

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA CADEIA ENERGÉTICA PARA AS PRINCIPAIS  
FONTES DE ENERGIA UTILIZADAS EM VEÍCULOS RODOVIÁRIOS NO  
BRASIL

Márcio de Almeida D'Agosto

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Suzana Kahn Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.

---

Prof. Márcio Peixoto de Sequeira Santos, Ph.D.

---

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira, D.Sc.

---

Prof. Isaias de Carvalho Macedo, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2004

D'AGOSTO, MÁRCIO DE ALMEIDA

Análise da Eficiência da Cadeia Energética  
para as Principais Fontes de Energia Utilizadas  
em Veículos Rodoviários no Brasil [Rio de  
Janeiro] 2004

XIX, 259p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,  
Engenharia de Transporte, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Análise de Ciclo de Vida

2. Eficiência Energética

3. Transporte Rodoviário

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*A todos os que me têm incentivado.  
Aos meus verdadeiros amigos.  
A meu pai, que não mais se encontra entre nós.  
A Nícia e Lísia,  
Que nestes anos de convivência têm sintetizado  
todo o apoio de que necessito.*

## AGRADECIMENTOS

Ao corpo docente do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ por ter possibilitado minha participação no Curso de Doutorado e pela convivência profissional, colaboração e transmissão de ensinamentos sem os quais não poderia ter realizado este trabalho. Em particular a Professora Suzana Kahn Ribeiro, pelo apoio e orientação ao longo de todo o curso e particularmente no desenvolvimento da tese, revisão do texto final e participação na banca examinadora.

Aos Professores Márcio Peixoto de Sequeira Santos, Luiz Pinguelli Rosa, Luiz Augusto Horta Nogueira e Isaias de Carvalho Macedo, por aceitarem avaliar o trabalho e participar da banca examinadora.

Aos funcionários do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ e aos meus colegas de curso, em particular à Jane Corrêa de Souza, secretária do Programa, pelo apoio e convivência ao longo destes quase cinco anos de trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ pelo suporte financeiro durante os quatro primeiros anos de desenvolvimento desta tese.

A meu querido pai, Emyr D'Agosto, e minha muito amada mãe, Nícia Celis, pois tenho certeza que sem a educação, formação profissional e apoio que me proporcionaram jamais teria obtido sucesso nesta empreitada.

A minha adorada esposa, Lísia Carla, pelo apoio incondicional, estímulo, amor, grande amizade e companheirismo ao longo de todos estes anos de intenso trabalho.

A todos aqueles que colaboraram com sugestões, dados e informações, possibilitando a conclusão deste trabalho.

Resumo de Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA CADEIA ENERGÉTICA PARA AS PRINCIPAIS  
FONTES DE ENERGIA UTILIZADAS EM VEÍCULOS RODOVIÁRIOS NO  
BRASIL

Márcio de Almeida D'Agosto

Novembro/2004

Orientadora: Suzana Kahn Ribeiro

Programa: Engenharia de Transporte

Este trabalho tem como objetivo específico a análise comparativa de alternativas de fontes de energia para o transporte rodoviário por meio de um procedimento que leve em consideração toda a cadeia de suprimento e uso final de cada alternativa sob a óptica da eficiência de seus processos, em particular a eficiência energética. Este procedimento desenvolvido com base na ferramenta de análise de ciclo de vida (ACV), em particular suas duas primeiras fases: objetivo e escopo e análise do inventário. Como parte do procedimento propõe-se um modelo de ciclo de vida para as fontes de energia para o transporte rodoviário elaborado segundo estrutura modular capaz de admitir refinamentos sucessivos. Sua aplicação se dá na análise comparativa dos ciclos de vida da gasolina C, óleo diesel, álcool etílico hidratado combustível (AEHC), gás natural comprimido (GNC) e biodiesel (éster metílico de óleo de soja), considerando o seu uso final no transporte urbano no Município do Rio de Janeiro. Os resultados permitem que se identifique as vantagens no uso de combustíveis renováveis oriundos da biomassa, opção particularmente interessante para a realidade brasileira.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF ENERGY CHAIN EFFICIENCY FOR THE MAIN ENERGY  
SOURCES USED IN ROADWAY VEHICLES IN BRAZIL

Márcio de Almeida D'Agosto

November/2004

Advisor: Suzana Kahn Ribeiro

Department: Transportation Engineering

This work has as specific objective the comparative analysis of roadway transport fuels by means of a procedure that considers the whole supply chain and final use of each alternative under the optical of the efficiency of its processes, in particular the energy efficiency. The procedure uses life cycle assessment (LCA) as its main tools in particular its first two phase's goal and scope and inventory analysis. As part of the procedure a life cycle model for roadway transport fuels is proposed. This model is a modulated framework that admits successive refinements. The procedure is applied in the comparative analysis of the life cycle of gasoline, diesel oil, ethanol from sugar cane, compressed natural gas (CNG) and biodiesel (soybean oil methyl ester), considering its use in the urban traffic of Rio de Janeiro. The results allow identifying the advantages in the use of renewable fuels from biomass, particularly interesting option for the Brazilian reality.

## ÍNDICE

GLOSSÁRIO.....	XVII
 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	 1
1.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2.OBJETIVO E JUSTIFICATIVA .....	6
1.3.ESTRUTURA DA TESE .....	7
 CAPÍTULO 2 – TRANSPORTE RODOVIÁRIO E USO DE ENERGIA.....	 9
2.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	9
2.2.PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE E USO DE ENERGIA.....	9
2.3.DIMENSÕES DO USO DE ENERGIA NO TRANSPORTE.....	13
2.4.USO FINAL DE ENERGIA NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO .....	15
2.4.1.Demanda por energia no transporte rodoviário .....	16
2.4.2.Oferta de energia no transporte rodoviário .....	18
2.4.3.Modelo de uso final de energia no transporte rodoviário .....	21
 CAPÍTULO 3 – FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO..	 26
3.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	26
3.2.APRESENTAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	26
3.2.1.As Fontes de energia convencionais .....	32
3.2.1.1.Cadeia de suprimento e uso final.....	36
3.2.1.2.Análise da cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia convencionais .....	44
3.2.2. O gás natural (GN).....	45
3.2.2.1.Cadeia de suprimento e uso final.....	49
3.2.2.2.Análise da cadeia de suprimento e uso final do GNC .....	59
3.2.3. O etanol.....	60
3.2.3.1.Cadeia de suprimento e uso final.....	63
3.2.3.2.Análise da cadeia de suprimento e uso final do etanol.....	72
3.2.4.O Biodiesel.....	74
3.2.4.1.Cadeia de suprimento e uso final.....	77

3.2.4.2. Análise da cadeia de suprimento e uso final do biodiesel .....	88
<b>CAPÍTULO 4 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ECOEFICIÊNCIA .....</b>	<b>91</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	91
4.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM PROCESSO .....	91
4.3. ECOEFICIÊNCIA .....	94
4.4. APLICAÇÃO DO CONCEITO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA À CADEIA DE SUPRIMENTO E USO FINAL DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO .....	99
4.4.1. Cadeia de suprimento .....	99
4.4.2. Uso final .....	106
<b>CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE CICLO DE VIDA .....</b>	<b>111</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	111
5.2. O CONCEITO DE ACV .....	111
5.2.1. Fase 1 - Objetivo e escopo .....	115
5.2.2. Fase 2 - Análise do inventário .....	119
5.2.3. Fase 3 - Avaliação de impactos .....	121
5.2.4. Fase 4 - Interpretação .....	124
5.3. ACV APLICADA AS FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO .....	125
<b>CAPÍTULO 6 – PROCEDIMENTO DE ANÁLISE COMPARATIVA DE FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO .....</b>	<b>131</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	131
6.2. ESTRUTURA DO PROCEDIMENTO .....	131
6.2.1. Fase 1 – Objetivo, função e escopo .....	131
Etapa 1 – Escopo – Abrangência da aplicação e caracterização das alternativas. .....	132
Etapa 2 – Escopo – Dimensões da aplicação .....	134
6.2.2. Fase 2 – Inventário de Ciclo de Vida (ICV) .....	137
Etapa 1 – Coleta de dados .....	137
Etapa 2 – Avaliação da qualidade dos dados .....	138
6.2.3. Fase 3 – Análise comparativa dos resultados .....	140

6.3.APLICAÇÃO DO MODELO DE CICLO DE VIDA À FONTES DE ENERGIA SELECIONADAS.....	141
6.3.1.Gasolina e óleo diesel derivados de petróleo.....	142
6.3.2.Gas natural comprimido.....	144
6.3.3.Biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis .....	146
 CAPÍTULO 7 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE COMPARATIVA DE FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO .....	 149
7.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	149
7.2.FASE 1 – OBJETIVO, FUNÇÃO E ESCOPO.....	149
7.2.1.Etapa 1 – Escopo – Abrangência da aplicação e caracterização das alternativas.....	150
7.2.2.Etapa 2 – Escopo – Dimensões da aplicação.....	154
7.3.FASE 2 – INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA (ICV).....	156
7.3.1.Etapa 1 – Coleta de dados .....	157
Gasolina C e óleo diesel .....	158
Gás natural comprimido .....	177
Álcool etílico hidratado combustível (AEHC) e álcool etílico anidro combustível (AEAC).....	184
Biodiesel - éster metílico de óleo de soja (EMOS) .....	194
Estágio de uso final.....	207
7.3.2.Etapa 2 – Avaliação da qualidade dos dados .....	210
7.4.FASE 3 – ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	216
 CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	 235
8.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	235
8.2.CONCLUSÕES.....	235
8.3.RECOMENDAÇÕES .....	240
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA .....	 242
 ANEXO 7.1 – FATORES DE CONVERSÃO ADOTADOS PARA OS INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA.....	 252

ANEXO 7.2 – DISTÂNCIAS ESTIMADAS PARA DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS.....	254
ANEXO 7.3 – COLETA DE DADOS PARA OS SISTEMAS DE PROPULSÃO.....	257

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.Evolução dos deslocamentos por modo de transporte no mundo. ....	2
Figura 1.2.Evolução do volume de tráfego mundial. ....	2
Figura 2.1.Estrutura de procedimentos para o planejamento de transportes sob a ótica da redução do consumo de energia. ....	10
Figura 2.2.Consumo de energia por alguns modos de transporte terrestres selecionados. ....	11
Figura 2.3.Síntese das dimensões do uso de energia no transporte. ....	15
Figura 2.4.Representação esquemática de forças agindo em um automóvel que trafega com aceleração constante no plano. ....	16
Figura 2.5.Sistemas de propulsão para veículos rodoviários.....	20
Figura 2.6.Sistemas de conversão e transmissão de energia nos veículos rodoviários. ...	20
Figura 2.7.Fluxograma para redução do consumo de energia no transporte rodoviário. ...	23
Figura 3.1.Evolução do consumo de gasolina e óleo diesel no Brasil.....	34
Figura 3.2.Esquema básico de refino de petróleo.....	40
Figura 3.3.Cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia convencionais.....	44
Figura 3.4.Esquema básico de um posto de serviço de gás natural veicular. ....	52
Figura 3.5.Opções de utilização do GNC como combustível automotivo. ....	54
Figura 3.6.Exemplo de dispositivo de conversão típico para automóvel. ....	55
Figura 3.7.Cadeia de suprimento e uso final do GNC.....	60
Figura 3.8.Cadeia de suprimento e uso final do etanol. ....	73
Figura 3.9.Processo de produção de biodiesel.....	81
Figura 3.10.Cadeia de suprimento e uso final de biodiesel. ....	89
Figura 4.1.Descrição esquemática de um processo. ....	93
Figura 5.1.Estágios do ciclo de vida.....	113
Figura 5.2.Fases da ACV segundo a norma NBR ISO 14.040.....	115
Figura 5.3.Modelo de sistema de produto destacando seus elementos. ....	117
Figura 5.4.Elementos da avaliação de impactos.....	122

Figura 5.5.Relação entre os elementos da fase de interpretação e as demais fases da ACV. ....	124
Figura 6.1. Matriz de Alternativas de Ciclos de Vida (MACV) genérica. ....	133
Figura 6.2.Níveis de detalhamento do modelo de ciclo de vida. ....	134
Figura 6.3.Modelo de ciclo de vida para as fontes de energia para o transporte rodoviário. ....	136
Figura 6.4.Processo de avaliação da qualidade dos dados. ....	139
Figura 6.5.Síntese do procedimento para análise comparativa das alternativas de fonte de energia para o transporte rodoviário. ....	140
Figura 6.6.Modelo de ciclo de vida para gasolina e óleo diesel derivados de petróleo. ....	142
Figura 6.7.Modelo de ciclo de vida para o gás natural comprimido. ....	145
Figura 6.8.Modelo de ciclo de vida para os biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis. ....	146
Figura 6.9.Derivação do modelo de ciclo de vida proposto para os biocombustíveis. ....	147
Figura 7.1.Matriz de Alternativas de Ciclo de Vida (MACV) da aplicação. ....	153
Figura 7.2.Ciclo de vida da gasolina C e do óleo diesel derivados do petróleo. ....	154
Figura 7.3.Ciclo de vida do gás natural comprimido. ....	155
Figura 7.4.Ciclo de vida do AEHC e do AEAC. ....	155
Figura 7.5.Ciclo de vida do biodiesel (éster metílico de óleo de soja - EMOS). ....	156
Figura 7.6.Perfil de processamento da REDUC. ....	159
Figura 7.7.Suprimento de petróleo para a REDUC, ano base 2002. ....	160
Figura 7.8.Percentuais de consumo de energia total e emissão de CO <sub>2</sub> , combustíveis fósseis. ....	217
Figura 7.9.Contribuição líquida do AEAC nas emissões de CO <sub>2</sub> , ciclo de vida da gasolina C. ....	218
Figura 7.10. Percentuais de consumo de energia total e emissão de CO <sub>2</sub> , biocombustíveis. ....	220
Figura 7.11. Percentual de energia renovável no ciclo de vida de cada alternativa. ....	222
Figura 7.12.Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC. ....	224
Figura 7.13.Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC. ....	226

Figura 7.14. Emissão de CO <sub>2</sub> , meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC. ....	227
Figura 7.15. Emissão de CO <sub>2</sub> , macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC. ....	228
Figura 7.16. Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCD, SPH com uso de óleo diesel e biodiesel. ....	228
Figura 7.17. Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCD, SPH com uso de óleo diesel e biodiesel. ....	230
Figura 7.18. Emissão de CO <sub>2</sub> , meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCD, SPCH com uso de óleo diesel e biodiesel. ....	230
Figura 7.19. Emissão de CO <sub>2</sub> , macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCD, SPCH com uso de óleo diesel e biodiesel. ....	231
Figura 7.20. Eficiência energética, alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC. ....	232
Figura 7.21. Eficiência energética, alternativas SPCD, SPH utilizando óleo diesel e EMOS. ....	232
Figura 7.22. Eficiência de energia renovável, alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC	232
Figura 7.23. Eficiência de energia renovável, alternativas SPCD, SPH utilizando óleo diesel e EMOS. ....	233
Figura 7.24. Eficiência na emissão de CO <sub>2</sub> , alternativas SPCGC, SPCFF, SPCBC. ....	233
Figura 7.25. Eficiência na emissão de CO <sub>2</sub> , alternativas SPCD, SPH utilizando óleo diesel e EMOS ....	233

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Síntese dos fatores de influência no modelo de uso final de energia. ....	22
Tabela 3.1. Fontes de energia para o transporte rodoviário. ....	30
Tabela 3.2. Classificação das frações do petróleo em função da quantidade de carbono. ....	32
Tabela 3.3. Características físico-químicas relevantes da gasolina e do óleo diesel. ....	34
Tabela 3.4. Composição típica do gás natural, em % volumétrico. ....	46
Tabela 3.5. Características físico-químicas relevantes do gás natural. ....	47
Tabela 3.6. Estimativa das frotas de veículos convertidos a GN. ....	48
Tabela 3.7. Características físico-químicas relevantes do etanol. ....	61
Tabela 3.8. Resultados obtidos com os veículos <i>flexible-fuel</i> no Brasil. ....	72

Tabela 3.9.Características físico-químicas relevantes do biodiesel. ....	76
Tabela 3.10. Capacidade e produção de biodiesel nos países da Europa (1.000 t/ano) ..	77
Tabela 3.11.Matérias primas para produção de biodiesel. ....	78
Tabela 3.12.Forma de extração do óleo e situação recomendada. ....	80
Tabela 3.13.Características da produção de biodiesel em função da rota escolhida. ....	82
Tabela 3.14. Veículos participantes do testes em Curitiba.....	86
Tabela 4.1.Considerações sobre ecoeficiência. ....	95
Tabela 4.2.Conjunto de indicadores de aplicação geral .....	97
Tabela 4.3.Indicadores selecionados, relacionados a categorias e aspectos.....	98
Tabela 4.4.Demanda de energia típica na cadeia de suprimento de derivados de petróleo no Reino Unido.....	101
Tabela 4.5.Eficiência energética na produção de combustíveis no Reino Unido.....	102
Tabela 4.6.Eficiência energética na cadeia de suprimento dos derivados de petróleo..	102
Tabela 4.7.Eficiência energética na cadeia de suprimento do gás natural. ....	102
Tabela 4.8.Eficiência da cadeia de suprimento de gasolina para uso em automóveis. .	103
Tabela 4.9.Eficiência energética da cadeia de suprimento de combustíveis selecionados. .....	104
Tabela 4.10. Comparativo da eficiência energética da cadeia de suprimento de óleo diesel e biodiesel. ....	105
Tabela 4.11.Eficiência energética do sistema de propulsão convencional.....	107
Tabela 5.1.Caracterização de função, unidade funcional e desempenho. ....	118
Tabela 5.2.Síntese das referências selecionadas sobre aplicação de ACV as fontes de energia para o transporte rodoviário. ....	126
Tabela 6.1.Caracterização da abrangência dos dados do modelo.....	138
Tabela 7.1.Caracterização das alternativas identificadas. ....	152
Tabela 7.2.Volume anual processado por origem e capacidade [m <sup>3</sup> ].....	159
Tabela 7.3.Produção da Bacia de Campos – 1990 a 2003.....	161
Tabela 7.4.Energia consumida na exploração e produção de petróleo – Bacia de Campos. ....	162
Tabela 7.5.Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> – exploração e produção de petróleo. .....	163
Tabela 7.6.MODM do transporte de petróleo.....	164
Tabela 7.7.Energia consumida no DTSE para movimentação de produtos. ....	165

Tabela 7.8. Consumo de energia para bombeio por oleodutos e operações nos terminais. .....	165
Tabela 7.9. Dados operacionais dos petroleiro da Transpetro.....	166
Tabela 7.10. Síntese do consumo de energia por processo – transporte de petróleo.....	167
Tabela 7.11. Emissão de CO <sub>2</sub> por processo – transporte de petróleo. ....	168
Tabela 7.12. Dados de consumo de energia – REDUC.....	168
Tabela 7.13. Balanço energético para a REDUC e UPGN REDUC I e II. ....	170
Tabela 7.14. Rateio de energia para o óleo diesel e gasolina A. ....	171
Tabela 7.15. Consumo de energia e emissões de CO <sub>2</sub> - refino de gasolina A e óleo diesel. .....	171
Tabela 7.16. Composição da gasolina C.....	172
Tabela 7.17. Dados de consumo de energia nas bases da BR Distribuidora.....	173
Tabela 7.18. Perfil da frota de distribuição de combustíveis no Rio de Janeiro. ....	175
Tabela 7.19. MODM para a distribuição de combustíveis. ....	176
Tabela 7.20. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> para distribuição de combustíveis. .....	177
Tabela 7.21. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> na produção de gás natural. ....	178
Tabela 7.22. MODM para o transporte de GN. ....	179
Tabela 7.23. Inventário de consumo de energia para movimentação de GN. ....	179
Tabela 7.24. Consumo de energia para o transporte de GN. ....	180
Tabela 7.25. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> para o processamento de GN. ....	181
Tabela 7.26. MODM para distribuição de GN. ....	182
Tabela 7.27. Energia necessária para a compressão de GN nos postos de serviço. ....	183
Tabela 7.28. Consumo de energia para compressão de GN. ....	183
Tabela 7.29. Consumo estimado de energia na distribuição de GN.....	183
Tabela 7.30. Eficências na produção da cana-de-açúcar e etanol .....	185
Tabela 7.31. Energia consumida e emissão de CO <sub>2</sub> na agricultura da cana-de-açúcar. .	186
Tabela 7.32. Consumo de energia no suprimento de insumos agrícolas para o cultivo da cana-de-açúcar. ....	188
Tabela 7.33. Energia embutida nos insumos agrícolas.....	188
Tabela 7.34. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> – cultura da cana-de-açúcar. ....	189
Tabela 7.35. MODM para o transporte da cana-de-açúcar.....	190
Tabela 7.36. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> - transporte da cana-de-açúcar...	191

Tabela 7.37. Balanço energético para uma unidade de produção de etanol.....	192
Tabela 7.38. MODM para a distribuição de etanol. ....	193
Tabela 7.39. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> no transporte do etanol entre unidade de produção e BADUC. ....	194
Tabela 7.40. Equipamentos para cultura da soja – região de São Paulo. ....	197
Tabela 7.41. Taxa de aplicação de adubos para a cultura da soja. ....	197
Tabela 7.42. Conteúdo energético de herbicidas, inseticidas e fungicidas.....	198
Tabela 7.43. Aplicação de herbicidas, inseticidas e fungicidas na cultura da soja. ....	199
Tabela 7.44. Consumo de energia na produção e transporte da soja.....	200
Tabela 7.45. Energia embutida nos insumos agrícolas para produção da soja.....	200
Tabela 7.46. Consumo de energia para extração de óleo de soja. ....	202
Tabela 7.47. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> – produção de óleo de soja. ....	202
Tabela 7.48. MODM para o transporte do óleo de soja. ....	203
Tabela 7.49. Consumo de energia para o transporte do óleo de soja. ....	203
Tabela 7.50. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> – produção de óleo de soja. ....	203
Tabela 7.51. Produção de biodiesel – referências para comparação. ....	204
Tabela 7.52. Produção de éster-metílico de óleo de soja - EMOS. ....	205
Tabela 7.53. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> – produção de biodiesel.....	206
Tabela 7.54. Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> para distribuição do biodiesel.....	206
Tabela 7.55. Características técnicas dos automóveis que tiveram dados coletados. ....	207
Tabela 7.56. Eficiência energética dos veículos escolhidos. ....	208
Tabela 7.57. Referências para comparação com o levantamento de dados de consumo. .....	208
Tabela 7.58. Eficiência energética dos ônibus Padron C e Padron H. ....	209
Tabela 7.59. Consumo de energia para os sistemas de propulsão.....	209
Tabela 7.60. Avaliação da qualidade dos dados – SPCGC. ....	211
Tabela 7.61. Avaliação da qualidade dos dados – SPCFF. ....	212
Tabela 7.62. Avaliação da qualidade dos dados – SPCBC. ....	212
Tabela 7.63. Avaliação da qualidade dos dados – SPCD. ....	213
Tabela 7.64. Avaliação da qualidade dos dados – SPCD + biodiesel. ....	214
Tabela 7.65. Comparativo do consumo de energia total com referências selecionadas – fontes de energia convencionais. ....	219
Tabela 7.66. Comparativo do consumo de energia total para os biocombustíveis.....	221

Tabela A7.1.1.Poder calorífico superior e massa específica. ....	252
Tabela A7.1.2.Fatores de conversão para cálculo de conteúdo de carbono. ....	252
Tabela A7.1.3.Fatores de conversão para cálculo da emissão de CO <sub>2</sub> . ....	253
Tabela A7.1.4.Fatores de conversão de uso geral. ....	253
Tabela A7.2.1.Distâncias entre as garagens das empresas de ônibus e a BADUC. ....	254
Tabela A7.2.2.Distâncias entre os postos de serviço e a BADUC. ....	255
Tabela A7.2.3.Distâncias entre as usinas/destilarias de etanol e a BADUC. ....	256
Tabela A7.3.1.Dados dos automóveis dedicados ao uso de gasolina C. ....	257
Tabela A7.3.2.Dados dos automóveis <i>flexible-fuel</i> . ....	258
Tabela A7.3.2.Dados dos automóveis utilizando GNC. ....	259

## GLOSSÁRIO

$\pi$ : eficiência produtiva.

$\eta_1$ : eficiência energética.

$\pi_E$ : eficiência produtiva do insumo energia.

$\eta_{MCI}$ : eficiência energética dos MCI.

$\eta_{SC}$ : eficiência energética da unidade de conversão de energia.

$\eta_{SP}$ : eficiência energética do sistema de propulsão.

$\eta_{STM}$ : eficiência energética dos sistemas de transmissão mecânica.

4T: quatro tempos – (1) admissão, (2) compressão, (3) explosão, (4) descarga.

ACV: Análise de Ciclo de Vida – técnica normatizada para estudar cadeias produtivas considerando os recursos necessários e os impactos ambientais envolvidos.

AE: acumulador de energia.

AEAC: álcool etílico anidro combustível.

AEHC: álcool etílico hidratado combustível.

ANP: Agência Nacional do Petróleo.

Atividade produtiva: Qualquer atividade que transforme insumos ou recursos em produtos.

BADUC: Base de Duque de Caxias.

BAT: bateria.

BX ou B(X): mistura de óleo diesel e biodiesel a X%.

$C_5^+$ : gasolina natural.

CEBDS: Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável.

CE: Comunidade Européia.

DME: dimetil éter.

EB: energia bruta.

$EB_1$ : energia bruta contida nos insumos.

$E_{comb}$ : energia contida no combustível.

$E_E$ : energia que entra no processo.

EMOS: éster metílico de óleo de soja.

$E_{of}$ : energia oferecida pelo sistema de propulsão.

ERE: energia requerida para produzir energia.

$E_S$ : energia que sai do processo.

EUA: Estados Unidos da América.

EX ou E(X): mistura de gasolina com etanol a X%.

F: fluxo.

GLP: gás liquefeito de petróleo.  
GN: gás natural.  
GNC: gás natural comprimido.  
GNL: gás natural liquefeito.  
GNV: gás natural veicular.  
GTL: processo *gas to liquid*.  
HC: hidrogênio.  
IAD: Índice Antidetonante.  
ICE: Ignição por centelhamento.  
ICE: ignição por centelhamento.  
ICO: Ignição por compressão.  
ICO: ignição por compressão.  
ICV: Invetário de Ciclo de Vida.  
ID: injeção direta de combustível.  
IEA: *International Energy Agency*.  
IID: injeção indireta de combustível.  
LGN: líquido de gás natural;  
MACV: Matriz de Alternativas de Ciclo de Vida.  
MCE: motor de combustão externa.  
MCI: motores alternativos de combustão interna.  
MCR: motor de combustão rotativo.  
ME: motor elétrico.  
MODM: Matriz Origem – Destino – Modo.  
MTBE: metil-terci-butil-éter.  
MX ou M(X): mistura de gasolina com metanol a X%.  
OECD: *Organization for Economic Co-operation and Development*.  
OPEP: Organização do Países Exportadores de Petróleo.  
Padron C: ônibus tipo Padron com sistema de propulsão convencional.  
Padron H: ônibus tipo Padron com sistema de propulsão híbrido.  
PC: pilha a combustível.  
Processo: O mesmo que unidade de processo ou atividade produtiva.  
REDUC: Refinaria de Duque de Caxias.  
SPC: sistema de propulsão convencional.  
SPCBC: sistema de propulsão convencional bicomcombustível.  
SPCFF: sistema de propulsão convencional *flexible fuel*.

SPCGC: sistema de propulsão convencional que utiliza gasolina C.

SPDC: sistema de propulsão convencional que utiliza óleo diesel.

SPH: sistema de propulsão híbrido.

STM: sistema de transmissão mecânica.

Unidade de processo: O mesmo que processo ou atividade produtiva.

UPGN: Unidade de processamento de gás natural.

WBCSD: *World Business Council on Sustainable Development*.

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

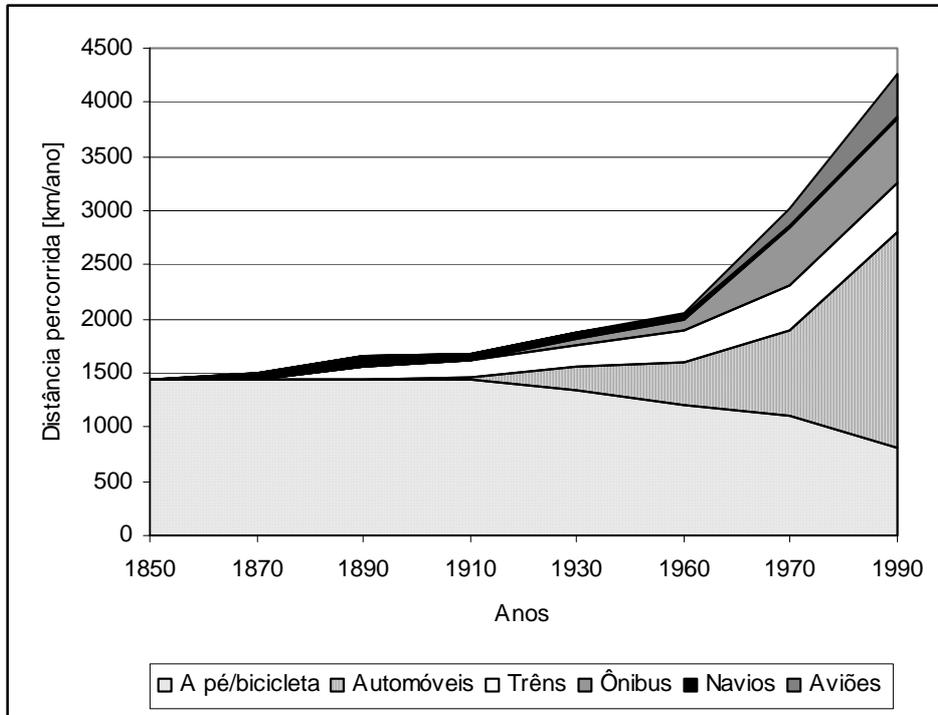
Transporte é uma atividade necessária ao sistema sócio-econômico. Diferentes autores procuram relacionar a expansão dos serviços de transportes com índices de crescimento econômico, como por exemplo, renda *per capita* ou Produto Interno Bruto (PIB) de um país (HIMANEM, 1993, RILEY, 1994, SCHAFER e VICTOR, 2000, STEAD, 2001). O trabalho de SCHAFER e VICTOR (2000) discute esta relação de forma muito objetiva, utilizando o índice de renda *per capita*. A série histórica analisada sugere que no mundo todo, a medida que a renda *per capita* cresce o volume de deslocamentos motorizados também cresce. Ou seja: enriquecimento e mobilidade estão positivamente relacionados.

Para os países desenvolvidos, a medida que a renda *per capita* cresce, a distância anual viajada por habitante utilizando modos de transporte motorizados cresce aproximadamente na mesma proporção. Para os países em desenvolvimento esta relação parece ser menos direta. Na China, entre 1960 e 1990, a renda *per capita* triplicou, porém o tráfego motorizado foi multiplicado por dez (SCHAFER e VICTOR, 2000). Neste caso específico, pode-se afirmar que o enriquecimento do país, além de aumentar a mobilidade da população, induziu a substituição do transporte não motorizado (caminhada e bicicleta) por modos motorizados como o automóvel, ônibus, trem etc, em parte devido a necessidade de um maior número de deslocamentos de maior extensão num menor intervalo de tempo.

Um outro aspecto desta situação pode ser observado na Figura 1.1, obtida de trabalho realizado pelo *World Business Council for Sustainable Development* (CEBDS, 2001). O gráfico apresenta a evolução das viagens por modo de transporte no mundo entre 1850 e 1990. Constata-se que a partir do início do século XX o número de deslocamentos utilizando transporte motorizado cresceu vertiginosamente, com grande destaque para o uso do automóvel. No mesmo período houve um declínio da caminhada e do uso das bicicletas.

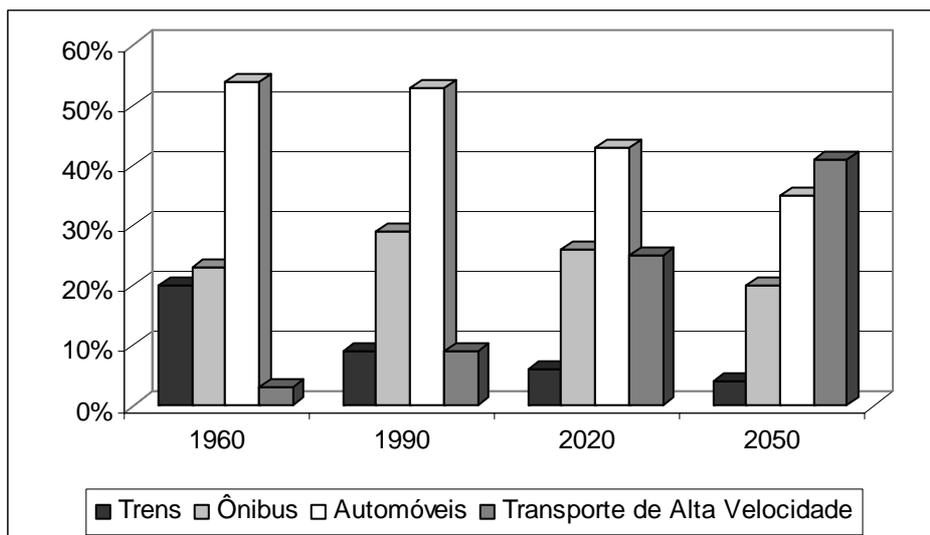
Esta situação deixa clara a importância que o automóvel assumiu na divisão modal dos transportes. Mesmo em um sistema de transportes bem estruturado, como o do Reino

Unido, observa-se a grande dependência do automóvel (HUGHES, 1994). Segundo SCHAFFER e VICTOR (2000) esta dependência se verifica em uma escala mundial, como pode ser visto na Figura 1.2, onde atualmente o automóvel responde por um percentual entre 40% e 50% dos deslocamentos.



Fonte: CEBDS, 2001.

Figura 1.1. Evolução dos deslocamentos por modo de transporte no mundo.



Nota: Transporte de Alta Velocidade: Avião e trem de grande velocidade

Fonte: SCHAFFER e VICTOR, 2000.

Figura 1.2. Evolução do volume de tráfego mundial.

As previsões para a primeira metade do século XXI indicam que os automóveis ainda

serão responsáveis por mais de 30% do tráfego motorizado mundial (RILEY, 1994, WOOTON, 1995, SCHAFER e VICTOR, 2000). Quando se faz uma projeção para um horizonte de 50 anos, pode-se esperar que os países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, trilhem um caminho ainda de maior dependência de sistemas rodoviários (incluindo o automóvel particular).

Tal afirmação se baseia no fato dos seus sistemas atuais de transportes coletivos serem menos estruturados que os que operam em países mais desenvolvidos e na constatação de que recursos para investimentos em sistemas tecnologicamente mais sofisticados nem sempre estão disponíveis, delegando-se ao transporte rodoviário e em especial ao automóvel, o papel de satisfazer as maiores taxas de mobilidade, típicas das economias desenvolvidas.

Na liderança dos países que dependem do automóvel para realizar o deslocamento diário da população encontra-se os Estados Unidos. A taxa de motorização americana é muito maior que a média mundial. Em 1995, havia aproximadamente 0,74 veículo por habitante nos Estados Unidos, enquanto a taxa média de motorização mundial era de cerca de 0,12 veículo por habitante. Assim como na maioria dos países em desenvolvimento, a taxa de motorização brasileira era menor do que a média mundial, não passando de 0,09 veículo por habitante (RUBIN, 2001, ABDETRAN, 2000).

Segundo GAKENHEIMER (1999) dois indicadores tem boa correlação positiva com o a taxa de motorização nos países em desenvolvimento: renda *per capita* anual e percentual da população vivendo em área urbana. Nos últimos 50 anos a população urbana brasileira cresceu 45%. A taxa de motorização cresceu de 0,094 veículo por habitante em 1980 para 0,192 veículo por habitante em 2000, com aumento de cerca de 100% em 20 anos (IBGE, 2002; DENATRAN, 2001; ABDETRAN, 2000). Verifica-se que o país segue a tendência mundial de optar pelo uso do transporte motorizado individual.

O aumento do uso do automóvel leva à ampliação da dependência do uso de combustíveis derivados do petróleo, fonte energética convencional para o transporte rodoviário. Atualmente o setor de transporte responde por mais de 57% do consumo de petróleo em todo o mundo, sendo que nos últimos 30 anos este percentual cresceu cerca de 0,5% ao ano (IEA, 2002). No Brasil, cerca de 50% do petróleo consumido se destina

ao transporte, dos quais, 90% são consumidos pelo modo rodoviário. A taxa brasileira média de crescimento do consumo de energia no setor de transportes no período de 1985 a 2001 foi de 3,8% ao ano, muito maior que os padrões mundiais (MME, 2002).

Esta situação leva, por um lado, a um problema de planejamento estratégico. Atualmente os Estados Unidos importam metade do petróleo consumido no país (DAVIS, 2001). Para o caso brasileiro, mesmo sendo atualmente o 18º maior produtor mundial de petróleo com uma taxa média de crescimento anual nos últimos 5 anos em torno de 11%, o país apresentou em 2001 uma dependência de produto externo na ordem de 25% sobre o consumo (MME, 2002). Com base no que foi exposto anteriormente, esta situação tende a se agravar se mantidas as tendências atuais de crescimento econômico e desenvolvimento social, que levarão a uma maior taxa de motorização. Além disso, não se pode esquecer que o petróleo é um recurso natural esgotável e a rapidez com que este recurso se esgotará é proporcional ao aumento do seu uso.

Por outro lado, a queima de derivados de petróleo acarreta impactos ambientais locais, regionais e globais. Estima-se que mais de 70% de toda a emissão mundial de monóxido de carbono (CO) e 50% dos vários óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) seja proveniente das atividades de transportes. Juntos o NO<sub>x</sub> e o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) emitidos por veículos respondem por 1/3 da chuva ácida. Estima-se que 50% dos hidrocarbonetos (HC) emitidos nas áreas urbanas e 25% das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal gás de efeito estufa, são provenientes dos sistemas de transportes (GABEL e ROLLER, 1992). No caso do CO, HC e NO<sub>x</sub>, a emissão destes poluentes se dá principalmente nos centros urbanos e áreas de maior adensamento populacional, onde condições desfavoráveis de concentração podem causar danos à saúde humana.

Não há indícios de que a tendência de opção pelo uso do automóvel vá se reverter nos próximos 50 anos. Além disso, o motor alternativo de combustão interna, base da tecnologia de propulsão dos automóveis modernos dominará o mercado neste período de tempo, principalmente nos países em desenvolvimento (RIBEIRO *et al.*, 2002). Por outro lado, cresce a preocupação e a consciência social com a necessidade de promover

o desenvolvimento sustentável<sup>1</sup>, em particular no que se refere aos aspectos relacionados ao uso de energia nos sistemas de transportes (OECD, 1997, RIBEIRO *et al.*, 2001b).

No caso dos automóveis, esforços estão sendo feitos no sentido de: (1) utilizar melhor os recursos energéticos convencionais para sua propulsão, sem comprometer o serviço prestado – deslocamento de pessoas e bens; (2) encontrar recursos energéticos alternativos para sua propulsão que proporcionem serviço semelhante ao obtido com os recursos convencionais.

Numa abordagem preliminar, a análise da eficiência no uso de combustíveis para a propulsão de automóveis limita-se ao uso final, por meio da conversão da energia química contida nos combustíveis em trabalho. Para os combustíveis convencionais, derivados do petróleo, isso se justifica, tendo em vista que a eficiência energética da cadeia de processos que levam a produção e disponibilização do combustível (cadeia de suprimento) é em média 4 vezes maior que a do sistema de propulsão do veículo (POULTON, 1997, IEA, 1999, RISTINEN e KRAUSHAAR, 1999, RUBIN, 2001).

A medida que se aprimora a eficiência energética do sistema de propulsão dos veículos e surge a necessidade adotar recursos energéticos alternativos, está se tornando uma prática, principalmente nos países desenvolvidos, a análise de toda a cadeia de suprimento das fontes de energia, considerando-se, em sua totalidade ou parcialmente, os recursos energéticos, as matérias-primas, os recursos naturais necessários e os impactos ambientais decorrentes desta atividade (IEA, 1999, WANG *et al.*, 1997; SHEEHAN *et al.*, 1998, KREITH *et al.*, 2002).

Esta técnica, inicialmente denominada de Análise Energética e posteriormente difundida como Análise de Ciclo de Vida (ACV) (CHEHEBE, 1998) 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, trata-se de uma técnica intensiva em dados, trabalhosa, lenta e cara, o que representa um conjunto de limitações à sua aplicação.

---

<sup>1</sup> Desenvolvimento sustentável é conceituado como uma forma de desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem suas próprias necessidades, conforme publicado em 1987 no relatório “Nosso Futuro Comum”. Para uma caracterização bastante abrangente de desenvolvimento sustentável aplicado em transportes recomenda-se o trabalho de RIBEIRO *et al.*, 2001b.

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.

Nos países em desenvolvimento, a técnica de ACV ainda é pouco praticada e sua difusão como ferramenta para a escolha de fontes alternativas de energia para o transporte rodoviário deve evitar a reprodução de modelos elaborados com base na realidade dos países desenvolvidos, pois é comum que a produção de combustíveis alternativos derivem 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. Esta situação pode ser exemplificada considerando-se as condições desfavoráveis de incidência de radiação solar para a produção de biocombustíveis em países do hemisfério norte em comparação com os países do hemisfério sul, ou a produção de energia elétrica de fonte hidráulica em comparação com a geração termelétrica.

As considerações anteriores não tiram o mérito da ACV, ou qualquer técnica de análise que procure contemplar o uso de recursos naturais e os impactos ambientais ao longo da cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia para os transportes. Muito pelo contrário, seu emprego, sempre que possível é recomendado. Porém, deve ficar claro que um melhor aproveitamento desta técnica depende de algumas 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.

## **1.2.OBJETIVO E JUSTIFICATIVA**

Esta tese tem como objetivo específico a análise comparativa de fontes de energia para o transporte rodoviário por meio da elaboração de um procedimento que considere a cadeia de suprimento e uso final de cada alternativa sob a óptica da eficiência de seus processos, em particular a eficiência energética.

Adotou-se como hipótese a possibilidade do aprimoramento da análise comparativa entre fontes de energia para o transporte rodoviário por meio de um procedimento simples que considere a aplicação da técnica de ACV.

O procedimento deve ser capaz de equilibrar a simplicidade de elaboração com a flexibilidade de uso e considerar aspectos relevantes aos países em desenvolvimento, em particular o Brasil. Sua elaboração deve contemplar uma estrutura modular que possa ser aprimorada de modo a ampliar sua abrangência e utilizar uma ferramenta simples de análise que considere as incertezas e variações dos dados que alimentarão o modelo.

Como objetivos gerais do trabalho considera-se:

- ◆ Colaborar para um melhor entendimento de como o uso de energia no transporte rodoviário contribui com o esgotamento das fontes não renováveis de energia e como isto pode ser alterado por meio do uso mais eficiente destes recursos ou de recursos alternativos;
- ◆ Subsidiar a análise de cada alternativa de fonte de energia para o transporte rodoviário, identificando os pontos fortes e as oportunidades de melhoria de cada opção. Em particular no que se refere ao uso de fontes de energia renováveis oriundas da biomassa, de devem dispor de um indicador próprio de eficiência;
- ◆ Proporcionar uma ferramenta que auxilie na análise dos impactos ambientais decorrentes do uso direto de energia nas cadeias de suprimento e uso final para cada alternativa.

Justifica-se este trabalho pela necessidade de economizar recursos energéticos não renováveis, seja por meio de maior eficiência em seu uso ou pela sua substituição por recursos alternativos de desempenho compatível, sendo esta abordagem coerente com a prática do desenvolvimento sustentável.

Adicionalmente, os países em desenvolvimento necessitam desenvolver e divulgar conhecimento próprio no que se refere ao suprimento e uso final de fontes de energia alternativas para o transporte rodoviário, bem como dispor de ferramentas de análise adequadas à sua realidade de aplicação, tendo em vistas que as fontes alternativas de energia não raro estão associadas ao potencial local.

### **1.3. ESTRUTURA DA TESE**

A tese está estruturada em 8 (oito) capítulos e 3 (três) anexos.

No Capítulo 1, de introdução, apresenta-se o problema com comentários gerais, os objetivos, justificativa e estrutura da tese.

O uso de energia nos transportes, em particular no que se refere ao caso do transporte rodoviário é apresentado no Capítulo 2.

Apresenta-se as alternativas de fontes de energia para o transporte rodoviário no Capítulo 3, sendo detalhadas aquelas que melhor se adequam à situação brasileira no curto e médio prazo.

O Capítulo 4 fornece os conceitos de produtividade e eficiência, aplicando-os aos processos de conversão de energia. Uma ampliação destes conceitos é possível por meio da introdução do conceito de ecoeficiência, que permite a introdução de indicadores de impacto no meio ambiente. A aplicação destes conceitos é apresentada no final do capítulo.

Dedica-se o Capítulo 5 ao estado da arte das técnicas de Análise de Ciclo de Vida (ACV), com destaque especial para a ferramenta de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e sua aplicação em estudos para a escolha entre alternativas energéticas para o transporte rodoviário.

No Capítulo 6 apresenta-se a estrutura de procedimentos para a análise comparativa de alternativas de fontes de energia para o transporte rodoviário com base na aplicação da ferramenta de ICV conjugada com o conceito de ecoeficiência sobre a cadeia de suprimento e uso final destas fontes de energia. Modelos de ciclo de vida para fontes de energia selecionadas também são apresentados.

O Capítulo 7 trata de uma aplicação do procedimento no Município do Rio de Janeiro com apresentação de resultados e sua análise comparativa.

As conclusões e recomendações são apresentadas no Capítulo 8.

## **CAPÍTULO 2 – TRANSPORTE RODOVIÁRIO E USO DE ENERGIA**

### **2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Nos diversos setores das atividades socio-econômicas pode-se substituir uma fonte energética por outra, porém a realização de uma atividade produtiva sem o consumo de alguma forma de energia parece não ser possível. Segundo SLESSER (1978): "*não existe substituto para a energia*". Esta afirmativa, reavaliada ao longo do tempo (RISTINEN e KRAUSHAAR, 1999, ANEEL/ANP, 1999, WISER, 2000) estabelece a importância deste recurso na sociedade moderna e se aplica em particular ao caso dos transportes.

A atividade de transporte pode ser entendida como sendo o deslocamento de pessoas e/ou bens, de um ponto para outro do espaço, ao longo de um percurso, durante um certo período de tempo, consumindo uma determinada quantidade de recursos (MORLOK, 1978, VUCHIC, 1981). Dentre estes recursos destaca-se a quantidade de energia consumida, que neste caso pode ser compreendida em sua forma mais elementar: energia é o potencial que um sistema tem de realizar trabalho, sendo trabalho o produto de uma força por um deslocamento (VAN WYLEN e SONNTAG, 1985).

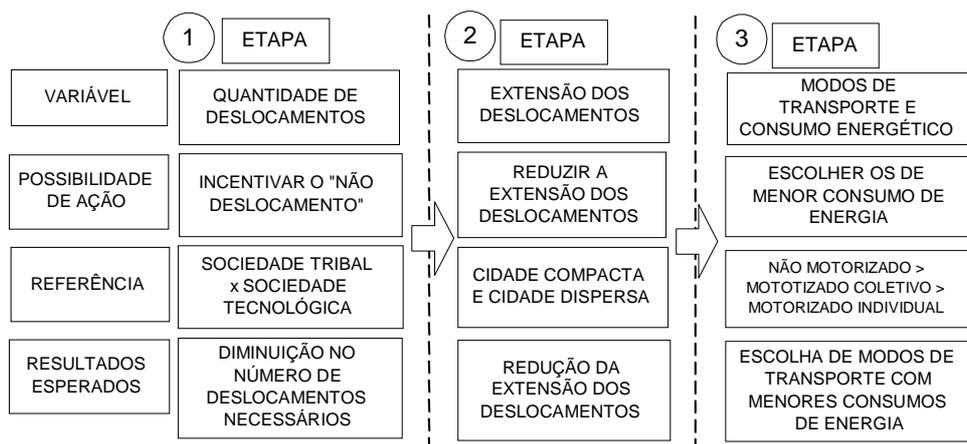
Partindo da relação elementar entre transporte e energia, pode-se tecer considerações sobre o uso de energia e a atividade de transportes, com aplicação particular ao transporte rodoviário, conforme será explorado neste capítulo. Para uma melhor compreensão desta relação, optou-se por apresentar inicialmente uma breve introdução a respeito do planejamento dos transportes sobre a ótica do consumo de energia, destacando neste contexto mais amplo quais dimensões serão detalhas e como interagem para caracterizar a cadeia de suprimento e uso final de energia no transporte rodoviário, objeto deste estudo.

### **2.2. PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE E USO DE ENERGIA**

A atividade de transporte está diretamente relacionada com a necessidade de deslocamento de pessoas e bens, assim, considerando um contexto amplo para o estudo das relações entre transporte e uso de energia, torna-se conveniente examinar as possíveis variáveis que concorrem para caracterizar o consumo de energia nesses

deslocamentos. De uma maneira geral essas variáveis englobam: (1) a quantidade de deslocamentos realizados; (2) a extensão destes deslocamentos; (3) os modos de transporte utilizados e (4) o consumo característico de energia de cada um dos modos (HUGHES, 1994, STEAD, 2001).

D'AGOSTO e BALASSIANO (2001) identificaram uma estrutura de procedimentos que considera o planejamento de transportes sobre a ótica da redução do consumo de energia. O trabalho segue a mesma linha sugerida pelo Grupo de Prevenção e Controle da Poluição – Força Tarefa de Transporte da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD, 1997). A Figura 2.1 apresenta esta estrutura de procedimentos composta de 3 etapas, cada uma contemplando: um conjunto de variáveis que deverão ser consideradas; possibilidades específicas de ação; uma situação de referência e um conjunto de resultados esperados.



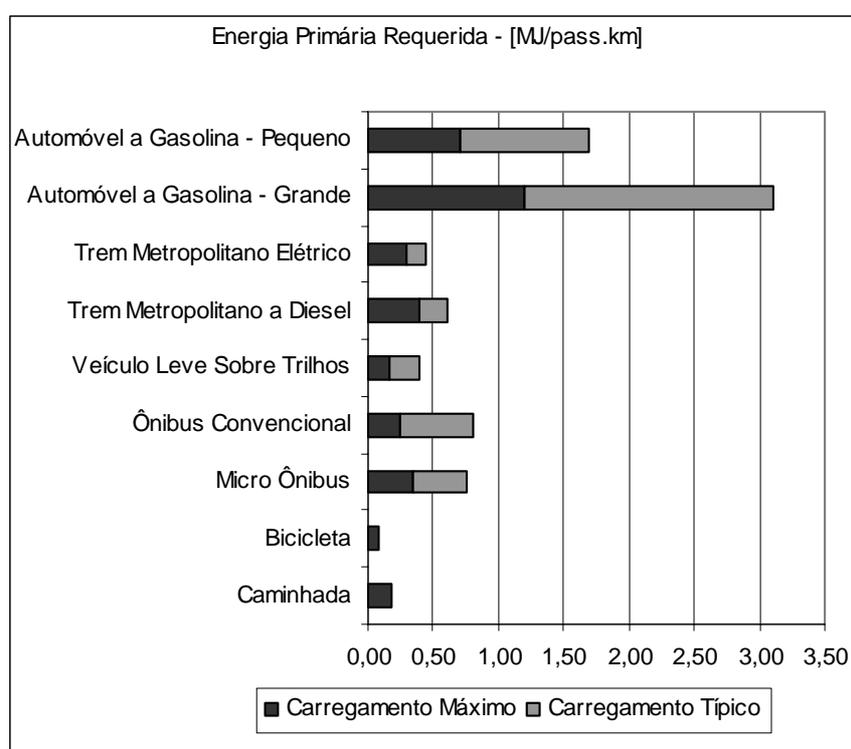
Fonte: D'AGOSTO e BALASSIANO, 2001.

