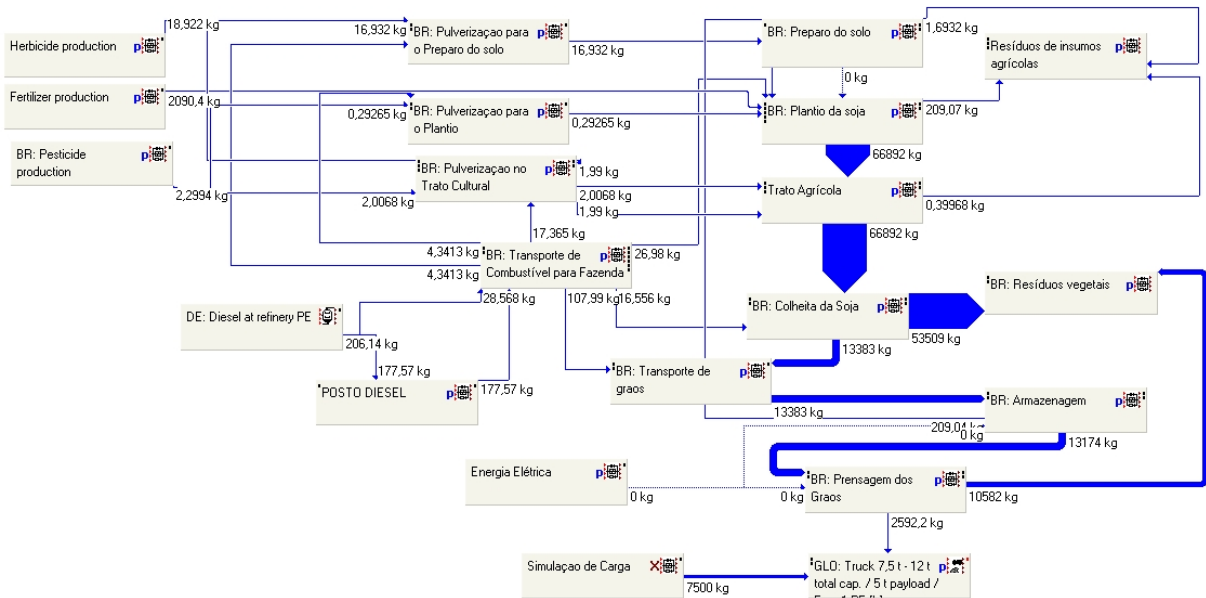


Figura 4.10: Fluxo mássico para a produção do óleo de soja

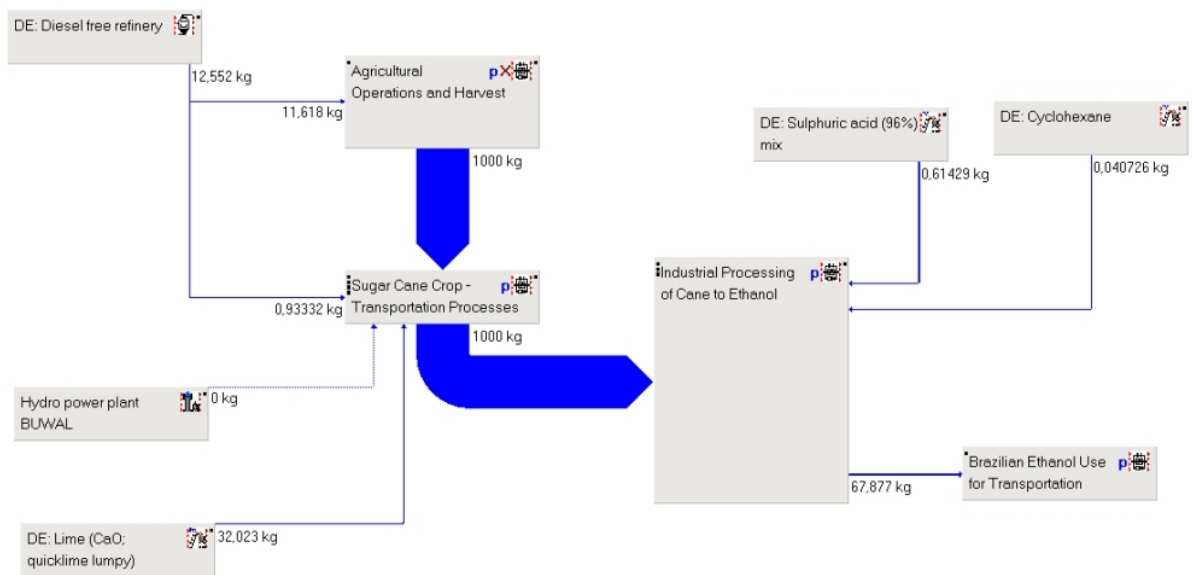


Figura 4.11: Fluxo mássico para a produção do etanol

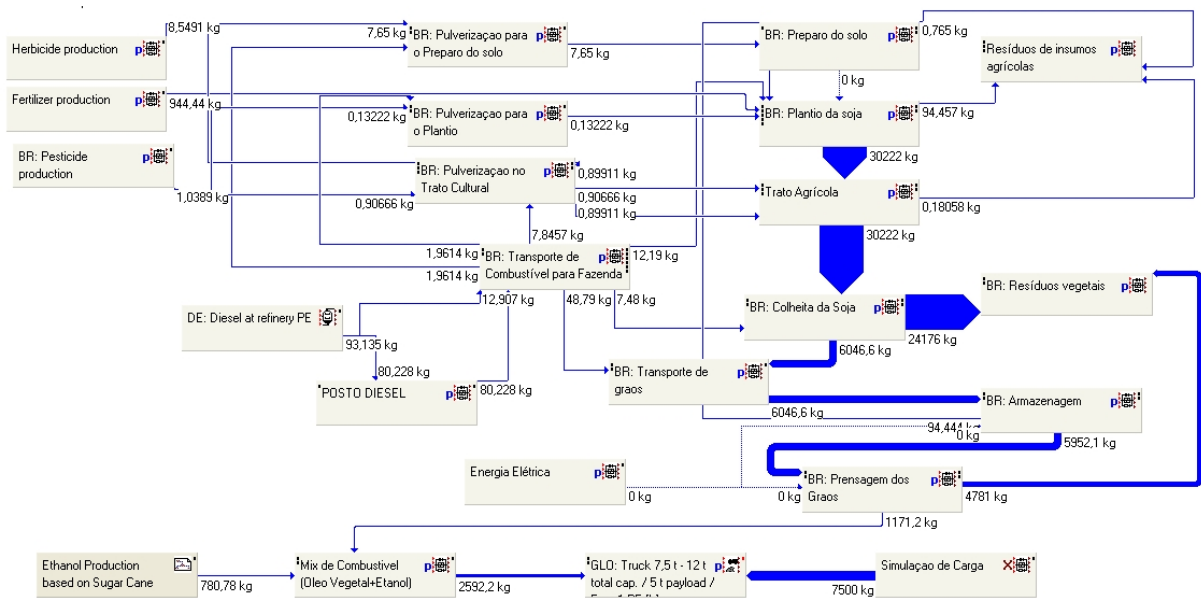


Figura 4.12: Fluxo mássico para a mistura de óleo de soja e etanol



Figura 4.13: Fluxo mássico para a produção de diesel

A partir dos fluxos mássicos apresentados é possível determinar as quantidades de produtos a serem utilizados para produção dos biocombustíveis. Com estes dados é possível estimar custos de produção em cada etapa, podendo assim em qualquer parte do processo minimizar estes custos.

Para efeito de comparação, foi caracterizado o fluxo mássico de produção de óleo Diesel, este já existente no *software GaBi 4*. Os resultados dos desempenhos ambientais serão comparados com o desempenho ambiental do óleo diesel. A partir de comparações com o cenário do óleo diesel, são realizadas as análises dos biocombustíveis.

