



SECRETARIA DE ESTADO
DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO DO RIO DE JANEIRO



**Fundação de Amparo a Pesquisa do
Estado do Rio de Janeiro**



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia



Programa de Engenharia de Transportes - PET

RELATÓRIO DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Processo E-26/171.231/2006

**INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV) COMO
FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA A LOGÍSTICA
DE SUPRIMENTO DE ENERGIA PARA O
TRANSPORTE.**

O CASO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

SETEMBRO DE 2008

EQUIPE:

COORDENADAÇÃO:

Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc
Engenheiro Mecânico e de Automóveis/Professor Adjunto
Programa de Engenharia de Transportes/COPPE/UFRJ

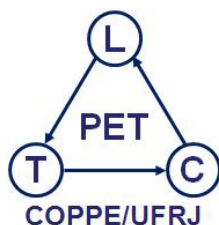
APOIO TÉCNICO E ADMINISTRATIVO:

Lísia Carla Almeida Jacques – pesquisas, contatos e levantamentos de informações.
Administradora de Empresas

Nícia Celis Agosto de Almeida – revisão do texto.
Professora



Programa de Engenharia de Transportes/COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia
Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H, sala 106, Ilha do Fundão
Rio de Janeiro, RJ, CEP.: 21941-914



Laboratório de Transporte de Carga/PET/COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia
Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H, sala 117, Gabinete 2,
Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, CEP.: 21941-914

ÍNDICE

1. APRESENTAÇÃO	5
2. INTRODUÇÃO	6
2.1. JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA	7
2.2. OBJETIVOS.....	8
2.3. METODOLOGIA	9
3. FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO	11
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
3.2. APRESENTAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO	11
3.2.1. As fontes de energia convencionais.	16
3.2.2. O gás natural (GN)	29
3.2.3. O etanol	42
3.2.4. O Biodiesel.	55
4. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA APLICADO AS FONTES DE ENERGIA PARA TRANSPORTE – PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO	70
4.1. BASE TEÓRICA	70
4.2. PROCEDIMENTO PARA COMPARAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE.....	74
4.2.1. FASE 1: Objetivo e escopo	74
4.2.2. FASE 2: Análise do inventário	76
4.2.3. FASE 3: Avaliação dos dados	76
4.2.4. FASE 4: Comparação dos resultados	77
5. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO	78
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	78
5.2. FASE 1: OBJETIVO E ESCOPO	78
5.2.1 FASE 1 – ETAPA 1 - Abrangência	78
5.2.2 FASE 1 – ETAPA 2 - Dimensões	81
5.3. FASE 2: ANÁLISE DO INVENTÁRIO	86
5.3.1. Combustíveis fósseis - derivados do petróleo e gás natural	91
5.3.2. Biocombustíveis – Etanol de Cana-de-Açúcar	93
5.3.3. Biocombustíveis – Biodiesel	94
5.3.4. Uso Final	95
5.4. FASE 3: AVALIAÇÃO DOS DADOS	95

5.5. FASE 4: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
BIBLIOGRAFIA.....	105

1. APRESENTAÇÃO

Este Relatório de Pesquisa tem a finalidade de atender aos requisitos parciais do Processo E-26/171.231/2006 que envolve o Projeto de Pesquisa financiado pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ intitulado Inventário de Ciclo de Vida (ICV) como Ferramenta Estratégica para a Logística de Suprimento de Energia para o Transporte.

Esse conteúdo foi elaborado com base na proposta inicial e divide-se em Introdução, onde são apresentados a proposta inicial e os condicionantes da pesquisa; um detalhamento teórico das fontes de energia para transportes, com ênfase naquelas utilizadas no Brasil e em particular no Rio de Janeiro; uma pesquisa bibliográfica sobre Análise de Ciclo de Vida aplicada à escolha de alternativas de fonte de energia para transportes; a proposta de um procedimento de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e sua aplicação considerando a realidade atual do estado do Rio de Janeiro e considerações finais.

Todo o material de pesquisa encontra-se em um CD na forma de anexo eletrônico.

Agradecemos a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ pelo apoio financeiro a mais este Projeto.

2. INTRODUÇÃO

No Brasil, a taxa de motorização cresceu mais de 100% no período de 1980 a 2000 (IBGE, 2002; DENATRAN, 2001; ABDETRAN, 2000). Esta tendência levou ao aumento do consumo de combustíveis derivados do petróleo, fonte energética convencional para o transporte rodoviário, com crescimento de 60% no período de 1990 a 2000, dos quais cerca de 88% foram destinados ao transporte rodoviário (MME, 2002).

Não há indícios de que esta tendência vá se reverter nos próximos 50 anos e o uso de combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural, devem continuar crescendo. Por outro lado, aumenta a consciência social para a promoção do desenvolvimento sustentável, em particular no que se refere aos aspectos relacionados à eficiência no suprimento e uso final de energia para transportes.

O Estado do Rio de Janeiro é responsável por cerca de 85% da produção nacional de petróleo e gás natural associado contando com o maior campo de exploração destes combustíveis no Brasil, a Bacia de Campos, e uma das maiores refinarias da Petrobras, a Refinaria de Duque de Caxias. Além disso, como fruto de esforço recente do Governo do Estado do Rio de Janeiro no fomento ao crescimento econômico do Rio de Janeiro, a Petrobras deverá investir na construção de uma nova refinaria na região de Itaboraí.

O quadro acima determina a vocação do Estado do Rio de Janeiro para o desenvolvimento e aprimoramento da cadeia de suprimento de combustíveis derivados do petróleo e do gás natural. Como estas são fontes de energia esgotáveis, com reservas limitadas, que podem durar por mais cerca de 20 anos, o aprimoramento da eficiência econômica, ambiental e social desta atividade exploratória é de fundamental importância.

A partir de uma visão estratégica, o Governo do Estado do Rio de Janeiro tem investido esforços na diversificação da matriz energética do Estado, principalmente por meio do incentivo à produção de biocombustíveis. Neste sentido, o Norte Fluminense pode despontar como pólo produtor de etanol (álcool etílico) para uso automotivo, com capacidade para suprir as necessidades do Estado.

Outra iniciativa pioneira do Governo do Estado do Rio de Janeiro, por meio de importante trabalho da Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI) é o Programa

RioBiodiesel que já está trabalhando no sentido de viabilizar a produção de biodiesel a partir do óleo de soja e de 24 outras oleaginosas como o amendoim, gergelim, girassol e nabo forrageiro. O Programa RioBiodiesel prevê atuação diversificada nas diferentes regiões do Estado, aproveitando as particularidades e potencialidades do Norte Fluminenses, Região Metropolitana e Sul Fluminense.

A avaliação e comparação destas alternativas pode se beneficiar da ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV) capaz de considerar em sua totalidade ou parcialmente, os recursos energéticos, as matérias-primas, os recursos naturais e os impactos ambientais ao longo de toda a cadeia de suprimento e uso final das alternativas de fontes de energia para transporte. A técnica de ACV é capaz de oferecer uma visão ampla sobre o alcance e as limitações de cada alternativa, em sintonia com a filosofia de desenvolvimento sustentável, representando um poderoso diferencial como ferramenta de planejamento estratégico.

2.1. Justificativa da proposta

Nos países em desenvolvimento, a técnica de ACV ainda é pouco praticada. Porém, sua difusão como ferramenta para a escolha de fontes de energia para o transporte deve evitar a reprodução de modelos elaborados com base na realidade dos países desenvolvidos, pois é comum que a produção de combustíveis alternativos derive de soluções locais, não se aplicando a um país o modelo adequado a outro. Esta consideração se torna ainda mais crítica quando se utilizam nos países em desenvolvimento dados adequados à realidade dos países desenvolvidos. Um melhor aproveitamento da técnica de ACV depende de considerações que se aplicam especificamente à realidade de cada sociedade por meio do desenvolvimento de um procedimento específico capaz de equilibrar os benefícios e limitações da técnica e proporcionar uma ferramenta adequada à tomada de decisão.

Em trabalho elaborado por D'AGOSTO (2004), foram desenvolvidos os modelos de ciclo de vida (MCV) para fontes de energia para o transporte, considerando a aplicação da ferramenta de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), em parte relacionada com a Análise de Ciclo de Vida (ACV). Este trabalho representou um esforço em homogeneizar a comparação dos ciclos de vidas das fontes de energia para os transportes em busca de uma forma de comparação mais equitativa.

No mesmo trabalho (D'AGOSTO, 2004), foi feita a comparação entre 5 fontes de energia para o transporte rodoviário – gasolina C, óleo diesel, gás natural comprimido, etanol hidratado e éster metílico de óleo de soja (EMOS)– considerando a realidade do Município do Rio de

Janeiro. Embora a frota de automóveis, caminhões e ônibus do Município do Rio de Janeiro consuma os derivados de petróleo e gás natural processados a partir da Bacia de Campos, observa-se a importação de etanol hidratado do Estado de São Paulo. Além disso, para o EMOS, o modelo hipotético estabelecido no estudo de caso também considerou a importação de óleo de soja dos estados produtores – São Paulo e Minas Gerais.

A produção de etanol hidratado e de insumos oleaginosos para o biodiesel no Estado do Rio de Janeiro representa importante oportunidade de melhoria na eficiência econômica das cadeias de suprimento destas fontes de energia, além de gerar emprego e renda para a população Fluminense. Considerando a evolução de todas as iniciativas apresentadas na Introdução desta proposta, entende-se que já seja possível reavaliar o estudo inicial de D'AGOSTO (2004), considerando os potenciais benefícios da atual política energética do Governo do Estado do Rio de Janeiro.

Adicionalmente, a visão da logística da cadeia de suprimento e o tratamento sistêmico das alternativas de movimentação dos produtos são pontos críticos na análise do ciclo de vida que demonstram a importância do tratamento deste tema sob o enfoque do planejamento de transporte de carga.

Vale lembrar que o trabalho de D'AGOSTO (2004) foi desenvolvido como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes pela COPPE/UFRJ, sendo a tese de doutorado realizada nos dois últimos anos com apoio de bolsa Doutorado-Bolsa Nota 10, outorgada pela FAPERJ por meio do processo E-26/150.613/2002. Assim sendo, a aprovação da presente proposta representaria a natural continuidade do trabalho, com um enfoque ainda mais profundo sobre a realidade do Estado do Rio de Janeiro.

Além disso, este projeto pode ser considerado complementar aos estudos que estão sendo desenvolvidos especificamente no âmbito do Programa RioBiodiesel e que tratam dos estudos de viabilidade técnica-econômica e de logística do referido programa.

2.2. Objetivos

Originalmente esta pesquisa tinha como objetivo principal desenvolver um procedimento para aplicação do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) como ferramenta de apoio ao planejamento estratégico das cadeias de suprimento de fontes de energia para o transporte no Estado do Rio de Janeiro.

Como objetivos adicionais destacavam-se:

1. Análise de forma sistemática e crítica da cadeia de suprimento das fontes de energia para o transporte, destacando a importância e a representatividade dos processos envolvidos com ênfase na atividade de transporte;
2. Elaboração de modelos de cadeias de suprimento de fontes de energia para os transportes que considerem a realidade do Estado do Rio de Janeiro, envolvendo não apenas a vocação para a produção de derivados de petróleo e gás natural, como também os biocombustíveis, tais como etanol e biodiesel;
3. Elaboração e disponibilização de um banco de dados na forma de inventários de ciclo de vida para as cadeias de suprimento de fontes de energia para o transporte que considere as particularidades do Estado do Rio de Janeiro.

Por conta da redução em 75% dos recursos solicitados à FAPERJ, e não existindo outro órgão de fomento apoiando esta pesquisa, optou-se por reduzir os objetivos adicionais aos itens 1 e 2 anteriormente relacionados, tendo em vista a indisponibilidade de recursos para elaborar o levantamento de campo e o processamento dos dados necessários à elaboração de um banco de dados. Adicionalmente, o objetivo principal e os objetivos adicionais tiveram seu alcance limitado por pesquisa de dados em nível de fontes secundárias e com enfoque no consumo de energia.

2.3. Metodologia

Com base na proposta original e em função do corte de orçamento já exposto no item 2.2, a metodologia adotada nesta pesquisa baseou-se parcialmente no trabalho de Menon et al. (1999), definida como *Discovery Oriented Approach*, considerando a aplicação de uma perspectiva baseada na visão acadêmica e no estudo do estado da arte, onde se busca identificar e analisar os conceitos teóricos ligados ao tema por meio de dados secundários encontrados na literatura nacional e estrangeira, realizando-se um estudo exploratório baseado em revisão bibliográfica em duas fases.

- a. Fase 1 – Assuntos relativos à revisão do trabalho de D’AGOSTO (2004) considerando a adequação dos modelos de ciclo de vida já estabelecidos à realidade do Estado do Rio de Janeiro;
- b. Fase 2 – Aprimoramento dos dados referentes ao ciclo de vida de biocombustíveis considerando a realidade do Estado do Rio de Janeiro.

Como resultado da Fase 1, pretende-se aprofundar os conhecimentos específicos da aplicação do procedimento desenvolvido por D'AGOSTO (2004) apresentando uma proposta preliminar de modelo de cadeia de suprimento para as fontes de energia para transportes a ser aprimorado, aplicando-se os conceitos identificados na Fase 2.

A cadeia de suprimento dos combustíveis derivados do petróleo e do gás natural, pela sua representatividade e sedimentação no mercado Fluminense poderá servir de referência natural para os resultados encontrados para os biocombustíveis.

Adicionalmente, é prática adotar a comparação dos resultados encontrados com a experiência internacional e com os resultados obtidos em outras regiões do Brasil que apresentem parâmetros análogos.

3. FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO

3.1.Considerações iniciais

O principal objetivo deste item é apresentar as fontes de energia para o transporte rodoviário, identificando aquelas que além de se adequarem ao sistema de propulsão convencional se adequam a algum sistema de propulsão não convencional.

Um breve histórico é apresentado de modo a ilustrar alguns dos motivos que levaram tanto à adoção da gasolina e do óleo diesel como fontes convencionais de energia para o transporte rodoviário quanto à difusão do motor alternativo de combustão interna (MCI) como principal elemento do sistema de propulsão dos veículos rodoviários. Seus argumentos reforçam a inter-relação entre a fonte de energia e o sistema de propulsão.

Os conceitos de fonte convencional e fonte alternativa de energia para o transporte rodoviário são apresentados previamente ao detalhamento das opções, de modo a destacar seu significado e tornar clara a diferença de situação entre o Brasil e os demais países do mundo.

O enfoque empregado parte do geral para o específico e procurou-se considerar, sempre que possível, como estas alternativas se aplicam à realidade brasileira.

3.2.Apresentação das fontes de energia para o transporte rodoviário

No século XVII a Revolução Industrial trouxe consigo grandes progressos no domínio da energia proveniente da queima, principalmente do carvão, em máquinas movidas a vapor. Estas máquinas inicialmente só se prestavam ao uso industrial e no caso do transporte por terra, a tração ferroviária; em função principalmente da alta relação peso/potência e da necessidade de armazenamento de grande volume de combustível.

Somente com o nascimento do motor de combustão interna, em meados de 1860, pelas mãos do inventor francês Jean-Joseph-Étienne Lenoir, provava-se a viabilidade de construir uma máquina capaz de utilizar um combustível fácil de armazenar e com grande potencial energético se comparado com as fontes disponíveis na época. Este motor foi inicialmente movido a gás de iluminação e posteriormente foi adaptado ao uso de petróleo cru; porém com potência limitada a 3 cv (cavalos-vapor). Coube a outro francês, Beau de Rochas, aperfeiçoar o motor de Lenoir e

criar o motor de combustão interna de quatro tempos de funcionamento, similar ao motor moderno. Porém a difusão da aplicação deste invento ficou a cargo do alemão Nikolaus August Otto; que patenteou o denominado motor alternativo de combustão interna por centelhamento com quatro tempos de funcionamento em 1876 (DUCASSÉ, 1961, OBERT, 1971, ASIMOV, 1993).

Ao desenvolvimento do motor a combustão interna segue-se a utilização da gasolina como combustível, tendo sido incessantes os melhoramentos posteriormente introduzidos ao seu funcionamento. Estes melhoramentos só vieram reforçar sua qualidade fundamental; desenvolver, com pouco peso da máquina e do combustível, uma potência utilizável muito maior que a fornecida por uma máquina a vapor de dimensões semelhantes. Ao vencer a grande corrida Paris-Bordeaux-Paris em 1895, o automóvel de *Panhard & Levassor* demonstrou esta propriedade que permitiu o nascimento e o progresso do transporte rodoviário (WRIGHT, 1990).

A margem destes acontecimentos, outro alemão, Rudolphe C. K. Diesel desenvolveu e patenteou em 1895 o motor que viria a ser universalmente utilizado em veículos rodoviários pesados. Trata-se do motor alternativo de combustão interna de ignição por compressão, que passou a utilizar como combustível um derivado do petróleo que levou o nome do idealizador do motor: óleo diesel (ASIMOV, 1993)

A despeito disso, na virada do século XIX, os Estados Unidos, que se transformariam no berço da indústria automobilística mundial, tinham somente 22% de sua frota de automóveis movidos a gasolina. O restante da frota se dividia entre veículos movidos a vapor (40%) e veículos movidos a energia elétrica (38%) (WRIGHT, 1990). Surpreende o alto percentual de veículos movidos a energia elétrica, fonte que foi quase integralmente substituída pelo petróleo.

Em 1901, a descoberta de vasta reserva de petróleo em Beaumont no Texas colocou os carros movidos a gasolina e os Estados Unidos na liderança da indústria automobilística mundial. A vasta disponibilidade de gasolina a preço baixo, considerada como um subproduto do refino do petróleo, cujo principal derivado na época era o querosene iluminante, foi sem dúvida um dos principais fatores que promoveu o subsequente sucesso dos motores de combustão interna para os veículos rodoviários (WRIGHT, 1990).

Tanto os veículos à vapor quanto os veículos elétricos tinham características que agradavam os usuários da época, como pouco ruído e boa dirigibilidade. Porém, além do baixo preço da

gasolina, algumas limitações, como demora na partida e complexidade de operação (propulsão a vapor) e baixa autonomia (propulsão elétrica) também corroboraram para a difusão dos MCI. Com o advento do motor de partida elétrico, os motores de combustão interna atingiram uma combinação de economia, autonomia e facilidade de operação que as demais alternativas não podiam atingir, dominando o mercado. O desenvolvimento subsequente resultou em equipamentos duráveis e confiáveis (WRIGHT, 1990, BECHTOLD, 1997)

A dependência dos derivados do petróleo como fonte de energia convencional para o transporte rodoviário está relacionada ao contexto histórico brevemente descrito anteriormente e tudo indica que o MCI, base da tecnologia de propulsão dos automóveis modernos, dominará o mercado pelos próximos 50 anos, principalmente nos países em desenvolvimento (WALTERS, 1992, OECD/IEA, 1993, IEA, 1999, RIBEIRO *et al.*, 2002). Esta situação apresenta dois inconvenientes. O primeiro de cunho estratégico, em função da dependência de um recurso esgotável e cujas reservas estão distribuídas de forma heterogênea no mundo, com a maior parte das reservas de óleo provadas e prováveis¹ localizadas no Oriente Médio (BENTLEY, 2002). O segundo de cunho ambiental, decorrente da emissão de poluentes atmosféricos locais, regionais e globais por conta da queima dos combustíveis derivados do petróleo.

Para minimizar estes inconvenientes faz-se esforços no sentido de: (1) utilizar melhor os recursos energéticos convencionais, aprimorando a sua cadeia de suprimento e uso final, sem comprometer o serviço prestado – deslocamento de pessoas e bens; (2) encontrar recursos energéticos alternativos que proporcionem resultado semelhante ao obtido com os recursos convencionais associados à uma forma racional de suprimento e uso final.

Define-se fonte alternativa de energia para o transporte rodoviário como aquela diferente da convencionalmente empregada no uso final em uma determinada região de estudo e que tenha sua viabilidade técnica comprovada. Esta concepção é suficientemente ampla para permitir uma abordagem regionalizada e a inclusão de fontes de energia que ainda se encontram em estágio de comprovação de viabilidade econômica.

¹ Reserva provada é o volume de energético de reserva conhecida, que pela análise dos dados de geologia e de engenharia pode ser estimado com razoável certeza de ser recuperável comercialmente, sob as condições econômicas regulamentares e com métodos de recuperação vigentes na época da avaliação. Reserva provável: volume de energético não provado, cuja análise dos dados de geologia e de engenharia sugerem que há um maior risco na sua recuperação em relação à reserva provada (THOMAS, 2001).

O exemplo brasileiro mostra que características regionais apropriadas para a cultura de cana-de-açúcar, acrescidas de circunstâncias políticas e econômicas favoráveis, favoreceram o uso de etanol (álcool da cana-de-açúcar) como combustível em escala não encontrada em nenhum outro lugar do mundo (MOREIRA e GOLDEMBERG, 2003), criando uma fonte alternativa de energia ao uso de gasolina em automóveis de passageiros.

A experiência norte americana (U.S. DOE, 2001) mostra que mesmo que uma determinada tecnologia para o transporte rodoviário não tenha sua viabilidade econômica amplamente comprovada, seu uso pode ser economicamente viável em um nicho de mercado específico. Isso também se aplica ao Brasil. O uso de gás natural comprimido (GNC) apresenta viabilidade técnica como substituto da gasolina e do óleo diesel, porém, até o momento só apresentou viabilidade econômica na substituição da gasolina, em veículos bicomcombustível convertidos para uso de GNC (RIBEIRO *et al.*, 2001a).

Fontes convencionais de energia são aquelas utilizadas na maior parte da frota de veículos de uma região. Para o transporte rodoviário, considera-se em todo o mundo que as fontes convencionais de energia são a gasolina e o óleo diesel derivados do petróleo. A Tabela 3.1, elaborada a partir dos trabalhos de ACIOLI (1994), RILEY (1994), POULTON (1994a), FAIZ *et al.* (1996), BELCHTOLD (1997), IEA (1999), SHEEHAN *et al.* (1998), RISTINEN e KRAUSHAAR (1999), DECICCO *et al.* (2000), WISER (2000), ARMSTRONG e AKHURST (2000), RUBIN (2001), HACKNEY e NEUFVILLE (2001), KREITH *et al.* (2002); DECICCO e KLIESH (2003), sintetiza as fontes de energia para o transporte rodoviário atuais.

Tabela 3.1. Fontes de energia para o transporte rodoviário.

Classificação	Fonte de energia	Processos de produção usual	Tipo do recurso	Formas de uso final da energia
Convencionais	Gasolina	Refino do petróleo	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por centelhamento (ICE) em sistema de propulsão convencional ou híbrido. Utilização em pilhas a combustível para tração elétrica. ⁽⁶⁾
	Óleo diesel	Refino do petróleo	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por compressão (ICO) em sistema de propulsão convencional ou híbrido.
Alternativas ⁽⁸⁾	Gasolina ⁽¹⁾	Processo petroquímico ou síntese	Não renovável	Idem gasolina convencional.
	Óleo diesel ⁽²⁾	Processo petroquímico ou síntese a partir de gás natural ou carvão ⁽³⁾	Não renovável	Idem óleo diesel convencional.
	Gás liquefeito de petróleo (GLP)	Refino de petróleo, processo petroquímico, separação e/ou síntese a partir do gás natural	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por centelhamento (ICE) em sistema de propulsão convencional ou híbrido. Normalmente utilizado na forma bicombustível com gasolina.
	Gás natural (GN)	Purificação e desumidificação do recurso natural e compressão (gás natural comprimido - GNC) ou resfriamento (gás natural liquefeito - GNL)	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por centelhamento (ICE) e em sistema de propulsão convencional ou híbrido. Normalmente utilizado na forma bicombustível com gasolina. Utilização em pilha a combustível para tração elétrica ⁽⁶⁾ .
	Biogás	Biodigestão anaeróbica de biomassa	Renovável	Combustível para MCI de ignição por centelhamento (ICE) em sistema de propulsão convencional ou híbrido. Normalmente utilizado na forma bicombustível com gasolina. Utilização em pilha a combustível para tração elétrica ⁽⁶⁾ .
	Metanol	Síntese química a partir do carvão ou do gás natural	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por centelhamento (ICE) em sistema de propulsão convencional ou híbrido. Pode ser utilizado na forma de mistura com gasolina ⁽⁴⁾ . Utilização em pilha a combustível para tração elétrica ⁽⁶⁾ .
		Fracionamento e destilação de biomassa (madeira), síntese química a partir do biogás	Renovável	
	Etanol	Síntese química a partir de gás natural ou petróleo	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por centelhamento (ICE) em sistema de propulsão convencional ou híbrido. Pode ser utilizado na forma de mistura com gasolina ⁽⁴⁾ ou óleo diesel ⁽⁵⁾ . Utilização em pilha a combustível para tração elétrica ⁽⁶⁾ .
		Processamento e destilação de biomassa (cana-de-açúcar, mandioca, milho etc)	Renovável	
	Óleos vegetais	Extração de óleo a partir de biomassa oleaginosa	Renovável	Combustível para MCI de ignição por compressão ⁽⁷⁾ (ICO) em sistema de propulsão convencional ou híbrido.
	Biodiesel	Conversão de óleo obtido a partir de biomassa oleaginosa	Renovável	Combustível para MCI de ignição por compressão (ICO) em sistema de propulsão convencional ou híbrido. Pode ser utilizado na forma de mistura com óleo diesel.
	Hidrogênio	Reforma a vapor a partir de carvão, petróleo ou GN.	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por centelhamento (ICE) em sistema de propulsão convencional. Ideal para utilização em pilha a combustível para tração elétrica.
		Eletrolise da água ou reforma de combustível renovável	Renovável ⁽⁹⁾	
	Eletricidade	Geração hidrelétrica	Renovável	Utilização em sistemas de propulsão exclusivamente elétrico (elétrico com baterias ou captação em redes aéreas)..
		Geração termelétrica	Não renovável	

Notas: (1) Inclui gasolinas reformuladas com redução de aromáticos e adição de compostos oxigenados derivados do petróleo; (2) Inclui óleo diesel com baixo teor de enxofre; (3) Pode ser obtido do biogás, quando será renovável; (4) Pode dispor de um MCI dedicado à mistura ou com tecnologia *flexible-fuel*, (5) Por meio de um aditivo emulsionante (tecnologia em fase de testes e desenvolvimento); (6) uso de reformador embarcado; (7) Motor ICO adaptado ou motor Erbest; (8) Pela pequena incidência nas referências consultadas, não se considerou o uso de DME – Dimetil éter; (9) Considerando geração hidrelétrica. Fonte: elaboração própria.

Observa-se que com exceção da eletricidade, as demais opções admitem o emprego do sistema de propulsão convencional, composto pelo motor alternativo de combustão interna (MCI) e sistema de transmissão mecânica (STM), o que ratifica a hipótese anterior de que esta configuração de sistema de propulsão será dominante no transporte rodoviário ainda por muitos anos.

Além de classificar as fontes de energia como convencionais ou alternativas, especificou-se aquelas consideradas renováveis. Este conceito está associado ao tempo necessário para transformar a energia liberada pelo sol em alguma forma de energia aplicável ao transporte. No caso das fontes de energia não renováveis, como os combustíveis de origem fóssil (petróleo, gás natural, carvão etc), este tempo ocorre em escala geológica. Para as fontes de energia renováveis, como os combustíveis de origem na biomassa, este tempo ocorre numa escala que pode ser reproduzida pelo homem (SHEEHAN *et al.*, 1998).

As condições geográficas e climáticas brasileiras, onde se observa em média o dobro de produtividade agrícola que no resto do mundo (NOGUEIRA e LORA, 2001), permitem privilegiar as fontes de energia renovável oriundas da biomassa (biocombustíveis), responsáveis pela geração de empregos no campo, em alguns casos de forma intensiva, com reflexos econômicos e sociais positivos.

Além disso, os biocombustíveis se aplicam tanto aos sistemas de propulsão convencionais, o que permite a sua implantação com pequeno esforço, quanto à sistemas de propulsão não convencionais e de tecnologia avançada, como por exemplo o uso de etanol para alimentar pilhas a combustível, favorecendo o desenvolvimento de tecnologia de ponta no país.

Por serem as alternativas amplamente utilizadas, a gasolina e o óleo diesel derivados do petróleo são recursos disponíveis no mundo todo e normalmente são adotados como referência de comparação, sendo necessário um maior detalhamento de sua cadeia de suprimento e uso final. Além destes, outras opções que se mostram atrativas para a realidade brasileira atual também serão detalhadas a seguir, com destaque para os biocombustíveis.

3.2.1. As fontes de energia convencionais.

Para o transporte rodoviário as fontes de energia convencionais são a gasolina e o óleo diesel derivados do petróleo. Em ambos os casos tratam-se de misturas de substâncias cujas moléculas são compostas de carbono (C) e hidrogênio (H) denominadas de hidrocarbonetos.

O petróleo bruto é uma mistura de grande variedade de hidrocarbonetos, incluindo de gases leves, de estrutura química simples, como o gás natural, até líquidos pesados, de estrutura química complexa, como o alcatrão, como pode ser visto na Tabela 3.2 (ACIOLI, 1994, THOMAS, 2001).

Tabela 3.2. Classificação das frações do petróleo em função da quantidade de carbono.

Número de átomos de carbono nas moléculas	Faixa de destilação [°C]	Frações típicas ⁽¹⁾
1 a 4	Até 40	Gases
5 a 10	40 – 175	Gasolina
11 a 12	175 – 235	Querosene
13 a 17	235 – 305	Gasóleo leve
18 a 25	305 – 400	Gasóleo pesado
26 a 38	400 – 510	Lubrificantes
> 38	> 510	Asfalto e resíduos

Nota: (1) O óleo diesel apresenta faixa de destilação entre 250 e 400°C (ANP, 2000).

Fonte: elaboração própria a partir de ACIOLI (1994) e THOMAS (2001).

Os valores apresentados na Tabela 3.2 variam e a composição da gasolina pode incluir substâncias com 4 até 12 átomos de carbono² (ACIOLI, 1994, THOMAS 2001), consideradas como frações líquidas leves do petróleo. Para o óleo diesel, existe ainda maior tolerância, podendo ser consideradas misturas de hidrocarbonetos com cadeia de 6 a 30 átomos de carbono, sendo ligeiramente mais denso que o querosene e destilando na faixa de 250°C a 400°C (SANTOS, 2000, ANP, 2000).

Tanto a gasolina como o óleo diesel se apresentam no estado líquido a temperatura e pressão ambiente e suas propriedades físico-químicas os tornam bastante propícios para o uso como fonte de energia para o transporte rodoviário na quase totalidade das condições de uso em todo o mundo. A composição básica destes combustíveis permanece praticamente inalterada desde o surgimento dos motores de combustão interna.

No Brasil a Agência Nacional do Petróleo (ANP) por meio da Portaria nº 309 de 27/12/2001 estabelece as especificações das gasolinas automotivas destinadas ao consumidor final, comercializadas pelos diversos agentes econômicos em todo o território nacional, consoante as disposições contidas no Regulamento Técnico ANP nº 5/2001. Para efeitos desta Portaria as gasolinas automotivas se classificam por tipo em:

- ♦ Gasolina A - é a produzida no País, a importada ou a formulada pelos agentes econômicos autorizados para cada caso, isenta de componentes oxigenados e que atenda ao Regulamento

Técnico;

- ♦ Gasolina C - é aquela constituída de gasolina A e álcool etílico anidro combustível (AEAC), nas proporções e especificações definidas pela legislação em vigor e que atenda ao Regulamento Técnico.

Em ambos os casos as gasolinas podem ser especificadas como Comum e Premium. Além da coloração, permitida por adição de corante em até 50 ppm na gasolina Premium, a principal diferença entre as duas está no Índice Antidetonante (IAD) e no percentual de benzeno em volume, maiores na gasolina Premium.

A ANP também é a responsável pela especificação do óleo diesel, segundo Portaria nº 310 de 27/12/2001, consoante as disposições contidas no Regulamento Técnico ANP nº 06/2001, posteriormente retificado pela Portaria nº 130, de 13/08/2002 e nº 162, de 11/09/2002. Para efeito destas Portarias o óleo diesel para uso em veículos rodoviários se classifica em dois tipos: óleo diesel Metropolitano e Interior.

A diferença entre os dois tipos de óleo diesel reside no teor máximo de enxofre, temperatura máxima de destilação de 85% e massa específica. Para todas estas características o óleo diesel tipo Interior apresenta maiores limites. A diferença de especificação se deve principalmente à necessidade de redução do teor de enxofre no óleo diesel utilizado nos centros urbanos, vindo daí a necessidade de especificação do óleo diesel Metropolitano.

No que se refere à sua conversão em energia mecânica por meio dos sistemas de propulsão, as principais características físico-químicas das fontes de energia convencionais que devem ser destacadas estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3.Características físico-químicas relevantes da gasolina e do óleo diesel.

Fonte de energia	Poder calorífico inferior [kcal/kg]	Massa específica [kg/litro]	Número de octanas	Número de cetano
Gasolina A	10.659	0,742	Não especificado	Não se aplica
Gasolina C	9.678	0,737	82,0	Não se aplica
Óleo diesel Metropolitano	10.212	0,82 a 0,865	Não se aplica	42 (mínimo)
Óleo diesel Interior	10.212	0,82 a 0,88	Não se aplica	42 (mínimo)

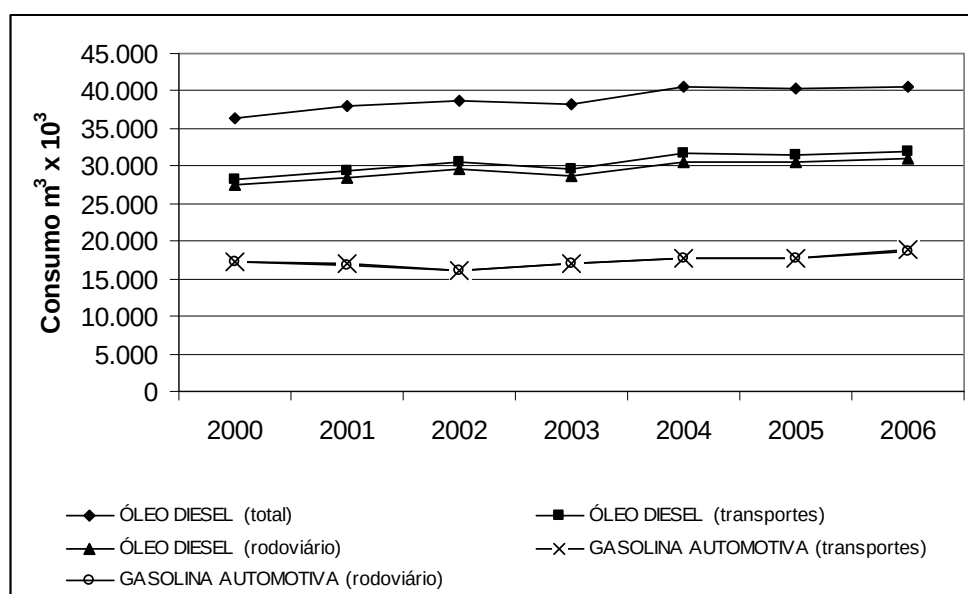
Nota: O número de octanas é um indicativo de resistência à auto-ignição da mistura ar+gasolina, sendo uma medida utilizada no cálculo do Índice Antidetonante (IAD).

Fonte: ANP (2003a), Portaria ANP nº 310 de 27/12/2001.

No Brasil, em 2006, foram consumidos cerca de 44 milhões de toneladas de petróleo no setor de

² A Agência Nacional do Petróleo admite que as frações líquidas leves do petróleo que compõe a gasolina possam conter até 12

transportes, representando cerca de 50,7% do consumo nacional dessa fonte de energia (BEN, 2007). Este percentual apresentou um crescimento de 4 % no período de 2000 a 2006. No ano de 2006, de toda a energia consumida no setor de transportes brasileiro, 87,7% foram derivados de petróleo, dos quais a gasolina e o óleo diesel representam respectivamente 27,1% e 50,9% (BEN, 2007). A Figura 3.1 apresenta a evolução do consumo de gasolina e óleo diesel no Brasil neste mesmo período.



Fonte: BEN (2007).

Figura 3.1. Evolução do consumo de gasolina e óleo diesel no Brasil.

Observa-se que o consumo de gasolina apresentou estabilidade em torno dos 17 milhões de metros cúbicos ano, porém com aumento de 6,2% no último ano analisado (2006). Toda a gasolina consumida se destinou ao setor de transportes, sendo o modo rodoviário responsável, em média, por 99,6% do consumo ao longo do período analisado, sendo que o crescimento do consumo de gasolina de 2000 até 2006 foi de 9,4% (BEN, 2007).

Em média, o consumo brasileiro de óleo diesel foi 1,7 vezes maior que o consumo de gasolina, em função deste representar a principal fonte de energia para o transporte coletivo de passageiros e de carga. Observa-se na Figura 3.1 um aumento progressivo do consumo total ao longo do período analisado, com crescimento de cerca de 13%. O transporte rodoviário apresentou o maior crescimento, 12,3% e consumiu 96,6% da parcela destinada aos transportes, que respondeu por 78,7% consumo total no período (BEN, 2007).

A produção nacional de petróleo em 2006 foi de pouco mais de 100 milhões de metros cúbicos, com exportações superiores às importações em 2 milhões m³, sustentando o quadro de autosuficiência em petróleo

A frota brasileira de veículos em 2000 totalizava 28,9 milhões de veículos, dos quais estima-se que 71,5%, em sua maioria automóveis de passageiros e veículos comerciais leves, tenham sido fabricados para consumir uma mistura de gasolina com 22% de álcool etílico anidro combustível (AEAC), usado como aditivo oxigenado com propriedades antidetonantes. Cerca de 10,6%, em sua maioria veículos comerciais leves, veículos de transporte coletivo de passageiros e veículos de carga, consomem óleo diesel. Em função da existência do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), cerca de 17,9% da frota nacional foi fabricada para consumir álcool etílico hidratado combustível (AEHC) (GEIPOT, 2001).

O panorama apresentado deixa claro o expressivo papel da gasolina e do óleo diesel como fontes convencionais de energia para o transporte rodoviário no Brasil, justificando seu uso como referência natural na escolha de combustíveis alternativos. No resto do mundo a predominância da gasolina e do óleo diesel é ainda maior, pois como será visto, o Brasil se destaca no uso de combustíveis considerados alternativos, como o AEHC e o gás natural comprimido. No caso deste último, adotou-se a configuração bicomcombustível, assim sendo, veículos originalmente produzidos para uso de gasolina ou AEHC, depois de adaptados, passam a consumir também gás natural.

3.2.1.1.Cadeia de suprimento e uso final

Gasolina e óleo diesel são combustíveis tradicionalmente obtidos a partir do refino do petróleo. Neste caso, a cadeia de suprimento destes combustíveis é em parte análoga a cadeia de exploração do petróleo, que é normalmente dividida em seis estágios: exploração, produção, transporte, armazenagem, refino e distribuição (PETROBRAS, 2000).

a) Exploração

O estágio de exploração, tem como primeira atividade a prospecção, que busca detectar a existência de petróleo nas jazidas que se situam no interior da crosta terrestre, seja em terra (*on shore*) ou no mar (*off shore*). Trata-se de um processo de eliminação, que reduz as áreas que apresentam potencial de produção de petróleo, sendo uma atividade trabalhosa, demorada, incerta e cara. O índice de insucesso em perfurações pioneiras é da ordem de 80% a 90% (SBPC, 2000, THOMAS, 2001).