Figura 2.1. Estrutura de procedimentos para o planejamento de transportes sob a ótica da redução do consumo de energia.

Em síntese, a estrutura de procedimentos parte da possibilidade de incentivar a redução do número de deslocamentos. Os deslocamentos que não puderem ser suprimidos devem ter sua extensão reduzida, dentro do conceito da cidade acessível (BREHENY, 1995). Para realizar os deslocamentos, escolhe-se os modos de melhor eficiência energética, seguindo uma ordem onde se privilegia o ciclismo, a caminhada, os transportes coletivos (ferroviário ou rodoviário) e o uso do automóvel como última alternativa. Para os casos em que o uso do automóvel é inevitável, existe a opção de desenvolver esforços no sentido de reduzir seu consumo de energia por meio de desenvolvimento tecnológico e a adequada gestão dos sistemas de transporte.

Dentro desta linha de raciocínio, verifica-se que o objeto desta tese enquadra-se especificamente na etapa 3 do procedimento, onde, uma vez estabelecida a necessidade de deslocamentos, sua extensão e modo de transporte, procura-se aprimorar a eficiência energética de um dos elementos deste sistema – a forma como a energia é suprida e usada.

Para ilustrar a importância do tema, a Figura 2.2 apresenta o consumo de energia para alguns modos de transporte terrestres selecionados (HUGHES, 1994). Observa-se claramente a existência de dois extremos. Enquanto a bicicleta é o modo de transporte não motorizado que apresenta o menor consumo de energia, o automóvel é o modo que apresenta o maior consumo. A invenção da bicicleta no século XIX (HESKETT, 1998) parece ter sido a grande conquista do homem no que se refere ao uso racional da energia para o transporte. Se comparado com a opção de caminhar, o uso da bicicleta moderna consome metade da energia e quase triplica a velocidade, assumindo-se as velocidades de 5 km/h para a caminhada e 13 km/h para a bicicleta (RISTINEN e KRAUSHAAR, 1999).



Nota: Automóvel a Gasolina – Pequeno refere-se ao padrão europeu e o Automóvel a Gasolina - Grande ao padrão norte americano.

Fonte: Hughes, 1994

Figura 2.2. Consumo de energia por alguns modos de transporte terrestres selecionados.

Embora a bicicleta tenha possibilitado ampliar o alcance das viagens se comparada com a caminhada, a utilização do transporte motorizado garante uma vantagem competitiva em termos de mobilidade, pois possibilita menor tempo de viagem independentemente da topografia do terreno. Para o caso dos transportes motorizados, a Figura 2.2 mostra ainda uma vantagem do ponto de vista de consumo energético para os modos que usam tecnologia ferroviária eletrificada, se comparados aos modos ferroviários ou rodoviários dependentes de combustíveis derivados do petróleo.

No entanto, quando se analisa o cenário mundial de consumo energético para o setor de transportes, parece evidente que as modalidades mais eficientes do ponto de vista energético são as menos utilizadas. Em 2000, no mundo todo, 57,7% do consumo de petróleo se destinou ao setor de transportes (IEA, 2002). Neste mesmo ano, 27,0% de toda a energia utilizada nos Estados Unidos se destinou ao setor de transportes, sendo que deste percentual 96,4% foram originados do petróleo (DAVIS, 2001).

Para o Brasil, em 2000, 28,5% de toda a energia consumida no país se destinou ao setor de transportes. Deste percentual, 89% dizem respeito à derivados de petróleo. No caso do Brasil estes números não tiveram alteração expressiva em 2001 (MME, 2002). O consumo intensivo de combustíveis fósseis no setor de transportes é um indicativo da predominância do uso do modo rodoviário.

A tecnologia de fabricação de automóveis e ônibus está centrada no uso de motores alternativos de combustão interna<sup>2</sup> (MCI) para a propulsão dos veículos. Estes motores tradicionalmente consomem combustíveis derivados do petróleo e apresentam rendimento térmico da ordem de 20% (OBERT, 1971, GILLESPIE, 1992, POULTON, 1997, RUBIN, 2001).

A comparação dos resultados obtidos em 1987 e 1997 para a pesquisa de origem/destino realizada em São Paulo ratifica a predominância no uso do automóvel para o caso da maior cidade brasileira. Nestes 10 anos o índice de viagens *per capita* por automóvel aumentou 5,56%. Para os demais modos, houve um decréscimo de 16,67% no uso de ônibus, 33,33% no uso de trens e 14,67% nos deslocamentos a pé. O uso de metrô

---

<sup>2</sup> Neste trabalho o termo motor alternativo de combustão interna (MCI) é utilizado para identificar o tipo de motor de combustão interna mais difundido na indústria automobilística moderna. A definição deste termo é necessária para diferenciar o MCI dos motores rotativos de combustão interna, que praticamente não têm aplicação comercial na indústria automobilística. Neste trabalho a sigla MCI será empregada para representar o motor alternativo de combustão interna.

permaneceu estável (NTU, 2000). Outro estudo, realizado para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, apresenta uma divisão modal onde 71% dos deslocamentos são realizados por ônibus e 22% por automóveis (SECTTRAN, 2000).

O crescimento histórico no uso do automóvel particular está relacionado aos padrões de ocupação e uso do solo. Abandona-se a ocupação compacta do espaço urbano em detrimento de um padrão descentralizado (HILLMAN, 1994, KENWORTHY e LAUBE, 1999). Isto é possível em função da disponibilidade do automóvel, que permite a criação de novas áreas de habitação, lazer e trabalho, dispersas e em regiões afastadas dos centros urbanos.

Na última década, muitas medidas vem sendo empregadas para diminuir a dependência do uso do automóvel. Os motivos para isso são normalmente relacionados à problemas de circulação de tráfego (congestionamentos) ou de agressão ambiental (excesso de emissões atmosféricas causadoras de impacto local ou regional). São raros os casos em que o consumo racional de energia é apontado como motivador para um uso mais restrito do automóvel.

Ainda assim, no Brasil o ônibus é o principal meio de transporte público urbano de passageiros, responsável pelo deslocamento diário de 55,14 milhões de passageiros nas cidades e o principal meio de transporte público coletivo, respondendo por 93,84% dos passageiros transportados diariamente (ANTP, 2000). Embora com consumo de energia por passageiro.km (pass.km) menor que o verificado nos automóveis, o ônibus convencional é o modo de transporte coletivo que apresenta o maior consumo de energia.

### **2.3.DIMENSÕES DO USO DE ENERGIA NO TRANSPORTE**

O transporte rodoviário pode ser desdobrado em 3 dimensões quanto à demanda por energia: infra-estrutura, composta de rodovias, terminais, sistemas de controle e instalações de apoio; veículos e a energia necessária à sua movimentação. No transporte rodoviário, esta última dimensão é usualmente ocupada pelos combustíveis derivados do petróleo (BOUSTEAD e HANCOCK, 1979).

Em cada uma das dimensões, consome-se energia em diferentes estágios. Consomem energia indiretamente os estágios de construção, manutenção e operação da infra-

estrutura necessária ao tráfego, bem como a fabricação e manutenção dos veículos. A movimentação dos veículos é a principal forma de consumo direto de energia nos transportes, sendo que o suprimento desta energia acarreta consumo adicional de energia.

Em todos os casos a contabilização da energia consumida é feita considerando a energia bruta ou primária, aquela fornecida pela natureza (petróleo, lenha, cana-de-açúcar, energia hidráulica etc) e energia útil, aquela de que dispõe o consumidor depois da última conversão feita nos seus próprios equipamentos. O processo de obtenção da energia útil a partir da energia primária pode exigir algum tipo de transformação, de modo a aumentar a densidade energética e facilitar o transporte e o armazenamento do recurso energético natural, como ocorre com a eletricidade, os combustíveis derivados do petróleo, o álcool, o carvão vegetal etc. Denomina-se energia secundária o resultado do processamento da energia primária. Considerados os extremos, a diferença entre energia primária e energia útil inclui as perdas ao longo da cadeia de extração, processamento (suprimento) e uso final da energia (MME, 2002).

A Figura 2.3 sintetiza todos os conceitos apresentados e destaca o objeto desta tese. Percentuais de consumo são apresentados com base em dois trabalhos, BOUSTEAD e HANCOCK (1979) e WISER (2000). Para os países desenvolvidos observa-se que nos últimos 25 anos o consumo direto de energia nos transportes tem sido responsável por uma parcela que varia entre 61% e 66%.

Segundo DAVIS (2001), a energia consumida na operação dos diversos modos de transporte norte-americanos no período de 1991 à 2000 girou em torno de 24,3% do total da energia consumida no país. O percentual brasileiro é um pouco maior, 27,7% (MME, 2002). WISER (2000) afirma que se considerado o consumo de energia relacionado às dimensões de infra-estrutura e veículo, o percentual norte-americano subiria para 40%. Isso demonstra que a maior fração da energia consumida em transportes (66% para este caso) está associada ao consumo direto, mais especificamente, ao uso final.

O trabalho de DECICCO e KLIESCH (2003) aponta que, em média, 68% da energia consumida por um automóvel norte-americano diz respeito à queima do combustível. Outros 11% estão relacionados à fabricação do veículo e cerca de 21% ao suprimento de

combustível. Nada é informado a respeito da energia consumida com infra-estrutura. Mesmo nesta visão parcial, verifica-se que 89% do consumo de energia está relacionado com consumo direto (Figura 2.3).

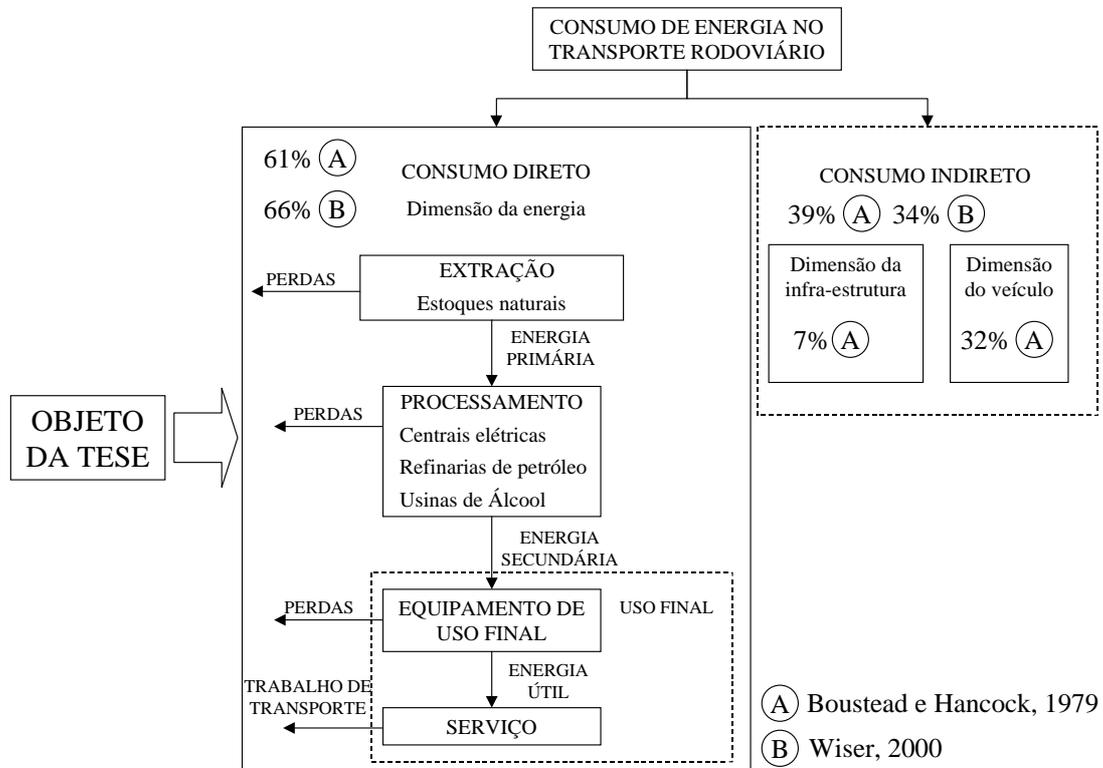


Figura 2.3. Síntese das dimensões do uso de energia no transporte.

O estabelecimento das dimensões do uso de energia no transporte rodoviário auxilia na compreensão de sua abrangência e esclarece porque os maiores esforços no sentido de reduzir este uso estão direcionados especificamente para o uso final, como será visto a seguir. Além disso, estudar o consumo direto de energia é uma tarefa necessária, principalmente se o objetivo for a comparação entre fontes de energia.

## 2.4. USO FINAL DE ENERGIA NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO

A partir de conceitos básicos da física e da química é possível estabelecer um modelo para o consumo de energia por um veículo rodoviário. A abordagem escolhida é tradicional, nasceu com o desenvolvimento da indústria automobilística na década de 50, encontrando-se detalhada em GILLESPIE (1992), RILEY (1994), SAE (1996), RISTINEN e KRAUSHAAR (1999) e RUBIN (2001).

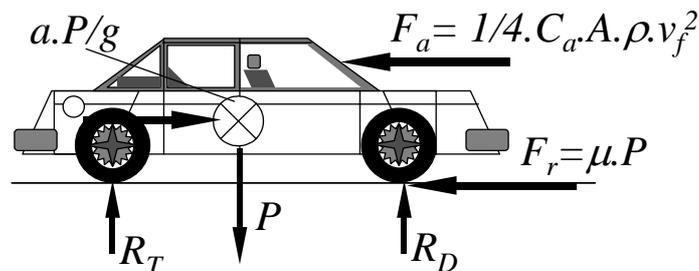
Apresenta-se, por meio de raciocínio indutivo, uma forma de entendimento do uso final

de energia no transporte rodoviário, considerando aspectos relacionados à fonte de energia, construção dos veículos e a sua operação. As considerações apresentadas são genéricas e podem ser aplicadas a qualquer veículo rodoviário (veículos comerciais leves, *vans*, ônibus, caminhões etc).

Esta abordagem considera duas componentes: (1) a demanda por energia no transporte rodoviário, função das solicitações impostas ao veículo que executa um deslocamento com uma determinada carga e (2) a oferta de energia que o sistema de propulsão do veículo pode oferecer. O equilíbrio entre estas duas componentes, dada uma condição de operação, estabelece o consumo de energia que o veículo apresentará ao longo de um percurso.

#### 2.4.1. Demanda por energia no transporte rodoviário

Considere-se um veículo que se desloca com aceleração constante ( $a$ ) no plano, como ilustrado na Figura 2.4. Neste caso simplificado, as únicas forças que se opõem ao movimento são a força de resistência aerodinâmica ( $F_a$ ), força de restrição ao rolamento ( $F_r$ ) e a força de restrição ao movimento ( $a.P/g$ ), onde  $P$  é o peso do veículo,  $g$  a aceleração da gravidade,  $R_T$  e  $R_D$  são as reações no eixo traseiro e dianteiro e “ $\otimes$ ” seu centro de massa.



Fonte: elaboração própria.

Figura 2.4. Representação esquemática de forças agindo em um automóvel que trafega com aceleração constante no plano.

Com base na literatura consultada, a demanda por energia para o deslocamento deste veículo é obtida pela equação (2.1).

$$E_d = \left( a \cdot \frac{P}{g} + \mu \cdot P + \frac{1}{4} C_a A \cdot \rho \cdot v_f^2 \right) \cdot d \quad (2.1)$$

Onde:  $a$  é a aceleração do veículo [ $\text{m/s}^2$ ]

$\mu$  é o coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional)

$P$  é o peso do veículo [N]

$g$  é a aceleração da gravidade

$C_a$  é o coeficiente de resistência aerodinâmica do veículo (adimensional)

$A$  é a área da seção transversal do veículo [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  é a massa específica do ar [ $\text{kg/m}^3$ ]

$d$  é o deslocamento do veículo [m]

$v_f$  é a velocidade do veículo ao fim do deslocamento  $d$  [m/s]

Da equação (2.1) verifica-se que a demanda por energia ( $E_d$ ) é o produto da soma das forças de restrição ao movimento pela distância ( $d$ ) a ser percorrida pelo veículo o que caracteriza uma medida de trabalho. Também é possível verificar que  $E_d$  é diretamente proporcional a distância percorrida.

Ainda da equação (2.1) observa-se que  $E_d$  é diretamente proporcional às características construtivas do veículo como seu peso (peso vazio mais capacidade de carga), tamanho (área frontal), forma (coeficiente de resistência aerodinâmica) e tipo de contato entre o pneu e a pista (coeficiente de resistência ao rolamento). Neste último caso,  $E_d$  também é influenciada pelas características construtivas da via (rugosidade, elasticidade, condição de conservação etc).

Se considerado que a força  $P$  representa o peso total do veículo, como soma do peso vazio com a carga transportada,  $E_d$  é diretamente proporcional à utilização do veículo em termos de quantidade de carga ou passageiros transportados. Indiretamente, a variação do peso total causa variação na deformação dos pneus e no comportamento da força  $F_r$ .

Quanto maior a velocidade final, maior será a demanda por energia, tendo em vista o aumento da força de resistência aerodinâmica ( $F_a$ ) com o quadrado de  $v_f$ . Porém, praticamente não se observam alterações da demanda por energia em função da massa específica do ar, que apresenta faixa de variação limitada para condições normais de operação.

Expandindo os limites de aplicação do modelo, observa-se que a demanda por energia cresce com a necessidade de vencer aclives, pois uma componente de resistência ao

movimento adicional, criada pela decomposição do peso do veículo, terá que ser incluída na equação (2.1).

Se o veículo trafegar à velocidade constante, o termo  $a.P/g$  deixa de existir e a força de resistência aerodinâmica passa a ter o dobro de importância, pois o fator  $1/4$  passa a valer  $1/2$ , o que implica na recomendação de um limite de velocidade quando se pretende economizar energia. A supressão do termo  $a.P/g$  quando o veículo encontra-se trafegando a velocidade constante também indica que variações de velocidade com sucessivos trechos de aceleração devem ser evitados.

Em condições reais de operação condicionantes externas, como o regime de tráfego e a forma de condução adotada pelo motorista, impõem variações nos valores de aceleração e velocidade final na forma de um ciclo de tráfego.

Em síntese, a demanda por energia para o transporte rodoviário é uma função das variações de velocidade do veículo, regulada por parâmetros associados às características físicas do veículo e da via e condicionada ao ciclo de tráfego.

#### **2.4.2.Oferta de energia no transporte rodoviário**

A energia calculada pela equação (2.1) é aquela necessária nas rodas para impulsionar o veículo. No entanto, a transformação da energia estocada no veículo em trabalho está condicionada às características de funcionamento do equipamento de uso final e a oferta de energia ao veículo está diretamente relacionada ao sistema de propulsão.

Os sistemas de propulsão utilizados em veículos rodoviários podem ser classificados em dois grandes grupos; sistemas convencionais e sistemas não convencionais. Pode-se afirmar que os sistemas convencionais dominam o mercado, sendo compostos de um motor alternativo de combustão interna (MCI) e um sistema de transmissão mecânico (STM) (SAE, 1996; FAIZ *et al.*, 1996). Já os sistemas de propulsão não convencionais podem assumir três configurações básicas; motores de combustão e sistema de transmissão mecânica, motores elétricos e sistema de transmissão mecânica, também denominado de sistema de propulsão elétrico e sistemas de propulsão híbridos.

Na primeira configuração é possível encontrar motores de combustão externa (MCE – por exemplo do ciclo Rankine ou Stirling), ou motores de combustão interna rotativos

(MCR – motor Wankel ou turbinas a gás), conjugados com um sistema de transmissão mecânica semelhante ao utilizado pelo sistema de propulsão convencional. Na quase totalidade tratam-se de veículos experimentais ou de comercialização limitada.

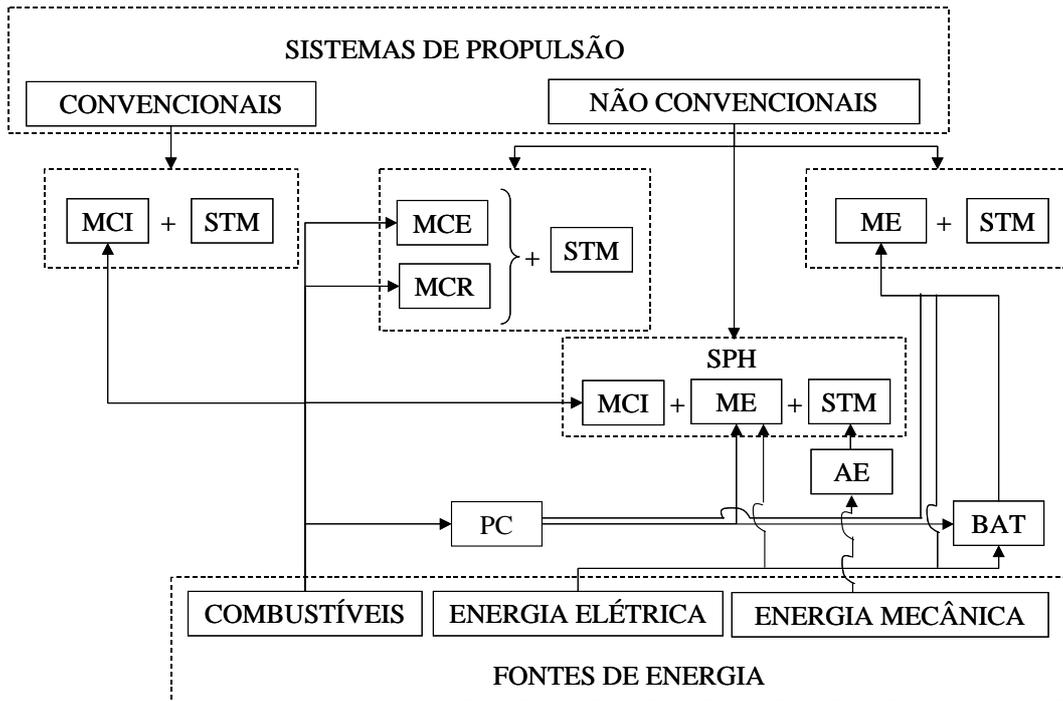
O sistema de propulsão elétrico utiliza motores elétricos (ME), onde a energia elétrica pode ser obtida de fonte externa ou interna ao veículo. No primeiro caso a energia é captada de uma rede de alimentação – como nos trolebus. No segundo caso a energia elétrica é obtida de baterias (BAT) ou de combustíveis, quando se usar uma pilha a combustível (PC).

Os sistemas de propulsão híbridos (SPH) podem assumir uma grande variedade de formas, porém, são mais freqüentemente uma conjugação de componentes do sistema de propulsão convencional e elétrico, arrançados em série (ambos funcionam simultaneamente em regime de operação otimizado) ou em paralelo (os sistemas funcionam alternativamente, com controle de melhor desempenho para cada um deles).

A Figura 2.5, apresentada a seguir, procura sintetizar estes conceitos além de destacar a origem da energia utilizada em cada um dos sistemas de propulsão. No caso do sistema de propulsão híbrido, representou-se também a possibilidade de utilização de energia mecânica estocada em um acumulador de energia (AE) e entregue diretamente ao sistema de transmissão (STM).

Independente do sistema de propulsão utilizado, é possível considerar um modelo para determinar a energia que está disponível para deslocamento do veículo. Não importa qual seja a forma da energia estocada no veículo ela deverá ser convertida em energia mecânica e transmitida para as rodas, o que pressupõem a existência dos sistemas de conversão e transmissão de energia. A Figura 2.6 ilustra este modelo.

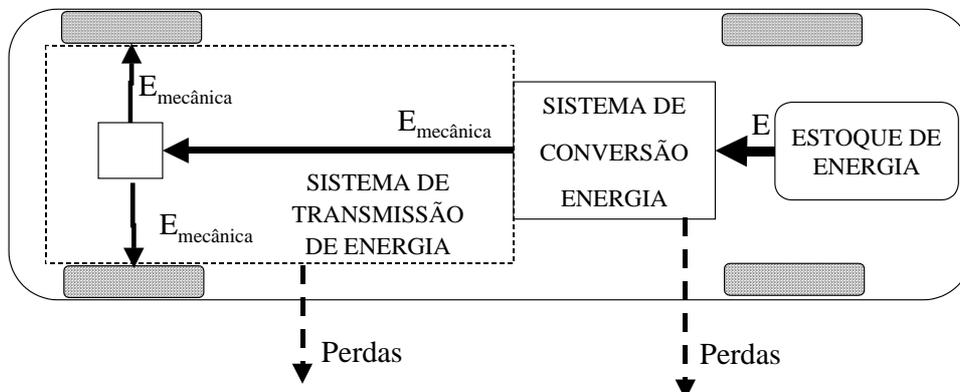
O sistema de conversão de energia é responsável por converter qualquer tipo de energia em energia mecânica. No sistema de propulsão convencional trata-se do MCI. O sistema de transmissão de energia é responsável por transmitir a energia mecânica até as rodas, por meio de acoplamento mecânico (embreagem, engrenagens, eixos, juntas etc), denominado de sistema de transmissão mecânica.



Legenda: MCI – motor alternativo de combustão interna, STM – sistema de transmissão mecânica, MCE – motor de combustão externa, MCR – motor de combustão rotativo, ME – motor elétrico, SPH – sistema de propulsão híbrido, AE – acumulador de energia, BAT – bateria, PC – pilha a combustível.

Fonte: elaboração própria.

Figura 2.5. Sistemas de propulsão para veículos rodoviários.



Fonte: elaboração própria.

Figura 2.6. Sistemas de conversão e transmissão de energia nos veículos rodoviários.

A partir deste modelo é possível calcular a energia que será fornecida as rodas para produzir o movimento desejado ( $E_{of}$ ) por meio da equação (2.2).

$$E_{of} = E - \sum Perdas \quad (2.2)$$

Onde:  $E$  é a energia estocada;

$\sum$ Perdas é a soma das perdas nos sistemas de conversão e transmissão de energia

Quanto menores forem as perdas, menor será a diferença entre a energia estocada ( $E$ ) e a energia efetivamente utilizada ( $E_{of}$ ). As perdas estão estreitamente associadas à fonte de energia utilizada (combustível, energia elétrica, energia mecânica) e a configuração do sistema de propulsão e a definição de seu valor só é possível após determinação deste par. Na prática as condições de operação também influenciam nas perdas, com menores valores num regime de funcionamento permanente, com poucas variações de velocidade.

### 2.4.3. Modelo de uso final de energia no transporte rodoviário

Se  $E_d$  é a demanda por energia nas rodas para que o veículo percorra o deslocamento  $d$  e  $E_{of}$  é a energia fornecida às rodas para produzir o movimento desejado, é possível igualá-las para elaborar o modelo de uso final de energia no transporte rodoviário, conforme expresso pela equação (2.3). O modelo mostra como a energia estocada ( $E$ ) se transforma na energia demandada ( $E_d$ ). Como indica a equação, esta transformação é sujeita às condições de operação.

$$E_d = E_{of} \quad \text{ou} \quad E = \left( a \cdot \frac{P}{g} + \mu \cdot P + \frac{1}{4} C_a A \cdot \rho \cdot v_f^2 \right) \cdot d + \sum \text{Perdas} \quad (2.3)$$

*Condições de Operação*

Os principais parâmetros e variáveis apresentados neste modelo são condicionados por fatores relacionados aos veículos quanto as suas características construtivas (projeto do veículo e projeto do sistema de propulsão), forma de conversão de energia (projeto do sistema de propulsão) e tipo de fonte de energia utilizada (projeto do sistema de propulsão e tecnologia disponível).

A distância a ser percorrida ( $d$ ) é uma variável determinante do uso final de energia relacionada ao planejamento dos transportes que já foi mencionada no item 2.2 deste capítulo. Além disso, o resultado da aplicação do modelo depende de condicionantes ligadas à operação do veículo que atuam direta ou indiretamente sobre a demanda por energia e perdas. A Tabela 2.1 procura sintetizar estas considerações.

Tabela 2.1. Síntese dos fatores de influência no modelo de uso final de energia.

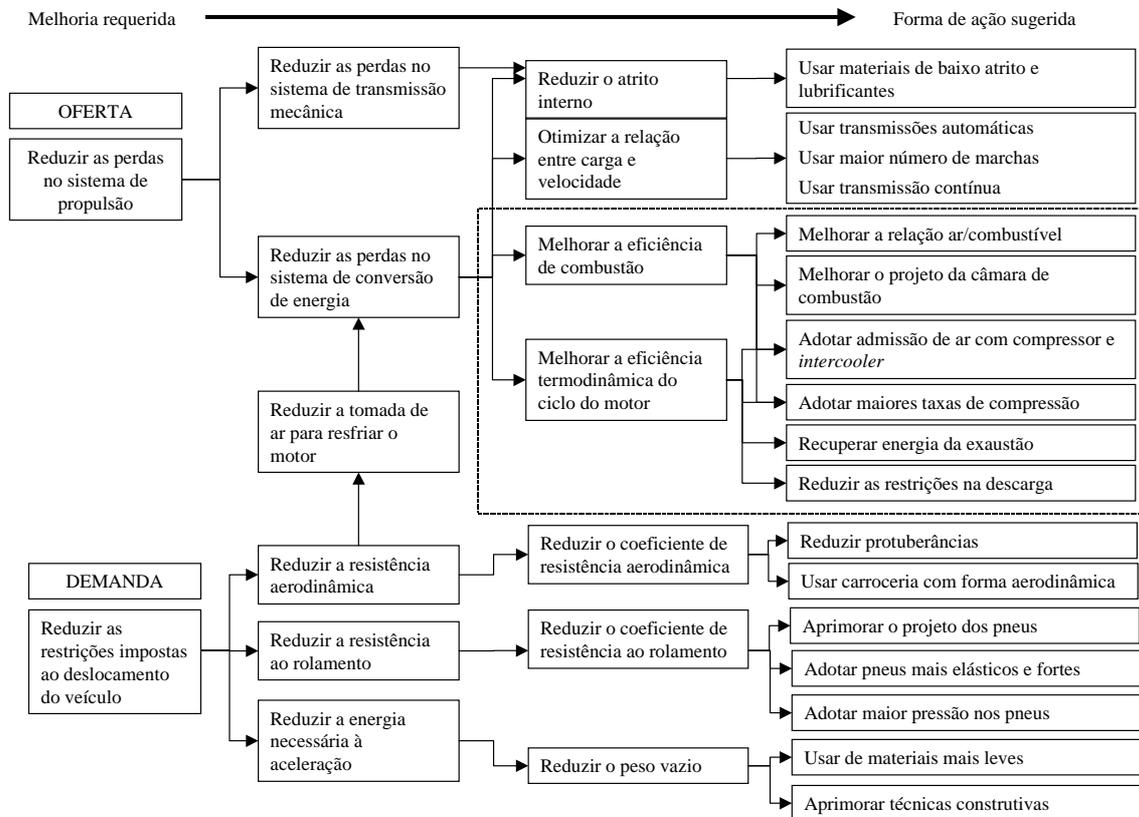
Componente	Parâmetro	Variáveis	Denominação	Condicionantes
Demanda por energia $E_d$	$P$		Peso total do veículo = peso vazio + capacidade de carga	Projeto do veículo, utilização
	$A$		Área da seção transversal do veículo	Projeto do veículo
	$C_a$		Coefficiente de resistência aerodinâmica do veículo	Projeto do veículo
	$\mu$		Coefficiente de resistência ao rolamento (pneu x pavimento)	Projeto do veículo, projeto e condição física da via
	$\alpha$		Inclinação da via ou rampa	Projeto da via
	$\rho$		Massa específica do ar	Condições climáticas
	$G$		Aceleração da gravidade	Posição geográfica
		$v_f$	Velocidade ao final da aceleração ou velocidade escolhida para tráfego	Projeto do veículo e do sistema de propulsão, projeto e condições da via, regime de tráfego, forma de condução
		$a$	Aceleração	Projeto do veículo e do sistema de propulsão, projeto e condições da via, regime de tráfego, forma de condução
		$D$	Distância percorrida	Planejamento do transporte
Oferta de energia $E_{of}$		$E$	Energia estocada ou disponibilizada para o sistema de propulsão	Projeto do veículo e do sistema de propulsão, tecnologia disponível
		$\sum$ Perdas	Soma das perdas no sistema de conversão e transmissão de energia	Projeto do veículo e do sistema de propulsão, tecnologia disponível

Fonte: elaboração própria.

O fluxograma apresentado na Figura 2.7 ajuda a compreender como é possível reduzir o uso final de energia no transporte atuando na oferta e na demanda por energia. Sua concepção original foi desenvolvida para veículos rodoviários leves de carga (furgões, vans e *pick ups*) com sistema de propulsão convencional (MCI + STM), porém, com exceção das ações contidas no retângulo tracejado, pode-se considerar que as demais ações se aplicam genericamente.

O peso do veículo ( $P$ ) é um parâmetro crítico para a economia de energia, sendo diretamente influenciado pelo projeto do veículo e pela tecnologia disponível. No que se refere ao projeto, a redução das dimensões dos veículos, tornando-os mais compactos, é uma forma efetiva de reduzir o peso vazio, desde que mantidos os padrões de segurança. Adicionalmente, a engenharia de valor estuda as partes e componentes dos veículos para reduzir sua quantidade. Dispondo-se de tecnologia para processamento de materiais, é

possível substituir o aço, matéria-prima tradicionalmente utilizada na fabricação dos componentes dos veículos, por alumínio e compostos plásticos mais leves.



Fonte: elaboração própria a partir de OECD/IEA (1993)

Figura 2.7. Fluxograma para redução do consumo de energia no transporte rodoviário.

O projeto do veículo determina a sua capacidade na forma da quantidade de passageiros ou de carga que o veículo é capaz de carregar. A utilização do veículo, isto é a relação entre a sua capacidade e o montante efetivamente transportado, é que determina o peso do veículo em operação. O aumento da carga proporciona um aumento aproximadamente linear no consumo de energia (BOUSTEAD e HANCOCK, 1979, RUBIN, 2001).

A redução na área da seção transversal e a forma do veículo podem diminuir a força de resistência aerodinâmica. O tamanho da seção transversal está intimamente associada ao tamanho do veículo e a forma determina o coeficiente de resistência aerodinâmica ( $C_a$ ). Em ambos os casos, o fator de influência preponderante é o projeto do veículo. Como a força de resistência aerodinâmica varia com a velocidade, a condição de operação também apresenta influência neste caso. Porém, em tráfego urbano, onde predominam

velocidades finais baixas, esta componente tem pouca influência.

A resistência ao rolamento pode ser reduzida por meio de aprimoramento das condições de contato do pneu com a pista. Neste caso, o uso de pneus de baixa resistência ao rolamento é uma medida utilizada. No entanto, o tipo de pavimento e o seu estado de conservação podem influenciar decisivamente este item.

O alinhamento vertical da via, que determinará sua inclinação está essencialmente associado ao projeto da via. Embora não apresentado anteriormente, o alinhamento horizontal também pode representar fonte de variação no consumo de energia, em função da necessidade de redução na velocidade de tráfego e aumento nas distâncias percorridas.

Do lado da oferta o principal parâmetro que afeta o uso final de energia são as perdas do sistema de conversão de energia, que estão associadas a sua eficiência, como será visto no Capítulo 4. Este parâmetro depende do projeto do veículo, mais especificamente do sistema de propulsão, da tecnologia disponível para fabricação do motor e da energia a ser empregada. Existe uma possibilidade restrita de aprimorar os MCI tendo em vista as limitações termodinâmicas naturais dos motores de combustão.

Dos demais sistemas de propulsão apresentados, o sistema de propulsão híbrido é o que apresenta melhor perspectiva de aplicação a curto (1 a 5 anos) e médio (5 a 15 anos) prazos, os demais dependem de desenvolvimento tecnológico adicional para representarem opções comercialmente viáveis.

As condições dinâmicas de operação, por meio das variáveis velocidade e aceleração, interagem estreitamente com os demais componentes para caracterizar o uso final de energia. O projeto do veículo e do sistema de propulsão determinarão a potência do motor (taxa de conversão da energia estocada em energia mecânica ao longo do tempo) e a sua capacidade de carga, a taxa máxima de aceleração e a velocidade máxima que o veículo poderá atingir.

Por outro lado, a forma de condução, imposta pelas condições de tráfego e dependente do comportamento do motorista, determina como a energia será transformada em trabalho a medida que o veículo trafega (ciclo de tráfego).

O modelo apresentado considera que o uso final de energia fica adequadamente caracterizado pelo equilíbrio das componentes oferta e demanda por energia, dada uma condição de operação. No próximo capítulo procura-se apresentar um melhor detalhamento das opções de fontes de energia para o transporte rodoviário em função dos sistemas de propulsão que apresentam melhores aplicações a curto (1 a 5 anos) e médio (5 a 15 anos) prazo, considerados como os parâmetros determinantes do consumo direto de energia.

## **CAPÍTULO 3 – FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO**

### **3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O principal objetivo deste capítulo 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 prováveis<sup>3</sup> 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.

---

<sup>3</sup> 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).

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.

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 o 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. <sup>(6)</sup>
	Óleo diesel	Refino do petróleo	Não renovável	Combustível para MCI de ignição por compressão (ICO) em sistema de propulsão convencional ou híbrido.
Alternativas <sup>(8)</sup>	Gasolina <sup>(1)</sup>	Processo petroquímico ou síntese	Não renovável	Idem gasolina convencional.
	Óleo diesel <sup>(2)</sup>	Processo petroquímico ou síntese a partir de gás natural ou carvão <sup>(3)</sup>	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 <sup>(6)</sup> .
	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 <sup>(6)</sup> .
	Metanol	Síntese química a partir do carvão ou do gás natural Fracionamento e destilação de biomassa (madeira), síntese química a partir do biogás	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 <sup>(4)</sup> . Utilização em pilha a combustível para tração elétrica <sup>(6)</sup> .
			Renovável	
	Etanol	Síntese química a partir de gás natural ou petróleo Processamento e destilação de biomassa (cana-de-açúcar, mandioca, milho etc)	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 <sup>(4)</sup> ou óleo diesel <sup>(5)</sup> . Utilização em pilha a combustível para tração elétrica <sup>(6)</sup> .
			Renovável	
	Óleos vegetais	Extração de óleo a partir de biomassa oleaginosa	Renovável	Combustível para MCI de ignição por compressão <sup>(7)</sup> (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. Eletrólise da água ou reforma de combustível renovável	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.	
		Renovável <sup>(9)</sup>		
Eletricidade	Geração hidrelétrica Geração termelétrica	Renovável	Utilização em sistemas de propulsão exclusivamente elétrico (elétrico com baterias ou captação em redes aéreas)..	
		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 <sup>(1)</sup>
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 carbono<sup>4</sup> (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.

<sup>4</sup> A Agência Nacional do Petróleo admite que as frações líquidas leves do petróleo que compõe a gasolina possam conter até 12 átomos de carbono (ANP, 2000).

No Brasil a Agência Nacional do Petróleo (ANP) por meio da Portaria n° 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 n° 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 n° 310 de 27/12/2001, consoante as disposições contidas no Regulamento Técnico ANP n° 06/2001, posteriormente retificado pela Portaria n° 130, de 13/08/2002 e n° 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.

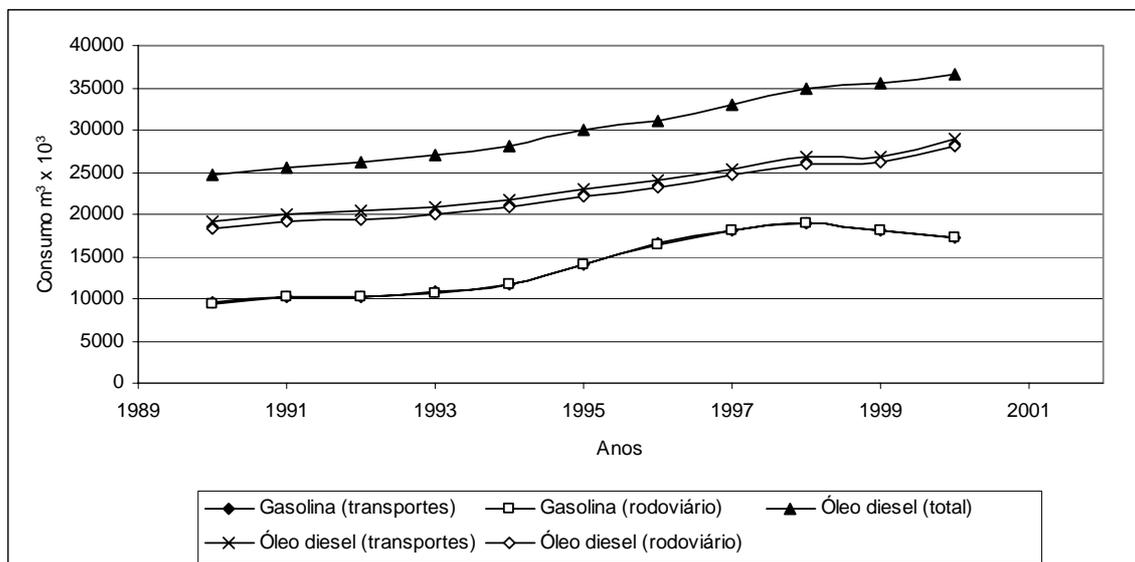
Tabela 3.3. Características físico-químicas relevantes da gasolina e do óleo diesel.

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 ano 2000 foram consumidos 1,702 bilhões de toneladas de petróleo pelo setor de transportes em todo o mundo (IEA, 2002). No Brasil, neste mesmo ano, cerca de 42 milhões de toneladas de petróleo se destinaram aos transportes, representando cerca de 48,5% do consumo nacional dessa fonte de energia (MME, 2002). Este percentual apresentou um crescimento de 0,6% no período de 1990 a 2000. No ano de 2001, de toda a energia consumida no setor de transportes brasileiro, 88% foram derivados de petróleo, dos quais a gasolina e o óleo diesel representam respectivamente 31,1% e 59,6% (MME, 2002). A Figura 3.1 apresenta a evolução do consumo de gasolina e óleo diesel no Brasil neste mesmo período.



Fonte: MME (2002).

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

Observa-se que o consumo de gasolina apresentou tendência de crescimento acentuado a partir de 1993, com um ponto máximo em 1998 estabilizando em torno dos 17 milhões de metros cúbicos ano. Toda a gasolina consumida se destinou ao setor de

transportes, sendo o modo rodoviário responsável, em média, por 99,5% do consumo ao longo do período analisado, sendo que o crescimento do consumo de gasolina de 1990 até 2000 foi de 81,41% (MME, 2002). Este crescimento em parte se deve à substituição do uso de álcool etílico hidratado combustível (AEHC) por gasolina.

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 50%. O transporte rodoviário apresentou o maior crescimento, 54% e consumiu 96,3% da parcela destinada aos transportes, que respondeu por 77,3% consumo total no período (MME, 2002).

Embora a produção nacional de petróleo em 2001 tenha sido de pouco mais de 75 milhões de metros cúbicos, houve a necessidade de importação de cerca de 24 milhões de metros cúbicos para suprir o consumo total desta fonte de energia, o que corresponde a cerca de 25,6% do consumo total ou 52,5% do consumo em transportes (MME, 2002). Além disso, aproximadamente 17% do óleo diesel consumido em 2001 foi importado, sendo que este percentual triplicou nos últimos 10 anos. Enquanto isso, as reservas provadas nacionais cresceram cerca de 80% no período de 1990 a 1999, a uma taxa média de 7% aa. Neste mesmo período o consumo cresceu 35,5% a uma taxa média de 3,1% aa e a produção cresceu 73% a uma taxa média de 7% aa (MME, 2002).

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 passageiro 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 bicombustível, 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 barcaças, 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.

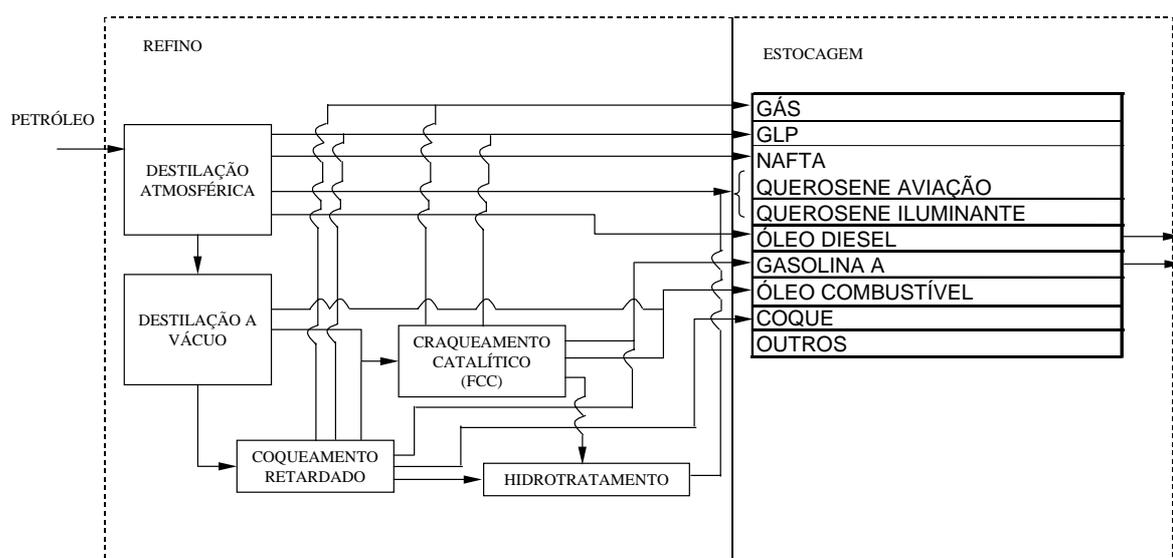
Em função da diversidade e complexidade dos processos encontrados numa refinaria optou-se por apresentar um esquema de refino básico (ANP, 2003b) capaz de considerar os processos elementares indispensáveis numa refinaria moderna, similares ao que se encontra no parque de refino brasileiro (MARIANO, 2001).

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 liqüefeito 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 posto 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 dispõem 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.

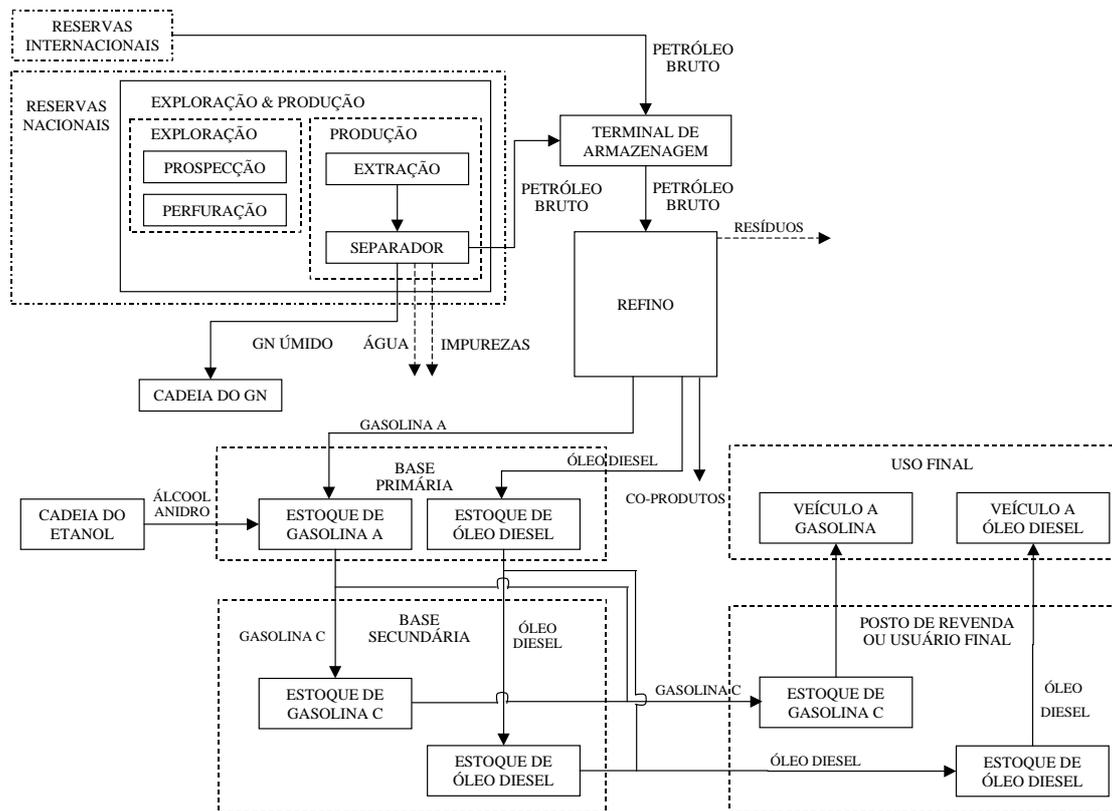
Tanto no caso da gasolina quanto do óleo diesel, seu armazenamento no veículo é feito por tanques, que têm formas e dimensões adequadas às necessidades operacionais e ao projeto dos veículos. Dependendo do tamanho, que é função da autonomia desejada, podem ser de material plástico, alumínio ou aço galvanizado.

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 estão amplamente dominados. 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 ( $\text{CH}_4$ ) (80% a 90%) e etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), que, à temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$  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 propano, o butano e o pentano. Dependendo da jazida, outros elementos como a água, o dióxido de carbono e o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 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 <sup>1</sup>	Não associado <sup>2</sup>	Processado <sup>3</sup>
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  $-162^{\circ}\text{C}$ , ao qual se denomina gás natural líquido (GNL). A experiência mundial com o uso de GNL é menor 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 crescimento de 13,5% aa 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 ancoras 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<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>) quanto no consumo de GNC (457 milhões m<sup>3</sup>), com os estados de Amazonas (2,7 bilhões de m<sup>3</sup>) e Bahia (2,0 bilhões de m<sup>3</sup>) 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  $-162^{\circ}\text{C}$ , 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).

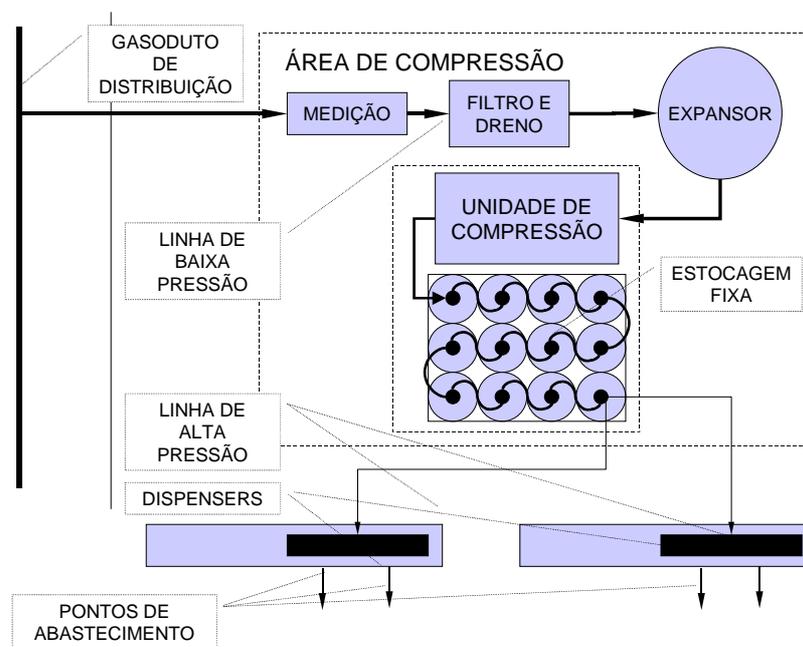
### *d) Distribuição*

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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/h é capaz de abastecer 100 automóveis ou 10 ônibus num período de 12 horas de trabalho (SOBRINHO, 1999).