Pode-se dizer que, de acordo com a análise feita, os resultados de ACV para qualquer cultivo podem variar em função da especificidade de cada região geográfica junto ao setor produtivo. Sendo assim, os impactos ambientais podem variar com a região geográfica.



#### 4.2.5.2 Fluxos mássicos de emissões - total geral

Através desse fluxo mássico é possível identificar certos aspectos da produção dos bio-combustíveis, como por exemplo, consumo de insumos e produtividade. Identificando estes aspectos, uma reavaliação quanto ao uso de produtos agrícolas poderá melhorar o desempenho ambiental e econômico.

A Tabela 4.2 caracteriza os resultados obtidos para cada combustível estudado.

(a) Resultado do balanço mássico obtido com o diesel

	[kg]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	6853,44	14469,61	7616,17
Emissões atmosféricas	0,00	9955,86	9955,86

(b) Resultado do balanço mássico obtido com a mistura de óleo de soja e etanol

	[kg]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	143407,44	112204,01	-31203,43
Emissões atmosféricas	64524,29	35888,15	-28636,14

(c) Resultado do balanço mássico obtido com o óleo de soja

	[kg]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	220582,84	228709,63	8126,79
Emissões atmosféricas	59131,13	67650,06	8518,93

Tabela 4.2: Resultados dos fluxos mássicos em geral obtidos dos combustíveis testados

Observa-se que na entrada o óleo de soja necessita de maiores recursos de massa de produto (combustível) para ser produzido. Porém, ao observar com maior detalhe, a maior fixação de CO<sub>2</sub> dos três combustíveis analisados é a mistura de óleo de soja e etanol.

Já na saída observa-se que os fluxos mássicos do óleo Diesel, da mistura de óleo de soja e álcool e óleo de soja, respectivamente, possuem valores crescentes. Observando detalhadamente as emissões atmosféricas, o óleo de soja é o maior emissor.

Mas, observando o balanço dos combustíveis analisados, têm-se o seguinte:

- O balanço mássico - sob o ponto de vista as emissões - mais vantajoso é a mistura de óleo de soja e etanol;
- Em seguida vem o óleo de soja;
- E o menos vantajoso é o óleo diesel.

Logo, o fumigamento de óleo de soja e etanol é a opção mais vantajosa ambientalmente porque é observado o maior sequestro de carbono.

#### 4.2.5.3 Fluxos de emissões de CO<sub>2</sub>

Nesta parte do estudo pode-se confirmar alguns aspectos do fluxo analisado no item acima. A Tabela 4.3 caracteriza os resultados obtidos para cada combustível estudado.

(a) Resultado do balanço obtido com o diesel

	[kg de CO <sub>2</sub> eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,36	9297,47	9297,11
Emissões atmosféricas	0,00	9297,47	9297,47

(b) Resultado do balanço obtido com a mistura de óleo de soja e etanol

	[kg de CO <sub>2</sub> eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	64529,91	35148,45	-29381,46
Emissões atmosféricas	64524,29	35148,45	-29375,84

(c) Resultado do balanço obtido com a mistura de óleo de soja

	[kg de CO <sub>2</sub> eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	59131,16	67558,84	8427,68
Emissões atmosféricas	59131,13	67558,84	8427,71

Tabela 4.3: Resultados dos fluxos de emissões de CO<sub>2</sub> obtidos dos combustíveis testados

Na entrada de emissões dos combustíveis analisados nota-se que a mistura óleo de soja e etanol possuem as maiores quantidades de CO<sub>2</sub>. Em segundo lugar vem o óleo de soja e logo em seguida o óleo Diesel.

Na saída o óleo Diesel possui uma quantidade bem menor diante dos outros combustíveis testados. Logo em seguida vem a mistura de óleo de soja e etanol e finalizando com as maiores emissões de saída está o óleo de soja.

Nessa tabela, é possível perceber o quanto de CO<sub>2</sub> é sequestrado observando as respectivas colunas de balanço. Confirmando os resultados obtidos no item acima, têm-se:

- O combustível com o maior sequestro de carbono é a mistura de óleo de soja e etanol;
- Em seguida o óleo de soja;
- E em último lugar o óleo Diesel.

Tendo o aspecto ambientalmente vantajoso da mistura de óleo de soja e etanol, realizou-se com o *software GaBi 4* perspectivas nas saídas de emissões com quantidades diferentes de óleo de soja e etanol na mistura. Observando a Figura 4.14, obteve-se as emissões de CO<sub>2</sub> em vários cenários. Em cada cenário há uma mistura diferente de óleo de soja e etanol.

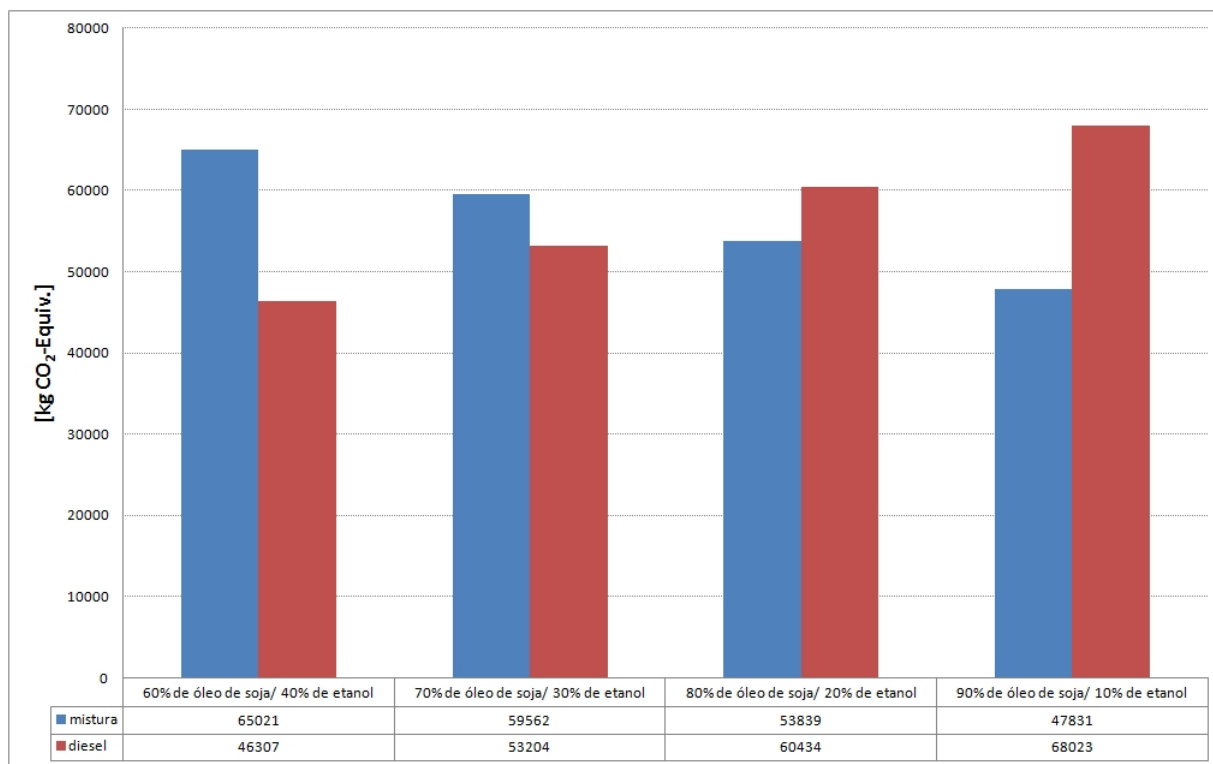


Figura 4.14: Saída de emissões de CO<sub>2</sub> - casos de mistura diferentes de óleo de soja e etanol

Para a construção dos cenários se fez necessária o uso de uma equação de linearização para as diversas quantidades de óleo de soja e etanol para a mistura. A equação foi construída a partir dos consumo específico do óleo de soja e da mistura do óleo de soja (60%) e etanol (40%).