A prospecção científica segue três tipos de técnicas: geológicas, geofísicas e geoquímicas. As técnicas geológicas baseiam-se no conhecimento dos processos de formação e evolução de diferentes rochas, incluindo suas deformações (fraturas, dobramentos, deslocamentos etc), sendo possível avaliar o potencial de ocorrência de petróleo em parte da estrutura rochosa do subsolo a partir do seu relevo, dos afloramentos de rocha, e de outros fatores geológicos.

Dentre as técnicas geofísicas destacam-se a gravimetria (registro e análise na superfície de variações da força da gravidade causada por camadas de rocha mais ou menos densas); a magnetometria (registro e análise, na superfície de variações magnéticas causada também por camadas rochosas do subsolo) e a sísmica (registro e análise de reflexões e refrações, por estruturas rochosas subterrâneas, de ondas de choque produzidas na superfície). A sísmica é a técnica geofísica mais utilizada.

As técnicas geoquímicas incluem análises que detectam a presença de hidrocarbonetos gasosos no solo, na água ou no ar de uma região, o que sugere a migração para a superfície a partir de reservatórios subterrâneos.

A interpretação dos dados obtidos pelos métodos de prospecção permite que se excluam as regiões onde são remotas as possibilidades de se encontrar petróleo. Nas regiões restantes deve-se fazer a sondagem por meio de perfuração, de modo que se tenha certeza da ocorrência de petróleo. As sondas de perfuração dispõem de brocas movidas por motores e possuem torres capazes de manter seu alinhamento e permitir a inclusão e retirada dos tubos que servem de guia. Pelo tubo de perfuração é bombeado um fluido, composto de água, argila e produtos químicos, cuja finalidade é manter a broca resfriada, retirar fragmentos da rocha perfurada e impedir o escapamento descontrolado do gás ou petróleo. Os equipamentos atuais de perfuração são capazes de atravessar qualquer tipo de rocha e são adaptáveis à embarcações e plataformas, o que permite que sejam usados em alto mar. As perfurações podem atingir até 9 km de profundidade, podendo ser verticais, curvas e horizontais, permitindo ramificações dentro da jazida de petróleo para facilitar seu escoamento.

b) Produção

Uma vez concluído o estágio de exploração e concluindo-se que a região sondada tem potencial, inicia-se a etapa de produção. O petróleo se encontra impregnado em rochas porosas, denominadas de reservatórios, que contém camadas de gás natural, petróleo e água, submetidas a altas pressões. A perfuração do poço cria um caminho para que a pressão impulse naturalmente estes constituintes para a superfície. Em reservatórios com baixas pressões, ou

quando a pressão inicial cai depois do período inicial de extração, pode ser preciso aplicar algum método para auxiliar a extração do petróleo. Os métodos convencionalmente utilizados são o bombeio, por meio de bombas de sucção de movimento alternativo e a injeção de gás ou água, ao que se denomina recuperação secundária. Este método tem a finalidade de aumentar a pressão no interior da jazida. Também é possível o uso de métodos não convencionais, como injeção de vapor, combustão *in situ* e injeção de substâncias químicas, que procuram facilitar o escoamento do petróleo por meio do seu aquecimento, aumento de pressão e redução da viscosidade.

Uma vez produzido, o petróleo é conduzido a um separador, com a finalidade de separar o petróleo do gás e da água. Este equipamento normalmente fica próximo ao local de extração e serve como um primeiro estágio do processamento do petróleo. Além do gás natural, neste momento são extraídas as frações leves do petróleo. Isso é feito passando-se a mistura úmida de gases por uma torre de absorção, onde um óleo de baixa volatilidade absorve as gotículas líquidas. O gás natural seco deixa a torre de absorção e a fase líquida é extraída do óleo por aquecimento, produzindo um derivado praticamente pronto para uso denominado de gasolina natural (C_5^+).

c) Transporte e armazenagem

Uma vez produzido o petróleo é encaminhado para centros de armazenagem e terminais de embarque e desembarque, iniciando-se a etapa de transporte. Normalmente o transporte entre o ponto de produção e os centros de armazenagem é feito por meio do bombeio do petróleo em dutos, denominados oleodutos. Para o transporte a longas distâncias, como no caso da importação de petróleo ou produção no mar utiliza-se o transporte por navios, sendo conveniente o uso de embarcações de grande porte, dedicadas ao transporte de petróleo, denominadas de petroleiros. No caso da produção em terra é possível o transporte por caminhões, trens ou barcas, em hidrovias.

Os centros de armazenagem devem estar em locais de conveniência para toda a cadeia de suprimento. No caso da extração de petróleo no mar, como ocorre predominantemente no Brasil, os centros de armazenagem encontram-se no litoral, junto aos terminais de embarque e desembarque, sendo esta localização adequada para o recebimento do petróleo importado e exportação dos excedentes. A partir dos centros de armazenagem o petróleo é bombeado por oleodutos para os tanques de armazenagem das refinarias, onde se processa a etapa de refino.

d) Refino

O estágio de refino é composto de um conjunto de processos de natureza física e química que objetivam a transformação do petróleo proveniente das áreas de produção, denominado de petróleo bruto, em seus derivados de uso comercial, dentre os quais a gasolina e o óleo diesel. Os principais processos por que passa o petróleo numa refinaria podem ser classificados em dois subgrupos, conforme descrito a seguir (MARIANO, 2001):

- ♦ Processos de refino: que também são conhecidos como de separação, são sempre de natureza física e tem a finalidade de desmembrar o petróleo bruto em suas frações mais básicas ou processar uma fração que tenha sido anteriormente gerada, para que dela se obtenha um determinado produto por meio de modificação de temperatura, pressão ou uso de solventes que efetuem a separação desejada. O principal processo de refino é a destilação (atmosférica ou a vácuo), sendo o primeiro, o mais básico processo aplicado ao petróleo bruto em uma refinaria;
- ♦ Processos de conversão: que possuem natureza química e se utilizam de reações de quebra, reagrupamento e reestruturação molecular para transformar frações de petróleo em produtos de maior interesse econômico. Tais processos mudam a estrutura das moléculas dos hidrocarbonetos, para obtenção de moléculas menores, maiores ou de melhor qualidade. Seu uso é muito comum quando se objetiva a produção de combustível de alta octanagem (gasolina). A diversidade destes processos é grande, destacando-se o coqueamento, o craqueamento (térmico e catalítico) e os tratamentos químicos.

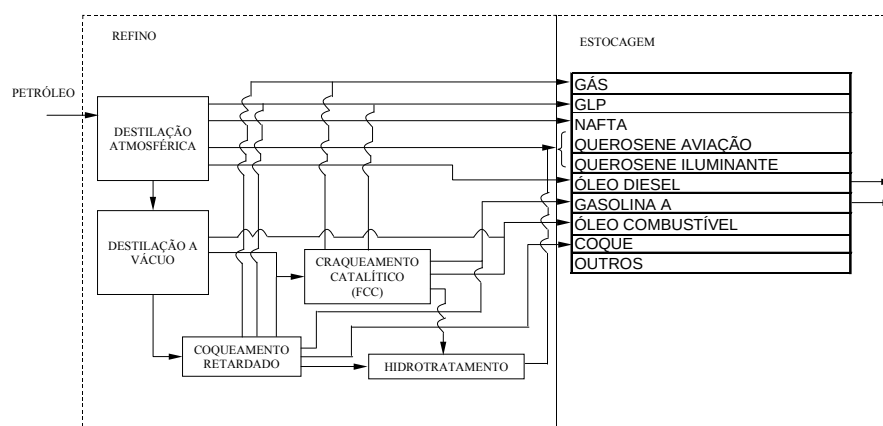
Em função da diversidade e complexidade dos processos encontrados numa refinaria optou-se por apresentar um esquema de refino básico (ANP, 2003b) capaz de considerar os processos elementares indispensáveis numa refinaria moderna, similares ao que se encontra no parque de refino brasileiro (MARIANO, 2001).

O petróleo bruto, proveniente dos tanques de armazenagem da refinaria, é aquecido e passa por um processo para remoção de sais corrosivos, metais e sólidos em suspensão (dessalinização). Posteriormente é pré-aquecido em fornos tubulares e introduzido numa torre de destilação atmosférica, que possui vários estágios de separação (bandejas), um para cada fração desejada. Os produtos deste processo são, principalmente, gás de refinaria (metano e etano), gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, gasolina, querosene, gasóleos (dentre os quais o óleo diesel) e resíduo atmosférico (óleo cru reduzido ou asfalto). Tais frações, retiradas ao longo da coluna em seus vários estágios de separação, deverão ser tratadas, para se transformarem em produtos finais, ou serem enviadas como matéria-prima para outros processos de refino, que as beneficiarão.

O resíduo atmosférico, que constitui a fração mais pesada obtida no fundo da torre de destilação atmosférica, após novo aquecimento, é submetido a um segundo fracionamento, agora sob vácuo (destilação a vácuo), no qual são gerados cortes de gasóleos (leve e pesado) e um resíduo de vácuo, composto de hidrocarbonetos de elevados pesos moleculares e impurezas, que conforme especificação podem ser comercializados como óleo combustível ou asfalto.

As frações geradas na torre de destilação a vácuo são utilizadas como cargas para os processos de conversão que visam a obtenção de produtos de menor peso molecular e maior valor agregado, dentre os quais destaca-se o craqueamento catalítico em leito fluidizado de gasóleos de vácuo, que apresenta como principais produtos o GLP e a gasolina, e o coqueamento de resíduo de vácuo, que gera GLP, nafta, óleo diesel e o coque de petróleo, mistura de carbono sólido, hidrocarbonetos e impurezas. Os produtos obtidos nesses processos de conversão são enviados para processos de tratamento, onde se transformam em produtos acabados.

A Figura 3.2 sintetiza o esquema de produção descrito anteriormente, que pode ser considerado como um esquema básico de refino, tendo em vista a flexibilidade e produtividade usualmente obtida com este conjunto de processos. Neste caso, as frações médias do coqueamento são encaminhadas para o hidrotratamento, possibilitando o aumento da oferta de óleo diesel de boa qualidade. Com esta configuração é possível um maior equilíbrio na oferta de gasolina e de óleo diesel na refinaria.



Fonte: ANP (2003b).

Figura 3.2. Esquema básico de refino de petróleo.

Uma vez que sejam produzidos, os derivados são bombeados por dutos para tanques de armazenagem na refinaria. Daí são entregues diretamente às distribuidoras de combustível, que têm tanques de armazenagem próprios em suas bases de distribuição (bases primárias). O transporte entre refinaria e bases primárias é feito usualmente por dutos ou navios.

e) Distribuição

O último estágio da cadeia de suprimento dos combustíveis convencionais é a distribuição, que tem a finalidade de promover a oferta destes combustíveis junto aos locais de consumo. No Brasil a distribuição de combustíveis é realizada por empresas, denominadas de distribuidoras, que possuem tanques de armazenamento de combustível em suas bases de distribuição, denominadas de bases primárias, se receberem produtos diretamente da refinaria ou secundárias, se receberem produtos de uma base primária. É também nas bases de distribuição que a gasolina tipo A é misturada com o AEAC (álcool etílico anidro combustível), em proporção regulamentada, para produção da gasolina tipo C.

O combustível é recebido dos terminais das refinarias, estocado e distribuído para a rede de postos de revenda, espalhados pela área de influência da base de distribuição. O transporte entre a base de distribuição e os postos de revenda é realizado pelo modo rodoviário, por meio de caminhões tanque. O carregamento dos caminhões tanque é feito por bombeamento e o descarregamento nos tanques dos postos de serviço por gravidade. O abastecimento dos veículos é feito por bombeamento.

f) Uso final

O sistema de propulsão convencional, composto do motor alternativo de combustão interna (MCI) e do sistema de transmissão mecânica (STM) é a tecnologia mais empregada no uso final dos combustíveis convencionais, sendo estes também considerados como fontes de energia para a maioria dos sistemas de propulsão não convencionais em função da sua cadeia de suprimento estar consolidada.

Embora a configuração básica do conjunto MCI e STM tenha permanecido a mesma há quase um século, seus principais aprimoramentos estão relacionados ao desempenho do veículo (taxas de aceleração, retomada de velocidade e velocidade final), eficiência energética e impactos ambientais.

Modernamente, em quase todo o mundo, os veículos que utilizam gasolina como combustível são equipados com um motor alternativo de combustão interna (MCI) do ciclo Otto, ou seja, ignição por centelhamento (ICE) e ciclo de quatro tempos (4T). O sistema de alimentação do motor é composto pela admissão de ar e por dispositivos de injeção indireta de combustível (IID), sendo a vazão de ar e a injeção de combustível controlados eletronicamente. Além disso, para atender as legislações de emissão de poluentes atmosféricos, é comum que estes motores disponham de dispositivos de controle e conversão dos gases de exaustão.

No Brasil, os primeiros veículos equipados com injeção indireta de combustível e controle eletrônico surgiram no início da década de 90. Atualmente, todos os veículos novos são equipados com injeção indireta de combustível e controle eletrônico. Esta tecnologia foi introduzida progressivamente, sendo primeiro empregada nos veículos mais caros – *top de linha*. Considerando a elevada idade média da frota brasileira, ainda é possível encontrar muitos veículos equipados com carburador, sistema de alimentação anterior à injeção indireta de combustível, porém, trata-se de uma tecnologia em desuso.

Os veículos que utilizam óleo diesel como combustível são equipados com motores alternativos de combustão interna (MCI) do ciclo Diesel, ou seja ignição por compressão (ICO) e ciclo de quatro tempos (4T). Neste caso, o sistema de alimentação do motor também dispõe de admissão de ar e dispositivos de injeção, só este último pode ser de dois tipos: (1) injeção direta (ID) e (2) injeção indireta (IID).

No caso dos MCI-ICO-4T-IID o óleo diesel é injetado numa pré-câmara de combustão onde se inicia a ignição da mistura, que em seguida se propaga para a câmara de combustão, dando continuidade ao processo de queima. Esta tecnologia é majoritariamente empregada em motores de baixa capacidade volumétrica que trabalham em regimes de alta rotação, como ocorre nos automóveis de passageiros, sendo muito comum na Europa, onde cerca de 20% da frota de automóveis é movida a óleo diesel (FAIZ *et al.*, 1996) e em parte do Sudeste Asiático. No Brasil não é permitido o uso de automóveis de passageiros movidos a óleo diesel, porém, os MCI-ICO-4T-IID podem ser encontrados em alguns tipos de veículos comerciais leves.

Quando se trata dos MCI-ICO-4T-ID o combustível é injetado diretamente dentro da câmara de combustão, onde se mistura com o ar a alta temperatura e pressão e queima. É utilizado em veículos comerciais médios e pesados, e se comparado com os motores de injeção indireta apresenta maior potência, melhor economia de combustível e funcionamento mais ruidoso (FAIZ *et al.*, 1996, POULTON, 1997). No Brasil seu uso é amplamente adotado em veículos comerciais leves (caminhonetes e furgões), caminhões médios, pesados e extra pesados e todos os tipos de ônibus.

Os motores do ciclo Diesel são geralmente mais robustos e tolerantes à variação das características do combustível. Mesmo assim, as características que apresentam maior impacto na eficiência energética e na emissão de poluentes atmosféricos são: o número de cetano e a composição química do combustível, especificamente no que se refere ao teor de hidrocarbonetos aromáticos e enxofre (FAIZ *et al.*, 1996).

O número de cetano é uma característica que determina a capacidade de auto ignição da mistura, assim sendo, variações nesta característica do óleo diesel podem acarretar combustão incompleta e perda de eficiência do MCI-ICO-4T-ID. O número de cetano está indiretamente relacionado com o teor de hidrocarbonetos aromáticos na composição química do óleo diesel, criando uma relação entre estas duas características.

Para a gasolina, a medida de resistência à auto-ignição é o número de octanas, que determina o Índice Antidetonante (IAD). Quanto maior o IAD maior a resistência da gasolina em apresentar combustão espontânea se submetida às pressões e temperaturas da câmara de combustão. Assim sendo, gasolinas com alto IAD admitem taxas de compressão maiores e podem operar em motores com melhor eficiência termodinâmica.

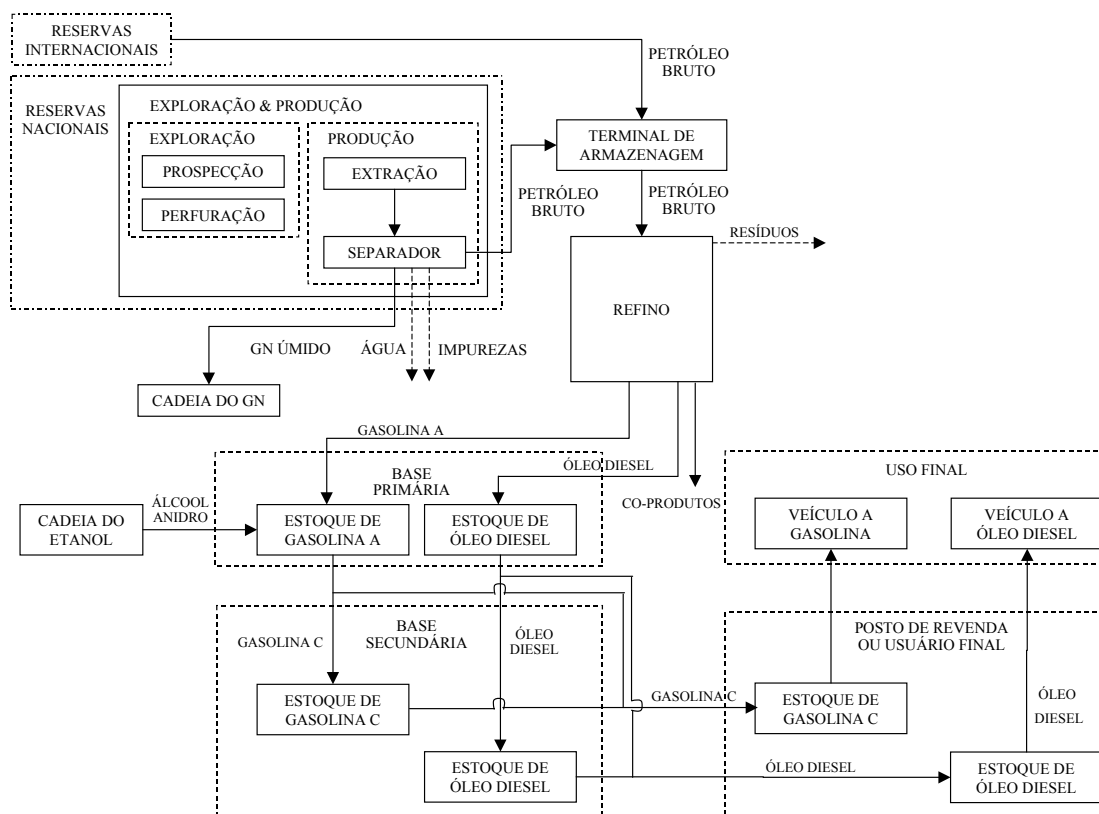
Tanto no caso da gasolina quanto do óleo diesel, seu armazenamento no veículo é feito por tanques, que têm formas e dimensões adequadas às necessidades operacionais e ao projeto dos veículos. Dependendo do tamanho, que é função da autonomia desejada, podem ser de material plástico, alumínio ou aço galvanizado.

Além da baixa eficiência na conversão de energia, outro inconveniente no uso dos MCI está na geração de poluentes atmosféricos, notadamente monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP). As taxas de emissão variam em função da especificação do combustível e do tipo de tecnologia utilizada.

Mantidas as mesmas condições de operação, a redução na emissão de poluentes atmosféricos pelos MCI está associada à modificação do tipo de combustível ou no projeto do motor e seus componentes. Estas ações podem influir no consumo de combustível, um dos aspectos a serem contemplados neste trabalho (FAIZ *et al.*, 1996).

3.2.1.2. Análise da cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia convencionais

A Figura 3.3 apresenta um fluxograma simplificado de toda a cadeia de suprimento dos combustíveis convencionais. Para tornar a representação mais simples, optou-se por representar os processos, por meio de caixas, e os produtos, por meio de fluxos. Os processos foram considerados a partir da descrição apresentada anteriormente e além de ajudar na compreensão do texto, servirão de base para o futuro desenvolvimento do conceito de ciclo de vida dos combustíveis tradicionais.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3.3.Cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia convencionais.

Os processos de exploração e produção foram agrupados em um único estágio, denominado de exploração & produção. Isso se faz necessário pois o processo de exploração não gera um fluxo de produto, não havendo sentido em separá-lo do processo de produção. No entanto, a literatura consultada os trata separadamente.

No caso do petróleo estar associado ao gás natural (GN), o processo de exploração & produção também gera o GN. Este co-produto vai alimentar a cadeia de suprimento do gás natural, um combustível alternativo para o transporte rodoviário, como será visto futuramente.

A interação entre cadeias de combustíveis não ocorre apenas neste estágio. O álcool etílico hidratado combustível (AEAC), proveniente da cadeia do etanol, representa um fluxo de entrada para composição da gasolina C no processo de estocagem nas bases de distribuição.

A atividade de transporte não está representada explicitamente, porém, ocorre juntamente com os fluxos de produtos, como foi visto na descrição anterior. O transporte pode ser feito de diversos modos, o que dependerá das características específicas e da disponibilidade de recursos de cada região.

Como o uso dos combustíveis convencionais já se estende por mais de um século, o

conhecimento de suas propriedades e das peculiaridades da sua utilização nos veículos está amplamente dominado. Além disso, sua cadeia de suprimento já está consolidada em todo o mundo, o que torna o uso destes combustíveis uma opção amplamente viável tanto sob critérios técnicos como econômicos.

Estes são os motivos pelos quais grandes esforços estão sendo feitos no sentido de aprimorar a eficiência energética dos sistemas de propulsão convencionais e a especificação destes combustíveis, prolongando o seu uso e respeitando as crescentes exigências de redução de impactos ambientais em todos os níveis.

3.2.2. O gás natural (GN)

O gás natural (GN) é a designação genérica de uma mistura de hidrocarbonetos na forma gasosa. Sua formação resulta do acúmulo de matéria orgânica decomposta, soterradas em grandes profundidades, devido ao processo de acomodação da crosta terrestre (THOMAS, 2001). Ocorre na natureza acumulado em rochas porosas no subsolo, freqüentemente acompanhado por petróleo, constituindo um reservatório ou jazida. A forma de ocorrência do gás natural divide-se então em associado ou não associado ao petróleo. Na forma de gás associado está dissolvido no óleo ou formando uma capa de gás. Neste caso, a produção de gás é determinada basicamente pela produção de óleo. O gás não associado é aquele que está livre ou apresenta quantidades muito pequenas de óleo.

A composição do gás natural varia em função do reservatório de origem, pelo fato de estar ou não associado ao petróleo e também por já ter sido ou não processado em unidades industriais, sendo formado por uma mistura de hidrocarbonetos, em sua maior parte metano (CH_4) (80% a 90%) e etano (C_2H_6), que, à temperatura ambiente de 25°C e pressão de 1 atmosfera, permanece no estado gasoso. Associados a estes dois gases encontram-se em menores e mais variadas proporções os hidrocarbonetos mais pesados como o propeno, o butano e o pentano. Dependendo da jazida, outros elementos como a água, o dióxido de carbono e o gás sulfídrico (H_2S) podem ser encontrados.

A Tabela 3.4 apresenta a composição típica, em % volumétrico, do gás natural em sua forma associada ou não com o petróleo. A última coluna apresenta a composição do gás natural após seu processamento em uma UPGN (Unidade de Processamento de Gás Natural). Observa-se que o processamento elimina os componentes pesados do gás (I Butano, N Butano, I Pentano, N Pentano, Hexano e Heptanos Superiores) e aumenta o teor de metano, neste exemplo em 8% para o gás associado e 3% para o não associado.

Tabela 3.4.Composição típica do gás natural, em % volumétrico.

Elementos	Associado ¹	Não associado ²	Processado ³
Metano	81,57	85,48	88,56
Etano	9,17	8,26	9,17
Propano	5,13	3,06	0,42
I Butano	0,94	0,47	-
N Butano	1,45	0,85	-
I Pentano	0,26	0,2	-
N Pentano	0,3	0,24	-
Hexano	0,15	0,21	-
Heptanos Superiores	0,12	0,06	-
Nitrogênio	0,52	0,53	1,2
Dióxido de Carbono	0,39	0,64	0,65
Total	100	100	100

Notas: 1 - Gás do campo de Garoupa, Bacia de Campos; 2 - Gás do campo de Miranda, Bahia; 3 - Saída da UPGN-Candeias, Bahia.

Fonte: PETROBRAS/GEGÁS (1998).

No Brasil, a especificação do GN de origem nacional ou importada para consumo é estabelecida pelo Regulamento Técnico nº 003/2002 da Agência Nacional do Petróleo (ANP), aprovado pela Portaria nº 104 de 08 de julho de 2002. Assim como foi feito para os combustíveis convencionais, a Tabela 3.5 apresenta as características físico-químicas relevantes para o GN.

Tabela 3.5.Características físico-químicas relevantes do gás natural.

Fonte de energia	Poder calorífico inferior [kcal/kg]	Massa específica [kg/litro]
Gás natural úmido	9.408	0,000856
Gás natural seco	10.295	0,000745

Fonte: MME (2002).

O uso de combustíveis gasosos é tão antigo quanto o próprio motor de combustão interna, porém, o uso extensivo de gás natural como combustível em automóveis teve início na Itália, no século passado, por volta dos anos 30. Após a II Guerra Mundial, com as restrições econômicas e a abundância de produtos petrolíferos, o combustível manteve-se discretamente no mercado italiano, ainda que restrito a algumas regiões. Nos anos 70, durante as crises do petróleo e diante da necessidade de diversificação de energéticos, o GN demonstrou ser uma alternativa viável como combustível automotivo (RIBEIRO *et al.*, 2001a).

Além do aspecto estratégico, a crescente conscientização sobre os impactos ambientais da atividade de transportes, tem fortalecido o uso de GN como uma alternativa de combustível mais limpo, tendo em vista que seu uso leva à uma redução nas emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não metano (HCNM) (POULTON, 1994b).

Manter o GN sob pressões que variam entre 200 e 230 atmosferas (3.000 a 3.600 psi ou 20 a 23 MPa) é a forma mais difundida em todo o mundo para armazenar este combustível nos veículos

(POULTON, 1994a, RILEY, 1994, BECHTOLD, 1997). Esta forma de utilização do GN em veículos é denominada gás natural comprimido (GNC), embora no Brasil o combustível utilizado sob esta forma de armazenamento seja conhecido como gás natural veicular (GNV). Outra forma de estocar o GN é por meio de sua liquefação a uma temperatura de aproximadamente -162°C , ao qual se denomina gás natural liquefeito (GNL). A experiência mundial com o uso de GNL é menor do que com o GNC, embora seu uso permita dispor de sistemas de armazenamento de combustível com aproximadamente metade do peso e do volume do que no caso do GNC (BECHTOLD, 1997).

A Tabela 3.6 apresenta as 10 maiores frotas de veículos rodoviários movidos a GN, conforme as estatísticas do *International Association for Natural Gas Vehicles* (IANGV, 2003). A frota mundial de veículos movidos a GN é estimada em cerca de 2,5 milhões de veículos. No início dos anos noventa este número era de cerca de 700 mil veículos, o que representa uma taxa de crescimento de 13,5% ao ano em 10 anos. A frota brasileira ocupa hoje o segundo lugar no ranking mundial, porém com uma taxa de crescimento acentuado, pois no período entre 2000 e 2003, a frota mais que dobrou a cada ano.

Tabela 3.6. Estimativa das frotas de veículos convertidos a GN.

País	Veículos a GN	Postos de abastecimento	País	Veículos a GN	Postos de abastecimento
Argentina	721.830	1043	EUA	126.341	1250
Brasil	550.000	284	Egito	42.000	72
Itália	380.000	369	Venezuela	40.962	170
Paquistão	280.000	333	China	36.000	70
Índia	137.000	116	Ucrânia	35.000	87

Nota: Com exceção da Itália e da China, os dados são de 2002 ou início de 2003.

Fonte: IANGV (2003).

No Brasil, as primeiras experiências com o GNC começaram na década de 80, com a iniciativa governamental de incluir o gás natural na matriz energética de transportes, cujo objetivo principal era promover a substituição do óleo diesel no transporte coletivo (CNE, 1989). Várias barreiras limitaram o avanço desta iniciativa, dentre as quais a necessidade de investimentos para a construção de gasodutos tanto para aumentar a oferta como para expandir as redes de distribuição urbanas, que promoveriam o crescimento da demanda.

Desde o início da década de 90, o governo brasileiro tem procurado viabilizar a indústria do gás natural no país. A construção de termelétricas para geração de energia elétrica e as instalações industriais de porte, por serem grandes consumidoras de gás, são consideradas âncoras para a transferência, pois viabilizam o lançamento de gasodutos e, conseqüentemente, a formação de

redes de distribuição para os pequenos consumidores.

Adicionalmente, o governo procurou viabilizar o uso do GNC em outros segmentos do transporte rodoviário por meio de uma série de medidas, dentre as quais a Portaria nº 553-MME (25/09/1992), que autorizou a utilização de GNC para fins automotivos em frotas de ônibus urbanos e interurbanos, em táxis, em frotas cativas de empresas e de serviços públicos e em veículos de transporte de cargas e o Decreto do Presidente da República, nº 1.787 (12/01/1996), que autorizou a utilização de GNC em veículos automotores e motores estacionários, nas regiões onde o referido combustível for disponível, obedecidas às normas e procedimentos estabelecidos pelo antigo Departamento Nacional de Combustíveis (DNC).

Estima-se que a frota do Rio de Janeiro em 2003 fosse da ordem de 236.733 veículos (IANGV, 2003), com crescimento de 36,8% aa nos últimos 5 anos (RIBEIRO *et al.*, 2001a). O processo de conversão de veículos leves, que começou timidamente na frota de táxis no início da década de 90, alcançava já no ano 2000 cerca de 4% de toda a frota da cidade. Vários fatores têm contribuído para o crescimento da conversão da frota do Rio de Janeiro, destacando-se, além das vantagens do preço em relação à gasolina, a redução do IPVA (Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores) em 75% e o financiamento para instalação dos *kits* de conversão.

A partir da expansão da rede de gasodutos, surgem por todo o país novos postos de serviço com GNC, principalmente nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, na região Nordeste, e Espírito Santo, São Paulo e Minas Gerais no Sudeste. Com a entrada em operação dos gasodutos nas Regiões Centro Oeste e Sul surgem postos no Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

O sucesso do GNC, principalmente no Brasil, tem se restringido à conversão de veículos leves movidos a gasolina, que passam a utilizar os dois combustíveis, numa configuração denominada bicombustível.

3.2.2.1.Cadeia de suprimento e uso final

Hoje, o gás natural consumido no Brasil provém de jazidas nacionais e da Bolívia. Estuda-se também a importação da Argentina e de outras regiões. A cadeia de suprimento de gás natural pode ser dividida nos seguintes estágios: exploração, produção, processamento, transporte e distribuição.

a) Exploração

Da mesma forma que ocorre com o petróleo, a exploração é a etapa inicial da cadeia de suprimento do gás natural e consiste em duas fases: a prospecção, onde é feito o reconhecimento e o estudo das estruturas geológicas propícias ao acúmulo de petróleo e/ou gás natural e a perfuração do poço para comprovar a existência desses produtos a nível comercial.

Os detalhes da produção do gás natural são muito semelhantes ao que já foi descrito para o caso do petróleo, não sendo necessário repeti-los. Na verdade, com exceção do campo de Juruá na Amazônia, que responde por cerca de 17% da produção nacional, o restante do gás natural explorado no Brasil está associado ao petróleo (PETROBRAS, 2000). Assim sendo, o ônus da exploração é normalmente creditado ao petróleo e não ao gás natural.

b) Produção e Processamento

Ao ser produzido o gás deve passar inicialmente por vasos separadores, que são equipamentos projetados para retirar a água, os hidrocarbonetos que estiverem em estado líquido e as partículas sólidas (pó, impurezas, produtos de corrosão etc). Se estiver contaminado por compostos de enxofre, o gás é enviado para unidades de dessulfurização, onde esses contaminantes são retirados. Após esta etapa, no caso de gás associado, uma parte do gás é utilizada no próprio sistema de produção, em processos conhecidos como reinjeção e gás *lift*, com a finalidade de aumentar a recuperação de petróleo do reservatório.

O restante é enviado para o processamento na Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), onde será fracionado, para retirada do metano e do etano, que formarão o gás processado ou residual, propano e butano, que compõe o gás liquefeito de petróleo (GLP) e um produto denominado C_5^+ ou gasolina natural.

A produção de gás natural pode ocorrer em regiões distantes dos centros de consumo e muitas vezes de difícil acesso. Por este motivo, tanto a produção como o transporte normalmente são atividades críticas do sistema. Em plataformas marítimas, por exemplo, o gás deve ser desidratado antes de ser enviado para terra, para evitar a formação de hidratos, que são compostos sólidos que podem obstruir os gasodutos. Outra situação que pode ocorrer é a reinjeção do gás no reservatório se não houver consumo do mesmo, como na Amazônia.

Em 2002 o Brasil produziu 15,5 bilhões de m^3 de gás natural, sendo que dez estados brasileiros (Alagoas, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, São Paulo e Sergipe) são produtores de gás natural. Em 2002, o estado do Rio de Janeiro foi o líder nacional tanto na produção de GN (6,9 bilhões de m^3) quanto no consumo de GNC (457

milhões m³), com os estados de Amazonas (2,7 bilhões de m³) e Bahia (2,0 bilhões de m³) na segunda e terceira colocação (ANP, 2003; GASNET, 2003). Embora o crescimento da produção seja uma realidade, em 2001 cerca de 40% da produção ainda foi utilizada para reinjeção nos poços de petróleo ou perdida no processo (MME, 2002).

c) Transporte

A quase totalidade das reservas situa-se no litoral do país, o que indica a necessidade de transporte do produto para o uso no interior. No estado gasoso o gás natural pode ser transportado por meio de dutos (gasodutos) ou, em casos muito específicos, em cilindros de alta pressão, na forma de gás natural comprimido. No estado líquido, como gás natural liquefeito (GNL), pode ser transportado por meio de navios, vagões, barcaças ou caminhões equipados com reservatórios criogênicos. Neste caso, o gás é armazenado a -162 °C, e seu volume é reduzido em cerca de 600 vezes, facilitando o armazenamento. O GNL deve ser revaporizado para ser utilizado.

Os principais gasodutos brasileiros distribuem-se pela região litorânea, indo de Fortaleza a Salvador na Região Nordeste, na região de Vitória no Espírito Santo e ligando Campos e Rio de Janeiro com Belo Horizonte e São Paulo. Além disso, o gasoduto Bolívia-Brasil, uma importante ligação para abastecimento do interior já se encontra em operação, ligando Santa Cruz, na Bolívia, com Campinas, no Brasil, passando pelos estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo, de onde parte para o Rio Grande do Sul, através do Paraná e Santa Catarina. Uma derivação deste gasoduto também abastece a cidade de Cuiabá no Mato Grosso. Estuda-se a ligação das cidades de Uruguaiana e Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, partido da cidade argentina de Passos de Los Libres, representando a futura importação de GN da Argentina (GÁSENERGIA, 2003).

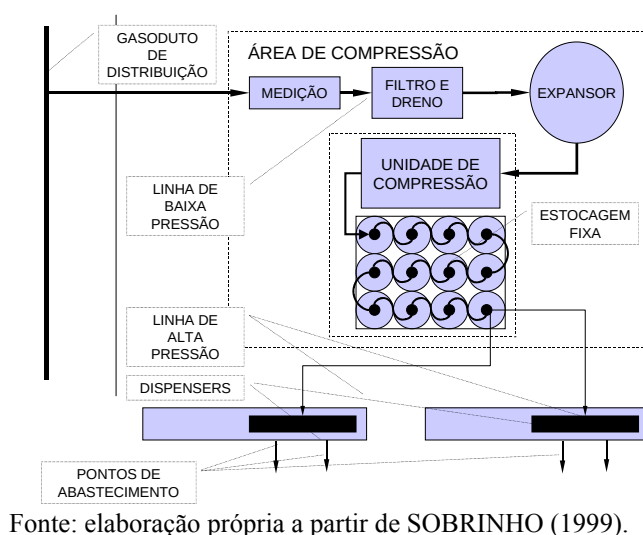
d) Distribuição

A distribuição é a etapa final do sistema, quando o gás chega ao consumidor final, que pode ser energético, residencial, comercial/público, industrial e transportes, este último exclusivamente como combustível para uso em automóveis (MME, 2002). Nesta etapa, o gás já deve estar atendendo aos padrões estabelecidos pela ANP.

Para o uso na forma de GNC é necessário que o gás natural seja distribuído de forma bastante abrangente dentro da malha urbana e ao longo das rodovias, servindo os postos de serviço de combustíveis líquidos. As redes de dutos para alimentação dos postos devem suportar pressões

de serviço de 8 a 10 atmosferas e vazões da ordem de 600 a 1.000 m³/h.

Existem duas formas básicas de reabastecimento de veículos com GNC, abastecimento rápido e abastecimento lento. No primeiro caso os tempos de abastecimento dos veículos são similares aos observados no caso dos combustíveis convencionais. O abastecimento rápido é o mais difundido no Brasil e suas peculiaridades podem ser vistas no diagrama esquemático apresentado na Figura 3.4, onde estão representados apenas os equipamentos diretamente relacionados com o abastecimento de gás natural. No caso de um posto de serviço dedicado ao abastecimento deste produto, estas serão as únicas instalações disponíveis. Porém, se já houver o serviço de abastecimento de combustíveis líquidos (combustíveis convencionais) estas instalações serão adicionadas as já existentes.



Fonte: elaboração própria a partir de SOBRINHO (1999).

Figura 3.4. Esquema básico de um posto de serviço de gás natural veicular.

O gás natural é fornecido pela empresa concessionária de distribuição de gás que atende a região onde o posto de serviço se localiza. O produto é fornecido através de um gasoduto, como indicado na Figura 3.4. A linha de gás de chegada representa uma linha de baixa pressão (5 a 10 atmosferas). O gás fornecido é medido na estação de medição, passa por um sistema de filtragem e por um vaso de pressão (expansor) antes de alimentar os compressores. Nos compressores o gás atinge pressões da ordem de 250 atmosferas, estando pronto para ser disponibilizado nos pontos de abastecimento ou encaminhado para uma estocagem fixa, vulgarmente conhecida como “pulmão”, que é composta de um conjunto de cilindros, semelhantes aos utilizados na adaptação de veículos, conectados entre si por tubulações e dimensionados para suportar as elevadas pressões do gás.

Cada ponto de abastecimento, também denominado de *dispenser*, funciona como se fosse uma

bomba de combustível, semelhante a uma bomba de gasolina, óleo diesel ou álcool hidratado. O ponto de abastecimento possui equipamento capaz de disponibilizar o produto em um sistema de abastecimento compatível com a válvula de abastecimento do veículo além de totalizar o volume de gás natural abastecido.