#### *e) Uso final*

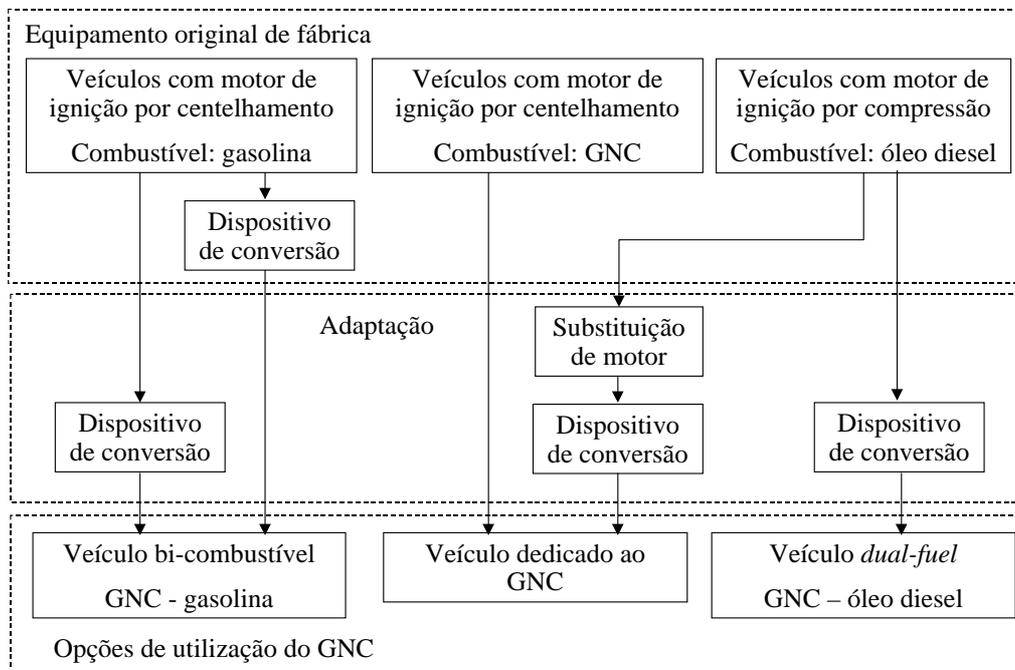
O GN é um combustível gasoso cujas propriedades químicas se adaptam bem a substituição dos combustíveis convencionais para motores alternativos de combustão interna que funcionam por meio de ignição por centelhamento, sejam motores de quatro tempos (ciclo Otto) ou motores de dois tempos. Na concepção 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 (CH<sub>4</sub>), 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.

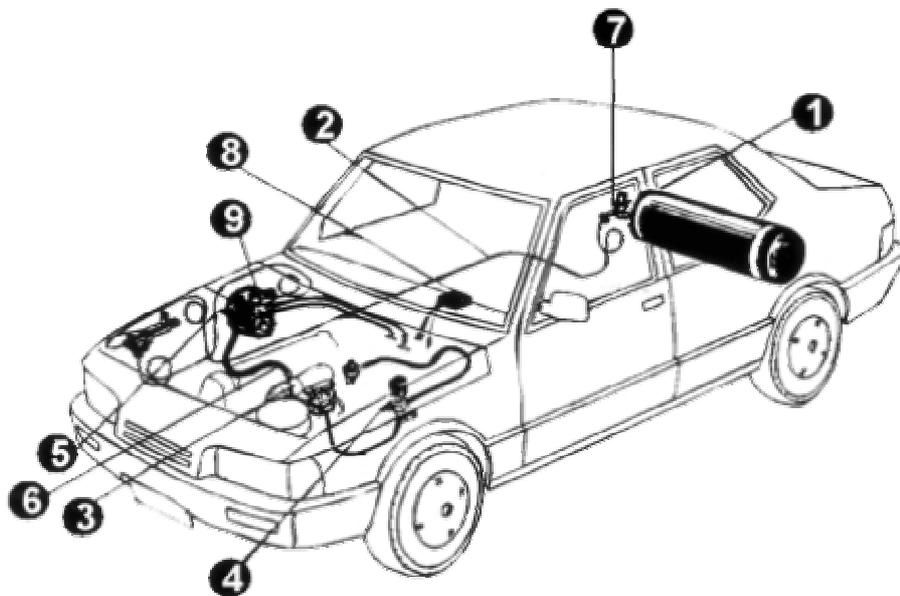


Fonte: elaboração própria.

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<sup>5</sup> 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 bicomustível, 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

---

<sup>5</sup> Este conceito será melhor detalhado no Capítulo 4.

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  $\eta_t$ <sup>6</sup>, 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 multiponto<sup>7</sup>.

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 lembrar, 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.

---

<sup>6</sup> Sendo:  $\eta_t = 1 - (1 / (r \cdot (k-1)))$ .

<sup>7</sup> 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.

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 hajam significativos melhoramentos a serem realizados nesta tecnologia.

Algumas características químicas do gás natural, como a quase totalidade da sua

composição de metano ( $\text{CH}_4$ ), 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.

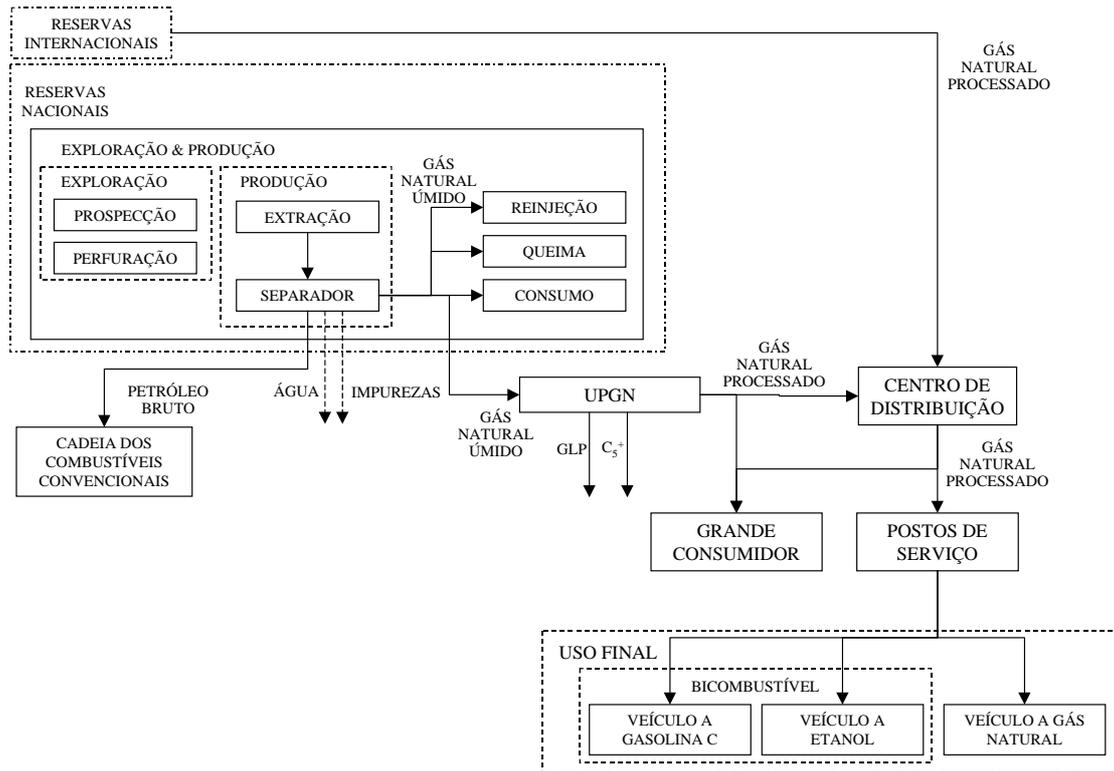
#### *3.2.2.2. Análise da cadeia de suprimento e uso final do GNC*

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 etanol<sup>8</sup> 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.

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,

<sup>8</sup> Alguns autores também denominam o produto, quando derivado de biomassa, de bioetanol (ACIOLI, 1994, MACEDO, 1999).

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 importava-se 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 infra-estrutura 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 OPEP<sup>9</sup>, 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 2001, o país produziu cerca de 11,4 bilhões de litros, sendo 62% deste volume no estado de São Paulo (MME, 2002, UNICA, 2001).

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 m<sup>3</sup>/ano (INFOENER, 2001,

---

<sup>9</sup> OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo. Integram a organização: Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait, Venezuela, Qatar, Indonésia, Líbia, Abu Dhabi, Bahrein, Argélia, Nigéria, Equador e Gabão.

MME, 2002). Além disso, utiliza-se álcool anidro, na proporção de 25%, como aditivo para a gasolina, o que representou em 2001 um consumo de 5,5 milhões de m<sup>3</sup> (MME, 2002). Nos últimos 22 anos registrou-se economia de 1,8 bilhão de dólares por ano com essa substituição (INFOENER, 2001).

Nos últimos 3 anos, a política de eliminação de subsídios provocou uma certa desorganização no mercado, exigindo a procura de um novo equilíbrio entre os diversos atores do cenário energético nacional. Atualmente, é baixa a produção de veículos novos a álcool, mas 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<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), 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<sub>11</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>), 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<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>), 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 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 colmos<sup>10</sup> são depositados e recobertos com terra. As gemas vegetativas<sup>11</sup> 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

---

<sup>10</sup> Segmento do caule das plantas gramíneas, situado entre a raiz e a espiga.

<sup>11</sup> Parte do vegetal suscetível de o reproduzir.

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).

#### *b) Produção do etanol*

Ao chegar na usina a cana-de-açúcar deverá ser moída em até de 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 de 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 do motor 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.

O próximo passo será o lançamento de um veículo com características de fábrica que seja *flexible-fuel* e bicombustível, capaz de utilizar etanol e gasolina ou GNC. A tecnologia já existe e a curto prazo estará disponível para comercialização (ITOKAZU, 2003). Adaptações já são possíveis e já se encontram em circulação no Rio de Janeiro veículos *flexible-fuel* que foram adaptados para uso de GNC.

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	
		Potência [cv]	109	105	
		Torque [kgfm]	18,2	17,3	
Palio 1.3 8v Flexfuel	Fiat	Rendimento em tráfego urbano [km/l]	Não divulgou	Não divulgou	11:1
		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 CO<sub>2</sub>, 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<sub>x</sub>) 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).

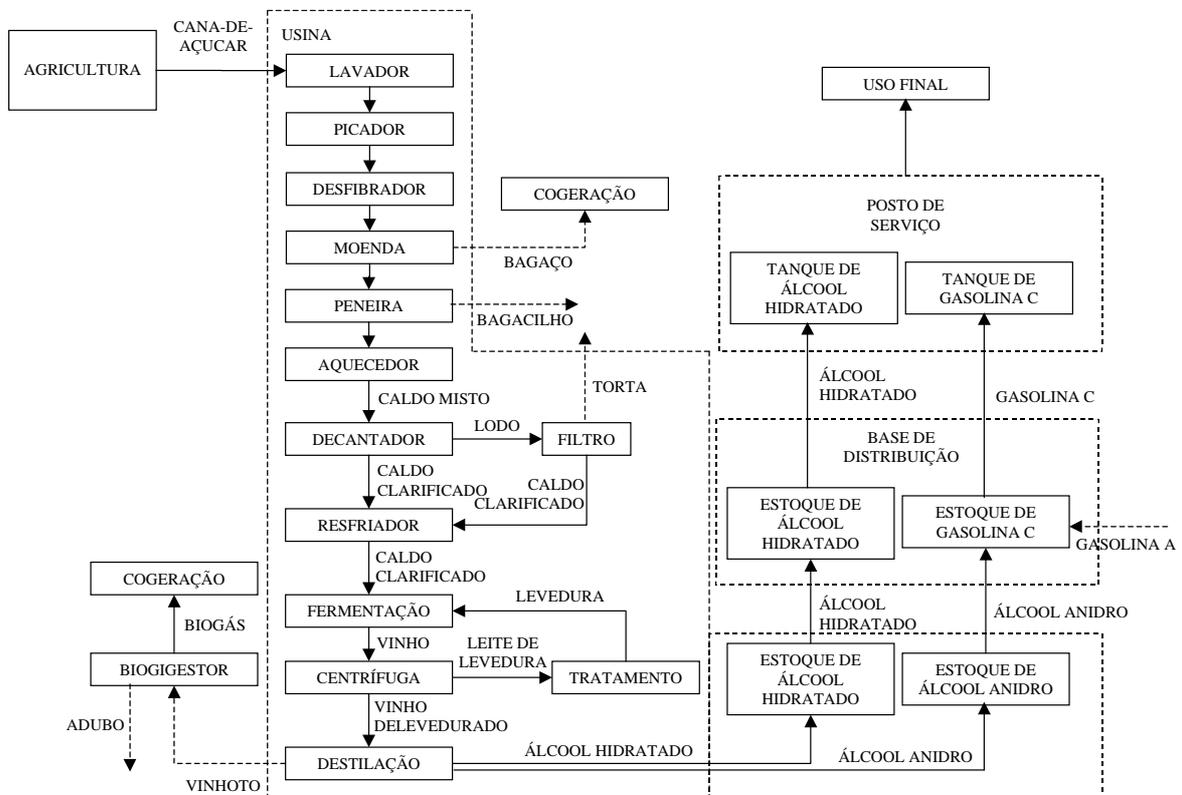
### 3.2.3.2. Análise da cadeia de suprimento e uso final do etanol

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 6.000 m<sup>3</sup> 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 Etílico de Óleo de Soja; EEOR – Éster Etílico 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 CO<sub>2</sub> (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 <sup>1</sup>
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 <sup>1</sup>	No Brasil existem 17 milhões de hectares onde predomina a palmeira de babaçu
Residuais	Óleo residual de fritura	30.000 t <sup>2</sup>	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).

O Brasil e os Estados Unidos são os dois maiores produtores mundiais de soja. A safra brasileira de soja atingiu em 2002 cerca de 41 milhões de toneladas, das quais 22 milhões foram destinadas ao esmagamento para produção de óleo. No período de 1993 a 2001 a taxa média de crescimento da safra foi de 8,6% ao ano. Considerando o potencial instalado de esmagamento em cerca de 32,4 milhões de toneladas, verifica-se a possibilidade de crescimento de 47% na produção de óleo, em detrimento das exportações de grãos. Parte deste excedente de óleo poderia ter sido transformado em 1,96 milhões de toneladas de biodiesel, ou cerca de 2,23 milhões de litros considerando um investimento inicial estimado de US\$ 100 milhões. Num cenário de crescimento médio, a produção de biodiesel poderia atingir cerca de 8,5 milhões de litros em 2012 (FERRÉS, 2001).

A produção brasileira de soja se concentra nas regiões Centro-Oeste (47%) e Sul (40%), com metade da produção de óleo concentrada na região Sul e um quarto na região Centro-Oeste. Relativamente menores percentuais de produção de soja e de óleo se verificam nas região Sudeste, onde se localizam os grandes centros de consumo de combustíveis<sup>12</sup> (ANP, 2002).

Assim sendo, para conciliar a produção de biodiesel a partir de óleos residuais de fritura, disponível nos centros urbanos, com aproveitamento do excedente de óleo de soja, duas possibilidades podem ser contempladas: (1) o consumo de biodiesel sendo realizado prioritariamente nos centros urbanos das regiões onde ocorrem as maiores produções de soja e óleo ou (2) a produção do óleo nas regiões Sul e Centro-Oeste e seu transporte para a região Sudeste.

---

<sup>12</sup> Em 2001 cerca de 45% do consumo brasileiro de óleo diesel ocorreu na região Sudeste e 20% na região Sul. A região Centro-Oeste foi responsável por cerca de 12% (ANP, 2002).

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).

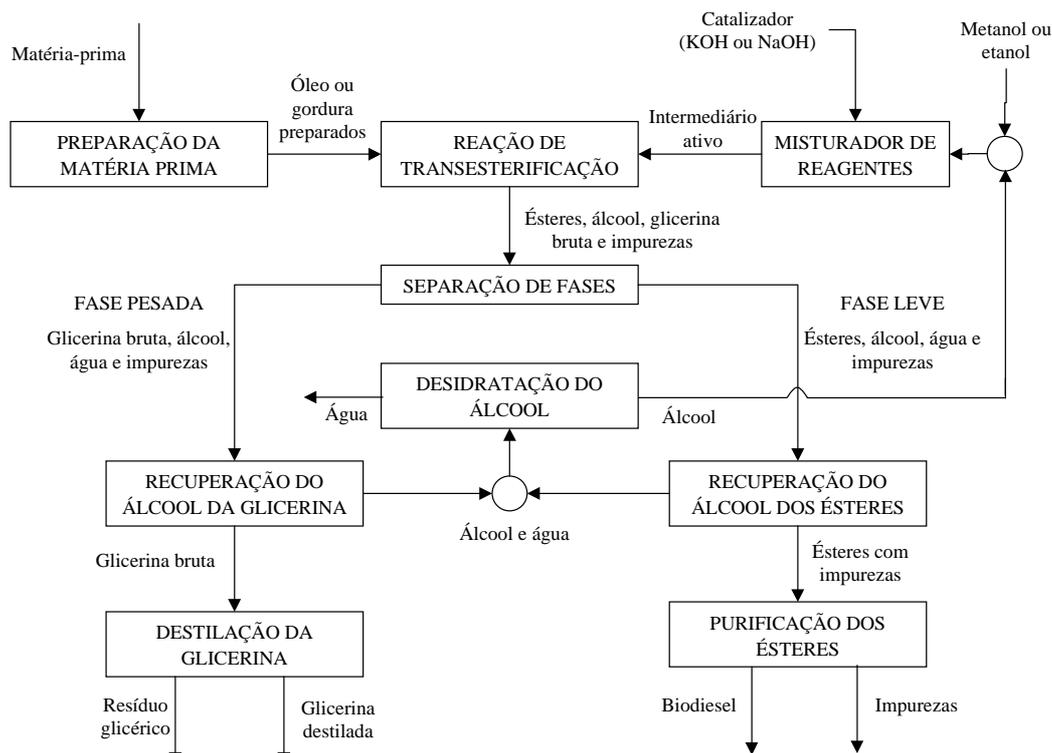
No caso dos insumos residuais, pode ser necessário extrair o óleo, como no caso dos óleos e gorduras animais, o que é feito aplicando-se água e vapor (PARENTE, 2003). O processamento das matérias graxas de esgoto ainda está em fase de pesquisa e

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	
	Metílica	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 azeotropismo<sup>13</sup> 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,

---

<sup>13</sup> 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.

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 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 separado 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-scrap*, 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 veículo 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 e 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, apresenta-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<sub>x</sub> 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.

- ◆ NO<sub>x</sub> –  $y = 0,0889x$  ( $R^2 = 0,6616$ )
- ◆ MP –  $y = -0,6807x$  ( $R^2 = 0,9722$ ) – MP é MP10
- ◆ CO –  $y = -0,4623x$  ( $R^2 = 0,9254$ )
- ◆ 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.

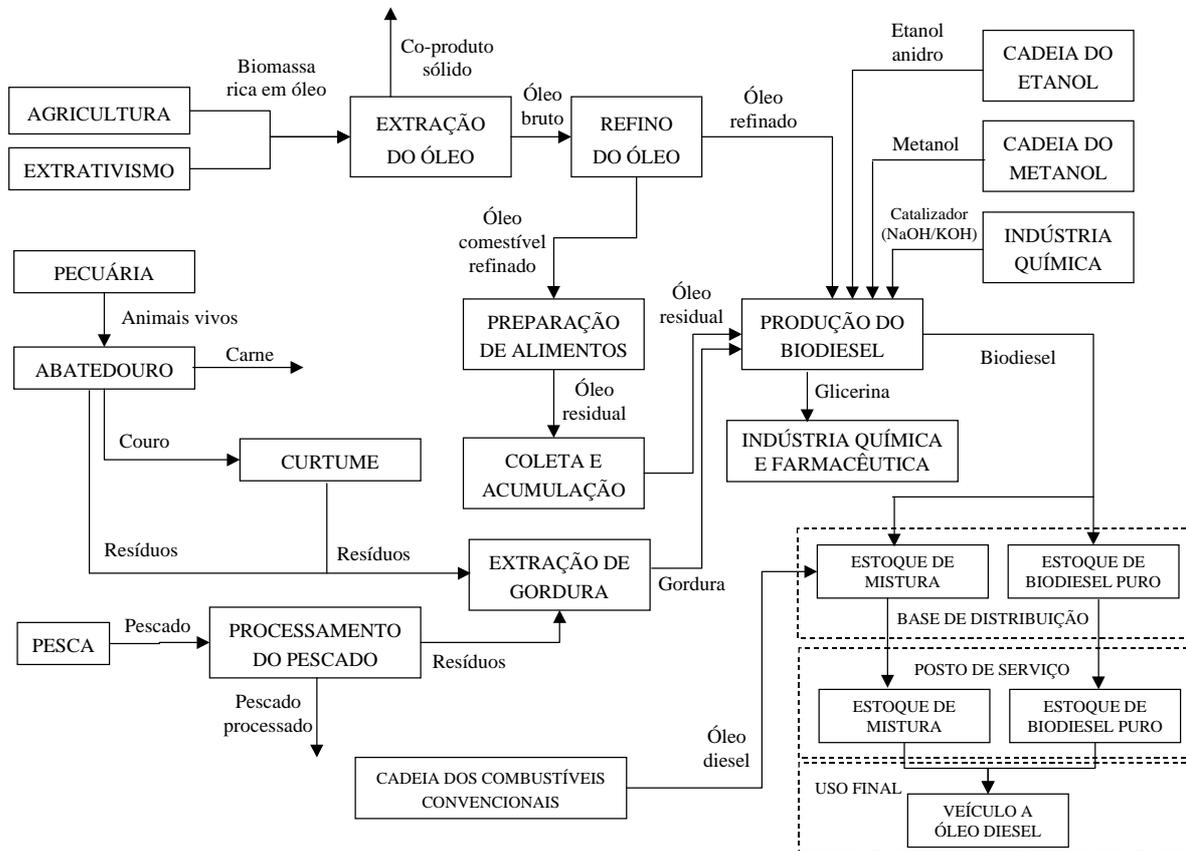
Verifica-se que o modelo explica bem o caso do MP e do CO ( $R^2 > 0,7$ ), porém não explica bem o caso do NO<sub>x</sub> e ainda menos o caso do HC (hidrocarbonetos não metano). No caso destes dois últimos poluentes, é possível que a curva siga uma tendência exponencial, com maiores variações para menores 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 Comlub (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.

O CENPES (Centro de Pesquisa da Petrobras) está desenvolvendo um método para fabricação de biodiesel diretamente a partir de sementes oleaginosas, sem necessidade do processo de extração de óleo, o que pode significar um ganho em termos de custo. A planta piloto será implantada no Nordeste e pretende-se produzir biodiesel a partir da

mamona.

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.

## CAPÍTULO 4 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ECOEFICIÊNCIA

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo parte-se do conceito de eficiência de uma atividade produtiva para, a seguir, apresentar suas aplicações na determinação da eficiência energética de um processo. A aplicação destes conceitos à cadeia de suprimento e uso final de energia no transporte rodoviário faz parte dos objetivos principais desta tese.

O entendimento da eficiência de um processo pode ser ampliado, caracterizando o conceito de ecoeficiência, que também leva em conta aspectos relacionados aos impactos ambientais da atividade produtiva e ajuda a identificar formas de promoção do desenvolvimento sustentável, atendendo aos objetivos gerais do trabalho.

### 4.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM PROCESSO

O termo eficiência vem do latim *efficientia* e está relacionado à ação, força ou virtude de produzir um resultado. A palavra aparece como sinônimo de eficácia, que considera a produção de um efeito desejado (FERREIRA, 1999). Na prática estes dois termos têm sentido diferenciado, porém, a chave para sua compreensão está na relação recursos e produtos.

No presente estudo, o termo processo deve ser entendido como atividade produtiva, ou seja: a maneira pela qual se realiza uma operação, segundo determinadas normas, métodos e técnicas (MARTINS e LAUGENI, 1999). Um processo é um conjunto de atividades que transforma recursos em produtos. Neste contexto, o termo processo tem sentido semelhante a operação industrial ou processo industrial encontrado em BOUSTEAD e HANCOCK (1979).

É usual que o conceito de eficácia esteja associado à obtenção do resultado desejado tendo sido empregados os recursos disponíveis, não sendo necessário que se determine a dimensão dos recursos ou do resultado produzido. Para determinação da eficiência usa-se uma medida de produtividade, também denominada de eficiência produtiva ( $\pi$ ), dada pela equação (4.1) (MARTINS e LAUGENI, 1999).

$$\pi = \frac{\text{Produtos}}{\text{Insumos}} \quad (4.1)$$

Entende-se que os produtos sejam os resultados desejados da atividade produtiva, normalmente bens ou serviços, enquanto os insumos são uma combinação de recursos, tais como: matérias-primas, recursos naturais, horas trabalhadas, capital, energia etc.

Os conceitos apresentados anteriormente podem ser formalizados como se segue: seja  $AP$  um processo capaz de produzir um conjunto de  $n$  produtos  $PD_i$ , com  $i$  ( $1...n$ ). Para que isso ocorra é necessário que se apliquem  $m$  insumos  $IS_j$ , com  $j$  ( $1...m$ ). A eficiência produtiva de  $PD_i$  em relação a  $IS_j$  ( $\pi_{i,j}$ ) é dada pela equação (4.2).

$$\pi_{i,j} = \frac{QT_{PD_i}}{QT_{IS_j}} \quad (4.2)$$

Onde:  $QT_{PD_i}$  - quantidade produzida do produto  $i$ ;

$QT_{IS_j}$  - quantidade consumida do insumo  $j$ .

Analogamente é possível formalizar a eficiência produtiva de  $PD_i$  em relação a todos os insumos necessários ao processo (equação (4.3)) e a eficiência produtiva total do processo (equação (4.4)) como:

$$\pi_{i,m} = \frac{QT_{PD_i}}{\sum_{j=1}^m QT_{IS_j}} \quad (4.3)$$

$$\pi_{n,m} = \frac{\sum_{i=1}^n QT_{PD_i}}{\sum_{j=1}^m QT_{IS_j}} \quad (4.4)$$

Enquanto a equação (4.2) pode ser aplicada à qualquer processo onde seja possível quantificar produtos e insumos, as equações (4.3) e principalmente a (4.4) só se aplicam se for possível identificar uma base comum para quantificar produtos e insumos. Usualmente esta base é monetária, porém, nem sempre uma aplicação generalizada faz sentido.

Conceituar eficiência como uma medida de produtividade, assim como formalizado nas equações (4.1) a (4.3), permite que se determine quantitativamente o seu valor de forma coerente com a noção intuitiva de que quanto maior a eficiência de um processo melhor.

Para a grande maioria dos processos industriais a energia é um dos principais insumos, sendo seu emprego amplamente estudado e tornando-se necessário seu relacionamento com os produtos oriundos desta atividade.

A Figura 4.1 apresenta um processo, onde se observam fluxos de insumos e produtos ( $PD_i$ ), destacando-se os fluxos de energia ( $E_j$ ). Quando considerada como um dos insumos do processo industrial a energia pode ser quantificada de diferentes maneiras, sendo muito comum que se determine sua quantidade em termos da massa de combustível utilizado, tratando-se invariavelmente de um processo contábil.

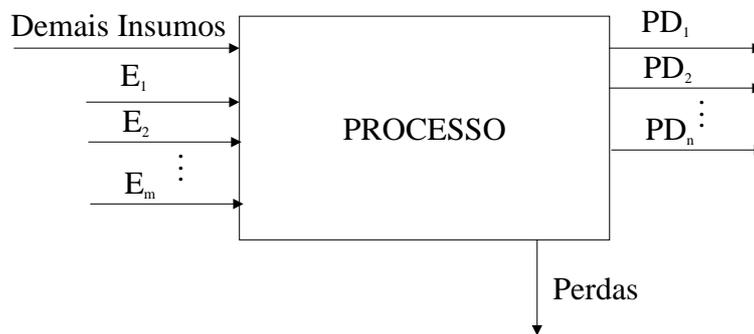


Figura 4.1. Descrição esquemática de um processo.

A eficiência energética a ser determinada diz respeito à produtividade do insumo energia, relacionando os produtos, ou o principal produto, com o consumo total de energia. Neste caso é possível utilizar diretamente uma expressão similar à equação (4.3).

$$\pi_{i,E} = \frac{QT_{PD_i}}{\sum_{j=1}^n E_j} \quad (4.5)$$

Onde:  $QT_{PD_i}$  - quantidade do produto  $i$ ;

$$\sum_{j=1}^n E_j - \text{somatório de todas as } m \text{ contribuições do insumo energia.}$$

Neste caso, a quantidade do produto  $i$  pode ser expressa da forma que se considerar mais conveniente, como por exemplo: massa, volume, unidades, valor monetário etc, enquanto a energia fornecida ao processo deve ser toda convertida em uma mesma unidade para que possa ser somada.

Eventualmente pode ser desejável que se determine a eficiência de um dos componentes do insumo energia em relação à algum produto em particular, empregando-se equação derivada da equação (4.2). Por outro lado, desde que se possa quantificar todos os produtos em uma base comum, como por exemplo em função da massa, é possível determinar a eficiência do insumo energia em relação a soma das quantidades de todos os  $n$  produtos, sendo empregada equação similar à equação (4.4).

Uma vez que o processo industrial seja conhecido, a eficiência do insumo energia só depende da realização apurada do inventário de insumos e produtos. Neste caso, não se deve esquecer que o processo está sujeito às leis da física e deve-se considerar a lei da conservação de massa e a lei da conservação de energia.

Como os processos de conversão de energia podem ser considerados como processos industriais particulares, onde tanto o insumo como os produtos são formas de energia, é comum que a equação (4.5) assuma uma expressão particular, na forma:

$$\eta_1 = \frac{E_S}{E_E} \quad (4.6)$$

Onde:  $E_S$  – energia que sai do sistema

$E_E$  – energia que entra no sistema

Os conceitos apresentados até o momento permitem a análise da eficiência energética de um processo, seja ele de conversão ou de uso final de energia. Porém, considerando que a energia é um recurso natural e que dependendo da sua fonte pode ser um recurso esgotável, cujo uso acarreta impactos ambientais indesejáveis, procurou-se ampliar o conceito de eficiência energética de forma que ele pudesse considerar estes aspectos.

### **4.3.ECOEFICIÊNCIA**

O conceito de ecoeficiência, introduzido pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (*World Business Council for Sustainable Development – WBCSD*), no Relatório para a Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento do Meio Ambiente, no Rio de Janeiro, em 1992, envolve a determinação de indicadores para a quantificação da eficiência econômica e ambiental de empreendimentos. Numa visão ampla, estes empreendimentos podem ser entendidos como atividades produtivas ou processos.

A evolução dos indicadores de ecoeficiência, ao longo do tempo, permite identificar, em uma determinada situação econômica, o uso mais eficiente dos recursos naturais e a menor incidência de impactos ambientais.

Muitas empresas em todo o mundo têm procurado maneiras de reduzir os impactos de suas atividades no meio ambiente à medida em que continuam a se desenvolver de uma forma sustentável. Embora estes agentes tenham buscado formas particulares de quantificar a ecoeficiência, a experiência internacional indica que já se dispõe de um conjunto de indicadores de ecoeficiência (eficiências econômica e ecológica) que pode ser facilmente adaptado para um grande número de casos.

O WBCSD (2000) determinou um conjunto comum de definições, princípios e indicadores, largamente empregados e flexíveis o suficiente para serem utilizados na maior parte das atividades de produção de bens e serviços. A Tabela 4.1 apresenta como determinar a ecoeficiência, um conjunto de elementos chave para aprimorar a ecoeficiência de uma atividade produtiva e os princípios que garantem que os indicadores recomendados e a forma de sua obtenção sejam cientificamente justificáveis, relevantes para o meio ambiente, precisos e úteis.

Tabela 4.1.Considerações sobre ecoeficiência.

Forma de determinação	Definição de indicadores capazes de medir o desenvolvimento de uma atividade produtiva de maneira ambientalmente sustentável, de modo a atender as necessidades humanas e promover a qualidade de vida, enquanto reduz progressivamente os impactos ambientais e a intensidade do consumo de recursos naturais considerando a capacidade ambiental do planeta.
Elementos chave	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reduzir a intensidade do uso de matéria-prima;</li> <li>2. Reduzir a intensidade do uso de energia;</li> <li>3. Reduzir a emissão de substâncias tóxicas;</li> <li>4. Reduzir o uso de recursos não renováveis;</li> <li>5. Aumentar a capacidade de reciclagem;</li> <li>6. Aumentar o uso de recursos renováveis;</li> <li>7. Aumentar a duração do produto final;</li> <li>8. Aumentar a utilidade do serviço.</li> </ol>
Princípios para determinação dos indicadores	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ser relevante e significativo quanto à proteção do meio ambiente, a saúde humana e aprimoramento da qualidade de vida;</li> <li>2. Informar os gestores como melhorar o desempenho da atividade produtiva;</li> <li>3. Reconhecer a diversidade de cada atividade produtiva em particular;</li> <li>4. Amparar a elaboração de metas e o seu monitoramento;</li> <li>5. Ser claramente definido, capaz de ser medido, ter transparência e ser criticável;</li> <li>6. Ser compreensível e significativo a todos os grupos interessados na atividade produtiva (internos e externos);</li> <li>7. Ser baseado numa avaliação da atividade produtiva incluindo produtos e/ou serviços;</li> <li>8. Reconhecer impactos relevantes da atividade produtiva no meio externo.</li> </ol>

Fonte: elaboração própria a partir de WBCSD (2000) e OECD (1997).

A identificação destes indicadores é uma etapa muito importante, uma vez que a meta da ecoeficiência é aprimorar o desempenho de um empreendimento e monitorar sua evolução, por meio de dados que sejam transparentes, capazes de serem obtidos e que possam ser transformados em informações significativas tanto para gestão interna da atividade produtiva como para informar agentes externos interessados.

Para a avaliação dos indicadores de ecoeficiência o WBCSD (2000) propõe uma estrutura com três níveis para organização dos dados: categorias, aspectos e indicadores. Essa proposição é consistente com a terminologia utilizada nas normas ISO 14.000 e já foi escolhida para possibilitar a integração do conceito de ecoeficiência no processo de certificação ambiental das atividades produtivas.

As categorias são grandes áreas de impacto no meio ambiente onde a atividade produtiva se desenvolve. Cada categoria tem um conjunto de aspectos, definidos como a forma de manifestação dos dados à ela relacionados. Os aspectos descrevem o que deve ser medido. Indicadores são as medidas específicas de um aspecto individual e têm a finalidade de demonstrar desempenho. Um aspecto pode ter vários indicadores.

De um modo geral, pode-se identificar três categorias básicas para a classificação dos indicadores de ecoeficiência: (1) Valor do produto ou serviço; (2) Impacto ambiental da geração do produto ou serviço – cadeia de suprimento e (3) Impacto ambiental do uso do produto ou serviço – uso final.

Segundo o WBCSD (2000), um conjunto de indicadores de ecoeficiência, apresentados na Tabela 4.2, foi identificado como válido para qualquer tipo de atividade. Estes indicadores de aplicação geral devem atender a quatro critérios de aplicação: (1) Serem relacionados a uma preocupação ambiental global; (2) Serem relacionados com o resultado da atividade produtiva; (3) Serem relevantes e representativos para a maioria das atividades produtivas e (4) Apresentarem métodos de medição estabelecidos e definições aceitas no mundo todo.

Tabela 4.2. Conjunto de indicadores de aplicação geral

Categoria	Indicador
Valor do produto ou serviço	Quantidade de produto ou serviço disponível
	Receitas líquidas
Impacto ambiental da geração do produto ou serviço	Consumo de energia
	Consumo de matéria-prima
	Consumo de água
	Emissão de gases de efeito estufa
	Emissão de substâncias que agredem a camada de ozônio

Fonte: WBCSD (2000).

Existe um consenso de que os indicadores do impacto ambiental do uso do produto ou serviço não são de aplicação geral. Neste caso, deve-se determinar um outro conjunto de indicadores a ser definido e utilizado de modo a atender um contexto particular, estes são chamados de indicadores de aplicação específica. O trabalho do WBCSD (2000) estabelece os indicadores de ecoeficiência de aplicação geral e proporciona um guia para a seleção dos indicadores de ecoeficiência de aplicação específica.

Recomenda-se que todos os envolvidos em medir ecoeficiência colem e processem indicadores de aplicação geral, porém, estes indicadores individualmente podem não compor de forma adequada todas as medidas de ecoeficiência do empreendimento.

Deve-se combinar os indicadores de aplicação geral com um grupo de indicadores de aplicação específica de modo a obter medidas de ecoeficiência que permitam traçar um perfil do desempenho do empreendimento. A Tabela 4.3, apresenta uma lista selecionada de categorias, aspectos e indicadores.

A determinação das medidas de ecoeficiência se dá por meio da determinação da razão entre os indicadores de valor do produto ou serviço e de impacto ambiental (produção ou uso final do produto/serviço), caracterizando uma relação entre insumos e produtos, típica de uma medida de eficiência produtiva (equação (4.1)), conforme descrito na equação (4.7)

$$\text{Medida de Ecoeficiência} = \frac{\text{Indicador do Valor do Produto ou Serviço (Produtos)}}{\text{Indicador do Impacto Ambiental (Insumos)}} \quad (4.7)$$

Tabela 4.3. Indicadores selecionados, relacionados a categorias e aspectos

Categoria	Aspecto	Exemplo de Indicador	Unidade
Valor do produto ou serviço	Volumétrico	Unidades vendidas	[unid]
		Volume vendido	[unid]
		Espaço ocupado	[m <sup>3</sup> ]
		Empregados	[pessoas]
Valor do produto ou serviço	Mássico	Horas trabalhadas	[h]
		Quantidade produzida	[t]
		Quantidade vendida	[t]
		Quantidade produzida	[t]
Valor do produto ou serviço	Monetário	Vendas líquidas	[\$]
		Margem bruta	
		Receitas	
		Provisões e Reservas	
Valor do produto ou serviço	Funcional <sup>1</sup>	Investimentos	
		Custos	
		Performance do produto	[ciclos]
		Serviços executados	[unid]
Impacto ambiental da geração do produto ou serviço	Energia	Durabilidade do produto	[h]
		Capacidade de transporte	[t.km]
			[pass.km]
Impacto ambiental da geração do produto ou serviço	Material	Energia total	[GJ]
		Energia Renovável	[GJ]
		Combustíveis fósseis	[tEP]
		Emissão de GEE	[Gg]
Impacto ambiental da geração do produto ou serviço	Emissões	Matéria prima	[t]
		Material de consumo	
		Embalagem	
		Material venenoso	
Impacto ambiental da geração do produto ou serviço	Recursos naturais	Matéria prima renovável	
		Emissões atmosféricas	[t]
		Resíduos sólidos	
		Água	[t]
Impacto ambiental do uso do produto ou serviço	Energia	Ar	[m <sup>3</sup> ]
		Espaço (uso da terra)	[ha]
		Energia total	[GJ]
		Energia Renovável	[GJ]
Impacto ambiental do uso do produto ou serviço	Emissões	Combustíveis fósseis	[tEP]
		Emissão de GEE	[Gg]
		Emissões atmosféricas	[t]
		Resíduos sólidos	

Nota: 1 - O aspecto funcional descreve o valor funcional do produto ou serviço para o usuário final. Desse modo este aspecto costuma estar associado a indicadores de aplicação específica, adequados para produtos e serviços particulares.

Fonte: WBCSD (2000).

O conceito de ecoeficiência é útil para ampliar o conceito de eficiência energética, acrescentando uma conotação adequada à análise dos impactos ambientais decorrentes do uso da energia, principalmente no caso de insumos não renováveis, como os combustíveis fósseis. Neste sentido, as medidas de ecoeficiência devem se sustentar nos seguintes elementos chave: (1) Reduzir a intensidade do uso de energia; (2) Reduzir a emissão de substâncias tóxicas; (3) Reduzir o uso de recursos energéticos não

renováveis; (4) Aumentar o uso de recursos energéticos renováveis; (5) Aumentar a capacidade de reciclagem; (6) Aumentar a intensidade do serviço de transporte.

A aplicação de medidas de ecoeficiência na gestão das atividades produtivas pressupõem o acompanhamento da evolução das medidas como forma de obter melhoria contínua. Isso é possível por meio da definição de metas de ecoeficiência, que são medidas de ecoeficiência tomadas como referência.

#### **4.4.APLICAÇÃO DO CONCEITO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA À CADEIA DE SUPRIMENTO E USO FINAL DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO**

Este item tem a finalidade de apresentar como o conceito de eficiência é usualmente empregado para analisar a cadeia de suprimento e uso final de combustíveis no transporte rodoviário. Procurou-se também apresentar valores numéricos encontrados na bibliografia consultada, sempre que possível destacando como estes valores foram obtidos.

De acordo com o objetivo deste trabalho, os exemplos apresentados limitam-se às opções consideradas aplicáveis ao Brasil: gasolina, óleo diesel, etanol, gás natural e biodiesel.

##### **4.4.1.Cadeia de suprimento**

O trabalho de SLESSER (1978) considera os aspectos relacionados à eficiência energética na conversão de energia a partir da definição do conceito de energia requerida para produzir energia, a qual denomina de ERE. Segundo este autor, a determinação da ERE deve considerar não apenas a energia bruta (EB) necessária para produzir a energia final (F), própria para uso, como também a energia bruta consumida em todos os insumos ( $EB_I$ ) necessários para o processo produtivo, sejam eles insumos de operação ou insumos de capital (prédios, equipamentos, máquinas etc). A partir destas considerações SLESSER (1978) sugere uma forma de determinar ERE como a seguir.

$$ERE(F) = \frac{EB + EB_I}{F} \quad (4.8)$$

A medida do ERE pode ser considerada como o inverso da eficiência do insumo energia ( $ERE = 1/\pi_E$ ), considerando todos os fluxos de energia que contribuem para o processo de conversão de energia em estudo. O autor não apresenta exemplos de valores de ERE que pudessem ser reproduzidos neste trabalho, porém, destaca a importância da completa caracterização da cadeia em estudo, tendo em vista as enormes diferenças de eficiência energética que podem ser encontradas em função de diferentes origem de insumos e da abrangência da análise. Como exemplo cita que a eficiência energética de extração de petróleo no Meio Oeste Norte Americano na época era de 99,99%, após o refino a eficiência caía para cerca de 87%. O transporte deste petróleo em navios tanque de grande porte (*super-tanker*) até o Reino Unido apresentava uma eficiência de 97,2%.

Por fim, SLESSER (1978) considera que os cálculos de ERE, EB e  $EB_I$  são muito específicos e representam condições impostas por particularidades da região geográfica, tecnologia e período. Recomendando que sejam feitos estudos de como estas medidas variam em função das variações destas particularidades.

BOUSTEAD e HANCOCK (1979) consideram complicada a avaliação da necessidade de energia para a produção de qualquer combustível derivado do petróleo. Isso se deve ao fato de que a maioria dos países não é auto-suficiente na produção deste energético, o que os leva a importar petróleo de diferentes fontes, por razões políticas e econômicas. A diversidade de fontes de fornecimento leva a existência de matérias-primas com composições diferentes, o que implica em grande variação de consumo de energia para conversão da matéria-prima em produtos como a gasolina e o óleo diesel.

A prática de importar petróleo de diferentes países torna difícil traçar a rota que um determinado derivado seguiu até o ponto de uso final e como conseqüência de todos estes fatores conjugados, a determinação das eficiências de produção de derivados de petróleo é feita com base na consideração de fontes específicas de petróleo ou em estatísticas nacionais.

No que se refere às estatísticas nacionais, estas podem omitir dados importantes, como o consumo de energia necessária para o transporte de produto importado (petróleo ou derivados), considerado como uma proporção considerável do consumo total da energia na cadeia de suprimento. Isso ocorre sempre que os navios (ou outro modo de transporte) forem abastecidos fora do país de destino do produto. No caso dos derivados

de petróleo importados esta situação se torna ainda mais crítica, pois até mesmo o consumo de energia no refino não será identificado.

As dificuldades descritas acima não se aplicam para a rede de processamento e distribuição do produto acabado, sendo, segundo os autores, mais fácil a determinação das redes de distribuição e dos modos de transporte dentro de uma macro-região. Neste caso o consumo de energia dependerá do tipo de produto, modo de transporte e distância de transporte.

Quando trata do gás natural, BOUSTEAD e HANCOCK (1979) consideram que a cadeia de suprimento deste combustível é bem mais simples que a do petróleo, tratando-se de um produto extraído praticamente pronto para o uso. A dificuldade encontrada à época se relacionava ao processo de distribuição, em função da sua associação com o gás manufacturado.

Os valores adotados por BOUSTEAD e HANCOCK (1979) são a apresentados a seguir. As Tabelas 4.4 e 4.5 se aplicam ao petróleo e decorrem de análise sintética da cadeia de suprimento. As Tabelas 4.6 e 4.7 são respectivamente para o petróleo e gás natural com base em dados estatísticos, considerando uma abordagem que relaciona insumos e produtos.

Tabela 4.4. Demanda de energia típica na cadeia de suprimento de derivados de petróleo no Reino Unido.

Processo	Demanda de energia $1/\pi_E$ [MJ/kg]	(%)
Extração do poço	Desprezível	0,00%
Transporte <sup>(a)</sup>	3,28	36,88%
Refino <sup>(b)</sup>	4,96	55,77%
Distribuição <sup>(c)</sup>	0,23	2,59%
Total de energia direta	8,47	95,24%
Energia embutida no capital <sup>(d)</sup>	0,42	4,76%
Total geral	8,89	100,00%

Notas: (a) Do Golfo Pérsico até a Europa Ocidental; (b) Rateado em base mássica; (c) Valor médio praticado no Reino Unido; (d) 5% da energia direta considerada como a energia necessária para produzir prédios e equipamentos.

Fonte: BOUSTEAD e HANCOCK (1979)

Tabela 4.5. Eficiência energética na produção de combustíveis no Reino Unido.

Combustível	Conteúdo energético [MJ/kg] <sup>(a)</sup>	Energia para Produção [MJ/kg] <sup>(c)</sup>	Total [MJ/kg]	Eficiência Energética da produção $\eta_1$ [%] <sup>(b)</sup>
Óleo combustível pesado	42,6	8,89	51,49	82,73%
Óleo combustível médio	42,85	8,89	51,74	82,81%
Óleo combustível leve	43,2	8,89	52,09	82,93%
Gasóleo	45,21	8,89	54,10	83,56%
Querosene	46,53	8,89	55,42	83,95%
Óleo diesel	44,84	8,89	53,73	83,45%
GLP (propano)	50	8,89	58,89	84,90%
GLP (butano)	49,3	8,89	58,19	84,72%

Notas: (a) Poder calorífico bruto típico – medido experimentalmente e similar ao poder calorífico superior; (b) calculado conforme equação (4.6) (c) valor da energia consumida no processo dividida pela massa de insumo – petróleo, sendo igual para todos os derivados (característica do processo).

Fonte: BOUSTEAD e HANCOCK (1979)

Tabela 4.6. Eficiência energética na cadeia de suprimento dos derivados de petróleo.

País de referência	Eficiência energética ( $\eta_1$ ) [%]		
	Máxima	Média	Mínima
Estados Unidos	97,5	86,9	81,2
Reino Unido	92,4	86,7	80,8
Holanda <sup>(a)</sup>	-	87,0	-

Notas: Valores calculados com base em análise estatística. (a) não apresenta intervalo de valores.

Fonte: BOUSTEAD e HANCOCK (1979)

Tabela 4.7. Eficiência energética na cadeia de suprimento do gás natural.

País de referência	Eficiência energética ( $\eta_1$ ) [%]		
	Máxima	Média	Mínima
Estados Unidos	93,0	89,0	85,5
Reino Unido	98,0	82,5	64,7 <sup>(a)</sup>
Média da Europa Ocidental	-	87,5	-

Notas: Valores calculados com base em análise estatística. (a) valores mais baixos referentes à composição de gás natural e gás manufacturado.

Fonte: BOUSTEAD e HANCOCK (1979)

Estando BOUSTEAD e HANCOCK (1979) entre os primeiros autores que elaboraram análise energética de processos industriais, as Tabelas 4.4 a 4.7 representam valores de referência. Além disso, muitas vezes a tecnologia mais antiga é encontrada nos países em desenvolvimento.

WANG e DELUCHI (1991) estimaram a eficiência de sete cadeias de conversão de energia para uso em automóveis. A Tabela 4.8 apresenta os resultados para duas fontes

de energia consideradas de interesse para o presente estudo.

Tabela 4.8. Eficiência da cadeia de suprimento de gasolina para uso em automóveis.

Gasolina do petróleo	$\eta_1$	Gasolina de carvão	$\eta_1$
Extração do petróleo	96,9%	Mineração do carvão	98,1%
Transporte do petróleo	98,9%	Transporte do carvão	99,3%
Refino do petróleo	87,4%	Conversão do carvão em óleo sintético	60,0%
Transporte da gasolina	99,2%	Refino do óleo sintético	87,4%
		Transporte da gasolina sintética	99,2%
Eficiência total <sup>(a)</sup>	83,1%	Eficiência total	50,7%

Notas: (a) A eficiência energética total da cadeia de processos foi calculada como o produto da eficiência individual de cada processo.

Fonte: WANG e DELUCHI (1991).

Os autores procuraram representar toda a cadeia de conversão de energia, fornecendo a eficiência individual de cada processo de forma padronizada. Não há distinção entre o refino de petróleo e de óleos sintéticos, o que aparenta o uso de estimativas médias. Uma consideração coerente é a adoção do mesmo valor de eficiência energética para o transporte de gasolina, não importando a fonte.

Para a cadeia de produção de gasolina, a eficiência total apresentada por WANG e DELUCHI (1991) é da ordem dos menores valores apresentados no final da década de 70 por BOUSTEAD e HANCOCK (1979), aparentando pouca evolução ao longo de uma década. Para a cadeia de processos de produção de gasolina de carvão, o valor de eficiência energética total é da ordem de 50%, bem inferior ao da gasolina de petróleo.

Um trabalho bastante completo foi realizado por FURUHOLT (1995) no que se refere ao consumo de energia para a produção de gasolina, gasolina aditivada (com MTBE) e óleo diesel. Os dados se referem à realidade da Statoil, companhia de exploração de petróleo estatal da Noruega. A cadeia de processos de produção incluiu: produção do petróleo (Mar do Norte), transporte até a refinaria (navio), refino do petróleo, transporte até os terminais (navio), distribuição (caminhões) e disposição nos postos.

Os valores de eficiência energética da cadeia de processos apresentados são:  $\eta_1 = 91\%$  (gasolina);  $\eta_1 = 88\%$  (gasolina com MTBE) e  $\eta_1 = 95\%$  (óleo diesel). A maior eficiência na produção de óleo diesel se deve ao processo requerer menos consumo de energia na refinaria que a gasolina. A pior eficiência é apresentada pela gasolina aditivada, em função da necessidade de considerar o consumo de energia na produção do aditivo.

A Agência Internacional de Energia realizou extenso trabalho prospectivo sobre combustíveis para o futuro (IEA, 1999). Um dos principais resultados foi a determinação do consumo de energia para a produção de 1 GJ de cada combustível. O trabalho considerou 12 alternativas, das quais 6 estão relacionadas na Tabela 4.9 com seus respectivos rendimentos energéticos.

Tabela 4.9. Eficiência energética da cadeia de suprimento de combustíveis selecionados.