O cálculo de emissões foi criada uma equação linear para cada consumo de quantidade de óleo, para inserir no programa *GaBi 4*.

$$y = 1,466 - 0,29x \quad (4.1)$$

Onde  $y$  é o consumo da mistura e  $x$  é a porcentagem de óleo de soja na mistura. Em cada cenário, percebe-se o decréscimo da quantidade de emissões quando a mistura se aproxima do óleo de soja puro. Ao mesmo tempo, há também um crescimento na quantidade de emissões de óleo Diesel em cada cenário.

Sob este aspecto, em relação ao óleo diesel, pode-se visualizar o desempenho ambiental da mistura de óleo de soja e etanol. Para maiores quantidades de óleo de soja na mistura obtêm-se

decrecente emissões de CO<sub>2</sub>eq. Assim, é visto a vantagem ambiental da mistura em diferentes quantidades dos componentes na mistura.

#### 4.2.5.4 Potencial de acidificação do solo

Um dos impactos ambientais mais comuns estudados atualmente é a acidificação dos solos. Ela consequência da precipitação atmosférica de compostos de enxofre (SO<sub>x</sub>), produzidos pela oxidação de impurezas sulfurosas de carvões e petróleo, e compostos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), gerados pelas altas temperaturas de queima de combustíveis fósseis. A acidificação é um dos impactos ambientais que é relacionada ao uso incorreto da água. É caracterizada pela irrigação inadequada no solo (uso de água salobra ou excesso de água no solo).

A Tabela 4.4 caracteriza os resultados obtidos do potencial de acidificação para cada combustível estudado.

(a) Resultado do balanço obtido com o diesel

	[kg SO <sub>2</sub> eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	75,48	75,48
Emissões atmosféricas	0,00	75,48	75,48

(b) Resultado do balanço obtido com a mistura de óleo de soja e etanol

	[kg SO <sub>2</sub> eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	71,36	71,36
Emissões atmosféricas	0,00	71,36	71,36

(c) Resultado do balanço obtido com a mistura de óleo de soja

	[kg SO <sub>2</sub> eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	70,97	70,97
Emissões atmosféricas	0,00	70,97	70,97

Tabela 4.4: Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de acidificação dos combustíveis testados

Observando somente a saída sob o ponto de vista a acidificação, a entrada não forma ácidos no solo em todos os casos.

De acordo com a tabela acima, a formação de ácidos oriundos com o uso do óleo diesel é maior. Em seguida, têm os valores da mistura de óleo de soja e etanol e finalmente, o óleo de soja. O resultado do óleo de soja possui o menor resultado sendo justificado pelo fato de que o

óleo de soja não possui em sua estrutura atômica o átomo de enxofre. Mesmo assim, ocorre a formação de ácido a partir de  $\text{NO}_x$ .

Então é visto que o combustível ambientalmente vantajoso sob o ponto de vista da acidificação é o óleo de soja, obtendo os menores níveis de potencial de acidificação.

#### 4.2.5.5 Potencial de eutrofização do solo

A eutrofização é um fenômeno causado pelo excesso de nutrientes (compostos ricos em fósforo ou nitrogênio) numa quantidade de água, causando assim, um aumento excessivo de algas. Estas fomentam o desenvolvimento de consumidores primários e eventualmente de outros elementos da cadeia alimentar de um determinado ecossistema. Devido a este aumento da biomassa, pode ocorrer a diminuição do oxigênio dissolvido nessa quantidade de água, acarretando alteração na qualidade da água.

A Tabela 4.5 caracteriza os resultados obtidos do potencial de eutrofização para cada combustível estudado.

(a) Resultado do balanço obtido com o diesel

	[kg $\text{PO}_4\text{eq.}$ ]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	11,45	11,45
Emissões atmosféricas	0,00	11,26	11,26

(b) Resultado do balanço obtido com a mistura de óleo de soja e etanol

	[kg $\text{PO}_4\text{eq.}$ ]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	11,32	11,32
Emissões atmosféricas	0,00	11,22	11,22

(c) Resultado do balanço com a mistura de óleo de soja

	[kg $\text{PO}_4\text{eq.}$ ]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	11,20	11,20
Emissões atmosféricas	0,00	11,19	11,19

Tabela 4.5: Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de eutrofização dos combustíveis testados

Assim como na acidificação, observa-se que durante a entrada não há a contabilização dos efeitos de eutrofização nos sistemas de produção dos combustíveis apresentados.

Na saída, percebe-se que os efeitos de eutrofização são maiores no sistema de produção de óleo diesel. Ficando em segundo lugar o sistema de produção da mistura de óleo de soja e álcool.

Na coluna de balanço dos combustíveis testados a condição de saída se mantém a mesma. As situações são explicadas da seguinte forma: na produção de etanol é produzida uma grande quantidade de vinhaça. Esta possui uma quantidade considerável de nitrogênio e fósforo. E por último, o sistema de produção de óleo vegetal produzindo o efeito de eutrofização devido ao seu método de plantio. Os três possuem efeitos de eutrofização muito próximos. Logo, percebe-se que os danos causados pela eutrofização dos três combustíveis analisados são quase equivalentes.

#### 4.2.5.6 Potencial de toxicidade humana

Segundo Mendonça (2007), os impactos por toxicidade são aqueles que agem diretamente na saúde dos seres vivos, especialmente na saúde dos seres humanos. O uso de produtos químicos como pesticidas, fungicidas e repelentes para o controle da produção agrícola contribuem para este impacto.

A Tabela 4.6 caracteriza os resultados obtidos do potencial de toxicidade humana para cada combustível estudado.

(a) Resultado do balanço obtido com o diesel

	[kg DCB eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	329,19	329,19
Emissões atmosféricas	0,00	302,12	302,12

(b) Resultado do balanço obtido com a mistura de óleo de soja e etanol

	[kg DCB eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	261,74	261,74
Emissões atmosféricas	0,00	260,32	260,32

(c) Resultado do balanço obtido com o óleo de soja

	[kg DCB eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	256,86	256,86
Emissões atmosféricas	0,00	254,71	254,71

Tabela 4.6: Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de toxicidade humana dos combustíveis testados

Novamente, assim como nos tópicos de acidificação e eutrofização, a entrada não contabiliza os efeitos de potencial de toxicidade humana.

Já a saída, observa em escala decrescente os efeitos da toxicidade humana nos sistemas de produção:

1. Sistema de produção de óleo Diesel: É o mais danoso para a saúde humana, onde as emissões atmosféricas possuem o maior dano a vida humana;
2. Sistema de produção da mistura de óleo de soja e etanol: Vêm em segundo lugar, onde as emissões atmosféricas são (em escala menor do que o óleo diesel) danosas a vida humana;
3. Sistema de produção do óleo de soja: Observa-se que há efeito tóxico. Também a principal causa da toxicidade humana na produção desse combustível são as emissões atmosféricas.

Portanto, de acordo com os resultados obtidos sob o ponto de vista do potencial de toxicidade humana, o combustível que produz menores danos para a vida humana é o óleo de soja.

#### **4.2.5.7 Potencial de toxicidade terrestre**

De acordo com Mendonça (2007), várias substâncias podem se acumular no organismo pelo compartilhamento ambiental (ar, água e solo) e entrar no sistema humano por inalação, ingestão ou contato físico, causando doenças no ser humano.

Mendonça (2007) afirma também que estes impactos também se acumulam na fauna e na flora terrestre. As consequências são a extinção de diversas espécies. Haverá a perda de biodiversidade, a salinização do solo (resultando em migrações familiares pelo esgotamento do solo para a produção agrícola) e danos ao solo (erosão e compactação).