Um posto de abastecimento de médio porte no Brasil, dispondo de uma vazão da ordem de 1.000 m³/h é capaz de abastecer 100 automóveis ou 10 ônibus num período de 12 horas de trabalho (SOBRINHO, 1999).

e) Uso final

O GN é um combustível gasoso cujas propriedades químicas se adaptam bem a substituição dos combustíveis convencionais para motores alternativos de combustão interna que funcionam por meio de ignição por centelhamento, sejam motores de quatro tempos (ciclo Otto) ou motores de dois tempos. Na concepção destes motores é comum utilizar a gasolina como combustível, porém no Brasil também são muito comuns os motores que utilizam álcool hidratado (etanol). As características que facilitam o uso de gás natural são:

- ◆ O metano (CH₄), principal componente do gás natural, é o hidrocarboneto que apresenta o menor teor de carbono e, portanto a maior relação hidrogênio/carbono (4:1). Tal fato permite que a combustão do produto apresente índices de emissão de poluentes inferiores aos combustíveis convencionais utilizados nos motores;
- ◆ Por ser um combustível gasoso sua mistura com o ar, necessário para a sua queima no motor, é muito mais homogênea e uniforme, o que otimiza a carburação e a distribuição nos cilindros. Isto traz grandes benefícios ao desempenho de motor tanto em relação à partida a frio quanto à estabilidade do seu funcionamento;
- ◆ A sua combustão é mais eficiente do que a dos demais combustíveis, ou seja, a formação de produtos indesejados é minimizada, de forma que ocorrem menos depósitos, e conseqüentemente aumenta a vida útil dos componentes do sistema de lubrificação (óleo, filtros) e reduz-se o desgaste dos componentes do motor;
- ◆ A sua temperatura de auto-ignição é bastante elevada, sendo que também apresenta excelente resistência à detonação, propriedades importantes para os motores de combustão interna de ignição por centelhamento.

Os veículos podem dispor de motores projetados para utilizar exclusivamente o GN ou podem ser equipados com motores que operem com dois combustíveis (bicomcombustível), o GN e um dos

combustíveis convencionais, conforme o ciclo de operação do motor. A Figura 3.5 apresenta as várias opções de utilização do GN como combustível nos veículos equipados com MCI.

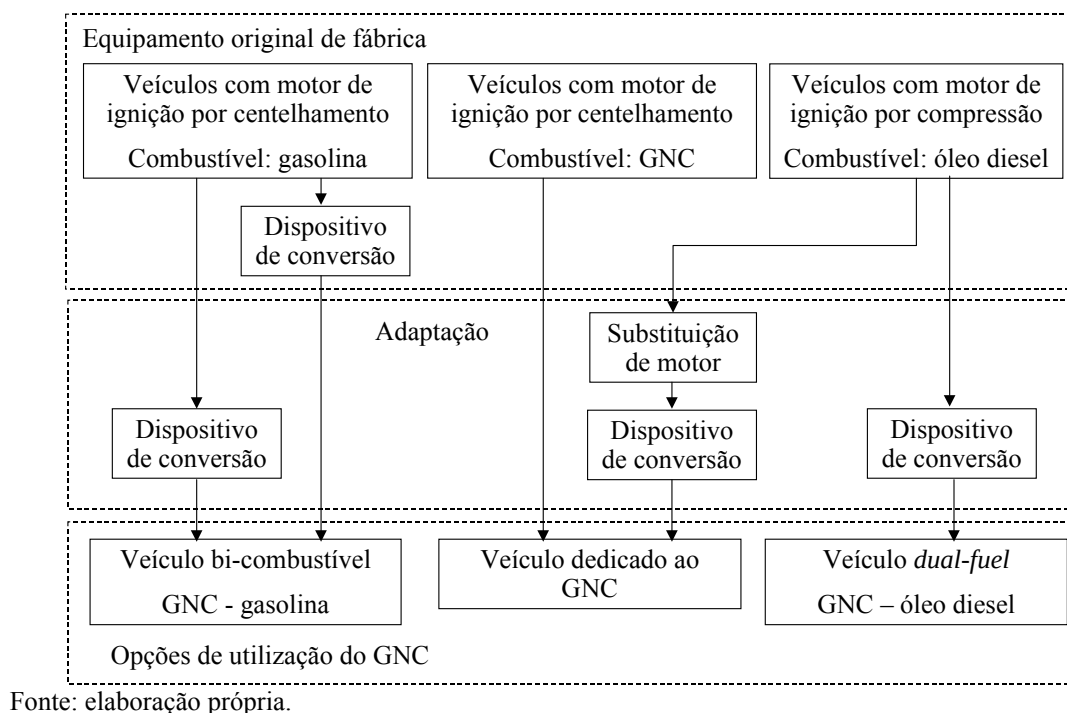
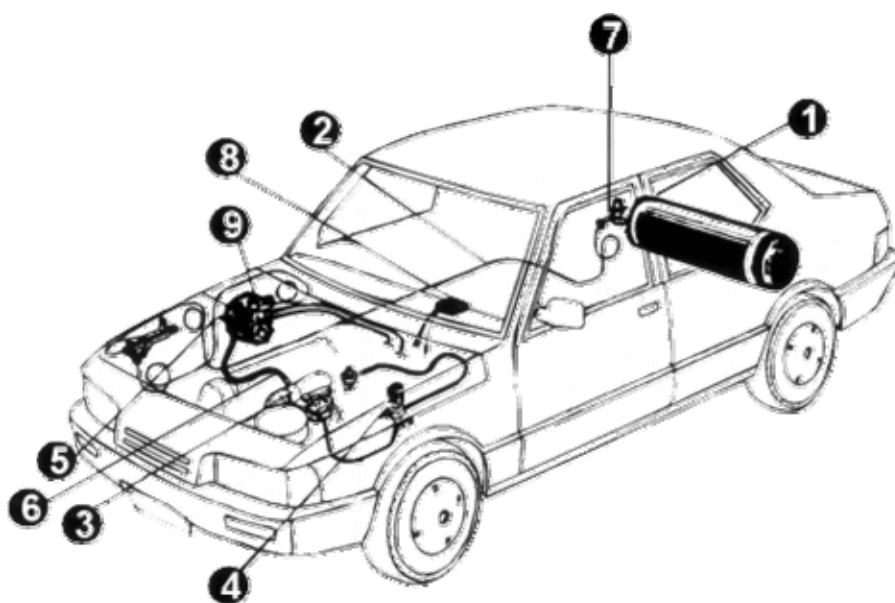


Figura 3.5. Opções de utilização do GNC como combustível automotivo.

No caso do uso de GN na forma comprimida (GNC), seja qual for a opção apresentada na Figura 3.5, os equipamentos básicos que compõe o dispositivo de conversão são apresentados na Figura 3.6. Estes equipamentos permitem que o veículo convertido utilize o gás natural como combustível conjuntamente com o combustível original, no caso de uma aplicação do tipo bicomcombustível para motores alternativos de combustão interna de ignição por centelhamento ou a substituição completa do combustível original, no caso dos motores diesel. Neste caso, deve-se ainda prever algum tipo de adaptação no motor.

O gás natural é capaz de manter o desempenho regular do motor tanto em marcha lenta (baixas rotações e sem carga) como em situação de altas solicitações de potência (altas rotações com carga) ou torque (baixas rotações e muita carga) sendo capaz, se bem regulado, de inibir de forma eficaz o problema de detonação, sem que seja necessária a adição de substâncias poluentes ao combustível, tendo em vista sua alta octanagem se comparado com os combustíveis convencionais.



Legenda: (1) cilindro de alta pressão; (2) tubulação de alta pressão; (3) dosador/misturador de GNC com ar; (4) eletroválvula para seleção de combustível; (5) válvula de abastecimento de GNC; (6) tubulação de baixa pressão – alimentação; (7) válvula de cabeça de cilindro; (8) medidor de GNC; (9) válvula reguladora de pressão.
Fonte: GASNET (2003).

Figura 3.6.Exemplo de dispositivo de conversão típico para automóvel.

Os veículos cujos motores foram projetados para utilizar exclusivamente o GNC como combustível, utilizam o ciclo Otto, pois é neste ciclo em que se pode otimizar as vantagens competitivas do gás em relação aos combustíveis convencionais. Um motor especialmente projetado para o uso de gás natural opera normalmente com altas taxas de compressão (da ordem de 14/1 a 16/1), permitidas em função do elevado poder antidetonante (alta octanagem) inerente ao gás, e portanto apresenta uma eficiência térmica superior se comparado a motores a gasolina ou álcool hidratado.

Os primeiros motores que operavam com ciclo Otto a gás eram bem mais simples do que seus similares a gasolina, mas resultavam numa perda de potência da ordem de 10%. Para otimizar a performance destes motores com GN, a cada nova geração de motores os fabricantes vêm continuamente incorporando modificações nos motores para maximizar a sua potência. Atualmente, os avanços tecnológicos incorporados aos sistemas de alimentação e de combustão dos motores deste tipo já permitem reduzir de forma significativa esta diferença.

Estes motores podem ser utilizados tanto em veículos leves como em pesados. Ainda que o Brasil não disponha de automóveis com motores dedicados a GNC, vários fabricantes no mundo, dentre eles a Ford, Honda, Toyota, BMW, Fiat, Volvo, Daimler-Chrysler, Honda, Nissan e Mitsubishi, têm veículos deste tipo, seja como produtos regulares ou como veículos experimentais ou de demonstração (DECICCO *et al.*, 2000).

No caso de veículos pesados, especialmente aplicáveis em ônibus urbanos, também existem vários fabricantes de motores, destacando-se a Cummins, Scania, Volvo, Daimler-Chrysler, sendo que este último é o único dos fabricantes que produz estes motores no Brasil. Uma das desvantagens dos veículos que utilizam este tipo de motor é a total dependência de gás natural para abastecer o veículo, o que limita a sua autonomia às regiões que disponham de instalações para o seu abastecimento.

No caso do uso do gás natural em motores concebidos para utilizar gasolina ou álcool hidratado é comum que se opere na forma bicomcombustível, utilizando preferencialmente o gás, sendo possível usar o combustível original quando necessário. Os veículos que possuem este tipo de adaptação podem ser fabricados desta forma, vindo de fábrica com essa possibilidade de escolha quanto ao combustível a ser utilizado, ou podem ser adaptados em oficinas credenciadas onde sofrem um processo de conversão, por meio da aplicação de um dispositivo, sumariamente composto pelos elementos apresentados na Figura 3.6.

Devido a necessidade de conciliar a operação da forma bicomcombustível, os veículos convertidos devem manter as taxas de compressão originais de seus motores a gasolina (9/1) ou álcool hidratado (12/1). Esta situação afeta a potência pois num motor alternativo de combustão interna por centelhamento a potência depende da razão $PCI/(1+V_a)$ e do rendimento térmico η_t^3 , onde PCI é o poder calorífico inferior do combustível empregado e V_a a quantidade de ar necessária para queimar uma unidade de volume de gás. O rendimento termodinâmico, depende de r , a taxa de compressão e do fator $k = C_p/C_v$ (C_p : calor específico a pressão constante e C_v : calor específico a volume constante). Na teoria, considerando que a razão $PCI/(1+V_a)$ para a gasolina é de 960 e para o metano é de 836, a utilização do gás natural (majoritariamente metano) seria responsável por uma queda de 14% de potência (POULALLION, 1980).

Os dispositivos de conversão têm evoluído continuamente a fim de acompanhar o desenvolvimento tecnológico incorporado pela indústria automobilística nos sistemas de dosagem e de injeção de combustível nos motores dos veículos. De tal forma que os dispositivos mais recentes, de 2ª e 3ª geração, incluem elementos para compatibilizar a operação com combustível convencional nos motores em veículos equipados com sistemas de injeção eletrônica monoponto ou multiponto⁴.

³ Sendo: $\eta_t = 1 - (1 / (r \cdot (k-1)))$.

⁴ Na injeção eletrônica monoponto o combustível é injetado em um único ponto no coletor de admissão. Já na multiponto, faz-se a injeção em um ponto para cada um dos cilindros.

Uma das grandes vantagens deste tipo de veículo para seu proprietário é a autonomia das viagens já que na falta de postos de abastecimento de GNC o veículo pode ser abastecido com o seu combustível tradicional.

Em qualquer veículo movido a gasolina ou álcool é possível instalar um dispositivo de conversão para uso de gás natural, basta que haja espaço para a instalação do cilindro de gás. Existem vários fabricantes de dispositivos de conversão nacionais e estrangeiros, que podem ser instalados por qualquer das oficinas habilitadas por todo o país.

No entanto, é conveniente relembrar, conforme já destacado acima, que deve-se avaliar se as tecnologias do dispositivo de conversão e do veículo são compatíveis para maximizar a performance do veículo com qualquer um dos combustíveis.

Veículos *dual-fuel* foram desenvolvidos para que o GNC pudesse substituir o óleo diesel, em motores de ignição por compressão. Porém, conforme descrito anteriormente, nos motores que operam com ciclo Diesel, o início da combustão se faz pela auto-ignição do combustível. Como a temperatura de ignição do gás natural é muito elevada, esta reação não se efetiva como requerido. Para contornar este problema, nos sistemas *dual-fuel* promove-se uma “injeção piloto” de óleo diesel nos cilindros, em quantidade suficiente apenas para iniciar a queima da mistura de ar + gás, de tal modo que o veículo opera em um ciclo misto, pois apresenta características do ciclo Diesel até a injeção piloto e as do ciclo Otto posteriormente. Portanto, diferentemente dos motores bicomcombustível, os *dual-fuel* não permitem a operação do veículo ora com o combustível alternativo (GNC) ora com o convencional (óleo diesel).

Alinhado com os objetivos do PLANGAS, desde o início da década de 80, o Centro de pesquisas da Petrobras (CENPES) efetuou o desenvolvimento de dispositivos de conversão para este tipo de ciclo. Além dos testes em bancada dinamométrica, inclusive com dispositivos importados, em 1985, 18 veículos da frota de ônibus da cidade do Rio de Janeiro foram submetidos a testes de campo. Os resultados, após 210.000 km rodados, indicaram redução da emissões de particulados (fumaça negra), redução de 40 a 70% do consumo de óleo diesel, porém um consumo de energia 20% superior, se comparado com a operação do veículo com o ciclo Diesel tradicional.

Posteriormente, já no início da década de 90, alguns testes foram feitos em veículos equipados com *kits* eletrônicos para controle dos sistemas de alimentação de combustível e os resultados obtidos foram mais favoráveis. Obteve-se economias de 65% a 85% de diesel, com desempenho semelhante ao veículo tradicional. No entanto, fatores políticos e econômicos, vinculados aos

interesses da empresa e do país, conduziram à descontinuidade deste programa de desenvolvimento.

Ainda que a fase de desenvolvimento do uso do gás natural nos veículos já tenha sido ultrapassada, os fabricantes têm investido muito pouco neste tipo de motor ao se comparar com os investimentos realizados no desenvolvimento de novas tecnologias aplicáveis aos combustíveis convencionais. Portanto, é de se esperar que ainda haja significativos melhoramentos a serem realizados nesta tecnologia.

Algumas características químicas do gás natural, como a quase totalidade da sua composição de metano (CH_4), sem ligações carbono-carbono e baixo teor de contaminantes, principalmente no que se refere ao enxofre, são os seus grandes trunfos ambientais em relação aos combustíveis convencionais, uma vez que o processo de combustão tende a ser mais simples e existe menos probabilidade de ocorrer combustão incompleta de hidrocarbonetos de cadeia longa. Como o motor a GN dispensa o dispositivo de enriquecimento de mistura para partida a frio, as emissões nesta condição tendem a ser menores que no caso dos combustíveis líquidos. Por fim, sendo as instalações de armazenamento do gás estanques, as emissões evaporativas são irrelevantes.

Em função do que já foi comentado no item anterior, com relação ao aprimoramento dos projetos e à introdução de novas tecnologias nos veículos leves, as vantagens ambientais da conversão para o GNC dependem de diversos fatores, onde se destaca a compatibilidade entre as tecnologias do veículo e dos dispositivos de conversão.

3.2.2.2. Análise da cadeia de suprimento e uso final do GNC

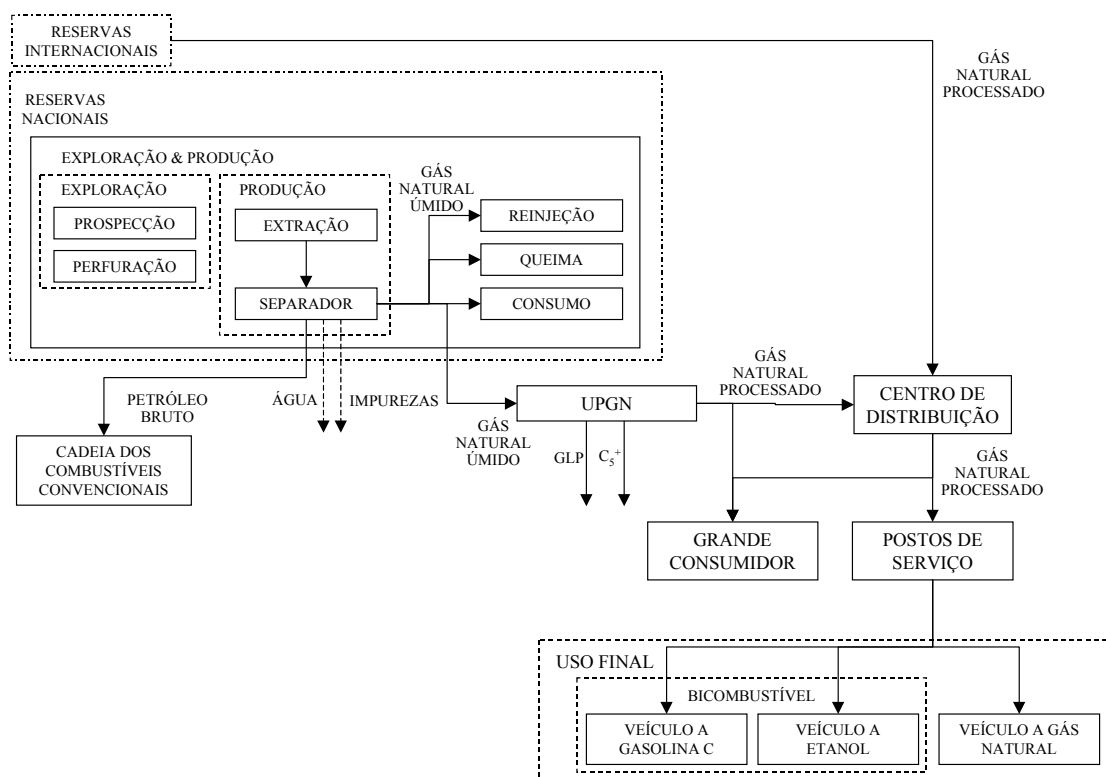
A Figura 3.7 apresenta de forma sintética a cadeia de suprimento e uso final de GNC para o uso como combustível no transporte rodoviário. Optou-se por apresentar o processo relacionado ao gás natural associado, que representa a maior parcela deste combustível no Brasil.

Foram mantidas as etapas de exploração e produção agrupadas, apresentando-se como co-produtos o petróleo bruto, que se destina à cadeia de produção dos combustíveis convencionais, e o gás natural úmido, este sendo encaminhado ao processamento nas UPGN ou ao uso na produção de petróleo. Nesta etapa existe a única interface entre a cadeia do gás natural e dos combustíveis convencionais para o transporte rodoviário.

O gás natural processado nas UPGN poderá ser transferido diretamente para os grandes consumidores (usuários finais) ou será encaminhado ao centro de distribuição, para distribuição

na malha de gasodutos urbanos aonde os postos de serviço estão conectados.

Uma vez nos postos de serviço o gás natural é comprimido, conforme esquema da Figura 3.4, estando pronto para abastecimento nos veículos na forma de gás natural comprimido (GNC).



Fonte: elaboração própria.

Figura 3.7.Cadeia de suprimento e uso final do GNC.

3.2.3. O etanol

O etanol⁵ ou álcool etílico, substância química cuja fórmula é C_2H_5OH , é o combustível alternativo renovável mais utilizado em todo o mundo, sendo que é no Brasil onde ocorre sua maior produção e consumo. O produto é conhecido como combustível automotivo há mais de um século e quando Henry Ford projetou o seu Modelo T, imaginou que o veículo poderia ser abastecido com etanol obtido a partir do milho (POULTON, 1994a; BECHTOLD, 1997).

O etanol apresenta características físico-químicas compatíveis com a utilização em motores alternativos de combustão interna de ignição por centelha, dos quais os mais empregados são os do ciclo Otto. Trata-se de uma substância simples, de composto oxigenado, que a temperatura e pressão ambiente encontra-se na forma de um líquido claro, com peso específico maior que o da gasolina e menor que o do óleo diesel.

⁵ Alguns autores também denominam o produto, quando derivado de biomassa, de bioetanol (ACIOLI, 1994; MACEDO, 1999).

No Brasil, para uso como combustível automotivo em motores de combustão interna dedicados à queima de álcool, o etanol é comercializado com até 7,4% de água, recebendo a denominação de álcool etílico hidratado combustível (AEHC). Para ser utilizado como aditivo oxigenante da gasolina, na proporção média de 25% em volume, o etanol poderá conter no máximo 0,7% de água e sua denominação será álcool etílico anidro combustível (AEAC). A Tabela 3.7 apresenta as características físico-químicas relevantes do etanol.

Tabela 3.7. Características físico-químicas relevantes do etanol.

Fonte de energia	Poder calorífico inferior [kcal/kg]	Massa específica [kg/litro]
AEAC	6.735	0,791
AEHC	6.317	0,809

Fonte: MME (2002).

Em ambos os casos, a Agência Nacional do Petróleo (ANP), por meio do Regulamento Técnico ANP nº 01/2002 aprovado pela portaria 126 de 08 de agosto de 2002, estabelece as especificações para comercialização destes combustíveis em todo o território nacional.

No Brasil, o etanol poderia até ser classificado como um combustível convencional, já que desde o início dos anos 80, utiliza-se o álcool combustível na frota rodoviária. O início de seu uso em larga escala foi a partir de um programa do Governo Federal, o PROÁLCOOL – Programa Nacional do Álcool, visto como estratégico para reduzir a dependência quanto ao petróleo importado. Mediante a formação de parcerias com o setor privado, o programa inicialmente se desenvolveu, tornando-se um sucesso social, ambiental e tecnológico. No entanto, uma série de fatores políticos e econômicos tem dificultado a consolidação da participação do etanol no mercado nacional de combustíveis automotivos.

Em 1973, quando ocorreu o primeiro choque do petróleo, o preço do barril passou de US\$ 2,70 para US\$ 11,20. Este aumento provocou um grande impacto na balança comercial brasileira, já que se importava aproximadamente 80% do total do petróleo consumido. Diante disso, o governo brasileiro começou a investir em pesquisas para a obtenção de fontes alternativas de energia para o óleo diesel, o óleo combustível e a gasolina. O PROÁLCOOL, estabelecido em 1975, procurava viabilizar a substituição da gasolina pelo álcool etílico produzido a partir da cana-de-açúcar. Os incentivos foram dirigidos à produção de álcool etílico (etanol) hidratado e anidro nas unidades açucareiras e nas destilarias independentes; ao desenvolvimento de infraestrutura de produção; ao financiamento do desenvolvimento de motores pela indústria automobilística; bem como à formação de uma extensa rede de distribuição do combustível.

O álcool hidratado (2ª fase do PROÁLCOOL) foi destinado a substituir totalmente a gasolina em automóveis equipados com motores de combustão interna dedicados à este combustível no início dos anos 80. Já o álcool anidro (1ª fase do PROÁLCOOL) foi introduzido no mercado, como um aditivo à gasolina para aumentar a sua octanagem e substituir o chumbo tetra-etila. A proposição inicial é de que a mistura deveria conter apenas 10% de álcool anidro, porém, um percentual de 22% foi adotado em todo o país a partir de 1980 (RIBEIRO *et al.*, 2002, UDOP, 2003).

Em 1979, com o segundo choque, quando o preço do petróleo alcançou US\$ 34,00 o barril, o governo brasileiro acelerou o PROÁLCOOL. Foram feitos muitos investimentos no setor, com a concessão de empréstimos e subsídios governamentais aos fazendeiros e às usinas produtoras, garantindo retorno financeiro aos investidores.

Em 1986, a redução no consumo de petróleo pelos países importadores fez com que a OPEP⁶, para garantir seu mercado, reduzisse para US\$10,00 o preço do barril. Nestas novas condições, as soluções alternativas passaram a não ser tão vantajosas. O país não pôde abandonar o PROÁLCOOL, mas começou a cortar financiamentos, subsídios e os descontos oferecidos aos produtores de álcool e aos montadores de veículos.

Entretanto o AEAC continuou a ser usado e desta forma o Brasil atingiu a produção de 15,5 bilhões de litros de etanol em 1997, o equivalente aproximadamente a 84 milhões de barris de petróleo. Em 2006, o país produziu cerca de 17,7 bilhões de litros, sendo 61% deste volume no estado de São Paulo (MME, 2002, UNICA, 2008).

No período de 1983 a 1986, a participação dos automóveis movidos à álcool no total da produção brasileira de automóveis atingiu seu pico e variou entre 73,1% e 76,0%. Desde de 1996 este percentual vem se mantendo em menos de 1% (ANFAVEA, 2004). Mesmo assim, em 2001, aproximadamente 3 milhões de veículos brasileiros eram movidos a álcool hidratado, consumindo 4,58 milhões de m³/ano (INFOENER, 2001, MME, 2002). Além disso, utiliza-se álcool anidro, na proporção de 25%, como aditivo para a gasolina, o que representou em 2006 um consumo de 5,4 milhões de m³ (BEN, 2007). Entretanto, com a retomada da política de difusão do Álcool Hidratado, o consumo de anidro em 2006 caiu 30% em relação ao ano anterior. Afinal, a gasolina C e o álcool hidratado são bens substitutos/produtos concorrentes. Nos últimos 22 anos registrou-se economia de 1,8 bilhão de dólares por ano com essa substituição (INFOENER, 2001).

A recente e progressiva elevação dos preços internacionais do petróleo tende a criar perspectivas promissoras para o álcool combustível, principalmente, porque o álcool tem tido seu reconhecimento na comunidade internacional como uma das possíveis soluções aos problemas ambientais globais.

Uma forma de agilizar o retorno ao uso intensivo de etanol no Brasil está relacionada com o lançamento e a comercialização de veículos capazes de utilizar gasolina e etanol juntos e em qualquer proporção (os veículos *flexible-fuel*), tendo em vista que o principal questionamento dos usuários deste combustível alternativo era o risco de desabastecimento, crítico para o caso de veículos dedicados mas não no caso dos *flexible-fuel*.

3.2.3.1. Cadeia de suprimento e uso final

O etanol pode ser obtido utilizando como matéria prima o gás natural ou petróleo. Neste caso, será um combustível de origem fóssil, não renovável e obtido por meio da hidratação catalítica do etileno (C_2H_4), produzido a partir do metano ou de derivados de petróleo (POULTON, 1994a). Este processo de obtenção do etanol não representa uma forma alternativa ao uso de fontes de energia esgotáveis, não sendo alvo deste trabalho.

Como fonte de energia renovável, os insumos mais utilizados são a cana-de-açúcar, a beterraba, a uva, o milho, a mandioca e vegetais diversos, capazes de produzir amido ou açúcar (ACIOLI, 1994, BECHTOLD, 1997). Quando se usam insumos ricos em sacarídeos ($C_{11}H_{22}O_{11}$), como no caso da cana-de-açúcar, da beterraba e da uva, o processo de obtenção do etanol será simplesmente a fermentação e a destilação. No caso dos insumos ricos em amiláceos ($C_6H_{10}O_5$), como é o caso do milho e da mandioca, será necessária uma etapa anterior à fermentação, de modo a quebrar o amido em açúcar (ACIOLI, 1994).

Embora pesquisas estejam sendo realizadas com diversos insumos, a experiência internacional indica que nos Estados Unidos optou-se por produzir etanol a partir do milho, enquanto na França a melhor opção esteja relacionada à combinação da beterraba com o trigo (POULTON, 1994a; BECHTOLD, 1997). No caso francês propunha-se a adição de 7% de etanol na gasolina, produzindo o aditivo a partir do cultivo de 5.100 quilômetros quadrados (150.000 hectares de beterraba e 350.000 hectares de trigo para gerar 1,5 milhões de litros).

A Alemanha, o Reino Unido e a Suíça propuseram projetos semelhantes, os dois últimos

⁶ OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo. Integram a organização: Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait,

considerando os excedentes na produção de trigo e cevada (POULTON, 1994a). No entanto, a adoção em larga escala da opção norte americana parece encontrar algum tipo de oposição, em função dos efeitos adversos de se dedicar extensas áreas cultiváveis para produção de combustível e não de alimentos. Além disso, com a tecnologia atual, mais energia é necessária para produzir o etanol a partir do milho que a energia contida no combustível (RILEY, 1994).

Também é possível obter etanol a partir do processo de hidrólise de qualquer tipo de vegetal contendo celulose, que é a substância mais abundante nas partes lenhosas da planta e constitui um terço de toda a matéria vegetal. Neste caso, trata-se de um carboidrato e o mais abundante composto natural, não tendo qualquer função alimentar para o homem. Dessa forma os insumos para a fabricação do etanol seriam restos de madeira, papel, galhos de poda, rejeitos florestais, raízes, cascas de cereais, bagaços, capim, lixo orgânico etc. As moléculas de celulose são mais complexas que as dos amiláceos, porém é possível quebrá-las em sacarídeos por meio de hidrólise enzimática ou ácida. Uma vez quebradas o processo seguirá a lógica da fermentação e destilação (ACIOLI, 1994).

No Brasil, os principais esforços no sentido de produzir etanol em larga escala estão associados à exploração da cana-de-açúcar como insumo. A cadeia de suprimento de etanol a partir da cana-de-açúcar pode ser dividida nas seguintes etapas: produção da matéria prima (insumo agrícola), produção do etanol, distribuição e uso final.

a) Produção da matéria-prima

A cana-de-açúcar é uma gramínea, a qual apresenta elevado potencial energético, uma vez que cada tonelada equivale a 1,2 barril de petróleo (RIBEIRO *et al.*, 2002). A produção de cana-de-açúcar ocupa, nas regiões Nordeste e Centro-Sul, cerca de 5 milhões de hectares, o que significou no período de 1993 a 2001, o processamento médio por safra de 272 milhões de toneladas de cana, para produzir açúcar e álcool etílico hidratado e anidro. O Centro-Sul é responsável pelo processamento de 83% do total (UNICA, 2001).

A cana-de-açúcar desenvolve-se formando touceiras, constituídas por partes aéreas (colmos e folhas) e partes subterrâneas (rizomas e raízes). As variedades são escolhidas pela produtividade, resistência a doenças e pragas, teor de sacarídeos, facilidade de brotação, exigência do solo e período útil de industrialização.

Para que possa fornecer matéria-prima para a destilaria durante toda a safra, que dura em torno de 6 meses, é necessário que a lavoura de cana-de-açúcar tenha variedades precoces, médias e tardias; isto quer dizer, variedades em que a maturação da cana ocorra no início, meio e fim da safra.

A cana-de-açúcar se desenvolve melhor em solos profundos, argilosos de boa fertilidade, com alta capacidade de retenção de água, porém, não sujeitos ao encharcamento. O índice de acidez (pH) desejado está entre 6,0 e 6,5. Normalmente, no preparo do solo para o plantio, há necessidade de misturar cal no solo para que o pH atinja estes valores (UDOP, 2003). Além disso, é comum a necessidades de adubação com nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), baseada na análise do solo e nas exigências nutricionais da cultura (MACEDO, 2002).

Depois da terra arada e gradeada, o solo é sulcado e adubado simultaneamente, com espaçamento de 1,00 a 1,35 metros entre as linhas de sulco. No fundo dos sulcos os colmos⁷ são depositados e recobertos com terra. As gemas vegetativas⁸ que se localizam nos "nós" dos colmos, darão origem a uma nova planta (UDOP, 2003).

A cana-de-açúcar, uma vez plantada, permanecerá produzindo durante 04 a 05 anos consecutivamente, quando então a produtividade diminui muito e é feita reforma do canavial. Denomina-se "cana planta" à cana-de-açúcar de primeiro corte, "cana soca" à de segundo corte e de "ressoca" a partir do terceiro corte. O plantio efetuado no período de fevereiro a maio produzirá a cana-de-açúcar conhecida como de "ano e meio" e o efetuado no período de outubro a dezembro originará a "cana de ano" (UDOP, 2003).

Embora já se encontre difundida a colheita mecanizada, ainda se pratica a colheita manual, sendo o canavial queimado para eliminar a palha (folhas secas) da cana e assim facilitar o corte, aumentando o rendimento das moendas na indústria. Depois de cortada e despontada, a cana-de-açúcar é depositada em montes que englobam sete linhas. Estes montes serão colocados em caminhões e/ou conjuntos de caminhões e reboques por uma carregadeira, sendo transportados para a usina.

Um hectare de terra fornece entre 40 e 100 toneladas de cana-de-açúcar, dependendo da forma de cultivo, adubação, irrigação e escolha das variedades mais adequadas à região (ACIOLI, 1994, MOREIRA e GOLDEMBERG, 2003).

⁷ Segmento do caule das plantas gramíneas, situado entre a raiz e a espiga.

⁸ Parte do vegetal suscetível de o reproduzir.

b) Produção do etanol

Ao chegar na usina a cana-de-açúcar deverá ser moída em até 72 horas depois do corte, caso contrário existe a possibilidade de infestação por fungos e bactérias prejudiciais à fermentação do caldo e perda de parte da sacarose pela respiração do colmo. A primeira etapa do processo é a pesagem, seguida do descarregamento por guindastes, sendo uma parte armazenada para ser moída a noite, quando não há transporte. A outra parte é diretamente encaminhada para a mesa alimentadora onde é lavada para ser industrializada. A lavagem tem a finalidade de remover as impurezas, como terra e areia, que seriam prejudiciais ao bom rendimento do processo de fabricação.

Uma esteira transporta a cana-de-açúcar lavada até o picador, que a corta em pedaços que são encaminhados ao desfibrador, cuja finalidade é abrir as células da cana para facilitar a próxima etapa, que é a extração do caldo, feita nas moendas. No total, a cana passa por quatro ternos (conjunto de 3 rolos) de moenda. Para maximizar a extração do caldo, promove-se a embebição do bagaço com caldo diluído após a passagem no primeiro e no segundo ternos e com água após a passagem no terceiro terno (ACIOLI, 1994).

Dessa moagem vai resultar o caldo de cana e o bagaço, que constitui de 26% a 30% do peso da cana-de-açúcar. O conteúdo energético do bagaço não é muito elevado, cerca de 2.257 kcal/kg, com umidade de 50% (ACIOLI, 1994), mesmo assim, é prática que uma parte seja queimado em caldeiras, produzindo vapor que irá gerar toda energia necessária ao complexo industrial. Outra parte do bagaço pode ser aproveitada como ração animal.

Um destino alternativo para excesso de bagaço gerado na usina é a produção de álcool pelo processo de hidrólise, citado anteriormente. Estima-se que uma tonelada de bagaço possa produzir cerca de 180 litros de álcool (ACIOLI, 1994). Este processo é recomendável tendo em vista que o bagaço já se encontra na usina, o que minimiza os custos de transporte.

Após sua extração o caldo de cana é peneirado para separação de pequenos fragmentos de bagaço que sobraram da moagem (bagacilho). Quase todos os açúcares existentes na cana-de-açúcar vão estar neste caldo, que é denominado de caldo misto. O caldo misto é bombeado para os aquecedores, onde é aquecido a temperaturas entre 90° e 105°C. A seguir o caldo misto aquecido é encaminhado para o decantador, onde ocorre a decantação das impurezas nele contidas. Ao resultado desta etapa denomina-se caldo clarificado, restando no fundo do decantador uma massa, denominada de lodo. O lodo é encaminhado para filtros rotativos a vácuo, que tem a finalidade de maximizar a recuperação do caldo, resultando em caldo limpo e a

torta. Esta última é enviada para a lavoura como adubo, pois é rica em sais minerais.

O caldo clarificado é bombeado para um tanque, passando a seguir por um trocador de calor, onde é resfriado para então seguir para o processo de fermentação. A fermentação é o processo que transforma os açúcares em álcool, pela ação das leveduras que estão contidas no fermento que é misturado no caldo. Esta mistura vai ficar reagindo nas dornas entre 06 e 08 horas. Do caldo fermentado, obtém-se o vinho, que é centrifugado para separação em duas partes. Da primeira parte obtém-se o leite de levedura, que foi o responsável pela fermentação e será usado em novas fermentações, logo após sofrer um tratamento químico adequado. Uma porcentagem do leite de levedura é desidratada servindo para ração animal. A segunda parte, é o vinho delevedurado, que contém de 7% a 8% de álcool (UDOP, 2003).

Como o álcool tem um ponto de ebulição de 78,5°C, menor que o da água, é possível separar os dois por um processo de destilação. Na prática a destilação industrial do álcool é feita usando-se as chamadas colunas de destilação, similares às encontradas nas refinarias de petróleo. As colunas são aquecidas na parte inferior e resfriadas na parte superior, de modo que o vinho delevedurado que alimenta a base da coluna evapora. Em função da diferença de temperatura de vaporização do álcool e da água, a medida que sobe, o vapor vai se enriquecendo de álcool, sendo esta mistura condensada e coletado em bandejas ao longo da coluna. Nas bandejas mais próximas do topo da coluna a porcentagem de álcool na mistura condensada é maior.

Em princípio podem se construir colunas com uma altura e um número de bandejas tais que se obtenha na última bandeja o teor mais alto possível de álcool, que com esse processo é 96%. Porém, por razões técnicas a indústria usa normalmente três colunas para se obter esta concentração (ACIOLI, 1994).

O rejeito industrial da destilaria é o vinhoto, que é a parte aquosa do vinho delevedurado, sendo um sub-produto de alta importância para a lavoura, pois é rico em sais minerais (N, P, K, Ca, Mg), mas que também é um agente poluidor do meio ambiente. Se não for tratado e usado de forma racional, pode poluir os rios, ameaçando a fauna e as populações que se abastecem dessa água. A produção de 1 litro de álcool acarreta a produção 6 a 13 litros de vinhoto, que depois de depositado em tanques naturais é enviado para a lavoura através de canais, bombeados e distribuído para servir como adubo (LIMA e MARCONDES, 2002).

Outro aproveitamento do vinhoto é para a produção de biogás por meio de sua decomposição anaeróbica, isto é, por microorganismos sem a presença de ar. Este aproveitamento reduz a carga

de rejeitos, produz adubo e aumenta a quantidade de energia total produzida pela usina (ACIOLI, 1994).

Atualmente já é possível obter cerca de 85 litros de etanol por tonelada de cana-de-açúcar (MACEDO, 2002), sendo o intervalo de variação mais divulgado entre 70 e 80 litros por tonelada. Desse modo, uma média de rendimento razoável para o Brasil pode ser considerada como 5.000 litros de álcool por hectare plantado (ACIOLI, 1994; MOREIRA e GOLDEMBERG, 2003). Deve-se destacar que este rendimento quase dobrou de 1979 até meados dos anos 90 (MOREIRA e GOLDEMBERG, 2003).