Fonte de Energia	Origem	Produção de matéria-prima		Transporte de matéria-prima		Produção do combustível		Transporte do combustível		Total	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Gasolina	Petróleo	97,0%	93,8%	99,3%	99,2%	90,7%	86,5%	99,8%	98,5%	87,2%	79,2%
Óleo diesel	Petróleo	97,0%	94,1%	99,3%	99,2%	95,0%	94,7%	99,8%	99,0%	91,3%	87,6%
GNC <sup>(a)</sup>	Gás natural	96,9%	95,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	97,0%	91,0%	94,0%	86,5%
Etanol	Celulose	94,6%	82,0%	98,5%	97,0%	-6,0%	-88,0%	99,2%	99,0%	-5,5%	-69,3%
	Milho	72,9%	64,0%	98,5%	98,5%	69,5%	13,0%	99,2%	99,0%	49,5%	8,1%
Biodiesel <sup>(b)</sup>	Colza	70,0%	54,9%	99,0%	98,0%	91,1%	3,0%	99,5%	99,0%	62,8%	1,6%

Notas: (a) considera-se que o gás natural é produzido e purificado junto ao ponto de extração, assim as eficiências energéticas de transporte de insumos e produção do combustível são 100%, (b) Éster metílico de óleo de colza.

Fonte: IEA (1999).

A extensa faixa de valores entre a máxima e a mínima eficiência se deve a considerações específicas sobre a cadeia de processos. Observa-se que a eficiência total mínima de produção da gasolina se apresenta num patamar ligeiramente inferior às referências apresentadas anteriormente. De uma forma geral, os combustíveis derivados de biomassa apresentam uma eficiência muito menor que os combustíveis fósseis, podendo chegar até mesmo a ser negativa (etanol de celulose). Ou seja, o processo consome energia no lugar de produzir.

Os resultados de eficiência energética encontrados para os combustíveis derivados de biomassa pela Agência Internacional de Energia (EIA, 1999) não representam a realidade brasileira. A energia disponível do processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é cerca de 10 vezes maior que a energia externa consumida no processo (MACEDO, 1999). Este cálculo inclui não apenas a energia consumida diretamente no processo, mas também a energia necessária para produção de insumos (fertilizantes, herbicidas etc), material de consumo (lubrificantes, produtos químicos etc), prédios e equipamentos.

Considerando a energia contida na cana-de-açúcar a ser processada como 4.438 MJ/t

(MME, 2002) é possível obter o intervalo de valores para o rendimento energético total do processo de conversão para o álcool como  $46,46\% < \eta_1 < 51,74\%$ .

SHEEHAN *et al.* (1998) apresentam uma comparação detalhada entre a cadeia de produção do óleo diesel e do biodiesel fabricado a partir de óleo de soja e metanol. Os dados de eficiência energética para a cadeia de produção do óleo diesel são médias que refletem a realidade norte americana da década de 90, enquanto os valores considerados para a produção de biodiesel foram estimados a partir da produção de soja e extração de óleo com base em dados médios da prática nos Estados Unidos e nas condições de produção de biodiesel em uma planta piloto. Os dados comparativos encontram-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Comparativo da eficiência energética da cadeia de suprimento de óleo diesel e biodiesel.

Petróleo	$\eta_1$	Biodiesel	$\eta_1$
Produção doméstica	94,1%	Plantio da soja	94,7%
Produção importada	96,2%	Transporte da soja	99,7%
Transporte doméstico	99,7%	Extração do óleo	93,1%
Transporte de importação	98,8%	Transporte do óleo	99,3%
Refino	93,9%	Conversão do óleo	92,6%
Transporte do óleo diesel	99,4%	Transporte do biodiesel	99,6%
Total ( $\eta_T$ )	83,3%		80,6%

Fonte: SHEEHAN *et al.* (1998)

Segundo o estudo, a eficiência energética total da cadeia de produção de biodiesel apresenta um valor bastante competitivo com a do óleo diesel, principalmente por tratar-se de um combustível originário da biomassa. A eficiência energética encontrada para o óleo diesel é semelhante aos menores valores publicados por BOUSTEAD e HANCOCK (1979), considerando valores da década de 70 e inferiores às publicadas nos trabalhos da IEA (1999) e FURUHOLT (1995), que apresentam valores máximos até 10% maiores.

REN *et al.* (2002) descrevem extensa pesquisa sobre a viabilidade econômica, técnica e ambiental do uso de combustíveis derivados de gás natural para o transporte. Os resultados de eficiência energética da cadeia de produção dos combustíveis é apenas uma parte do trabalho de análise de ciclo de vida (ACV), como será visto no Capítulo 5, aplicado ao sistema formado pelo veículo e pelo combustível.

Embora o estudo contemple a gasolina, considerada como combustível convencional e base de comparação, e quatro combustíveis derivados do gás natural, os resultados aqui considerados se limitam à eficiência energética ( $\eta_1$ ) da conversão de energia da origem do energético (poço) até a disposição para uso final (na bomba do posto) para o caso da gasolina e do gás natural comprimido. Para a gasolina obteve-se  $\eta_1 = 84,9\%$ , já para o gás natural comprimido o valor foi  $\eta_1 = 91,9\%$ . Mesmo considerando que o trabalho foi realizado levando em conta as condições específicas encontradas na China da atualidade, os valores de eficiência para ambos os combustíveis é bastante coerente com aqueles apresentados pelos autores anteriormente citados.

#### 4.4.2. Uso final

A conversão de energia no uso final é um dos principais aspectos a serem considerados na análise da eficiência energética nos transportes rodoviários. Como foi visto, a tecnologia dominante como sistema de propulsão nos veículos é o conjunto motor alternativo de combustão interna (MCI) e sistema de transmissão mecânica (STM), porém, outras configurações como o sistema híbrido também podem ser consideradas como promissoras a médio prazo (5 a 15 anos).

O sistema de propulsão pode ser considerado como uma cadeia de processos que converte a energia armazenada no combustível ( $E_{comb}$ ), ou em qualquer outro dispositivo de estocagem de energia, como uma bateria por exemplo, em energia mecânica disponível para movimentar o veículo ( $E_{of}$ ).

Como foi visto no Capítulo 2, esta cadeia é composta de duas unidades: (1) sistema de conversão de energia e (2) sistema de transmissão de energia (Figura 2.6). Usualmente, toda a energia recebida pelo sistema de transmissão é proveniente do sistema de conversão, logo é possível calcular a eficiência do sistema de propulsão como:

$$\eta_{SP} = \eta_{SC} \cdot \eta_{ST} \quad (4.9)$$

Onde:  $\eta_{SP}$  é a eficiência no sistema de propulsão;

$\eta_{SC}$  é a eficiência no sistema de conversão de energia;

$\eta_{ST}$  é a eficiência no sistema de transmissão de energia.

No caso do sistema de propulsão convencional esta cadeia é composta do MCI e do STM, necessariamente dispostos em série e apenas a energia convertida pelo MCI é

disponibilizada para o STM, e permite calcular  $E_{of}$  (energia ofertada nas rodas) em função de  $E_{comb}$  (energia estocada no combustível) segundo a equação (4.10).

$$E_{of} = \eta_{MCI} \cdot \eta_{STM} \cdot E_{comb} \quad (4.10)$$

Onde:  $\eta_{MCI}$  é a eficiência do MCI;

$\eta_{STM}$  é a eficiência no sistema de transmissão mecânica;

Considerar o sistema de propulsão como uma cadeia de processos em série facilita a sua análise, porém, não representa uma generalização incondicional e sistemas de propulsão mais sofisticados podem não se enquadrar perfeitamente no modelo.

Estudar a eficiência do sistema de propulsão convencional sempre foi uma preocupação dos fabricantes de veículos. Tendo em vista a baixa eficiência térmica (conversão de calor em trabalho) do MCI, em comparação com a eficiência mecânica (propagação da energia mecânica) do STM, este sempre foi o principal alvo de aperfeiçoamentos. A Tabela 4.11 apresenta o resultado da pesquisa em algumas referências selecionadas.

Tabela 4.11. Eficiência energética do sistema de propulsão convencional.

				Referências			
				1	2	3	4
Componentes da oferta de energia							
Energia disponível no combustível				100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Componentes do sistema de propulsão	MCI	Perdas de energia	Sistema de Refrigeração	36,0%	30,0%	30,0%	20,0%
			Gases de exaustão	38,0%	35,0%	35,0%	35,0%
			Fricção dos componentes do motor	6,0%	5,0%	5,0%	-
			Radiação térmica do motor	-	-	5,0%	20,0%
	Eficiência do MCI			20,0%	30,0%	25,0%	25,0%
	STM	Perdas de energia	Transmissão	10,0%	17,0%	40,0%	24,0%
			Pneus	15,0%			
	Eficiência do STM			77,0%	83,0%	60,0%	76,0%
Eficiência do conjunto				15,0%	25,0%	15,0%	19,0%
Oferta final de energia				15,0%	25,0%	15,0%	19,0%
Componentes da demanda por energia							
Resistência ao rolamento				-	6,0%	-	4,2%
Resistência aerodinâmica				8,0%	13,0%	10,0%	10,5%
Energia disponível para vencer inércia, rampas e equipamentos auxiliares				7,0%	6,0%	5,0%	4,3%

Referências: 1) Automóvel norte americano típico operando sob condições corriqueiras de tráfego urbano; RISTINEN e KRAUSHAAR (1999); 2) Automóvel europeu com motor à óleo diesel em ciclo Euromix; POULTON (1997), 3) Automóvel norte americano típico WISER (2000), 4) Automóvel norte americano típico, OECD (1997).

Notas: O ciclo Euromix compreende um percurso onde 1/3 é feito em condições de tráfego urbano, 1/3 a velocidade constante de 90 km/h e 1/3 a velocidade constante de 120 km/h.

Como pode ser visto, a eficiência energética do MCI para os exemplos apresentados varia entre 20% e 30%. Os valores entre 20% e 25% podem ser considerados como típicos para motores alternativos de combustão interna de ignição por cetelamento e quatro tempos (MCI-ICE-4T). Para estes motores é possível considerar um ciclo de funcionamento segundo um processo reversível denominado de ciclo padrão de ar de Otto, cuja eficiência térmica é dada pela equação (4.11) (VAN WYLEN e SONNTAG, 1985).

$$\eta_{térmica} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \quad (4.11)$$

Onde:  $r_v$ : razão de compressão ou taxa de compressão;

$k = \frac{C_p}{C_v}$ : razão entre calor específico a pressão constante ( $C_p$ ) e calor específico a volume constante ( $C_v$ )

Assim, verifica-se que a eficiência térmica do ciclo padrão Otto é função apenas da taxa de compressão e que o rendimento aumenta com o aumento desta taxa. Para um motor real também é verdade que a eficiência aumenta com o aumento da taxa de compressão. A necessidade de construir motores mais eficientes levou os fabricantes de motores a aumentarem a taxa de compressão de seus motores até um limite, de modo a evitar o efeito conhecido como batida de pino. O desenvolvimento de combustíveis mais resistentes à batida de pino tem sido uma condicionante para o aumento da taxa de compressão ao longo dos anos e o aumento da sua eficiência energética.

As principais características dos combustíveis para motores do ciclo Otto que se relacionam com a eficiência energética são: o Índice Antidetonante (IAD); a volatilidade e a composição química.

O IAD depende do número de octanas e está estreitamente relacionado com a possibilidade de aumento da taxa de compressão do motor e esta com a eficiência termodinâmica. O aumento da taxa de compressão de um motor de 7,5 para 9 exige um aumento do IAD em 10 unidades e possibilita um aumento de 10% na eficiência energética da máquina (ARMSTRONG e WILBRAHAM, 1995 *apud* FAIZ *et al.*, 1996). Porém, para um dado projeto de motor não existe vantagem em usar um

combustível de IAD maior que o especificado.

Quanto menor a volatilidade do combustível menor o percentual eventualmente perdido por evaporação e menores as pressões que o sistema de alimentação de combustível deve suportar quando aquecido. Por outro lado, a redução da volatilidade do combustível é limitada pela necessidade de se manter sua adequada evaporação e mistura com o ar na partida do motor, principalmente em regiões de clima frio.

A composição química da gasolina, por exemplo, é uma característica que pode determinar qualquer uma das duas outras (IAD e volatilidade) pois a mistura de hidrocarbonetos que compõem a gasolina é determinante do seu número de octanas e da curva de destilação, que determinará a pressão de vapor e volatilidade do combustível. Além disso, a presença de elementos contaminantes pode comprometer o funcionamento de partes do motor.

No caso dos motores de ignição por compressão (MCI-ICO-4T) também é possível construir um ciclo padrão de ar (ciclo Diesel) que apresente um funcionamento ideal. Na prática o ciclo Diesel pode operar com taxas de compressão maiores, o que normalmente garante melhor eficiência térmica que para o ciclo Otto, porém, sua comparação deve ser baseada em condições bem determinadas (VAN WYLEN e SONNTAG, 1985).

Em função do sistema de transmissão mecânico (STM) ter uma eficiência energética maior que a dos MCI, existe menos atenção voltada para sua otimização, sendo que configurações específicas devem ser tratadas caso a caso.

Os demais sistemas de propulsão apresentados no Capítulo 2 (elétrico e híbrido) apresentam melhor eficiência energética se comparados ao sistema de propulsão convencional, principalmente se puderem prescindir do MCI, como no caso dos veículos elétricos. Porém, em função de serem muito menos encontrados na prática e do cálculo da eficiência energética depender da configuração particular de cada sistema, não serão considerados neste capítulo.

A aplicação dos conceitos de eficiência na cadeia de suprimento e uso final de combustíveis para os transportes pode representar na prática um grande desafio. Os exemplos deixam clara a diversidade de formas de abordagem do problema e as

ilimitadas possibilidades de incluir elementos na análise energética, dentre os quais, aqueles que considerem aspectos ambientais, de modo a conciliar o conceito de ecoeficiência. Uma ferramenta capaz de auxiliar neste trabalho é a análise de ciclo de vida (ACV), como será visto no próximo capítulo.

## **CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE CICLO DE VIDA**

### **5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da técnica de análise de ciclo de vida (ACV), sua abrangência e limitações. O conteúdo foi dividido em 2 partes, envolvendo os conceitos básicos da ACV e a apresentação de trabalhos onde a ACV foi aplicada às fontes de energia para os transportes, o que corresponde diretamente ao tema desta tese.

O objetivo principal é entender como a técnica de ACV pode ser utilizada para auxiliar na análise da eficiência energética da cadeia de suprimento e uso final de energia para o transporte rodoviário, complementando a base teórica apresentada até o momento.

### **5.2. O CONCEITO DE ACV**

Os primeiros trabalhos que de alguma forma aplicaram os conceitos fundamentais da análise de ciclo de vida (ACV) foram desenvolvidos durante a década de 70 e tinham como objetivo avaliar os processos produtivos e racionalizar o consumo de fontes de energia esgotáveis, em particular os derivados de petróleo. Apesar do principal enfoque desses estudos ter sido a questão energética, em função das crises do petróleo, alguns deles chegaram a considerar, mesmo que de forma insipiente, vários aspectos relacionados à questão ambiental, incluindo estimativas de emissões sólidas, líquidas e gasosas (CHEHEBE, 1998, HANSSSEN, 1998, VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999, CULABA e PURVIS, 1999).

Pode-se dizer que a análise energética, considerada como a metodologia de avaliação da necessidade de energia para a elaboração de um produto, envolvendo todas as suas etapas produtivas, desde a extração da matéria-prima até a disponibilização do produto final (BOUSTEAD e HANCOCK, 1979), serviu de base para o posterior desenvolvimento da ACV, que ampliou a análise para além dos insumos energéticos e incluiu os estágios de uso final e gestão dos resíduos na cadeia de processos a serem analisados (AUDUS, 1996, CHEHEBE, 1998, HANSSSEN, 1998, VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999).

Esta ampliação do escopo inicial da análise energética refletia uma necessidade de incluir nos estudos os aspectos ambientais, preocupação que ganhou peso nos anos 80,

em função de uma maior conscientização da sociedade sobre os danos que poderiam advir do desenvolvimento econômico desordenado.

Nesta linha, pode-se destacar o trabalho intitulado de *Green Design* (Projeto Verde), desenvolvido em 1992 pelo *Office of Technology Assessment* (OTA) sob solicitação da *House Committees of Science, Space and Technology, and on Energy and Commerce* que teve como foco principal o desenvolvimento de projetos de produtos que embora garantissem uma maior competitividade no mercado acarretassem um menor impacto ao meio ambiente. Segundo a formulação do OTA, os principais objetivos do *Green Design* são o aprimoramento da gestão de matéria-prima e a prevenção da geração de resíduos.

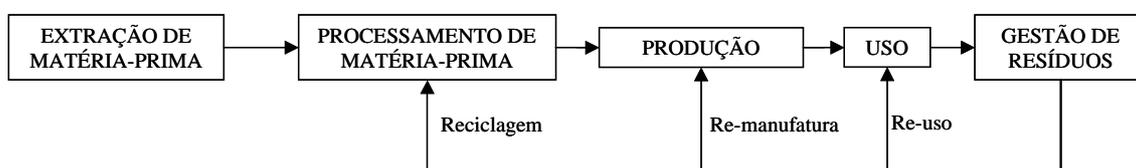
Um dos principais focos desta filosofia de projeto é a aplicação do conceito de ACV do produto, vista como uma forma de identificar os impactos ambientais que poderiam ser causados desde a extração de matéria-prima até a disposição final do produto em estudo. Neste caso, o que se pretendia era desenvolver a ACV como forma de aprimorar econômica e ambientalmente o projeto de um produto, ou seja, aumentar a sua ecoeficiência (OTA, 1992).

Com a proliferação de estudos voltados para a ACV e a natural tendência de comparação de resultados obtidos em cada um deles, surge a necessidade de adotar uma padronização para sua elaboração. A primeira entidade que de uma forma sistematizada se preocupou com a padronização dos termos e critérios da ACV foi a SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*. A partir dos seminários e publicações da SETAC, que estabeleceu um código de prática para a realização da ACV, a ISO - *International Organization for Standardization* iniciou o processo de elaboração das normas sobre ACV (HANSSEN, 1998, VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999).

Atualmente, o sistema ISO 14.000 de normas internacionais sobre o meio ambiente apresenta um conjunto de normas específicas para padronizar os termos e os critérios para a elaboração e divulgação dos resultados da ACV além de determinar requisitos gerais para condução da técnica. Estas normas são a ISO 14.040, que já possui similar nacional na forma da norma NBR ISO 14.040 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura; a ISO 14.041 *Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis*; a ISO 14.042

*Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment e ISO 14.043 Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation.* As duas primeiras normas já foram publicadas (ABNT, 2001; ISO 14.041, 1998) e as duas últimas encontram-se em estudo e no momento só se dispõe das versões provisórias.

Segundo a norma brasileira, entende-se por ciclo de vida de um produto ou serviço aos estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto/serviço, desde a aquisição da matéria-prima ou geração de recursos naturais até a disposição final (ABNT, 2001). A Figura 5.1 ilustra os estágios típicos do ciclo de vida de um produto, também denominado como sistema de produto.



Fonte: RUBIN (2001).

Figura 5.1. Estágios do ciclo de vida.

Os cinco estágios típicos do ciclo de vida de um produto (extração de matéria-prima, processamento de matéria-prima, produção, uso final e gestão de resíduos) são encadeados por fluxos que indicam a seqüência direta de seu processamento, desde a extração de matéria-prima até a gestão de resíduos. Também existe a indicação dos fluxos de reciclagem, re-manufatura e re-uso em separado, caracterizando uma configuração cíclica de parte dos recursos aplicados ao produto.

Desde que os estágios do ciclo de vida representem um conjunto de processos, o ciclo de vida pode ser considerado como uma cadeia de processos, sendo que na terminologia da ACV, um processo é denominado de unidade de processo (ABNT, 2001).

Segundo CHEHEBE (1998) a análise de ciclo de vida (ACV) é vista como: “uma técnica para a avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias-primas elementares que entram no sistema de produto<sup>14</sup> (berço) à disposição final do

<sup>14</sup> Os termos sistema de produto e sistema produtivo não tem o mesmo significado. O sistema de produto inclui todos os estágios do ciclo de vida, o sistema produtivo não inclui os estágios de uso final e gestão de resíduos. Nestes termos, sistema do produto significa o soma da cadeia de suprimento e o uso final do produto.

produto (título).” É possível interpretar o termo produto com o sentido amplo de produto e/ou serviço, sendo o resultado desejado de uma atividade produtiva (CHEHEBE, 1998, HANSEN, 1998, VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999, RUBIN, 2001, KHAN *et al.*, 2001).

Uma grande variedade de propósitos é associada a ACV, dentre os quais se destaca: auxiliar na tomada de decisão, determinar indicadores de eficiência ambiental relevantes para a avaliação de produtos e para melhorar o entendimento dos aspectos ambientais ligados aos processos produtivos de uma forma ampla (AUDUS, 1996, HANSEN, 1998, VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999, RUBIN, 2001). Neste último caso, a ACV proporciona subsídios para a mudança da filosofia tradicional de proteção ambiental, que considera a mitigação dos impactos ambientais depois da sua ocorrência e não a sua prevenção. Sob a ótica empresarial, este fato representa uma mudança na estratégia ambiental pois considera a possibilidade de evitar os impactos ambientais antes que eles ocorram e não a sua correção (KHAN *et al.*, 2001, KHAN *et al.*, 2002; MELLOR *et al.*, 2002).

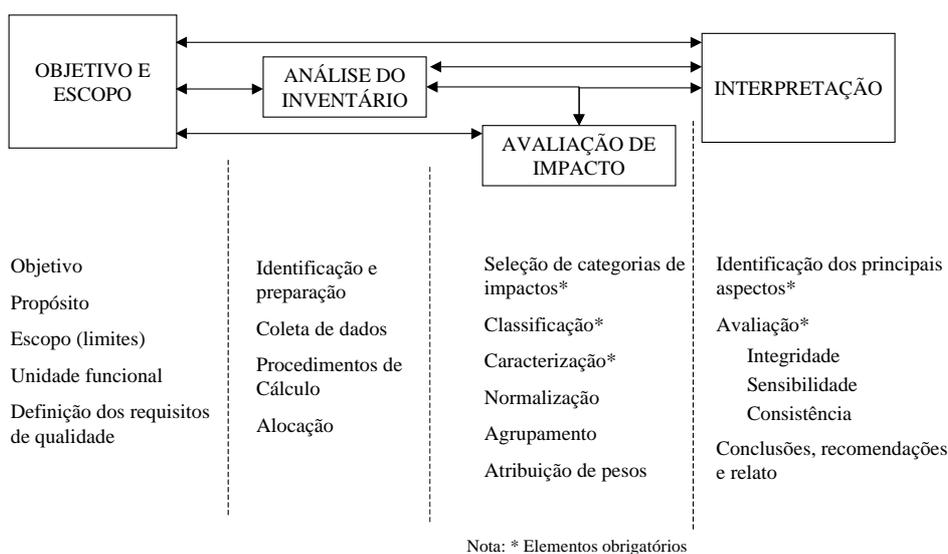
A ACV é uma ferramenta útil quando se pretende planejar com ênfase na redução tanto do consumo de recursos naturais quanto na emissão de poluentes, proporcionando uma estrutura de dados e informações capaz de orientar as decisões presentes de modo que elas sejam vistas no futuro como as mais adequadas do ponto de vista dos impactos ambientais. Em decorrência, depreende-se que a ACV permite que se incluam aspectos relacionados aos impactos ambientais no processo de tomada de decisão (HANSEN, 1998, CULABA, 1999, VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999).

A norma NBR ISO 14.040 estabelece uma série de definições para a terminologia a ser adotada na ACV. Em função da complexidade do tema alguma incoerência é encontrada, porém, pode ser contornada à medida que as demais normas são consultadas. Já na descrição geral da ACV, destaca-se a afirmação de que não existe um único método para conduzir o estudo, podendo o usuário ter flexibilidade para implementar sua prática segundo seus próprios requisitos, porém, com base nos requisitos mínimos da norma (HANSEN, 1998).

Segundo CHEHEBE (1998) a aplicação da técnica de ACV segue a mesma tendência de várias outras técnicas de modelagem, onde existem conflitos entre a precisão do estudo

e sua praticidade. Fatores como disponibilidade de dados, recursos e tempo limitam a abrangência do estudo e recomenda-se que “em todos os casos o princípio básico a ser aplicado é menos é melhor.” Uma interpretação mais pragmática dessa afirmativa indica que o modelo deve contemplar os elementos principais e imprescindíveis para o correto entendimento do sistema físico real (MENKE *et al.*, 1996; MAURICE *et al.*, 2000).

As fases da ACV, conforme estabelecido pela norma NBR ISO 14.040, são ilustradas na Figura 5.2 onde se destaca seu relacionamento e os principais aspectos considerados em cada uma delas.



Fonte: ABNT (2001).

Figura 5.2.Fases da ACV segundo a norma NBR ISO 14.040.

### 5.2.1.Fase 1 - Objetivo e escopo

A primeira fase da ACV diz respeito à definição do objetivo e do escopo do estudo. A definição do objetivo deve estabelecer a aplicação desejada, os motivos para condução do estudo e a audiência esperada. O objetivo pode ser promover alguma melhoria no desempenho ambiental de um produto, como por exemplo aprimorar a ecoeficiência de um combustível convencional; a necessidade de projetar um produto completamente novo, como por exemplo um combustível alternativo; ou simplesmente obter informações sobre o produto para elaboração de um banco de dados; a comparação entre produtos ou o estabelecimento de uma relação com um padrão.

O escopo refere-se a três dimensões básicas: a extensão, que indica onde iniciar e onde

parar o estudo; a largura, que indica quantos níveis de análise devem ser incluídos e a profundidade, que estabelece o nível de detalhe necessário, sendo definidas de forma a atender o estabelecido nos objetivos.

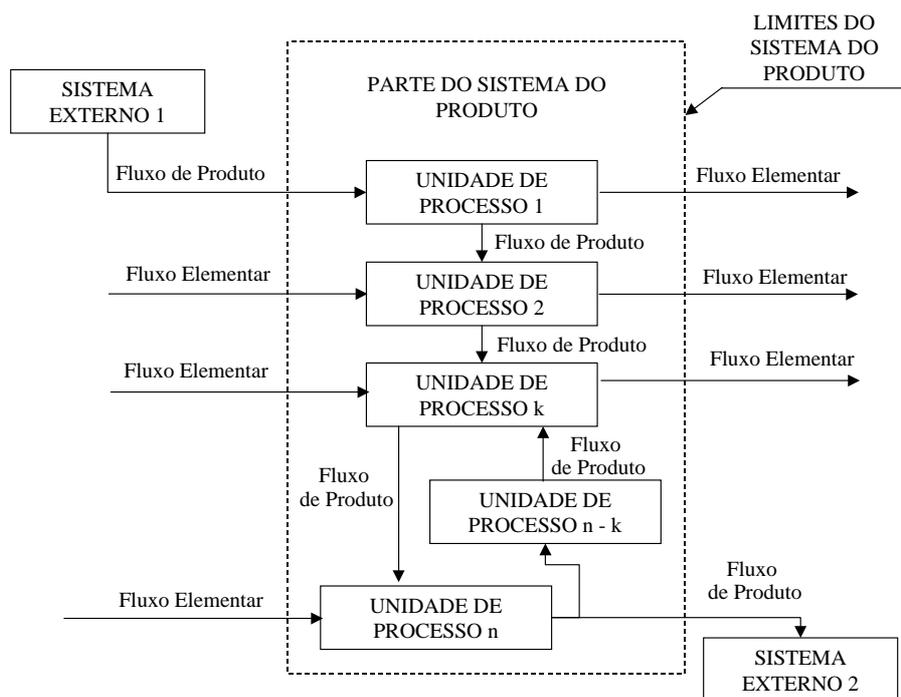
A determinação do escopo implica na identificação dos limites do sistema de produto. Por se tratar de uma ferramenta iterativa, onde a revisão periódica do planejamento inicial faz parte dos procedimentos de aplicação, recomenda-se que tanto o objetivo como o escopo sejam reavaliados ao longo do estudo, gastando-se inicialmente pouco tempo formulando o escopo, que deve considerar os seguintes aspectos (CHEHEBE, 1998):

- ◆ A identificação do sistema de produto (cadeia de unidades de processo<sup>15</sup>);
- ◆ A definição dos limites de contorno do sistema e quais unidades de processo incluir;
- ◆ A identificação dos elementos que compõem o sistema de produto;
- ◆ O estabelecimento da função do sistema e sua unidade funcional;
- ◆ Os requisitos de qualidade dos dados;
- ◆ A decisão sobre a realização da avaliação dos impactos e o método que será adotado;
- ◆ A decisão sobre a realização da interpretação e o método que será adotado;
- ◆ A definição dos critérios para a revisão crítica.

Os elementos que compõem o sistema de produto podem ser unidades de processo ou fluxos. Fluxos elementares e fluxos de produto atravessam os limites do sistema, tanto para entrada como para saída, ligando o sistema em estudo ao meio ambiente ou a outros sistemas por meio de sua vizinhança. Internamente, as unidades de processo são interligadas por fluxos intermediários de produtos e/ou resíduos para tratamento. A Figura 5.3 ilustra o que foi descrito e auxilia no entendimento da lógica do modelo.

---

<sup>15</sup> Uma unidade de processo é o termo empregado na ACV para designar um processo ou atividade produtiva como definido nos capítulos anteriores deste trabalho.



Fonte: elaboração própria a partir de CHEHEBE (1998).

Figura 5.3. Modelo de sistema de produto destacando seus elementos.

O sistema de produto deve obedecer às leis da física quanto à conservação de massa e energia para os fluxos elementares e de produto que entram e saem das unidades de processo. Este aspecto é utilizado para verificar a validade da modelagem.

Recomenda-se o uso de fluxogramas para descrever o sistema de produto de modo que sejam incluídas as unidades de processo e os fluxos de forma coerente com a definição do objetivo e do escopo. O fluxograma deve permitir a visão de todos os estágios do ciclo de vida e dos limites do sistema e deve iniciar na extração da matéria-prima da natureza e termine na disposição final dos resíduos. É desejável que o sistema de produto seja modelado de modo que os fluxos atravessando seus limites sejam fluxos elementares, ou seja: material ou energia que sem transformação humana prévia ou subsequente entra ou deixa o sistema de produto sob estudo.

Para a elaboração dos fluxogramas recomenda-se que se inicie pelas unidades de processo do estágio principal, normalmente a produção, ampliando a rede em comprimento, largura e profundidade à medida que o estudo avança.

A definição de até onde o estudo será estendido é determinada parcialmente pelo escopo e por decisões pragmáticas que consideram que excesso de sofisticação usualmente propicia contribuição precária. Num trabalho abrangente, além dos fluxos e unidades de

processo do principal estágio deve-se incluir:

- ◆ Distribuição/transporte;
- ◆ Produção e uso de energia (combustíveis, eletricidade e calor);
- ◆ Uso final e manutenção de produtos;
- ◆ Descarte dos resíduos da produção e do uso do produto;
- ◆ Reaproveitamento de insumos (reciclagem, re-manufatura e re-uso);
- ◆ Produção de materiais não consumíveis;
- ◆ Produção, manutenção e descarte de equipamentos;
- ◆ Atividades de apoio (iluminação, aquecimento etc).

CHEHEBE (1998) recomenda que maior atenção seja concentrada nas unidades de processo que apresentam maior valor agregado e contribuam mais intensamente com os impactos ambientais. Estágios de transporte e sistemas de embalagens devem ser considerados, enquanto a produção de bens de capital (prédios, máquinas etc) normalmente são desconsiderados.

No que se refere à função do sistema, sua unidade funcional e as características de desempenho, apresenta-se a Tabela 5.1, adaptada para expressar melhor os conceitos apresentados. Um exemplo para o caso dos combustíveis foi criado de acordo com os objetivos desta tese.

Tabela 5.1. Caracterização de função, unidade funcional e desempenho.

Descrição do atributo	Caracterização do atributo	Exemplo – combustíveis
Função	Possíveis resultados esperados de um produto.	Produzir movimento, calor ou luz.
Função escolhida	A função que será estudada segundo objetivo e escopo da ACV.	Produzir movimento.
Unidade funcional	Unidade de medida da função	Movimentar 1.000 passageiros por 1 km.
Desempenho	Relação entre produtos e insumos.	0,1 kg/pass.km.
Fluxo de referência	Volume do produto a ser considerado como base do estudo.	1 litro.

Fonte: elaboração própria a partir de CHEHEBE (1998).

Entende-se por requisitos de qualidade de dados a sua precisão, integridade, representatividade, consistência e reprodutibilidade. A identificação dos requisitos de qualidade dos dados relaciona-se como três parâmetros: abrangência temporal,

geográfica e tecnológica. As abrangências temporal e tecnológicas dizem respeito à adequação dos dados ao momento da aplicação da ACV, sendo representativos de sua época. A abrangência geográfica cria uma relação de pertinência entre o dado e a região de estudo.

### **5.2.2.Fase 2 - Análise do inventário**

O inventário do ciclo de vida é uma fase de coleta e processamento de dados onde devem ser contemplados critérios para sua categorização e inclusão juntamente com procedimentos para sua coleta, validação, agregação e alocação. É claramente a fase mais trabalhosa da ACV (MAURICE *et al.*, 2000).

A norma recomenda três grandes conjuntos para categoria de dados: (1) insumos - energia, matérias-primas, materiais auxiliares e outras entradas físicas; (2) produtos e (3) emissões (ar, água, terra etc) (ABNT, 2001). Esta segmentação é coerente com a caracterização de fluxos de entrada (insumos) e fluxos de saída (produtos, co-produtos e resíduos) e com os indicadores de ecoeficiência relacionados no Capítulo 4 (Tabela 4.3).

O critério para inclusão inicial de dados no inventário desempenha papel fundamental para a determinação dos resultados e existem alguns critérios de escolha que se baseiam na relevância do dado em termos de algum aspecto particular (MAURICE *et al.*, 2000). A norma faz referência a três critérios que podem ser condensados em duas regras de decisão (ABNT, 2001):

- ◆ Regra dos volumes totais: estabelece a inclusão de todas as entradas que cumulativamente contribuam mais do que uma determinada percentagem da massa ou energia total que entra no sistema de produto que está sendo modelado. Considera que a relação causa efeito é proporcional ao volume das substâncias e julga a importância de um determinado fluxo em comparação com os fluxos totais envolvidos no sistema de produto;
- ◆ Regra dos volumes marginais: estabelece a inclusão das entradas que contribuam com mais do que uma percentagem determinada da quantidade estimada de cada categoria de dados do sistema de produto. Considera que algumas substâncias, mesmo com pequena participação podem causar grandes impactos ambientais e julga a importância de um determinado fluxo em comparação com os demais fluxos

da mesma substância no sistema.

As fontes de dados devem ser, sempre que possível, públicas e acompanhadas de comentários críticos. Embora o uso dos chamados “dados proprietários<sup>16</sup>”, pressuponha uma maior precisão e integridade, sua representatividade, consistência e reprodutibilidade ficam comprometidas, principalmente no caso de estudos comparativos.

O que se considera como validação dos dados é na verdade a validação do modelo do sistema de produto, tendo em vista que pressupõe o uso do princípio do balanço de energia e massa para verificar a integridade do conjunto de unidades de processo e onde podem existir desvios. A principal consideração sobre a validação dos dados diz respeito ao tratamento que deve ser dado aos dados não disponíveis. Sua supressão ou substituição por valores calculados ou obtidos por analogia devem ser amplamente justificados. Em regra, a existência de algum dado é sempre melhor que sua exclusão (CHEHEBE, 1998; MAURICE *et al.*, 2000).

Uma decorrência da elaboração dos fluxogramas, coleta dos dados e sua validação é o refinamento dos limites do sistema. Recomenda-se que estas decisões sejam baseadas em análise de sensibilidade para determinar a significância das alterações que podem ser: exclusão de estágios do ciclo de vida ou subsistemas; exclusão de fluxos de materiais insignificantes para os resultados da avaliação e inclusão de novas unidades de processo que se mostrem significativas (MAURICE *et al.*, 2000).

Quando o sistema relacionado ao produto apresenta mais de um produto como resultado deve-se buscar uma forma de entender e identificar a situação e de alocar os recursos aos co-produtos coerentemente. A norma apresenta 3 procedimentos para o procedimento de alocação (ABNT, 2001):

- ◆ Procedimento 1 – sempre que possível a alocação deve ser evitada por meio da divisão da unidade de processo onde ocorrer a alocação em dois ou mais sub-processos ou pela expansão do sistema do produto de modo a incluir uma nova função;
- ◆ Procedimento 2 – quando não se puder evitar a alocação as entradas e saídas do

---

<sup>16</sup> Dados obtidos na iniciativa privada e associados a uma empresa ou segmento particular (CHEHEBE, 1998).

sistema devem ser rateadas entre os diferentes co-produtos e funções por meio da relação física que exista entre eles;

- ◆ Procedimento 3 – quando nenhuma relação física puder ser estabelecida entre os co-produtos e as entradas e saídas, busca-se outra relação que seja justificável, como por exemplo de origem financeira.

O procedimento 1 implica na modelagem de um novo sistema e pode representar mais trabalho. O procedimento 2 é o mais utilizado (CHEHEBE, 1998, RUBIN; 2001), principalmente se a propriedade física for a massa dos co-produtos, porém, também apresenta suas limitações e só funciona bem quando existe forte correlação positiva entre as propriedades físicas escolhidas e o valor relativo dos co-produtos. No caso do terceiro método, o principal impedimento para a sua aplicação reside na natureza transitória, em função do tempo e do espaço, dos valores econômicos associados aos co-produtos.

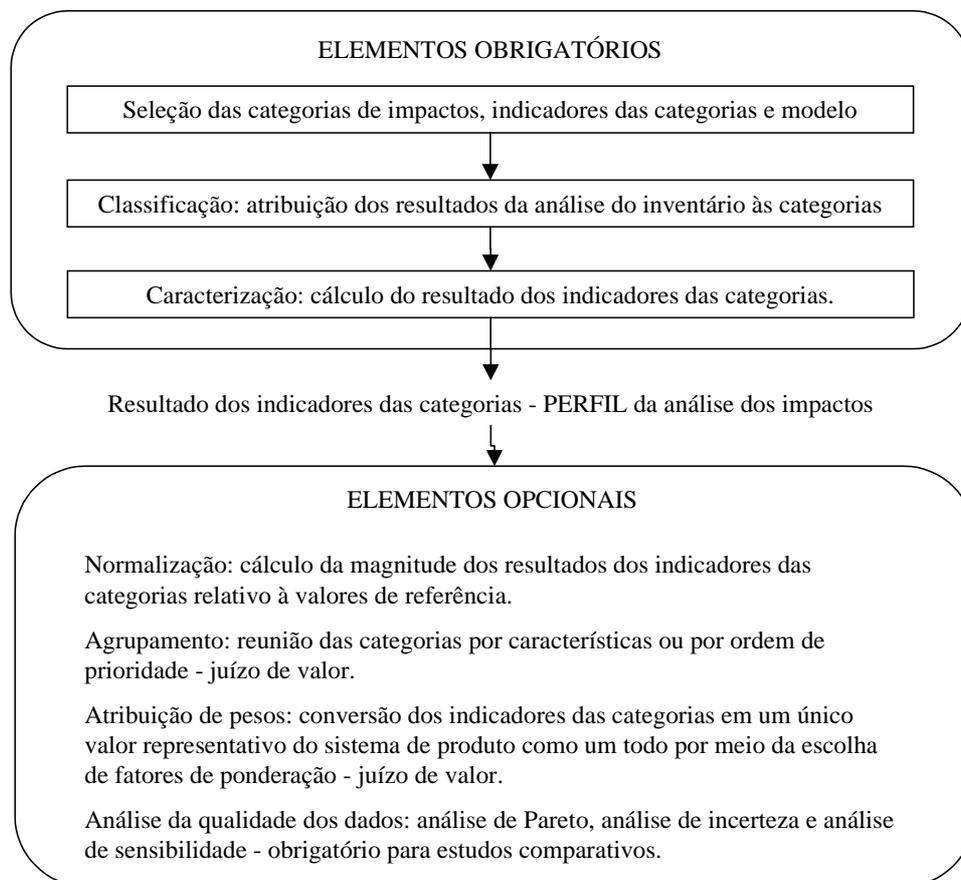
Ao processo de reciclagem, re-manufatura e re-uso também se aplicam os métodos de alocação. Estas atividades podem ocorrer em ciclo fechado, quando a unidade de processo de reciclagem se encontra dentro do sistema principal ou em ciclo aberto, caso contrário.

A interpretação dos resultados da análise de inventário deve incluir a análise da qualidade dos dados e a análise de sensibilidade das principais entradas e saídas e do modelo de modo que se entenda as incertezas dos resultados. Neste momento os resultados devem ser considerados com muita cautela, pois não representam o resultado dos impactos ambientais mas apenas entradas e saídas do sistema. Uma análise de inventário não deve ser considerada isoladamente como base de comparação, quanto à impactos ambientais.

### **5.2.3.Fase 3 - Avaliação de impactos**

A avaliação de impactos é a terceira fase da ACV e procura identificar, caracterizar e avaliar, quantitativamente e qualitativamente, impactos potenciais das intervenções ambientais identificadas na etapa de análise de inventário segundo o que foi definido no objetivo e escopo do estudo. Isso é feito por meio da estruturação, exame, condensação e simplificação dos dados de forma a permitir sua análise (CHEHEBE, 1998; ABNT,

2001). A norma divide a abordagem em duas partes que envolvem elementos obrigatórios e opcionais conforme apresentado na Figura 5.4.



Fonte: ABNT (2001).

Figura 5.4.Elementos da avaliação de impactos.

A principal recomendação apresentada no que se refere à seleção das categorias de impactos, seus indicadores e modelo é que isto seja feito com completo embasamento em conhecimento científico. Embora a norma não seja indicativa, tanto CHEHEBE (1998) quanto RUBIN (2001) sugerem que o conjunto de categorias inclua: exaustão dos recursos não renováveis; aquecimento global; redução da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade; acidificação; oxidantes fotoquímicos e eutroficação.

Com base nestas categorias é feita a classificação dos dados obtidos na análise do inventário de forma completa, independente, operacional e prática. Deve-se considerar primeiramente os resultados que se referem exclusivamente a uma categoria de impacto e em seguida aqueles que se referem a mais de uma categoria de impacto, neste caso identificando os efeitos que ocorrem em paralelo (uma ou mais categorias de impacto simultaneamente) ou em seqüência (mais de uma categoria de impacto em série).

Como cada categoria pode comportar um ou mais tipos de dados, depois de classificados suas contribuições são quantificadas por meio de fatores de caracterização. Estes fatores devem ser estritamente respaldados em conhecimento científico e são utilizados para calcular os efeitos diretos. Os efeitos indiretos, oriundos de modificação do poluente no meio não são normalmente considerados.

O trabalho do OTA (1992) destaca que normalmente os impactos ambientais mais sérios ocorrem durante o uso final dos produtos, em particular para aqueles que são consumidos ou se dissipam durante o uso, como é o caso dos combustíveis. As emissões destes produtos para o meio ambiente podem ser muito maiores no uso que em todo o processo de produção. Neste caso, a principal recomendação apresentada diz respeito ao aprimoramento da eficiência no uso de tais produtos, ou seja, aumentar a eficiência no uso final.

O resultado da caracterização é expresso na forma de um conjunto de matrizes que expressam o perfil ambiental do sistema de produto em estudo. É importante destacar que se espera uma compensação entre a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados. Os resultados de cada matriz podem ser valores de difícil comparação sendo necessária a sua normalização por meio de aplicação de uma base comum, o que já se constitui um elemento opcional.

Dos elementos opcionais 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. O agrupamento usualmente considera uma hierarquia, tal como alta, baixa e média prioridade (HANSSEN, 1998; RUBIN, 2001).

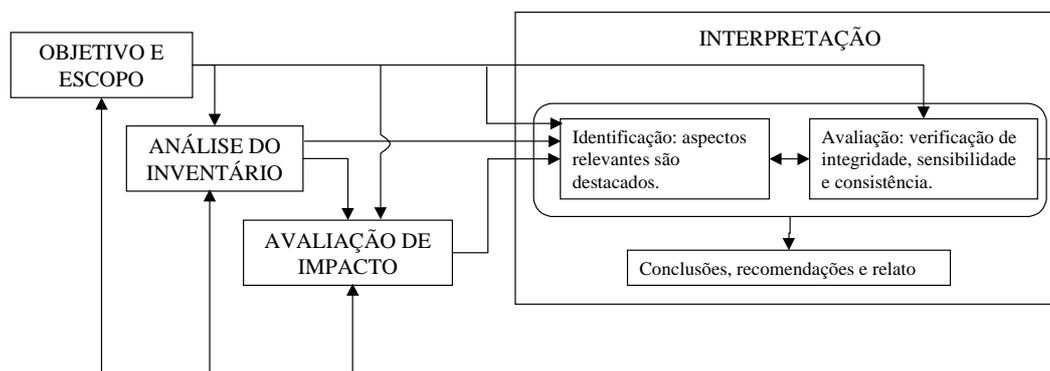
No caso da atribuição de pesos torna-se necessário o estabelecimento de um índice ambiental, que usualmente é determinado por meio de um conjunto de fatores de ponderação para cada categoria de impacto. A norma não especifica o método para sua aplicação, CHEHEBE (1998) sugere análise multicritério. Para qualquer situação a norma obriga que os dados originais sejam disponibilizados junto com os resultados da atribuição de pesos, tendo em vista se tratar de um procedimento que envolve considerações subjetivas.

Para melhor compreender o nível de significância, a incerteza e a sensibilidade dos

resultados da avaliação dos impactos, recomenda-se a aplicação de técnicas que possam avaliar a qualidade dos dados. A norma especificamente recomenda: análise de Pareto; análise de incerteza e análise de sensibilidade, porém, processos mais sofisticados como simulação podem ser encontrados (MAURICE *et al.*, 2000).

#### 5.2.4.Fase 4 - Interpretação

A última fase da ACV é a interpretação. Trata-se de uma fase que se desenvolve de forma simultânea e interativa com as demais, como pode ser visto na Figura 5.5, ampliada a partir da Figura 5.2. A interpretação da ACV é uma técnica sistemática para identificação, qualificação, verificação e avaliação dos resultados provenientes da análise do inventário e da avaliação de impactos e apresentá-los de forma clara e objetiva atendendo ao objetivo e escopo propostos.



Fonte: ABNT (2001).

Figura 5.5. Relação entre os elementos da fase de interpretação e as demais fases da ACV.

Seu objetivo é analisar os resultados, tirar conclusões, explicar as limitações e fornecer recomendações para a ACV. A Figura 5.5 apresenta os três elementos em que se divide a interpretação da ACV – identificação, avaliação e conclusões.

Dos três elementos apresentados destaca-se a avaliação, tendo em vista possibilitar a verificação da integridade, sensibilidade e consistência do modelo. A norma traz recomendações gerais no que se refere à verificação destes requisitos e expõe exemplos no Anexo A (informativo) – *Examples of life cycle interpretation*. Neste sentido, uma recomendação de CHEHEBE (1998) diz respeito à utilização da técnica de análise de incertezas aplicada à análise do inventário. A possibilidade de expressar os resultados do inventário na forma de faixas e/ou distribuições de probabilidade pode contribuir

muito para uma exposição dos resultados mais consistente com a incerteza dos dados.

Além disso, o que sempre pode ser feito é a análise de sensibilidade por meio da construção de cenários ou da variação de valores, que dependendo do resultado pode recomendar a exclusão e/ou inclusão de estágios do ciclo de vida, de subsistemas, unidades de processo e/ou fluxos. No entanto deixa claro que testar a sensibilidade de todas as variáveis do sistema é impraticável.

Com exceção da fase de elaboração de objetivo e escopo, todas as demais fases da ACV exigem a elaboração de um relatório. Em alguns casos recomenda-se a realização de análise crítica, segundo NBR ISO 14.040, principalmente para estudos comparativos, quando esta consideração é obrigatória.

É comum a aplicação da ACV de forma parcial, onde as fases de objetivo e escopo, análise do inventário e interpretação compõem a prática usual a que se denomina Inventário de Ciclo de Vida (ICV) (VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999).

Uma vez que se tenha feito uma breve descrição sobre o conceito e a metodologia normatizada para a aplicação da ACV, optou-se por incluir alguns trabalhos selecionados que apresentam a aplicação da técnica para as fontes de energia para o transporte rodoviário, tema de particular interesse para o presente estudo.

### **5.3.ACV APLICADA AS FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO**

Investigar a abrangência e as limitações da aplicação da técnica de ACV às fontes de energia para o transporte rodoviário é o principal objetivo deste capítulo. Assim sendo, do total de referências pesquisadas, nove trabalhos que tratam deste assunto foram selecionados para análise específica.

A Tabela 5.2 apresenta uma síntese destes trabalhos onde se procurou considerar objetivamente como cada um aplicou a técnica de ACV, por meio da determinação do objetivo, escopo, abrangência dos dados, unidade funcional escolhida, principais fluxos avaliados, critérios de alocação e categoria dos impactos, este último sempre que se aplicou a técnica de forma completa.

Tabela 5.2. Síntese das referências selecionadas sobre aplicação de ACV as fontes de energia para o transporte rodoviário.

Autores	Ano	Local	Objetivo		Escopo		Abrangência dos dados			Unidade Funcional	Principais fluxos	Critério de Alocação	Categoria de Impactos
			Aplicação	Motivo	Aplicação da técnica	Estágios considerados	Temporal	Geográfica	Tecnológica				
FURUHOLT	1995	Noruega	Gasolina, gasolina com MTBE e óleo diesel	Comparação	Completa - 4 fases da ACV	Cadeia de suprimento	Curto prazo (ano do estudo)	Dados proprietários	Tecnologia usual na data do estudo	litros	Energia, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , COV	Equivalente energético	5 categorias <sup>2</sup>
WRANG <i>et al.</i>	1997	EUA	E85, E10 e gasolina	Comparação	Parcial - ICV e interpretação	Cadeia de suprimento e uso final	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	Btu/milha	Energia, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Não específica	Não considera
SHEERAN <i>et al.</i>	1998	EUA	B100, B20 e óleo diesel	Comparação	Parcial - ICV e interpretação	Cadeia de suprimento e uso final	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais e internacionais	Tecnologia usual na data do estudo	bhp-h	Energia, GEE, poluentes atmosféricos locais	Equivalente mássico	Não considera
EIA	1999	CE	Gasolina, óleo diesel, GLP, GNC, M100, E100, B100, HC, DME	Comparação	Parcial - ICV	Cadeia de suprimento e uso final	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	GJ	Energia, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, HC, MP	Não específica	Não considera
ARMSTRONG e AKHURST	2000	CE	Gasolina, óleo diesel, GLP, GNC, M100, E100, B100, HC, eletricidade	Comparação	Não divulga	Suprimento <sup>1</sup> e uso final	Médio prazo	Valores médios dos países da CE	Tecnologia usual na data do estudo	MJ/km	Energia, CO <sub>2</sub>	Não específica	Não considera
BERR <i>et al.</i>	2001	Austrália	Gasolina Premium sem enxofre, E85, E10, GLP, GNC, GNL, B100, diesool, óleo diesel e óleo diesel GTL	Comparação	Completa - 4 fases da ACV	Cadeia de suprimento e uso final	Curto prazo	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	g/t.km	Energia, GEE e poluentes atmosféricos locais	Equivalente energético e mássico	Não considera
HACKNEY e NEUFVILLE	2001	EUA	Gasolina, gasolina reformulada, óleo diesel, M85, E85, M100, E100, GLP, GNC, GNL, HC, eletricidade	Comparação	Parcial - ICV	Cadeia de suprimento e uso final	Médio prazo (12 anos de vida dos veículos)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	Energia em 12 anos de vida do veículo	Energia, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCNM, MP	Equivalente mássico	Não considera
KADAM	2002	Índia	E10	Desenvolver o produto	Completa - 4 fases do ACV	Cadeia de suprimento e uso final	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	1 tonelada de bagaço seco	Energia, CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , HC e MP	Não específica	6 categorias <sup>3</sup>
KREITH <i>et al.</i>	2002	EUA	GNC, HC, óleo diesel GTL, M100, eletricidade	Comparação	Parcial - ICV	Cadeia de suprimento e uso final	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	Não divulga	Energia	Não específica	Não considera

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.