A Tabela 4.7 caracteriza os resultados obtidos do potencial de toxicidade terrestre para cada combustível estudado.

(a) Resultado do balanço obtido com o diesel

	[kg DCB eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	5,491	5,491
Emissões atmosféricas	0,00	2,455	2,455

(b) Resultado do balanço obtido com a mistura de óleo de soja e etanol

	[kg DCB eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	1,359	1,359
Emissões atmosféricas	0,00	1,190	1,190

(c) Resultado do balanço obtido com o óleo de soja

	[kg DCB eq.]		
	Entrada	Saída	Balanço
Total	0,00	0,459	0,459
Emissões atmosféricas	0,00	0,218	0,218

Tabela 4.7: Resultados dos fluxos mássicos relacionados ao potencial de toxicidade terrestre dos combustíveis testados

A primeira vista, nota-se que nenhum dos sistemas de produção (Diesel, mistura de óleo de soja e etanol e óleo de soja), produzem efeitos de toxicidade terrestre na entrada.

Porém na saída, nota-se que o sistema de produção de óleo Diesel é o que produz mais efeitos na toxicidade terrestre. Observando o sistema de produção de óleo Diesel, vê-se a parcela de emissões atmosféricas que contribui para os efeitos de toxicidade, que é por volta de 45% do potencial total. Já nos sistemas que produzem a mistura de óleo de soja e etanol e o óleo de soja, é importante observar que estes sistemas produzem uma quantidade menor em relação ao sistema que produz óleo Diesel.

Da mesma maneira da toxicidade humana, pode-se afirmar que o uso correto dos insumos agrícolas (insumos que possuem um caráter sustentável) acarretou em menores efeitos nos resultados obtidos no sistema de produção de óleo de soja.

### 4.3 Avaliação energética versus avaliação ambiental

Tendo os resultados das avaliações energéticas e resultados das avaliações ambientais, neste estudo apresenta-se o cruzamento desses resultados. A partir do vínculo mencionado no capítulo 3, na seção 3.2, subseção 3.2.1, viu-se a possibilidade de cruzamento desses dados, gerando



novas interpretações e análises dos combustíveis testados.

### 4.3.1 Emissões de CO<sub>2</sub> e Potencial de mudanças climáticas

A Figura 4.15 caracteriza o primeiro cruzamento de dados entre as avaliações energéticas e as avaliações ambientais.

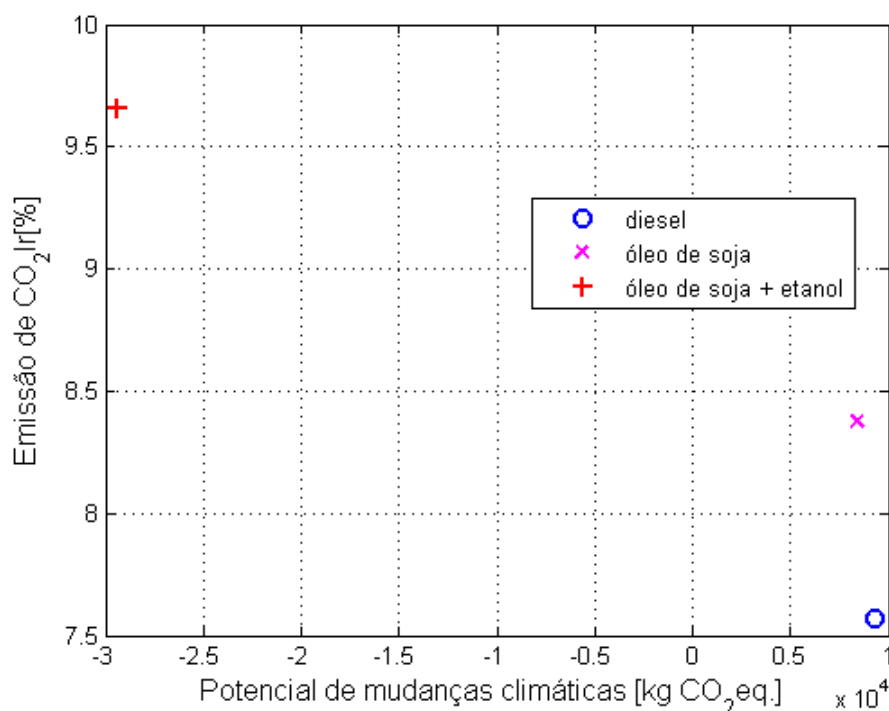


Figura 4.15: Resultados de emissões de CO<sub>2</sub> versus potencial de mudanças climáticas

Observando de forma geral, vê-se que a mistura de óleo de soja e etanol é a que possui as maiores emissões de CO<sub>2</sub>, porém esse combustível possui do ponto de vista ambiental o maior sequestro de carbono. Nesta figura observa-se também o quanto está sendo sequestrado, mesmo com o elevado nível de emissão.

Em segundo lugar está o óleo de soja. Com o potencial de mudanças climáticas entre 5 a 10 toneladas de CO<sub>2</sub>eq., percebe-se que este está muito próximo do óleo diesel. Entretanto, o óleo diesel possui as menores emissões de CO<sub>2</sub> sob o ponto de vista de emissões CO<sub>2</sub> na parte de avaliações energéticas.

Portanto, do ponto de vista geral a escolha da mistura de óleo de soja e etanol para a utilização de combustível é a melhor, mesmo com as maiores emissões. Isso porque o sequestro desse combustível é elevado o suficiente para a fixação de carbono, não contribuindo para o efeito estufa (um dos efeitos da mudança climática).

### 4.3.2 Emissões de CO e Potencial de mudanças climáticas

A Figura 4.16 caracteriza o cruzamento de dados de emissões de CO versus o potencial de mudanças climáticas.

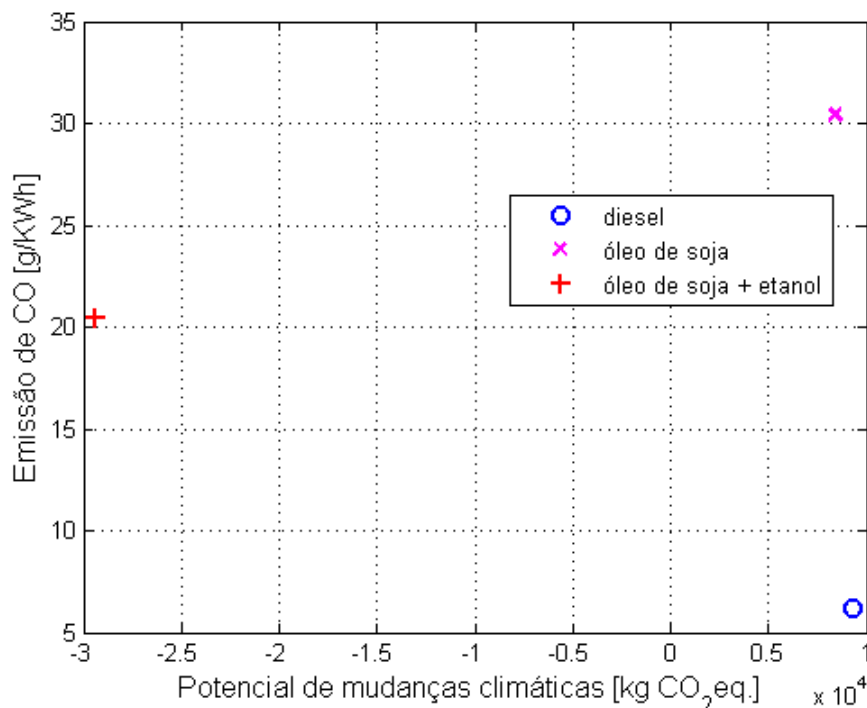


Figura 4.16: Resultados de emissões de CO versus potencial de mudanças climáticas

De forma semelhante as emissões de CO<sub>2</sub>, novamente a mistura de óleo de soja e etanol está em segundo lugar com as maiores emissões porém está com os maiores sequestros de carbono.