O Brasil também desenvolveu tecnologia industrial para obter álcool a partir de vegetais contendo amido, como é o caso da mandioca. Neste caso, os amiláceos são decompostos por enzimas apropriadas, transformando-se em açúcares, que são fermentados e destilados, de maneira semelhante ao caso utilizado no caldo de cana. Uma tonelada de mandioca pode fornecer 180 litros de álcool. O aprimoramento das pesquisas desse processo de produção sinalizava a possibilidade de atingir uma produtividade de 25 a 30 toneladas de mandioca por hectare, o que reverteria numa relação de 4.500 a 5.400 litros de álcool por hectare, similar a observada para o caso da cana-de-açúcar (ACIOLI, 1994).

Dois aspectos ratificam a continuidade das pesquisas no sentido de utilizar a mandioca como insumo para a produção de etanol: (1) a planta não carece de terra fértil para se desenvolver; (2) não se teria a produção de um combustível tão estratégico para os interesses do país dependente de uma única fonte de matéria-prima, a cana-de-açúcar. Assim a oferta de álcool combustível ficaria menos dependente das variações internacionais do preço do açúcar o que possibilitaria maior estabilidade do PROÁLCOOL.

c) Distribuição

Uma vez produzido o álcool combustível é estocado junto às destilarias e transferido por modo rodoviário ou dutoviário até as bases de distribuição das empresas distribuidoras dos combustíveis convencionais. No caso de não existirem, é necessária a construção de tanques de armazenamento, sistemas de bombeamento e redes de dutos específicos para estocagem e disponibilização do produto. Estes componentes devem ser resistentes as características químicas do etanol e principalmente impedir a absorção de água, tendo em vista a estreita afinidade entre a água e o álcool. No caso do uso de etanol como aditivo, um maior cuidado deve ser tomado, tendo em vista que pequenas quantidades de água podem levar a separação das fases e acarretar a corrosão das instalações e dos motores no uso final.

Em função da menor densidade energética, um maior volume de armazenamento de etanol será necessário para suprir as necessidades que eram anteriormente atendidas com o uso de gasolina. Esta razão é da ordem de 1,4 a 1,5 entre o volume de etanol e gasolina (BECHTOLD, 1997). No Brasil toda esta estrutura já existe e se encontra disponível, tanto nas bases de distribuição de combustíveis como nos postos de abastecimento. Mesmo com a redução do consumo de álcool etílico hidratado combustível a infra-estrutura existente foi mantida e o produto pode ser distribuído em todo o país.

d) Uso final

O uso de etanol como combustível em veículos pressupõem um projeto de motor de combustão interna de funcionamento conceitualmente idêntico ao que utiliza gasolina, porém, com componentes adequados às características físicas e químicas deste combustível. Assim, a substituição de componentes dos motores fabricados com ligas metálicas e polímeros plásticos suscetíveis ao ataque químico pelo álcool deve ser prevista.

Dentre os componentes do motor que devem ser contemplados destacam-se os bicos injetores, galerias, filtros e bombas de combustível, tanque de combustível e seus acessórios, bem como as velas de ignição. Os principais problemas decorrentes do uso inadequado de materiais em motores que utilizam etanol estão relacionados ao aumento de consumo, perda de torque e potência, falhas de aceleração, danos ao catalizador e aumento de emissões (BOTELHO, 2002).

A maior octanagem do etanol também pode ser aproveitada por meio do aumento da taxa de compressão dos motores dedicados a este combustível, desta forma aumentando sua eficiência térmica. Por outro lado, para manter a mesma autonomia, o veículo deverá contar com um tanque de combustível maior, por conta da menor densidade energética do álcool, se comparado à gasolina.

Devido ao baixo índice de cetano, o uso de etanol em substituição ao óleo diesel nos motores de ignição por compressão depende de algum tipo de modificação ou adaptação que pode se dar de uma de três formas (POULTON, 1994a):

- ◆ Modificação do motor original para um sistema *dual-fuel*, similar ao descrito para o caso do uso de GNC, onde o etanol ocupa o papel de combustível principal e o óleo diesel é utilizado com chama piloto, para iniciar a queima de mistura ar-combustível;
- ◆ Adaptação de um sistema de dupla alimentação, onde o etanol é misturado ao ar e supre parcialmente o volume de óleo diesel necessário;

- ♦ Modificação do motor original, de modo que passe a operar como um motor de ignição por centelhamento, de modo que o óleo diesel possa ser integralmente substituído pelo etanol.

Também é possível promover a mistura do óleo diesel com álcool por meio de substâncias emulsificantes, de modo que parte do volume de óleo diesel consumido pelo veículo passa a ser substituído por etanol (POULTON, 1994a; SILVA, 2001). A substância emulsificante normalmente é um éster, com propriedades semelhantes ao biodiesel, que será apresentado no item 3.2.4.

Uma forma de incentivar o uso de etanol como combustível automotivo no Brasil está na comercialização de veículos *flexible-fuel*. Estes veículos dispõem de tecnologia de injeção de combustível e controle eletrônico do sistema de alimentação que permite o uso de gasolina e/ou etanol hidratado em quaisquer proporções (ITOKAZU, 2003).

A tecnologia e os veículos *flexible-fuel* existem nos Estados Unidos desde o início da década de 90, onde já foram produzidas 3 milhões de unidades. No entanto, o uso final de álcool ainda é incipiente em função de limitações na cadeia de suprimento, com baixo rendimento produtivo a partir do milho e rede de distribuição limitada (cerca de 150 postos de revenda). O mesmo não ocorre no Brasil, que dispõem de uma cadeia de suprimento consolidada com cerca de 25.000 postos de revenda (ITOKAZU, 2003).

A primeira montadora a lançar um veículo *flexible-fuel* no Brasil foi a Volkswagen, que em março de 2003 lançou o Gol 1.6 Total Flex com preço de mercado apenas 3% maior que o Gol Power 1.6 dedicado a gasolina. Esta iniciativa foi acompanhada pelas demais montadoras, que passaram a oferecer veículos *flexible-fuel* em suas linhas de produto (GERRERO, 2003). A Tabela 3.8 apresenta um comparativo entre os veículos *flexible-fuel* disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 3.8. Resultados obtidos com os veículos *flexible-fuel* no Brasil.

Modelo do veículo	Fabricante (Marca)	Parâmetro observado	Usando apenas etanol	Usando apenas gasolina	Taxa de compressão
Gol 1.6 Total Flex	VW	Rendimento em tráfego urbano [km/l]	5,29	6,37	10:1
		Rendimento em tráfego rodoviário [km/l]	10,29	11,23	
		Potência [cv]	99	97	
		Torque [kgfm]	14,3	14	
Corsa 1.8 Flex Power	GM	Rendimento em tráfego urbano [km/l]	7,6	11,0	10,5:1
		Rendimento em tráfego rodoviário [km/l]	11,0	16,3	

Palio 1.3 8v Flexfuel	Fiat	Potência [cv]	109	105	11:1
		Torque [kgfm]	18,2	17,3	
		Rendimento em tráfego urbano [km/l]	Não divulgou	Não divulgou	
		Rendimento em tráfego rodoviário [km/l]	Não divulgou	Não divulgou	
		Potência [cv]	71	10	
		Torque [kgfm]	11,3	11,1	

Notas: potência e torque máximos a plena carga.

Fonte: ITOKAZU (2003), GERRERO (2003).

No caso do etanol se originar da cana-de-açúcar, é possível considerar que a emissão de carbono, sob a forma de CO₂, é absorvida pela planta durante o seu crescimento compensando a quantidade liberada na queima do combustível (RIBEIRO *et al.*, 2002). Além disso, seu uso reduz a emissão de poluentes atmosféricos locais como os óxidos de enxofre (SO_x) e compostos orgânicos tóxicos, como o benzeno e 1,3-butadieno (BECHTOLD, 1997).

A principal desvantagem está na emissão de aldeído acético que é um composto tóxico. Além disso, vapores de etanol reagem na atmosfera, gerando mais aldeído acético, que formam o nitrato de perox-acetila, que é um dos precursores do ozônio troposférico e também é tóxico. Já a emissão de formaldeídos a partir da queima do etanol é semelhante a esperada nos veículos a gasolina (BECHTOLD, 1997).

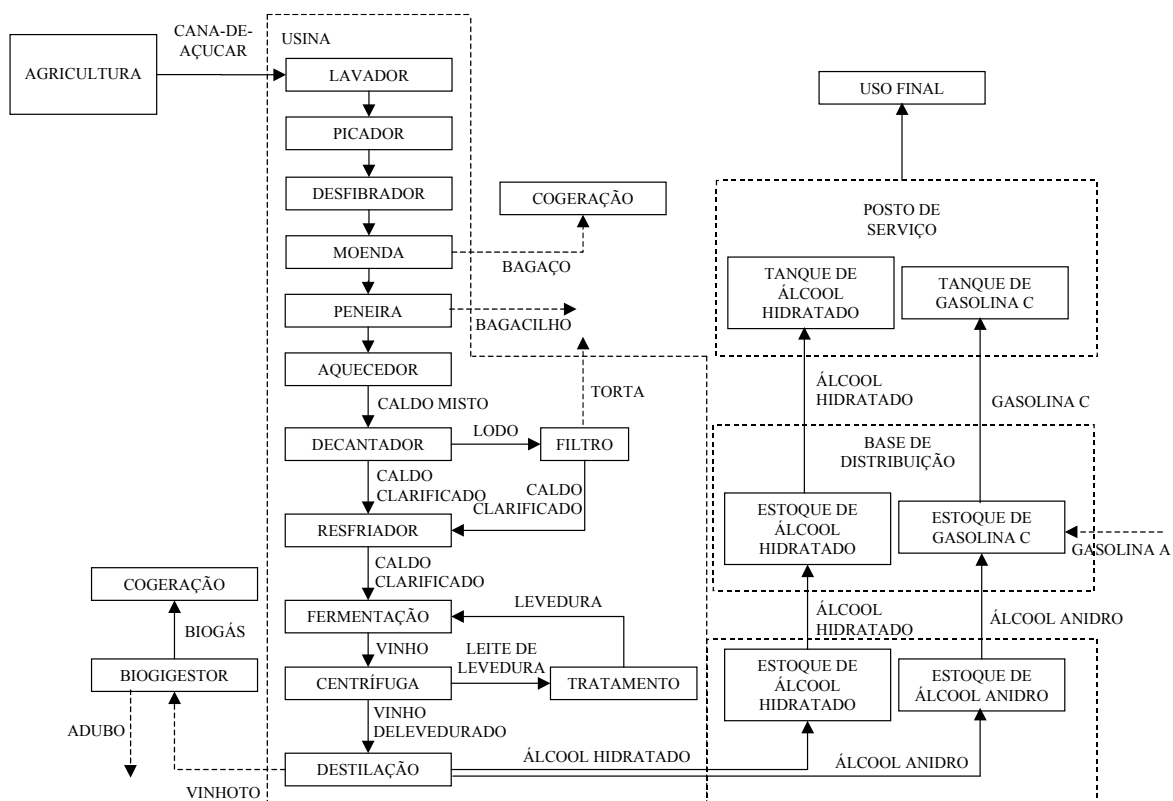
3.2.3.2. Análise da cadeia de suprimento e uso final do etanol

A Figura 3.8 apresenta de forma sintética a cadeia de suprimento e uso final de etanol no transporte rodoviário. Estes são também os estágios que devem ser considerados no consumo direto de energia para esta fonte alternativa de energia.

O etanol no Brasil é um excelente exemplo dos problemas enfrentados para a introdução de um combustível alternativo para uso no transporte rodoviário. O baixo preço do petróleo associado às variações de preço do açúcar no mercado internacional levaram à variações no abastecimento deste produto e criaram incertezas nos usuários quanto a garantia de sua disponibilidade. Porém, o Brasil continua dispondo de infra-estrutura de porte para garantir a cadeia de suprimento do etanol, o que não se encontra em nenhum outro país do mundo.

Nos últimos 5 anos a indústria brasileira do etanol produziu em média **8.000** m³ anuais de AEAC para misturar à gasolina em percentual de cerca de 25%. Esta capacidade produtiva está associada ao crescente consumo de gasolina e não é afetada pelas variações de consumo do AEHC. Se comparado com o resto do mundo, o Brasil é o único país que utiliza amplamente um combustível alternativo, pois a gasolina C brasileira é na verdade uma mistura de etanol (25%) e

gasolina (85%). Por outro lado, a adoção de veículos *flexible-fuel* no mercado brasileiro possibilita a eliminação do principal questionamento quanto ao uso do AEHC que está relacionado a incerteza no abastecimento.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3.8.Cadeia de suprimento e uso final do etanol.

No resto do mundo, alguns países, principalmente os Estados Unidos, responsável pelo consumo de 25% do petróleo mundial (IEA, 2002), têm investido recursos significativos na pesquisa e no desenvolvimento de alternativas energéticas para o transporte rodoviário. A utilização de etanol como aditivo oxigenado para a gasolina já é uma realidade nos Estados Unidos. A mistura gasolina-álcool, conhecida como *gasool*, representou 10% da gasolina comercializada nos EUA em 2000, sendo esta mistura vendida em 150 postos ao longo de 20 estados americanos (DOE, 2002).

Na Comunidade Européia, em função da Diretiva 2003/30 do parlamento europeu, que incentiva a adoção de até 5% de biocombustíveis na matriz energética dos transportes até 2010, países como a França e a Alemanha estão aprimorando a produção de “biometanol” (metanol produzido a partir de biomassa) e “bioetanol” (etanol produzido a partir de biomassa e/ou da fração biodegradável de resíduos).

No entanto, a energia solar incidente nos países do hemisfério norte é bastante inferior à

incidente no Brasil, o que torna o rendimento energético das plantações significativamente reduzido. Diferente da obtenção de etanol a partir da cana-de-açúcar, o uso de beterraba, milho e de outros grãos cultivados no hemisfério norte, além de significar um processo químico mais complexo, pois pressupõe a quebra do amido em açúcar antes da fermentação, não produz bagaço, o que reduz o rendimento energético do processo de produção e a independência de combustíveis fósseis o que dificulta a inserção dos álcoois como combustível para frota automobilística dos países desenvolvidos.

3.2.4.O Biodiesel.

O uso de óleos vegetais como substituto do óleo diesel tem sido alvo de pesquisas nacionais e internacionais há muitos anos. Por possuírem alto índice de cetano e um poder calorífico elevado, teoricamente, seu uso *in natura* se presta para a queima em motores do ciclo Diesel, como pressupunha o próprio inventor deste motor, que em 1900 apresentou um modelo capaz de queimar óleo de amendoim (ACIOLI, 1994, POULTON, 1994a, LOVATELLI, 2001).

Como as moléculas dos óleos vegetais contêm glicerina, se usados sem nenhuma adaptação em motores projetados para queimar óleo diesel observa-se problemas de carbonização e depósitos nos bicos injetores e sedes de válvulas e desgaste prematuro dos pistões, anéis de segmento e cilindros. Outros problemas estão relacionados à diluição do óleo lubrificante, dificuldade de partida a frio, queima irregular, eficiência térmica reduzida, odor desagradável dos gases de descarga e emissão de substâncias tóxicas (PARENTE, 2003). Esta constatação levou a que se evitasse o uso dos óleos vegetais *in natura* como substitutos em larga escala do óleo diesel (POULTON, 1994a).

Para minimizar ou contornar estes problemas existem algumas opções: (1) utilização de misturas de óleos vegetais com o óleo diesel em até 30%; (2) utilização de ésteres de ácidos graxos, obtidos por meio de transformação química do óleo vegetal e (3) utilização de óleos vegetais craqueados (SALAMA, 1982, ACIOLI, 1994).

A opção dominante em todo o mundo é o uso dos ésteres de ácidos graxos, aos quais se denomina genericamente de biodiesel. A forma mais comum de obtenção deste combustível é por meio da reação dos óleos vegetais com metanol ou etanol, na presença de um catalizador, em processo químico conhecido como transesterificação, cujos produtos são a mistura de ésteres etílicos ou metílicos de ácidos graxos, que compõe o próprio biodiesel e glicerina, cujo maior constituinte é o glicerol.

Embora existam diversas matérias primas capazes de produzir biodiesel, envolvendo tanto os óleos vegetais, como os de dendê, copaíba, amendoim, soja, algodão, abacate e mamona; quanto as gorduras animais e os resíduos gordurosos, a experiência internacional na produção industrial tem recaído sobre o uso de óleo colza (grande predominância) de soja e de girassol (menores quantidades).

A referência internacional para caracterizar o biodiesel baseia na Norma Européia EN 14.214, e a Norma Norte Americana ASTM D 6751-02 (PARENTE, 2003). No Brasil a Agência Nacional de Petróleo (ANP) publicou em 15 de setembro de 2003 a Portaria 255/2003 e o Regulamento Técnico ANP nº 2/2003 com a especificação preliminar do biodiesel puro (B100). Como ainda não existe produção comercial estabelecida de biodiesel no Brasil, a Tabela 3.9 apresenta as características físico-químicas relevantes do biodiesel com base na literatura internacional.

Atualmente o uso de biodiesel em maior escala se dá na Comunidade Européia (CE) que desde a década de 70 estuda as aplicações deste combustível em máquinas agrícolas e para o transporte rodoviário (MACCHI, 1991; KÖRBITZ, 2000). A capacidade européia estimada para 2004 é de 1.200.000 toneladas e a norte americana, segunda maior, não deve chegar a 200.000 toneladas (EBB, 2004).

Tabela 3.9. Características físico-químicas relevantes do biodiesel.

Combustível	Número de Cetano	Densidade	Poder Calorífico Superior (BTU/lb)
EMS	-	0,8756	17283
EMOS	51,34	0,8848	17437
EMOG	49	0,8800	-
EMOA	51,2	0,8800	-
EMOC	54,4	0,8738	17930
EEOS	48,2	0,8810	17208
EEOR	61	0,8716	17428

Legenda: EMS – Éster Metílico de Sebo; EMOS – Éster Metílico de Óleo de Soja; EMOG – Éster Metílico de Óleo de Girassol; EMOA – Éster Metílico de Óleo de Algodão; EMOC – Éster Metílico de Óleo de Colza; EEOS – Éster Etilílico de Óleo de Soja; EEOR – Éster Etilílico de Óleo Residual de Fritura. O uso de “-” significa que o valor não foi publicado.

Fonte: elaboração própria a partir de SHEEHAN *et al.* (1998).

No início do ano de 2003, o Parlamento Europeu estabeleceu a Diretiva 2003/30/CE no sentido de promover o uso de energia renovável no setor de transportes. Esta diretiva estabelece metas para os países membros: 2% de biocombustíveis até dezembro de 2005 e 5,75 % até dezembro de 2010. As metas não são obrigatórias, mas os governos estão estimulados a desenvolverem planos para atingir tais metas.

Como principais argumentos para a produção de biodiesel se destacam a utilização de terras não

destinadas ao cultivo de alimento, o aquecimento do mercado agrícola, a substituição estratégica dos derivados de petróleo e uma forma de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa, principalmente CO₂ (CONNEMANN e FISCHER, 1998).

Na Europa, a produção do biodiesel é originada principalmente da colza, que é uma couve comestível, cuja semente fornece óleo. Em menor quantidade o combustível pode ser obtido também do óleo de girassol. Historicamente, as primeiras experiências se iniciaram na Áustria (déc. 70), porém, atualmente os três maiores produtores e consumidores europeus de biodiesel são Alemanha, França e Itália (EBB, 2004).

A Alemanha é o país que apresenta atualmente o maior consumo de biodiesel, tendo inclusive plantações dedicadas para fins energéticos e no período de 1998 à 2001 seu consumo mais do que quadruplicou, em função da ampliação da oferta na rede de distribuição. França e Itália também se destacam no crescimento do uso de biodiesel, com taxas de crescimento de 75% e 340% respectivamente, no mesmo período (LOVATELLI, 2001). A Tabela 3.10 mostra uma síntese da produção dos últimos dois anos de biodiesel em alguns países europeus.

Tabela 3.10. Capacidade e produção de biodiesel nos países da Europa (1.000 t/ano)

País	2002	2003		2004
	Produção	Capacidade	Produção	Capacidade ¹
Alemanha	550	1.100	650	1.100
França	366	523	357	523
Itália	210	420	273	550
Áustria	25	75	32	100
Inglaterra	3	9	5	15
Dinamarca	10	40	41	44
Suécia	1	8	1	8
Espanha			6	70
Total	1065	2048	1434	2156

Nota: 1 - Valores previstos, tendo em vista algumas iniciativas em andamento.

Fonte: elaboração própria a partir de UFOP (2004), BOCKEY (2004a, 2004b), EBB (2004).

3.2.4.1. Cadeia de suprimento e uso final

O processo de suprimento de biodiesel está parcialmente associado à origem dos insumos que podem ser usados na produção deste combustível. É possível classificá-los da seguinte maneira (PARENTE, 2003):

- ◆ Insumos residuais: envolvem o óleo de fritura usado, ácidos graxos, gordura animal e esgoto sanitário. Por serem considerados como poluentes a obtenção de combustível a partir destes insumos configura-se como uma atividade que utiliza materiais sem valor no mercado, o que contribui para a redução dos custos de produção, além de caracterizar um tratamento

sanitário. A matéria-prima do processo é de disposição imediata junto aos centros urbanos, porém, em pequena quantidade quando comparada à demanda energética. No caso do Brasil poderia atender a cerca de 2,5% da demanda de óleo diesel (IVIG, 2001);

- ◆ Insumos extrativos: no Brasil envolvem os recursos oriundos do extrativismo vegetal, como o babaçu, o buriti e a castanha-do-pará. Esta matéria-prima também apresenta disposição imediata, porém encontra-se em locais distantes dos centros urbanos. Apresenta-se em quantidade superior que a dos insumos residuais, podendo atender a cerca de 8% do consumo brasileiro (DI LÁSCIO, 1994);
- ◆ Insumos cultivados: envolvem por exemplo soja, mamona, dendê, girassol, amendoim, colza e coco, insumos que não apresentam disposição imediata em função de já terem um mercado consolidado, podendo sofrer variações de preço em função das flutuações do mercado. Neste caso é possível aproveitar entre 80 e 90 milhões de hectares agricultáveis ociosos do Brasil (FERRÉS, 2001) e as peculiaridades de cada região quanto ao cultivo de oleaginosas. O potencial de oferta de insumo seria mais de dez vezes superior à demanda interna por combustível.

Verifica-se que a origem dos insumos tem maior impacto na forma de obtenção da matéria-prima e menor na produção do combustível. Uma vez que a matéria-prima esteja disponível a obtenção dos ésteres de ácidos graxos pode se dar por meio da transesterificação dos triglicerídeos constituintes da matéria-prima, ou por meio da hidrólise dos triglicerídeos em ácidos graxos e posterior esterificação dos ácidos graxos (ACIOLI, 1994, PARENTE, 2003). A opção dependerá da composição da matéria-prima, que pode ser rica em triglicerídeos ou em ácidos graxos, porém, em ambos os casos trata-se de processos químicos a serem realizados em uma planta industrial.

a) Produção da matéria-prima – biomassa rica em óleos e gorduras

No Brasil existe potencial de produção de biodiesel a partir de insumos residuais, extrativos e cultivados. A Tabela 3.11 apresenta uma síntese deste potencial obtido a partir de PARENTE (2003).

Tabela 3.11. Matérias primas para produção de biodiesel.

Tipo de insumo	Matéria-prima	Produção anual de óleo	Característica
Cultivável	Soja	500 a 600 kg/ha	Cultura temporária mecanizada.
	Amendoim	ND	Cultura temporária mecanizada.
	Girassol	ND	Cultura temporária.
	Colza	350 a 400 kg/ha	Cultura temporária, principal fonte de biodiesel na Europa.
	Mamona	ND	Cultura que se adapta bem às condições do semi-árido.
	Dendê	5.000 kg/ha	Cultura permanente, necessita de 5 anos para início da extração do óleo.
Extrativismo	Babaçu	240 kg ¹	No Brasil existem 17 milhões de hectares onde predomina a palmeira de babaçu
Residuais	Óleo residual de fritura	30.000 t ²	Geração próxima aos grandes centros urbanos.
	Gorduras animais	ND	
	Gordura de esgotos	ND	Tecnologia em desenvolvimento.

Notas: 1 - Produção anual de babaçuais de elevada densidade, considerando 6.000 kg de coco por ano por ha e 4% de óleo no coco; 2 - Considerando apenas os fornecedores que produzem mais de 100 kg de óleo por mês; ND – Não divulgado. Fonte: elaboração própria a partir de PARENTE (2003).

Uma opção atraente para a produção de combustível para o transporte rodoviário urbano seria a conciliação do uso de insumos residuais, já disponíveis nos aglomerados urbanos, com insumos cultivados. Neste caso é possível explorar o uso de óleos residuais de fritura como complemento à fabricação de biodiesel a partir de óleo de soja, que representa cerca de 90% da produção de óleos comestíveis no Brasil (PARENTE, 2003).

No caso do óleo residual de fritura, o principal aspecto a ser avaliado no processo anterior a produção do biodiesel está relacionado à logística da coleta da matéria-prima, por esta se encontrar pulverizada em diversos pontos na malha urbana.

Já a produção de biodiesel a partir do óleo de soja virgem depende das etapas de agricultura e produção do óleo. No Brasil, é possível produzir em média 2,3 toneladas de soja por hectare plantado (MA, 2004). O processo de plantio e colheita é totalmente mecanizado, sendo as sementes transportadas para os centros de extração de óleo (esmagamento) por meio de transporte rodoviário ou ferroviário.

b) Processamento da matéria-prima

O processamento da matéria-prima para sua conversão em biodiesel visa criar melhores condições para a efetivação da reação química, obtendo-se máxima taxa de conversão. No caso

da biomassa rica em óleo vegetal o primeiro passo é a obtenção do óleo que pode ser feita por meio de extração mecânica (esmagamento), extração com solvente e/ou extração mista.

A princípio, a seleção da forma de extração do óleo depende de dois fatores: capacidade produtiva e teor de óleo encontrado na biomassa. A Tabela 3.12 apresenta a forma de extração, a situação mais adequada para seu uso e o tipo de matéria-prima que pode ser empregada.

Tabela 3.12. Forma de extração do óleo e situação recomendada.

Forma de extração do óleo	Situação recomendada	Teor de óleo	Matérias-primas típicas
Mecânica	Pequenas e médias capacidades, normalmente abaixo de 200 toneladas de grãos por dia.	Alto (> 35% em peso)	Mamona, amendoim, babaçu
Por solvente	Grandes capacidades, normalmente acima de 300 toneladas de grãos por dia.	Baixo (< 25% em peso)	Soja
Mista	Médias e grandes capacidades, normalmente acima de 200 toneladas de grãos por dia.	Médio (entre 25% e 35% em peso)	Mamona, amendoim, babaçu, girassol, algodão

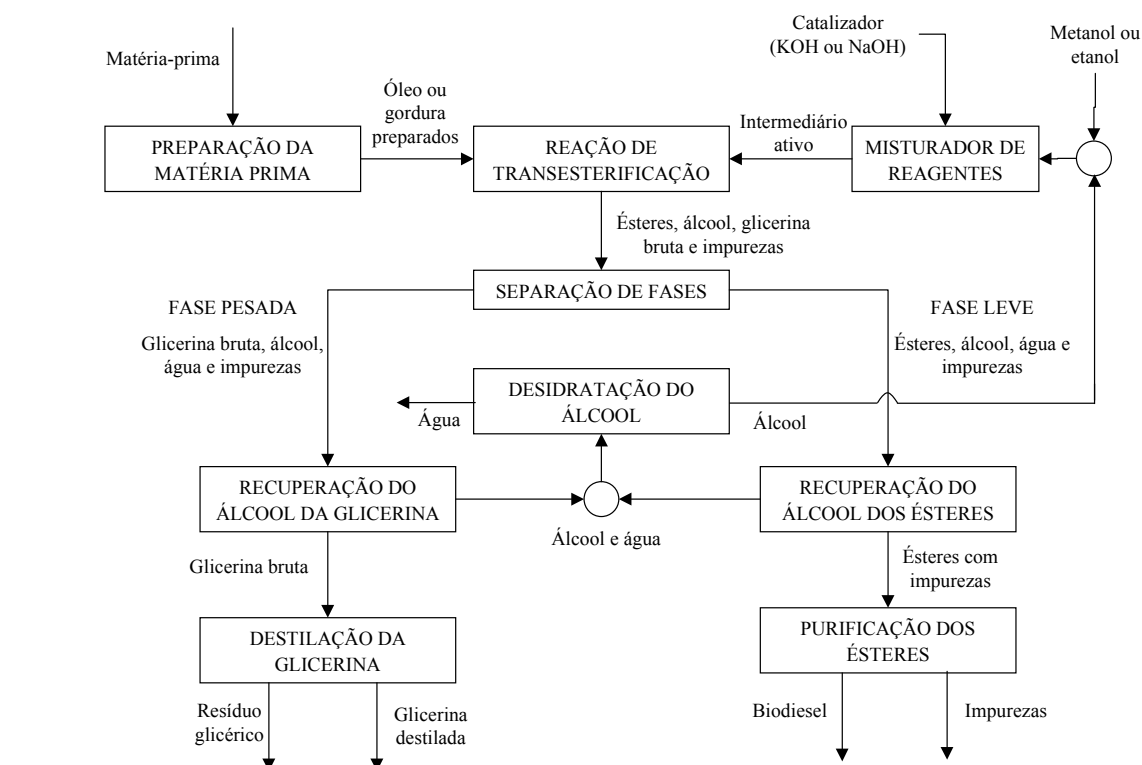
Fonte: PARENTE (2003).

No caso dos insumos residuais, pode ser necessário extrair o óleo, como no caso dos óleos e gorduras animais, o que é feito aplicando-se água e vapor (PARENTE, 2003). O processamento das matérias graxas de esgoto ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento, porém também é necessário um processo de extração de gordura, o que pode ser feito com solvente.

No caso específico da soja brasileira, antes de serem esmagadas, as sementes são limpas e secas. Depois de extraído, o óleo é degomado para retirada de carbonatos e ácidos graxos livres, isto é feito por meio de lavagem com água quente. Uma tonelada de soja processada produz cerca de 190 kg (19%) de óleo degomado e 780 kg (78%) de farelo (FERRÉS, 2001). A principal aplicação do farelo de soja é como ração animal, de alto valor proteico.

c) Produção do combustível - biodiesel

Pode-se estabelecer um fluxograma do processo de produção do biodiesel a partir de óleos e gorduras ricas em triglicerídeos, principal matéria-prima para obtenção deste combustível, como pode ser visto na Figura 3.9.



Fonte: elaborado a partir de PARENTE (2003).

Figura 3.9. Processo de produção de biodiesel.

Antes de iniciar a reação química, faz-se necessário uma preparação da matéria-prima para que esta tenha o mínimo de acidez e umidade, o que é possível submetendo-a a um processo de neutralização, por meio de lavagem com solução alcalina de hidróxido de potássio ou sódio, seguindo-se de operação de secagem e desumidificação.

A reação química, usualmente denominada de transesterificação é a etapa de conversão do óleo ou gordura nos ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos que constituem o biodiesel. As equações (3.1) e (3.2) apresentam estas reações:



Sob o ponto de vista objetivo, as duas reações são equivalentes, pois tanto os ésteres metílicos quanto os etílicos são considerados como biodiesel e capazes de substituir o óleo diesel. As duas reações acontecem na presença de um catalizador, o qual pode ser o hidróxido de sódio (NaOH) ou o hidróxido de potássio (KOH). No Brasil o NaOH é muito mais barato do que o KOH, porém, é muito difícil decidir genericamente qual dos dois catalizadores deve ser o utilizado, ficando a decisão para ser analisada caso a caso. A Tabela 3.13 apresenta sinteticamente as

características da produção (PARENTE, 2003).

Tabela 3.13. Características da produção de biodiesel em função da rota escolhida.

Característica da produção	Rota do processo	
	Metilica	Etílica
Quantidade consumida de álcool por 1.000 litros de biodiesel	90 kg	130 kg
Preço médio do álcool	US\$ 190/kg	US\$ 360/kg
Excesso recomendado de álcool, recuperável, por destilação, após reação	100 %	650%
Temperatura recomendada de reação	60 °C	85 °C
Tempo de reação	45 min	90 min

Fonte: PARENTE (2003).

Em todo o mundo o biodiesel tem sido obtido a partir do metanol, porém, no Brasil as vantagens do uso da rota etílica estão relacionadas à disponibilidade do produto e da cadeia de suprimento e infra-estrutura de oferta, como foi visto no item 3.2.3. Sob o ponto de vista ambiental o etanol também leva vantagem sobre o metanol, quando este último é obtido de derivados do petróleo ou do gás natural. Esta vantagem ambiental pode não existir se o metanol for obtido a partir da biomassa.

Por outro lado, como no Brasil o etanol já é amplamente utilizado como combustível automotivo e aditivo para a gasolina, produzir biodiesel utilizando metanol obtido a partir do gás natural pode ser uma forma de aproveitar melhor os recursos nacionais desta fonte de energia fóssil e diversificar a matriz energética brasileira, correndo menores riscos de dependência e desabastecimento.

O produto da reação de transesterificação pode ser dividido em duas fases. A fase pesada, composta de uma mistura de glicerina, álcool, água e impurezas e a fase leve, composta do éster (metílico ou etílico), álcool, água e impurezas. É possível que se encontre traços de glicerina na fase leve e de éster na fase pesada.

A fase pesada é encaminhada para o processo de recuperação do álcool, o que é feito por evaporação. A mistura álcool e água que vaporiza deste processo é encaminhada para o processo de desidratação do álcool, o que é feito por destilação. A glicerina bruta é encaminhada para o processo de destilação da glicerina.

Também por evaporação elimina-se a mistura álcool e água do éster, sendo este remetido para o processo de purificação. A mistura álcool e água é encaminhada para desidratação.

A desidratação da mistura metanol com água é muito mais fácil que a da mistura etanol com água. Isso ocorre pois a diferença de volatilidade entre o metanol e a água é muito grande e não

existe azeotropismo⁹ para dificultar a completa separação, o que não ocorre com o etanol.

Uma vez que tenha passado pelo processo de recuperação do álcool, o éster deve sofrer um processo de purificação, onde são lavados por centrifugação e desumidificados, para que suas características se enquadrem perfeitamente nas especificações desejadas. Esta é uma fase bastante crítica e deve ser rigorosamente controlada, para que sejam eliminadas todas as impurezas, principalmente resíduos de glicerina.

A glicerina bruta já é um produto comercializável, porém, o mercado valoriza mais a glicerina purificada, o que é feito por destilação a vácuo, resultando num produto transparente e límpido, denominado comercialmente de glicerina destilada e cujas aplicações ocorrem na indústria química e farmacêutica. O resíduo deste processo, contendo de 10% a 15% de glicerina ainda está tendo sua aplicação pesquisada.

A descrição do processo de produção apresentado anteriormente tem aplicação geral na produção do biodiesel a partir de óleos e gorduras ricas em triglicerídeos. Tendo em vista o potencial da soja como matéria-prima para produção de biodiesel no Brasil, optou-se por destacar as particularidades deste processo, o que será feito a seguir.

O óleo de soja é composto de triglicerídeos (97,7% em peso), carbonatos (0,02% em peso), material não saponificável (1,5% em peso) e ácidos graxos livres (0,719% em peso) (SHEERAN *et al.*, 1998). Uma vez extraído e transportado para a planta de produção de biodiesel este óleo deve passar por um processo de neutralização para remoção dos ácidos graxos livres (remoção de acidez), o que gera sabão como resíduo.

Para remoção do sabão o óleo refinado é lavado com água quente e posteriormente deve passar pelo processo de secagem, antes de seguir para o processo de transesterificação, onde reage com um produto considerado como intermediário ativo, oriundo da reação entre álcoois e uma base, produzindo o éster de ácido graxo e a glicerina.

O intermediário ativo é resultado da reação entre o álcool, normalmente o metanol, com uma base, normalmente o hidróxido de sódio (NaOH) ou potássio (KOH), que funciona como catalizador. O etanol anidro poderia ser utilizado, sendo tolerável um percentual de no máximo 2% de água, uma vez que a água atua como inibidor da reação. Esta reação ocorre

⁹ Azeotropismo: fenômeno apresentado pelas soluções de duas ou mais substâncias que, sob pressão constante, tem temperatura de vaporização isotérmica perfeitamente determinada. No caso da mistura água e etanol, observa-se um azeótropo homogêneo, pois a mistura é composta de uma única fase que a pressão constante ferve a temperatura constante.

preferencialmente com álcoois de baixo peso molecular, como o metanol, que tem sido o preferido em função de sua alta reatividade e preço atrativo no mercado mundial, configurando o éster metílico de ácido graxo como o biodiesel comercialmente produzido em todo o mundo.

O processo produtivo ocorre em duas etapas. Inicialmente o metanol é misturado com o catalizador de modo a produzir o intermediário ativo. Este é então bombeado para um reator onde entrará em contato com o óleo de soja de modo que ocorra a transesterificação. Após a reação, a glicerina é separada em tanques de decantação ou por centrifugação e o éster metílico é retirado e destilado.

Em média a reação do óleo de soja degomado com 11% em peso de metanol resulta em 88% de biodiesel e 9,2% de glicerina (FERRÉS, 2001). A diferença se apresenta na forma de sabão. Para o caso do etanol é necessário utilizar de 13% a 15% em peso do álcool, obtendo-se 85% de biodiesel e 8,8% de glicerina.

d) Distribuição

O estágio de distribuição é bastante semelhante ao do óleo diesel. Se for utilizado como aditivo a ser misturado no óleo diesel, deverá ser disponibilizado nas distribuidoras que se encarregarão de misturá-lo ao óleo diesel na proporção especificada, como é feito com o álcool anidro. Se for utilizado puro, atendendo a nichos específicos de mercado, deverá se dispor de tanques para seu armazenamento nas distribuidoras e nos postos de serviço. Neste caso, um cuidado especial deve ser tomado quanto a contaminação por água, que pode acelerar a degradação do produto (RIBEIRO *et al.*, 2004).

e) Uso final

Uma das grandes vantagens do biodiesel é sua adequação aos motores do ciclo Diesel, pois enquanto a aplicação de outros combustíveis mais limpos que os convencionais, como o GNC, requer adaptação e/ou troca de motores, a combustão de biodiesel pode dispensar maiores alterações, fornecendo uma alternativa de combustível renovável capaz de atender toda a frota de veículos movida a óleo diesel já existente.

Nos anos de 1983 e 1984 foram realizados no Brasil testes com uma frota de 16 caminhões e ônibus, rodando cerca de 870.000 quilômetros; 6 tratores e 1 *moto-scraper*, funcionando por cerca de 5.000 horas. O combustível utilizado foi o éster etílico de óleo de soja, puro ou misturado ao óleo diesel na proporção de 30% e 70%. Os veículos apresentaram dirigibilidade e desempenho normais, salvo nos casos onde se observou pequena carbonização dos bicos

injetores. A substituição destes componentes foi suficiente para retificar as características de desempenho dos veículos. Os problemas de carbonização de bicos injetores foram mais comuns nos motores operando em maiores rotações e com pequena cilindrada em aplicação urbana. Motores de maior cilindrada ou turbinados não apresentaram qualquer problema. O rendimento energético foi mantido enquanto os bicos injetores se mantiveram limpos, um aumento médio de consumo de 6% foi observado para o uso de biodiesel puro (NIGRO, 2001).