Com exceção de KADAM (2002), todos os autores estudam a cadeia de suprimento e uso final de energia para os transportes com a finalidade de elaborar comparações entre alternativas. Destes, apenas FURUHOLT (1995) e BEER *et al.* (2001) empregam a técnica de ACV de forma completa, considerando as 4 fases estabelecidas em norma. Nos demais trabalhos observa-se a prática da ACV de forma parcial, envolvendo apenas o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e a interpretação dos dados, o que permite ampliar as conclusões de VERSCHOOR e REIJNDERS (1999), quanto a prática simplificada da ACV em sete grande empresas multinacionais, também para o caso das fontes de energia para os transportes.

A aplicação da ACV de forma completa esbarra na insuficiência de argumentação científica que suporte a escolha de um procedimento para avaliação dos impactos que seja pouco questionável, principalmente no caso de estudos muito abrangentes, como os de SHEERAN *et al.* (1998), IEA (1999), HACKNEY e NEUFVILLE (2001) e KREITH *et al.* (2002). Estes trabalhos concentram-se em fornecer um inventário de dados que possa ser usado como subsídio à avaliação de impactos em estudos futuros.

FURUHOLT (1995) pôde aplicar a ACV de forma completa pois desenvolveu seu trabalho de forma bastante restrita, estudando um sistema de produto formado por uma única refinaria que recebia produto de um único campo de exploração. Além disso, dispunha de informações detalhadas sobre a configuração da refinaria de modo a quantificar detalhadamente as cargas ambientais de apenas 3 co-produto (gasolina, gasolina com MTBE e óleo diesel). Isso possibilitou o máximo de certeza na caracterização dos dados para aplicação da fase de avaliação dos impactos com pouco questionamento. No entanto, mesmo com este nível de detalhamento o trabalho de FURUHOLT (1999) não é abrangente, pois não considera o estágio de uso final dos combustíveis, o que deixa clara a relação de desequilíbrio entre detalhamento e abrangência.

Este desequilíbrio também ocorre no trabalho de BEER *et al.* (2001), que é muito abrangente, envolvendo 20 alternativas de combustível para transporte, porém, aborda cada alternativa de forma excessivamente simplificada, com apresentação de inventários elaborados de forma parcial e com pouca qualidade de dados. Mesmo considerando a possibilidade do emprego que uma variedade de *softwares* específicos para aplicação da

ACV (MENKE *et al.*, 1996), estas ferramentas não compensam a falta de dados com abrangência temporal, geográfica e tecnológica em um estudo específico, o que pode levar à resultados questionáveis.

Com exceção de FURUHOLT (1995) todos os trabalhos consideram o sistema de produto como uma cadeia composta pelos estágios de suprimento e uso final. Porém, não se observa uma sistemática para análise desta cadeia, o que seria desejável, tendo em vista tratarem de objetivos e sistemas de produto semelhantes. Nos trabalhos de WANG (1997), SHEERAN *et al.* (1998) e IEA (1999) observa-se a segmentação da cadeia de suprimento em 4 estágios (produção de matéria-prima, transporte de matéria-prima, produção da energia e transporte da energia). Tanto HACKNEY e NEUFVILLE (2001) como BEER *et al.* (2001) consideram apenas 2 estágios para a cadeia de suprimento (produção e transporte de matéria-prima e produção e distribuição de energia). ARMSTRONG e AKHURST (2000) simplificam ao máximo, considerando a cadeia de suprimento como um estágio único.

O uso de dados com valores médios representativos da região de estudo é dominante, o que caracteriza a abrangência geográfica destes trabalhos. No caso da cadeia de suprimento dos combustíveis derivados do petróleo, observa-se o uso de médias internacionais, como no caso da Comunidade Européia (CE) e Austrália, ou nacionais, como no caso dos Estados Unidos. A padronização dos processos e a equivalência tecnológica encontrada atualmente na indústria do petróleo expande a abrangência temporal e tecnológica e também favorece a adoção de dados internacionais, porém, estas considerações são menos válidas para o caso dos países em desenvolvimento, como é o caso da Índia (KADAM, 2002).

No que se refere às fontes alternativas de energia, a abrangência geográfica dos dados fica restrita à médias regionais e locais, uma vez que estas alternativas estão estreitamente relacionadas com oportunidades e recursos peculiares de uma determinada região. Valores obtidos para a realidade dos países desenvolvidos normalmente não servem para os países em desenvolvimento e vice-versa. A mesma consideração é válida para os requisitos de abrangência temporal e tecnológica.

Os trabalhos de WANG *et al.* (1997), IEA (1999) e HACKNEY e NEUFVILLE (2001) procuram avaliar o comportamento futuro das cadeias de suprimento e uso final das

fontes de energia para transportes. Suas considerações são baseadas principalmente na evolução da tecnologia de uso final em médio (5 a 15 anos) e longo prazo (acima de 15 anos). WANG *et al.* (1997) também consideram alguma evolução na cadeia de suprimento de energia, por meio da consolidação da tecnologia de ponta.

Observa-se uma grande diversidade na definição da unidade funcional, prevalecendo as medidas de conteúdo energético (GJ, bhp-h) e trabalho de transporte (Btu/milha, MJ/km e g/t.km). A escolha da unidade funcional parece estar associada a como seus resultados serão interpretados e para que uso se destinam. A perfeita compreensão do estágio de uso final é determinante na interpretação de unidades funcionais apresentadas na forma de trabalho de transporte e estas parecem ser as mais adequadas quanto se pretende privilegiar a função de transporte vinculada ao uso de energia.

Em todos os trabalhos a energia aparece como o principal fluxo avaliado. Isso ocorre na forma de energia total consumida e pode ser dividida em energia de origem não renovável ou renovável. Com exceção de KREITH *et al.* (2002) os gases de efeito estufa (GEE), com destaque para o CO<sub>2</sub>, são contabilizados. A determinação dos poluentes atmosféricos locais também foi observada com frequência, sendo menos comum a contabilização de efluentes líquidos e sólidos.

SHEERAN *et al.* (1998) BEER *et al.* (2001) e KADAM (2002) se utilizam de *softwares* comerciais para desenvolvimento do ICV, o que os auxilia na obtenção de resultados bastante abrangentes quanto ao número de fluxos considerados por estágio. Wang *et al.* (1999) e HACKNEY e NEUFVILLE (2001) adotaram a elaboração do ICV em planilhas de M.S. Excel, embora o trabalho de WANG *et al.* (1999) tenha se transformado em um programa de aplicação mais extensa (Modelo GREEET 1.5a). O uso de *softwares* comerciais dificulta a interpretação dos dados e a avaliação de requisitos de qualidade, principalmente se estes já dispuserem de banco de dados próprios, raramente compatíveis com a realidade dos países em desenvolvimento.

O trabalho da IEA (1999) apresenta os resultados do ICV associados a uma margem de variação, como forma de compensar a incerteza dos resultados. Com exceção deste caso, nenhum outro trabalho apresentou qualquer tipo de tratamento para os resultados, o que demonstra que não se trata de prática comum no caso da ACV aplicada às fontes de energia para os transportes.

A maioria dos trabalhos foi desenvolvida e aplicada no contexto dos países desenvolvidos (Comunidade Européia, Estados Unidos, Canadá e Austrália), cabendo ressaltar como exceção o trabalho de KADAM (2002), com aplicações voltada para a Índia.

Na totalidade dos trabalhos analisados os limites do sistema de produto se restringem ao primeiro nível, ou seja, consideram apenas os fluxos diretamente relacionados com o processo em estudo. A energia embutida em máquinas, equipamentos, prédios, infraestrutura e materiais de consumo, bem como os impactos ambientais de sua obtenção, não são considerados.

O que foi apresentado neste capítulo demonstra como a técnica de ACV pode ser empregada como uma ferramenta para auxiliar na análise da eficiência e energética da cadeia de suprimento e uso final de fontes de energia para os transportes. O uso da ACV para esta finalidade apresenta limitações que devem ser consideradas e a difusão de seu uso carece de uma melhor sistematização, contribuições que fazem parte dos objetivos desta tese.

## **CAPÍTULO 6 – PROCEDIMENTO DE ANÁLISE COMPARATIVA DE FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO**

### **6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo apresenta-se um procedimento capaz de subsidiar a análise comparativa entre fontes de energia para o transporte rodoviário. Este procedimento pode ser considerado como uma contribuição à técnica de Análise de Ciclo de Vida (ACV), desenvolvido a partir da aplicação da ferramenta de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) conjugada com o conceito de ecoeficiência e com aplicação específica para a análise simultânea de cadeias de suprimento e uso final de fontes de energia para o transporte rodoviário.

Como parte do procedimento, apresenta-se um modelo de ciclo de vida aplicado à análise de fontes de energia para o transporte rodoviário que dispõe de estrutura modular capaz de admitir aprimoramentos sucessivos, porém, elaborado de modo à comparar equitativamente as diversas alternativas. Como contribuição adicional, o modelo de ciclo de vida é aplicado às fontes de energia convencionais, de origem não renovável e às fontes de energia alternativas, com destaque para as de origem renovável derivadas de biomassa.

### **6.2. ESTRUTURA DO PROCEDIMENTO**

O procedimento segue a estrutura da ferramenta de ICV apresentada no Capítulo 5, porém, deve ser possível determinar previamente as alternativas de fontes de energia, como foi feito no Capítulo 3 (Tabela 3.1) e os sistemas de propulsão (Capítulo 2). A partir destas informações propõem-se uma estrutura de procedimentos em 3 fases, conforme descrição a seguir.

#### **6.2.1. Fase 1 – Objetivo, função e escopo**

Considera-se como objetivo a análise comparativa entre as alternativas de fontes de energia para o transporte rodoviário. Esta comparação pode ser feita com uma referência, quando normalmente se utilizam indicadores obtidos a partir das fontes de energia convencionais.

Para o caso do transporte rodoviário a função da energia é produzir o deslocamento de

uma determinada unidade (passageiro, carga etc) ao longo de um percurso (distância). Esta função pode ser traduzida na forma de trabalho (*pass. x d* ou *t x d*). Do entendimento da função decorre a definição da unidade funcional e do desempenho. A Tabela 5.1 (Capítulo 5) sintetizou estes conceitos.

O escopo fica melhor caracterizado se sua abordagem se dividir em 2 Etapas:

*Etapa 1 – Escopo – Abrangência da aplicação e caracterização das alternativas.*

No que se refere a abrangência temporal, geográfica e tecnológica que se pretende dar a análise de cada alternativa, é prática que esta se limite ao estudo de uma região específica, no momento presente, quando se dispõem de tecnologia representativa desta situação.

A definição da abrangência cria um contexto que restringe o conjunto de alternativas a ser caracterizado, o que agiliza a aplicação da técnica de ICV e facilita a obtenção de dados com melhor qualidade.

As fontes de energia são caracterizadas pela sua cadeia de suprimento e podem ser classificadas em fontes convencionais (FC) e fontes alternativas (FA). Genericamente, FC pode variar de 1 até N e FA pode variar de 1 até M. Na prática existem 2 ( $N = 2$ ) FC para o transporte rodoviário: gasolina e óleo diesel derivados do petróleo.

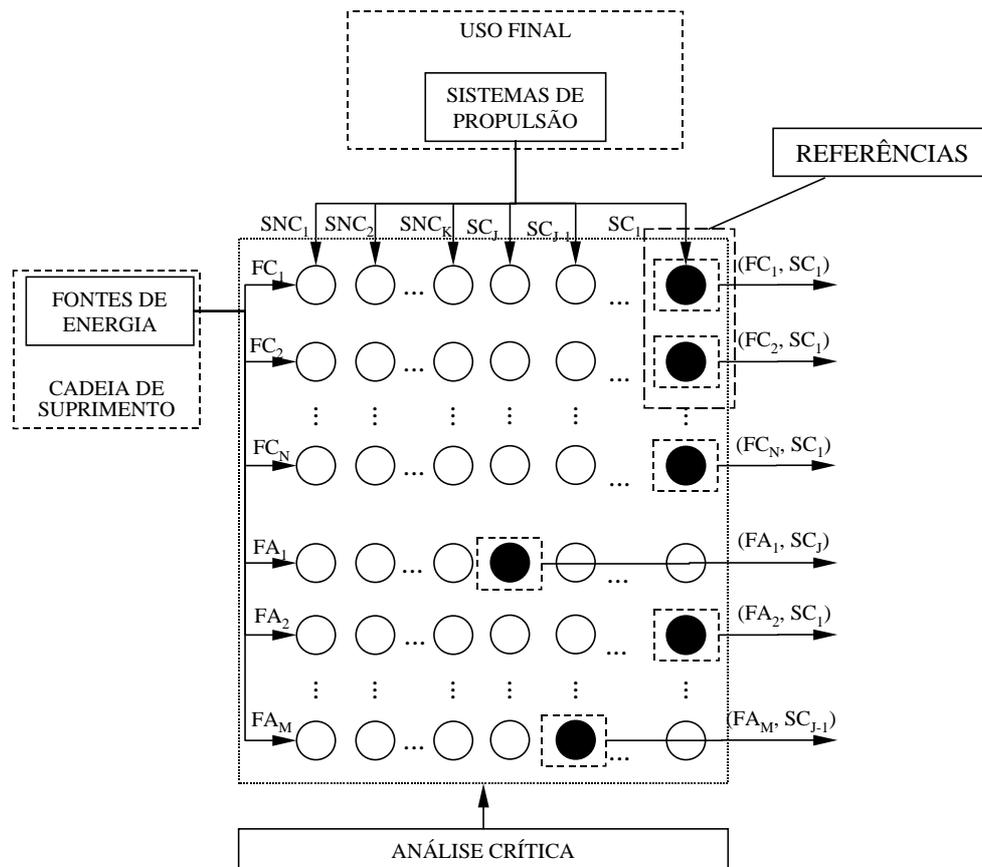
É possível que o uso final de uma fonte de energia possa estar associado a mais de um tipo de sistema de propulsão. Estes podem ser classificados em sistemas convencionais (SC) e sistemas não convencionais (SNC). Assim como no caso das fontes de energia, SNC pode variar de 1 até K e SC de 1 até J.

Uma fonte de energia para o transporte rodoviário só fica adequadamente caracterizada se houver a identificação da sua origem (cadeia de suprimento) e forma de uso (uso final). Além disso, os limites da aplicação devem ser capazes de especificar as condições de operação no uso final.

A caracterização do par fonte de energia + sistema de propulsão deve ser tão específica e detalhada quanto necessário, considerando que o sistema de propulsão convencional pode utilizar fontes de energia convencionais ou alternativas, ou que a mistura de dois ou mais combustíveis deve ser associada a uma nova cadeia de suprimento.

A combinação de  $N + M$  fontes de energia com  $K + J$  sistemas de propulsão originam uma matriz ( $M_{N+M \times K+J}$ ) de pares ordenados que representa todas as possíveis cadeias de suprimento e uso final das fontes de energia para o transporte rodoviário. Cada par ordenado definido nesta matriz é essencialmente dependente da cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia, porém, nem todas as combinações são possíveis, exigindo que uma análise crítica seja realizada. Esta análise crítica é orientada pelas condições estabelecidas nos limites da aplicação e na caracterização das alternativas.

Como resultado desta etapa é obtida a Matriz de Alternativas de Ciclos de Vida (MACV) onde permanecem apenas os pares ordenados que representam combinações que estão adequadamente relacionadas com os limites da aplicação e que irão passar para a próxima etapa do procedimento. A Figura 6.1 apresenta uma MACV genérica onde os pares ordenados destacados em tonalidade escura foram obtidos da análise crítica e irão passar para a próxima etapa do procedimento. Também se destacam os pares ordenados que representam alternativas consideradas como referências.



Legenda: FC<sub>n</sub> – fonte de energia convencional n, FA<sub>m</sub> – fonte de energia alternativa m, SC<sub>k</sub> – sistema de transmissão convencional k, SNC<sub>k</sub> – sistema de transmissão não convencional k.

Figura 6.1. Matriz de Alternativas de Ciclos de Vida (MACV) genérica.

## Etapa 2 – Escopo – Dimensões da aplicação.

As dimensões da aplicação envolvem o comprimento, largura e profundidade que se pretende dar ao inventário de ciclo de vida para cada umas das alternativas componentes da MACV.

No que se refere à extensão, o emprego da ferramenta de ICV exige que se considere da extração da matéria-prima até a gestão dos resíduos. Porém, da análise dos trabalhos apresentados no Capítulo 5 (item 5.3) propõe-se que 3 níveis de detalhamento sejam considerados, em função da profundidade da análise, como apresentado na Figura 6.2.

### NÍVEL 1: MACRO-ESTÁGIOS



### NÍVEL 2: MESO-ESTÁGIOS



### NÍVEL 3: MICRO-ESTÁGIOS

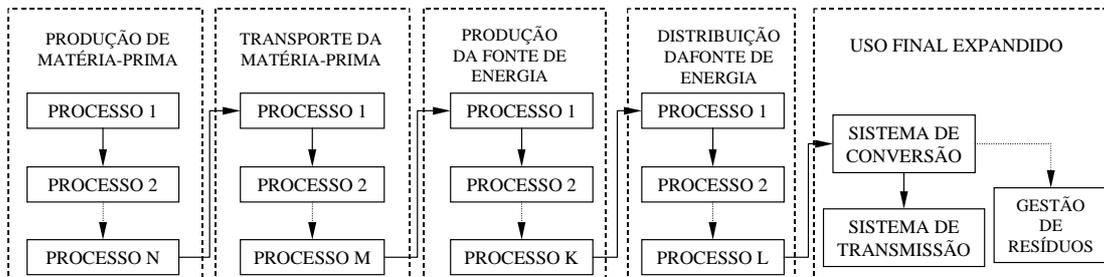


Figura 6.2. Níveis de detalhamento do modelo de ciclo de vida.

Um modelo de ciclo de vida que considere a abordagem por níveis de detalhamento possibilita a adoção de estrutura modular e a prática de refinamentos sucessivos, a medida que se disponha de um maior detalhamento dos estágios e processos.

Das referências consultadas, apenas ARMSTRONG e AKHURST (2000) limitam-se ao nível dos macro-estágios, não apresentando maior detalhamento sobre a cadeia de suprimento. Os demais trabalhos consideram pelo menos os meso-estágios da cadeia de suprimento. FURUHOLT (1995), WRANG *et al.* (1997), SHEEHAN *et al.* (1998) e

HACKNEY e NEUFVILLE (2001) também apresentam os micro-estágios da cadeia de suprimento, embora nem sempre com seus limites estabelecidos de forma equivalente em função dos meso-estágios.

Como os micro-estágios (processos) são específicos das cadeias de suprimento de cada fonte de energia, existe uma grande dificuldade em classificá-los equitativamente por meso-estágio, verificando-se na prática a fusão ou a supressão de processos e até mesmo de meso-estágios, o que dificulta a comparação entre fontes de energia.

Por considerar um nível de detalhamento intermediário, encontrado na maioria dos trabalhos pesquisados, o modelo de ciclo de vida a ser adotado neste procedimento deverá apresentar nível de detalhamento de meso-estágios para a cadeia de suprimento.

É comum que o estágio de uso final se limite a considerações sobre o sistema de propulsão, porém, para a aplicação do ICV de forma completa, é necessário que se inclua um meso-estágio de gestão dos resíduos, embora esta preocupação não tenha sido observada em nenhuma das referências consultadas. Acredita-se que a razão para isso esteja na dificuldade em identificar este meso-estágio e quantificar os recursos necessários para sua realização.

Para a dimensão da largura, é prática que se considere apenas o nível 1, ou seja os insumos e as cargas ambientais diretamente associadas aos meso-estágios. Refinamentos podem ser obtidos considerando-se os níveis 2 (consideração dos insumos e cargas ambientais para produção dos insumos do nível 1) e nível 3 (consideração dos insumos e cargas ambientais para produção dos insumos do nível 2 e bens de capital).

Como não existe um modelo a ser seguido e em função da diversidade e complexidade das cadeias de suprimento existentes, da análise dos trabalhos apresentados no item 5.3 observa falta de equilíbrio no tratamento de diferentes fontes de energia. Para as fontes convencionais (combustíveis derivados de petróleo) não é prática considerar a energia contida nos insumos e bens de capital (máquinas e equipamentos), porém, no caso dos biocombustíveis a energia incorporada nos fertilizantes, agrotóxicos e na fabricação de implementos agrícolas é normalmente considerada.

A Figura 6.3 apresenta uma proposta de modelo de ciclo de vida que se adapta ao caso das fontes de energia para o transporte rodoviário. Os estágios e fluxos representados

em linhas cheias devem ser considerados numa primeira abordagem. Refinamentos na dimensão da largura são obtidos ao se considerar os elementos representados em linha pontilhada, enquanto na dimensão da profundidade deve-se considerar o desdobramento em micro-estágios (Figura 6.2).

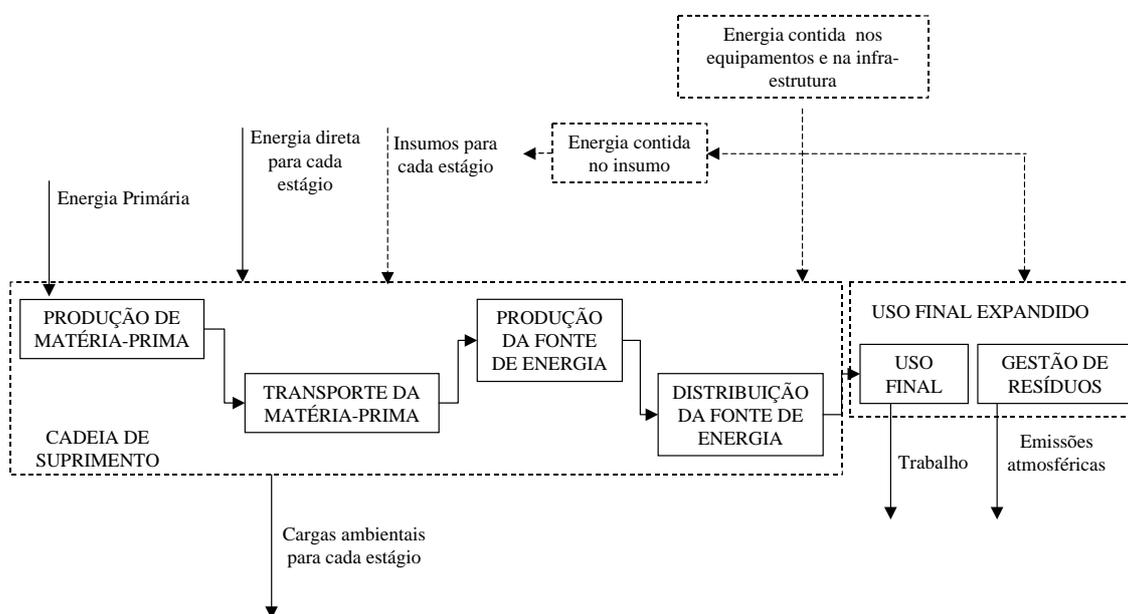


Figura 6.3. Modelo de ciclo de vida para as fontes de energia para o transporte rodoviário.

Para auxiliar na escolha dos fluxos a serem incluídos adota-se como referência os elementos chave e os princípios para determinação dos indicadores de ecoeficiência (item 4.3, Tabela 4.1), conciliando-os com o escopo do trabalho, que determina os limites considerados na dimensão da largura e seguindo a doutrina de “menos melhor”, que permite a simplificação da análise do inventário e facilita a obtenção dos dados.

Uma análise completa exigiria a inclusão de uma infinidade de fluxos, porém, verificando as referências consultadas que uma primeira abordagem poderia se limitar aos fluxos relacionados a seguir, o que se considera uma atitude coerente com os objetivos desta tese.

- 1) Energia em processo de conversão de energia primária em trabalho;
- 2) Energia total consumida em cada estágio;
- 3) Energia de origem renovável consumida em cada estágio;
- 4) Gases de efeito estufa (GEE) oriundos do consumo de energia em cada estágio.

Os fluxos 1 e 2 atendem ao objetivo deste trabalho, no que se refere à análise da eficiência energética. Os indicadores 3 e 4 aprimoram esta análise com a introdução de aspectos associados ao meio-ambiente: aumento no uso de recursos renováveis e redução dos impactos ambientais globais. Ambos são indicadores facilmente relacionáveis com o consumo de energia, relevantes para o gerenciamento do empreendimento e para o meio ambiente e capazes de reconhecer a diversidade de cada cadeia de suprimento e uso final.

Como resultado desta etapa obtém-se os fluxogramas dos ciclos de vida para cada uma das alternativas estabelecidas na MACV. Estes fluxogramas são tão detalhados e específicos quanto se considerar necessário para a elaboração do inventário de dados.

### **6.2.2.Fase 2 – Inventário de Ciclo de Vida (ICV)**

Para cada um dos elementos da MACV deve-se realizar a coleta de dados, ao que se denomina inventário de ciclo de vida (ICV), sendo esta a fase mais extensa e trabalhosa do procedimento que pode ser dividida em duas etapas, conforme descrito a seguir.

#### *Etapa 1 – Coleta de dados*

Numa pesquisa preliminar quantifica-se os dados com pouca preocupação sobre sua qualidade. Haverá dados de uso específico, diretamente associados ao sistema em estudo, cuja certeza quanto à aplicação e precisão é grande. Quando se dispuser de um conjunto de dados representativos de um processo, recomenda-se considerar o valor médio e o intervalo de variação, calculado em função do desvio padrão da amostra, e que será considerado como uma expressão da incerteza na obtenção dos dados.

Outros dados podem ser estimados de bancos de dados de uso geral, quando existe menor certeza quanto à aplicação ao sistema em estudo e precisão. Neste caso, recomenda-se adotar o limite superior dos dados disponíveis (MAURICE *et al.*, 2000) e apresentar justificativas e comentários pertinentes.

Para o caso das alternativas de fonte de energia para o transporte rodoviário, a Tabela 6.1 apresenta o que se recomenda como melhor caracterização da abrangência para a coleta de dados no momento da realização do inventário.

Tabela 6.1. Caracterização da abrangência dos dados do modelo.

Abrangência	Fontes convencionais de energia e sistemas de propulsão convencionais	Fontes alternativas de energia e sistemas de propulsão não convencionais
Temporal	Dados históricos	Dados recentes
Geográfica	Internacional e nacional	Nacional e regional (preferencialmente)
Tecnológica	Tecnologia representativa de mercado	Tecnologia representativa de mercado ou em desenvolvimento

A abrangência temporal e geográfica na obtenção de dados pode ser menos restritiva para o caso das fontes de energia e dos sistemas de propulsão convencionais. Por envolverem tecnologia internacionalmente consolidada, espera-se poucas variações dos dados no tempo e no espaço. O mesmo não ocorre com as fontes de energia alternativas e os sistemas de propulsão não convencionais, que muitas vezes representam soluções em desenvolvimento, que sofrem mudanças de parâmetro no curto prazo e podem representar soluções particulares de uma região específica.

No que se refere especificamente à abrangência geográfica, os combustíveis de fontes não renováveis, principalmente os derivados de petróleo, estão sujeitos à influência do mercado internacional em função da profunda sedimentação e abrangência do seu uso. Isso não ocorre com os combustíveis de fonte renovável (biocombustíveis), que na maioria das vezes apresentam desenvolvimento regionalizado.

A abrangência tecnológica deve garantir a escolha de tecnologia representativa para a região em estudo, que no caso do par fonte de energia e sistema de propulsão convencional são menos influenciados por aspectos regionais e pela variação ao longo do tempo que as fontes alternativas e os sistemas de propulsão não convencionais.

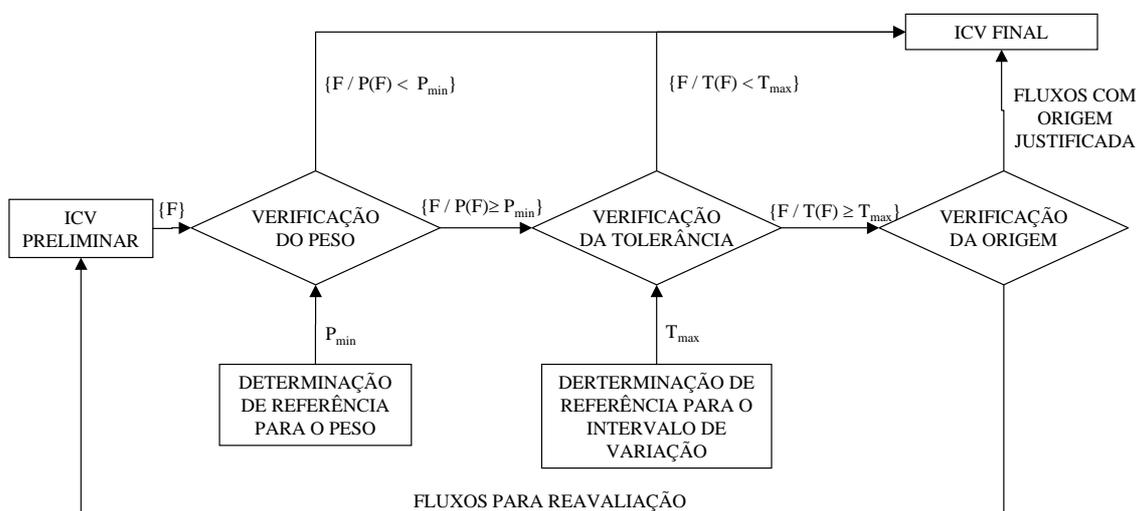
#### *Etapa 2 – Avaliação da qualidade dos dados*

Três avaliações são feitas, quanto ao peso que os fluxos de cada processo têm em relação ao fluxo total do ciclo de vida, quanto a origem, que pode ser uso específico ou uso geral e quanto ao intervalo de variação dos valores de cada fluxo.

O peso é determinado pela contribuição que o limite superior do fluxo de um processo dá ao fluxo total de um insumo ou carga ambiental. Para que se avalie a importância de um fluxo por este critério é necessário que se determine uma referência ( $P_{\min}$ ). MAURICE *et al.* (2000) recomenda que em uma primeira abordagem todos os fluxos com peso maior que 10% ( $P_{\min} = 10\%$ ) devem ser avaliados quanto a origem e intervalo

de variação.

Também para o caso do intervalo de variação, alguma referência deve ser estabelecida ( $T_{max}$ ). Fluxos que apresentem peso maior que  $P_{min}$  e intervalo de variação maior que  $T_{max}$  devem ser avaliados quanto a origem dos dados. Caso estes fluxos tenham sido determinados a partir de dados de uso específico, é comum que se encontre algum tipo de justificativa para o excesso de variação, que normalmente está associada à incerteza quanto ao valor do dado. Já no caso dos fluxos terem sido determinados a partir de dados de uso geral, ao que se denomina de fluxos críticos, recomenda-se que sua origem seja reavaliada e um esforço maior seja feito no sentido diminuir a incerteza na sua obtenção, o que nem sempre é possível. A Figura 6.4 ilustra o processo de avaliação da qualidade dos dados.



Legenda: {F} - conjunto de fluxos a ser avaliado

Figura 6.4. Processo de avaliação da qualidade dos dados.

O processo de avaliação da qualidade dos dados é uma ferramenta útil para identificar os fluxos críticos, uma vez que tenham sido estabelecidas referências de peso e intervalo de variação, o que depende dos critérios adotados pelo analista e que devem ser adequadamente documentados. Também deve ficar a critério do analista, segundo as limitações de cada caso, qual será a profundidade adotada na reavaliação dos dados.

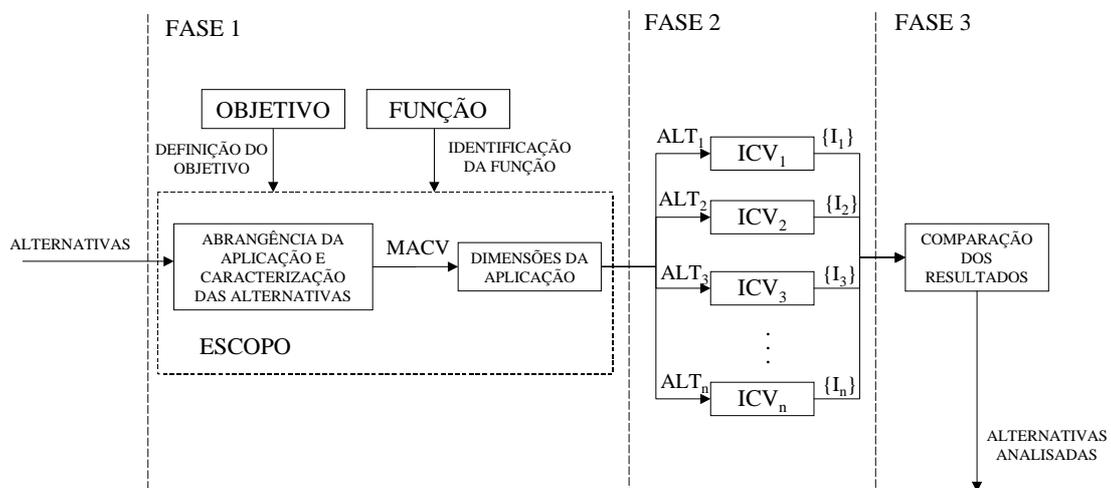
Reavaliar prioritariamente os dados relacionados aos fluxos críticos orienta os esforços necessários ao aprimoramento do ICV e permite que se estabeleça um processo de refinamento progressivo dos dados, o que reduz o tempo e os custos desta operação.

### 6.2.3.Fase 3 – Análise comparativa dos resultados

Para cada alternativa identificada na MACV, o resultado do ICV é um conjunto de indicadores de ecoeficiência acompanhados de intervalos de variação e expressos com base na unidade funcional. A simples comparação dos indicadores obtidos para cada alternativa, entre si ou com aqueles escolhidos como referência, já permite a análise comparativa das fontes de energia para o transporte rodoviário.

Para facilitar a comparação, os indicadores podem ser combinados na forma de medidas de ecoeficiência (MEE), conforme equação (4.7), de modo que quanto maior o valor da medida, melhor o desempenho da alternativa. Os resultados podem ser expressos na forma de gráficos, expressos em valores absolutos ou relativos à uma referência, quando usualmente se escolhe a fonte de energia convencional.

A Figura 6.5 sintetiza o procedimento para a análise comparativa das alternativas de fonte de energia para o transporte rodoviário com base no que foi exposto anteriormente.



Legenda:  $ALT_i$  – modelo de ciclo de vida para a  $i$ -ésima alternativa; MACV – Matriz de Alternativas de Ciclo de Vida;  $ICV_i$  – Invetário de Ciclo de Vida para a  $i$ -ésima alternativa;  $\{I_i\}$  – conjunto de indicadores de ecoeficiência da  $i$ -ésima alternativa.

Figura 6.5. Síntese do procedimento para análise comparativa das alternativas de fonte de energia para o transporte rodoviário.

O procedimento requer a completa definição das fontes de energia e dos sistemas de propulsão para que não haja equívocos na montagem dos pares ordenados – fontes de energia e sistemas de propulsão. Assim, a gasolina obtida a partir do refino do petróleo é uma fonte de energia convencional que pode ser utilizada em mais de um sistema de

propulsão convencional. Já a gasolina sintética, embora também possa ser utilizada nos mesmos sistemas de propulsão convencionais, é uma fonte de energia alternativa.

Misturas entre fontes de energia também devem ser tratadas como alternativas individuais pois consideram em sua cadeia de suprimento uma composição diferente de cada uma das fontes de energia que a compõem. A alocação de alternativas na Matriz Alternativas de Ciclo de Vida (MACV) é ilimitada, o que possibilita qualquer composição. O mesmo deve ocorrer para os sistemas de propulsão. O par MCI e SPM compõem o sistema de propulsão convencional. No entanto, aplicações específicas ocorrem para motores do ciclo Otto, diesel, *flexible-fuel*, bicomustível etc. Por apresentar a flexibilidade de definição de mais de um sistema de propulsão convencional o procedimento é adaptável a esta variedade de opções.

### **6.3.APLICAÇÃO DO MODELO DE CICLO DE VIDA À FONTES DE ENERGIA SELECIONADAS**

Uma das principais preocupações quanto a equidade na comparação entre fontes de energia para o transporte rodoviário está na elaboração do modelo de ciclo de vida. Como foi visto na Figura 6.2, é possível o detalhamento do modelo em três níveis, sendo que as comparações normalmente se fazem entre os meso-estágios. Assim sendo, deve existir a preocupação em considerar quais processos (micro-estágios) são incluídos nos meso-estágios e se isso é feito de forma equitativa para cada uma das alternativas de fonte de energia.

Com base nas referências consultadas para a elaboração dos itens 3.2, 4.4 e 5.3 são estruturados modelos de ciclo de vida para 3 conjuntos de alternativas de fontes de energia para o transporte:

- ◆ Gasolina e óleo diesel derivados de petróleo
- ◆ Gás natural comprimido;
- ◆ Biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis.

O primeiro conjunto representa as fontes de energia convencionais, tradicionalmente consideradas como referência. O gás natural é um combustível de origem não renovável, porém, de reservas abundantes e considerado mais limpo que os derivados de petróleo. Já os biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis são fontes de energia

renovável, que tem como representantes o etanol e o biodiesel e são consideradas alternativas de interesse para os países em desenvolvimento como o Brasil.

Os modelos representam um esforço de padronização das cadeias de suprimento e uso final das fontes de energia para transporte rodoviário e a síntese das experiências obtidas nas referências consultadas. Na elaboração dos modelos procurou-se equilibrar uma abordagem generalista com o necessário detalhamento a nível de micro-estágios, considerando sempre que oportuno, particularidades da realidade brasileira.

### 6.3.1. Gasolina e óleo diesel derivados de petróleo

A Figura 6.6 apresenta o modelo de ciclo de vida recomendado para a análise da cadeia de suprimento e uso final da gasolina e do óleo diesel derivados do petróleo.

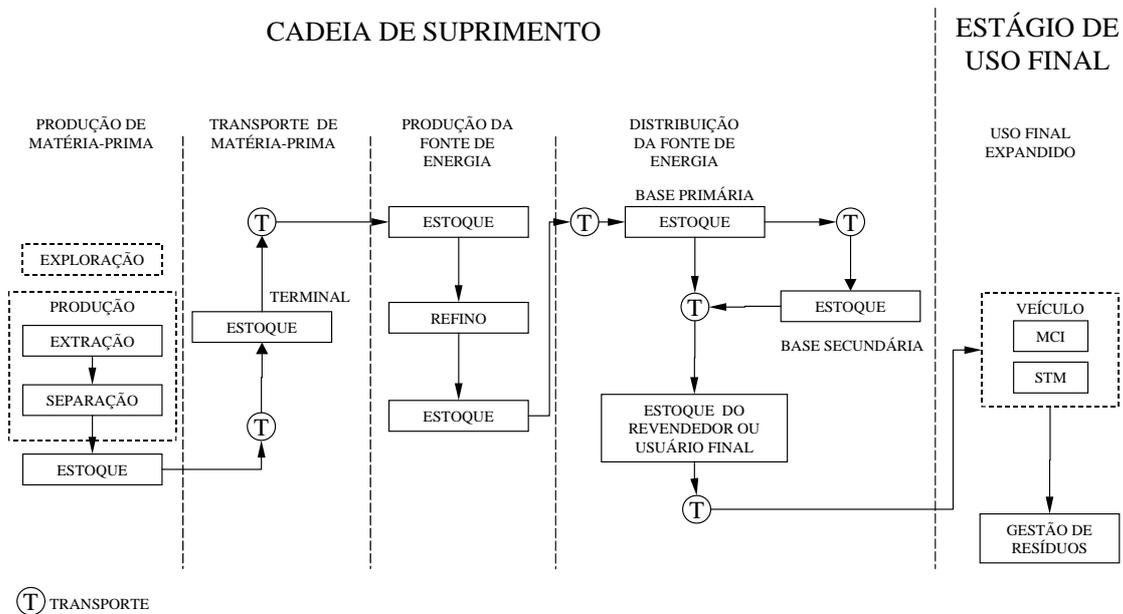


Figura 6.6. Modelo de ciclo de vida para gasolina e óleo diesel derivados de petróleo.

O processo de exploração encontra-se destacado com linhas tracejadas pois nem sempre é considerado. Os argumentos para sua exclusão estão relacionados a sua pequena contribuição na cadeia de suprimento como um todo e o alto grau de incerteza quanto ao valor a ser considerado (BOUSTEAD e HANCOCK, 1979, SHEEHAN *et al.*, 1998, EIA, 1999, HACKNEY e NEUFVILLE, 2001, THOMAS – comunicação via e-mail, 2004). Nenhum dos trabalhos consultados considera a exploração (prospecção + perfuração) como um processo individual, na prática seus impactos são adicionados ao processo de extração. Isto se deve ao fato destes processos não resultarem diretamente

em um produto.

A extração e a separação são processos notáveis da produção de matéria-prima responsáveis pela maior parte do consumo de energia neste meso-estágio. O estoque provisório, que precede o transporte também deve ser incluído e seus fluxos envolvem emissões evaporativas e energia para aquecimento.

O principal aspecto a ser considerado na produção de matéria-prima é o tipo, podendo ser em terra (*on shore*) ou no mar (*off shore*). O tipo de produção caracteriza a facilidade com que o petróleo é produzido o que determina o aporte de insumos e os impactos potenciais.

Os bombeios de longa distância por dutos e o transporte por navios, barcas, trens e caminhões tanque são característicos do transporte de matéria-prima. Aqui também é comum a existência de estoques em terminais.

A produção da energia (combustível) envolve o processo de refino e os estoques de refinaria, antes e depois da produção, bem como a movimentação (bombeio) interna à refinaria e em alguns casos para fora da refinaria. Com exceção de FURUHOLT (1995), todos os trabalhos consultados consideram a refinaria como um processo fechado, onde a matéria-prima é transformada em produtos e todos os recursos necessários são rateados seguindo o critério de alocação por base mássica ou por conteúdo energético.

O meso-estágio de distribuição de energia considera toda a movimentação a partir do estoque da refinaria. No Brasil é prática que os combustíveis sejam bombeados por dutos até os estoques das empresas distribuidoras, localizados próximos às refinarias (base primária). Daí o combustível pode ser transportado para outros locais de estocagem (base secundária) ou para o estoque de revendedores (postos ou atacadistas) ou do usuário final (frotistas). Todos os processos desta rede devem ser considerados no meso-estágio de distribuição de energia.

A cadeia de suprimento dos derivados de petróleo apresenta como regra abrangência nacional. Considerar o país como região de estudo e adotar valores médios para os dados dos processos é prática comum na maioria dos trabalhos consultados. Neste caso, aumenta-se o nível de incerteza quanto a aplicação e valor dos dados em detrimento da abrangência do estudo.

A consideração de valores médios nacionais para os dados implica que todo o petróleo seja processado por uma refinaria padrão, que apresenta características médias do parque de refino nacional. Isso não implica em alteração na determinação das distâncias médias de transporte e distribuição que continuam considerando a produção descentralizada.

Alternativamente, é possível determinar uma região de estudo e a partir daí identificar qual a cadeia de suprimento que forneceu o combustível para aquela região. Neste caso é mais fácil caracterizar uma cadeia de processos específica, o que envolve menos incertezas, porém, com resultados limitados à região de estudo. Como a utilização de fontes alternativas de energia para o transporte rodoviário normalmente apresenta dependência de aspectos regionais, considerar uma região de estudo para as fontes convencionais parece ser uma opção recomendável.

No macro-estágio de uso final, como regra, se considera o uso de veículos equipados com sistema de propulsão convencional, de tecnologia consolidada e representativa da região de estudo e da época. Os resultados são utilizados como referência para comparação e a escolha deve ser equitativa com as possibilidades de aplicação das fontes alternativas de energia. Além disso, as condições de operação também devem ser estabelecidas e mantidas as mesmas para todas as alternativas.

A gestão de resíduos é um processo condicionado pela adequada aplicação da ACV, porém, não considerado em nenhuma das referências consultadas. Para o uso de energia, se relaciona principalmente com a gestão dos gases de descarga, em particular o CO<sub>2</sub>, por ser o principal resíduo e por causar impactos ambientais globais.

### **6.3.2. Gas natural comprimido**

O modelo para o gás natural comprimido, que pode ser visto na Figura 6.7, apresenta similaridades com o modelo para os combustíveis derivados de petróleo, principalmente quando se trata de gás natural associado. No entanto, o gás natural que se encontra nas jazidas já é um combustível praticamente pronto para uso e seu processamento é muito mais simples que o do petróleo.

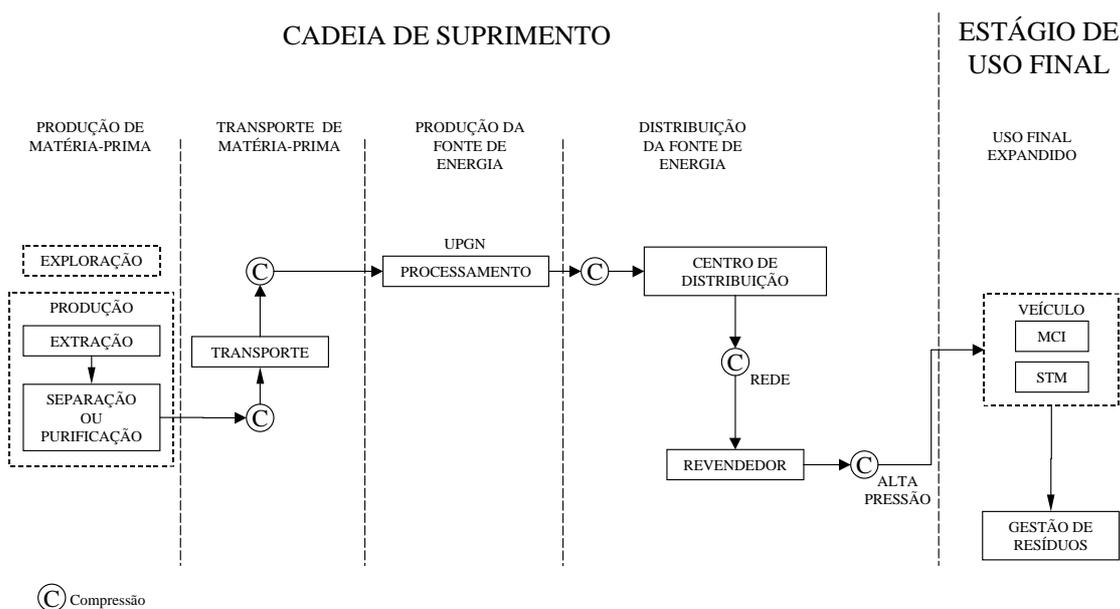


Figura 6.7. Modelo de ciclo de vida para o gás natural comprimido.

Como no caso do petróleo, o processo de exploração é normalmente desconsiderado e sendo o gás natural associado, todo o esforço de prospecção e perfuração será alocado para o petróleo.

É desejável que o processamento do gás natural seja feito o mais próximo possível da sua produção, o que implica na fusão dos processos de purificação e processamento e na supressão do meso-estágio de transporte de matéria-prima (IEA, 1999, SPATH e MANN, 2000, GARCIA, 2002).

No entanto, um modelo de ciclo de vida mais abrangente deve considerar que no estágio de produção o gás natural sofre separação, se associado ao petróleo, e purificação, com eliminação de parte da água, condensados e se houver, enxofre. Esta purificação é suficiente para que o produto seja transportado à uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN) onde será enquadrado na especificação final de distribuição (BEER *et al.*, 2001).

Na prática, a posição da UPGN na cadeia de suprimento não faz muita diferença se não estiverem sendo feitas comparações entre meso-estágios, porém, o modelo proposto é mais coerente com os adotados para as demais fontes de energia.

O meso-estágio de distribuição é o mais extenso e complexo, envolvendo o transporte do gás natural a baixa pressão entre a UPGN e os centros de distribuição e destes para a

rede de distribuição. No revendedor o gás natural é comprimido e abastecido nos veículos.

As considerações para o estágio de uso final são as mesmas adotadas para a gasolina e o óleo diesel, sendo o equipamento de uso final coerente com o adotado para as fontes de energia convencionais para permitir uma comparação adequada.

### 6.3.3. Biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis

Um modelo de ciclo de vida para os biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis é apresentado na Figura 6.8. Este modelo considera que a matéria-prima para produção do biocombustível é o insumo cultivável bruto, assim como foi colhido e tem como principal referência a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar no Brasil.

O meso-estágio de produção de matéria-prima envolve a produção de sementes ou mudas e 4 processos de agricultura, sendo comum que se considere a energia contida em insumos como fertilizantes e agrotóxicos, além da energia diretamente utilizada nos processos. Por uma questão de coerência com os demais modelos, considera-se que os processos de carga, transporte e descarga do insumo agrícola façam parte do meso-estágio de transporte de matéria-prima.

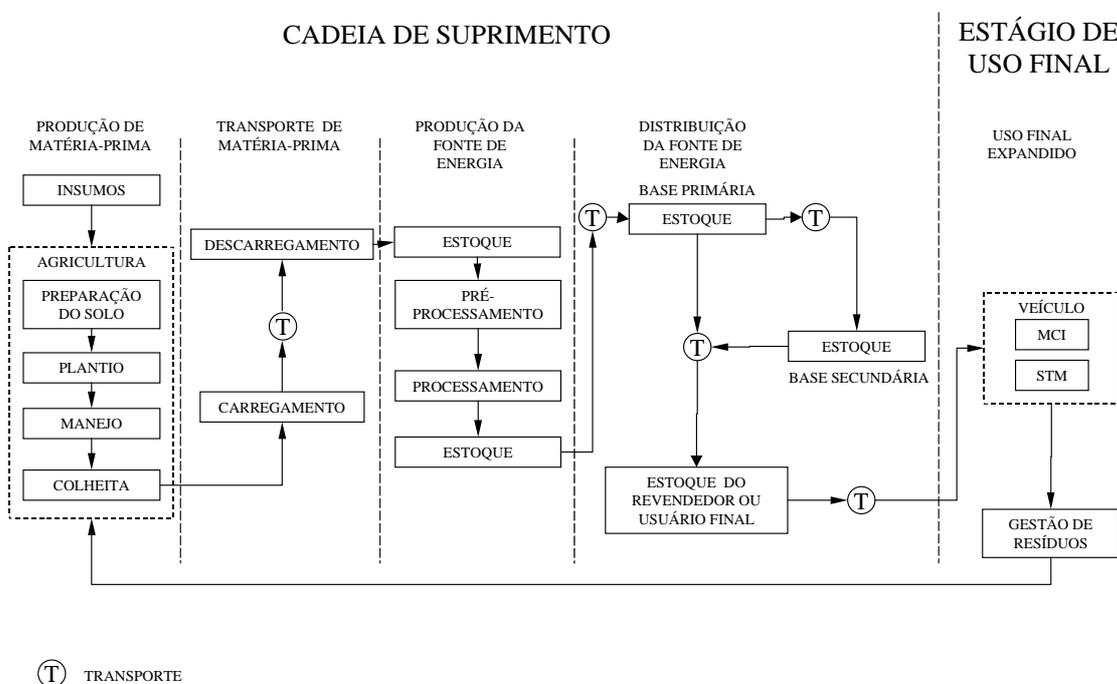


Figura 6.8. Modelo de ciclo de vida para os biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis.

O meso-estágio de produção da fonte de energia envolve todo o processamento necessário à conversão do insumo cultivável em biocombustível pronto para ser utilizada no transporte rodoviário. Para algumas matérias-primas, como a cana-de-açúcar, não existe razão em adotar a divisão em pré-processamento e processamento, porém, existem outros biocombustíveis onde esta segmentação é recomendável, como no caso do biodiesel.