O óleo de soja está com as maiores emissões e possui um potencial de mudanças climáticas entre 5 e 10 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. Em seguida, está o óleo diesel que possui as menores emissões de CO, porém possui o maior potencial de mudanças climáticas.

Avalia-se que a mistura de óleo de soja e etanol, sob este ponto de vista, é a melhor escolha quanto ao uso desse, por sua elevada fixação de carbono, mitigando os efeitos das mudanças climáticas.

### 4.3.3 Emissões de NO<sub>x</sub> e Potencial de acidificação

A Figura 4.17 caracteriza o cruzamento de dados de emissões de NO<sub>x</sub> versus o potencial de acidificação.

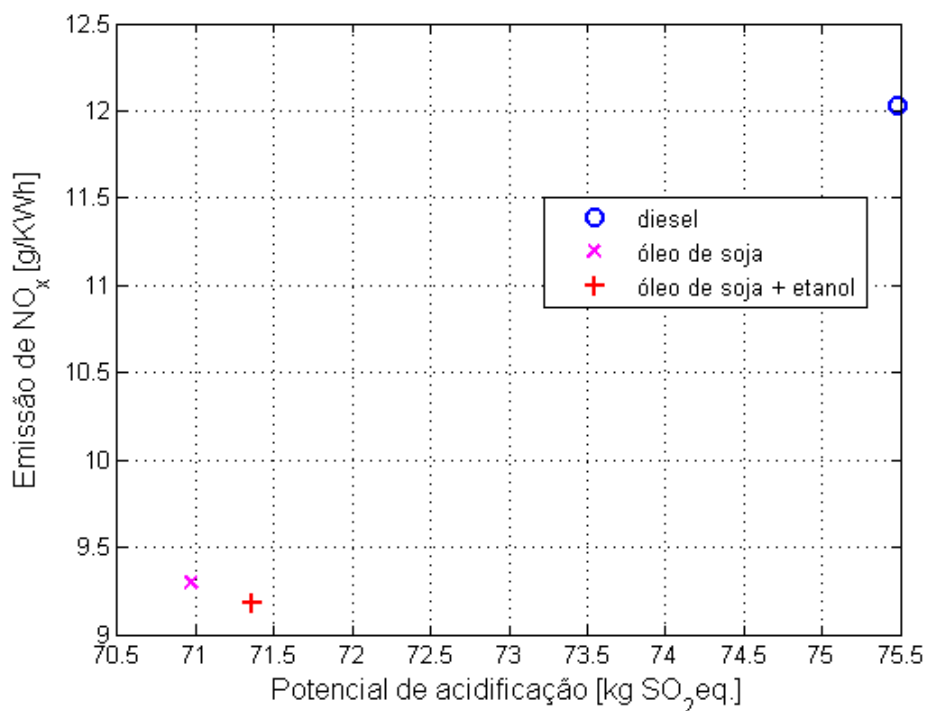


Figura 4.17: Resultados de emissões de NO<sub>x</sub> versus potencial de acidificação

A partir da observação da figura acima vê-se que o óleo de soja possui uma emissão mediana NO<sub>x</sub> e com o menor potencial de acidificação. Em segundo lugar, está a mistura de óleo de soja e etanol com a menor emissão de NO<sub>x</sub> e com o segundo lugar no potencial de acidificação. Por último está o óleo diesel com os maiores níveis de emissões de NO<sub>x</sub> e potencial de acidificação.

Já neste cenário, a escolha do combustível a ser utilizado é outra. Sob o ponto de vista geral, o melhor combustível a ser utilizado é o óleo de soja porque é o que possui o menor potencial de acidificação, mesmo com as emissões maiores do que a mistura de óleo de soja e etanol.

#### 4.3.4 Emissões de NO<sub>x</sub> e Potencial de eutrofização

A Figura 4.18 caracteriza o cruzamento de dados de emissões de NO<sub>x</sub> versus o potencial de eutrofização.

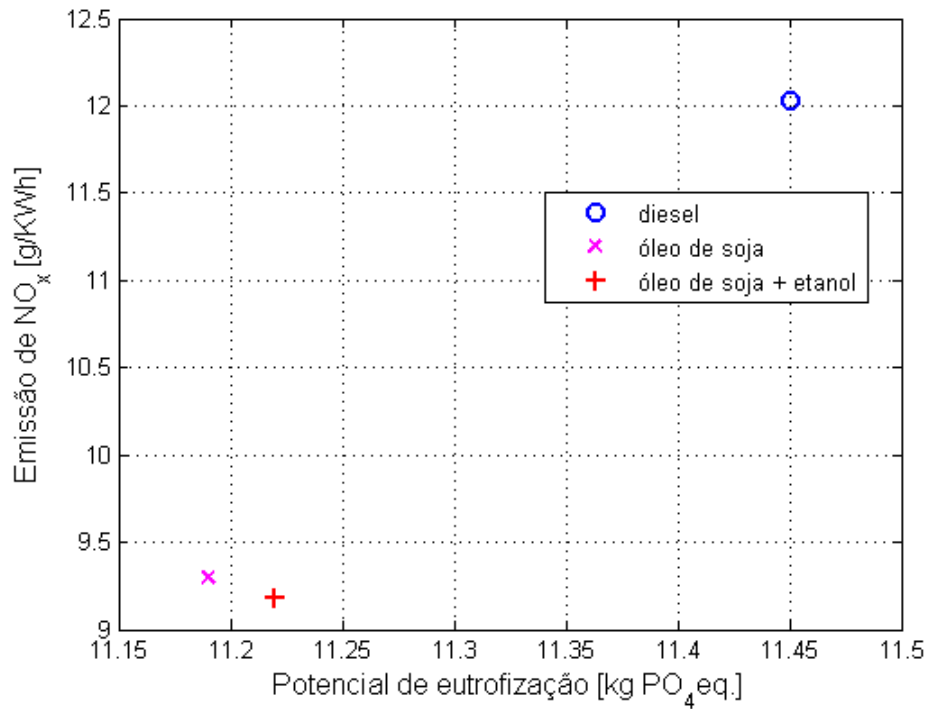


Figura 4.18: Resultados de emissões de NO<sub>x</sub> versus potencial de eutrofização

De forma semelhante a subsecção 4.3.3, o comportamento quanto a escolha do melhor combustível sob o ponto de vista geral é o óleo de soja. A análise segue o mesmo padrão lógico para a escolha do combustível.

#### 4.3.5 Consumo específico e Potencial de toxicidade humana

A Figura 4.19 caracteriza o cruzamento de dados de consumo específico e o potencial de toxicidade humana.