Ainda na década de 80 testes de longa duração realizados com ésteres metílicos e etílicos de óleo de soja apresentaram resultados equivalentes entre si, mas se comparados com o óleo diesel, os motores apresentaram cerca de 4% de perda de potência e aumento de 10% no consumo específico (PINTO *et al.*, 2001).

Em 2001 a PETROBRAS fez uma avaliação do teor de biodiesel em misturas com o óleo diesel. Foram testadas misturas de 5% (B5) e 20% (B20) em volume de éster metílico de óleo de soja. Verificou-se um aumento progressivo no número de cetano com o aumento do teor de biodiesel na mistura. O número de cetano cresceu de 42,5, observado no óleo diesel puro, para 45 no B20. Observou-se uma melhora sensível na lubricidade após mistura de 5% de biodiesel, esta característica se manteve aproximadamente constante para o caso do B20. Por outro lado, a instabilidade aumentou com o aumento do percentual de biodiesel na mistura, caracterizado pelo aumento da observação de partículas no combustível após exposição à atmosfera oxidante (PINTO *et al.*, 2001).

Entre janeiro e março de 1998 foram realizados testes de campo com 40 ônibus urbanos utilizando mistura B20 de éster metílico de óleo de soja na Cidade de Curitiba. Os testes foram supervisionados pela empresa de urbanização da cidade (URBS) e coordenados tecnicamente pela TECPAR (TECPAR, 2000). Uma frota similar foi mantida operando com óleo diesel como referência. A Tabela 3.14 apresenta a relação do veículos que participaram dos testes.

Tabela 3.14. Veículos participantes do testes em Curitiba.

Marca	Modelo	Quantidade
Mercedes Benz	MBB O 371 UP	10
Mercedes Benz	MBB OF 1620/60	20
Volvo	B58	8
Scania	L 113	2

Fonte: TECPAR (2000).

Os veículos testados não sofreram nenhuma alteração de seus componentes mecânicos e ao longo do teste foi possível acumular 426.617 km onde não se verificou diferença digna de nota quanto à operação, manutenção e dirigibilidade dos veículos se comparados ao uso de óleo diesel. A eficiência [km/l] média dos veículos que operaram com biodiesel foi 2,3% menor que a dos veículos que operaram com óleo diesel.

Os ônibus urbanos testados em Curitiba representam adequadamente a tecnologia empregada na década de 90, com motores de injeção mecânica, turbinados e com pós-resfriamento. Assim como para a experiência apresentada por NIGRO (2001), que caracterizava a tecnologia empregada na década de 80, o uso biodiesel em mistura com óleo diesel nos veículos fabricados na década de 90 aparentemente não representa maiores problemas.

Baseado na experiência européia, BOLDO *et al.* (2001) enumeram os problemas que podem ocorrer por conta do uso inadequado dos ésteres metílicos de ácidos graxos. Estes problemas podem ser devido a existência de contaminantes decorrentes do processo de produção, das propriedades físicas do combustível ou da sua degradação.

Verifica-se que cuidados devem ser tomados no sentido de promover a normatização das propriedades dos ésteres de ácidos graxos e seu controle de qualidade, que se considerados, garantem a utilização do biodiesel em motores originalmente projetados para o uso de óleo diesel sem a necessidade de adaptações e minimizam a probabilidade de falhas.

Um extenso trabalho comparativo realizado por SHEEHAN *et al.* (1998) conclui que embora esperada a perda de potência e o aumento de consumo pelo uso de biodiesel isto na prática não é perceptível. Analisando o resultado de 20 trabalhos que testaram (testes em dinamômetro em regime permanente ou transiente) biodiesel ou suas misturas (B10 a B100) com óleo diesel em motores (diversos modelos e anos de fabricação) os autores concluem que não é possível identificar qualquer perda de potência ou aumento de consumo pelo uso de biodiesel ou qualquer de suas misturas ao nível de significância de 90%.

A possível explicação para os resultados está no fato do menor poder calorífico superior do biodiesel (cerca de 9,6% menor que o do óleo diesel) ser na prática compensado pela maior densidade (cerca de 3,5% maior que a do óleo diesel) e maior número de cetano (cerca de 9,5% maior que o do óleo diesel).

A maior parte dos testes foi realizada com motores de combustão interna do ciclo Diesel e 4 tempos, Detroit Diesel - DDC Series 60 (11,1 litros) e 50 (8,5 litros) fabricados no período de 1991 e 1998 e Cummins N14. Estes motores já dispunham de sistema de injeção eletrônica e são adequados ao uso em caminhões e ônibus.

O estudo de SHEEHAN *et al.* (1998) relata que nos ensaios de potência, a redução máxima verificada com o uso de B100 foi de 2,8%. No que se refere ao aumento de consumo, apresentam-se resultados onde a diferença de consumo com uso de misturas B0, B20, B35, B65 e B100 não passa de 5%. Em ambos os casos, considerada-se que estas variações são imperceptíveis na prática.

Para o caso das emissões, observa-se que a tendência é o aumento nas emissões de NO_x e redução dos demais poluentes regulamentados (HC, CO e MP). O trabalho de SHEEHAN *et al.* (1998) apresenta curvas que relacionam o aumento ou redução de emissões com o percentual de mistura de biodiesel no óleo diesel.

- ♦ $\text{NO}_x - y = 0,0889x$ ($R^2 = 0,6616$)
- ♦ $\text{MP} - y = -0,6807x$ ($R^2 = 0,9722$) – MP é MP10
- ♦ $\text{CO} - y = -0,4623x$ ($R^2 = 0,9254$)
- ♦ $\text{HC} - y = -0,3673x$ ($R^2 = 0,3663$)

Onde: y é a mudança percentual de emissões e x é o percentual de biodiesel na mistura.

Verifica-se que o modelo explica bem o caso do MP e do CO ($R^2 > 0,7$), porém não explica bem o caso do NO_x e ainda menos o caso do HC (hidrocarbonetos não metano). No caso destes dois últimos poluentes, é possível que a curva siga uma tendência exponencial, com maiores variações para menores valores de percentual de mistura e ganhos proporcionais decrescentes (SHEEHAN *et al.*, 1998).

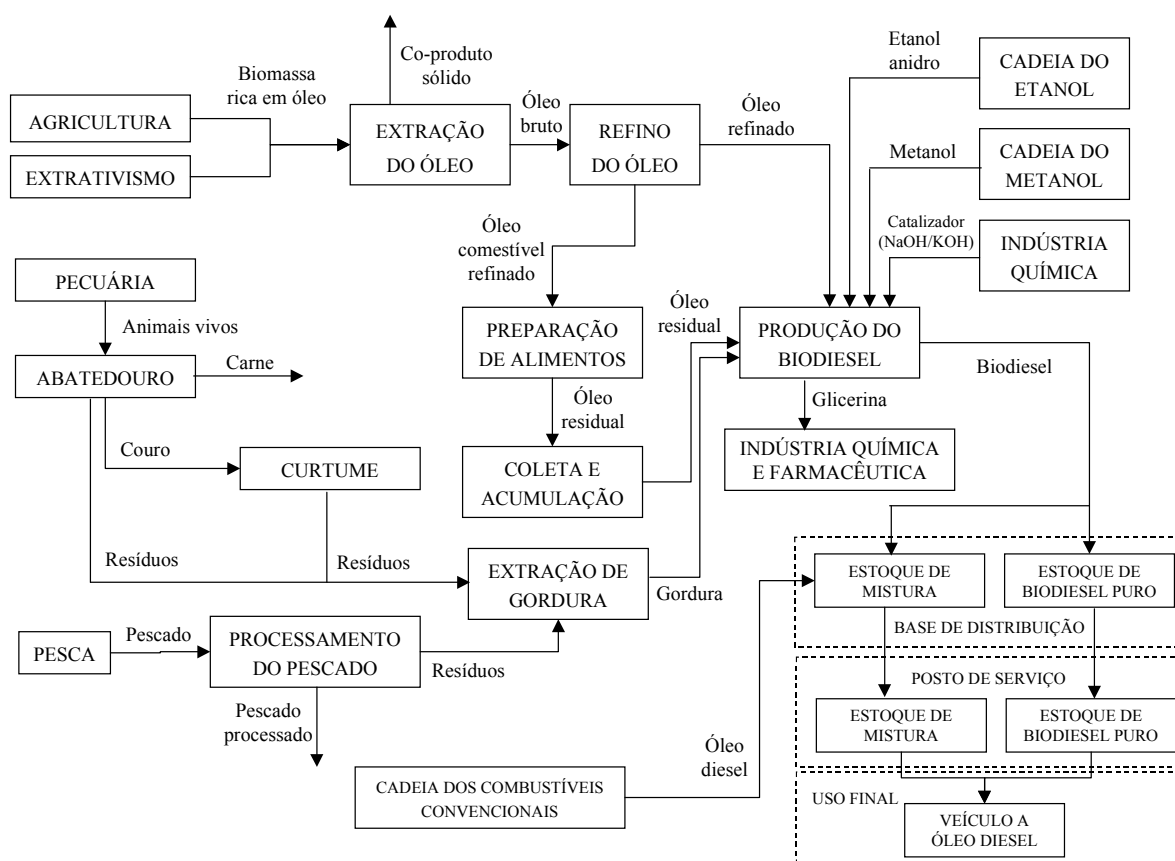
Um teste de longa duração com uma frota de 6 caminhões da COMLURB (Companhia de Limpeza Urbana) no Rio de Janeiro utilizando B5 de éster metílico de óleo de soja - EMOS (2 veículos), B5 de éster metílico de óleo residual de fritura - EMOR (2 veículos) e óleo diesel

metropolitano (2 veículos) teve início em junho de 2003 e está sendo realizado pelo Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais da COPPE/UFRJ (IVIG/COPPE/UFRJ) em parceria com o CENPES/Petrobras, Bosch, Cummins e Ford. Até a presente data não se verificou qualquer alteração no desempenho ou no consumo de combustível dos veículos que utilizam mistura se comparados com os caminhões que utilizam óleo diesel.

3.2.4.2. Análise da cadeia de suprimento e uso final do biodiesel

A Figura 3.10 apresenta de forma sintética os estágios do processo de suprimento de biodiesel (éster de ácidos graxos) para o uso como combustível no transporte rodoviário.

Existem muitas razões para crer que, no futuro, os óleos vegetais poderão ter forte participação no mercado de combustíveis para motores ciclo Diesel. A sociedade e os governos a cada dia exercem maiores pressões no sentido da utilização de recursos renováveis, que possam favorecer o desenvolvimento sustentável.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3.10. Cadeia de suprimento e uso final de biodiesel.

O biodiesel no Brasil ainda está na fase de introdução, lutando para ultrapassar as etapas de pesquisa. Várias instituições têm realizado pesquisas voltadas para a produção de biodiesel a

partir de óleos vegetais provenientes de recursos da flora brasileira. Para facilitar a introdução do produto no mercado, a Agência Nacional de Petróleo está avaliando a possibilidade do seu uso como aditivo ao óleo mineral, na proporção restrita de 5% em peso.

No que se refere a fabricação do biodiesel a partir de insumos agricultáveis, deve-se levar em consideração a limitação da área disponível para o plantio, a concorrência com o cultivo de alimentos e esgotamento do solo, entre outros fatores.

O biodiesel parece ser um combustível com bastante potencial de utilização, no entanto, várias questões de cunho econômico, financeiro e tecnológico ainda precisam de resposta de modo que esta alternativa possa se viabilizar no Brasil.

Este capítulo procurou apresentar uma visão das alternativas energéticas para uso nos transportes rodoviários no Brasil. Para isso, partiu-se de uma pesquisa bibliográfica sobre as alternativas contempladas mundialmente, apresentando um maior detalhamento apenas para aquelas que apresentam aplicação coerente com a realidade brasileira. Com isso procurou-se apresentar aspectos capazes de subsidiar a modelagem da cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia para o transporte rodoviário a ser analisada quanto à sua eficiência energética, conceito a ser apresentado no Capítulo 4.

4. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA APLICADO AS FONTES DE ENERGIA PARA TRANSPORTE – PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO

4.1. Base teórica

Os estágios típicos do ciclo de vida de um produto são extração e processamento de matéria-prima, produção, uso final e gestão de resíduos; sendo os três primeiros relacionados à cadeia de suprimento e os dois últimos ao uso final. Seu encadeamento se dá por meio de fluxos que indicam a sequência direta de seu processamento, podendo haver indicação de reaproveitamento de parte dos recursos aplicados ao produto (ABNT, 2001).

Não existe um único método para conduzir a ACV (HANSSEN, 1998; CULABA e PURVIS, 1999; VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999; KHAN *et al.*, 2001; KHAN *et al.*, 2002), havendo flexibilidade para prática com base nos requisitos mínimos da norma sumariamente ilustrados na Figura 4.1 (ABNT, 2001).

Uma investigação preliminar sobre a aplicação da ACV às fontes de energia para o transporte foi elaborada a partir de nove trabalhos cuja síntese encontra-se na Tabela 4.1. Com exceção de KADAM (2002), os trabalhos têm o propósito de comparar alternativas.

FURUHOLT (1995) e KADAM (2002) consideram as 4 fases da ACV. Os demais se limitam as 2 primeiras fases e a interpretação dos dados, ampliando as conclusões de VERSCHOOR e REIJNDERS (1999) quanto a prática simplificada da ACV, denominada de Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Estes trabalhos concentram-se em fornecer um inventário de dados para futura avaliação de impactos ambientais.

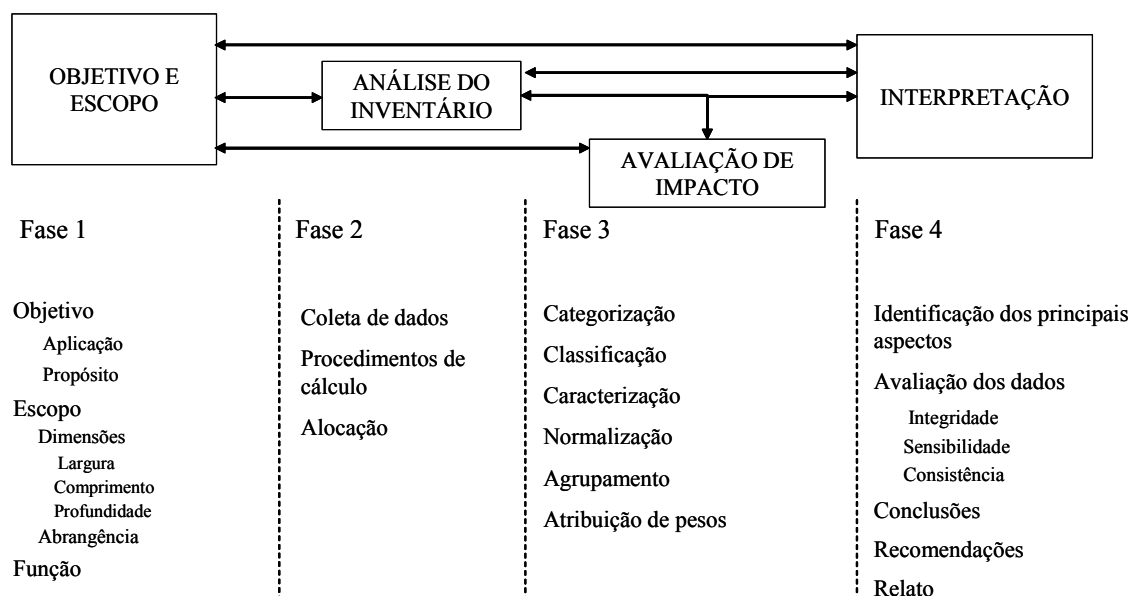


Figura 4.1. Fases da Análise de Ciclo de Vida (ACV).

Todos os trabalhos limitam a largura aos fluxos diretamente relacionados aos processos em estudo (1º nível). Em termos de comprimento, apenas FURUHOLT (1995) não considera o uso final. Não se observa sistemática para o desdobramento dos estágios do ciclo de vida, o que seria desejável, tendo em vista tratarem de objetivos e sistemas de produto semelhantes. FURUHOLT (1995), WANG *et al.* (1997), SHEERAN *et al.* (1998), IEA (1999) e KADAM (2002) segmentam a cadeia de suprimento em 4 estágios (produção de matéria-prima, transporte de matéria-prima, produção de energia e transporte de energia). HACKNEY e NEUFVILLE (2001), BEER *et al.* (2001) e KREITH *et al.* (2002) consideram apenas 2 estágios, unindo os 2 primeiros e os 2 últimos. ARMSTRONG e AKHURST (2000) considerando toda a cadeia de suprimento como um estágio único.

Para a cadeia de suprimento dos combustíveis derivados do petróleo, predominam dados com abrangência geográfica internacional, justificável pela padronização dos processos na indústria contemporânea do petróleo. Isto não se aplica aos combustíveis alternativos, principalmente para o caso dos países em desenvolvimento (KADAM, 2002), onde a abrangência geográfica fica restrita a dados nacionais e regionais, em face do vínculo com processos produtivos e recursos específicos de uma determinada região.

Tabela 4.1. .Síntese das referências selecionadas sobre aplicação de ACV as fontes de energia para o transporte.

Autores	Ano	Local	Aplicação da técnica	Objetivo			Escopo					
				Aplicação	Propósito	Função	Dimensões				Abrangência	
							Largura	Comprimento	Profundidade	Temporal	Geográfica	Tecnológica
Furuholt [4]	1995	Noruega	Completa: 4 fases da ACV	Gasolina, gasolina com MTBE e óleo diesel	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento	Energia, CO ₂ , NO _x , SO _x , COV	Curto prazo (ano do estudo)	Dados proprietários	Tecnologia usual na data do estudo
Wrang <i>et al.</i> [5]	1997	EUA	Parcial: ICV e interpretação	E85, E10 e gasolina	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Curto prazo (ano do estudo) e longo prazo (não definido)	Valores médios nacionais e regionais	Aprimoramento tecnológico para a produção do etanol no longo prazo
Sheeran <i>et al.</i> [6]	1998	EUA	Parcial - ICV e interpretação	B100, B20 e óleo diesel	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, GEE, poluentes atmosféricos locais	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais e internacionais	Tecnologia usual na data do estudo
IEA [7]	1999	CE	Parcial: ICV	Gasolina, óleo diesel, GLP, GNC, M100, E100, B100, HC, DME	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , NO _x , CO, HC, MP	Curto prazo (1 a 5 anos) e longo prazo (15 a 25 anos)	Valores médios dos países da OECD.	Tecnologia usual na data do estudo
Armstrong e Akhurst [8]	2000	CE	Não divulga	Gasolina, óleo diesel, GLP, GNC, M100, E100, B100, HC, eletricidade	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Suprimento ¹ e uso final	Energia, CO ₂	Médio prazo	Valores médios dos países da CE	Tecnologia usual na data do estudo
Berr <i>et al.</i>	2001	Austrália	Completa: 4 fases da ACV	Gasolina Premiun sem enxofre, E85, E10, GLP, GNC, GNL, B100, diesool, óleo diesel e óleo diesel GTL	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, GEE e poluentes atmosféricos locais	Curto prazo	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo
Hackney e Neufville	2001	EUA	Parcial: ICV	Gasolina, gasolina reformulada, óleo diesel, M85, E85, M100, E100, GLP, GNC, GNL, HC, eletricidade	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , NO _x , HCNM, MP	Médio prazo (12 anos de vida dos veículos)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo
Kadam	2002	Índia	Completa: 4 fases do ACV	E10	Desenvolver produto	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CO, NO _x , SO _x , HC e MP	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo
Kreith <i>et al.</i>	2002	EUA	Parcial: ICV	GNC, HC, óleo diesel GTL, M100, eletricidade	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo
HU et al	2004	China	Parcial ICV	E85, gasolina	Comparação	Produzir deslocamento	Não específica	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CO, HC, NO _x , MP e custos	Curto prazo	Valores médios nacionais e internacionais	Tecnologia usual na data do estudo
Wang et al	2005	China	Parcial ICV	Metanol, gasolina e hidrogênio	Comparação	Produzir deslocamento	Não específica	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CO, HC, NO _x , MP, SO _x e custos	Curto prazo	Valores médios nacionais e internacionais	Tecnologia usual na data do estudo
Collela et al	2005	USA	ICV	Gasolina, óleo diesel, hidrogênio	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível e 2o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CO, HC, NO _x , MP, Sox, CH ₄	Curto prazo	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo

Legenda: EUA – Estados Unidos; CE – Comunidade Européia; MTBE – metil-terci-butil-éter; EX – mistura com X% de etanol e 100-X% gasolina, MX – mistura com X% de metanol e 100-X% de gasolina; BX – mistura com X% de biodiesel e 100-X% de óleo diesel; GLP – gás liquefeito de petróleo, GNC – gás natural comprimido, GNL – gás natural liquefeito; HC – hidrogênio comprimido; DME – di-metil-éter; GTL – *gas to liquid*. Notas: 1 – O trabalho não deixa claro quais são os estágios da cadeia de suprimento para cada alternativa; 2 – Consumo de combustível fóssil, aquecimento global, oxidantes fotoquímicos, acidificação e geração de resíduos sólidos; 3 – Consumo de combustível fóssil, aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e odor do ar

Os trabalhos de WANG *et al.* (1997), IEA (1999) e HACKNEY e NEUFVILLE (2001) consideram a abrangência temporal dos dados de uso final para médio (6 a 15 anos) e longo prazo (acima de 15 anos). WANG *et al.* (1997) também consideram alguma evolução temporal nos dados na cadeia de suprimento, por meio da consolidação da tecnologia de ponta. Os demais trabalhos limitam-se ao curto prazo (1 a 5 anos). Apenas WANG *et al.* (1997) destaca o aprimoramento tecnológico dos processos da cadeia de suprimento, os demais trabalhos adotam uma posição conservadora considerando dados representativos da tecnologia usual na data do estudo.

A unidade funcional está relacionada com a função que o produto proporciona e sua base de medição. Observa-se uma grande diversidade na escolha da unidade funcional, prevalecendo as medidas de conteúdo (GJ, bhp-h) e consumo (Btu/milha, MJ/km e g/t.km) energético, sendo que as últimas parecem ser as mais adequadas quando se pretende privilegiar a função de transporte.

Na elaboração do inventário de dados, a energia total consumida aparece como o principal fluxo analisado, podendo ser dividida em energia de origem renovável ou não. Com exceção de KREITH *et al.* (2002), os gases de efeito estufa (GEE), com destaque para o CO₂, são contabilizados. A consideração de poluentes atmosféricos locais também foi observada com frequência, sendo menos comum a contabilização de efluentes líquidos e sólidos. Quando especificado, o critério de alocação mais empregado é o equivalente mássico.

Consumo de combustíveis fósseis, aquecimento global e acidificação são categorias de impactos ambientais coincidentes em FURUHOLT (1995) e KADAM (2002) na fase de avaliação dos impactos. As categorias servem de base para a classificação dos dados obtidos na análise do inventário. Como cada categoria pode comportar mais de um tipo de dado, depois de classificados suas contribuições são quantificadas por meio de fatores de caracterização específicos e a comparação de seus resultados é possível por meio de aplicação de uma base comum (normalização). Tanto o agrupamento quanto a atribuição de pesos são elaboradas com base no juízo de valor, sendo esta última a mais controversa, pois usualmente é desenvolvida de forma muito subjetiva e com pouco embasamento científico (HANSSEN, 1998; RUBIN, 2001).

Como instrumento de interpretação, os trabalhos de WANG *et al.* (1997), IEA (1999) e ARMSTRONG e AKHURST (2000) apresentam os resultados do ICV associados a uma margem de variação como forma de compensar a incerteza, o que não ocorre com os demais trabalhos. Procura-se garantir a qualidade dos dados por meio de descrição da sua origem e justificação de sua escolha, considerando que a existência de algum dado é sempre melhor que a

sua exclusão (MAURICE *et al.*, 2000).

A maioria dos trabalhos foi desenvolvida e aplicada no contexto dos países desenvolvidos (Comunidade Européia, Estados Unidos, Canadá e Austrália), sendo exceção o trabalho de KADAM (2002).

A técnica de ACV é capaz de oferecer uma visão ampla sobre o alcance e as limitações de cada alternativa, em sintonia com a filosofia de desenvolvimento sustentável. Porém, é uma técnica intensiva em dados, trabalhosa, lenta e cara, o que representa um conjunto de limitações à sua aplicação. Para contornar esta situação, deve-se buscar o equilíbrio entre o excesso de sofisticação e detalhamento, que pode tornar o estudo impraticável, e o risco de exclusão de elementos importantes à tomada de decisão (CHEHEBE, 1998; CULABA e PURVIS, 1999; MAURICE *et al.*, 2000).

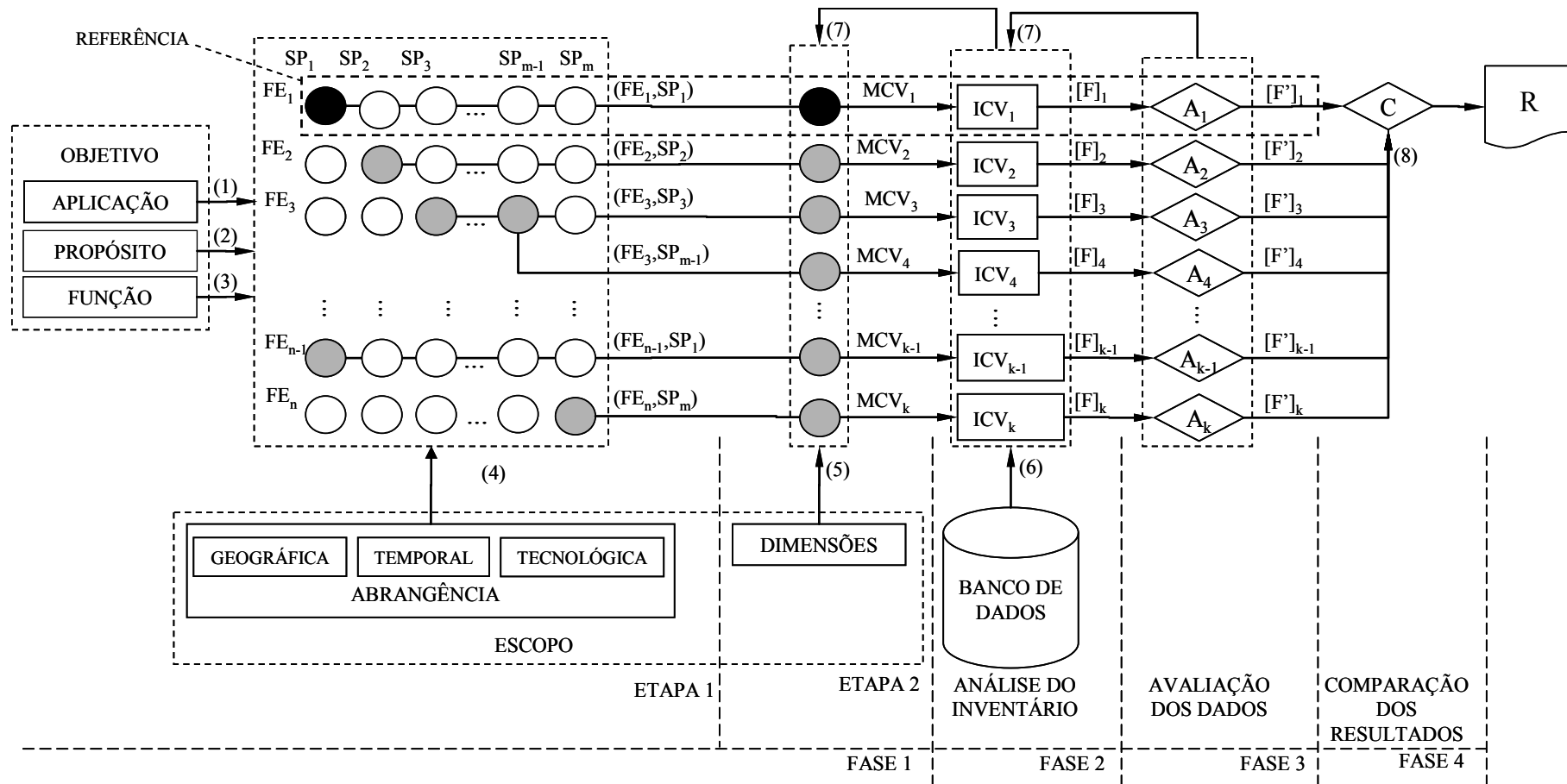
4.2. Procedimento para comparação de fontes de energia para o transporte

A partir das referências bibliográficas selecionadas propõe-se um procedimento baseado na técnica de ICV para uma primeira abordagem na comparação de alternativas de fontes de energia para o transporte sob a óptica do consumo de energia. A Figura 4.2 apresenta o esquema do procedimento e baseia a discussão a seguir.

4.2.1. FASE 1: Objetivo e escopo

O objetivo desdobra-se em aplicação aos ciclos de vida das fontes de energia para o transporte, propósito de comparar alternativas e função de produzir deslocamento.

Na ETAPA 1 do escopo, a consideração de limites para a abrangência geográfica, temporal e tecnológica restringe e relaciona as fontes de energia (FE), associadas à cadeias de suprimento e os sistemas de propulsão (SP), associados ao uso final. Cada par (FE, SP) deve ser caracterizado de modo tão específico e detalhado quanto necessário, considerando que um SP pode utilizar mais de uma FE, a mistura de duas ou mais FE representa uma nova cadeia de suprimento, diferentes processos de produção levam a cadeias de suprimento diferentes e as condições de uso final devem ser explicitadas, pois modificam o desempenho dos sistemas de propulsão.



Legenda - (1) Fontes de energia para transporte; (2) Comparar alternativas; (3) Produzir deslocamento; (4) Dados de restrição e relacionamento; (5) Limites do sistema de produto; (6) Dados para o inventário; (7) Dados para reavaliação; (8) Dados para comparação; FE: Fonte de energia; SP: Sistema de propulsão; MCV: Modelo de Ciclo de Vida; ICV: Inventário de Ciclo de Vida; [F]: Matriz de fluxos do ICV; A: Avaliação da qualidade dos dados; [F']: Matriz de fluxos avaliados do ICV; C: Comparação dos resultados; R: Relatório de resultados.

Figura 4.2. Estrutura do procedimento

Na ETAPA 2 do escopo, para cada par (FE, SP) são associados modelos de ciclo de vida (MCV) que estabelecem as dimensões da aplicação e os fluxos a serem considerados. Recomenda-se uma estrutura modular para elaboração dos MCV, com três níveis de profundidade, na forma de macro-estágios, meso-estágios e micro-estágios, que permite a prática de refinamentos sucessivos, garantindo equivalência entre os níveis. Como os micro-estágios são específicos para cada ciclo de vida, recomenda-se que a comparação de alternativas se faça no nível de meso-estágios, onde se consegue melhor equidade.

Quanto à largura, inicialmente recomenda-se considerar o nível 1 (insumos e cargas ambientais diretamente associadas aos processos). Refinamentos podem ser obtidos considerando-se os níveis 2 (insumos e cargas ambientais para produção dos insumos do nível 1) e 3 (insumos e cargas ambientais para produção dos insumos do nível 2 e bens de capital). Sob a ótica do consumo energético é comum que sejam considerados para cada processo os fluxos de energia total (ET); energia de origem renovável (ER) e gases de efeito estufa (GEE) oriundos do consumo de energia.

4.2.2. FASE 2: *Análise do inventário*

Realiza-se a coleta de dados para cada um dos MCV resultantes da FASE 1, ao que se denomina inventário de ciclo de vida (ICV). Numa pesquisa preliminar quantificam-se os dados com pouca preocupação quanto a sua qualidade. Para alguns processos haverá dados de uso específico de grande integridade que se disponíveis na forma de séries históricas permitem a consideração de valores médios e intervalos de variação como expressão de sua consistência. Para dados obtidos de bancos de dados de uso geral, que apresentam menor integridade e consistência, recomenda-se adotar o limite superior dos valores disponíveis (MAURICE et al., 2000), acompanhados das justificativas e comentários pertinentes.

Como resultado da FASE 2, para cada MCV associa-se uma matriz [F] de fluxos por processo, que sofrerá avaliação da qualidade dos dados na FASE 3.

4.2.3. FASE 3: *Avaliação dos dados*

O critério de avaliação varia em função da necessidade de cada estudo. Para uma abordagem preliminar recomenda-se um critério baseado em MAURICE et al. (2000) que propõe avaliações quanto ao: (1) peso que os fluxos individuais de insumos e cargas ambientais de cada processo têm em relação aos respectivos fluxos totais no ciclo de vida; (2) intervalo de variação dos valores de cada fluxo e (3) origem, que pode ser uso específico ou uso geral.

MAURICE *et al.* (2000) recomenda que a princípio todos os fluxos com peso maior que 10% ($P_{\min} = 10\%$) devem ser avaliados quanto ao intervalo de variação e origem. Fluxos que apresentem $P_{\text{fluxo}} \geq P_{\min}$ e intervalo de variação maior que um máximo ($T_{\max}$) devem ser avaliados quanto à origem dos dados. Caso estes fluxos tenham sido determinados a partir de dados de uso específico, o excesso de variação pode refletir inconsistência. Sendo obtidos a partir de dados de uso geral, ao que se denomina de fluxos críticos, recomenda-se que sua origem seja reavaliada e um esforço seja feito no sentido aumentar sua integridade.

Fica a critério do analista, segundo as limitações de cada caso, qual será a profundidade adotada na reavaliação dos dados. Reavaliar prioritariamente os dados relacionados aos fluxos críticos orienta os esforços necessários ao aprimoramento do ICV e permite que se estabeleça um processo de refinamento progressivo, o que reduz o tempo e os custos desta operação.

Como resultado da FASE 3 obtém-se uma matriz $[F']$ de fluxos avaliados por meso-estágio para cada alternativa.

4.2.4. FASE 4: Comparação dos resultados

A comparação dos resultados pode seguir diversos critérios, sendo possível a comparação dos valores de $[F']$ para cada alternativa entre si ou com uma referência, fornecendo uma hierarquia, ou a parametrização das alternativas considerando uma alternativa ou os melhores resultados de cada alternativa como referência.

5. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

5.1. Considerações Iniciais

A aplicação do procedimento será feita por meio da seleção de uma situação típica, porém não restritiva, de transporte de passageiros em uma área urbana do Brasil. Esta aplicação foi escolhida em sintonia com os objetivos desta pesquisa.

As fases e etapas apresentadas a seguir seguem a seqüência de aplicação apresentada na Figura 4.2 do item 4. Considerações adicionais, sempre que necessárias ao entendimento desta aplicação, serão apresentadas em momento oportuno.

5.2. FASE 1: Objetivo e escopo

Escolheu-se como aplicação os ciclos de vida de fontes de energia para o transporte de passageiro (automóvel e ônibus), como propósito o de comparar alternativas e como função o deslocamento de passageiros (pass). Decorre da função a escolha da unidade funcional de 1 pass.km.

5.2.1 FASE 1 – ETAPA 1 - Abrangência

Adotou-se como abrangência geográfica o transporte urbano no Município do Rio de Janeiro, selecionando alternativas de fontes de energia (FE) para cada um dos sistemas de propulsão (SP) disponíveis no mercado no momento presente, com viabilidade legal, tecnológica, econômica e disponibilidade de dados. A Tabela 5.1 apresenta o resultado da ETAPA 1 do escopo com a caracterização dos pares (FE, SP). Tal escolha não limita a aplicação do procedimento e se justifica pelas considerações apresentadas a seguir.

Como nos demais estados brasileiros, no Rio de Janeiro utiliza-se gasolina com adição de etanol anidro (gasolina C) ou etanol hidratado (etanol) em automóveis dedicados a estes combustíveis. Desde 2003 comercializa-se no Brasil veículos *flexible fuel*, que utilizam gasolina C e etanol em qualquer proporção de mistura (ANFAVEA, 2006). É proibido o uso de óleo diesel em veículos automotores de passageiros, de carga e de uso misto, nacionais ou importados, com capacidade de carga inferior a 1 tonelada (DNC, 1994). Assim sendo, o óleo diesel só pode ser adotado nos ônibus urbanos convencionais.

Tabela 5.1. Caracterização dos pares (FE, SP) para a aplicação do procedimento.

Fonte de energia			Sistema de propulsão ⁽¹⁾			Par
Nome	Sigla	Caracterização	Nome	Sigla	Caracterização	
Gasolina C	GC	Mistura com 85% de gasolina obtida do refino de petróleo e 25% de etanol anidro obtido a partir do processamento da cana-de-açúcar.	Convencional gasolina C	SPGC	Automóvel ⁽²⁾ equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por centelhamento e sistema de transmissão mecânico, dedicado ao uso de gasolina C.	(GC,SPGC)
Gás natural comprimido	GNC	Gás natural purificado e comprimido.	Bi-combustível	SPBC	Automóvel ⁽²⁾ equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por centelhamento e sistema de transmissão mecânico, dedicado ao uso de gasolina C e adaptado ao uso de GNC ⁽⁴⁾ .	(GNC,SPBC)
			Dedicado GNC	SPDG	Ônibus convencional ⁽³⁾ equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por compressão e sistema de transmissão mecânico, dedicado ao uso de GNC.	(GNC,SPDG)
Etanol hidratado	EH	Etanol hidratado obtido a partir do processamento da cana-de-açúcar.	Flexible-fuel	SPFF	Automóvel ⁽²⁾ equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por centelhamento e sistema de transmissão mecânico, capaz de consumir gasolina C e/ou etanol hidratado ⁽⁵⁾ .	(EH,SPFF)
Óleo diesel	OD	Óleo diesel obtido do refino de petróleo.	Convencional óleo diesel	SPOD	Ônibus convencional ⁽³⁾ equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por compressão e sistema de transmissão mecânico, dedicado ao uso de óleo diesel.	(OD,SPOD)
B3	B3	Mistura com 98% de óleo diesel obtido do refino de petróleo e 2% de biodiesel.	Convencional B3	SPB2	Ônibus convencional ⁽³⁾ equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por compressão e sistema de transmissão mecânico, dedicado ao uso mistura B2.	(B3,SPB2)
Biodiesel	BD	Biodiesel obtido a partir de óleo de girassol, soja e sebo bovino.	Convencional biodiesel	SPBD	Ônibus convencional ⁽³⁾ equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por compressão e sistema de transmissão mecânico, dedicado ao uso de biodiesel.	(BD,SPBD)

Notas: (1) Para todos os casos o perfil de operação é de tráfego urbano com velocidade média de 20 km/h (PDT-RJ, 2006). (2) Veículo compacto pesando 1.500 kgf, equipados com motor alternativo de combustão interna por centelhamento com deslocamento de 1,6 dm³, potência máxima de 100 HP, transmissão manual e ocupação média de 1,3 passageiro/veículo (PDT-RJ, 2006). (3) Ônibus urbano convencional com capacidade de projeto para 80 passageiros/veículo e potência máxima variando entre 180 e 220 HP. (4) Assume-se que use unicamente GNC, embora possa utilizar gasolina C. (5) Assume-se que use unicamente etanol hidratado.