Quando o insumo cultivável pode originar um produto intermediário de maior valor agregado, com densidade e poder calorífico similar ao do biocombustível, como é o caso dos óleos vegetais, justifica-se a consideração de um pré-processamento. É possível e em alguns casos desejável, considerar que este produto intermediário seja a matéria-prima para o estágio de produção da fonte de energia.

Neste caso obtém-se uma derivação do modelo proposto na Figura 6.8. O meso-estágio de produção de matéria-prima se estenderia até o pré-processamento. Um meso-estágio de transporte de matéria-prima diferente teria de ser incluído, para levar o produto intermediário até o local do seu processamento que pode ser distante da produção de matéria-prima de modo a conciliar outros interesses. A Figura 6.9 ilustra o que foi descrito.

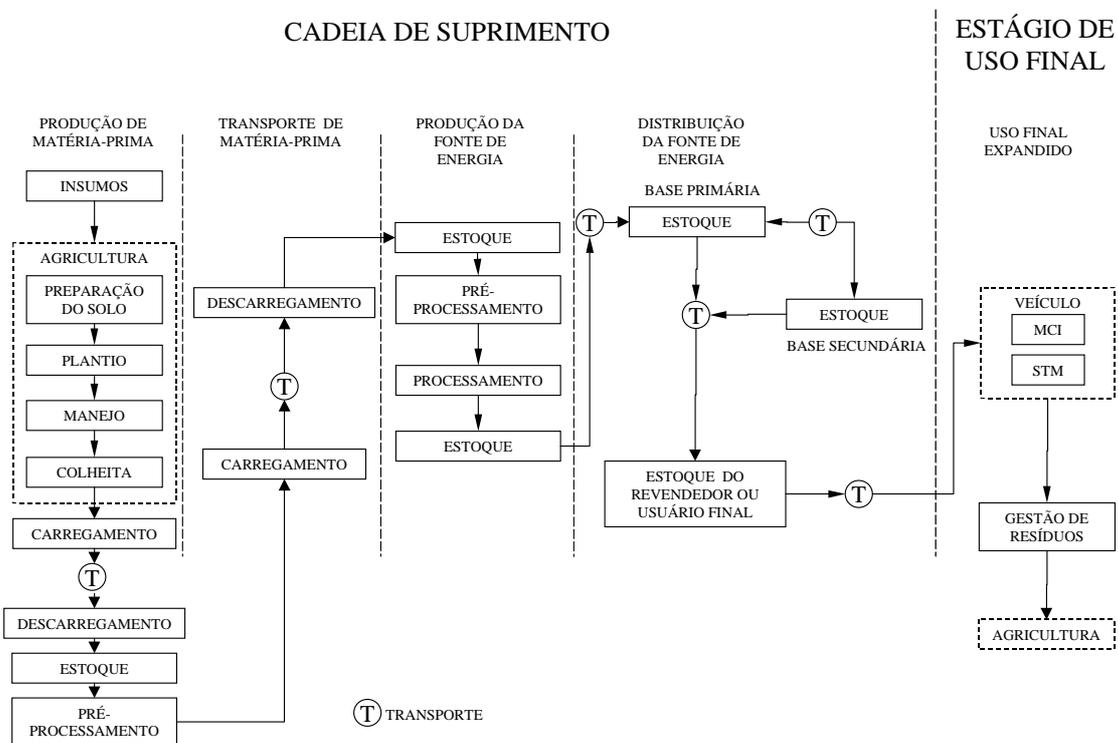


Figura 6.9. Derivação do modelo de ciclo de vida proposto para os biocombustíveis.

Uma aplicação para este modelo derivado é apresentada em SHEEHAN *et al.* (1998) para a produção de biodiesel nos Estados Unidos. A produção de soja e a extração do óleo são mantidos próximos. O óleo de soja é estocado e transportado em vagões ferroviários até uma planta de transesterificação junto ao centro urbano, onde além do óleo virgem, pode-se usar óleo residual de fritura como matéria-prima. Além disso, o farelo, co-produto da extração do óleo é mantido onde é mais útil, na área rural, enquanto a glicerina é produzida junto ao centro urbano, onde terá aproveitamento mais fácil.

O meso-estágio de distribuição da fonte de energia é similar ao considerado para o caso das fontes de energia convencionais. A principal diferença é que as bases primárias não estão próximas dos locais de produção dos biocombustíveis e o transporte entre eles não é feito por dutos.

As considerações sobre o estágio de uso final são aquelas já apresentadas para os demais combustíveis com exceção do que se refere à gestão de resíduos. Considerando que os insumos cultiváveis têm potencial de capturar o CO<sub>2</sub> emitido na queima do biocombustível, estas alternativas de fonte de energia são as únicas que apresentam um laço de reciclagem da maior parte de seus resíduos.

Considerar a captura do CO<sub>2</sub> pelo insumo cultivável como uma forma de reciclagem dos resíduos da combustão dos biocombustíveis representa um diferencial importante na sua comparação com as fontes de energia convencionais, que não têm este laço de reciclagem naturalmente.

A aplicação destes modelos de ciclo de vida e do procedimento será apresentada no Capítulo 7 onde se faz a comparação entre alternativas de fontes de energia para o transporte rodoviário no Município do Rio de Janeiro. Esta aplicação também permitirá uma melhor compreensão quanto a análise dos resultados e uso das medidas de ecoeficiência.

## **CAPÍTULO 7 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE COMPARATIVA DE FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO**

### **7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Para ilustrar a aplicação do procedimento de análise comparativa entre alternativas de fonte de energia para o transporte rodoviário procurou-se um exemplo simples, que pudesse valorizar a sua forma de aplicação. Isto pôde ser feito limitando-se sua abrangência, escolhendo-se o momento presente e o Município do Rio de Janeiro como a região de estudo.

Não existe relação de dependência entre a aplicação do procedimento e a abrangência da aplicação e todas as fases e etapas apresentadas a seguir se aplicam a qualquer outra condição. Porém, quanto mais abrangentes forem os limites da aplicação, mais trabalhoso será o ICV, com maior incerteza sobre a validade e o valor dos dados. Isso pode exigir muito tempo para o refinamento dos dados, sem contribuição adicional para a aplicação do procedimento e os objetivos desta tese.

As fases e etapas apresentadas a seguir seguem a seqüência de aplicação apresentada no Capítulo 6. Considerações adicionais, se necessárias ao entendimento desta aplicação, serão apresentadas em momento oportuno.

### **7.2. FASE 1 – OBJETIVO, FUNÇÃO E ESCOPO**

Tem-se como objetivo a comparação entre as alternativas de fontes de energia para o transporte rodoviário, adotando-se como referências as cadeias de suprimento e uso final das fontes de energia convencionais que melhor representam a abrangência da aplicação.

Para todas as alternativas contempladas a unidade funcional é a mesma e representa o deslocamento de 1.000 passageiros por quilômetro (1.000pass.km), escolhida por ser uma medida de trabalho de transporte que apresenta boa representação de escala. Em termos de ecoeficiência, a unidade funcional é equivalente ao indicador de valor do produto ou serviço.

### **7.2.1. Etapa 1 – Escopo – Abrangência da aplicação e caracterização das alternativas.**

Adotou-se como abrangência da aplicação o transporte rodoviário de passageiros na área urbana do Município do Rio de Janeiro com suas atuais alternativas de fonte de energia e sistema de propulsão.

As fontes de energia para o transporte rodoviário mais utilizadas no Estado do Rio de Janeiro são a gasolina C e o óleo diesel, respondendo por 38% e 53% das vendas, respectivamente (ANP, 2003a). Por analogia, considera-se que estes percentuais se mantenham aproximadamente os mesmos para o Município.

A gasolina C é uma mistura que contém em média 85% de gasolina A, derivada do petróleo, e 25% de álcool etílico anidro combustível (AEAC). Já o óleo diesel é um combustível exclusivamente derivado do petróleo.

Como em todo o Brasil, no Município do Rio de Janeiro existe uma rede para distribuição de etanol (álcool etílico hidratado combustível – AEHC) o que torna este biocombustível uma alternativa de fonte de energia para o transporte rodoviário. Além disso, o Município do Rio de Janeiro é o maior consumidor brasileiro de gás natural comprimido (GNC) para fins automotivos. No Estado, os consumos de AEHC e GNC representam 3% e 6% do total, respectivamente (ANP, 2003a).

A partir de 2003, em sintonia com o Governo Federal, o Governo do Estado do Rio de Janeiro iniciou um programa para incentivar o uso de biodiesel, o RioBiodiesel. No futuro, este biocombustível será produzido a partir de insumos cultiváveis locais, como a mamona, o girassol, o gergelim, o nabo forrageiro e o dendê. Porém, ainda não existe uma cadeia de produção e comercialização de biodiesel no Estado do Rio de Janeiro e as considerações para esta alternativa serão feitas por analogia com a experiência internacional, aproveitando-se, sempre que possível, informações e dados sobre a realidade brasileira.

Dos insumos cultiváveis com expressão no Brasil, só a soja pôde ser encontrada na experiência internacional, que considera a produção de éster metílico de óleo de soja (EMOS) nos Estados Unidos (SHEEHAN *et al.*, 1998). A cultura da soja também é a melhor documentada para a realidade brasileira, o que facilita o estabelecimento de

analogia na elaboração do inventário de dados. Assim sendo, escolheu-se o EMOS como alternativa a ser analisada.

A gasolina C, o AEHC e o GNC são combustíveis adequados aos motores alternativos de combustão interna (MCI) de ignição por centelhamento (ICE) e quatro tempos (4T) (ciclo Otto). Modernamente sua aplicação se dá em motores de injeção indireta (IID) caracterizando o sistema de conversão de energia como MCI-ICE-4T-IID. Estes motores tem seu uso voltado para automóveis de passageiros e veículos comerciais leves (até 1 tonelada de capacidade de carga). Em 2003, 90% destes veículos comercializados no Brasil eram equipados com motores dedicados ao uso de gasolina C (ANFAVEA, 2004).

Os automóveis de passageiros e comerciais leves equipados com motores que usam gasolina podem ser adaptados para uso de GNC, passando a operar na forma bicomustível. Em dezembro de 2003, o Estado do Rio de Janeiro tinha cerca de 38,50% da frota brasileira de veículos movidos a GNC, totalizado 236.733 veículos (IANGV, 2003).

A partir de 2003 passaram a ser comercializados veículos equipados com motores capazes de consumir gasolina C e AEHC em quaisquer proporção de mistura. O uso destes motores, denominados de *flexible fuel*, está sendo considerado uma forma de revitalizar o uso do AEHC. Em 2003 foram produzidos 49.255 destes veículos (automóveis de passageiros e comerciais leves) produção maior que a dos veículos dedicados ao AEHC, que totalizou 34.918 unidades (ANFAVEA, 2004).

Nos últimos 5 anos, os automóveis de passageiros representaram 90,8% das vendas de veículos que usam gasolina C e AEHC (ANFAVEA, 2004), incluídos aqui os veículos com motor *flexible-fuel*. Isto caracteriza os automóveis de passageiros como a configuração de veículo predominante no uso destas fontes de energia.

De acordo com a Portaria nº 23 do Departamento Nacional de Combustíveis (DNC), emitida em 07/06/1994, no Brasil 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. Com isso, o óleo diesel é majoritariamente utilizado em veículos pesados, como ônibus e caminhões.

No Município do Rio de Janeiro o transporte motorizado de passageiros é dependente dos ônibus urbanos, com 77,37% das viagens sendo realizadas por este modo de transporte que conta com uma frota de cerca de 7.366 veículos (RIOÔNIBUS, 2004a). Estes números justificam a importância do óleo diesel, e do biodiesel, enquanto seu substituto, como fonte de energia para o transporte coletivo de passageiros na área urbana da cidade.

Os ônibus urbanos são equipados com MCI de quatro tempos (4T) de ignição por compressão (ICO) e injeção mecânica direta de combustível (ID), caracterizando o sistema de conversão de energia como MCI-ICO-4T-ID.

O Brasil já tem tecnologia disponível para produção de ônibus com sistema de propulsão híbrido. Estes veículos podem utilizar o óleo diesel ou o biodiesel como fonte de energia e são considerados como uma alternativa para o transporte rodoviário urbano de passageiros (D'AGOSTO e RIBEIRO, 2004) e um veículo já está sendo testado pela Prefeitura do Rio de Janeiro.

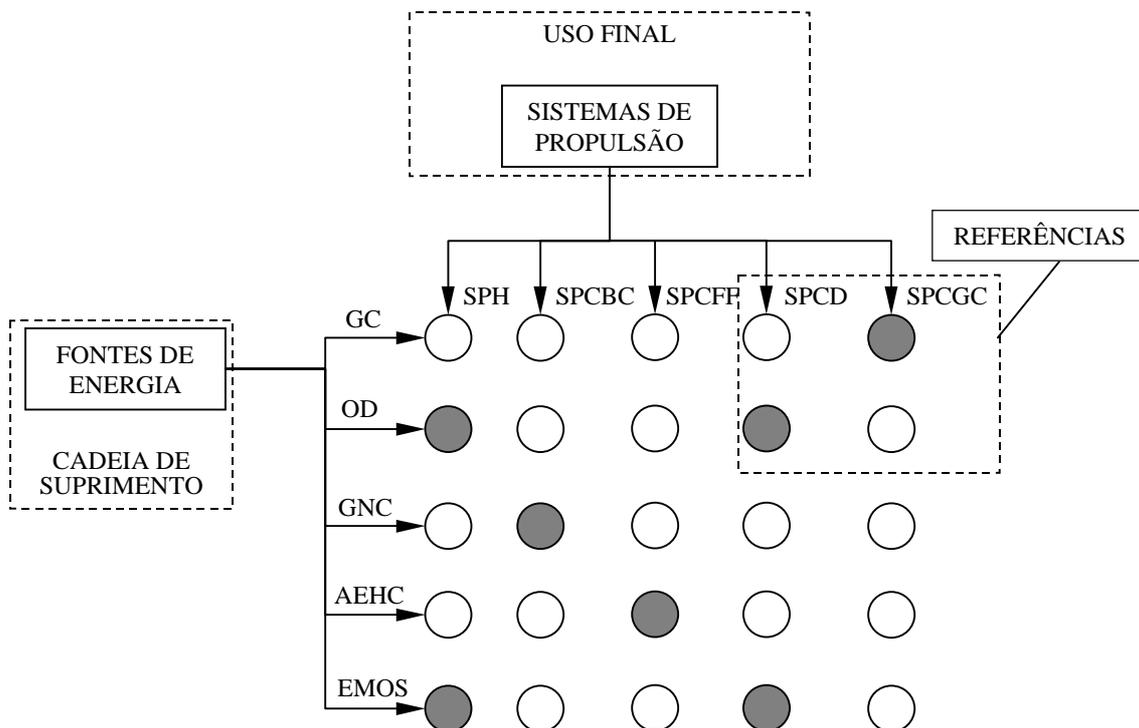
A Tabela 7.1 apresenta a caracterização das alternativas que serão consideradas na aplicação do procedimento.

Tabela 7.1. Caracterização das alternativas identificadas.

Elemento determinante	Classificação	Caracterização	Código
Fonte de energia	Convencional	Gasolina C composta de 85% gasolina derivada do petróleo e 25% AEAC oriundo da cana-de-açúcar	GC
		Óleo de diesel derivado do petróleo	OD
	Alternativa	Gás natural comprimido obtido a partir de gás natural de origem fóssil	GNC
		Álcool etílico hidratado combustível oriundo da cana-de-açúcar	AEHC
		Éster metílico de óleo de soja oriundo da reação de óleo de soja e metanol sintetizado a partir do gás natural	EMOS
Sistema de propulsão	Convencional	Sistema de propulsão convencional com MCI-ICE-4T-IID dedicado a gasolina C equipando automóvel de passageiro	SPCGC
		Sistema de propulsão convencional com MCI-ICO-4T-ID equipando ônibus urbano Padron para 100 passageiros	SPCD
		Sistema de propulsão convencional com MCI-ICE-4T-IID <i>flexible-fuel</i> equipando automóvel de passageiro	SPCFF
		Sistema de propulsão convencional com MCI-ICE-4T-ID adaptado para bicomcombustível equipando automóvel de passageiro	SPCBC
	Não convencional	Sistema de propulsão híbrido equipando ônibus urbano Padron para 100 passageiros.	SPH

A partir das alternativas caracterizadas na Tabela 7.1 é possível elaborar a Matriz de Alternativas de Ciclo de Vida (MACV) e realizar sua análise crítica, sendo que apenas os pares ordenados destacados na Figura 7.1 (cor cinza) deverão ser considerados daqui para frente. Cabe aqui algumas considerações adicionais:

- ◆ A gasolina C pode ser utilizada pelos veículos equipados com SPCBC e SPCFF, porém, estes sistemas existem para privilegiar o uso das fontes de energia alternativas e não da gasolina C;
- ◆ É possível a adaptação de veículos com motor dedicado ao uso de AEHC ou motor *flexible-fuel* para uso de GNC. Estas são alternativas que estão além das considerações feitas na identificação das alternativas quanto à aplicação usual das fontes de energia em cada sistema de propulsão;
- ◆ Em tese, o SPH pode ser equipado com motores alternativos de combustão interna que utilizem qualquer tipo de combustível, porém, a tecnologia nacional já desenvolvida utiliza um motor do ciclo Diesel.



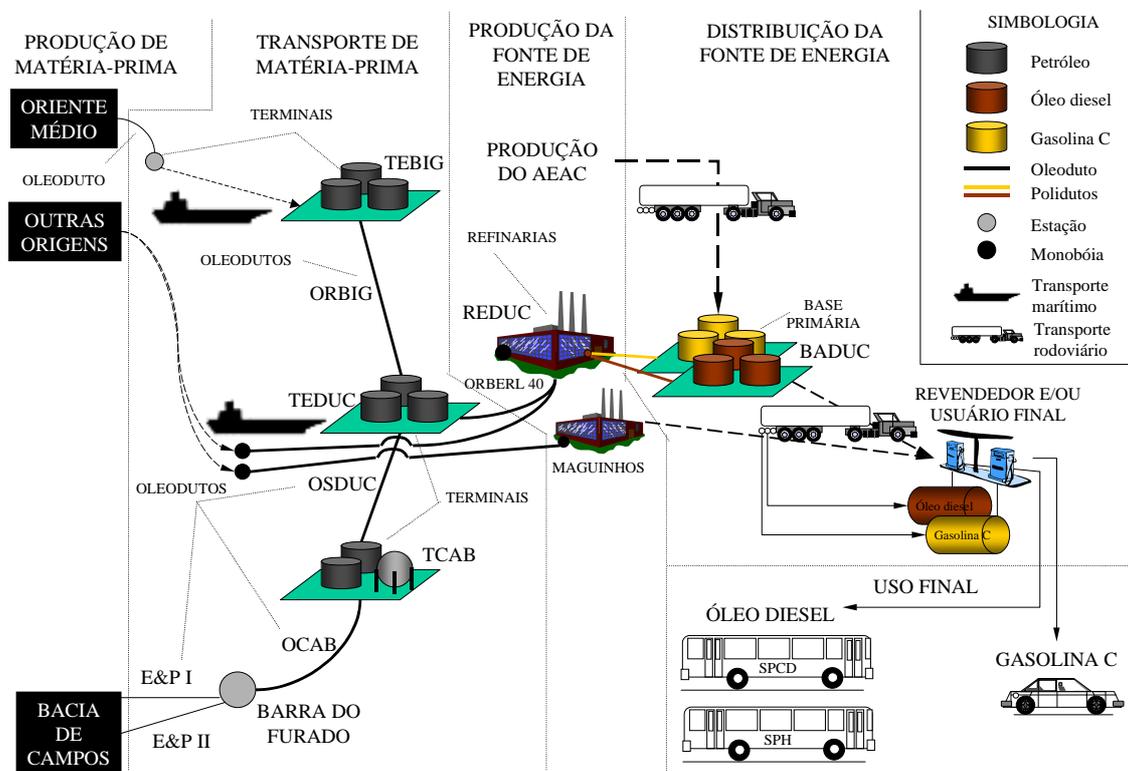
Legenda: GC – gasolina C; OD – óleo diesel; GNC – gás natural comprimido; AEHC – álcool etílico hidratado combustível; EMOS – éster metílico de óleo de soja; SPCGC – sistema de propulsão convencional dedicado ao uso de gasolina C; SPCD – sistema de propulsão convencional dedicado ao uso de óleo diesel; SPCFF – sistema de propulsão convencional *flexible-fuel*; SPCBC – sistema de propulsão convencional bicombustível; SPH – sistema de propulsão híbrido.

Figura 7.1. Matriz de Alternativas de Ciclo de Vida (MACV) da aplicação.

Os resultados obtidos a partir dos pares (GC; SPCGC) e (OD; SPCD) serão considerados como referência para a análise comparativa, uma vez que estas alternativas representam a aplicação tradicionalmente adotada na região de estudo.

### 7.2.2. Etapa 2 – Escopo – Dimensões da aplicação.

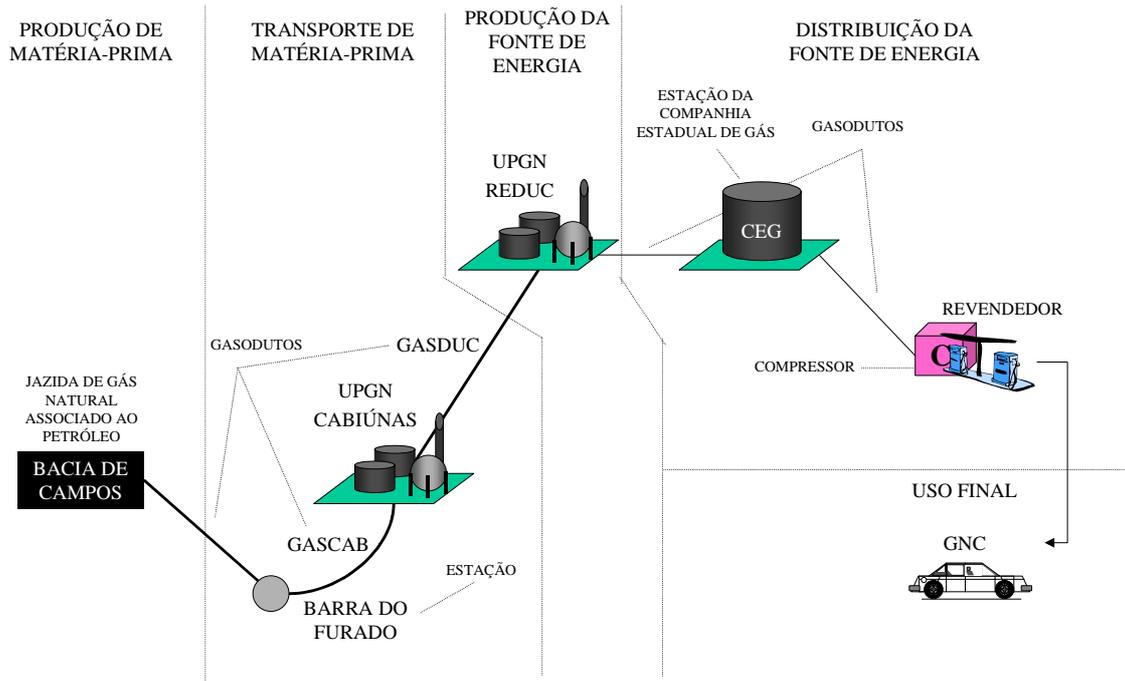
Para todas as alternativas na dimensão do comprimento é necessário que se considere o ciclo de vida completo, da origem da matéria-prima à gestão dos resíduos no estágio de uso final, com processos distribuídos pelos meso-estágios conforme os modelos de ciclo de vida apresentados no item 6.3. As Figuras 7.2 a 7.5 apresentam os fluxogramas de ciclo de vida específicos para a aplicação, que foram elaborados a partir das referências consultadas para elaboração do ICV.



**Legenda:** E&P I e II – oleodutos de escoamento da produção da Bacia de Campos até a estação de BARRA DO FURADO; OCAB – oleoduto de Cabiúnas; TCAB – terminal de Cabiúnas, TEDUC – terminal de Duque de Caxias; OSDUC – oleoduto de Duque de Caxias; ORBIG – oleoduto de Ilha Grande; TEBIG – terminal de Ilha Grande; ORBEL 40 – oleoduto entre o TEDUC e a REDUC; REDUC – refinaria de Duque de Caxias; MANGUINHOS – refinaria de Manguinhos; BADUC – base de Duque de Caxias; SPCD – sistema de propulsão convencional dedicado ao uso de óleo diesel; SPH – sistema de propulsão híbrido.

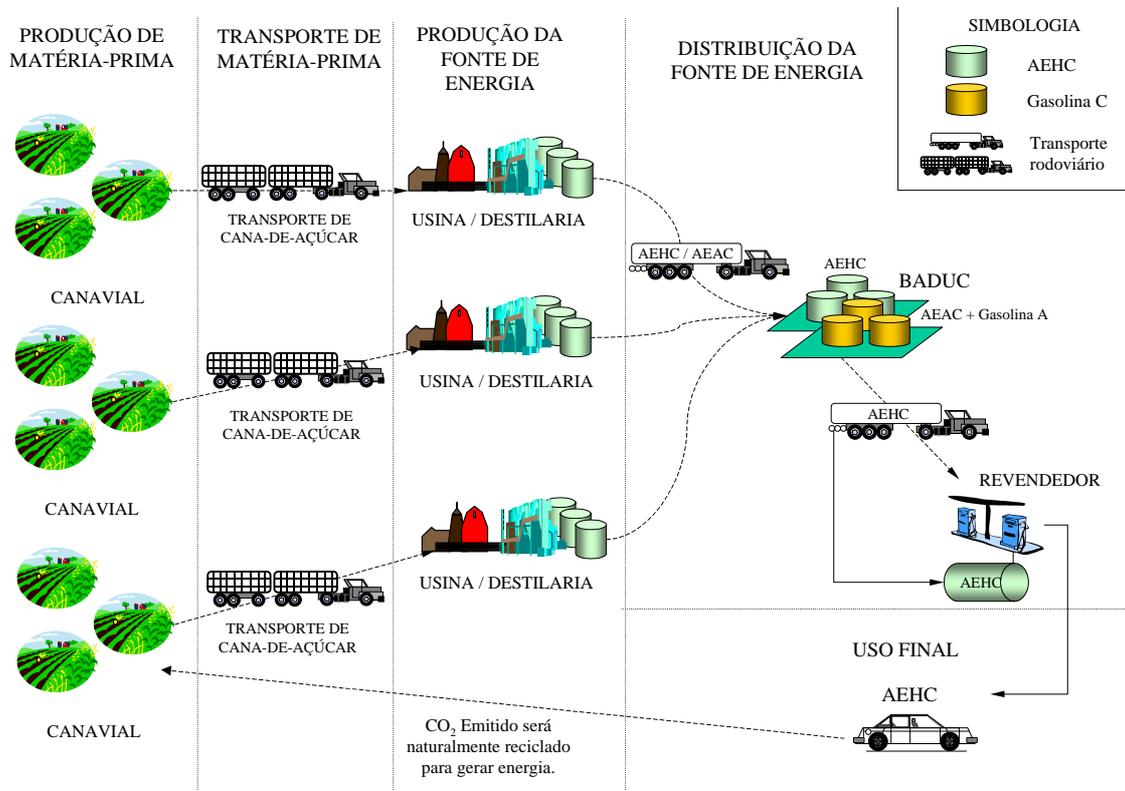
**Nota:** Em função do volume de derivados produzidos na REDUC o Município do Rio de Janeiro é exportador e não importador de óleo diesel.

Figura 7.2. Ciclo de vida da gasolina C e do óleo diesel derivados do petróleo.



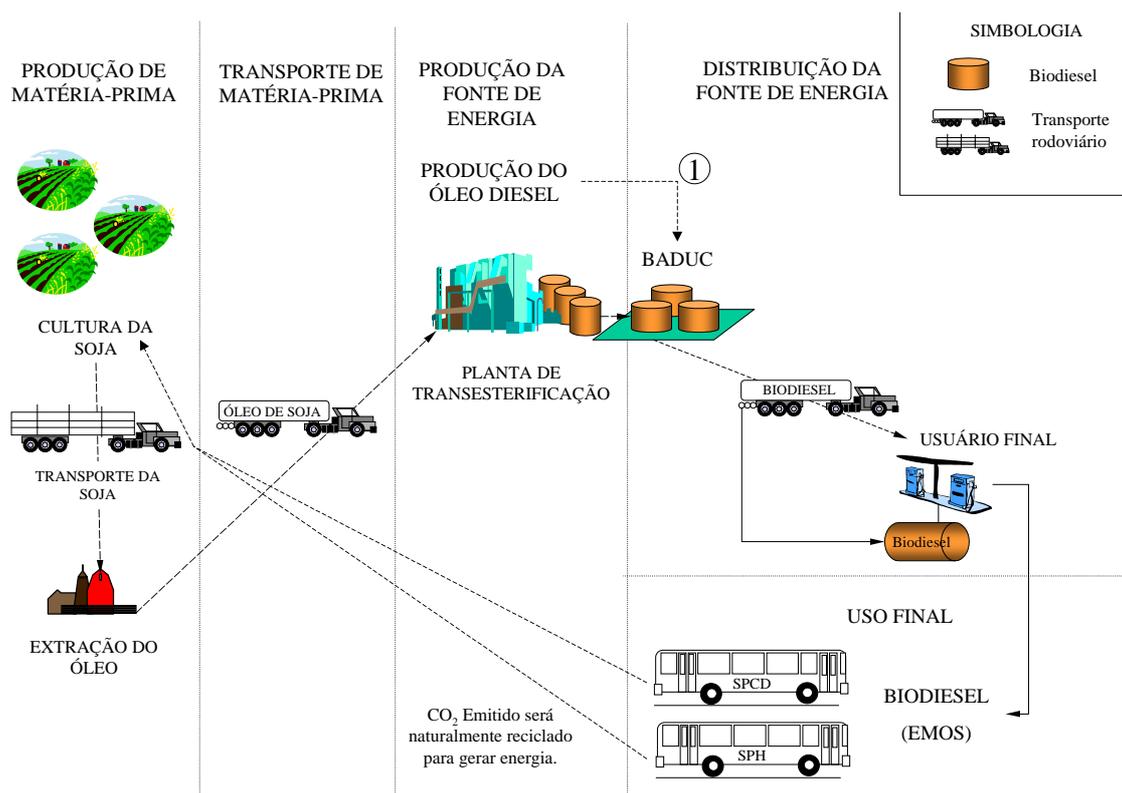
Legenda: **GASCAB** – gasoduto de Cabiúnas; **UPGN CABIÚNAS** e **REDUC** – Unidades de Processamento de Gás Natural de Cabiúnas e da REDUC; **GASDUC** – gasoduto de Duque de Caxias.

Figura 7.3.Ciclo de vida do gás natural comprimido.



Legenda: **AEHC** – álcool etílico hidratado combustível; **AEAC** – álcool etílico anidro combustível.

Figura 7.4.Ciclo de vida do AEHC e do AEAC.



**Legenda:** SPCD – sistema de propulsão convencional dedicado ao uso de óleo diesel; SPH – sistema de propulsão híbrido

**Nota:** 1 – quando em uso de mistura de biodiesel + óleo diesel.

Figura 7.5. Ciclo de vida do biodiesel (éster metílico de óleo de soja - EMOS).

Para a dimensão da largura, considera-se o primeiro nível (insumos energéticos diretamente utilizados no processo), salvo no caso dos biocombustíveis, onde é usual a inclusão da energia contida nos insumos agrícolas. A dimensão da profundidade fica limitada aos fluxos apresentados no item 6.2.1. (Capítulo 6), quais sejam: energia em processo de conversão, energia total e energia de origem renovável consumidas em cada estágio e emissão de CO<sub>2</sub> pela queima de combustíveis fósseis para cada estágio.

### 7.3.FASE 2 – INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA (ICV)

Utiliza-se como orientação para o inventário de dados os fluxogramas de ciclo de vida apresentados nas Figuras 7.2 a 7.5 conjugados com as considerações apresentadas no item 6.3 (Capítulo 6) sobre os modelos de ciclo de vida para as fontes de energia para o transporte rodoviário.

Para cada uma das 4 alternativas de fonte de energia optou-se por realizar primeiro o levantamento de dados para os processos identificados em cada meso-estágio da cadeia

de suprimento. Posteriormente se realizou o levantamento de dados para o estágio de uso final, considerando os diferentes sistemas de propulsão.

### 7.3.1. Etapa 1 – Coleta de dados

Buscou-se, sempre que possível, a obtenção de dados de uso específico, descrevendo-se o procedimento de obtenção, a justificativa dos valores e a determinação das fontes de consulta. A maior parte dos fatores de conversão adotados neste trabalho estão no Anexo 7.1. Quando necessário, fatores de conversão de aplicação específica e a justificativa para seu uso serão apresentados no texto.

O cálculo da energia contida nos combustíveis baseou-se no poder calorífico inferior (PCI), adotando-se, sempre que necessário, o fator de conversão de PCS (poder calorífico superior) para PCI como 0,90 para combustíveis gasosos e 0,95 para combustíveis líquidos (MCT, 2002). A princípio não se considerou a energia embutida nos combustíveis (energia consumida na cadeia de suprimento), tendo em vista ser este um dos objetivos do inventário.

De acordo com a realidade brasileira, são considerados dois tipos de energia renovável: energia hidroelétrica e combustíveis oriundos da biomassa. Porém, considera-se que apenas os combustíveis oriundos da biomassa serão reciclados, ou seja, o CO<sub>2</sub> emitido será naturalmente convertido em nova biomassa, caracterizando uma cadeia fechada de gestão de resíduos. O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> segue a equação (7.1), cujos fatores são apresentados no Anexo 7.1 (MCT, 2002). Não se considera a emissão de CO<sub>2</sub> oriunda da geração de energia hidrelétrica, que neste caso seria um fluxo de segundo nível.

$$E_{CO_2} = CE_C [TJ] \cdot F_{con} [tC/TJ] \cdot F_{corr} \cdot F_{ox} \cdot F_{CO_2} [C/CO_2] \cdot 1000 \quad (7.1)$$

Onde:  $E_{CO_2}$  - emissão de CO<sub>2</sub> [kg];

$CE_C$  – conteúdo energético do combustível [TJ];

$F_{con}$  – fator de conversão [tC/TJ];

$F_{corr}$  – fator de correção de PCS para PCI;

$F_{ox}$  – fator de oxidação – proporção do carbono oxidado;

$F_{CO_2}$  - fator de conversão de C para CO<sub>2</sub>.

O método utilizado para determinar a média e o intervalo de variação para os dados obtidos a partir de séries históricas segue a abordagem para o caso em que se desconhece o desvio padrão da população, utilizando-se o desvio padrão da amostra e os coeficientes da distribuição  $t$  de Student tabelados para um nível de significância de 90% como parâmetros para estimativa do intervalo de variação ( $e$ ), conforme apresentado na equação (7.2) (STEVENSON, 1981). Este método admite que os dados seguem uma distribuição Normal, ou que seja possível adotar tal aproximação e é considerado adequado para a maioria das aplicações em engenharia de transportes (KING, 1994).

$$\bar{x} \pm t \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (7.2)$$

Onde:  $\bar{x}$  - média amostral;

$s_x$  - desvio padrão amostral;

$t$  - coeficientes da distribuição  $t$  de *Student* para  $n-1$  graus de liberdade;

$n$  - tamanho da amostra

$e$  - intervalo de variação  $e = t \frac{s_x}{\sqrt{n}}$

Na indisponibilidade de dados obtidos a partir de série histórica procurou-se referências que apresentassem valores de média com intervalo de variação ou intervalos do tipo máximo-mínimo, quando se adotou a média como valor central. Em último caso foram considerados dados desacompanhados de intervalos de variação.

### *Gasolina C e óleo diesel*

Toda a gasolina C e o óleo diesel consumidos na região de estudo são produzidos nas Refinarias de Duque de Caxias (REDUC) ou de Manguinhos. Com apenas 60% de sua produção a REDUC é capaz de suprir toda a demanda de derivados de petróleo do Rio de Janeiro (MEDEIROS, 2003).

Avaliando os dados apresentados na Tabela 7.2, verifica-se que a REDUC processa entre 93% e 95% do petróleo na região de estudo, tendo atuação predominante no fornecimento de derivados, o que justifica, por questão de simplicidade, a exclusão da refinaria de Manguinhos do escopo do estudo.

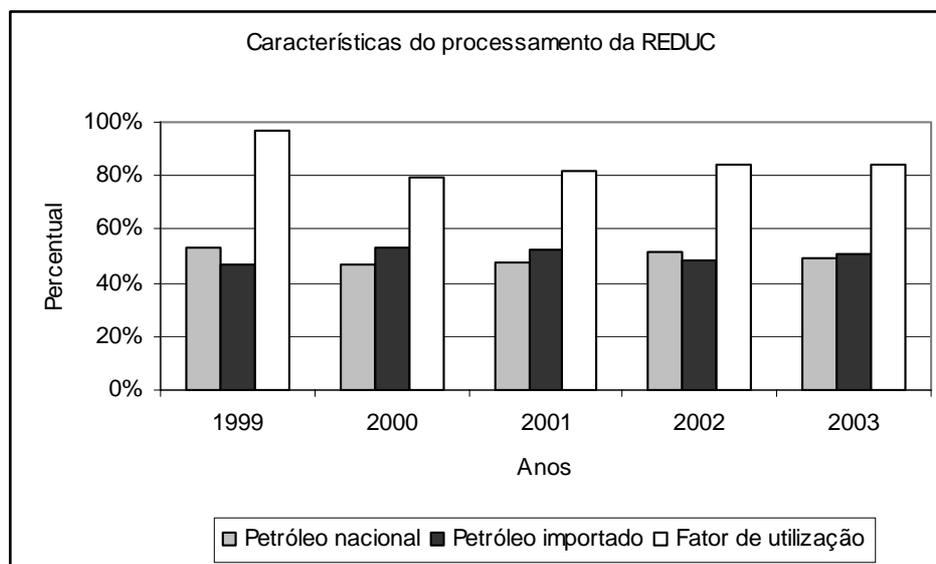
A Figura 7.6 apresenta o perfil do processamento da REDUC e especifica a origem da matéria-prima que é processada. Como pode ser visto, cerca de metade do petróleo processado pela REDUC é nacional, sendo o restante importado.

Esta situação vem se mantendo aproximadamente constante ao longo dos últimos 5 anos e foi adotada como representativa do momento presente, com o ano de 2002 como o de referência. Entende-se que nos próximos 3 anos a REDUC receberá investimentos que possibilitarão aumentar o processamento do petróleo nacional (MEDEIROS, 2003).

Tabela 7.2. Volume anual processado por origem e capacidade [m<sup>3</sup>]

Refinaria	Origem	1999	2000	2001	2002	2003
REDUC	Nacional	6.371.149	4.960.068	5.177.638	5.807.640	5.534.664
	Importado	5.681.841	5.672.484	5.718.631	5.373.685	5.679.486
	Total	12.052.990	10.632.552	10.896.269	11.181.325	11.214.150
	Capacidade	12.483.000	13.349.875	13.349.875	13.349.875	13.349.875
Manguinhos	Nacional	6.195	10.454	54.377	0	7.961
	Importado	642.548	672.285	764.215	755.478	842.614
	Total	648.743	682.739	818.592	755.478	850.575
	Capacidade	762.850	762.850	866.875	866.875	866.875

Fonte: ANP (2003a)



Fonte: ANP (2003a)

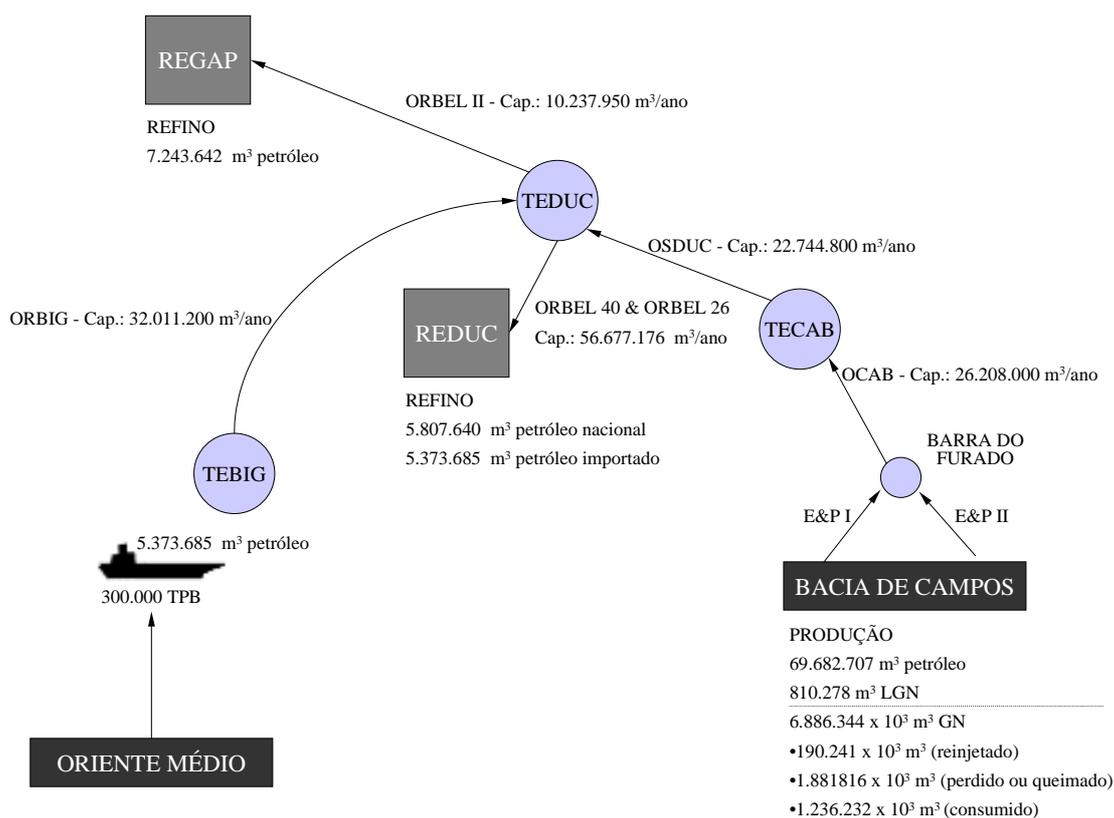
Figura 7.6. Perfil de processamento da REDUC.

Em função da proximidade da REDUC com a Bacia de Campos e da disponibilidade de ligação por oleoduto, considera-se que todo o petróleo nacional processado por esta refinaria seja oriundo da exploração marítima no litoral do Rio de Janeiro (Bacia de Campos), incluindo o petróleo pesado (<sup>0</sup>API = 19) do campo de Marlim (MEDEIROS,

2003).

Como origem do petróleo importado considera-se os países do Oriente Médio com base nos dados da ANP (2003a) para o ano de 2002 e nas considerações de MEDEIROS (2003), tendo em vista a necessidade de importação do petróleo Árabe Leve ( $^{\circ}$ API = 35) para otimizar a produção de lubrificantes.

A Figura 7.7 apresenta o esquema adotado no modelo de ciclo de vida para o suprimento de matéria-prima para a REDUC, a partir do qual é possível desenvolver o inventário de dados dos meso-estágios de produção e transporte de matéria-prima. Observa-se que as hipóteses de origem da matéria-prima são coerentes com a produção e a capacidade do sistema de transporte, inclusive considerando a inclusão da REGAP (Refinaria Gabriel Passos, Betim, MG) que recebe petróleo a partir do terminal de Duque de Caxias (TEDUC).



Fontes: MARTINEZ (1999), ANP (2003a), MEDEIROS (2003).

Figura 7.7. Suprimento de petróleo para a REDUC, ano base 2002.

*a) Produção de matéria-prima*

Para a determinação da energia total consumida e da emissão de CO<sub>2</sub> neste meso-estágio torna-se necessário dividir a coleta de dados em duas partes: produção de petróleo na Bacia de Campos e produção de petróleo no exterior.

O levantamento de dados da produção de petróleo na Bacia de Campos foi feita com base no Relatório Sobre Conservação de Energia no Sistema Petrobras, elaborado pela Coordenadoria de apoio ao CONPET (Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e Gás Natural) que apresenta o histórico de consumo de energia no período de 1990 a 2003 para as atividades de perfuração e produção na Bacia de Campos (BC) (PETROBRAS-CONPET, 2003).

A Tabela 7.3 apresenta dados da produção da Bacia de Campos no período de 1990 a 2003. Neste mesmo período, a energia consumida encontra-se relacionada na Tabela 7.4. Os combustíveis são fornecidos em tEP (tonelada equivalente de petróleo) e a energia elétrica, adquirida da rede, mantida em MWh.

Tabela 7.3. Produção da Bacia de Campos – 1990 a 2003.

Ano	Petróleo e Condensado [m <sup>3</sup> ]	LGN [m <sup>3</sup> ]	GN Produzido [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]	GN Reinjetado <sup>1</sup> [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]	GN Queima <sup>2</sup> [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]	GN Consumo <sup>3</sup> [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]	GN Disponível <sup>4</sup> [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]
1990	25.897.917	364.440	2.584.471	50.370	873.080	362.080	1.298.941
1991	26.411.415	411.655	2.757.275	146.000	807.380	390.550	1.413.345
1992	26.266.839	488.320	2.773.243	9.125	609.550	408.435	1.746.133
1993	27.774.227	389.130	2.841.970	22.265	645.685	440.920	1.733.100
1994	29.715.413	425.150	2.893.311	37.960	678.535	470.120	1.706.696
1995	30.455.614	409.300	3.164.611	58.400	614.295	492.020	1.999.896
1996	35.070.648	455.754	3.576.917	54.385	758.470	572.685	2.191.377
1997	38.755.189	599.056	3.876.348	60.590	999.005	609.550	2.207.203
1998	46.446.184	632.982	4.544.308	118.990	1.435.910	681.455	2.307.953
1999	54.947.719	655.900	5.528.256	140.214	1.731.074	945.013	2.711.956
2000	57.035.135	695.707	5.721.030	171.604	1.919.628	1.116.729	2.513.069
2001	60.487.440	589.189	5.968.330	135.093	2.277.655	1.139.289	2.416.293
2002	69.682.707	810.278	6.886.344	190.241	1.881.816	1.236.232	3.578.055
2003	70.946.033	1.245.240	6.660.153	139.683	1.263.107	1.361.228	3.896.134

Legenda: LGN – líquido de gás natural; GN – gás natural. Notas: 1 – GN reinjetado no poço; 2 - GN queimado nas tochas; 3 – GN consumido para geração de energia; 4 – GN disponível para uso, igual ao GN produzido menos as parcelas reinjetado, queima e consumo.

Fonte: elaboração própria com base em ANP (2003a) e PETROBRAS-CONPET (2003).

Tabela 7.4. Energia consumida na exploração e produção de petróleo – Bacia de Campos.

Ano	Exploração (Perfuração)	Produção				
	Óleo Diesel [tEP]	Óleo Diesel [tEP]	GN Reinjetado [tEP]	GN Queima [tEP]	GN Consumo [tEP]	E.E. [MWh]
1990	81.791	110.379	45.937	796.249	330.217	11451
1991	96.579	116.053	133.152	736.331	356.182	12473
1992	117.022	97.022	8.322	555.910	372.493	12892
1993	113.199	113.199	20.306	588.865	402.119	13435
1994	84.595	125.883	34.620	618.824	428.749	13656
1995	52.322	152.172	53.261	560.237	448.722	14788
1996	103.199	133.725	49.599	691.725	522.289	15432
1997	148.628	158.442	55.258	911.093	555.910	15781
1998	181.590	201.025	108.519	1.309.550	621.487	16753
1999	230.653	268.250	127.875	1.578.739	861.852	18465
2000	198.457	243.937	156.503	1.750.701	1.018.457	24970
2001	210.469	258.703	123.205	2.077.221	1.039.031	26482
2002	242.465	298.031	173.500	1.716.216	1.127.444	30507
2003	246.861	303.434	127.391	1.151.954	1.241.440	31060

Fonte: elaboração própria a partir de PETROBRAS-CONPET (2003)

Foram apropriados os consumos de energia para os processos de perfuração (exploração) e produção. Como critério de alocação para a energia consumida na produção, utilizou-se o rateio da energia consumida na razão das massas de petróleo e GN, sendo que no período produziu-se em média 0,043 kg de GN por 1 kg de petróleo. A energia consumida na perfuração foi toda alocada para o petróleo, pois considerou-se que a intenção em realizar este processo é apenas a obtenção de petróleo.

Por energia consumida considera-se: óleo diesel para perfuração e produção, GN queimado e GN consumido para geração de energia. O GN reinjetado foi considerado como energia perdida e alocado exclusivamente na produção do petróleo, tendo em vista que esta operação (reinjeção) só está associada à recuperação do petróleo. A energia elétrica adquirida (E.E.) será considerada no meso-estágio de transporte de matéria-prima, pois trata-se de energia para bombeio de petróleo na estação de Barra do Furado.

No caso do petróleo produzido no exterior (Oriente Médio) considerou-se como adequado apropriar o valor de energia consumida publicado por SHEEHAN *et al.* (1998) para o petróleo importado pelos Estados Unidos e originário na região do Golfo Pérsico. Neste caso, o consumo de energia para exploração é considerado como 0,0075tEP por tonelada de petróleo para exploração convencional *on shore*. Embora não

especificado, admitiu-se para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> que o combustível consumido seja óleo diesel. Para o processo de produção, considera-se exclusivamente o consumo de GN. Em ambos os casos o estudo admite um intervalo de variação de 5%.

A partir dos valores e considerações apresentados anteriormente é possível determinar o consumo de energia e a emissão de CO<sub>2</sub> por unidade de massa de petróleo, considerando a composição 50% produção nacional e 50% importado, como pode ser visto na Tabela 7.5.

Tabela 7.5. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> – exploração e produção de petróleo.

Origem	Processo	Consumo de energia [MJ/t]			Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t]		
		Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Bacia de Campos	Exploração	152,73	167,83	182,94	10,46	11,49	12,53
	Produção	1950,42	2097,22	2244,03	86,46	93,98	101,50
	Total	2103,14	2265,05	2426,96	96,92	105,47	114,02
Oriente Médio	Exploração	305,87	321,97	338,06	21,31	22,43	23,55
	Produção	1853,01	1950,53	2048,06	82,14	87,40	92,63
	Total	2158,88	2272,50	2386,13	103,45	109,83	116,18
Composição (50%/50%)	Exploração	229,30	244,90	260,50	15,88	16,96	18,04
	Produção	1901,71	2023,88	2146,04	84,30	90,69	97,06
	Total	2131,01	2268,78	2406,54	100,18	107,65	115,10

A diferença de resultado obtido entre o petróleo nacional e importado se deve principalmente a quantidade e ao tipo de combustível utilizado para cada caso. Na exploração, os dados da Petrobras apontam para o consumo médio de 0,0042tEP por tonelada de petróleo produzido, enquanto os dados internacionais consideram 0,0075tEP.

Já na produção, na Bacia de Campos verifica-se o consumo médio de 154 MJ/barril de petróleo produzido, sem considerar aqui o GN queimado ou reinjetado, sendo que esta energia é proveniente do uso de óleo diesel e GN. No estudo de SHEEHAN *et al.* (1998) a taxa de consumo é de 97 MJ/barril e considera exclusivamente o uso de GN.

Os dados obtidos junto a Petrobras são de uso específico e a série histórica proporcionou intervalo de variação de 9% sobre a média para os dados de exploração e 7% para os dados de produção. Admite-se que os dados publicados por SHEEHAN *et al.* (1998) também possam ser considerados de uso específico em função da descrição do processo apresentada e da profundidade com que os autores tratam a coleta de dados.