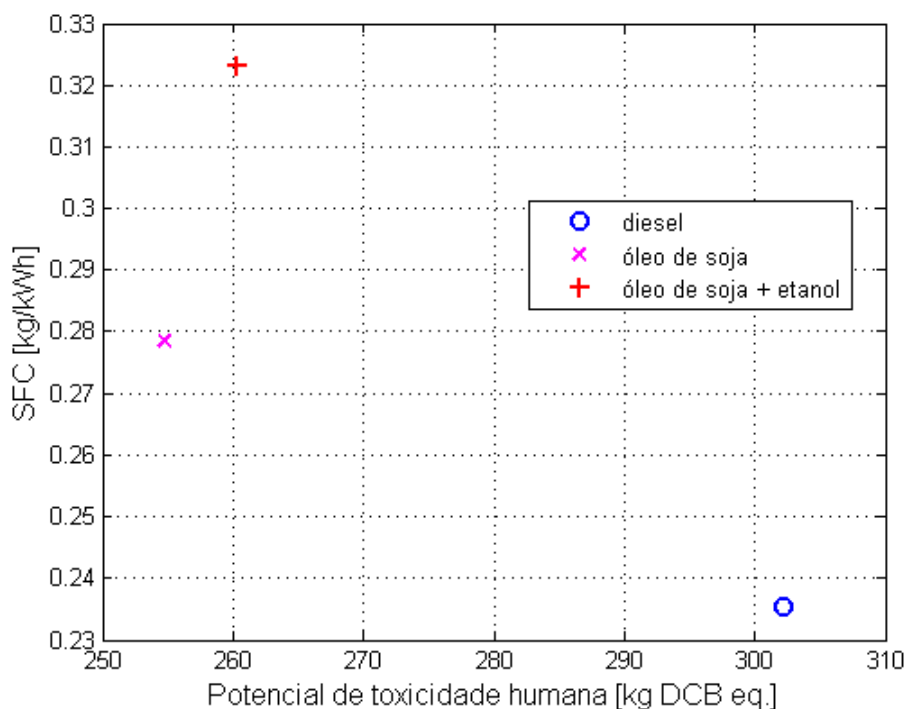


Figura 4.19: Resultados de consumo específico versus potencial de toxicidade humana

Inferre-se da figura acima o seguinte:

- O óleo de soja possui um consumo específico mediano e com o menor potencial de toxicidade humana;
- A mistura de óleo de soja possui o maior consumo e o potencial de toxicidade humana um pouco maior;
- O óleo diesel possui o menor consumo específico e o maior potencial de toxicidade humana.

Analisando, a melhor escolha do combustível a partir dessa figura é o óleo de soja. Tendo em vista em primeiro lugar a vida humana ou a sua sustentação, o óleo de soja é o combustível que gera o menor dano.

#### 4.3.6 Consumo específico e Potencial de toxicidade terrestre

A Figura 4.20 caracteriza o cruzamento de dados de consumo específico e o potencial de toxicidade terrestre.

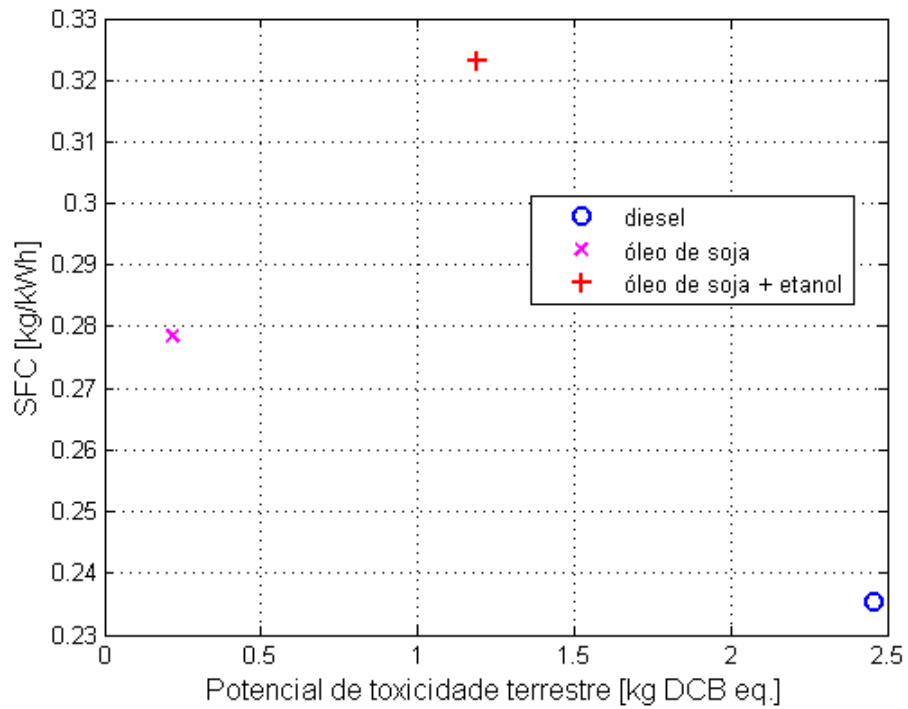


Figura 4.20: Resultados de consumo específico versus potencial de toxicidade terrestre

Do mesmo modo que a subseção 4.3.5 os resultados têm o mesmo comportamento e a mesma escolha do combustível ideal sob este cenário.

Percebe-se que o óleo de soja tem um potencial de toxicidade terrestre próximo de zero, dando uma caráter forte na sua escolha como combustível ideal.

## 5 Conclusões

Foi apresentado neste trabalho o estudo sobre a produção e a utilização de biocombustíveis nos motores diesel. Foi proposto e apresentado um estudo que considera toda a cadeia para a utilização de biocombustíveis desde o plantio até a sua utilização.

Foi apresentada outra alternativa de biocombustível através do estudo sendo esta a mistura de óleo de soja e etanol, visando uma redução de diversos gases poluentes. É observado as seguintes características:

- Acréscimo de emissão de  $\text{NO}_x$  em relação ao óleo de soja;
- Índices de emissão de  $\text{CO}_2$  são os mais elevados em relação aos outros combustíveis analisados;
- Consumo específico do biocombustível superior ao consumo específico do diesel e do óleo de soja.

Segundo Pimentel e Belchior (2009), as emissões se devem redução da taxa de compressão no motor. Porém, o equilíbrio taxa de compressão/emissão é uma questão para novos estudos. Propõem-se como roteiro para novos estudos experimentais o seguinte:

- Modificações no avanço de injeção de combustível;
- Modificações no débito de combustível;
- Modificações no desenho do pistão do motor.

Ao modificar estas variáveis, pode-se alcançar o equilíbrio esperado entre taxa de compressão/emissão. A partir desse equilíbrio é viável o rumo quanto ao desempenho ambiental esperado quanto as modificações no motor Diesel.

Em concomitância com os resultados experimentais, foram produzidos resultados ambientais pelo *software GaBi 4*. A avaliação de ciclo de vida para a produção de soja e produção de cana-de-açúcar demonstraram os seus resultados. Percebeu-se que a mistura de óleo de soja e etanol gera a maior fixação de carbono no solo, sendo essa a sua maior qualidade. Porém, ainda há necessidade de otimização dos seus rendimentos ambientais. E para minimizar as emissões dos gases poluentes em cada parte do processo, estudos aprofundados

sob os aspectos de captura de CO<sub>2</sub> em novos plantios para a produção do biocombustível se faz necessária.

Quanto ao impacto ambiental da atividade agrícola relacionado com o uso de terra ainda não há uma metodologia amplamente aceita. Uma vez que a ACV é uma metodologia que se baseia em fluxos de material e de energia, é difícil vinculá-la ao impacto sobre a biodiversidade. Muitos estudos de ACV de produtos agrícolas incluem como uso da terra somente a área necessária para a produção do produto em estudo sem nenhuma correlação com a biodiversidade.

Ao cruzar os resultados obtidos pela avaliação energética obtida experimentalmente no motor diesel com os resultados ambientais obtidos pelo *software GaBi 4* conclui-se:

- Sob o aspecto de mudanças climáticas, o melhor combustível a ser utilizado é a mistura de óleo de soja e etanol;
- Sob os aspectos de acidificação, eutrofização, toxicidades humana e terrestre, o melhor combustível a ser utilizado é o óleo de soja.

De uma maneira simples, a mistura de óleo de soja e etanol é vantajosa quando se trata de mudanças climáticas. Por produzir o maior potencial de captura de carbono, este combustível é a primeira escolha para a sua utilização.

Por produzir menores potenciais de agressão a terra e aos seres humanos, o óleo de soja puro possui propriedades melhores quando se trata em manter a vida microscópica e humana.

Em ambos os combustíveis, porém o seu consumo são os maiores diante do óleo diesel. Portanto, propõem-se novas alternativas para o desenvolvimento de novos motores diesel utilizando biocombustíveis.