Em 2007, os automóveis de passageiros representaram aproximadamente 85% das vendas de veículos que consomem gasolina C e/ou etanol, incluído aqui os automóveis *flexible-fuel* que responderam por 61,4% das vendas deste segmento. No período de 2003 a 2007, as vendas de automóveis *flexible-fuel* aumentaram pouco mais de 42 vezes – de 39.853 veículos em 2003 para 1.719.667 veículos em 2007 – sendo que em 2007 a venda de automóveis *flexible-fuel* superou em 142% a venda total de automóveis dedicados ao uso de outros combustíveis (gasolina, etanol e diesel) (ANFAVEA, 2007). Estes indícios levam a crer que o uso de veículos *flexible-fuel* é uma tendência atual no Brasil.

Veículos dedicados ao uso de gasolina C, etanol ou *flexible-fuel*, podem ser adaptados para consumo de gás natural comprimido (GNC) assumindo a configuração bi-combustível. Em 2006, cerca de 4% frota brasileira de automóveis apresentava esta configuração e o Rio de Janeiro respondia por 42% desta fração, com a maior frota brasileira movida a GNV (GASNET, 2007). No Brasil é uma tendência utilizar o GNC como combustível automotivo em regiões que dispõem de consolidada rede de gasodutos, como é o caso do Município do Rio de Janeiro, sendo esta a justificativa para se considerar esta alternativa e a predominância do uso deste combustível em automóveis em comparação com outros estados.

O uso de GNC em ônibus ainda não se estabeleceu como tendência no Brasil, tampouco no Município do Rio de Janeiro. Alguns testes vêm sendo realizados desde a década de 80 do século passado, porém, sem resultados que indicassem ser esta uma alternativa economicamente atrativa, consideradas as condições operacionais do Município do Rio de Janeiro. O mais recente teste foi realizado por 360 dias com início em 09/12/2005 e envolveu um ônibus marca Volkswagen VW 17.240 (peso bruto total de 17 t e potência máxima em plena carga de 240 HP) operando na linha 2011 (Rodoviária x Leme – Via Praia do Flamengo) (SMTr, 2006).

A partir de 2008 tornou-se obrigatória a adição de um percentual de biodiesel no óleo diesel comercializado em todo o território brasileiro, conforme Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Este percentual foi inicialmente de 2%, passando a 3% no mês de julho de 2008. O biodiesel produzido no Brasil é obtido predominantemente a partir de óleo de soja e sebo bovino (IBP, 2007) e o Rio de Janeiro não figura como um estado produtor (ANP, 2008). Para atender aos objetivos deste projeto, considera-se que o estado do Rio de Janeiro é importador de biodiesel, sendo uma parte adicionada ao óleo diesel de petróleo na proporção de 2% e uma parte utilizada experimentalmente na forma de B100 (ônibus convencional dedicado ao uso de biodiesel).

Automóveis de passageiros apresentam diversas configurações de peso, potência e cilindrada,

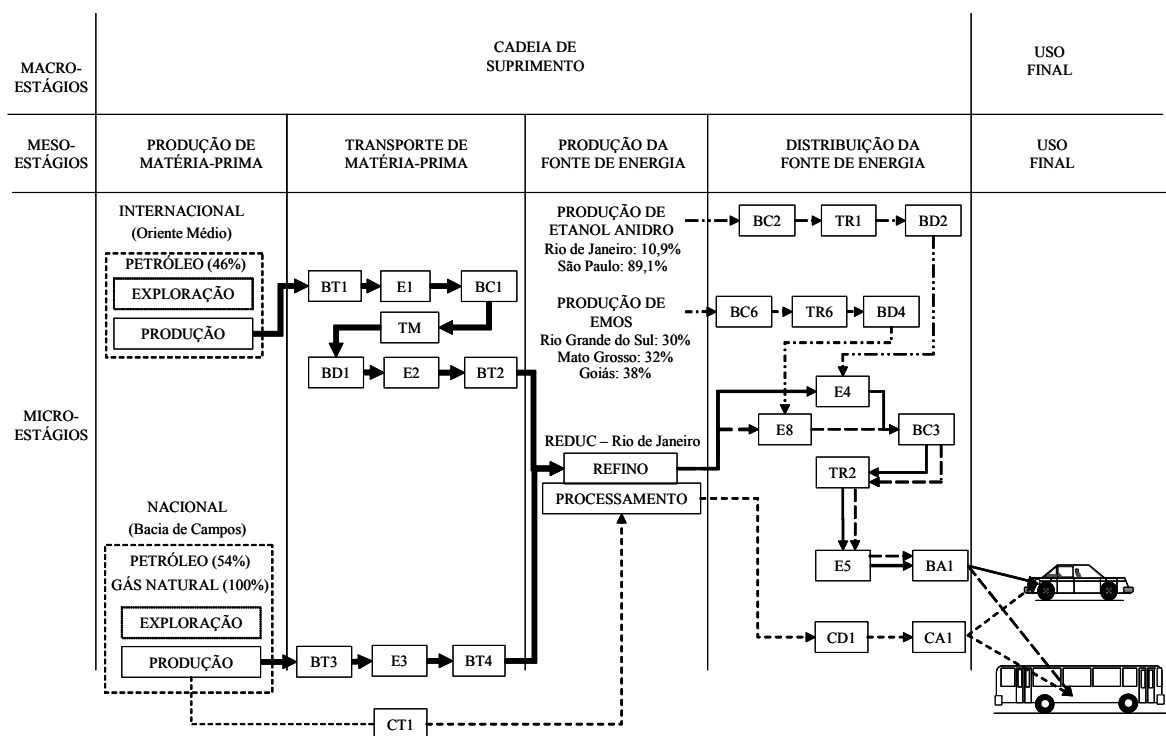
parâmetros que condicionam o consumo de combustível. Como pode ser visto na Tabela 5.1, adotou-se a mesma configuração de veículo para cada fonte de energia (gasolina C, etanol hidratado e gás natural comprimido). Tal configuração reflete a caracterização típica dos veículos *flexible-fuel*.

Segundo dados da Secretaria Municipal de Transportes do Município do Rio de Janeiro (SMTr, 2006), cerca de 63% da frota de ônibus urbanos em circulação no Município do Rio de Janeiro em 2005 era composta por ônibus urbanos convencionais com capacidade para 80 passageiros/veículo, equipados com motores alternativos de combustão por compressão à óleo diesel e potência máxima variando entre 180 e 220 HP. Não existe indícios de que este perfil tenha evoluído significativamente nos últimos dois anos, sendo este o motivo pelo qual esta configuração foi adotada nesta pesquisa.

O regime de tráfego e a ocupação do veículo também são condicionantes do consumo de combustível. No Brasil a urbanização é crescente e já em 2000, 81% da população vivia nas cidades (IBGE, 2006). No Município do Rio de Janeiro o uso do automóvel para deslocamento urbano representava em 2003 o montante de 26,1% das viagens, com crescimento percentual de 74% no período de 1994 a 2003. Por outro lado, o transporte de passageiros por ônibus tem atingido percentuais superiores a 60% desde 1968, com percentual de 68% em 2003 (PDT-RJ, 2006). Excluindo-se algumas intervenções localizadas, que buscaram aprimorar a integração entre os modos ferroviário e rodoviário para o transporte de passageiros – como o bilhete eletrônico – não se verificou nenhuma tendência que justificassem a alteração deste perfil de escolha modal.

5.2.2 FASE 1 – ETAPA 2 - Dimensões

As Figuras 5.1 a 5.3 apresentam os MCV adotados para as alternativas da Tabela 5.1. Sendo o gás natural associado ao petróleo, optou-se por representar seu MCV junto com o dos derivados de petróleo (gasolina A e óleo diesel – Figura 5.1). O Anexo 5.I apresenta tabelas que ajudam a compreender os MCV apresentados.

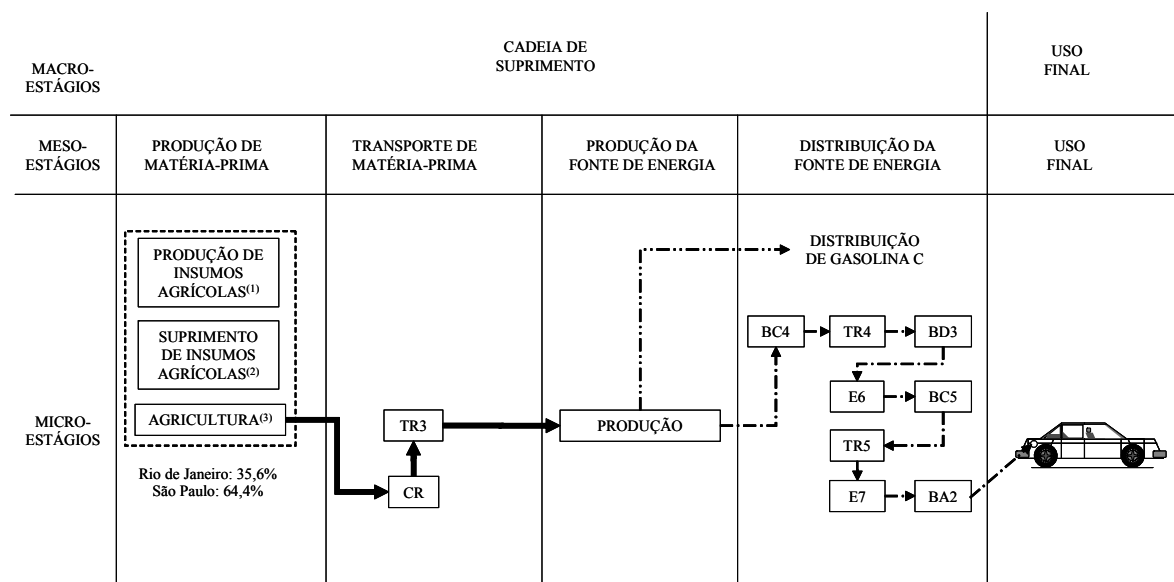


Legenda:

Petróleo → Gasolina A → Gasolina C → Óleo diesel → B2 → Etanol anidro → EMOS → Gás natural →

BA: bombeio para abastecimento; BC: bombeio para carregamento; BD: bombeio para descarregamento; BT: bombeio para transporte por duto; E: estoque; TM: transporte marítimo; TR: transporte rodoviário; CT: compressão para transporte por duto; CD: compressão para distribuição por duto; CA: compressão para abastecimento.

Figura 5.1. Modelos de ciclo de vida (MCV) para os pares (GC,SPGC), (GNC,SPBC), (GNC,SPDG), (OD,SPOD), (B2,SPB2).



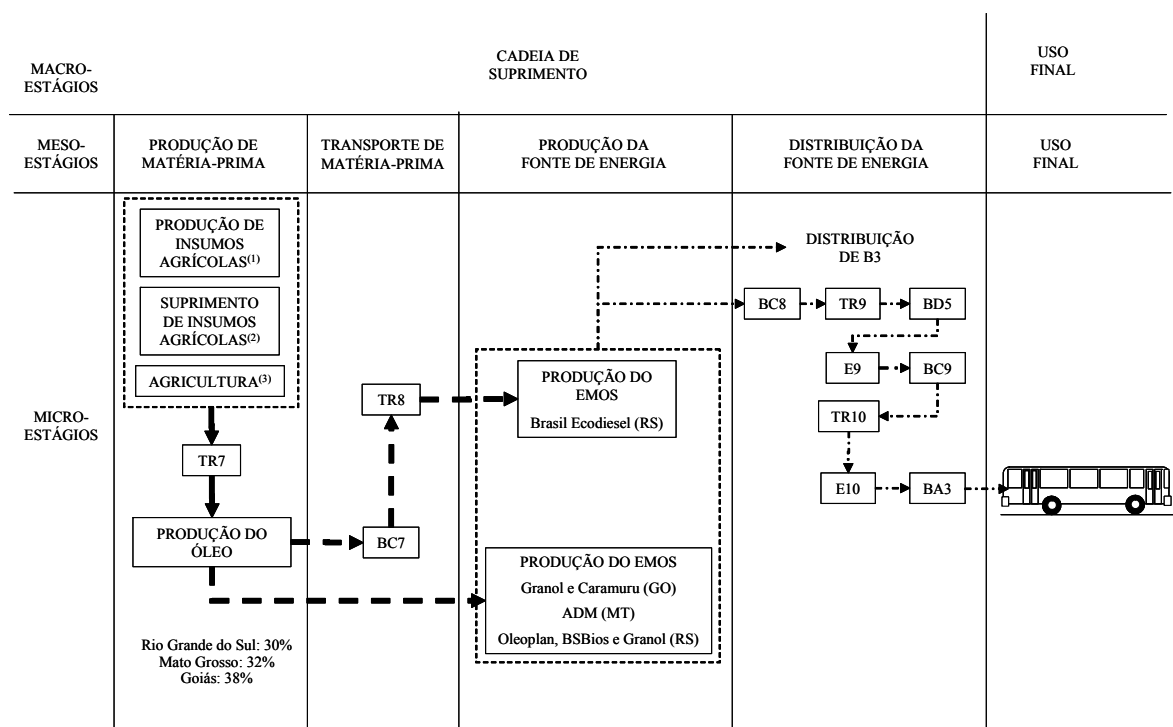
Legenda:

Cana-de-açúcar → Etanol anidro → Etanol hidratado →

BA: bombeio para abastecimento; BC: bombeio para carregamento; BD: bombeio para descarregamento; CR: carregamento; E: estoque; TR: transporte rodoviário.

Notas - (1): Energia embutida em mudas = 5,87 MJ/tc; fertilizantes = 66,49 MJ/tc; calcário = 7,14 MJ/tc; herbicidas = 11,26 MJ/tc e inseticidas = 0,79 MJ/tc (NOGUEIRA, 1987; CTC, 2003); (2): Óleo diesel para transporte de mudas, fertilizante orgânico e químico no valor de $8,2 \pm 0,8$ MJ/tc (CTC, 2003); (3): Preparação do solo, plantio e colheita mecanizada.

Figura 5.2. Modelo de ciclo de vida (MCV) para o par (EH, SPFF).



Legenda:

Soja → Óleo de soja → EMOS →

BA: bombeio para abastecimento; BC: bombeio para carregamento; BD: bombeio para descarregamento; E: estoque; TR: transporte rodoviário.
 Notas - (1): Energia embutida em mudas = 96,06 MJ/ts; fertilizantes = 435,84 MJ/ts; calcário = 137,51 MJ/ts; herbicidas = 353,22 MJ/ts e inseticidas = 29,78 MJ/ts (Costa, 1996, Macedo, 2002 e Diehl e Junqueira, 2002); (2): Óleo diesel para transporte de mudas; (3): Preparação do solo, plantio e colheita mecanizada.

Figura 5.3. Modelo de ciclo de vida (MCV) para o par (BD, SPBD).

Numa primeira abordagem, e em função das restrições orçamentárias impostas ao projeto, para cada micro-estágio considerou-se os apenas o fluxos de energia total e energia renovável.

5.2.2.1. Combustíveis fósseis - derivados do petróleo e gás natural

Como as vendas de combustíveis derivados de petróleo no Município do Rio de Janeiro representam cerca de 40% do petróleo processado na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), admite-se que todo o suprimento de gasolina A e óleo diesel necessário no município se origine na REDUC. Esta refinaria tem capacidade de processar $13,4 \times 10^6$ m³/ano e seu fator de utilização variou entre 90% e 95% nos período de 2005 a 2007 (ANP, 2008).

Quarenta e seis por cento do petróleo processado para suprimento do município do Rio de Janeiro (cerca de 3×10^6 bep) é proveniente de jazidas *on shore* do Oriente Médio e o restante de jazidas *off shore* situadas no litoral do Rio de Janeiro (ANP, 2008, MEDEIROS, 2003).

Admite-se o transporte marítimo do petróleo importado por 8.746 ± 262 milhas náuticas (DOBSON & BERESFORD, 1989) em navios-tipo de 300.000 TPB, o transporte poço-terminal

no Oriente Médio por 145 ± 15 km em oleodutos (RIO OIL & GAS, 2002) e terminal-refinaria no Brasil em oleoduto por 125 km. O transporte poço-refinaria do petróleo nacional é realizado exclusivamente em oleoduto por 334 km (TRANSPETRO, 2002). Nos terminais nacionais, o petróleo é mantido aquecido para bombeio (PETROBRAS-CONPET, 2003).

Após o refino, a gasolina A (sem adição de etanol) é bombeada por dutos para tanques próximos da refinaria, onde se adiciona 25% de etanol anidro, produzindo gasolina C. Esta é carregada em caminhões-tipo com 30.000 l de capacidade que a distribuem para postos a distância de $26,23 \pm 1,84$ km (D'AGOSTO, 2004; MENEZES, 2004).

O gás natural associado ao petróleo nacional pode ser reinjetado no poço, queimado, consumido como energia nas plataformas ou disponibilizado para uso (ANP, 2008, PETROBRAS-CONPET, 2003). Do Anexo I, observa-se que no período de janeiro a junho de 2008 as vendas de gás natural comprimido para uso automotivo (GNV) em todo o Estado do Rio de Janeiro representaram apenas 0,8% do gás natural disponível na Bacia de Campos. Assim sendo, é razoável assumir que todo o GNV necessário no Município do Rio de Janeiro seja oriundo da Bacia de Campos.

O gás disponível é transportado em gasodutos por 452 km até a unidade de processamento (TRANSPETRO, 2002). Após processamento, é distribuído por uma rede de 638 km de gasodutos até postos (SEINPE, 2000), onde é comprimido a 220 atm para abastecer os veículos.

5.2.2.2. Biocombustíveis – Etanol de Cana-de-Açúcar

O Estado do Rio de Janeiro é um pequeno produtor de etanol. Sua produção na safra de 2006/2007 representou 0,5% da produção dos estados da Região Centro-Sul, onde o grande produtor é o Estado de São Paulo, com pouco mais de 68% da produção. Com base no Anexo 5.I (UDOP, 2008), observa-se que no período de 2001 a 2007 a produção de etanol no Estado do Rio de Janeiro seria capaz de abastecer 10,9% do etanol anidro, a ser adicionado à gasolina A e 35,6% do etanol hidratado.

Para atender aos objetivos deste trabalho, admite-se que todo o etanol produzido no Estado do Rio de Janeiro é direcionado para a Base de Duque de Caxias (BADUC) para atender às necessidades parciais deste combustível nas frações especificadas no parágrafo anterior. O complemento necessário para atender às vendas no Estado do Rio de Janeiro é produzido em São Paulo, estado mais próximo e com excedente de produção (UDOP, 2008).

No Estado do Rio de Janeiro, a produção de etanol ocorre predominantemente na Região do Norte Fluminense, em particular no Município de Campos dos Goytacazes, local considerado para avaliação da distância de transporte até a BADUC, da ordem de 300 km (rota: BR 101 de Campos dos Goytacazes até Manilha; BR 493 de Manilha a Surui; BR 116/493 de Surui até o entrocamento com a BR 040 e BR 040 até a REDUC), com base no Mapa Rodoviário do Estado do Rio de Janeiro.

Para a produção de etanol no Estado de São Paulo, onde existe uma maior quantidade e dispersão das usinas, adotou-se a distância de transporte de 697 ± 24 km com base nos cálculos apresentados no Anexo 5.II (MENEZES, 2004; D'AGOSTO, 2004; UDOP, 2008). Em ambos os casos o transporte é realizado por caminhões-tipo com 30.000 l de capacidade. A partir da BADUC o modelo adotado para o etanol hidratado é semelhante ao aplicado para a distribuição de gasolina C.

A matéria-prima para a produção do etanol é a cana-de-açúcar cortada e pronta para carregamento em caminhões com 23 t de capacidade que a transportam por 20 ± 5 km até as usinas. Para o estado de São Paulo admite-se colheita mecanizada em 25% da plantação e colheita manual com carregamento mecanizado no restante. Para o estado do Rio de Janeiro admite-se que toda a colheita é manual, com carregamento mecanizado.

5.2.2.3. Biocombustíveis – Biodiesel

O estado do Rio de Janeiro não produz matéria-prima (fontes de óleo ou gordura de origem cultivável, extrativa ou residual) para a produção de biodiesel. Tampouco existem plantas de produção de biodiesel instaladas no estado do Rio de Janeiro.

Considera-se que o todo o biodiesel necessário para o atendimento da demanda de 2% em mistura com o óleo diesel (B2) e uso experimental na forma de B100 (biodiesel puro) seja proveniente dos estados de Goiás, Mato Grosso e Rio Grande do Sul, por serem aqueles que possuem produção excedente, conforme pode ser visto no Anexo 5.III.

A produção de biodiesel nos estados considerados utiliza predominantemente o óleo de soja como matéria-prima e a transesterificação alcoólica com metanol e hidróxido de potássio, sendo estas premissas do trabalho (IBP, 2007). A denominação do produto adotada neste caso é de éster metílico de óleo de soja (EMOS).

A quantidade recebida de cada uma das fontes produtoras foi estimada considerando-se que a

fonte que apresenta maior excedente de produção pode fornecer proporcionalmente mais. Assim considerou-se que a demanda do Rio de Janeiro é atendida em 38% por Goiás (21% pela Granol e 17% pela Caramuru), 32% por Mato Grosso (ADM) e 30% pelo Rio Grande do Sul (9% pela Oleoplan, 7% pela Brasil Ecodiesel, 8% pela BSBios e 6% pela Granol). Estas são as usinas que apresentaram produção firme no período de janeiro a junho de 2007 (ANP, 2008).

Com exceção da Brasil Ecodiesel, todas as demais usinas de biodiesel são anexas às plantas de extração de óleo. Para a Brasil Ecodiesel admite-se que o óleo de soja seja proveniente de plantas de extração a uma distância de 316 ± 90 km. Uma vez produzido, o EMOS (biodiesel) é transportado por 1.517 ± 22 km até a BADUC, sendo esta a média ponderada entre as distâncias apresentadas no Anexo 5.III e os percentuais ofertados por usina.

5.3. FASE 2: Análise do inventário

Nas Tabelas 5.2 a 5.8 apresenta-se o resultado do inventário de ciclo de vida (ICV) para energia total e energia renovável para cada uma dos pares FE e SP considerados neste trabalho conforme Tabela 5.1.

Nos itens 5.3.1 a 5.3.4 apresenta-se a exposição e discussão sobre os dados utilizados. Na sequência, são apresentados os itens de análise de dados (5.4) e comparação e análise dos resultados (5.5).

Tabela 5.2. Inventário de ciclo de vida (ICV) para o par (GC,SPGC).

Energia total [kJ/pass.km]		Consumo			Consumo Uso Final [kg/pass.km]						
Meso-estágios		0,75	0,25		0,061101	0,064767	0,068901				
Micro-estágios		Mínimo	Médio	Máximo	Varição	OD	Mínimo	Máximo			
Produção de matéria-prima	Exploração	10,23	11,60	13,14	12,56%	uso esp.	0,34%	0,38%			
	Produção	87,33	98,60	111,30	12,16%	uso esp.	2,91%	3,25%			
	Parcela do AEAC	29,48	32,24	35,27	8,97%	uso esp.	0,98%	1,03%			
Transporte de matéria-prima		Origem	Destino								
Petróleo importado	Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio) (BT1)	0,11	0,13	0,16	21,45%	uso ger.	0,00%	0,00%		
	Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento) (BC1)	0,23	0,25	0,27	8,36%	uso ger.	0,01%	0,01%		
	Navio (carregamento)	Navio (descarregamento) (TM.)	11,41	12,47	13,66	9,03%	uso esp.	0,38%	0,40%		
	Navio (descarregamento)	TEBIG (BD1)	0,23	0,25	0,27	8,36%	uso ger.	0,01%	0,01%		
	TEBIG	REDUC (BT2)	0,26	0,31	0,36	16,06%	uso esp.	0,01%	0,01%		
	Operações de estocagem (E1) (E2)		0,14	0,17	0,21	19,07%	uso esp.	0,00%	0,01%		
Transporte de matéria-prima		Origem	Destino								
Petróleo nacional	Bacia de Campos	REDUC (BT3) (BT4)	0,83	0,98	1,15	16,06%	uso esp.	0,03%	0,03%		
	Operações de estocagem (E3)		0,17	0,20	0,24	19,07%	uso esp.	0,01%	0,01%		
	Parcela do AEAC		8,02	8,99	10,10	11,56%	uso esp.	0,27%	0,29%		
Produção da fonte de energia		Refino na REDUC	166,11	185,34	207,03	11,04%	uso esp.	5,53%	6,04%		
Distribuição da fonte de energia	Parcela do AEAC		204,01	216,25	230,05	6,02%	uso esp.	6,80%	6,71%		
	Carregamento (BC3)		0,11	0,12	0,14	12,04%	uso esp.	0,00%	0,004%		
	Transporte (TR2)		1,64	2,07	2,64	24,25%	uso esp.	0,05%	0,08%		
	Abastecimento do veículo (BA1)		0,04	0,04	0,05	6,02%	uso esp.	0,00%	0,00%		
	Parcela do AEAC		6,54	8,07	10,11	22,11%	uso ger.	0,22%	0,29%		
Total cadeia de suprimento		526,87	578,10	636,16	9,45%		17,56%	18,57%			
Uso final		2474,24	2622,70	2790,10	6,02%	uso esp.	82,44%	81,43%			
Total		3.001,11	3.200,79	3.426,26	6,64%		100,00%	100,00%			
		17,56%	18,06%	18,57%	2,80%						
Energia renovável [kJ/pass.km]											
Meso-estágios		Micro-estágios			Mínimo	Médio	Máximo	Varição	OD	Mínimo	Máximo
Produção de matéria-prima	Exploração				0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%
	Produção				0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%
	Parcela do AEAC				0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%
Transporte de matéria-prima		Origem	Destino								
Petróleo importado	Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio) (BT1)	0,00	0,00	0,00	-	uso ger.	0,00%	0,00%	0,00%	
	Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento) (BC1)	0,00	0,00	0,00	-	uso ger.	0,00%	0,00%	0,00%	
	Navio (carregamento)	Navio (descarregamento) (TM.)	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%	0,00%	
	Navio (descarregamento)	TEBIG (BD1)	0,00	0,00	0,00	-	uso ger.	0,00%	0,00%	0,00%	
	TEBIG	REDUC (BT2)	0,35	0,42	0,49	16,06%	uso esp.	0,05%	0,07%	0,07%	
	Operações de estocagem (E1) (E2)		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%	0,00%	
Transporte de matéria-prima		Origem	Destino								
Petróleo nacional	Bacia de Campos	REDUC (BT3) (BT4)	1,11	1,30	1,53	16,06%	uso esp.	0,17%	0,20%	0,20%	
	Operações de estocagem (E3)		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%	0,00%	
	Parcela do AEAC		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%	0,00%	
Produção da fonte de energia		Refino na REDUC	1,21	1,35	1,50	11,04%	uso esp.	0,18%	0,20%	0,20%	
Distribuição da fonte de energia	Parcela do AEAC		204,01	216,25	230,05	6,02%	uso esp.	30,91%	30,89%	30,89%	
	Carregamento (BC3)		0,11	0,12	0,14	12,04%	uso esp.	0,02%	0,02%	0,02%	
	Transporte (TR2)		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	0,00%	0,00%	
	Abastecimento do veículo (BA1)		0,04	0,04	0,05	6,02%	uso esp.	0,01%	0,01%	0,01%	
	Parcela do AEAC		0,07	0,08	0,09	12,04%	uso ger.	0,01%	0,01%	0,01%	
Total cadeia de suprimento		206,89	219,56	233,84	6,14%		31,35%	31,39%	31,39%		
Uso final		453,14	480,33	510,99	6,02%	uso esp.	68,65%	68,61%	68,61%		
Total		660,04	699,89	744,83	6,06%		100,00%	100,00%	100,00%		
		39,3%	38,0%	36,8%							
		18,3%	18,3%	18,3%							
		22,0%	21,9%	21,7%							

Tabela 5.3. Inventário de ciclo de vida (ICV) para o par (GNC,SPBC).

Energia total [kJ/pass.km]		Consumo [kg/pass.km]			Consumo Uso Final [kg/pass.km]			
Meso-estágios		0,0582	0,0605	0,0631	Varição	OD	Máximo	
Micro-estágios		Mínimo	Médio	Máximo				
Produção de matéria-prima	Exploração	-	-	-	-	-	-	-
	Produção	108,46	121,29	135,19	11,02%	uso esp.	4,15%	
Transporte de matéria-prima		Origem	Destino					
Produção da fonte de energia	Bacia de Campos	UPGN REDUC I e II (CT1)	1,72	1,84	1,97	7,01%	uso esp.	0,06%
	Processamento UPGN REDUC I e II		28,14	30,80	33,69	9,01%	uso esp.	1,03%
Distribuição da fonte de energia	Distribuição malha urbana (CD1)		1,72	1,84	1,97	7,01%	uso ger.	0,06%
	Compressão no posto de serviço (CA1)		53,96	61,79	70,26	13,19%	uso esp.	2,15%
Total cadeia de suprimento		193,99	217,56	243,09	11,28%		7,46%	
Uso final		2785,57	2896,99	3017,7	4,01%	uso esp.	92,54%	
Total		2.979,56	3.114,55	3.260,79	4,51%		100,00%	
Energia renovável [kJ/pass.km]		6,51%	6,99%	7,46%				
Meso-estágios		Consumo [kg/pass.km]			Consumo Uso Final [kg/pass.km]			
Micro-estágios		Mínimo	Médio	Máximo	Varição	OD	Máximo	
Produção de matéria-prima	Exploração	-	-	-	-	-	-	-
	Produção	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%	
Transporte de matéria-prima		Origem	Destino					
Produção da fonte de energia	Bacia de Campos	UPGN REDUC I e II (CT1)	1,72	1,84	1,97	7,01%	uso esp.	2,66%
	Processamento UPGN REDUC I e II		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Distribuição da fonte de energia	Distribuição malha urbana (CD1)		1,72	1,84	1,97	7,01%	uso ger.	2,66%
	Compressão no posto de serviço (CA1)		53,96	61,79	70,26	13,19%	uso esp.	94,68%
Total cadeia de suprimento		57,39	65,46	74,21	12,85%		100,00%	
Uso final		0,00	0,00	0,00		uso esp.	0,00%	
Total		57,39	65,46	74,21	12,85%		100,00%	
Energia renovável na cadeia		29,58%	30,09%	30,53%	1,57%			
Energia renovável no uso final		0,00%	0,00%	0,00%	-			
Energia renovável no ciclo		1,93%	2,10%	2,28%	8,32%			

Tabela 5.4. Inventário de ciclo de vida (ICV) para o par (GNC,SPDG).

			Consumo [kg/pass.km]					
Energia total [kJ/pass.km]			0,00402	0,00502	0,00590			
Meso-estágios		Micro-estágios	Mínimo	Médio	Máximo	Variação	OD	Máximo
Produção de matéria-prima	Exploração		-	-	-	-	-	-
	Produção		7,49	10,06	12,64	25,61%	uso esp.	4,15%
Transporte de matéria-prima	Origem	Destino						
	Bacia de Campos	UPGN REDUC I e II (CT1)	0,12	0,15	0,18	21,66%	uso esp.	0,06%
Produção da fonte de energia	Processamento UPGN REDUC I e II		1,94	2,55	3,15	23,63%	uso esp.	1,03%
Distribuição da fonte de energia	Distribuição malha urbana (CD1)		0,12	0,15	0,18	21,66%	uso ger.	0,06%
	Compressão no posto de serviço (CA1)		3,73	5,12	6,57	27,76%	uso esp.	2,15%
Total cadeia de suprimento			13,40	18,04	22,74	25,87%		7,46%
Uso final			192,452	240,16	282,232	18,69%	uso esp.	92,54%
Total			205,85	258,20	304,97	19,19%		100,00%
			6,51%	6,99%	7,46%			
Energia renovável [kJ/pass.km]			Mínimo	Médio	Máximo	Variação	OD	Máximo
Meso-estágios		Micro-estágios						
Produção de matéria-prima	Exploração		-	-	-	-	-	-
	Produção		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Transporte de matéria-prima	Origem	Destino						
	Bacia de Campos	UPGN REDUC I e II (CT1)	0,12	0,15	0,18	21,66%	uso esp.	2,66%
Produção da fonte de energia	Processamento UPGN REDUC I e II		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Distribuição da fonte de energia	Distribuição malha urbana (CD1)		0,12	0,15	0,18	21,66%	uso ger.	2,66%
	Compressão no posto de serviço (CA1)		3,73	5,12	6,57	27,76%	uso esp.	94,68%
Total cadeia de suprimento			3,97	5,43	6,94	27,41%		100,00%
Uso final			0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Total			3,97	5,43	6,94	27,41%		100,00%
		Energia renovável na cadeia	29,58%	30,09%	30,53%	1,57%		
		Energia renovável no uso final	0,00%	0,00%	0,00%	-		
		Energia renovável no ciclo	1,93%	2,10%	2,28%	8,32%		

Tabela 5.5. Inventário de ciclo de vida (ICV) para o par (OD,SPOD).

Energia total [kJ/pass.km]			Consumo Uso Final [kg/pass.km]				Peso	
			0,004166	0,004817	0,005637	Variação		
Meso-estágios			Mínimo	Médio	Máximo		OD	Máximo
Produção de matéria-prima	Micro-estágios							
	Exploração		0,9297	1,1500	1,4336	21,91%	uso esp.	0,49%
	Produção		7,9383	9,7775	12,1425	21,50%	uso esp.	4,16%
Transporte de matéria-prima	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
	Origem	Destino	-	-	-	-	-	-
Petróleo importado	Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio) (BT1)	0,0097	0,0132	0,0179	30,97%	uso ger.	0,01%
	Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento) (BC1)	0,0209	0,0248	0,0296	17,64%	uso ger.	0,01%
	Navio (carregamento)	Navio (descarregamento) (TM.)	1,0374	1,2367	1,4906	18,32%	uso esp.	0,51%
	Navio (descarregamento)	TEBIG (BD1)	0,0209	0,0248	0,0296	17,64%	uso ger.	0,01%
	TEBIG	REDUC (BT2)	0,0241	0,0309	0,0398	25,45%	uso esp.	0,01%
	Operações de estocagem (E1) (E2)		0,0128	0,0171	0,0226	28,50%	uso esp.	0,01%
Transporte de matéria-prima	Origem		-	-	-	-	-	-
	Bacia de Campos	REDUC (BT3) (BT4)	0,0755	0,0970	0,1249	25,45%	uso esp.	0,04%
Petróleo nacional	Operações de estocagem (E3)		0,0151	0,0200	0,0265	28,50%	uso esp.	0,01%
	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
Produção da fonte de energia	Refino na REDUC		15,0303	18,2950	22,4814	20,36%	uso esp.	7,71%
	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
Distribuição da fonte de energia	Carregamento (BC3)		0,0085	0,0105	0,0130	21,38%	uso esp.	0,00%
	Transporte (TR2)		0,1341	0,1868	0,2648	34,99%	uso esp.	0,09%
	Abastecimento do veículo (BA1)		0,0032	0,0037	0,0043	15,28%	uso esp.	0,001%
	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
Total cadeia de suprimento			25,26	30,89	38,12	20,82%		13,07%
Uso final			187,3725014	216,6686833	253,5690478	15,28%	uso esp.	86,93%
Total			212,63	247,56	291,69	15,97%		100,00%
			11,9%	12,5%	13,1%			
Energia renovável [kJ/pass.km]			Mínimo	Médio	Máximo	Variação	OD	Máximo
Meso-estágios								
Produção de matéria-prima	Micro-estágios							
	Exploração		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Produção		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Transporte de matéria-prima	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
	Origem	Destino	-	-	-	-	-	-
Petróleo importado	Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio) (BT1)	0,00	0,00	0,00	-	uso ger.	0,00%
	Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento) (BC1)	0,00	0,00	0,00	-	uso ger.	0,00%
	Navio (carregamento)	Navio (descarregamento) (TM.)	0,00	0,00	0,00	-	uso ger.	0,00%
	Navio (descarregamento)	TEBIG (BD1)	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	TEBIG	REDUC (BT2)	0,02	0,03	0,04	25,45%	uso esp.	11,80%
	Operações de estocagem (E1) (E2)		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Transporte de matéria-prima	Origem		-	-	-	-	-	-
	Bacia de Campos	REDUC (BT3) (BT4)	0,08	0,10	0,12	25,45%	uso esp.	37,02%
Petróleo nacional	Operações de estocagem (E3)		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
Produção da fonte de energia	Refino na REDUC		0,11	0,13	0,16	15,28%	uso esp.	46,06%
	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
Distribuição da fonte de energia	Carregamento (BC3)		0,01	0,01	0,01	42,76%	uso esp.	3,84%
	Transporte (TR2)		0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Abastecimento do veículo (BA1)		0,00	0,00	0,00	15,28%	uso esp.	1,28%
	Parcela do biodiesel		-	-	-	-	-	-
Total cadeia de suprimento			0,23	0,27	0,34	20,24%		100,00%
Uso final			0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Total			0,23	0,27	0,34	20,24%		100,00%
			Energia renovável na cadeia	0,90%	0,89%	0,89%		
			Energia renovável no uso final	0,00%	0,00%	0,00%		
			Energia renovável no ciclo	0,11%	0,11%	0,12%		

Tabela 5.6. Inventário de ciclo de vida (ICV) para o par (B2,SPB2).