*b) Transporte de matéria-prima*

A determinação da energia consumida e da emissão de CO<sub>2</sub> originário da queima de combustíveis fósseis no meso-estágio de transporte de matéria-prima depende da identificação da matriz origem-destino-modo (MODM). Isto pode ser realizado com o auxílio da Figura 7.7, sendo apresentada na Tabela 7.6.

Tabela 7.6. MODM do transporte de petróleo.

Origem	Destino			
	Barra do Furado	Cabiúnas	TEDUC	REDUC
Bacia de Campos	83 km oleoduto E&P I (24")	-		-
	83 km oleoduto E&P II (22")	-		-
Barra do Furado	-	67 km oleoduto OCAB (38")	-	
Cabiúnas	-	-	181,6 km oleoduto OSDUC (32")	-
TEDUC	-	-	-	1,8 km oleoduto ORBEL (26")
				1,8 km oleoduto ORBEL (40")
Origem	Destino			
	TEBIG	TEDUC	REDUC	
Oriente Médio	8.746 ± 262 milhas náuticas navio 300.000 TPB	-	-	
TEBIG	-	122,9 km oleoduto ORBIG (40")	-	
TEDUC	-	-	1,8 km oleoduto ORBEL (26")	
			1,8 km oleoduto ORBEL (40")	

Nota: o valor entre parênteses representa o diâmetro dos oleodutos.

Fonte: DOBSON e BERESFORD (1989), TRANSPETRO (2002).

Para o caso do petróleo originado na Bacia de Campos ou o transporte por oleoduto do TEBIG em diante, foram utilizados os dados do Relatório Sobre Conservação de Energia no Sistema Petrobras (PETROBRAS-CONPET, 2003) referentes à antiga divisão DTSE (Dutos e Terminais Sudeste), hoje a Regional Sudeste da Transpetro.

Os dados são fornecidos de forma agregada, envolvendo a movimentação de petróleo e derivados e limitados ao período de 1990 a 1999. O relatório especifica que a energia elétrica (E.E.), adquirida da rede externa, é a fonte de energia utilizada para o bombeio dos produtos e que os derivados de petróleo são consumidos nos terminais, principalmente para geração de vapor que é utilizado no aquecimento de produtos mais

viscosos, como petróleo, óleo combustível e asfalto.

Os valores apresentados na Tabela 7.7 consideram apenas a movimentação de produtos internamente ao sistema. A energia consumida no recebimento de produtos que são bombeados por terceiros não é considerada, devendo ser calculada a parte.

Tabela 7.7. Energia consumida no DTSE para movimentação de produtos.

Ano	Óleo Combustível [tEP]	Óleo Diesel [tEP]	GN [tEP]	Gasolina [tEP]	AEHC [tEP]	E.E. [MWh]	Movimentação [ $10^6$ t.km]	Movimentação [ $10^3$ t]
1990	839	1442	3292	83,4	55,6	148079	6176	43844
1991	881	1244	4211	112,8	75,2	142990	5855	43195
1992	537	1820	4902	94,2	62,8	157443	5732	43293
1993	573	2202	3705	109,8	73,2	164207	6506	46903
1994	462	1464	3950	103,8	69,2	159646	5709	38996
1995	130	3461	3524	85,8	57,2	187351	6433	38358
1996	538	3389	4086	86,4	57,6	189367	5916	33134
1997	363	3009	3881	66,6	44,4	199397	5702	31027
1998	228	1241	3801	98	0	202967	5523	30312
1999	270	1225	6721	86	0	217899	6003	35753

Fonte: elaboração própria a partir de PETROBRAS-CONPET (2003).

Associando o consumo de energia elétrica (E.E.) ao bombeio (movimentação em  $10^6$  t.km) e o consumo de óleo combustível, óleo diesel e GN às operações nos terminais (movimentação  $10^3$  t) é possível obter os valores médios de consumo de energia para o transporte de matéria-prima, conforme Tabela 7.8. O consumo de energia elétrica em Barra do Furado, apresentado na Tabela 7.4 foi considerado nestes cálculos.

Tabela 7.8. Consumo de energia para bombeio por oleodutos e operações nos terminais.

Operação	Consumo de energia	Unidade	Tipo de energia
Bombeio	$0,0311 \pm 0,0031$	kWh/t.km	Energia elétrica
Operação nos terminais	$0,000179 \pm 2,3 \cdot 10^{-5}$	tEP/t	Óleo combustível, óleo diesel e GN

O valor obtido para o bombeio é maior que o considerado por SHEEHAN *et al.* (1998), cerca de 0,0114 kWh/t.km e adotado para o bombeio de petróleo no Oriente Médio, porém menor que o adotado por RISTINEN e KRAUSHAAR (1999) como referência para transporte por dutos (0,0828 kWh/t.km). Como a presente estimativa foi feita sobre valores agregados é possível que outras utilidades além do bombeio estejam sendo consideradas. Neste caso acredita-se ser um valor mais realista, pois trata-se de um dado de uso específico e considera a energia realmente consumida na operação de transporte.

O consumo de gasolina e AEHC está associado à movimentação da frota de apoio à

operação e deve ser destacado do consumo de energia diretamente associado com a movimentação dos produtos. Com base nos dados apresentados este valor seria de  $0,003678 \pm 0,00037$  tEP/t, porém, não foi considerado.

O consumo de energia para o transporte de petróleo do Oriente Médio para o TEBIG é calculado com base na média dos dados obtidos para os navios petroleiros de 300.000 TPB (toneladas de porte bruto) da frota da Transpetro, considerando a possibilidade de atracação de navios de até 500.000 TPB no TEBIG (MARTINEZ, 1999).

Tabela 7.9. Dados operacionais dos petroleiros da Transpetro.

NOME	Porte [TPB]	Capacidade de Carga [m <sup>3</sup> ]	Velocidade [nós]	Consumo [t/dia] <sup>1</sup>	Combustível
José Bonifácio	270.358	328.000	16	174,79	Óleo combustível
Vidal de Negreiros	282.823	347.064	16	174,3	
Cairú	282.750				
Henrique Dias	279.749	342.534	16,4		
José do Patrocínio	279.913				
Barão de Mauá	280.103				
Felipe Camarão	279.688				

Nota: 1 - consumo total dos motores principal e auxiliar. TBP – tonelagem de porte bruto.

Fonte: TRANSPETRO (2002), GABINA (Comunicação pessoal, 2004).

A distância média entre o TEBIG e os portos de Jeddah (Arábia Saudita), Basrah (Iraque), Minas Qaboos (Oman), Bandar Abbas (Iran) e Bubaia (Catar/Bubaia/EAU), foi determinada com base em DOBSON e BERESFORD (1989), sendo obtido o valor de  $8.746 \pm 262$  milhas náuticas. A identificação dos países de origem foi feita com base em ANP (2003a), considerando o ano base de 2002. Já os portos de origem foram obtidos a partir de *Petroleum Economist Cartographic Energy Maps* (RIO OIL & GAS, 2002).

O intervalo de consumo específico de óleo combustível calculado para o transporte marítimo foi de 1,543 a 1,637 g/t.milha, considerando velocidade de 16 nós, consumo diário variando entre 174,79 e 174,3 t/dia e capacidade entre 328.000 m<sup>3</sup> e 347.064 m<sup>3</sup> (Tabela 7.9). A título de comparação, o consumo específico característico de navios tipo VLCC (*Very Large Crude Carriers*), conforme valores publicados em THORSTEN e RIGNOR (1978) e GARDINER (1992) é da ordem de 1,1 g/t.milha para navios de 350.000 TPB. A partir do porte e tipo do navio, foi obtido o tempo de carregamento e de descarregamento como de 24 horas com consumo médio variando entre 88 e 84 toneladas de óleo combustível (GABINA – Comunicação pessoal, 2004).

A distância média de bombeio dos campos de exploração até os terminais de exportação no Oriente Médio foi estimada entre 160 e 130 km a partir da análise dos principais oleodutos disponíveis no *Petroleum Economist Cartographic Energy Maps* (RIO OIL & GAS, 2002).

A Tabela 7.10 sintetiza os resultados obtidos para o consumo de energia por processo do meso-estágio de transporte de matéria-prima. Em função do perfil de refino da REDUC nos últimos 5 anos, considera-se 50% do petróleo é importado e 50% é proveniente da Bacia de Campos para a determinação da composição final para refino.

Tabela 7.10. Síntese do consumo de energia por processo – transporte de petróleo.

Origem	Destino	Consumo de energia [MJ/t]		
		Mínimo	Médio	Máximo
Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio)	5,07	5,951	6,895
Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento)	10,91	11,170	11,430
Navio (carregamento)	Navio (descarregamento)	541,38	558,09	574,81
Navio (descarregamento)	TEBIG	10,91	11,17	11,43
TEBIG	REDUC	12,56	13,95	15,35
Operações de estocagem nos terminais		6,70	7,71	8,71
Total para petróleo importado		587,53	608,05	628,62
Origem	Destino	Mínimo	Médio	Máximo
Bacia de Campos	REDUC	33,58	37,31	41,04
Operações de estocagem nos terminais		6,70	7,71	8,71
Total para petróleo nacional		40,28	45,01	49,74
Composição (50% importado e 50% nacional)		313,90	326,53	339,18

Finalmente é possível apresentar as emissões de CO<sub>2</sub> proveniente do consumo direto de combustíveis considerando o óleo combustível, óleo diesel e GN nos terminais e de óleo combustível marítimo no navio petroleiro. A Tabela 7.11 apresenta estes valores.

Os valores obtidos para o transporte de petróleo, que variam entre 7,31 e 7,90 MJ/GJ, são comparáveis com os publicados pela IEA (1999), que considera a faixa de 7,00 a 8,4 MJ/GJ. Porém, deve-se destacar que a posição privilegiada da REDUC, na proximidade da Bacia de Campos e dispondo de ligação por oleodutos, colabora para reduzir bastante o consumo de energia no transporte de petróleo. Acrescente-se a isso a possibilidade de otimizar o transporte marítimo com navios petroleiros de maior porte que também colaboram para a eficiência deste processo.

Tabela 7.11. Emissão de CO<sub>2</sub> por processo – transporte de petróleo.

Origem	Destino	Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t]		
		Mínimo	Médio	Máximo
Campos (Oriente Médio)	Terminal (Oriente Médio)	0,32 <sup>1</sup>	0,37 <sup>1</sup>	0,43 <sup>1</sup>
Terminal (Oriente Médio)	Navio (carregamento)	0,79	0,81	0,83
Navio (carregamento)	Navio (descarregamento)	39,39	40,61	41,83
Navio (descarregamento)	TEBIG	0,79	0,81	0,83
TEBIG	REDUC	Não considerada <sup>2</sup>	Não considerada <sup>2</sup>	Não considerada <sup>2</sup>
Operações de estocagem nos terminais		0,37	0,44	0,50
Total para o petróleo importado		41,35	42,67	43,99
Origem	Destino	Mínimo	Médio	Máximo
Bacia de Campos	REDUC	Não considerada <sup>2</sup>	Não considerada <sup>2</sup>	Não considerada <sup>2</sup>
Operações de estocagem nos terminais		0,37	0,44	0,50
Total para o petróleo nacional		0,37	0,44	0,50
Composição (50% nacional e 50% importado)		20,86	21,55	22,25

Notas: 1 – Considerou-se que o bombeio de petróleo no Oriente Médio utiliza gás natural como fonte de energia (SHEEHAN *et al.*, 1998); 2 – Não se considerou emissão de CO<sub>2</sub> a partir do uso de energia hidrelétrica

### c) Produção da fonte de energia

O meso-estágio de produção da fonte de energia envolve o refino do petróleo na REDUC. Os dados sobre o consumo de energia (Tabela 7.12) foram obtidos a partir de MARIANO (2001) e PETROBRAS-CONPET (2003), este último para o período de 1990 a 1999.

Tabela 7.12. Dados de consumo de energia – REDUC.

Ano	Óleo Combustível [tEP]	GN [tEP]	Gas de Refinaria [tEP]	Coque de FCC [tEP]	Outras <sup>1</sup> [tEP]	Gas Queimado <sup>2</sup> [tEP]	E.E. <sup>3</sup> [MWh]	Carga <sup>4</sup> [m <sup>3</sup> ]
1990	402.852	77.091	134.946	96.131	-	-	110.456	10.384.431
1991	414.827	84.663	152.871	102.835	-	-	105.624	10.594.192
1992	445.321	98.140	123.149	94.828	-	-	76.028	11.068.394
1993	319.121	150.433	182.442	123.732	-	-	48.073	9.950.953
1994	347.329	169.745	163.629	95.871	-	-	57.863	9.421.760
1995	330.356	122.156	139.669	83.547	-1.696	-	71.656	8.291.229
1996	411.270	105.820	172.653	116.532	-4.176	-	79.843	11.253.852
1997	451.810	46.273	203.167	101.742	-2.241	333	63.746	10.282.482
1998	434.955	43.982	255.489	114.596	-2.381	332	46.185	11.997.118
1999	394.110	96.104	211.993	118.357	-2.124	307	88.292	12.597.659

Notas: 1 – Neste caso, exportação de vapor, 2 – gás natural ou de refinaria queimado nas tochas, 3 – E.E.: energia elétrica adquirida da rede, 4 – carga de petróleo processada.

Fonte: elaboração própria a partir de MARIANO (2001) e PETROBRAS-CONPET (2003).

Calculou-se o consumo médio de cada fonte de energia por volume de petróleo processado, obtendo-se um intervalo de variação de 6%. Estes valores foram usados

para estimar a quantidade de energia necessária para processar 11.181.325 m<sup>3</sup> de petróleo, carga da REDUC para 2002, ano para o qual também se obteve a produção de derivados de petróleo (ANP, 2003a).

Na composição dos derivados produzidos pela REDUC encontram-se incluídas as parcelas de GLP e o C<sub>5</sub><sup>+</sup> produzidos nas UPGN REDUC I e REDUC II (ANP, 2003a). A partir desta informação, foram realizados dois balanços de energia e massa para o processo de refino de petróleo na REDUC. No primeiro, excluiu-se as parcelas de GLP e gasolina natural (C<sub>5</sub><sup>+</sup>) da composição dos derivados produzidos pela REDUC e no segundo, incluiu-se o gás natural úmido processado nas UPGN REDUC I e II como carga do processo e o gás natural seco como parte dos resultados.

Os parâmetros analisados nos balanços foram: ajuste de massa, expresso pela relação entre massa de produtos sobre massa de carga, ajuste de energia, expresso pela relação entre energia produzida e energia fornecida e eficiência energética, expressa pela relação entre energia produzida menos energia consumida internamente (gás de refinaria, gás natural queimado, coque FCC e perdas) sobre a energia fornecida.

Para o primeiro balanço obteve-se 7% para o ajuste de massa, 8% para o ajuste de energia e 88,76% de eficiência energética. Para o segundo balanço, que considera o gás natural como uma corrente de processo, obteve-se 6% para o ajuste de massa, 7% para o ajuste de energia e 90,64% de eficiência energética, optando-se por adotar esta hipótese, conforme apresentado na Tabela 7.13.

Em função da disponibilidade dos dados completos de 1999, da Tabela 7.12 e dados de produção de derivados pela REDUC e de GLP e o C<sub>5</sub><sup>+</sup> UPGN REDUC I e REDUC II, foi elaborado um balanço adicional para o ano 1999. Os resultados obtidos foram bastante semelhantes, com eficiência energética de 91,13% e diferenças de energia e massa respectivamente de 6% e 8,2%, o que ratifica os valores encontrados.

Se comparado às referências consultadas, verifica-se que no trabalho de SHEEHAN *et al.* (1998) houve preocupação em apresentar um balanço de refinaria similar ao apresentado na Tabela 7.13, sendo apontadas diferenças da ordem de 5% no balanço de energia e de 7% no balanço de massa. Nos trabalhos de WANG *et al.* (1999) e HACKNEY e NEUFVILLE (2001), que apresentam explicitamente os cálculos de consumo de energia no refino, não se observou a preocupação com o fechamento do

balanço.

Tabela 7.13. Balanço energético para a REDUC e UPGN REDUC I e II.

Fluxos de entrada	Massa [t]	Energia [MJ]			
Petróleo para processo	9.617.650	4,35E+11			
GN para processo	1.337.069	5,85E+10			
Óleo combustível para consumo	449.009	1,80E+10			
GN para consumo	102.766	4,67E+09			
Energia elétrica Adquirida	-	2,87E+08			
Fluxos de saída	Volume [1000 m <sup>3</sup> ]	Massa [t]	Energia [MJ]	Rateio [massa/massa]	Rateio [energia/energia]
Gasolina A	2.127	1.578.127	7,13E+10	16,9%	17,2%
GLP	644	355.349	1,50E+10	3,8%	3,6%
Óleo combustível	2.938	2.879.246	1,21E+11	30,8%	29,2%
Óleo diesel	2.601	2.216.318	9,97E+10	23,7%	24,0%
QAV	643	508.201	2,36E+10	5,4%	5,7%
Querosene iluminante	31	24.751	1,15E+09	0,3%	0,3%
Asfalto	162	168.557	7,09E+09	1,8%	1,7%
Nafta	1.017	732.021	3,47E+10	7,8%	8,3%
Óleo lubrificante	635	555.277	2,50E+10	5,9%	6,0%
Parafina	38	30.874	1,49E+09	0,3%	0,4%
Solvente	15	11.049	5,20E+08	0,1%	0,1%
Outros	289	289.097	1,31E+10	3,1%	3,1%
Gás de Refinaria	-	184.691	7,89E+09	-	-
Gás Queimado (tocha)	-	316	1,35E+07	-	-
Vapor Gerado	-	-	1,11E+08	-	0,03%
Coque FCC	-	141.237	4,77E+09	-	-
Energia Elétrica Gerada	-	-	1,20E+09	-	0,3%
Perda de Calor (água)	-	-	1,15E+07	-	-
Gás Natural (UPGN)	-	1.093.693	5,23E+10	-	-
Balanço	Saída	10.768.803	4,80E+11		
	Entrada	11.506.495	5,16E+11		
	Diferença	737.692	3,56E+10		
	Ajuste %	6%	7%		
	Eficiência			90,64%	

Nota: O petróleo utilizado foi considerado como uma composição de 20% de petróleo pesado de Marlim (0,89 t/m<sup>3</sup>), 30% de petróleo nacional (0,85811 t/m<sup>3</sup>) a 50% de petróleo importado leve (0,84944 t/m<sup>3</sup>) (MEDEIROS, 2003).

A eficiência energética (90,64%) é coerente com os valores publicados nas referências CONSULTADAS (BOUSTEAD e HANCOCK, 1979; FURUHOLT, 1995; WANG *et al.*, 1997; SHEEHAN *et al.*, 1998; HACKNEY e NEUFVILLE, 2001).

Os valores de consumo de energia na Tabela 7.13 representam valores médios obtidos a partir de série histórica da Tabela 7.12 e projetados para a carga de 2002. Admite-se que o intervalo de variação de 6%, calculado para a série histórica, se aplique também a estes resultados.

Como critério de alocação adotou-se o rateio da energia consumida pela massa dos produtos, porém, apenas o gás natural para consumo e a energia elétrica foram distribuídos pela massa de derivados e do gás natural seco. Esta hipótese considera que as UPGN REDUC I e II utilizam apenas gás natural para separação das frações pesadas do gás natural úmido e energia elétrica para compressão do gás natural seco (POULALLION, 1980; SPATH e MANN, 2000; GARCIA, 2002). A Tabela 7.14 apresenta o rateio de energia para o óleo diesel e gasolina A.

Tabela 7.14. Rateio de energia para o óleo diesel e gasolina A.

Energia de processo [MJ]	Total	Gasolina A	Óleo diesel
Óleo Combustível	1,80E+10	3,09E+09	4,32E+09
GN para consumo	4,15E+09	7,12E+08	9,96E+08
Energia Elétrica Adquirida	2,55E+08	4,37E+07	6,11E+07
Gás de Refinaria	7,89E+09	1,35E+09	1,89E+09
Gás Queimado (tocha)	1,35E+07	2,32E+06	3,24E+06
Coque FCC	4,77E+09	8,19E+08	1,15E+09
Total	3,51E+10	6,02E+09	8,42E+09
Energia [MJ/t]		3815,6	3797,9

Para comparação dos resultados da Tabela 7.14 com as referências consultadas obteve-se os valores de 4.720 e 4.960 MJ/t que foram apresentados por SHEEHAN *et al.* (1998) e BOUSTEAD e HANCOCK (1979), respectivamente. Estes consumos de energia estão expressos por tonelada de petróleo processada e devem ser comparados com o valor de 3.706 MJ/t que pode ser obtido dividindo-se a energia total consumida pela carga de petróleo processada na Tabela 7.13.

Considerando apenas a queima dos combustíveis utilizados como fonte de energia direta (óleo combustível, GN, gás de refinaria, gás queimado e coque FCC) é possível obter os valores de emissão de CO<sub>2</sub> no meso-estágio de produção da fonte de energia, conforme Tabela 7.15, que sintetiza os resultados deste meso-estágio.

Tabela 7.15. Consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> - refino de gasolina A e óleo diesel.

Derivados [MJ/t]	Mínimo	Médio	Máximo
Gasolina A	3625	3816	4006
Óleo diesel	3608	3798	3988
Derivados [kgCO <sub>2</sub> /t]	Mínimo	Médio	Máximo
Gasolina A	252,5	265,7	279,0
Óleo diesel	251,3	264,5	277,7

*d) Distribuição da fonte de energia*

A gasolina A e o óleo diesel produzidos na REDUC são bombeados por dutos para os tanques de estocagem localizados nas bases de distribuição das companhias distribuidoras de derivados de petróleo que ficam próximas da refinaria e foram identificadas genericamente como BADUC na Figura 7.2. O bombeio dos produtos para as bases de distribuição é uma atribuição da refinaria e a energia necessária para esta operação já foi considerada no meso-estágio anterior.

Uma vez na base de distribuição, adiciona-se 25% de álcool etílico anidro combustível (AEAC) à gasolina A, produzindo-se a gasolina C, que é distribuída para os postos revendedores e usuários finais. Para estabelecer a composição mássica e energética da gasolina C é necessário considerar a ocorrência desta mistura, como pode ser visto na Tabela 7.16.

Tabela 7.16. Composição da gasolina C.

Característica	Gasolina A	AEAC	Gasolina C
Composição percentual	75%	25%	100%
Massa específica [t/m <sup>3</sup> ]	0,742	0,791	0,7373
Poder calorífico inferior [MJ/t]	44.598	28.182	40.494

Nota: 1 – A energia embutida é a energia diretamente utilizada para produzir a energia, considerada com a soma da energia atribuída nos meso-estágios anteriores. 2 – A energia embutida no AEAC foi calculada a partir do ICV do AEAC.

Por hipótese, no modelo de ciclo de vida utilizado nesta aplicação e ilustrado nas Figuras 7.2 a 7.5, os processos relacionados à distribuição dos combustíveis líquidos a partir da base de distribuição são os mesmos para todos os combustíveis. Assim, o inventário do consumo de energia para a distribuição de gasolina C e óleo diesel, da base de distribuição (inclusive) ao abastecimento dos veículos será o mesmo para o AEHC e biodiesel (EMOS).

O consumo de energia nas bases de distribuição varia em função do tipo de operação e da companhia distribuidora de combustível. A Petrobras Distribuidora (BR Distribuidora) representa 26,39% das vendas de óleo diesel e 21,76% das vendas de gasolina C. Em segundo lugar encontra-se a Companhia Brasileira de Petróleo Ipiranga (CBPI) com 19,69% e 14,91%, respectivamente (ANP, 2003a). Com isso, optou-se por buscar dados de consumo de energia nas bases destas duas companhias.

No caso da BR Distribuidora, é possível obter dados a partir de PETROBRAS-CONPET (2003), conforme apresentado na Tabela 7.17 que apresenta dos dados da Gerência Regional Sudeste.

Tabela 7.17.Dados de consumo de energia nas bases da BR Distribuidora.

Ano	Óleo Comb. [tEP]	EE [MWh]	Movimentação [t]
1990	1553	8475	12279430
1991	2874	9037	14752193
1992	2531	8928	13826695
1993	1958	6600	11953000
1994	1865	6582	11961373
1995	1906	6414	11602532
1996	2087	6703	11773341
1997	734	6543	10650142
1998	923	6527	10005175
1999	1096	6636	11113455

Fonte: elaboração própria a partir de PETROBRAS-CONPET (2003).

Entende-se que o consumo de óleo combustível esteja associado ao aquecimento de derivados pesados, como óleo combustível e asfalto, enquanto o energia elétrica esteja associada à movimentação dos combustíveis, como o carregamentos de caminhões tanque para o processo de distribuição. Assim sendo, apenas a parcela de energia elétrica foi associada à movimentação de gasolina C e óleo diesel nas bases da BR Distribuidora.

A partir dos dados da Tabela 7.17 calcula-se o valor de  $2,17 \pm 0,109$  MJ/t para o processo de carregamento dos caminhões tanque. Uma verificação deste valor foi realizada em consulta à base de distribuição da CBPI em Duque de Caxias. O consumo mensal de energia elétrica obtido foi de  $45.962 \pm 2.757$  MWh para a movimentação de  $1.074.204 \text{ m}^3$  de produto no ano de 2002 (MARQUES – comunicação por e-mail, 2003). Considerando as vendas de óleo diesel, gasolina C e AEHC com percentuais de 59%, 35% e 6% (ANP, 2003a, MENEZES, - comunicação pessoal, 2004), respectivamente, é possível estimando a massa específica média de  $0,8 \text{ t/m}^3$  ( $0,59 \times 0,83 + 0,35 \times 0,74 + 0,06 \times 0,79$ ), donde se obteve o valor de  $2,32 \pm 0,17$  MJ/t para a energia consumida na movimentação dos produtos, cerca de 7% maior que o encontrado para as bases da BR Distribuidora, porém, da mesma ordem de grandeza.

Adotou-se o valor obtido para a CBPI, por ser maior, para o cálculo do consumo de energia para carregamento dos produtos na base de distribuição. Os cálculos foram feitos considerando a massa específica do óleo diesel, da gasolina C e do AEHC, o que possibilita diferenciar o consumo de energia por produto.

A partir das bases de distribuição torna-se necessário estabelecer uma MODM da distribuição da gasolina C e do óleo diesel. Por hipótese desta aplicação, o óleo diesel se destina às empresas de transporte público urbano. Já a gasolina C e o AEHC, aos postos de revenda.

Foram identificadas 47 garagens de empresa de ônibus no Município do Rio de Janeiro que possuem sistema de abastecimento para seus veículos (RIOÔNIBUS, 2004b). A distância destas empresas até a BADUC foi estimada em  $27,63 \pm 2,21$  km com o uso de um guia de ruas (QUATRO RODAS, 2002). Os endereços e as distâncias para cada empresa encontram-se no Anexo 7.2.

No caso dos postos de revenda, em função do grande número de unidades e por uma questão de coerência e simplicidade, foram considerados apenas os postos que dispõem de venda de gás natural comprimido (GNC) (GASNET, 2004) e AEHC, pois estes poderiam oferecer as três alternativas de fontes de energia para os automóveis de passageiros. Neste caso, a distância estimada foi de  $26,226 \pm 1,84$  km. A relação de postos de revenda e suas distâncias estimadas até a BADUC também se encontra no Anexo 7.2.

A distribuição de combustíveis líquidos nas cidades (*city-market*) é feito exclusivamente pelo modo de transporte rodoviário (SANTOS, 1997; MENEZES – comunicação pessoal, 2004). A partir de 1997, com a liberação dos preços de transporte de combustíveis houve uma tendência à otimização deste tipo de transporte, com parte dele sendo absorvido pelas empresa distribuidoras e suas transportadoras coligadas. Com isso, a frota de distribuição de combustíveis nas cidades é composta predominantemente de conjuntos caminhão-trator + semi-reboque tanque de 30.000 litros de capacidade (MENEZES – comunicação pessoal, 2004).

Para o Município do Rio de Janeiro, esta situação foi verificada em consulta ao perfil da frota de quatro empresas de distribuição de combustíveis, a Transdepe S.A., a

Transportes FS Ltda, a Liderbras Ltda e a Tropical Transportes Ltda, por meio do Anuário do Transporte Rodoviário de Carga para os anos de 2002, 2003 e 2004, como pode ser visto na Tabela 7.18 (RIBEIRO, 2002, 2003; 2004).

Tabela 7.18. Perfil da frota de distribuição de combustíveis no Rio de Janeiro.

Transdepe S/A	Ano	Total	MBB	Scania	Volvo	Outros	Idade [anos]	Desempenho [km/ano]	Consumo [litros/ano]	Carga [t/ano]	km/litro
	2002	32	2	16	14	-	6	3396000	1400000	220000	2,43
2003	32	3	16	12	1	7	4544900	1940000	374220	2,34	
2004	34	1	14	18	1	8	5880000	2400000	370000	2,45	
Transportes FS Ltda	Ano	Total	MBB	Scania	Volvo	Outros	Idade [anos]	Desempenho [km/ano]	Consumo [litros/ano]	Carga [t/ano]	km/litro
	2002	94	11	9	40	11	6	NC	2600000	1180000	-
2003	72	28	9	18	17	7	5409325	1695000	3000000	3,19	
2004	76	25	13	9	9	7	4054400	1267000	2532000	3,20	
Liderbras Ltda	Ano	Total	MBB	Scania	Volvo	Outros	Idade [anos]	Desempenho [km/ano]	Consumo [litros/ano]	Carga [t/ano]	km/litro
	2002	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	-
2003	161	133	14	-	13	4	10642884	4439535	ND	2,40	
2004	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	-
Tropical Transportes Ltda	Ano	Total	MBB	Scania	Volvo	Outros	Idade [anos]	Desempenho [km/ano]	Consumo [litros/ano]	Carga [t/ano]	km/litro
	2002	150	108	11	5	27	3	11000000	3550000	4000000	3,10
2003	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	-
2004	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	-
Nota: NC – não consta.									Média	2,73	
									Desvio padrão	0,41	
									Intervalo de variação	0,33	

Verifica-se que estas empresas dispõem em sua maioria de caminhões tratores das marcas Mercedes Benz do Brasil (MBB), Scania e Volvo, porém, os semi-reboques tanque variam de capacidade, podendo ter 20.000, 25.000, 30.000 e 35.000 litros, com compartimentos padronizados de 5.000 litros. Caminhões tanque de 10.000, 15.000 e 20.000 (“Outros” na Tabela 7.18) estão saindo de uso (MENEZES – comunicação pessoal, 2004). Embora seja clara a predominância de uso de caminhão trator, não foi possível identificar exatamente a configuração típica do semi-reboque tanque, que por hipótese será considerado de 30.000 litros.

Considerando que este tipo de veículo predomine nas empresas avaliadas, seria possível associar a eficiência obtida de forma agregada na (Tabela 7.18) ao seu desempenho, o que implicaria no valor de  $2,73 \pm 0,33$  km/l. Em consulta à Revista Transporte Moderno, obteve-se o valor médio de 2,32 km/l para o desempenho do conjunto

caminhão trator + semi-reboque granel, valor próximo ao limite inferior dos dados da Tabela 7.18 e associado ao transporte de longa distância.

Segundo publicação da Volvo do Brasil S.A. os valores típicos de eficiência dos conjuntos caminhão trator + semi-reboque se encontram na faixa de 1,81 km/l a 2,25 km/l. Considerando que a distribuição de combustíveis se dá em zona urbana, sujeita as retenções habituais de tráfego, optou-se por adotar o valor publicado pela Volvo do Brasil S.A. (VOLVO, 2000). Esta hipótese também se justifica pelo fato de estar se adotando os menores valores de eficiência, que acarretarão os maiores valores de consumo.

Com base nas informações anteriores, a MODM adequada à distribuição da gasolina C, óleo diesel, AEHC e biodiesel, como será visto, é apresentada na Tabela 7.19.

Tabela 7.19. MODM para a distribuição de combustíveis.

Origem	Destino do óleo diesel e do biodiesel	Destino da gasolina C e do AEHC
	Empresas de ônibus	Postos revendedores de combustíveis líquidos e GNC
BADUC	27,63 ± 2,21 km Rodoviário Conjunto caminhão trator + semi-reboque tanque de 30.000 litros de capacidade	26,23 ± 1,84 km Rodoviário Conjunto caminhão trator + semi-reboque tanque de 30.000 litros de capacidade

Tanto nas empresas de ônibus como nos postos de revenda de combustíveis, o produto é descarregado por gravidade, não sendo necessário qualquer tipo de bombeio. Já o abastecimento dos veículos é feito por bombas que utilizam energia elétrica. Em consulta ao fabricante destes equipamentos obteve-se como perfil predominante bombas de 1 cv de potência e vazão de 75 litros/minuto, com eficiência de 90% (GILBARCO, 2004). Com isso é possível calcular o consumo de energia como 0,654 MJ/m<sup>3</sup>.

Os resultados para este meso-estágio são apresentados na Tabela 7.20. Considera-se que o veículo de entrega retorna vazio à BADUC e que não se considera a emissão de CO<sub>2</sub> pelo uso de energia elétrica.

Como neste meso-estágio todas as alternativas de combustíveis líquidos estão sujeitas as mesmas condições em cada processo, as diferenças entre valores encontrados estão relacionadas à variações na massa específica e no poder calorífico inferior destes combustíveis.

Tabela 7.20. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> para distribuição de combustíveis.

Consumo de energia [MJ/t]									
Processo	Gasolina C			Óleo diesel			AEHC		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Carregamento	2,36E+00	2,51E+00	2,66E+00	2,04E+00	2,17E+00	2,30E+00	2,15E+00	2,28E+00	2,42E+00
Transporte	3,57E+01	4,25E+01	5,10E+01	3,22E+01	3,88E+01	4,70E+01	3,82E+01	4,55E+01	5,46E+01
Abastecimento do veículo	8,87E-01	8,87E-01	8,87E-01	7,68E-01	7,68E-01	7,68E-01	8,09E-01	8,09E-01	8,09E-01
Total	3,89E+01	4,59E+01	5,46E+01	3,50E+01	4,17E+01	5,00E+01	4,11E+01	4,86E+01	5,78E+01
Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t]									
Processo	Gasolina C			Óleo diesel			AEHC		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Transporte	2,62E+00	3,12E+00	3,74E+00	2,36E+00	2,84E+00	3,44E+00	2,80E+00	3,34E+00	4,00E+00

Os resultados deste meso-estágio são de difícil comparação com os resultados apresentados nas referências consultadas, pois envolvem aspectos muito específicos da abrangência da aplicação. Porém, SHEEHAN *et al.* (1998) adotam o valor de 5,8 MJ/t.km para o bombeio de produtos nas bases de distribuição e considera a distância média de 0,5 km, donde é possível obter 2,9 MJ/t, uma boa aproximação do valor apresentado na Tabela 7.20 para o carregamento.

O trabalho publicado por EIA (1999) aponta intervalo de valores de 2 a 15 MJ/GJ para a distribuição de gasolina, 1,9 a 10 MJ/GJ para o óleo diesel. Os valores obtidos para gasolina C foram 0,96 a 1,35 MJ/GJ, para o óleo diesel 0,77 a 1,11 MJ/GJ que não chega ao limite inferior de cada caso. Para o AEHC ainda não é possível fazer comparação, pois deve-se considerar a transferência entre a usina/destilaria e BADUC como uma parte da distribuição.

#### *Gás natural comprimido*

Considera-se que todo o gás natural fornecido ao município do Rio de Janeiro é oriundo da Bacia de Campos, conforme pode ser visto na cadeia do gás natural comprimido na Figura 7.3. A produção da Bacia de Campos já foi apresentada (Tabela 7.3), donde se obtém o gás natural (GN Disponível), que será enviado por gasoduto (GASCAB) primeiramente para a UPGN de Cabiúnas.

O gás natural processado na UPGN de Cabiúnas se destina região de Campos e Arraial do Cabo. O gás natural não processado na UPGN de Cabiúnas segue por gasoduto (GASDUC) para as UPGN REDUC I e II, ambas na REDUC. A partir das UPGN REDUC I e II o gás natural pode ter três destinos: abastecer o Município do Rio de

Janeiro, sendo distribuído pela Companhia Estadual de Gás (CEG); abastecer a Refinaria Gabriel Passos (REGAB) e seguir para o sul do estado do Rio de Janeiro (Volta Redonda) (SEINPE, 2000, TRANSPETRO, 2002).

*a) Produção da matéria-prima*

Por se tratar de gás natural associado ao petróleo, a energia consumida e a emissão de CO<sub>2</sub> relacionadas a produção do gás natural foram determinados juntamente com a produção de petróleo, com base nos dados das Tabelas 7.3 e 7.4.

O critério de alocação adotado considera que a energia e as emissões de CO<sub>2</sub> do processo de exploração são creditadas exclusivamente ao petróleo, uma vez que todo o esforço de exploração está voltado para a descoberta de petróleo e não de gás natural. No caso do processo de produção, o gás natural reinjetado só é considerado na produção de petróleo. O consumo de as emissões de CO<sub>2</sub> pela queima das demais fontes de energia são distribuídas na razão das massas de petróleo e gás natural. A Tabela 7.21 apresenta os valores associados ao gás natural.

Tabela 7.21. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> na produção de gás natural.

Energia [MJ/t]	Mínimo	Médio	Máximo
Exploração GN	Não considera	Não considera	Não considera
Produção GN	1.864	2.004	2.144
Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t]	Mínimo	Médio	Máximo
Exploração GN	Não considera	Não considera	Não considera
Produção GN	83,1	89,4	95,6

Fonte: elaboração própria a partir de PETROBRAS-CONPET (2003)

Convertendo os valores encontrados para unidades de energia e considerando o poder calorífico inferior do GN úmido como 39.367 MJ, o consumo de energia na produção seria 50,90 MJ/GJ, compatível com o limite superior dos valores indicados por IEA (1999) e que se distribuem entre 30,9 e 50 MJ/GJ. O resultado também é comparável com Beer et al (2001), que apresenta valor de 55,80 MJ/GJ.

As referências consultadas não apresentam valores de emissão de CO<sub>2</sub> que possam ser comparados, principalmente se considerado que os valores variam em função da composição da energia consumida.

*b) Transporte de matéria-prima*

A MODM para o transporte de GN é apresentada na Tabela 7.22. Os dados sobre consumo de energia disponíveis para o transporte do GN do local de extração até a UPGN REDUC I e II consideram toda a região do DTSE (Dutos e Terminais SE) conforme PETROBRAS-Compnet (2003) (Tabela 7.23), não sendo possível obter o consumo individual por trecho.

Tabela 7.22. MODM para o transporte de GN.

Origem	Destino		
	Barra do Furado	Cabiúnas	UPGN REDUC I e II
Bacia de Campos	84 km Gasoduto (18")	-	-
	87 km Gasoduto (20")	-	-
	82 km Gasoduto reserva (12")	-	-
	-	118 km Gasoduto (18")	-
Barra do Furado	-	67 km Gasoduto (20")	-
	-	67 km Gasoduto (18")	-
Cabiúnas	-	-	183 km Gasoduto (16")

Fonte: TRANSPETRO (2002).

Tabela 7.23. Inventário de consumo de energia para movimentação de GN.

1991	Movimentação anual de GN [ $10^3 \text{ m}^3$ ]	E.E. [MWh]
1990	1.298.941	9.104
1991	1.413.345	10.850
1992	1.746.133	13.950
1993	1.733.100	12.147
1994	1.706.696	13.139
1995	1.999.896	14.222
1996	2.191.377	15.359
1997	2.207.203	16.752
1998	2.307.953	16.029
1999	2.711.956	19.008
2000	2.513.069	18.082
2001	2.416.293	17.016
2002	3.578.055	25.078
2003	3.896.134	26.692

Fonte: elaboração própria a partir de PETROBRAS-CONPET (2003)

Considerar os valores agregados, como na Tabela 7.23, não permite individualizar os

trechos especificados na MODM de outros ramais de transferência que não fazem parte da abrangência geográfica da aplicação, como por exemplo os trechos de gasoduto que partem da REDUC para o sul do Estado.

Assim como foi feito no caso do petróleo, considera-se neste meso-estágio parte da energia elétrica (E.E.) originalmente relacionada ao processo de produção de petróleo e GN e contabilizada na estação de Barra do Furado. Neste caso, o critério de alocação leva em conta o rateio por massa.

Uma vez que o transporte de gás natural consome exclusivamente energia elétrica, nenhuma emissão de CO<sub>2</sub> a partir da queima de combustíveis é verificada. A Tabela 7.24 apresenta o consumo de energia para o transporte de GN. Os dados da tabela 7.23 permitiram determinar valores com intervalo de variação de 3% sobre a média.

Tabela 7.24. Consumo de energia para o transporte de GN.

Processo	Energia [MJ/t]		
	Mínimo	Médio	Máximo
Transporte de GN	29,47	30,38	31,29

Fonte: elaboração própria.

Considerando o valor médio, o consumo de energia foi de 0,77 MJ/GJ, sendo possível compará-lo com os resultados dos trabalhos de BEER *et al.* (2001) e HACKNEY e NEUFVILLE (2001). Os valores obtidos são completamente divergentes. No primeiro o valor é de 12,49 MJ/GJ e no segundo 0,002 MJ/GJ. Uma explicação para esta divergência de valores pode estar na distância de transporte ou no tipo de energia utilizada. Nos trabalhos consultados estas considerações não são claras. No entanto, valores da ordem de 10 a 15 MJ/t foram obtidos para o transporte de petróleo (Tabela 7.10) o que poderia ser considerado como um parâmetro para o transporte de GN.

Não é possível comparar o resultado obtido com o trabalho de IEA (1999) pois neste modelo de ciclo de vida do GN os meso-estágios de transporte de matéria-prima e produção da fonte de energia são suprimidos.

### *c) Produção da fonte de energia*

Este meso-estágio envolve o processo de tratamento do GN nas UPGN REDUC I e II na REDUC. Como foi visto na produção de gasolina A e óleo diesel, o C5+ produzido nas UPGN REDUC I e II é misturado à nafta petroquímica, sendo, juntamente com o GLP,

contabilizado como os demais derivados produzidos na REDUC. Desse modo, para obter um melhor balanço de energia e de massa, a carga de GN em processamento também foi considerada no balanço da REDUC.

Para o cálculo da energia consumida na UPGN adotou-se o rateio do GN para consumo e da energia elétrica adquirida (Tabela 7.13) entre as massas de derivados de petróleo oriundos do refino e do gás natural seco oriundo das UPGN. Esta hipótese considera que mesmo compartilhando do balanço de massa e de energia, as UPGN só consomem gás natural no processo de separação das frações pesadas do gás natural úmido e energia elétrica para a compressão do gás natural seco (POULALLION, 1980, SPATH e MANN, 2000, GARCIA, 2002). Esta é uma limitação do modelo, tendo em vista que não é possível determinar exatamente a energia consumida nas UPGN. Por outro lado, não se encontrou justificativa para a hipótese de incluir no processamento do gás natural o consumo de óleo combustível, gás de refinaria e coque FCC, que são consumidos na REDUC. A Tabela 7.25 apresenta os resultados obtidos para o GN e foram calculados com base nas Tabelas 7.12 e 7.13.

Tabela 7.25. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> para o processamento de GN.

Processamento do GN nas UPGN REDUC I e II	Mínimo	Médio	Máximo
Energia [MJ/t]	483,46	508,91	534,35
Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t]	20,99	22,10	23,20

Fonte: elaboração própria a partir de PETROBRAS-CONPET (2003)

Para este meso-estágio, HACKENEY e NEUFVILLE (2001) apresentam valor de 0,0176 MJ/t de GN, também muito inferior ao valor encontrado. Infelizmente não há informação suficiente a respeito do procedimento de cálculo que possa esclarecer a diferença. Por outro lado, é possível que o critério de alocação adotado no presente estudo superestime o consumo de energia no processamento do GN em função da deficiência de identificar exatamente a parcela de energia que realmente é alocada à este combustível.

Vale lembrar que o trabalho da IEA (1999) suprime o meso-estágio de produção da fonte de energia para o caso do gás natural, pois considera que todo o processamento é feito junto a sua extração. Porém, na prática isso não ocorre, e algum consumo de energia deveria ser alocado no processamento nas UPGN.

*d) Distribuição da fonte de energia*

A distribuição do GN no Município do Rio de Janeiro é atribuição da CEG (Companhia Estadual de Gás) que conta com uma malha urbana de cerca de 2.278 km de gasodutos, dos quais 30% distribuem o GN, que se limita à rede de gasodutos mais novos. A CEG recebe o GN da Petrobras em um *city gate* na Rodovia Washington Luiz, em frente à REDUC (SEINPE, 2000).

Uma vez na rede da CEG, o GN é encaminhado aos postos de serviço onde será comprimido e poderá ser abastecido nos veículos. A Tabela 7.26 apresenta a MODM para a distribuição de GN após seu processamento na UPGN REDUC I e II.

Tabela 7.26. MODM para distribuição de GN.

Origem	Destino	
	CEG	Postos de serviço
UPGN REDUC I e II	Gasoduto principal Diâmetro não identificado Pressão de 10 atm	-
CEG	-	Malha urbana de gasodutos Diversos diâmetros Pressão de 5 a 10 atm

Fonte: elaboração própria a partir de GÔMARA (comunicação pessoal, 2001) e BLANCO (comunicação pessoal, 2004).

Não foi possível obter dados a respeito do consumo de energia para a distribuição de GN na malha urbana, deste modo, como melhor aproximação adotou-se o mesmo valor considerado para o transporte, o que pode ser considerado como uma aproximação subestimada.

No caso da energia necessária à compressão, foram consideradas duas fontes de dados. Valores obtidos em PETROBRAS-CONPET (2003) para os anos de 1996 e 1997, conforme Tabela 7.27. Em função da baixa representatividade dos dados, buscou-se informação adicional por meio de consulta bibliográfica, conforme apresentado na Tabela 7.28.

Tabela 7.27. Energia necessária para a compressão de GN nos postos de serviço.

Ano	EE [MWh]	Movimentação [t]	MJ/t
1996	3108	12068	927,15
1997	4761	15380	1114,41
		Média	1020,78

Fonte: elaboração própria a partir de PETROBRAS-CONPET (2003).

Nota: referente à serviço de compressão de gás natural em postos da BR Distribuidora. A partir de 1998 este serviço foi transferido para os postos de serviço.

Tabela 7.28. Consumo de energia para compressão de GN.

Fonte do dado	kWh/m <sup>3</sup>	MJ/t <sup>4</sup>
Compressor ideal <sup>1</sup>	0,120	579,87
Compressor Aspro <sup>2</sup>	0,110	531,54
	0,132	637,85
Compressor Galileu <sup>3</sup>	0,129	620,94
Compressor Nuova Pignone <sup>3</sup>	0,153	739,33
Compressos Knox Western <sup>3</sup>	0,140	675,63

Nota: 1 – SOBRINHO (1999), 2 – GÔMARA (Comunicação pessoal, 2000), 3 – BLANCO (Comunicação pessoal, 2004); 4 – considerando 0,000745 t/m<sup>3</sup> para o GN seco e 1 kWh = 3,6 MJ.

Em todos os casos da Tabela 7.28 considera-se a vazão de 1.000 m<sup>3</sup>/h, pressão de entrada de 8 atm e pressão de saída de 250 atm, características da realidade no Rio de Janeiro. (BLANCO – comunicação pessoal, 2004). Como poder ser visto, os cálculos apresentam valores inferiores aos apresentados na Tabela 7.27, porém, são da mesma ordem de grandeza. Os valores calculados não consideram variações de pressão e vazão ao longo da operação, o que implicaria em maior consumo de energia, de modo que se optou por utilizar os dados da PETROBRAS-CONPET (2003).

Tanto para a distribuição como para a compressão utiliza-se energia elétrica (BLANCO – comunicação pessoal, 2004), de modo que não se considera a emissão de CO<sub>2</sub> pela queima de combustíveis. A Tabela 7.29 apresenta os resultados para este meso-estágio.

Tabela 7.29. Consumo estimado de energia na distribuição de GN.

Processo	Consumo de energia [MJ/t]		
	Mínimo	Médio	Máximo
Distribuição na malha urbana	29,47	30,38	31,29
Compressão no posto de serviço	927,15	1.020,78	1.114,41
Total	956,61	1.051,16	1.145,70

É possível comparar os resultados dos três últimos meso-estágios com os resultados apresentados em IEA (1999), que considera valores entre 30 e 90 MJ/GJ para o estágio

de distribuição do gás natural. Considerando os valores médios, obteve-se 31,94 MJ/GJ, valor próximo ao limite inferior estabelecido pela referência. Vale lembrar que o processo de distribuição teve seu valor subestimado.

Outra comparação pode ser feita com BEER *et al.* (2001) que considera a fusão dos meso-estágios de produção e distribuição para os quais atribui valor de 6,46 MJ/GJ. Neste caso, o valor encontrado foi de 31,31 MJ/GJ, bem superior ao da referência.

#### *Álcool etílico hidratado combustível (AEHC) e álcool etílico anidro combustível (AEAC)*

Por hipótese, todo o AEHC e AEAC consumidos no Município do Rio de Janeiro têm sua origem no Estado de São Paulo (MENEZES – comunicação pessoal, 2004; Bastos – comunicação pessoal, 2004), sendo transportado por caminhão até a BADUC onde se faz a mistura com a gasolina A (AEAC) ou a distribuição pelos postos de revenda (AEHC).

A verificação desta hipótese se justifica pela pequena participação do Estado do Rio de Janeiro como produtor de etanol, com cerca 1,2% da produção na safra 2000/2001, enquanto São Paulo respondeu por 69,3% da produção (UDOP, 2004). Em São Paulo, entre 1994 e 2002, a produção de etanol se concentrou na nas cidades de Ribeirão Preto, Jaú, Catanduva, Barretos que responderam por 43,37% da produção na safra 2001/2002, com Ribeirão Preto ocupando a liderança com participação 15,95%.

Com base nesta premissa, concentrou-se a busca de dados de consumo de energia na produção do etanol na experiência das usinas paulistas, onde existe alguma disponibilidade de dados. Procurou-se, sempre que possível, um entendimento da composição dos dados, para que se pudesse obter resultados comparáveis com os obtidos para a gasolina C, óleo diesel e gás natural.

#### *a) Produção de matéria-prima*

Entende-se como matéria-prima para a produção do etanol a cana-de-açúcar cortada e pronta para o carregamento em caminhões com destino para a usina ou destilaria. Com isso está se seguindo o modelo apresentado na Figura 6.8 (Capítulo 6).

Com base no trabalho de NOGUEIRA (1987) e suas sucessivas atualizações

(MACEDO, 1999, CTC, 2003), é possível estimar as eficiência médias da produção de cana-de-açúcar e do etanol, como pode ser visto na Tabela 7.30. Além destes trabalhos, voltados especificamente para a realidade das usinas e destilarias do grupo Copersucar, que representam 1/3 das unidades produtivas de São Paulo (MACEDO – comunicação pessoal, 2003), também se buscou dados em outras referências.

Tabela 7.30. Eficências na produção da cana-de-açúcar e etanol

Produtividade agrícola – toneladas de cana-de-açúcar ( $t_c$ ) por hectare (ha) [ $t_c/ha$ ]	Menor valor	Valor médio	Melhor valor
NOGUEIRA, 1987	-	65	81,25
LIMA e MARCONDES, 2002	-	60 - 65	70 - 75
BNDES, 2003	60	77 - 81	83
Produtividade industrial – litros de etanol ( $l_a$ ) por tonelada de cana-de-açúcar ( $t_c$ ) [ $l_a/t_c$ ]	Menor valor	Valor médio	Melhor valor
NOGUEIRA, 1987	70	73	83
MACEDO, 1999	-	73	85,4
CTC, 2003	-	85,4	87,5
LIMA e MARCONDES, 2001	68	72 a 75	85
BNDES, 2003	79	80	85

Legenda:  $t_c$  – toneladas de cana-de-açúcar, ha – hectare,  $l_a$  – litros de álcool

Da leitura de LIMA e MARCONDES (2002) e BNDES (2003) entende-se que os menores valores estão relacionados com a produção no Nordeste brasileiro e os maiores com a região de São Paulo. No entanto, NOGUEIRA (1987) apresenta o cálculo da média de produtividade da cana-de-açúcar em função do número de cortes, onde 65  $t_c/ha$  aparece como um valor praticado. A evolução dos números nos trabalhos subsequentes (MACEDO, 1999 e CTC, 2003), considerando-se a manutenção das práticas de cultivo e colheita, ratifica este valor, sendo o escolhido para o presente estudo.