Para propostas de futuros trabalhos visiona-se a melhoria das metodologias ambientais existentes ou a criação de novas metodologias - tais como dentro do estudo de ACV. E incluir o estudo da qualidade e quantidade da água na produção dos resíduos em cada parte do processo produtivo de ambas as lavouras. Assim envolve-se sempre aspectos ecológicos e termodinâmicos de toda a cadeia produtiva dos biocombustíveis. Pode-se, através de experimentação, determinar (para cada região ou lavoura da qual é o melhor biocombustível a ser produzido) os melhores números para o uso de insumos agrícolas.



# Referências Bibliográficas

- ABREU, Y. V. Estudo comparativo da eficiência energética da indústria da cerâmica de revestimento via úmida no Brasil e na Espanha. p. 135, 2003. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica)–Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- ABU-QUDAIS, M.; HADDAD, O.; QUDAISAT, M. The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emission. *Energy Conversion and Management*, v. 41, p. 389–399, 2000.
- AGARWAL, A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 33, p. 233–271, 2007.
- AGARWAL, D.; AGARWAL, A. K. Performance and emissions characteristics of jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering*, v. 27, p. 2314–2323, 2007.
- ALMEIDA, S. C. de et al. Performance of a diesel generator fuelled with palm oil. *Fuel*, v. 81, p. 2097–2102, 2002.
- ALTIN, R.; ÇETINKAYA, S.; YUCESU, H. S. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Conversion and Management*, v. 42, p. 529–538, 2001.
- ALVIM, C. et al. Energia final e equivalente - procedimento simplificado de conversão. *Revista Economia e Energia nr. 18*, nov. 2009. Disponível em: <<http://www.ecen.com/eee18/energui-.htm>>. Acesso em: 12 ago. 2006.
- BHATTACHARYYA, S.; REDDY, C. Vegetable oils as fuels for internal combustion engines: A review. *Journal of Agric. Engng. Res.*, v. 57, p. 157–166, 1994.
- BIODIESELBR. Portal do biodiesel. *BiodieselBR*, 2006. Disponível em: <<http://www-biodieselbr.com>>. Acesso em: 12 ago. 2006.
- BRASIL. *Óleos Vegetais: experiência de uso automotivo desenvolvida pelo programa OVEG I*. Centro de documentação da ANEEL: Brasília: STI, 1985. 344 p.

- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente–RESOLUÇÃO/conama/n.º 010. 14 de setembro 1989. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res%20-%20res89/res1089-.html>>. Acesso em: 01 nov. 2007.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia - Matrizes Energéticas Preliminares - Exercício de 2006. jul 2007. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/site/menu/select\\_main\\_menu\\_item-.do?channelId=1432&pageId=4040](http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item-.do?channelId=1432&pageId=4040)>. Acesso em: 13 jul. 2007.
- BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres - RNTRC em números: Idade média dos veículos. fev 2008. Disponível em: <[http://www.antt.gov.br/rntrc\\_numeros-/rntrc\\_idademedias\\_veiculos.asp](http://www.antt.gov.br/rntrc_numeros-/rntrc_idademedias_veiculos.asp)>. Acesso em: 13 fev. 2008.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Estatísticas: Culturas. mar 2008. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 16 mar. 2008.
- CADENAS, A.; CABEZUDO, S. Biofuels as sustainable technologies: perspectives for less developed countries. *Technol Forecast Social Change*, v. 58, p. 83–103, 1998.
- CALDEIRA-PIRES, A.; NOLETO, M. G.; MENDONÇA, R. M. de L. Fluxos mássicos de produção do complexo sucroalcooleiro brasileiro para exportação para o Japão. *Anais do 16º posmec - Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, v. 1, p. 8p, 2006.
- CAN Özer; ÇELIKTEN, I.; USTA, N. Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection diesel engine running at different injection pressures. *Energy Conversion and Management*, v. 45, p. 2429–2440, 2004.
- COELHO, C. N. Produção Agrícola Brasileira. *Ministério das Relações Exteriores*, mar. 2008. Disponível em: <<http://www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/web/port/economia/agric-/producao/index.htm>>. Acesso em: 16 mar. 2008.
- COLTRO, L. et al. *Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão*. [S.l.]: CETEA/ITAL, 2007. 75 p.
- DANESI, E. J.; JUNIOR, J. E. de A. Estudo experimental da queima de biodiesel e álcool em motores diesel no modo duplo combustível. p. 63, 2005. Relatório do projeto de graduação em Engenharia Mecânica–Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- DEMIRBAS, M.; BALAT, M. Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: A global perspective. *Applied Thermal Engineering*, v. 47, p. 2371–2381, 2006.
- EMBRAPA. EMBRAPA CANA. *Cana-de-açúcar*, jan. 2009. Disponível em: <[http://www-agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia8/AG01/arvore/AG01\\_453\\_217200392420.html](http://www-agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia8/AG01/arvore/AG01_453_217200392420.html)>. Acesso em: 15 jan. 2009.

- EMBRAPA. EMBRAPA SOJA. *Seca: Soja em carência de água*, jan. 2009. Disponível em: <<http://bioinfo.cnpso.embrapa.br/seca/index.php/ecofisiologia/zoneamento-agroclimatico>>. Acesso em: 15 jan. 2009.
- EUROPEAN COMMISSION. Biofuels in the European Union: A vision for 2030 and beyond. p. 1–39, 2006. Disponível em: <<http://biomatnet.org/publications/2061rep.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2006.
- FIESP. Federação das Indústrias de São Paulo. *Indicadores: Desempenho Ambiental da Indústria*, jan. 2009. Disponível em: <[http://www.fiesp.com.br/download/publicacoes\\_meio\\_ambiente/cartilha\\_indic\\_ambiental.pdf](http://www.fiesp.com.br/download/publicacoes_meio_ambiente/cartilha_indic_ambiental.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2009.
- FIGUEIREDO, M. C. B. Modelo de avaliação do desempenho ambiental de inovações tecnológicas agroindustriais, considerando o conceito de ciclo de vida e a vulnerabilidade ambiental: Ambitec-ciclo de vida. p. 424, 2008. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil)–Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- GOLDEMBERG, J. Energia, suas fontes e seus usos. 1983. Mimeo, SP.
- HANSEN, A. C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W. Ethanol-diesel fuel blends—a review. *Bioresour Technol*, v. 96, p. 277–285, 2005.
- HARWOOD, H. Oleochemicals as a fuel: Mechanical and economic feasibility. *JAACS*, v. 61, p. 315–324, 1984.
- HE, B.-Q. et al. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. *Atmospheric Environment*, v. 37, p. 4965–4971, 2003.
- IEA. IEA statistics. jan. 2008. Disponível em: <<http://www.iea.org/Textbase/stats/index%-.asp>>. Acesso em: 08 jan. 2008.
- JEFFERSON, M. Sustainable energy development: performance and prospects. *Renew Energy*, v. 31, p. 571–582, 2006.
- KIM, S.; DALE, B. E. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. *Biomass and Bioenergy*. June 2005.
- KNOTHE, G. et al. *Manual de Biodiesel*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- MA, F.; HANNA, M. Biodiesel production: a review. *Bioresour Technol*, v. 70, p. 1–15, 1999.
- MATTSON, B.; CEDERBERG, C.; BLIX, L. Agricultural land use in life cycle assessment (LCA): case studies of three vegetable oil crops. *Journal of Cleaner Production*, v. 8, p. 283–292, 2000.