Energia total [kJ/pass.km]			Consumo Uso Final [kg/pass.km]				Peso	
Meso-estágios			0,00418	0,00479	0,00556		OD	Máximo
Micro-estágios			Mínimo	Médio	Máximo	Variação		
Produção de matéria-prima	Exploração		0,9137	1,1209	1,3846	21,00%	uso esp.	0,48%
	Produção		7,8018	9,5305	11,7274	20,59%	uso esp.	4,07%
	Parcela do biodiesel		0,4415	0,5378	0,6611	20,41%	uso esp.	0,23%
Transporte de matéria-prima	Origem	Destino	-	-	-	-	-	-
	Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio) (BT1)	0,0095	0,0129	0,0173	30,04%	uso ger.	0,01%
Petróleo importado	Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento) (BC1)	0,0205	0,0241	0,0286	16,74%	uso ger.	0,01%
	Navio (carregamento)	Navio (descarregamento) (TM.)	1,0196	1,2054	1,4397	17,43%	uso esp.	0,50%
	Navio (descarregamento)	TEBIG (BD1)	0,0205	0,0241	0,0286	16,74%	uso ger.	0,01%
	TEBIG	REDUC (BT2)	0,0237	0,0301	0,0384	24,54%	uso esp.	0,01%
	Operações de estocagem (E1) (E2)		0,0126	0,0166	0,0218	27,59%	uso esp.	0,01%
	Origem	Destino	-	-	-	-	-	-
Petróleo nacional	Bacia de Campos	REDUC (BT3) (BT4)	0,0742	0,0946	0,1207	24,54%	uso esp.	0,04%
	Operações de estocagem (E3)		0,0148	0,0195	0,0256	27,59%	uso esp.	0,01%
	Parcela do biodiesel		0,0016	0,0027	0,0043	50,05%	uso esp.	0,00%
Produção da fonte de energia	Refino na REDUC		14,7718	17,8328	21,7129	19,46%	uso esp.	7,54%
	Parcela do biodiesel		0,4185	0,4801	0,5567	14,39%	uso esp.	0,19%
Distribuição da fonte de energia	Carregamento (BC3)		0,0083	0,0102	0,0125	20,48%	uso esp.	0,00%
	Transporte (TR2)		0,1318	0,1821	0,2557	34,04%	uso esp.	0,09%
	Abastecimento do veículo (BA1)		0,0031	0,0036	0,0042	14,38%	uso esp.	0,001%
	Parcela do biodiesel		0,0900	0,1193	0,1615	29,96%	uso esp.	0,056%
	Total cadeia de suprimento		25,7778	31,2474	38,2016	19,88%		13,26%
Uso final			187,9089	215,5049	249,8993	14,38%	uso esp.	86,74%
Total			213,687	246,752	288,101	15,08%	uso esp.	100,00%
			12,1%	12,7%	13,3%			
Energia renovável [kJ/pass.km]			Consumo Uso Final [kg/pass.km]				Peso	
Meso-estágios			0,0000	0,0000	0,0000		OD	Máximo
Micro-estágios			Mínimo	Médio	Máximo	Variação		
Produção de matéria-prima	Exploração		0,0000	0,0000	0,0000	-	uso esp.	0,00%
	Produção		0,0000	0,0000	0,0000	-	uso esp.	0,00%
	Parcela do biodiesel		0,0220	0,0253	0,0293	14,38%	uso esp.	0,61%
Transporte de matéria-prima	Origem	Destino	-	-	-	-	-	-
	Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio) (BT1)	0,0000	0,0000	0,0000	-	uso ger.	0,00%
Petróleo importado	Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento) (BC1)	0,0000	0,0000	0,0000	-	uso ger.	0,00%
	Navio (carregamento)	Navio (descarregamento) (TM.)	0,0000	0,0000	0,0000	-	uso ger.	0,00%
	Navio (descarregamento)	TEBIG (BD1)	0,0000	0,0000	0,0000	-	uso esp.	0,00%
	TEBIG	REDUC (BT2)	0,0237	0,0301	0,0384	24,54%	uso esp.	0,80%
	Operações de estocagem (E1) (E2)		0,0000	0,0000	0,0000	-	uso esp.	0,00%
	Origem	Destino	-	-	-	-	-	-
Petróleo nacional	Bacia de Campos	REDUC (BT3) (BT4)	0,0742	0,0946	0,1207	24,54%	uso esp.	2,50%
	Operações de estocagem (E3)		0,0000	0,0000	0,0000	-	uso esp.	0,00%
	Parcela do biodiesel		0,0003	0,0004	0,0004	14,38%	uso esp.	0,01%
Produção da fonte de energia	Refino na REDUC		0,1129	0,1294	0,1501	14,38%	uso esp.	3,11%
	Parcela do biodiesel		0,0094	0,0108	0,0125	14,38%	uso esp.	0,26%
Distribuição da fonte de energia	Carregamento (BC3)		0,0083	0,0102	0,0125	40,95%	uso esp.	0,26%
	Transporte (TR2)		0,0000	0,0000	0,0000	-	uso esp.	0,00%
	Abastecimento do veículo (BA1)		0,0031	0,0036	0,0042	14,38%	uso esp.	0,09%
	Parcela do biodiesel		0,0006	0,0007	0,0009	19,89%	uso esp.	0,02%
	Total cadeia de suprimento		0,2546	0,3051	0,3690	18,75%		7,64%
Uso final			3,36	3,85	4,46	-	uso esp.	92,36%
Total			3,6103	4,1536	4,8317	14,70%		100,00%
			0,99%	0,98%	0,97%			
			1,79%	1,79%	1,79%			
			1,69%	1,68%	1,68%			

Tabela 5.7. Inventário de ciclo de vida (ICV) para o par (EH,SPFF).

Energia total [kJ/pass.km]		Consumo [kg/pass.km]					
		Mínimo	Médio	Máximo			
		0,1083	0,1137	0,1197			
		AEHC			Varição	OD	
Meso-estágios	Micro-estágios	Mínimo	Médio	Máximo			Máximo
Produção de matéria-prima	Agricultura	45,55	52,56	60,30	14,04%	uso esp.	1,14%
	Suprimento de insumos agrícolas	11,72	14,31	16,58	16,97%	uso esp.	0,31%
	Produção de insumos agrícolas	152,20	159,81	168,22	5,01%	uso esp.	3,19%
Transporte de matéria-prima	Carregamento mecânico (CR)	7,49	8,64	9,92	14,04%	uso esp.	0,19%
	Transporte rodoviário (TR3)	50,60	55,93	61,81	10,03%	uso esp.	1,17%
Produção da fonte de energia	Produção do álcool	1.414,38	1.485,10	1.563,26	5,01%	uso esp.	29,63%
Distribuição da fonte de energia	Carregamento/descarregamento (BC4) (BD3)	0,47	0,52	0,58	11,03%	uso ger.	0,01%
	Transporte até BADUC (TR4)	38,12	46,69	57,88	21,17%	uso esp.	1,10%
	Carregamento (BADUC) (BC5)	0,23	0,26	0,29	11,03%	uso esp.	0,01%
	Transporte (TR5)	4,13	5,17	6,54	23,21%	uso esp.	0,12%
	Abastecimento do veículo (BA2)	0,09	0,09	0,10	5,01%	uso esp.	0,002%
	Total cadeia de suprimento	1.724,98	1.829,09	1.945,48	6,03%		36,87%
Uso final		3013,68	3164,36	3330,91	5,01%	uso esp.	63,13%
Total		4738,66	4993,45	5276,39	5,38%		100,00%
Energia renovável [kJ/pass.km]		AEHC			Varição	OD	
Meso-estágios	Micro-estágios	Mínimo	Médio	Máximo			Máximo
Produção de matéria-prima	Agricultura	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Suprimento de insumos agrícolas	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Produção de insumos agrícolas	-	-	-	-	uso esp.	-
Transporte de matéria-prima	Carregamento mecânico (CR)	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Transporte rodoviário (TR3)	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Produção da fonte de energia	Produção do álcool	1.414,38	1.485,10	1.563,26	5,0%	uso esp.	31,93%
Distribuição da fonte de energia	Carregamento/descarregamento (BC4) (BD3)	0,47	0,52	0,58	11,0%	uso ger.	0,01%
	Transporte até BADUC (TR4)	0,00	0,00	0,00	0,0%	uso esp.	0,00%
	Carregamento (BADUC) (BC5)	0,23	0,26	0,29	11,0%	uso esp.	0,01%
	Transporte (TR5)	0,00	0,00	0,00	-		
	Abastecimento do veículo (BA2)	0,09	0,09	0,10	5,0%	uso esp.	0,002%
	Total cadeia de suprimento	1.415,17	1.485,97	1.564,23	5,0%		31,95%
Uso final		3013,68	3164,36	3330,91	5,0%	uso esp.	68,05%
Total		4.428,85	4.650,33	4.895,14	5,0%		100,00%
		Energia renovável na cadeia	82,0%	81,2%	80,4%		
		Energia renovável no uso final	100,0%	100,0%	100,0%		
		Energia renovável no ciclo	93,5%	93,1%	92,8%		

Tabela 5.8. Inventário de ciclo de vida (ICV) para o par (BD,SPBD).

Energia total [kJ/pass.km]		Consumo Uso Final [kg/pass.km]			Variação	OD	Máximo
		0,004495	0,005198	0,006083			
Meso-estágios	Micro-estágios	Mínimo	Médio	Máximo			
Produção de matéria-prima	Agricultura	12,85	16,33	20,83	24,4%	uso esp.	6,51%
	Suprimento insumos agrícolas	0,28	0,36	0,45	24,4%	uso esp.	0,14%
	Produção insumos agrícolas	4,93	5,70	6,67	15,3%	uso ger.	2,08%
	Transporte dos grãos (TR7)	0,81	1,14	1,63	35,9%	uso esp.	0,51%
	Produção do óleo	4,89	5,66	6,62	15,3%	uso ger.	2,07%
Transporte de matéria-prima	Carregamento e descarregamento (BC7)	0,02	0,02	0,03	21,4%	uso ger.	0,01%
	Transporte rodoviário (TR8)	0,07	0,12	0,21	56,0%	uso esp.	0,07%
Produção da fonte de energia	Produção do EMOS	10,55	12,20	14,28	15,3%	uso esp.	4,46%
	Insumos (metanol)	11,97	13,84	16,20	15,3%	uso ger.	5,06%
Distribuição da fonte de energia	Carregamento na usina (BC8)	0,01	0,01	0,01	21,4%	uso esp.	0,00%
	Transporte até a BADUC (TR9)	4,65	6,24	8,56	31,4%	uso esp.	2,67%
	Descarregamento na BADUC (BD5)	0,01	0,01	0,01	21,4%	uso esp.	0,00%
	Carregamento para postos (BC9)	0,01	0,01	0,01	21,4%	uso ger.	0,00%
	Transporte para postos (TR10)	0,17	0,20	0,24	18,2%	uso esp.	0,07%
	Abastecimento do veículo (BA3)	0,00	0,00	0,00	15,3%	uso esp.	0,00%
Total cadeia de suprimento		51,20	61,83	75,75	19,8%		23,67%
Uso final		180,54	208,76	244,32	15,3%	uso esp.	76,33%
Total		231,74	270,60	320,07	16,3%		100,00%
Energia renovável [kJ/pass.km]							
Meso-estágios	Micro-estágios	Mínimo	Médio	Máximo	Variação	OD	Máximo
Produção de matéria-prima	Agricultura	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Suprimento insumos agrícolas	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Produção insumos agrícolas	-	-	-	-	uso ger.	-
	Transporte dos grãos (TR7)	0,012	0,014	0,016	15,28%	uso esp.	0,01%
	Produção do óleo	1,17	1,36	1,59	15,28%	uso ger.	0,68%
Transporte de matéria-prima	Carregamento e descarregamento (BC7)	0,02	0,02	0,02	15,28%	uso ger.	0,01%
	Transporte rodoviário (TR8)	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
Produção da fonte de energia	Produção do EMOS	0,51	0,58	0,68	15,28%	uso esp.	0,29%
	Insumos (metanol)	-	-	-	-	uso ger.	-
Distribuição da fonte de energia	Carregamento na usina (BC8)	0,01	0,01	0,01	21,38%	uso ger.	0,01%
	Transporte até a BADUC (TR9)	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Descarregamento na BADUC (BD5)	0,01	0,01	0,01	21,38%	uso ger.	0,01%
	Carregamento para postos (BC9)	0,01	0,01	0,01	21,38%	uso ger.	0,01%
	Transporte para postos (TR10)	0,00	0,00	0,00	-	uso esp.	0,00%
	Abastecimento do veículo (BA3)	0,00	0,00	0,00	15,28%	uso esp.	0,00%
Total cadeia de suprimento		1,74	2,01	2,36	15,38%		1,02%
Uso final		169,74	196,27	229,70	15,28%	uso esp.	98,98%
Total		171,48	198,29	232,06	15,28%		100,00%
Energia renovável na cadeia		3%	3%	3%			
Energia renovável no uso final		94%	94%	94%			
Energia renovável no ciclo		74%	73%	73%			

5.3.1. Combustíveis fósseis - derivados do petróleo e gás natural

As Tabelas 5.2 a 5.6 apresentam os resultados do inventário de ciclo de vida para a gasolina C (GC), óleo diesel (OD), gás natural comprimido (GNC) e mistura 2% de biodiesel (EMOS) e 98% de óleo diesel (B2), levantados com base nos MCV apresentados nas Figuras 5.1.

Adotou-se o poder calorífico inferior (PCI) para o cálculo do conteúdo energético dos combustíveis. A energia embutida foi desconsiderada, pois sua identificação é um dos objetivos do trabalho.

A partir de séries históricas para consumo de energia, foram obtidas as médias aritméticas dos dados e utilizou-se o desvio padrão da amostra e os coeficientes da distribuição *t* de Student para um nível de significância de 90% como parâmetros para estimativa da variação (KING, 1994). Dados disponíveis na forma de intervalos, tiveram sua média determinada pelo centro do intervalo e a variação por sua amplitude dividida por dois.

O óleo diesel e o gás natural (GN) consumidos na produção de petróleo e GN nacional foram obtidos de inventários anuais realizado no período de 1990 a 2003. Como critério de alocação utilizou-se o rateio mássico (0,043 kg de GN para 1 kg de petróleo). O óleo diesel consumido na exploração e o GN reinjetado foram alocados exclusivamente ao petróleo, pois têm como finalidade a sua obtenção (PETROBRAS-CONPET, 2003). Para o petróleo, os valores obtidos foram: $0,0042 \pm 0,0005$ tEP/t (exploração) e 154 ± 11 MJ/barril (produção) e para o GN, 2004 ± 140 MJ/t (produção).

Para o petróleo importado, adotou-se $0,0075 \pm 0,0004$ tEP/t para exploração on shore e 97 ± 5 MJ/barril para produção no Golfo Pérsico. Admite-se o uso de óleo diesel na exploração e GN na produção (SHEEHAN et al, 1998).

O bombeio de petróleo nacional (BT2, BT3 e BT4) consome $0,0311 \pm 0,0031$ kWh/t.km de energia elétrica e $(1,79 \pm 0,23) \cdot 10^{-4}$ tEP/t para aquecimento nos terminais (E2 e E3) com óleo combustível e GN (PETROBRAS-CONPET, 2003). Adotou-se $0,0144 \pm 0,0007$ kWh/t.km de GN para o bombeio de petróleo no Oriente Médio (BT1) (SHEEHAN et al, 1998) e o dado nacional para aquecimento no terminal E1.

Para o transporte marítimo (TM) adotou-se consumo entre 1,543 e 1,637 g/t.milha de óleo combustível para capacidade entre 328.000 e 347.000 m³. O carregamento e descarregamento (BC1 e BD1) consomem entre 3,7 e 3,5 t/h de óleo combustível (TRANSPETRO, 2002, GABINA, 2004).

A série histórica (1990 a 2003) do consumo de óleo combustível, GN, gás de refinaria, coque e energia elétrica para refino de petróleo e processamento de GN foi obtida de PETROBRAS-CONPET (2003). No período de 1999 a 2003 obteve-se a produção de gasolina A, óleo diesel e derivados de ANP (2003), sendo possível calcular a eficiência energética do processo (89% a 91%) e os balanços de massa e energia (6% a 8%). Dividiu-se a energia elétrica e o GN consumido pela massa dos derivados do petróleo e do GN seco e os demais combustíveis apenas pelos derivados de petróleo (PETROBRAS-CONPET, 2003). Os valores obtidos foram: 3798 ± 190 MJ/t (óleo diesel), 3816 ± 191 (gasolina A) e 509 ± 25 MJ/t (GN).

O carregamento de caminhões para distribuição (BC3) consome $2,51 \pm 0,15$ MJ/t de energia

elétrica para a gasolina C, $2,17 \pm 0,13$ MJ/t para o óleo diesel e biodiesel¹⁰ (PETROBRAS-CONPET, 2003; MARQUES, 2003). Os valores típicos de eficiência energética para o caminhão-tipo de 30.000 l de capacidade (TR1 e TR2) variam entre 1,81 e 2,25 km/l (VOLVO, 2000) e adotou-se o consumo de energia elétrica no abastecimento (BA1) como $0,654 \pm 0,033$ MJ/m³ (GILBARCO, 2004). O estoque na base (E4 e E6) e no posto (E5 e E7) não consomem energia e as emissões evaporativas não fazem parte do escopo do trabalho.

Os dados de energia elétrica consumida no transporte de GN até o processamento (CT1) foram obtidos de PETROBRAS-CONPET (2003) por meio de série histórica (1990 a 2003) no valor de $30 \pm 0,9$ MJ/t. Este mesmo valor foi utilizado como uma aproximação subestimada para a distribuição de GN (CD1), em função da dificuldade na obtenção de dados específicos. Para compressão para abastecimento (CA1) adotou-se 1021 ± 94 MJ/t (PETROBRAS-CONPET, 2003).

5.3.2. Biocombustíveis – Etanol de Cana-de-Açúcar

A Tabela 5.7 apresenta os resultados do inventário de ciclo de vida para o etanol (anidro e hidratado) levantados com base nos MCV apresentados na Figura 5.2.

Na cadeia de suprimento do etanol admite-se 65 t_c/ha (t_c = tonelada de cana-de-açúcar) para a produção de cana-de-açúcar e 85,4 l/t_c para a produção de etanol (LIMA e MARCONDES, 2002; CTC, 2003).

Por uma questão de coerência com os trabalhos apresentados na Tabela 4.1 considerou-se a energia embutida nos insumos agrícolas e seu suprimento, embora se trate de fluxos de 2º nível. A cada 5 anos a agricultura envolve o cultivo da cana-planta (1 vez), das soqueiras (3 vezes) e colheita mecanizada (4 vezes), utilizando equipamentos que consomem óleo diesel e totalizam $25,10 \pm 2,25$ MJ/t_c (CTC, 2003). O consumo de energia para a produção de matéria-prima totalizou 1993 ± 59 MJ/t_{EH} (t_{EH} = tonelada de etanol hidratado).

O carregamento (CR) e transporte (TR3) de cana-de-açúcar até as destilarias utiliza carregadeiras e caminhões que consomem óleo diesel em taxas de $16,25 \pm 1,62$ l/ha e 0,0209 a 0,0231 l/t.km, respectivamente. (CTC, 2003; RIBEIRO, 2004). O consumo de energia para o

¹⁰ Espera-se que exista uma diferença de consumo de energia para o bombeio de óleo diesel e o EMOS aproximadamente proporcional a razão das massas específicas (0,852 t/m³ para o óleo diesel e 0,876 t/m³ para o EMOS). Assim, o consumo de energia para bombear o EMOS seria aproximadamente 3% maior que o necessário para bombear o óleo diesel. Porém, as estimativas apresentadas neste trabalho partiram de valores médios do consumo de energia em bases de distribuição rateadas pelas vendas de derivados em período anterior a comercialização de B2, não sendo possível comprovar esta expectativa.

transporte de matéria-prima totalizou 492 ± 25 MJ/t_{EH}.

Admite-se que toda a energia necessária para a produção de etanol (moagem, fermentação, destilação e geração de energia elétrica) é obtida da queima de 232 kg/t_c de bagaço com PCI de 1650 kcal/kg e eficiência na conversão de vapor de 78%¹¹, produzindo excedente de 8% de bagaço que é considerado como co-produto pelo potencial de geração de energia elétrica comercializável (COELHO *et al*, 1997; LIMA e MARCONDES, 2002; CTC, 2003). Obteve-se 58% de eficiência energética do processo, 7% para o balanço de massa, 0,3% para o balanço de energia e 13.058 ± 668 MJ/t_{EH}.

Por analogia aos cálculos adotados para a gasolina C, obteve-se 464 ± 72 MJ/t_{EH} para o carregamento, descarregamento (BC4 e BD3) e transporte rodoviário da usina até a base de distribuição (TR4) e $48,6 \pm 9$ MJ/t_{EH} para a distribuição urbana (BC5 e TR5) e abastecimento (BA2).

5.3.3. Biocombustíveis – Biodiesel

A Tabela 5.8 apresenta os resultados do inventário de ciclo de vida para biodiesel (EMOS) levantados com base nos MCV apresentados na Figura 5.3.

Na cadeia de suprimento do EMOS admite-se 2,4 t_s/ha (t_s = tonelada de soja) para a produção de cana-de-açúcar e 18% em massa de óleo no grão.

Por uma questão de coerência com os trabalhos apresentados na Tabela 4.1 considerou-se a energia embutida nos insumos agrícolas e seu suprimento, embora se trate de fluxos de 2º nível. O consumo de energia para a produção de matéria-prima totalizou 5613 ± 328 MJ/t_{EMOS} (t_{EMOS} = tonelada de EMOS).

O transporte (TR7) de soja até as plantas de esmagamento se dá a uma distância de 8 ± 1 km e utiliza tratores de capacidade de 12t e eficiência de 1,34 km/l (velocidade de 10 km/h) (SILVEIRA, 1991).

Admite-se que toda a energia necessária para a produção do óleo de soja (recebimento e estocagem, preparação da soja, extração do óleo, recuperação do óleo, degomagem do óleo, recuperação do solvente, processamento do farelo e tratamento dos resíduos) é obtida da queima de 351,28 kcal/t_s de óleo combustível, 182,6 kcal/ts de vapor e 72,5 kWh/ts de energia

(SHEERAN et al, 1998).

Com exceção do caso da Brasil Ecodiesel, cuja distância de transporte estimada foi de 316 ± 89 km, admite-se que as usinas de produção de EMOS são contíguas as plantas de extração de óleo de soja e considera-se apenas o bombeio interno do óleo para a produção do combustível.

As usinas de produção de EMOS consome 2347 ± 10 MJ/t_{EMOS} e considera-se a energia embutida no metanol como de 2663 MJ/t_{EMOS}.

A distância média de transporte (TR9) do EMOS é de 1517 ± 22 km e se faz por transporte rodoviário com caminhões de 30.000 l de capacidade. O carregamento e descarregamento (BC8 e DB5) a estocagem na base (E9), carregamento para distribuição (BC9), a distribuição (TR10), a estocagem no posto de serviço (E10) e o abastecimento dos ônibus (BA3) tiveram o mesmo tratamento empregado para o óleo diesel.

5.3.4. Uso Final

Para cada sistema de propulsão apresentado na Tabela 5.1, foram coletados dados de campo de eficiência para 3 veículos com as características e perfil operacional descritos nas notas (2) e (3), conforme Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Perfil de consumo dos veículos selecionados para uso final.

Tipo de Veículo	Sistema de Propulsão	Fonte de energia	Consumo [kg/km]			Variação
			Máximo	Médio	Mínimo	
Automóveis	SPGC	Gasolina C	0,0896	0,0842	0,0794	6,02%
	SPFF	AEHC	0,1556	0,1478	0,1408	5,01%
	SPBC	GNC	0,0820	0,0787	0,0757	4,01%
Ônibus	SPDO	100% Óleo diesel	0,3338	0,3142	0,2968	5,89%
	SPDB	100% EMOS	0,3602	0,3391	0,3203	5,89%
	SPB3	98% óleo diesel + 2% EMOS	0,3290	0,3125	0,2977	5,01%
	SPDG	GNC	0,5098	0,4703	0,4014	11,53%

Um melhor detalhamento da elaboração do ICV para os estágios apresentados até o momento pode ser obtido em D'Agosto (2004) (Tese_Doc_DAgosto_2004.doc) que se encontra nos Anexos em meio eletrônico.

5.4. FASE 3: Avaliação dos dados

A finalidade desta fase é orientar uma possível reavaliação dos dados por meio da identificação de fluxos críticos. Os parâmetros adotados foram: $P_{\min}=20\%$ e $T_{\max}=10\%$ (a partir de MAURICE

¹¹ Para o caso do Rio de Janeiro, este número pode estar superestimado. Porém, não se obteve uma referência adequada para esta pesquisa.

et al., 2000)¹².

Das Tabelas 5.2 a 5.8, destaca 19 fluxos com $P_{\text{fluxo}} \geq 20\%$, dos quais 11 apresentam $T_{\text{fluxo}} \geq 10\%$, nenhum envolve dados de uso geral, não sendo considerados críticos. O principal aspecto a ser avaliado neste caso é a consistência dos dados.

Observa-se variações acima de T_{mim} para todos os dados de uso final considerados para a operação com ônibus. Isso se deve ao fato de que os dados sofrem variação em função do consumo (kg/km) e lotação (pass/veículo). O ideal seria que se dispusesse de um banco de dados onde os valores de kg/pass.km fossem obtidos diretamente dos testes de campo, mais isso não foi possível. Esta variação acaba impactando todo o inventário do par (GNC,SPDG).

Uma limitação desta fase do trabalho refere-se ao teste de consistência do fluxo de compressão para abastecimento do GN. Foi possível obter referências para os valores médios (SOBRINHO, 1999; GÔMARA, 2000, BLANCO, 2004), porém, não para sua variação.

Variações superiores a T_{mim} também foram obtidas para o uso de energia renovável no par (OD,SPOD) e (B2,SPB2) em bombeio de petróleo nacional e refino. Por se tratar de dados de uso específico da Petrobras, entende-se que estas variações sejam características dos micro-estágios.

Em todos os casos, por se tratar de fluxos relacionados à dados de uso específico optou-se pela sua manutenção.

5.5. FASE 4: Comparação dos resultados e discussão

Por facilitar a visualização dos resultados, optou-se pela comparação paramétrica. Para cada alternativa da Tabela 5.1, o consumo de energia total considera o maior valor de cada meso-estágio como referência. O consumo de energia renovável considera o respectivo consumo de energia total como referência. As Figuras 5.4 a 5.8, elaboradas a partir das Tabelas 5.2 a 5.8, que apresentam os valores absolutos, servirão de base para a discussão dos resultados.

¹² A determinação de P_{mim} e T_{max} fica a cargo da equipe de elaboração do ICV e da sensibilidade que os mesmos dispõem sobre as características dos processos produtivos (micro-estágios) referentes a dados de uso específico e qualidade dos dados referentes aos dados de uso geral.

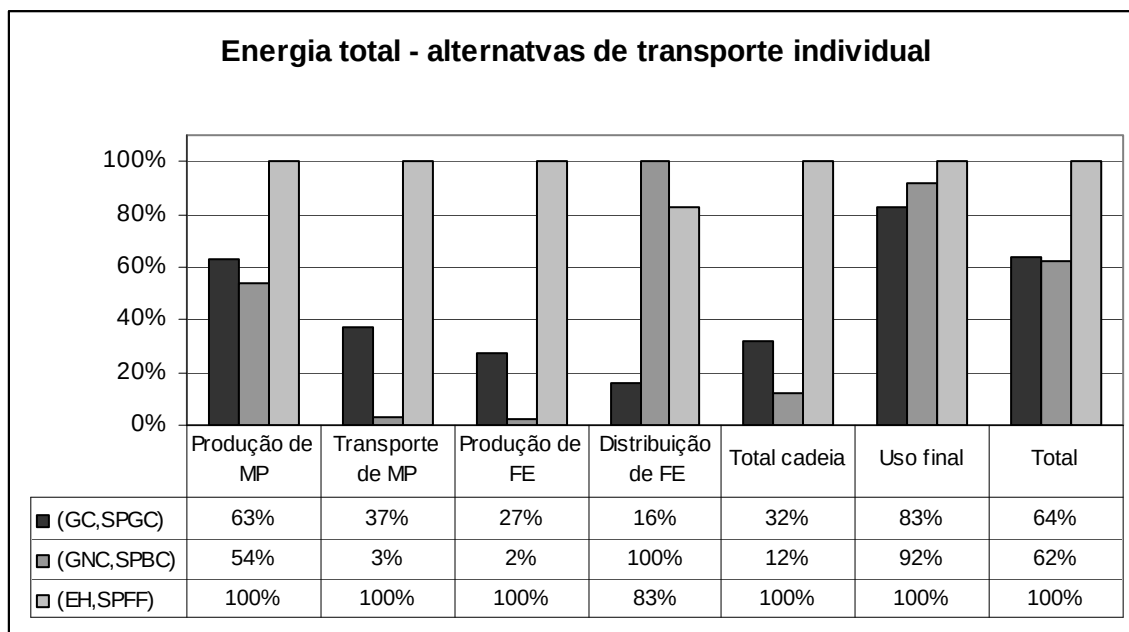


Figura 5.4. Consumo de energia total - alternativas para transporte individual.

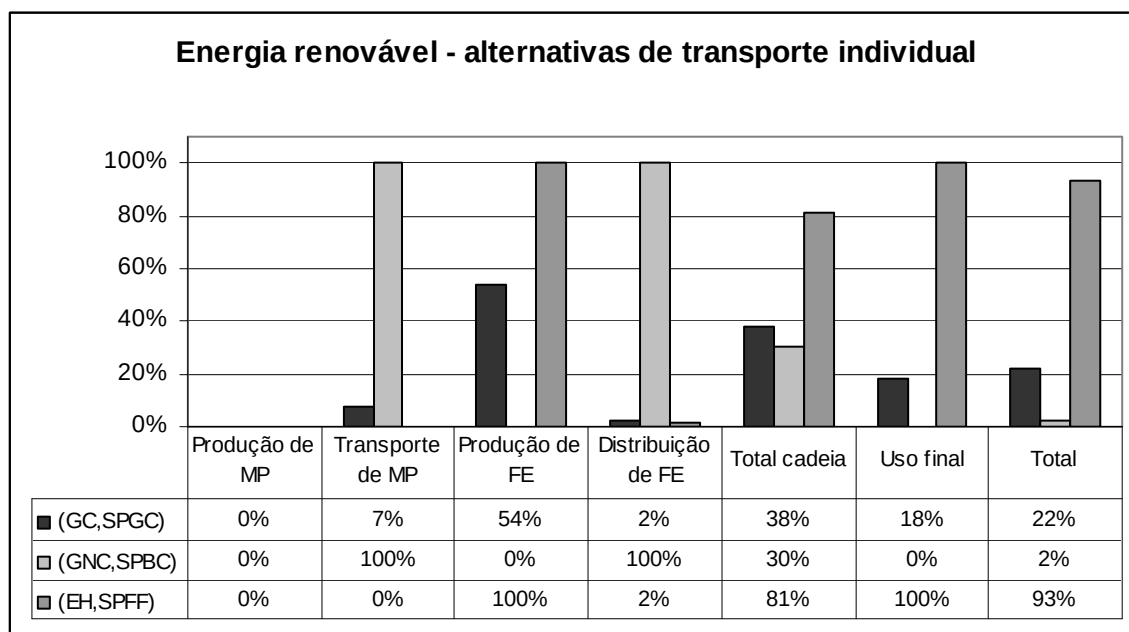


Figura 5.5. Consumo de energia renovável – alternativas para transporte individual.

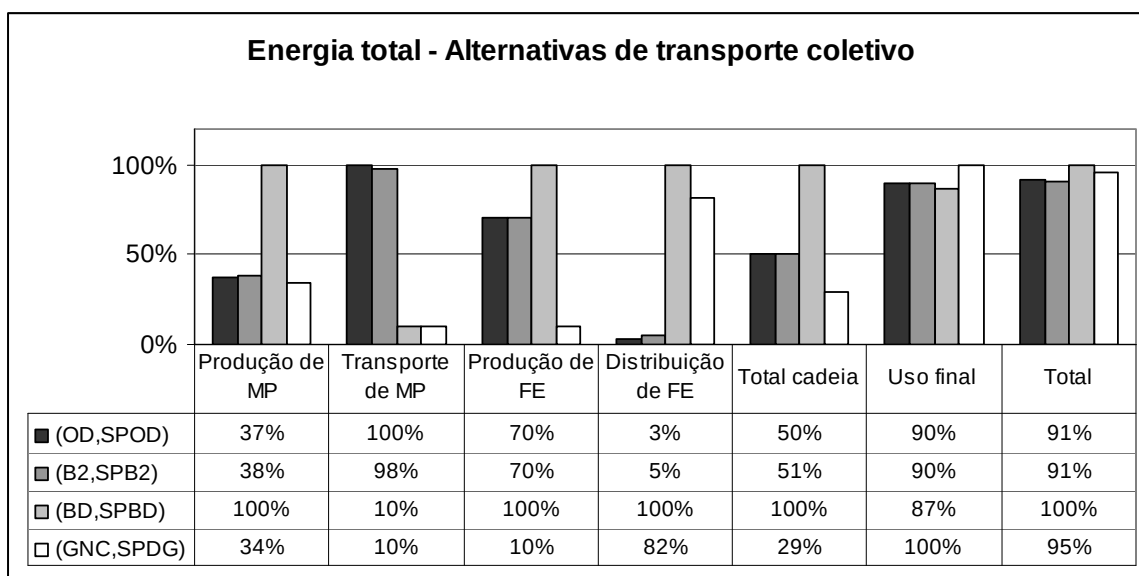


Figura 5.6. Consumo de energia total – alternativas para transporte coletivo.

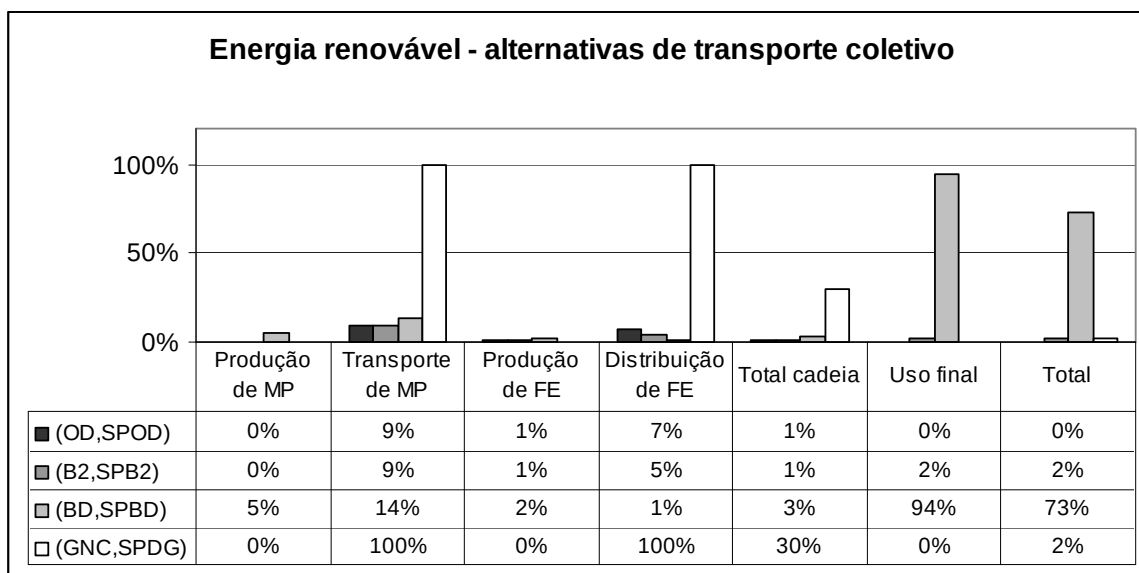


Figura 5.7. Consumo de energia renovável – alternativas para transporte coletivo.

No que se refere às alternativas para transporte individual, com exceção para distribuição da fonte de energia, a alternativa (EH, SPFF) apresenta os maiores consumos de energia total por meso-estágios. A energia embutida nos insumos agrícolas é a parcela decisiva para tornar o consumo de energia total da produção de matéria-prima para a alternativa (EH, SPFF) superior em 37% a alternativa (GC, SPGC) e 46% a alternativa (GNC, SPBC), sendo que esta última se privilegia do critério de alocação adotado que não considera o óleo diesel consumido na exploração do GN associado.

No que se refere às alternativas para transporte coletivo, o biodiesel (BD, SPBD) predomina como de maior consumo de energia total, não sendo a mais energo-intensiva apenas nos estágios

de transporte de matéria-prima e uso final. No caso do transporte de matéria-prima, isso decorre do fato de que três das quatro usinas de produção consideradas são adjacentes às plantas de obtenção de óleo de soja, sendo o transporte neste caso o bombeio por dutos de curta distância. No caso do uso final, embora se tenha considerado como premissa que o ônibus utilizando B100 apresenta uma eficiência 5% menos que o ônibus utilizando óleo diesel, deve-se considerar que a relação de massa específica é 3% mais favorável ao EMOS (se comparada ao óleo diesel) e o poder calorífico do EMOS é 11% menos que o do óleo diesel. Assim, para um maior consumo volumétrico do EMOS, se comparado ao óleo diesel, equivale um menor consumo mássico e energético, o que o coloca numa posição 3% mais favorável que o óleo diesel.

A alternativa para transporte coletivo de maior consumo energético no uso final é a (GNC, SPDG), pois ônibus movido à gás natural apresenta os piores consumos mássicos.

As opções (OD, SPOD) e (B2, SPB2) podem ser consideradas semelhantes, não havendo diferenças dentro de um intervalo de variação de 10%. Sua apresentação se deveu ao fato de existirem dados de eficiência do ônibus testado com mistura B2. É importante destacar que os resultados obtidos para este experimento indicam que o ônibus que utilizou B2 é ligeiramente mais eficiente (0,5%) que o conjunto de ônibus que utilizou óleo diesel. Porém, não há como identificar se esta é uma característica, operacional, do veículo ou do combustível e recomenda-se desconsidera-la.

Com exceção de (BD, SPBD), que utiliza energia elétrica como parte das necessidades energéticas para extração do óleo de soja, nas demais alternativas não se verifica o consumo de energia renovável para produção de matéria-prima.

A diferença entre o consumo de energia total para o transporte de matéria-prima de cada alternativa é função do modo de transporte e do critério de alocação mássica na conversão da matéria-prima em fonte de energia. O GN é transportado por gasodutos, o petróleo por oleodutos e navios e o óleo de soja, em sua maior parte, por dutos industriais, modos de maior eficiência energética que o rodoviário, utilizado para o transporte da cana-de-açúcar e da fração do óleo de soja que alimenta a usina da Brasil Ecodiesel no Rio Grande do Sul. Adicionalmente, admite-se que uma pequena fração da massa da cana-de-açúcar, o equivalente a 85,4 l/tc, é transformada em etanol, enquanto para o petróleo, GN e grãos de soja¹³, a menos das pequenas perdas de processo, a matéria-prima é integralmente transformada em co-produtos comercializáveis.

Além de apresentar o menor consumo de energia total, comparável apenas com o observado para a opção (BD, SPBD) o transporte de GN utiliza exclusivamente energia renovável (hidrelétrica). Isso não ocorre para nenhuma das demais alternativas, onde uma parte entre 0% (EH, SPFF) e 14% da energia total é renovável.

Se comparado apenas para as alternativas para transporte individual, na base do fluxo considerado (kJ/pass.km) o consumo de energia total para a produção de etanol 3,7 vezes maior que para a gasolina C e 48 vezes maior que para o GN, porém, toda a energia consumida é biomassa renovável (bagaço de cana-de-açúcar). A maior parte da energia renovável observada na produção de gasolina C (99%) decorre da adição de etanol e o restante da utilização de energia hidrelétrica.

No que tange as alternativas para transporte coletivo, na base do fluxo considerado (kJ/pass.km) a produção de EMOS consome 1,4 vezes mais energia que a produção de biodiesel ou B2 e 10 vezes mais energia que a produção de GN

O processamento de GN apresenta um pequeno consumo de energia total mesmo se comparado à produção de gasolina C. Isto decorre das hipóteses adotadas no modelo de processamento do GN associado ao refino do petróleo, com pequena parte da energia e das emissões líquidas de CO₂ alocadas ao GN.

Das alternativas para transporte individual, o maior consumo de energia total na distribuição da fonte de energia ocorre para a alternativa (GNC, SPBC) e está associado à energia elétrica utilizada na compressão para abastecimento. Das alternativas para transporte coletivo o maior consumo de energia total na distribuição da fonte de energia ocorre para o par (BD, SPBD) em função da grande distância para transferência pelo modo rodoviário.

Os consumos de energia total para o transporte de matéria-prima e a distribuição da fonte de energia da alternativa (EH, SPFF) apresentam valores da mesma ordem, embora o último meso-estágio considere deslocamento muito maior. Este é mais um reflexo da relação mássica entre a cana-de-açúcar e o etanol que só fica claro considerando-se toda a cadeia de suprimento.

Das alternativas adequadas ao transporte individual, a alternativa (GC, SPGC) apresenta o melhor desempenho para o uso final, com consumo de energia total 10% menor que a alternativa (GNC, SPBC) e 20% menor que a alternativa (EH, SPFF). Das alternativas para transporte coletivo o

¹³ Gás e petróleo são processados em derivados de valor comercial não desprezíveis e os grãos de soja são transformados em óleo

par (GN, SPDG) apresentou o maior consumo, 10% maior que as alternativas (OD, SPOD) e (B2, SPB2), muito semelhantes, e 13% maior que a alternativa (BD, SPBD). Esta última, embora apresente consumo mássico (kg/pass.km) maior que as alternativas que utilizam óleo diesel ou B2, acabou apresentando menor consumo energético (kJ/pass.km), pois o poder calorífico adotado para o EMOS é um pouco mais de 10% menor que o adotado para o óleo diesel ou B2.