- MENDONÇA, R. M. de L. Avaliação de ciclo de vida do carbono na queima de biodiesel à base de óleo de soja. p. 107, 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas)–Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- MOREIRA, J. R. Policies for promotion of new and renewable sources of energy. *CENBIO*, p. 1–26, 2002.
- MURPHY, J.; MCCARTHY, K. Etanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. *Applied Energy*, v. 82, p. 148–166, 2005.
- NARAYANASWAMY, V. et al. Methodological framework for application of environmental life cycle assessment (lca) to australian grains. 2003. Curtin University of Technology, Perth, Western Australia.
- NBR ISO 14040. *Associação Brasileira de Normas Técnicas - Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura*. Rio de Janeiro, 1997. 10 p.
- NBR ISO 3046/1. *Associação Brasileira de Normas Técnicas - Gestão ambiental: Condições - padrão de referência e declarações de potência e consumos de combustível e óleo lubrificante*. Rio de Janeiro, 1995. 15 p.
- NWAFOR, O. Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature. *Biomass and Bioenergy*, v. 27, p. 507–511, 2004.
- OZCIMEN, D.; KARAOSMANOGLU, F. Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake. *Renew Energy*, v. 29, p. 779–787, 2004.
- PASSOS, M. Avaliação de sustentabilidade aplicada ao biodiesel. p. 113, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? *Energy Policy*, v. 24, p. 355–390, 1996.
- PIMENTEL, V. S. B.; BELCHIOR, C. P. R. Análise e diagnose de diesel geradores operando com óleo de dendê “in natura”. *ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, jan. 2009. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100016&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100016&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 15 jan. 2009.
- PUGAZAHVADIVU, M.; JEYACHANDRAN, K. Investigations on the performance and exhaust emissions of a diesel engine using preheated waste frying oil as fuel. *Renewable Energy*, v. 30, p. 2189–2202, 2005.
- PUHAN, S. et al. Mahua (*Madhuca indica*) seed oil: a source of renewable energy in India. *Journal of scientific & industrial research*, v. 64, p. 890–896, 2005.

- RAMADHAS, A.; JAYARAJ, S.; MURALEEDHARAN, C. Use of vegetable oils as i.c. engine fuels-a review. *Renewable Energy*, v. 29, p. 727–742, 2004.
- REBITZER, G. et al. Life cycle assessment part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, v. 30, p. 701–720, 2004.
- REIJNDERS, L. Conditions for the sustainability of biomass based fuel use. *Energy Policy*, v. 34, p. 863–876, 2006.
- SANTOS, A. de O.; SOUZA, R. C. de. Óleos vegetais em substituição ao óleo diesel com combustível. *III CBE - III Congresso Brasileiro de Energia - In Proceedings*, v. 4, p. 1635–1641, 1984.
- SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. G. Substituição do diesel por óleos vegetais in natura em grupos geradores. *Revista Eletricidade Moderna*, ano XXX, 2002.
- SUBRAMANIAN, K. et al. Utilization of liquid biofuels in automotive diesel engines: An Indian perspective. *Biomass and Bioenergy*, v. 29, p. 65–72, 2005.
- TAKEDA, A. Levantamento de métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) e análise comparativa dos métodos mais utilizados. p. 151, 2008. Monografia apresentada ao curso de graduação em engenharia ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- TANIMOTO, A. H. Proposta de simbiose industrial para minimizar os resíduos sólidos no pólo petroquímico de Camaçari. p. 151, 2004. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo)–Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- VALE, A. T. do; SABLÓWSKI, A. R. M. Fluxo de energia e de massa na análise de eficiência da linha de produção de uma serraria de pequeno porte. 2006. *Ciência Florestal*, Santa Maria, Vol.16, n. 2, pp. 213-223.
- VENANZI, D.; SANTOS, A. M. dos; ALMEIDA, S. J. de. Aproveitamento dos óleos vegetais nos motores de ignição por compressão. *III CBE - III Congresso Brasileiro de Energia - In Proceedings*, v. 2, p. 843–851, 1984.
- VILLAR, S. C. et al. Considerações sobre a utilização de óleos vegetais para fins energéticos. *III CBE - III Congresso Brasileiro de Energia - In Proceedings*, v. 4, p. 1659–1666, 1984.
- WAHLUND, B.; YAN, J.; WESTERMARK, M. A total energy system of fuel upgrading by drying biomass feedstock for cogeneration: a case study of skelleftea bioenergy combine. *Biomass and Bioenergy*, v. 23, p. 271–281, 2002.

# A Anexos

## A.1 Tabelas

Tabela A.1: Problemas e soluções em potencial quanto o uso de óleos vegetais como combustíveis (HARWOOD, 1984; MA; HANNA, 1999)

Problema	Causa do provável do problema	Solução em potencial
<i>A Curto prazo</i>		
1. Em dias frios	Alta viscosidade, baixa porcentagem de cetano, e baixo ponto de fulgor dos óleos vegetais. Cinzas.	Pré-aquecimento do combustível antes da injeção. Outra maneira é transformar o óleo vegetal em um éster (biodiesel)
2. Colamento e formação de gomas nos filtros, linhas e nos bicos injetores	Gomas naturais (fosfateídos) nos óleos vegetais	Refino parcial do óleo para a remoção das gomas. Utilizar para 4 microns.
3. Travamento hidráulico	A taxa de cetano é muito baixa em certos óleos vegetais. Tempo de injeção impróprio	Ajustar o tempo de injeção. Pré-aquecimento do combustível antes da injeção é fundamental. Outra maneira é transformar o óleo vegetal em um éster (biodiesel)
<i>A Longo prazo</i>		
4. Cozimento dos injetores e depósitos de carbono no pistão e no cabeçote do motor	Alta viscosidade do óleo vegetal, combustão incompleta do combustível. Uma combustão pobre em cargas mais baixas	Aquecer o combustível antes da injeção. Mudar para o modo diesel quando operar em cargas menores. Outra maneira é transformar o óleo vegetal em um éster (biodiesel)
5. Uso excessivo do motor	Alta viscosidade, combustão incompleta do combustível. Combustão pobre em cargas baixas. Possibilidade de haver ácidos graxos no óleo vegetal. Contaminação do óleo de lubrificação.	Aquecer o combustível antes da injeção. Mudar para o modo diesel quando operar em cargas menores. Outra maneira é transformar o óleo vegetal em um éster (biodiesel). Diminuir o intervalo de troca do óleo de lubrificação do motor. Adicionar aditivos ao óleo de lubrificação do motor para inibir a oxidação.

Tabela A.2: Visão geral dos biocombustíveis, matérias primas e processos usados na sua produção (EUROPEAN COMMISSION, 2006).

**Biocombustíveis de primeira geração**

<b>Tipo de biocombustível</b>	<b>Nomes técnicos</b>	<b>Matéria prima de biomassa</b>	<b>Processo de produção</b>
Etanol	Bioetanol convencional	Açúcar de beterraba e grãos	hidrólise e fermentação
Óleo vegetal	Óleo puro da planta	culturas com base em óleos	prensagem a frio para extração
Biodiesel	Biodiesel obtido através de resíduos de processos	culturas com base em óleos	prensagem a frio para extração e transesterificação
Biodiesel	Biodiesel obtido através de óleo vegetal usado e gordura animal	Resíduos de óleo vegetal ou animal	transesterificação
Biogás	Biogás atual	Biomassa (úmida)	digestão
Bio-ETBE		Bioetanol	síntese química

**Biocombustíveis de segunda geração**

<b>Tipo de biocombustível</b>	<b>Nomes técnicos</b>	<b>Matéria prima de biomassa</b>	<b>Processo de produção</b>
Bioetanol	bioetanol celulósico	material lignocelulósico	fermentação e hidrólise avançadas
Biocombustíveis sintéticos	biomassa líquida, Fischer-Tropsch (FT) diesel, Biodiesel sintético, Biometanol, Biodimetiléter	material lignocelulósico	gaseificação e síntese
Biodiesel	Biodiesel tratado	Óleos vegetais e gordura animal	hidrotratamento
Biogás	Gás natural sintético	material lignocelulósico	gaseificação e síntese
Biohidrogênio		material lignocelulósico	gaseificação e síntese ou processos biológicos