A parcela do etanol na gasolina C representa 38% de energia renovável na energia total da cadeia de suprimento da alternativa (GC, SPGC), percentual mais expressivo que os 18% obtido para o uso final e os 22% obtidos para o ciclo de vida. Constatação que só é possível por meio da análise do ciclo de vida.

Para o transporte individual, a alternativa (GNC, SPBC) é a que apresenta o menor consumo de energia total para o ciclo de vida, com desempenho semelhante à alternativa (GC, SPGC) e 38% melhor que a alternativa (EH, SPFF). Para o transporte coletivo, as melhores alternativas considerando o consumo de energia total em todo o ciclo de vida são (OD, SPOD) e (B2, SPB2), seguido de (GNC, SPDG) e (BD, SPBD).

Para o transporte individual, sob a ótica do consumo de energia total, a melhor alternativa seria (GNC, SPBC), seguida de (GC, SPGC), com desempenhos muito próximos. Porém, os seguintes aspectos devem ser considerados: a fração de etanol na gasolina C representa uma parcela importante de energia renovável em todo o seu ciclo de vida que não se verifica no GN, o modelo de ciclo de vida estabelecido para o GN associado ao petróleo privilegia esta alternativa no que se refere ao consumo de energia total e as incertezas nos dados para a distribuição do GN podem ter levado à subestimar o consumo de energia para este meso-estágio. Os dois últimos itens representam oportunidades de melhoria no presente estudo.

Os resultados obtidos representam a realidade brasileira limitada à abrangência do modelo. Esta situação privilegia as alternativas (GC, SPGC), (OD, SPOD), (B2, SPB2), (GNC, SPBC) e (GNC, SPDG) pela proximidade entre o local de produção da matéria-prima, em sua totalidade ou em parte, e o local de uso final. Tais resultados não devem ser adotados como médias nacionais, o que implicaria a determinação de outra abrangência para os modelos.

Para as alternativas (GC, SPGC), (OD, SPOD), (GNC, SPBC) e (GNC, SPDG) a cadeia de suprimento consome respectivamente 18%, 12%, 7% e 7% da energia total do ciclo de vida. Estes valores são comparáveis com os obtidos por IEA (1999), sendo de 13% a 21% para a

gasolina, de 8% a 12% para o óleo diesel e de 6% a 13% para o GN. No caso da alternativa (EH, SPFF), a cadeia de suprimento responde por 37% da energia total do ciclo de vida, valor bem inferior a faixa de 51% a 92% apresentada por IEA (1999), porém, considerando etanol produzido a partir de milho e beterraba. Para (BD, SPBD) este valor é de 23% que não é comparável com o valor publicado pelo IEA (1999) por se tratar de biodiesel produzido a partir do óleo de colza.

O aumento do consumo de energia total na alternativa (OD, SPOD) pela introdução de 2% de biodiesel é de cerca de 1%, porém, o aumento de energia renovável, pelo uso de hidroeletricidade é de 11%.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entende-se que os objetivos apresentados no item 2, sub-item 2.2 foram atingidos, tendo sido possível:

1. Apresentar uma análise de forma sistemática e crítica da cadeia de suprimento das fontes de energia para o transporte, conceitualmente apresentadas no item 3 e sistematizadas sob a ótica da ACV no item 5, Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, destacando a importância e a representatividade dos processos envolvidos com ênfase na atividade de transporte;
2. Elaborar modelos de cadeias de suprimento de fontes de energia para os transportes que considerem a realidade do Estado do Rio de Janeiro (Figuras 5.1, 5.2 e 5.3), envolvendo não apenas a vocação para a produção de derivados de petróleo e gás natural, como também os biocombustíveis, em particular o etanol;
3. Elaborar e disponibilizar de um banco de dados na forma de inventários de ciclo de vida para as cadeias de suprimento de fontes de energia para o transporte que considere as particularidades do Estado do Rio de Janeiro – conforme anexo eletrônico pasta Planilhas_ICV.

O procedimento sugerido apresenta aderência à técnica de ICV, estando alinhado a prática apresentada na norma (Figura 4.1) na literatura consultada (Tabela 4.1). A adoção de três níveis de profundidade na elaboração dos modelos de ciclo de vida (MCV), na forma de macro-estágios, meso-estágios e micro-estágios, permite a prática de refinamentos sucessivos, garantindo equivalência entre os níveis, o que representa uma contribuição no sentido de uma melhor estruturação de futuras aplicações da ACV para fontes de energia para transportes.

A associação de cada fonte de energia (cadeia de suprimento) a apenas um sistema de propulsão (uso final), racionaliza a coleta de dados e facilita a comparação dos resultados mantendo a referência com o universo de alternativas original. Adicionalmente, procurou-se estabelecer fases e etapas necessárias e suficientes à uma aplicação objetiva da técnica de ACV aplica à fontes de energia para transportes.

Os MCV (Figuras 5.1, 5.2 e 5.3) apresentados permitem a sua aplicação em qualquer tipo de atividade de transporte, bastando para isso que se caracterize adequadamente o uso final. Com isso destaca-se a robustez e flexibilidade do modelo em face de diferentes aplicações.

A aplicação do procedimento ratificou sua adequação e representa uma importante contribuição

para o desenvolvimento e divulgação de conhecimento no que se refere ao ciclo de vida de fontes de energia para o transporte em países em desenvolvimento, uma vez que considera dados representativos de uma parte da realidade brasileira. Os dados apresentados para todas as alternativas representam, até onde se tem conhecimento, estudo inédito.

Os comentários e conclusões decorrentes da aplicação encontram-se no item 5.5. Neste caso, a identificação da melhor fonte de energia para o transporte individual de passageiros depende dos aspectos que se pretende valorizar. Se considerado apenas o menor consumo de energia total, o uso de GNC e gasolina C, nesta ordem, são as melhores alternativas. Porém, sob a ótica do uso de energia renovável, o uso de etanol é imbatível. Se considerado o transporte coletivo de passageiros, o uso de óleo diesel ou B2 são as melhores alternativas, seguidos do uso de GNC e EMOS.

Os resultados também destacam a adequação do procedimento em identificar, ao longo do ciclo de vida de cada alternativa, aonde ocorrem vantagens específicas, em particular no uso de combustíveis renováveis oriundos da biomassa, opção praticada e interessante para a realidade brasileira.

Sempre que possível, fez-se a comparação dos resultados obtidos na aplicação com a literatura internacional, retificando os valores encontrados.

BIBLIOGRAFIA

- ABDETRAN (2000) Frota Nacional, Associação Brasileira dos DETRANS, www.abdetran.org.br
- ABNT (2001). NBR – ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ACIOLI, J, de L., 1994, *Fontes de Energia*, 1ª ed, Brasília, Editora Universidade de Brasília.
- ANFAVEA (2008). Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. www.anfavea.com.br/anuario2006/Cap02, 08/08/2008.
- ANP (2008). Dados da produção e consume de combustíveis. Agência Nacional do Petróleo. Rio de Janeiro, RJ.
- ANP, 2000, *Anuário Estatístico da Indústria Brasileira do Petróleo 1990-1999*, Rio de Janeiro, Agência Nacional do Petróleo.
- ANP, 2003a, *Anuário Estatístico da Indústria Brasileira do Petróleo 1993 – 2002*, Rio de Janeiro, Agência Nacional do Petróleo.
- ANP, 2003b, *Refino do petróleo*, In: <http://www.anp.gov.br/petro>, Rio de Janeiro, Agência Nacional do Petróleo, acesso em 25/03/2003
- Armstrong, A. P. e Akhurst, M. A. (2000) *Alternative Fuels: Well-to-Wheels Energy Use & CO₂ Comparisons*. BP Amoco, UK.
- ARMSTRONG, A. P. e AKHURST, M. A., 2000, *Alternative Fuels: Well-to-Wheels Energy Use & CO₂ Comparisons*, London, BP Amoco.
- ASIMOV, I, 1993, *Cronologia das Ciências e das Descobertas*, 1ª ed, Rio de Janeiro, Editora Civilização Brasileira.
- AUDUS, H.; “IEA Greenhouse Gas R&D Programme: Full Fuel Cycle Studies”, *Energy Conversion and Management*, Vol 37, Nos. 6-8, Elsevier Science Ltd., 1996.
- BECHTOLD, R. L., 1997, *Alternative fuels guidebook: properties, storage, dispensing, and vehicle facility modifications*. 1ª ed, Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc.
- BEER, T.; Grant T; Morgan, G.; Lapszewicz, J.; Anyon, P.; Edwards, J.; Nelson, P.; Watson, H. e Williams, D.; “Comparison of Transport Fuels: Life Cycle Emissions Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles”, *Final Report EV45A/2/F3C*, Australian Greenhouse Office, 2001.
- BENTLEY, R. W., 2002, “Global oil & gas depletion: an overview”, *Energy Policy* 30, pp. 189 – 205.
- BLANCO, J., 2004, “Identificação da rede de gasodutos da CEG”, *Comunicação pessoal*. Gerente de Desenvolvimento de Mercado GNV, Companhia Distribuidora de Gás do Rio de Janeiro – CEG, Rio de Janeiro.
- BOCKEY, D., 2004a, *Biodiesel production and marketing in Germany. The situation and perspective*. In: www.ufop.de, UFOP, Berlim, acesso em 16/05/2004.
- BOCKEY, D., 2004b, *The bioidesel market is growing – but the challenges too!* In: www.ufop.de, UFOP, Berlim, acesso em 16/05/2004.
- BOLDO, C., WAHNFRIED, C. e MASSAGARDI, M. A., 2001, *A experiência européia com RME. Efeitos no sistema de injeção*. Seminário Biodiesel, São Paulo, AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva.
- BOTELHO, B. S., 2002, *Novas tecnologias automotivas para a realidade dos combustíveis brasileiros*, Forum de debates sobre qualidade e uso de combustíveis, Rio de Janeiro, AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva.
- BOUSTEAD, I (1997). *Eco-Profiles of the European plastic Industry. Report # 15: Nylon 66*. Association of Plastic Manufacturers in Europe in Sheehan, J. et al (1998) *Life Cycle*

- Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in Urban Bus, Final Report, National Renewable Energy Laboratory, Golden Colorado, USA
- BOUWMAN, M.E. e Moll, H.C.; “Environmental Analyses of Land Transportation Systems in The Netherlands”, Transportation Research Part D, No. 179, Elsevier Science Ltd., 2002.
- Chehebe, J. R. B. (1998) *Análise do Ciclo de Vida de Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000*. Qualitymark Editora, Rio de Janeiro RJ.
- COELHO, S. T.; OLIVEIRA JR, S.; ZYLBERSZTAJN, D., 1997, “Thermoeconomic analysis of electricity cogeneration from sugarcane origin”. *Third Biomass Conference of the Americas*, v. II, pp. 1631-1640, Montreal, August 24-29.
- CONNEMANN, J. e FISCHER, J., 1998, “Biodiesel in Europe”, *International Liquid Biofuels Congress*, Curitiba.
- CTC, 2003, *Use of Energy in the production of cane, sugar and alcohol and green house gas emissions: present situation (2002) and future situations (cogeneration with BIG-GT)*. Centro de Tecnologia Copersucar, Piracicaba.
- Culaba, A. B. e Purvis, M. R. I.; “A Methodology for the Life Cycle and Sustainability Analysis of Manufacturing Processes”, *Journal of Cleaner Production*, Vol 7, Pag 435-445, Elsevier Science Ltd., 1999.
- D’AGOSTO, M. A. 2004, *Análise da eficiência da cadeia energética para as principais fontes de energia utilizadas em veículos rodoviários no Brasil*, Tese realizada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.) na COPPE/UFRJ.
- DECICCO, J e KLIESCH, J, 2003, *ACEE’S Green Book - The Environmental Guide to Cars & Trucks – Model Year 2003*, American Council for Energy-Efficiency Economy, Washington, DC.
- DECICCO, J; KLIESCH, J.; THOMAS, M., 2000, *ACEE’S Green Book - The Environmental Guide to Cars & Trucks – Model Year 2000*, American Council for Energy-Efficiency Economy, Washington, DC.
- DELUCCHI, M. A. (1993). Emissions of greenhouse gases from the use of transport fuels and electricity. Centre of Transportation Research, Energy System Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, ANL/ESD/TM-22 in Sheehan, J. et al (1998) *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in Urban Bus*, Final Report, National Renewable Energy Laboratory, Golden Colorado, USA
- DENATRAN (2001) *Anuário Estatístico de Acidentes de Trânsito 2001*, Ministério da Justiça, www.denatran.gov.br
- DI LASCIO, M. A.; ROSA, L. P.; MOLION, L. C. B., 1994, “Projeto de atendimento energético para comunidades isoladas da Amazônia”, In: COPPE/UFRJ, UNB, UFAL. Rio de Janeiro.
- DOBSON, H e BERSFORD, A, 1989, *Maritime Atlas of Words Ports and Shipping Places*, London, Lloyd’s of London Press Ltd.
- DOE, 2002, *Data and Statistics Tools*, In: www.ott.doe.gov, Office of Transportation Technology, U.S. Department of Energy, acesso em 12/09/2003.
- DUCASSÉ, P., 1961, *História das Técnicas*. 2ª ed, Lisboa, Publicações Europa-América.
- EBB, 2004, *Biodiesel News*, In: www.ebb-eu.org/stats.php, European Biodiesel Board, acesso em 15/06/2004.
- ERIKSSON, E.; Blinge, M. e Lövgren, G.; “Life Cycle Assessment of the Road Transport Sector”; *The Science of the Total Environment*, No.189/190, Elsevier Science B.V., 1996.
- FAIZ, A. et al., 1996, *Air Pollution from Motor Vehicles. Standards and Technologies for Controlling Emissions*, Washington, DC, The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank.
- FERRÉS, J. D., 2001, “Biodiesel: Produção e custos no Brasil”, In: *Anais do Seminário Biodiesel*. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo.

- FORSBERG, G.; "Biomass Energy Transport: Analysis of Bioenergy Transport Chains Using Life Cycle Inventory Method"; Biomass & Bioenergy, No.19, Elsevier Science Ltd, 2000.
- FURUHOLT, E.; "Life Cycle Assessment of Gasoline and Diesel", Ressources, Conservation and Recycling, No. 14, Elsevier Science B.V., 1995.
- GABINA, F. de C., 2004, "Dados sobre a frota de petroleiro da Transpetro e sua operação", *Comunicação pessoal*, engenheiro naval, FRONAPE – Frota Nacional de Petroleiros – GETEC, Rio de Janeiro.
- GÁSENERGIA, 2003, *Banco de mapas*, In: www.gasenergia.com.br, acesso em 25/03/2003.
- GASNET (2007).
- GASNET, 2003, *Mapa do GNV no Brasil*, In: www.gasnet.com.br, acesso em 25/03/2003.
- GEIPOT, 2001, *Anuário estatístico dos Transportes/2001*, Brasília, DF, Empresa Brasileira de Planejamento de Transporte – GEIPOT.
- GERRERO, L., 2003, "Álcool ou gasolina? Você decide no posto", *Revista 4 Rodas*, ano 43, nº 513, Editora Abril Cultural, São Paulo, pp. 36-41.
- GÔMARA, R., 2001, "Identificação das características de distribuição de GN para os postos de serviço", *Comunicação pessoal*, sócio da NPR, representante da Aspro GNV fabricante de compressores e dispensers para GNV, Rio de Janeiro.
- Hackney, J. e Neufville, R.; "Life Cycle Model of Alternative Fuel Vehicles: Emissions, Energy and Cost Trade-offs", *Transportation Research Part A*, No. 235, Elsevier Science Ltd., 2001.
- HANSSEN, O. J., 1998, "Environmental impacts of product systems in life cycle perspective: a survey of five product types based on life cycle assessments studies", *Journal of Cleaner Production*, 6, pp. 299 – 311.
- IANGV, 2003, *Latest international NGV Statistics*, In: <http://statistics.iangv.org/>, International Association on Natural gas Vehicles, acesso em 25/03/2003.
- IBGE (2002) Censo demográfico 2000, Dados estatísticos – população, www.ibge.gov.br.
- IBP (2007). Planejamento Estratégico do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel BASE TECNOLÓGICA. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- IEA (1999) *Automotive Fuels for the Future - The Search for Alternative*. International Energy Agency, Office of Energy Efficiency Technology and R&D,
- INFOENER, 2001, *Sistemas de informações energéticas*, In: www.infoener.iee.usp.br, acesso em 09/03/2003.
- ITOKAZU, T., 2003, "Brasil na era dos carros flex". *Engenharia Automotiva e Aeroespacial*. ano 3, nº 15, São Paulo, pp. 40-43.
- IVIG, 2001, "Produção de biodiesel a partir de óleos residuais", *Relatório Interno CDM-PDD-Biodiesel*, Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais. UFRJ, Rio de Janeiro.
- KADAM, K. L.; "Environmental Benefits on a Life Cycle Basis of Using Bagasse-derived Ethanol as a Gasoline Oxygenate in India", *Energy Policy*, No. 30, Elsevier Science Ltd., 2002.
- KHAN, F. I.; Natrajan B. R. e Revathi, P.; "GreenPro: A New Methodology for Cleaner and Greener Process Design", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, No. 14, pag 307-328, Elsevier Science Ltd., 2001.
- KHAN, F. I.; Sadiq, R. e Husain, T.; "GreenPro-I: A Risk-based Life Cycle Assessment and Decision Making Methodology for Process Plant Design", *Environmental Modelling & Software*, No. 17, pag 669-692, Elsevier Science Ltd., 2002.
- KING, L. E., 1994, "Statistical Analyses", *Manual of Transportation Engineering Studies - Appendix C*, Prentice Hall Inc, pp. 392-412.
- KNOEPFEL, I. H.; "A Framework for Environmental Impact Assessment of Long-distance Energy Transport Systems", *Energy*, Vol 21, No. 7/8, pp 693-702, Elsevier Science Ltd., 1996.

- KÖRBITZ, W., 2000, “New Markets for biodiesel in modern Common Rail diesel engines”, In: *ALTENER – Seminar*, University for Technology in Graz, Graz.
- KREITH, F.; West, R. E. e Isler, B. E.; “Legislative and Technical Perspectives for Advanced Ground Transportation Systems”, *Transportation Quarterly*, Vol 56, No. 1, Eno Transportation Foundation, Washington D.C., 2002
- LIMA, L. DA R. e MARCONDES, A. de A., 2002, *Álcool carburante. Uma estratégia brasileira*, 1ª ed., Curitiba, Editora de UFPR.
- LOVATELLI, C., 2001, “Situação do biodiesel no mundo”, In: *Anais do Seminário Biodiesel*, Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo.
- LOVATELLI, C., 2001, “Situação do biodiesel no mundo”, In: *Anais do Seminário Biodiesel*, Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo.
- MA, 2004, *Levantamento sistemático da produção agrícola. LSPA – 12/2004*, In: www.agricultura.gov.br, Ministério da Agricultura, acesso em 12/09/2004.
- MACCHI, S., 1991, “Overview on biodiesel utilisation for S+L+H tractor engines, In: *Proceedings of the conference “Engine and Environment – Which Fuel for the Future?”, 23-24 July 1991, Grazer Congress, Graz.*
- MACEDO, I. de C., 2003, “Características da produção de etanol nas usinas de São Paulo”, *Comunicação pessoal*. Professor da UNICAMP, Campinas, São Paulo.
- MARIANO, J. B., 2001, *Impactos Ambientais do Refino do Petróleo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- MAURICE, B.; Frischknecht, R.; CoelhoSchwartz, V. e Hungerbühler, K.; “Uncertainty Analysis in the Life Cycle Inventory. Application to the Production of Electricity with French Coal Power Plants”, *Journal of Cleaner Production*, Vol 8, Pag 95-108, Elsevier Science Ltd., 2000.
- MELLOR, W.; Wright, E.; Clift, R.; Azapagic, A. e Stevens, G.; “A Mathematical Model and Decision-support Framework for Material Recovery, Recycling and Cascaded Use”, *chemical Engineering Science*, Vol 57, pag 4697-4713, Elsevier Science Ltd., 2002.
- MENKE, D. M.; Davis, G. A. e Vigon, B. W.; “Evaluation of Life Cycle Assessment Tools”, Relatório Final, Center for Clean Products and Clean Technologies, The University of Tennessee, 1996.
- MILDENBERGER, U. e Khare, A.; “Planning for an Environment-friendly Car”, *Technovation* No. 20, Elsevier Science Ltd., 2000.
- MME (2002) Balanço Energético Nacional BEM 2002, Departamento Nacional de Política Energética, Coordenação Geral de Informações Energéticas, Ministério das Minas e Energia, Brasília, DF, www.mme.gov.br
- MOREIRA, J. R. e GOLDEMBERG, J., 2003, *The alcohol program*. Ministério da Ciência e Tecnologia, Convention on Climate Change, In: www.mct.gov.br/clima/ingles/comunic_old/alcool.htm, acesso em 21/03/2003.
- NIGRO, F. E. B., 2001, “A experiência brasileira: tecnologia e impacto ambiental”, In: *Anais do Seminário Biodiesel*. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo.
- NOGUEIRA, L. A.H e LORA. E. E. S., 2001, *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- OBERT, E. F., 1971, *Motores de Combustão Interna*, 4ª ed., Porto Alegre, Editora Globo.
- OECD/IEA, 1993, *Cars and Climate Change*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Head of Publication Service, Paris.
- OLSEN, S. I.; Christensen, F. M.; Hauschild, M.; Pedersen, F.; Larsen, H. F. e Torslov, J.; “Life Cycle Impact Assessment and Risk Assessment of Chemicals – A Methodological Comparison”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol 21, pag 385-404, Elsevier Science Inc., 2001.
- OTA (1992) *Green Products by Design: Choices for a Cleaner Environment*. Office of Technology Assessment, U.S. Congress, Washington, DC.

- PARENTE, E. J. S., 2003, *Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado*, 1ª ed., Fortaleza, Tecbio.
- PDT-RJ, 2006. Plano Diretor de Transportes da Cidade do Rio de Janeiro, Secretaria Municipal de Transportes, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.
- PETROBRAS, 2000, *O petróleo e a Petrobras em perguntas e respostas*, Petrobras, Serviço de Comunicação Institucional, Rio de Janeiro.
- PETROBRAS-CONPET, 2003, *Relatório Sobre Conservação de Energia no Sistema Petrobras*, C-CONPET, Petrobras, Rio de Janeiro, RJ.
- PINTO *et al.*, 2001, *Caracterização do biodiesel para uso automotivo. Anais do Seminário Biodiesel*. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo, SP.
- POULALLION, P, 1980, *Manual do gás Natural*, 2ª ed, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- POULTON M. L., 1994a, *Alternative Fuels for Road Vehicles*, Computational Mechanics Publications, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton.
- RIBEIRO, S. K. *et al*, 2002, *Barreiras na implantação de alternativas energéticas para o transporte rodoviário no Brasil*, Rio de Janeiro, Centro Clima, COPPE/UFRJ.
- RIBEIRO, S. K. *et al.*, 2001a, *Estudo das vantagens ambientais do gás natural veicular: o caso do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, Centro Clima, COPPE/UFRJ.
- RILEY, R. Q., 1994, *Alternative cars in the 21st century. A new personal transportation paradigm*. Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc.
- RIO OIL & GAS, 2002, “Strategies for World Energy”, In: “Official publication of the 17th World Petroleum Congress”, Rio de Janeiro, pp. 158 – 159.
- RISTINEN, R. A. e KRAUSHAAR, J. J., 1999, *Energy and the environment*, John Willey & Sons, Inc.
- RUBIN, E. S (2001) *Introduction to Engineering and the Environment*. McGraw-Hill International Edition, Environmental Engineering Series, NY, USA.
- SALAMA, C., 1982, *Estudo da Viabilidade de Utilização de Óleos Vegetais em Substituição ao Óleo Diesel*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- SANTOS, J. A., 2000, *Óleo Diesel*, Informativo sobre produtos Petrobras, Petrobras S. A., Rio de Janeiro.
- SBPC, 2000, “A cadeia do petróleo: das ‘armadilhas’ do subsolo a bilhões de consumidores”, *Ciência Hoje*, vol. 28, nº 163, pp.2-7.
- SEINPE, 2000, *Balanco Energético do Estado do Rio de Janeiro 1980 – 1999*, Rio de Janeiro, Secretaria de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo.
- SHEEHAN, J. *et al* (1998) *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in Urban Bus*, Final Report, National Renewable Energy Laboratory, Golden Colorado, USA
- SILVA, I. B., 2001, “Emulsões aquosas de diesel. Uma solução de urgência para mitigar os efeitos das emissões na saúde humana”, In: *Seminário: Mercado de combustíveis no Brasil. Alternativas energéticas e opções tecnológicas no contexto de mudanças climáticas*, AEA, Brasília, DF.
- SILVEIRA, G. M. (1991). *As máquinas para colheita e transportes*. 1ª ed, São Paulo, Editora Globo S.A.
- SMTTr (2006). *Dados de desempenho das linhas de ônibus*. Secretaria Municipal de Transportes Urbanos, Rio de Janeiro, RJ.
- SOBRINHO, C. A., 1999, “Análise Comparativa do Desempenho de Compressores de Gás Natural; Características Técnico Econômicas”, In: *7th International Seminar on Natural Gas and LPG*, Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Petróleo.
- Spath, P. M. e Mann, M. K.; “Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System”, Relatório NREL/TP-570-27715, National Renewable Energy Laboratory, 2000.

- TECPAR, 2000, *Utilização do biodiesel B20 em Curitiba*, Relatório Final do Projeto, Instituto de Tecnologia do Paraná, Curitiba.
- THOMAS, J. E., 2001, *Fundamentos de engenharia de petróleo*, Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda.
- TRANSPETRO, 2002, *Relatório Anual 2001*, Rio de Janeiro, Transpetro.
- U.S.DOE, 2001, *Charting the Course for AFV Market Development and Sustainable Clean Cities Coalitions*, U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington D.C.
- UDOP (2008), Acompanhamento da produção de álcool –, Usinas e Destilarias do Oeste Paulista, acesso em 21/07/2008.
- UDOP, 2003, *Processo de Fabricação de Álcool Etílico Hidratado Carburante*, In: www.udop.com.br/historico/materiais/fabr_alcool_etilico_hidratado_carburante.htm, Usinas e Destilarias do Oeste Paulista, acesso em 31/03/2003.
- UFOP, 2004, *Biodiesel – Flowerpower. Facts, Arguments, Tips*. 2nd ed., issue 1/2004, Belin, UFOP, www.ufop.de, acesso em 15/06/2004.
- VERSCHOOR, A. H. e REIJNDERS, L., 1999, “The use of life cycle methods by seven major companies”, *Journal of Cleaner Production*, 7, pp. 375 – 382.
- WALTERS, M. H. L., 1992, *Road Vehicle Fuel Economy. State of the art review / 3.*, London, Transport and Road Reserach Laboratory, Department of Transport.
- WANG, M. (2000). GREET 1.5a. Changes from GREET 1.5. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, USA.
- WANG, M.; Saricks, C. e Wu, M.; “Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced form U.S. Midwest Corn”, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, 1997.
- WEISS, M.A.; Heywood, J. B.; Schafer, A. e Natarajan, V. K.; “Comparative Assessment of Fuel Cell Cars”, Report MIT LFEE 2003-001-RP, Laboratory for Energy and the Environment, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- WISER, W. H., 2000, *Energy Resources. Occurrence, production, conversion and use*, New York, Springer.
- WRIGHT, K., 1990, “The shape of thinks to go. Automakers turn to high technology in the search for car that is clean, safe and fun”, *Scientific American*, vol. 262, n° 5, pp. 58 – 67.

ANEXO 5.I

Tabela A.5.I.1. Processamento de petróleo e vendas de combustíveis derivados de petróleo												
Mês	Vendas de derivados de petróleo [bep]								Processamento na REDUC [bep]			
	Gasolina automotiva	Gasolina aviação	GLP	Óleo combustível	Óleo diesel	QAV	Querozene iluminante	Totais	Nacional	Importado	Outras	Totais
Jan	720.428	531	331.234	28.400	1.220.130	412.041	607	2.713.370	4.007.359	3.071.847	224.305	7.303.511
Fev	642.528	583	326.261	82.381	1.145.611	367.359	615	2.565.338	3.728.724	2.931.562	93.028	6.753.315
Mar	707.930	630	333.665	63.756	1.287.625	398.933	836	2.793.376	3.810.467	3.206.994	65.159	7.082.619
Abr	698.950	539	346.486	33.138	1.253.124	373.980	534	2.706.751	3.551.784	2.991.183	59.316	6.602.283
Mai	689.016	520	366.743	29.342	1.319.315	386.569	732	2.792.236	3.270.465	3.270.142	269.747	6.810.354
Jun	665.073	520	359.157	23.429	1.353.903	373.373	511	2.775.967	3.767.492	3.032.311	156.062	6.955.866
Totais	4.123.925	3.322	2.063.547	260.446	7.579.708	2.312.254	3.835	16.347.038	22.136.290	18.504.040	867.618	41.507.948

Tabela A.5.I.2. Disponibilidade e vendas de GNC			
Mês	Disponibilidade [mil m3]	Vendas Totais [mil m3]	Vendas GNV [mil m3]
Jan	435.671	12.935	3.789
Fev	390.270	17.317	3.813
Mar	423.742	17.913	3.855
Abr	417.093	17.772	3.752
Mai	422.809	16.606	3.851
Jun	414.252	ND	ND
Totais	2.503.837	82.542	19.061

Tabela A.5.I.3. Produção e vendas de etanol - anidro e hidratado - Rio de Janeiro						
Ano	Produção [m3]			Vendas [m3]		
	Etanol anidro	Etanol hidratado	Total	Etanol anidro	Etanol hidratado	Total
2001	52.999	39.597	92.596	398.776	155.572	554.348
2002	23.960	40.832	64.792	443.685	157.567	601.252
2003	44.499	64.543	109.042	397.034	98.178	495.212
2004	39.621	68.313	107.934	415.839	109.817	525.655
2005	61.230	101.644	162.874	391.347	180.528	571.875
2006	50.935	84.601	135.536	373.681	224.255	597.936
2007	29.429	58.026	87.455	367.909	359.404	727.313
Totais	302.673	457.556	760.229	2.788.270	1.285.321	4.073.591

ANEXO 5.II

Tabela A.5.II.1. Distâncias entre as usinas/destilarias de etanol e a BADUC.

Destino		BADUC		
N	Região de Origem	Volume de Produção Safrá 2000/2001 [m ³]	Distância [km]	Distância ponderada
1	Andradina	171710	1065	25,66
2	Araçatuba	235709	927	30,68
3	Araraquara	356596	658	32,95
4	Assis	412100	847	48,98
5	Avaré	42943	709	4,27
6	Barretos	592946	706	58,79
7	Bauru	25899	732	2,66
8	Botucatu	39174	638	3,51
9	Campinas	0	464	0,00
10	Catanduva	518179	771	56,07
11	Dracena	97894	1007	13,84
12	Fernandópolis	43172	925	5,61
13	Franca	143339	619	12,46
14	General Salgado	136359	925	17,71
15	Itapetininga	24142	545	1,85
16	Jaboticabal	416927	728	42,62
17	Jaú	842030	650	76,87
18	Limeira	437323	516	31,70
19	Lins	115083	840	13,57
20	Mogi Mirim	49488	516	3,59
21	Orlândia	437888	622	38,25
22	Ourinhos	171896	754	18,20
23	Piracicaba	342624	534	25,70
24	Presidente Prudente	25421	968	3,46
25	Presidente Venceslau	41263	1014	5,87
26	Ribeirão Preto	1136564	576	91,95
27	S. João da Boa Vista	47680	603	4,04
28	S. José do Rio Preto	44101	825	5,11
29	Sorocaba	19835	487	1,36
30	Tupã	78469	887	9,77
31	Votuporanga	78144	900	9,88
			Média ponderada	697
			Desvio padrão	23,7
			Intervalo de variação	0,05

Fonte: elaboração própria a partir de UDOP (2004) e QUATRO RODAS (2000).

ANEXO 5.III

Tabela A.5.III.1. Balanço de produção e consumo de biodiesel por estado produtor.

Mês	Produção [m3]										
	Bahia	Ceará	Goiás	Mato Grosso	Pará	Piauí	São Paulo	Tocantins	Rio Grande do Sul	Rondônia	Maranhão
Jan	10.475	5.069	16.253	12.045	128	0	8.299	3.144	15.240	0	5.073
Fev	6.623	4.824	19.101	12.214	197	0	8.757	4.177	13.080	32	6.899
Mar	7.082	0	17.672	15.935	162	0	8.028	2.673	5.832	0	4.438
Abr	2.873	0	19.639	17.064	158	364	4.614	307	16.557	4	604
Mai	1.822	0	19.579	21.521	305	0	7.673	0	22.620	0	2.627
Jun	2.764	1.238	21.733	17.533	0	2.304	7.854	0	28.740	0	1.883
Totais	31.640	11.130	113.978	96.312	951	2.668	45.226	10.302	102.069	36	21.524

Mês	Vendas de óleo diesel [m3]										
	Bahia	Ceará	Goiás	Mato Grosso	Pará	Piauí	São Paulo	Tocantins	Rio Grande do Sul	Rondônia	Maranhão
Jan	267.232	68.602	135.222	111.585	119.716	34.904	726.791	43.295	203.708	45.304	73.090
Fev	244.621	66.326	153.315	157.394	115.253	31.673	732.878	41.928	202.665	46.343	65.738
Mar	241.917	63.635	167.216	180.564	112.021	31.422	800.694	44.566	246.108	48.344	63.265
Abr	207.979	55.607	163.869	148.303	113.898	29.560	864.792	48.092	273.451	52.186	67.555
Mai	207.746	60.838	161.598	141.857	118.384	33.224	906.088	49.396	235.859	54.811	73.009
Jun	204.709	66.038	170.128	162.809	127.218	34.014	948.744	50.410	229.201	55.401	70.451
Totais	1.374.203	381.045	951.347	902.511	706.490	194.797	4.979.988	277.687	1.390.992	302.389	413.108

2%

Mês	Fração de biodiesel - 2% das vendas de óleo diesel - [m3]										
	Bahia	Ceará	Goiás	Mato Grosso	Pará	Piauí	São Paulo	Tocantins	Rio Grande do Sul	Rondônia	Maranhão
Jan	5.345	1.372	2.704	2.232	2.394	698	14.536	866	4.074	906	1.462
Fev	4.892	1.327	3.066	3.148	2.305	633	14.658	839	4.053	927	1.315
Mar	4.838	1.273	3.344	3.611	2.240	628	16.014	891	4.922	967	1.265
Abr	4.160	1.112	3.277	2.966	2.278	591	17.296	962	5.469	1.044	1.351
Mai	4.155	1.217	3.232	2.837	2.368	664	18.122	988	4.717	1.096	1.460
Jun	4.094	1.321	3.403	3.256	2.544	680	18.975	1.008	4.584	1.108	1.409
Totais	27.484	7.621	19.027	18.050	14.130	3.896	99.600	5.554	27.820	6.048	8.262

Mês	Balanço produção-consumo [m3]										
	Bahia	Ceará	Goiás	Mato Grosso	Pará	Piauí	São Paulo	Tocantins	Rio Grande do Sul	Rondônia	Maranhão
Jan	5.130	3.697	13.548	9.813	(2.266)	(698)	(6.237)	2.279	11.166	(906)	3.611
Fev	1.731	3.497	16.035	9.066	(2.108)	(633)	(5.901)	3.339	9.026	(895)	5.585
Mar	2.244	(1.273)	14.328	12.324	(2.078)	(628)	(7.986)	1.782	909	(967)	3.173
Abr	(1.287)	(1.112)	16.361	14.098	(2.120)	(227)	(12.682)	(655)	11.088	(1.039)	(747)
Mai	(2.333)	(1.217)	16.347	18.684	(2.062)	(664)	(10.449)	(988)	17.903	(1.096)	1.167
Jun	(1.330)	(83)	18.331	14.277	(2.544)	1.623	(11.120)	(1.008)	24.156	(1.108)	474
Totais	4.156	3.509	94.951	78.262	(13.179)	(1.228)	(54.374)	4.748	74.249	(6.012)	13.262

Tabela A.5.III.2. Divisão da produção por estado com oferta líquida de biodiesel.

Mês	Goiás				Mato Grosso						Rio Grande do Sul				
	Granól Anápolis	Caramuru	Barralcool	Coami	Araguassu	Cooperbio	ADM	Biocamp	Cooperfelig	Friagil	Coomisa	Oleoplan	Brasil Ecodiesel Rosário do Sul	BSBios	Granól Caixoeira do Sul
Jan	9.008	7.244	219	15	2	196	10.134	285	0	1.194	0	5.593	4.277	5.370	0
Fev	10.516	8.585	0	0	0	28	7.909	125	45	4.107	0	5.306	6.689	1.085	0
Mar	9.609	8.064	0	0	0	0	11.755	759	49	3.371	0	2.308	3.524	0	0
Abr	11.337	8.302	0	0	0	0	10.522	1.396	27	5.119	0	3.633	3.212	4.130	5.581
Mai	10.557	9.022	1.761	0	0	0	11.954	855	25	6.927	0	5.289	2.998	8.167	6.166
Jun	12.419	9.315	3.376	0	0	0	14.082	0	66	0	10	8.137	1.780	9.739	9.084
Totais	63.447	50.531	5.356	15	2	224	66.357	3.419	211	20.719	10	30.266	22.481	28.491	20.832

Distâncias das usinas de produção de biodiesel até a base de armazenamento de combustíveis em de Duque de Caxias (DC) – BADUC.

1) Goiás:

Fabrica Granol- Anapólis = 1.285 km ou aproximado 15 horas e 38 min. de DC.

Fabrica Caramuru- São Simão = 1.296 km ou aprox. 15 horas e 24 min. de DC.

2) Mato Grosso:

Fabrica ADM- Rondonópolis = 1.769 km ou aprox. 20 horas e 33 min. de DC.

3) Rio Grande do Sul:

Fabrica Oleoplan- Veranópolis = 1.411 km ou aprox. 16 hora e 12 min. de DC.

Fábrica Brasil Ecodiesel- Rosário do Sul = 1.813 km ou 21 horas e 39 min. de DC

Fábrica BS Bios- Passo Fundo = 1.385 km ou 16 horas e 1 min. aprox. de DC.

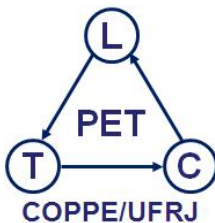
Fábrica Granol - Cachoeiro do Sul = 1.663 km ou 19 horas e 48 min. de DC.

INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV) COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA A LOGÍSTICA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE.

O CASO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO



**Programa de Engenharia de Transportes/COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia
Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H, sala 106, Ilha do Fundão
Rio de Janeiro, RJ, CEP.: 21941-914**



**Laboratório de Transporte de Carga/PET/COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia
Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H, sala 117, Gabinete 2,
Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, CEP.: 21941-914**