Já no caso da produtividade industrial, optou-se pelo valor de 85,4  $l_a/t_c$ , considerando o valor adotado em CTC (2003) como, em média, representativo da prática atual e ratificado pelos demais trabalhos consultados, que são unânimes em aceitar valores de produtividade industrial maiores que 80  $l_a/t_c$  para a região de São Paulo.

A adoção de cenários, como feito por NOGUEIRA (1987), MACEDO (1999) e CTC (2003), não é adequada ao presente estudo, tendo em vista que se procura adequar o inventário de dados as abrangências temporais, geográficas e tecnológicas apresentadas na Fase 1 do procedimento. Assim, optou-se por adotar, em linhas gerais, as hipótese

que segundo CTC (2003) se relacionam a situação atual da agroindústria do etanol, considerando como referência para o detalhamento e ratificação dos cálculos o trabalho mais detalhado de NOGUEIRA (1987). Adicionalmente, adotou-se como intervalo de variação para o consumo de combustível pelos equipamentos agrícolas o valor de 10% sobre a média com base no trabalho de SAAD (1983).

Admite-se que 85% da cana-de-açúcar é queimada no campo e colhida manualmente, sendo o restante alvo de colheita mecanizada. Não se considera a técnica de cultivo mínimo apresentada por NOGUEIRA (1987) em função da divergência com números apresentados por CTC (2003). Esta situação é ratificada por CORTEZ *et al.* (2002), que considera atualmente a queima de 80% da cana-de-açúcar para colheita manual.

Os processos considerados envolvem as operações de cultivo da cana-planta e das soqueiras (cana-soca e ressoça) e a colheita mecanizada. Por coerência com o modelo de ciclo de vida proposto no Capítulo 6, o carregamento dos caminhões para transporte da cana-de-açúcar cortada até as unidades de produção é incluído no meso-estágio de transporte de matéria-prima.

Num ciclo de 5 anos, realiza-se uma reforma do canavial, 3 tratamentos culturais de soqueira e 4 cortes, sendo esta sistemática utilizada para se estimar o consumo de energia (óleo diesel) nos processos de cultivo da cana-planta ( $C_p$ ), cultura das soqueiras ( $C_s$ ) e colheita ( $C_{cc}$ ), como pode ser visto na Tabela 7.31.

Tabela 7.31. Energia consumida e emissão de  $CO_2$  na agricultura da cana-de-açúcar.

Preparação do solo e plantio			
Consumo de óleo diesel	Mínimo	Médio	Máximo
$C_p$ [l/ha]	107,44	118,07	128,69
$C_s$ [l/ha]	20,966	23,04	25,11
Colheita mecanizada			
Consumo de óleo diesel	Mínimo	Médio	Máximo
$C_{cc}$ [l/ha]	55,874	61,4	66,926
Total para preparação do solo, plantio e colheita mecanizada $C_{ac} = 1/65.(0,2.C_p + 0,6.C_s + 0,8.(0,15C_{cc}))$			
Consumo de óleo diesel	Mínimo	Médio	Máximo
$C_{ac}$ [l/t <sub>c</sub> ]	0,627	0,689	0,751
$C_{ac}$ [MJ/t <sub>c</sub> ]	22,84	25,10	27,35
Emissão de $CO_2$ [kg/t <sub>c</sub> ]	1,59	1,75	1,91

Legenda:  $C_p$  – consumo no cultivo da cana-planta;  $C_s$  – consumo na cultura das soqueiras;  $C_{cc}$  – consumo na colheita mecanizada;  $C_{ac}$  – consumo nos processos de agricultura e colheita mecanizada;  $t_c$  – toneladas de cana-de-açúcar

Considerou-se apenas emissão de CO<sub>2</sub> a partir da queima de óleo diesel. Por uma questão de coerência com os inventários realizados para os demais combustíveis, não foram incluídas as emissões de outros gases de efeito estufa e tampouco as emissões de poluentes atmosféricos a partir da queima da cana-de-açúcar para colheita.

O mesmo se aplica à energia necessária à fabricação de máquinas, equipamentos e infraestrutura, pois tratam-se de dados em 3º nível de profundidade de análise. No entretanto, estes fluxos, que são apresentados em NOGUEIRA (1987) e CTC (2003), poderiam ser incluídos no modelo de ciclo de vida e no procedimento em questão, se necessário.

Além dos processos de preparação do solo, plantio e colheita, também devem ser considerados os processos de suprimento de insumos de produção, como mudas, adubos, herbicidas e inseticidas, conforme Tabela 7.32.

Foi possível obter dados quanto ao intervalo de variação de eficiência [km/l] dos caminhões de transporte, considerando como o referência os veículos MBB L 2314 de 12 toneladas de capacidade e MBB LA 1418 de 9 toneladas de capacidade (RIBEIRO, 2004). Estes são veículos mais modernos e similares aos indicados por NOGUEIRA (1987). Não se propôs variação na capacidade ou nas distâncias percorridas, por não se dispor de referência para isso.

Considera-se que a torta de filtro para adubo é distribuída em 30% da área reformada do canavial, com aplicação de 12t(úmida)/ha e 5t(seca)/ha. O vinhoto, também como adubo, é aplicado em 30% das soqueiras e usa-se 100 m<sup>3</sup>/ha. Estas considerações são coerentes com o cenário 2 apresentado por NOGUEIRA (1987) e com os valores apresentados por CTC (2003)

Por uma questão de coerência com os demais trabalhos consultados, também se considera a energia embutida nos insumos agrícolas (mudas, adubos, herbicidas e inseticidas), embora se trate de 2º nível de análise energética. Segundo NOGUEIRA (1987) a taxa de aplicação varia muito e não se obteve informação sobre esta variação, dispondo-se apenas do valor médio. Neste caso, por se tratar de um dado de uso específico, adotou-se os valores publicados em CTC (2003), após comparação com os valores calculados por Nogueira (1987). Os resultados encontram-se na Tabela 7.33.

Tabela 7.32. Consumo de energia no suprimento de insumos agrícolas para o cultivo da cana-de-açúcar.

Suprimento de mudas			
Capacidade do caminhão [t]	12	Caminhão MBB L 2314	
Carga necessária [t]	12		
Distância média (ida) [km]	16		
Consumo de óleo diesel	Mínimo	Médio	Máximo
Eficiência [km/l]	2,00	2,20	2,60
$C_{tm}$ [l/ha]	12,308	14,545	16,000
Suprimento e aplicação de torta de filtro			
Capacidade do caminhão [t]	9	Caminhão MBB LA 1418	
Carga necessária [t]	12		
Distância média (ida) [km]	8		
Consumo de óleo diesel	Mínimo	Médio	Máximo
Eficiência [km/l]	2,32	2,56	2,80
$C_{tt}$ [l/ha]	7,619	8,333	9,195
Suprimento de vinhoto			
Capacidade do caminhão [m <sup>3</sup> ]	15	Caminhão MBB L 2314	
Carga necessária [m <sup>3</sup> ]	100		
Distância média (ida) [km]	8		
Consumo de óleo diesel	Mínimo	Médio	Máximo
Eficiência [km/l]	2,00	2,20	2,60
$C_{tv}$ [l/ha]	41,026	48,485	53,333
Suprimento do adubo			
Capacidade do caminhão [t]	9	Caminhão MBB LA 1418	
Carga necessária [t]	2,12		
Distância média (ida) [km]	16		
Consumo de óleo diesel	Mínimo	Médio	Máximo
Eficiência [km/l]	2,32	2,56	2,80
$C_{ta}$ [l/ha]	11,429	12,5	13,79
Total para suprimento de insumos agrícolas $C_s = 1/65\{0,2(C_{tm}+C_{ta})+0,3(0,2C_{tt}+0,6C_{tv})\}$			
	Mínimo	Médio	Máximo
Consumo de óleo diesel [l/t <sub>c</sub> ]	0,1937	0,2252	0,2479
Consumo de energia [MJ/t <sub>c</sub> ]	7,05	8,20	9,02
Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t <sub>c</sub> ]	0,491	0,571	0,630

Legenda:  $C_{tm}$  – consumo no transporte de mudas;  $C_{tt}$  – consumo no transporte de torta de filtro;  $C_{tv}$  – consumo no transporte de vinhoto;  $C_{ta}$  – consumo transporte de adubo;  $C_s$  – consumo para suprimento de insumos agrícolas;  $t_c$  – toneladas de cana-de-açúcar

Tabela 7.33. Energia embutida nos insumos agrícolas.

Insumo	Energia embutida [MJ/t <sub>c</sub> ]
Fertilizantes	66,49
Calcário	7,14
Herbicidas	11,26
Inseticidas	0,79
Mudas	5,87

Legenda:  $t_c$  – toneladas de cana-de-açúcar

Em síntese, os consumos de energia e a emissão de CO<sub>2</sub> para este meso-estágio

encontra-se na Tabela 7.34. Os dados foram expressos em função de 1 tonelada do combustível que será produzido a partir da cana-de-açúcar (AEHC ou AEAC), escolhido como base de cálculo, sendo uma forma padronizada de expressar os resultados do ICV e possibilitando sua comparação com os demais meso-estágios.

Tabela 7.34. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> – cultura da cana-de-açúcar.

Consumo de energia [MJ/t]						
Processos	AEAC			AEHC		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Agricultura	338,06	371,50	404,93	330,54	363,23	395,92
Suprimento	104,38	121,36	133,58	102,06	118,66	130,60
Insumos	1.355,24	1.355,24	1.355,24	1.325,08	1.325,08	1.325,08
Totais	1.797,68	1.848,10	1.893,75	1.757,68	1.806,97	1.851,60
Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t]						
Processos	AEAC			AEHC		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Agricultura	23,55	25,88	28,21	23,03	25,30	27,58
Suprimento	7,27	8,45	9,30	7,11	8,27	9,10
Totais	30,82	34,33	37,51	30,14	33,57	36,68

Notas: Considera-se apenas a emissão de CO<sub>2</sub> a partir da queima de óleo diesel usado diretamente nos processos.

Considerando os valores médios da Tabela 7.34, obteve-se 62,29 MJ/GJ de AEAC e 64,94 MJ/GJ de AEHC, valores muito menores que o intervalo de 271 a 360 MJ/GJ publicado pelo IEA (1999) e relacionado à produção de etanol a partir de açúcar e amido (milho), o que ratifica a melhor eficiência energética da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

O consumo médio de energia no processo de agricultura difere do apresentado por NOGUEIRA (1987) em cerca de 25% pois a abordagem é ligeiramente diferente, sendo que no presente estudo a colheita manual com carregamento mecânico é considerado no próximo meso-estágio. Não foram encontrados outros estudos que considerassem o consumo de energia na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar de forma desagregada para que se pudesse estabelecer comparação.

#### *b) Transporte de matéria-prima*

Este meso-estágio envolve os processos de carregamento mecanizado e transporte rodoviário, com distância média de 20 km, entre o canavial e a unidade de produção de etanol. Este transporte, em sua maior parte, envolve caminhões com 1 ou 2 reboques (Romeu e Julieta) ou caminhão trator com 1 ou 2 semi-reboques (Treminhão)

(NOGUEIRA, 1987; SILVEIRA, 1991; MACEDO – Comunicação pessoal, 2003). A MODM (Matriz-Origem-Destino-Modo) da Tabela 7.35 sintetiza estas informações.

Tabela 7.35.MODM para o transporte da cana-de-açúcar.

Origem	Destino
	Usinas ou destilarias
Lavoura de cana-de-açúcar	20 km Rodoviário Conjunto caminhão+reboque+(reboque) Conjunto caminhão trator + semi-reboque + (semi-reboque)

Fonte: NOGUEIRA (1987), SILVEIRA (1991), MACEDO (Comunicação pessoal, 2003)

Esta operação tem sido alvo de otimização nos últimos anos e em função disso se adotou os dados do melhor desempenho (cenário 2 de NOGUEIRA (1987)) que são coerentes com os valores da situação atual apresentada por CTC (2003). Adicionalmente, foi possível obter intervalo de variação entre 0,0209 e 0,0231 l/t.km para o consumo de combustível dos caminhões típicos para esta operação – MBB LK ou LB 2318 (RIBEIRO, 2004).

No que se refere ao carregamento dos caminhões, considera-se o uso de uma carregadora marca Santal, com consumo de 16,25 l/ha, executando 4 cortes em 5 anos em 85% da área plantada. O intervalo de variação de consumo de combustível para este equipamento é de 10% sobre a média (SAAD, 1983).

Considera-se que o descarregamento da cana-de-açúcar é uma operação realizada na unidade de produção de etanol, sendo que a energia para este processo será contabilizada no próximo meso-estágio (LIMA e MARCONDES, 2002).

A Tabela 7.36 apresenta o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> para o transporte da cana-de-açúcar. Assim como na Tabela 7.34, para que se possa comparar os resultados com os demais meso-estágios, os valores foram expressos em função de 1 tonelada do combustível que será produzido a partir da cana-de-açúcar (AEHC ou AEAC).

Tabela 7.36. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> - transporte da cana-de-açúcar.

Consumo de energia [MJ/t]						
Processo	AEAC			AEHC		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Carregamento	83,37	91,62	99,87	81,52	89,58	97,64
Transporte rodoviário	450,55	474,27	497,98	440,53	463,71	486,90
Totais	533,92	565,89	597,85	522,05	553,29	584,54
Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t]						
Processo	AEAC			AEHC		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Carregamento	5,81	6,38	6,96	5,68	6,24	6,80
Transporte rodoviário	31,39	33,04	34,69	30,69	32,30	33,92
Totais	37,20	39,42	41,65	36,37	38,54	40,72

Se adicionados os valores médios de consumo de energia do processo de carregamento com aqueles do processo de agricultura da Tabela 7.34 obtém-se valores próximos dos calculados por NOGUEIRA (1987) para as operações agrícolas e de colheita, o que ratifica os valores apresentados. Variações da ordem de 15% são esperadas, pois NOGUEIRA (1987) considera a energia embutida no óleo diesel.

Como o consumo de energia é dependente das distâncias e dos modos de transporte, a comparação dos resultados obtidos neste meso-estágio com outros trabalhos exige que se disponha do detalhamento da operação, o que raramente é possível. De todas as referências pesquisadas, o trabalho de IEA (1999) apresenta valores de consumo de energia para o transporte de matéria-prima para fabricação de etanol que variam entre 15 e 30 MJ/GJ, considerando transporte rodoviário de madeira e distância média de 50 km, como os valores apresentados na Tabela 7.36 estão entre de 16,6 e 18,83 MJ/GJ verifica-se que se enquadram neste intervalo.

*c) Produção da fonte de energia.*

Entende-se que toda a energia necessária à produção do etanol é obtida a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Segundo CTC (2003), na situação atual das unidades de produção ainda se verifica a sobra de cerca de 8% do bagaço produzido, sendo o restante consumido na produção de vapor que alimenta todos os processos da planta (moagem, fermentação, destilação, geração de energia elétrica etc) e as tornam auto-suficientes.

Um balanço de energia e de massa para uma unidade de produção de etanol é

apresentado na Tabela 7.37. Considera-se o fluxo de 1 tonelada de cana-de-açúcar, com 23,21% de bagaço (LIMA e MARCONDES, 2002), eficiência na conversão de vapor de 78,7% e 8% de excedente em massa de bagaço para geração de energia para disponibilização na rede (CTC, 2003). Sendo o bagaço excedente uma fonte de energia, portanto um co-produto na produção do etanol (COELHO *et al.*, 1997), considerou-se a alocação da energia de processo entre o etanol produzido e o bagaço excedente na razão do conteúdo energético. Os resultados são fornecidos por unidade de massa de AEHC ou AEAC.

Tabela 7.37. Balanço energético para uma unidade de produção de etanol.

Fluxos de entrada						
	Massa [t]			Energia [MJ/t]		
	Cana-de-açúcar	Bagaço	Caldo	Cana-de-açúcar	Bagaço	Caldo
		1,000	0,2321	0,7679	3495	1602
Fluxos de saída						
	Massa [t]			Energia [MJ/t]		
Bagaço consumido	0,213			1470,50		
Perdas	-			313,22		
Energia de processo	-			1157,29		
Bagaço excedente	0,019			131,86		
Etanol produzido	0,068			1903,73		
Bagacilho/torta/vinhoto	0,769			-		
Totais	1,068251			3506,10		
Balanço	106,8%			100,3%		
Consumo de energia de processo [MJ/t <sub>AEHC</sub> ]				13.355,6		
Consumo de energia de processo [MJ/t <sub>AEAC</sub> ]				13.058,5		
Eficiência (energia disponível / energia fornecida)				58,25%		

Legenda: t<sub>AEHC</sub> – toneladas de AEHC; t<sub>AEAC</sub> – toneladas de AEAC

Notas: O balanço foi realizado considerando os poderes caloríficos inferiores e 85,4 l<sub>g</sub>/t<sub>c</sub>. Para o caso do bagaço utilizou-se PCI = 1.650 kcal/kg (LIMA e MARCONDES, 2001).

Embora deva existir variação no consumo de energia para a produção do etanol, não foi possível obter um intervalo de dados que se considerasse adequado ao estudo, o que representa uma limitação deste trabalho. Porém, considera-se que os dados utilizados são de uso específico e representativos das unidades de produção estabelecidas em São Paulo.

Quanto as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da queima do bagaço da cana-de-açúcar, considera-se desnecessário determiná-la tendo em vista tratar-se de combustível renovável, cujas emissões de CO<sub>2</sub> serão recuperadas no próximo ciclo de crescimento da cana-de-açúcar.

Com base na Tabela 7.37 o consumo de energia para produção de etanol é da ordem de 500 MJ/GJ, valor que se enquadra no intervalo de valores de 305 a 870 MJ/GJ publicado por EIA (1999), embora tratando-se de processos diferentes. Melhor comparação pode ser feita com o trabalho de BODDEY (1993), que determinou o valor de 15.692,9 MJ/t<sub>AEHC</sub> considerando as condições de produção brasileira. O valor é compatível com o apresentado no presente estudo, sendo que a diferença de 15% se deve principalmente ao uso de outros critérios de alocação, parâmetros de produção e fatores de conversão.

*d) Distribuição da fonte de energia*

Considera-se que o etanol é transportado da região de São Paulo até a BADUC no Rio de Janeiro conforme especificação da MODM apresentada na Tabela 7.38. A partir da BADUC a distribuição se dá nos mesmos moldes que para a gasolina C e óleo diesel.

Tabela 7.38. MODM para a distribuição de etanol.

Origem	Destino	
	BADUC	Postos revendedores de combustíveis líquidos e GNC
Unidades de produção	697 ± 23,7 km Rodoviário Conjunto caminhão trator+ semi-reboque tanque de 30.000 litros de capacidade	-
BADUC	-	26,226 ± 1,84 km Rodoviário Conjunto caminhão trator + semi- reboque tanque de 30.000 litros de capacidade

A distância média entre as unidades de produção e a BADUC foi estimada considerando-se as distâncias entre as cidades produtoras de etanol no Estado de São Paulo e a BADUC. Calculou-se a média ponderada pelo volume de produção, de modo que as cidades que produziram mais em 2000/2001 têm maior peso na alocação da distância. A relação de cidades, distâncias e volumes produzidos encontra-se no Anexo 7.2.

O carregamento do etanol na unidade de produção e o descarregamento na BADUC foram estimados por analogia com a gasolina C. O transporte considera um conjunto caminhão trator e semi reboque tanque de 30.000 litros de capacidade, similar ao

veículo utilizado para a distribuição urbana e com a mesma eficiência energética, o que representa uma hipótese conservadora pois trata-se de transporte rodoviário de longa distância e não urbano.

Considera-se apenas a emissão de CO<sub>2</sub> pela queima de óleo diesel. A Tabela 7.39 apresenta os valores para o consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> para o transporte de etanol entre as unidades de produção e a BADUC, considerado como parte do meso-estágio de distribuição.

Tabela 7.39. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> no transporte do etanol entre unidade de produção e BADUC.

Carregamento – unidade de produção de etanol				
Descarregamento – BADUC				
Consumo de energia elétrica	Mínimo	Médio	Máximo	
	0,4826	0,5134	0,5443	kWh/m <sup>3</sup>
	0,5966	0,6347	0,6727	kWh/t <sub>AEHC</sub>
	0,6102	0,6491	0,6881	kWh/t <sub>AEAC</sub>
	2,148	2,285	2,422	MJ/t <sub>AEHC</sub>
	2,197	2,337	2,477	MJ/t <sub>AEAC</sub>
Transporte da unidade de produção de etanol até a BADUC				
	Mínimo	Médio	Máximo	
Distância [km]	662	697	732	
Eficiência [km/l]	1,81	2,03	2,25	
Capacidade [m <sup>3</sup> ]	30	30	30	
Consumo de óleo diesel	441,42	515,01	606,49	MJ/t <sub>AEHC</sub>
	451,47	526,73	620,30	MJ/t <sub>AEAC</sub>
Emissão de CO <sub>2</sub>	24,52	28,60	33,68	kg/t <sub>AEHC</sub>
	25,07	29,25	34,45	kg/t <sub>AEAC</sub>
Total				
Consumo [MJ/t <sub>AEHC</sub> ]	445,720	519,584	611,337	
Consumo [MJ/t <sub>AEAC</sub> ]	455,863	531,408	625,249	

Legenda: t<sub>AEHC</sub> – toneladas de AEHC; t<sub>AEAC</sub> – toneladas de AEAC

Para comparação dos valores obtidos para este meso-estágio com os resultados de outros trabalhos deve-se acrescentar os valores obtidos para a distribuição do etanol a partir da BADUC, já calculados anteriormente. Porém, tratam-se de resultados muito específicos, vinculados ao modo de transporte e às distâncias características desta aplicação e difíceis de serem comparados com outras situações. Não se identificou nenhuma referência que dispusesse de resultados comparáveis.

#### *Biodiesel - éster metílico de óleo de soja (EMOS)*

No Brasil, o biodiesel ainda é um combustível em fase de desenvolvimento, dependendo

de regulamentação governamental para que possa ser comercializado. Deste modo, não existe uma cadeia de suprimento e uso final estruturada, a partir da qual se possa estabelecer o ciclo de vida deste combustível, embora já se verifique a produção em algumas plantas pequenas, com capacidade de no máximo 10.000 t/ano (RIBEIRO *et al.*, 2004).

Esta situação limita a obtenção de dados de uso específico e obriga que se estabeleça uma série de suposições e hipótese para o aproveitamento de dados de uso geral, que serão apresentadas ao longo do inventário.

De todas as alternativas de matéria-prima para a produção de biodiesel, o óleo de soja é a que melhor concilia a possibilidade de obter dados nacionais, de uso específico, com dados de uso geral, obtidos em referências internacionais. Além disso, em função de ser amplamente praticada no Brasil, a cultura do soja apresenta algum tipo de documentação útil para o levantamento de dados.

#### *a) Produção de matéria-prima*

Para esta aplicação adota-se o modelo de ciclo de vida apresentado na Figura 6.9 (Capítulo 6). Isso possibilita que a unidade de produção de biodiesel esteja localizada próxima do centro consumidor e não necessariamente junto ao local de produção dos insumos agrícolas, como é usualmente praticado.

Como o Estado do Rio de Janeiro não tem vocação para o plantio de soja, a adoção deste modelo evita grandes deslocamentos ( $d > 500$  km) de grãos, com pequena parcela de óleo (cerca de 18% em massa), e permite que uma parte da cadeia de suprimento do biocombustível ocorra no Estado do Rio de Janeiro, desejável em vistas do Programa RioBiodiesel. Além disso, a localização da planta perto do centro urbano permite que se utilize outros insumos, como por exemplo o óleo residual de fritura ou outros óleos vegetais que no futuro possam ser cultivados no Estado do Rio de Janeiro (RIBEIRO *et al.*, 2004).

Dentre os estados produtores de soja no Brasil destacam-se, em ordem decrescente de produção em 2002, Paraná, Rio Grande do Sul, Mato Grosso, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Santa Catarina (ABIOVE, 2004). Destes, os mais próximos do Rio de Janeiro são São Paulo e Minas Gerais.

Em São Paulo, as unidades de produção de óleos vegetais encontram-se concentradas nas proximidades de Ourinhos, distando 796 km do Município do Rio de Janeiro, enquanto em Minas Gerais isto ocorre em Uberlândia, distante 979 km. Considerando o critério de menor distância para esta primeira abordagem, adotou-se como hipótese o fornecimento do óleo de soja a partir de Ourinhos.

A partir de BISOTTO e FARIAS (2002), é possível obter a produtividade da soja no Estado de São Paulo variando entre 2.100 e 2.400 kg/ha. Valores maiores, entre 2.400 kg/ha e 2700 kg/ha encontram-se em MINETTO (2002) e DIEHL e JUNQUETTI (2002), levando à adoção do valor de 2.400 kg/ha para esta aplicação.

Os dados relativos a cultura da soja foram obtidos a partir de DIEHL e JUNQUETTI (2002) que apresentam a especificação dos equipamentos e seus rendimentos médios (h/ha) para a região de São Paulo. Já o consumo médio de combustível (l de diesel/h) destes equipamentos foi obtido a partir de SAAD (1983) e SILVEIRA (1989). Com estes valores estimou-se o consumo médio de combustível em l/ha, como pode ser visto na Tabela 7.40.

Estes valores, sempre que possível, foram comparados com os dados apresentados em NOGUEIRA (1987). Para o cálculo do intervalo de variação adotou-se o mesmo critério aplicado à cultura da cana-de-açúcar, com base em SAAD (1983).

DIEHL e JUNQUETTI (2002) também apresentam as taxas de aplicação de calcário e adubos (fósforo e potássio), valores que foram ratificados em consulta a outras referências, como pode ser visto na Tabela 7.41. A energia embutida [kcal/kg] foi obtida de NOGUEIRA (1987). Não há recomendação para a aplicação de adubo com nitrogênio, tendo em vista as características específicas desta cultura em fixar o nitrogênio do ar se as sementes forem adequadamente inoculadas com bactéria específica (COSTA, 1996).

Tabela 7.40. Equipamentos para cultura da soja – região de São Paulo.

Operações agrícolas - plantio convencional						
Operação	Implemento	Quant.	h/ha	l/h	l/ha	Equipamento
Reforma terraço	Terraciador (arado)	1	0,5	18,00	9	Valmet 110 Id (60 cv)
Gradeação pesada	Grade 12Dx32" (2.700 kg)	1	0,8	26,40	21,12	Fiat AD 7B (88cv)
Subsolagem	Subsolador	1	1,13	31,95	36,1035	Cat D6 (125 cv)
Gradeação leve	Grade 24Dx18" (381kg)	2	0,6	14,16	16,992	Valmet 62 Id (47,2 cv)
Distribuição de calcário	Carreta calcareadora	1	0,36	6,00	2,16	Ford 6.600 (44 cv)
Plantio	Semeadora de 8 linhas	1	0,66	6,25	4,125	Fendt Farmer N (25 cv)
Aplicação de herbicida	Pulverizador	2	0,8	4,00	6,4	Ford 4.600 (44 cv)
Aplicação de defensivo	Pulverizador	2	0,8	4,00	6,4	Ford 4.600 (44 cv)
				Total	102,30	
				l/t <sub>s</sub>	42,625	
Colheita mecanizada						
Operação	Implemento	Quant.	h/ha	l/h	l/ha	Equipamento
Colheitadeira	Colheitadeira de 4 linhas (2,5m)	1	1,04	45	46,80	John Deere 9750 STS
				l/t <sub>s</sub>	19,5	
Transporte de suprimento – insumos agrícolas						
Operação	Implemento	Quant.	h/ha	l/h	l/ha	Equipamento
Transporte interno	Carreta graneleira	1	0,1	7,475	0,7475	Massey-Ferguson 55X (28,9 cv)
				l/t <sub>s</sub>	0,311	1,04

Fonte: SAAD (1983), SILVEIRA (1989), DIEHL e JUNQUETTI (2002)

Tabela 7.41. Taxa de aplicação de adubos para a cultura da soja.

Especificação	Tipo	kg/ha	kcal/kg	kcal/ha	Fonte
Calcário <sup>1</sup>	-	250,00	315,5	78.875	COSTA (1996)
Fertilizante	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	60,00	2.300	138.000	IAC/BTC 100 (1996) <i>apud</i> MACEDO (2002); DIEHL e JUNQUEIRA (2002) <sup>2</sup>
	K <sub>2</sub> O	70,00	1.600	112.000	IAC/BTC 100 (1996) <i>apud</i> MACEDO (2002); DIEHL e JUNQUEIRA (2002) <sup>3</sup>

Notas: 1 – DIEHL e JUNQUEIRA (2002) recomenda 1.000 kg/ha a cada 5 anos, já COSTA (1996), recomenda aplicações anuais de 200 a 300 kg/ha, sendo adotado o valor médio; 2 – COSTA (1996) recomenda de 50 a 75 kg/ha intervalo que inclui o valor das outras referências; 3 – COSTA (1996) recomenda de 60 a 70 kg/ha, sendo adotado o maior valor.

Para comparação, SHEEHAN *et al.* (1998) consideram a aplicação de 34,77 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 59,2 kg/ha K<sub>2</sub>O e 11,1 kg/ha de nitrogênio como NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. Estes valores foram obtidos da média ponderada de 14 estados produtores norte-americanos.

Ainda considerando os tratos agrícolas da soja, DIEHL e JUNQUETTI (2002) relacionam o consumo de herbicidas, inseticidas e fungicidas, especificando nominalmente os produtos utilizados e o volume por hectare. Como não foi possível

identificar o conteúdo energético destes produtos especificamente, optou-se por realizar uma pesquisa genérica sobre o conteúdo energético de herbicidas, inseticidas e fungicidas de modo que se pudesse orientar a escolha de um conjunto de valores. A Tabela 7.42 apresenta estes valores e suas respectivas fontes.

Tabela 7.42. Conteúdo energético de herbicidas, inseticidas e fungicidas.

Fonte de referência	Conteúdo energético [kcal/kg]		
	Herbicida	Inseticida	Fungicida
WANG <i>et al.</i> (1997)	59.800	52.100	-
BEER <i>et al.</i> (2001)	53.536	53.536	-
MACEDO (2002)	53.600	24.400	-
PATZEK (2003)	56.400	27.720	49.710

Os valores apresentados por MACEDO (2002) e PATZEK (2003) para herbicidas e inseticidas são semelhantes, porém, no caso dos inseticidas divergentes com as demais referências. Verificou-se que, em função da dificuldade de obter informações, BEER *et al.* (2001) adotam um valor único para herbicidas e inseticidas e WANG *et al.* (1997) superestimou o conteúdo energético dos inseticidas, como comprova o trabalho do próprio PATZEK (2003). Considerando MACEDO (2002) como a referência nacional, seus valores foram adotados para o caso dos herbicidas e inseticidas. Já para o caso do fungicida, adotou-se o valor de PATZEK (2003).

No que se refere às quantidades para aplicação, as referências consultadas também apresentaram divergência, como pode ser visto na Tabela 7.43. O trabalho de Costa (1996) aplica-se a região do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, relacionando todos os produtos recomendados para o cultivo da soja, sem identificar a composição ideal por hectare, o que foi feito por analogia ao trabalho de DIEHL e JUNQUETTI (2002). Beer *et al.* (2001) expressam a realidade australiana e só foi indicado para estabelecer uma relação com a realidade brasileira. Optou-se por adotar os valores de DIEHL e JUNQUETTI (2002), cujo estudo detalha o tipo de produto e a composição para aplicação é específica para a região de São Paulo.

Tabela 7.43. Aplicação de herbicidas, inseticidas e fungicidas na cultura da soja.

Fonte de referência	Quantidade [kg/ha]		
	herbicidas	Inseticidas	Fungicidas
COSTA (1996)	5,5 a 7,0	0,16 a 0,375	-
SHEEHAN <i>et al.</i> (1998)	4,55 (herbicidas e inseticidas)		
BEER ET AL (2001)	1 a 2	0,5 a 2,5	-
MACEDO (2002)	5,7	1,17	
DIEHL e JUNQUETTI (2002)	3,78	0,7	0,54

Para o cálculo da energia necessária para a produção de semente utilizou-se o taxa de 75 kg/semente.ha (DIEHL e JUNQUETTI, 2002), o que eleva cerca de 3,13% do consumo de energia por hectare plantado.

A energia consumida no transporte de insumos agrícolas (adubos, defensivos agrícolas, sementes etc), calculada com base na Tabela 7.40, foi comparada com o valor de 0,25 l/ha apresentado por MINETTO (2002) para as operações de apoio agrícola, sendo adotado o maior valor.

Considera-se que o transporte de grãos entre a plantação e os silos seja realizado por uma carreta graneleira de capacidade 12t, tracionada por um trator com potência de 28,9 cv na barra de tração (SILVEIRA, 1991) e distâncias que variam de 7 a 9 km (MINETTO, 2002).

Dos silos para a unidade de produção do óleo o transporte é feito por conjuntos caminhão trator + semi-reboque graneleiro de 41,5t de peso bruto total e com distâncias variando entre 80 e 120 km (ABIOVE, 2004). A eficiência destes veículos [km/l] foi considerada a mesma dos conjuntos para distribuição de gasolina C, óleo diesel e etanol, embora esta seja uma hipótese conservadora, pois neste caso trata-se de transporte de longa distância e não uso urbano.

O descarregamento da soja nos silos é feito por moegas e o consumo de energia adotado é o mesmo que se considera no recebimento e estocagem para a unidade de produção de óleo de soja. Considerou-se carregamento por gravidade para os conjuntos caminhão trator + semi-reboque.

Com base nas considerações apresentadas anteriormente, a Tabela 7.44 apresenta o consumo de energia para cada um dos processos considerados na produção e transporte

da soja e a Tabela 7.45 a energia embutida nos insumos agrícolas para sua produção.

Tabela 7.44. Consumo de energia na produção e transporte da soja.

Preparação do solo, plantio e colheita			
Consumo de óleo diesel [l/t <sub>s</sub> ]	Mínimo	Médio	Máximo
Consumo na preparação do solo e plantio (C <sub>a</sub> )	38,79	42,63	46,46
Consumo na colheita (C <sub>c</sub> )	17,75	19,50	21,26
C <sub>a</sub> +C <sub>c</sub>	56,53	62,13	67,72
C <sub>a</sub> +C <sub>c</sub> [MJ/t <sub>s</sub> ]	2166,50	2380,77	2595,04
Suprimento de insumos agrícolas (calcário, adubos, defensivos agrícolas e mudas)			
Consumo de óleo diesel [l/t <sub>s</sub> ]	Mínimo	Médio	Máximo
Consumo no suprimento (C <sub>t</sub> )	1,23	1,35	1,47
C <sub>t</sub> [MJ/t <sub>s</sub> ]	47,13	51,79	56,45
Transporte de grãos			
Transporte entre a plantação e os silos			
Consumo de óleo diesel [l/t <sub>s</sub> ]	Mínima	Média	Máxima
Consumo no transporte interno de grãos (C <sub>üg</sub> )	0,831	0,997	1,180
C <sub>üg</sub> [MJ/ts]	31,83	38,19	45,23
Descarregamento nos silos por moegas			
Consumo de energia elétrica [MJ/t <sub>s</sub> ]	Mínima	Média	Máxima
	2,70	2,70	2,70
Transporte entre os silos e a unidade de produção de óleo de soja			
Consumo de óleo diesel [l/t <sub>s</sub> ]	Mínima	Média	Máxima
Consumo no transporte externo de grãos (C <sub>teg</sub> )	2,667	3,284	4,052
C <sub>teg</sub> [MJ/t <sub>s</sub> ]	102,19	125,85	155,26

Legenda: t<sub>s</sub> – toneladas de soja

Tabela 7.45. Energia embutida nos insumos agrícolas para produção da soja.

Insumo	Energia embutida [MJ/t <sub>s</sub> ]
Fertilizantes	435,84
Calcário	137,51
Herbicidas	353,22
Inseticidas	29,78
Sementes	96,06
Fungicidas	43,33

Legenda: t<sub>s</sub> – toneladas de soja

Somando os valores médios de consumo de óleo diesel para preparação do solo, plantio, colheita, suprimento de insumos e transporte de grãos até os silos (Tabela 7.44) obtém-se 64,47 l(diesel)/t<sub>s</sub>, 38% maior que o valor de 40,11 l(diesel)/t<sub>s</sub> que pode ser obtido a partir de SHEEHAN *et al.* (1998). Esta é a referência disponível que melhor detalha os processos agrícolas, embora não apresente sistemática de cálculo, o que dificulta a crítica para comparação.

Ainda é possível buscar referência no trabalho de SHEEHAN *et al.* (1998) para a energia consumida nos processos de agricultura, suprimento de insumos agrícolas, transporte interno de grãos e descarregamento, da ordem de 3.158 MJ/t<sub>s</sub>, contra 3.569,19

MJ/t<sub>s</sub> obtidos das Tabelas 7.44 e 7.45. A diferença se deve ao menor consumo de energia e as menores taxas de aplicação de adubos e defensivos agrícolas do trabalho norte-americano.

Para o transporte dos grão de soja até a unidade de produção do óleo, SHEEHAN *et al.* (1998) consideram a distância média de 195 km (75 milhas) e o transporte por caminhões pesados. O valor obtido para o consumo de energia foi de 162,17 MJ/t<sub>s</sub>, 30% maior que o valor apresentado na Tabela 7.44, embora a distância de transporte admitida seja quase o dobro. O trabalho utiliza dados de eficiência energética para transporte de banco de dados de uso geral (DEAM<sup>TM</sup>) e o valor não é explícito, o que dificulta a comparação.

O modelo de extração de óleo segue o trabalho de SHEEHAN *et al.* (1998) que apresenta o melhor detalhamento desta operação, se comparado com as informações disponíveis sobre a realidade brasileira. Adota-se a extração por solvente (hexano), considerando sua recuperação integral. Este processo é utilizado no Brasil (PARENTE, 2003) e recomendado para o soja, por possuir teores de óleo inferiores à 25%.

Adotou-se como teor de óleo na soja o valor de 18,4%, o mesmo de Sheehan *et al.* (1998) e coerente com os valores apresentados em Salama (1981), porém menores que os valores adotados por PARENTE (2003).

O critério de alocação adotado neste processo é o rateio por massa, considerando o farelo como um co-produto. Porém, a energia consumida na degomagem é creditada exclusivamente à produção do óleo e a energia consumida no processamento do farelo ao farelo. Para os demais processos, o consumo total de energia foi rateado igualmente entre as massas de óleo e farelo.

Em função ds localização da planta, todo o combustível consumido foi considerado como óleo combustível, incluindo a geração de vapor, onde se adotou eficiência de 80% (DORSA, 2000). A Tabela 7.46 apresenta os resultados para o processo de extração de óleo de soja.

Tabela 7.46. Consumo de energia para extração de óleo de soja.

Composição do grão	0,184	Óleo	
	0,16	Umidade	
	0,574	Farelo	
	0,082	outros sólidos	
Operação	EE [kWh/t <sub>s</sub> ]	Óleo combustível [kcal/t <sub>s</sub> ]	Vapor [kcal/t <sub>s</sub> ]
Recebimento e estocagem	21,35	266,27	-
Preparação da soja	21,59	-	41.431
Extração do óleo	3,60	-	-
Recuperação do Óleo	0,38		20.814
Degomagem	1,69	-	16.354
Recuperação do solvente	0,52	-	-
Processamento do farelo	19,95		133.074
Tratamento de resíduos	0,57	-	8.798
Totais	69,65	266,27	220.471
Totais Energia/t <sub>o</sub>	72,52	351,28	182.605

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

Legenda: t<sub>s</sub> – toneladas de soja; t<sub>o</sub> – toneladas de óleo soja

Não se considerou a emissão de CO<sub>2</sub> para produção ou uso de insumos agrícolas ou geração de energia elétrica, de modo coerente com os cálculos apresentados para as outras fontes de energia.

A Tabela 7.47 apresenta o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> para todo o meso-estágio de produção de óleo de soja. Os dados foram expressos em função de 1 tonelada do combustível que será produzido a partir do óleo (biodiesel), escolhido como base de cálculo, sendo uma forma padronizada de expressar os resultados do ICV e possibilitando sua comparação com os demais meso-estágios.

Tabela 7.47. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> – produção de óleo de soja.

Consumo de energia [MJ/t <sub>b</sub> ]			
Processos	Mínimo	Médio	Máximo
Agricultura	2.858,18	3.140,86	3.423,54
Suprimento	62,18	68,33	74,47
Insumos	1.095,74	1.095,74	1.095,74
Transporte dos grãos	179,51	219,12	267,20
Extração do óleo	1.088,63	1.088,63	1.088,63
Totais	5.284,24	5.612,68	5.949,59
Emissão de CO <sub>2</sub> [kg/t <sub>b</sub> ]			
Micro-estágios	Mínimo	Médio	Máximo
Agricultura	218,79	218,79	218,79
Suprimento	4,76	4,76	4,76
Insumos	-	-	-
Transporte dos grãos	12,32	15,08	18,43
Extração do óleo	55,70	55,70	55,70
	291,57	294,33	297,68

b) Transporte de matéria-prima

Considera-se neste meso-estágio o transporte do óleo de soja entre Ourinhos e a unidade de produção de biodiesel, por hipótese localizada próxima à BADUC no Estado do Rio de Janeiro, conforme MODM apresentada na Tabela 7.48.

Tabela 7.48.MODM para o transporte do óleo de soja.

Origem	Destino
	Unidade de produção do biodiesel (Rio de Janeiro)
Unidade de extração de óleo (Ourinhos/SP)	754 km Rodoviário Conjunto caminhão+reboque tanque

Por hipótese a energia consumida no carregamento e descarregamento é a mesma que a adotada no bombeio de combustíveis na BADUC e a eficiência do conjunto caminhão trator + semi-reboque tanque é mesma utilizada nos conjuntos para distribuição de combustível, porém, a capacidade do semi-reboque é diferenciada (18 m<sup>3</sup>) em função das práticas do mercado para óleos vegetais (RIBEIRO, 2002), como pode ser visto na Tabela 7.49.

Tabela 7.49.Consumo de energia para o transporte do óleo de soja.

Carregamento e descarregamento			
Consumo de energia elétrica	Mínima	Média	Máxima
[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,4826	0,5134	0,5443
MJ/t <sub>o</sub>	2,0805	2,2133	2,3461
Transporte de óleo de soja			
Consumo de óleo diesel	Mínima	Média	Máxima
l/t <sub>o</sub>	20,1923	22,3806	25,1009
MJ/t <sub>o</sub>	773,81	857,67	961,92

Legenda: t<sub>o</sub> – tonelada de óleo de soja.

A Tabela 7.50 apresenta o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> para todo o meso-estágio de transporte de óleo de soja, aqui também os dados foram expressos em função de 1 tonelada de biodiesel.

Tabela 7.50.Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> – produção de óleo de soja.

Consumo de energia [MJ/tb]	Mínima	Média	Máxima
Carregamento e descarregamento	3,77	4,01	4,25
Transporte rodoviário	773,81	857,67	961,92
Emissão de CO <sub>2</sub>	Mínima	Média	Máxima
Carregamento e descarregamento	-	-	-
Transporte rodoviário	31,39	33,04	34,69

c) *Produção da fonte de energia*

Uma pesquisa foi realizada no intuito de identificar algumas alternativas de unidades de produção de biodiesel, como pode ser visto na Tabela 7.51.

Tabela 7.51. Produção de biodiesel – referências para comparação.

Referências	LURGI	INTECNIAL	FÉRRES	SHEEHAN <i>et al.</i>	Unidade
Insumos					
Óleo de soja degomado	1000 <sup>1</sup>	- <sup>2</sup>	1015	1037 <sup>3</sup>	kg
Vapor	415	320	706	495	kg
Água	25	50	-	0,36	m <sup>3</sup>
Energia elétrica (E.E.)	12	17	34,5	28,9	kWh
Metanol	96	89	115	89,51	kg
Hidróxido de potássio (KOH)	-	-	12,75	-	
Metóxido de sódio	5	25	-	24,04	kg
Hidróxido de sódio (9,5%)				24	
Ácido hidroclorídrico	10	15	-	75,43	kg
Soda cáustica (50%)	1,5	5	-	-	kg
Nitrogênio	1	-	-	-	Nm <sup>3</sup>
Água de processo	20	-	-	-	kg
Produtos					
Biodiesel	1000	1000	1000	1000	kg
Glicerina bruta	128	130	104	213	kg

Fontes: LURGI (2003); INTECNIAL (2003), FÉRRES (2001); SHEEHAN *et al.* (1998)

Notas: 1 – óleo de colza refinado; 2 – não especifica a base; 3 – óleo de soja degomado

De todas as referências consultadas apenas FÉRRES (2001) considera o uso do catalizador KOH, que se verifica ser a prática adotada no Brasil (RIBEIRO *et al.*, 2004) e portanto a alternativa mais indicada para consideração neste trabalho. O consumo de vapor e energia elétrica são maiores na unidade de produção de FÉRRES (2001) que nas demais referências, e sua adoção favorece uma posição conservadora quanto ao uso de energia.

Embora todas as unidades de produção considerem como base 1.000 kg de biodiesel, a planta de FÉRRES (2001) é a que apresenta menor produção de glicerina e maior consumo de metanol, sendo a que menos favorece o rateio de energia entre co-produtos, o que representa outro aspecto conservador quanto ao consumo de energia.

A partir destas considerações adotou-se FÉRRES (2001) como referência para o presente estudo sendo que seus dados consideram a produção de 1.000 kg de éster-metílico de óleo de soja a partir de óleo de soja degomado, coerente com o processo

adotado na unidade de extração de óleo vegetal. Não foi possível obter um intervalo de valores para os dados este processo, embora se considere dados de uso geral. A Tabela 7.52 apresenta estes valores.

Tabela 7.52. Produção de éster-metílico de óleo de soja - EMOS.

Unidade de produção de biodiesel – Fonte: FÉRRRES (2001)				
Capacidade	400	t/dia	129.600	t <sub>b</sub> /ano
Fluxo de entrada	1.015	kg	Óleo de soja degomado	
Insumos				
Vapor	2.462	MJ	2.229,8	MJ/t <sub>b</sub> (0,0518 t/GN) <sup>1</sup>
Energia elétrica (E.E.)	124,2	MJ	112,5	MJ/t <sub>b</sub>
Metanol	115	kg	2.402,8	MJ/t <sub>b</sub> (energia embutida) <sup>2</sup>
Hidróxido de potássio (KOH) <sup>3</sup>	12,75	kg		
Produtos				
EMOS	1000	kg	Fração de biodiesel: 90,6%	
Glicerina bruta	104	kg	Fração de glicerina: 9,4%	
Total	1104	kg		

Legenda: t/d – tonelada por dia; t<sub>b</sub> – tonelada de biodiesel.

Notas: 1 - Todo o vapor é gerado a partir do GN com eficiência de 80%. 2 – Considerando 25.565 MJ/t<sub>metanol</sub> para energia de processo do metanol a partir do gás natural (BOUNSTEAD e HANCOCK, 1979). 3 – Admite-se que o KOH não é consumido, não sendo necessário acrescentar a energia embutida neste insumo.

Como critério de alocação utilizou-se o rateio por massa e considerou-se a glicerina bruta como um co-produto do processo. Como cargas adicionais considera-se a energia e as emissões de CO<sub>2</sub> necessárias ao suprimento de metanol e hidróxido de potássio, admitindo suas origens respectivamente na Prosint, única fábrica de metanol no Estado do Rio de Janeiro, situada na Avenida Brasil próximo à Refinaria de Manguinhos, e na Panamericana, única fábrica de KOH no Estado do Rio de Janeiro, situada em Honório Gurgel.

O transporte de metanol é realizado por um conjunto caminhão trator + semi-reboque tanque similar com os veículos utilizados para a distribuição de combustíveis, sendo adotada a mesma capacidade (30.000 litros) e a mesma eficiência energética. A distância entre a unidade de produção de biodiesel e a Prosint foi estimada em 23,5 km (QUATRO RODAS, 2000). Para o transporte de KOH admite-se um caminhão de 12t de capacidade com características similares ao caminhão MBB L 2314 e a distância entre a unidade de produção de biodiesel e a Panamericana de 19,7 km, também estimada com base no guia de ruas (QUATRO RODAS, 2000).

A Tabela 7.53 os resultados obtidos para consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> para o

meso-estágio de produção do biodiesel.

Tabela 7.53. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> – produção de biodiesel.

Consumo de energia [MJ/tb]	Mínima	Média	Máxima
Produção do biodiesel	2.346,31	2.346,79	2.347,33
Insumos (metanol)	2.663,02	2.663,02	2.663,02
Emissão de CO <sub>2</sub>	Mínima	Média	Máxima
Produção do biodiesel	112,30	112,33	112,37

É possível comparar o resultado de 5.009,81 MJ/t<sub>b</sub> da Tabela 7.53 com o valor de 5.572 MJ/t<sub>b</sub> obtido por SHEEHAN *et al.* (1998). A diferença, de cerca de 11% pode estar associada à energia embutida nos insumos, que é considerada pelo trabalho norte-americano.

Outra comparação possível é com os resultados apresentados em IEA (1999), cujo intervalo de variação para a energia necessária a produção de biodiesel vai de 89 a 470 MJ/GJ. Neste caso o valor obtido da Tabela 7.53 é de 124,75 MJ/GJ, enquadrando-se no intervalo do IEA (1999).

#### d) Distribuição da fonte de energia

Considera-se que os processos para distribuição do biodiesel sejam os mesmos já adotados para a gasolina C, óleo diesel e AEHC, e já descritos anteriormente. Justifica-se esta premissa por se considerar a unidade de produção de biodiesel junto à BADUC e a possibilidade da programação de entregas diretas do produtor de biodiesel ao usuário final (empresas de ônibus), desde que a operação seja feita sob supervisão de uma distribuidora. A Tabela 7.54 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 7.54. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> para distribuição do biodiesel.

Consumo de energia [MJ/tb]	Mínima	Média	Máxima
Carregamento	1,98	2,11	2,24
Transporte	31,32	37,73	45,70
Abastecimento do veículo	0,75	0,75	0,75
Emissão de CO <sub>2</sub>	Mínima	Média	Máxima
Carregamento	-	-	-
Transporte	34,05	40,59	48,69
Abastecimento do veículo	-	-	-

Assim como nas demais alternativas, os resultados deste meso-estágio são fortemente dependentes dos parâmetros determinados pela abrangência da aplicação, como

distâncias médias de transporte, condição de carregamento dos caminhões e modo de transporte, sendo de difícil comparação com outras referências.

*Estágio de uso final.*

O estágio de uso final considera o uso de gasolina C, AEHC e GNC em automóveis de passageiros e de óleo diesel e biodiesel em ônibus urbanos. No caso dos automóveis é necessário que se obtenha dados de eficiência [km/l] para veículos com as mesmas características básicas, porém, em três configurações de sistema de propulsão, como foi apresentado na Tabela 7.1.

Foram coletados os dados de 3 automóveis modelo Gol 1.6 a gasolina C (ano/modelo 2003/2003), 2 automóveis modelo Gol 1.6 adaptado para uso de GNC (bicomcombustível) (ano/modelo 2004/2004) e 1 automóvel modelo Gol 1.6 TotalFlex (*flexible-fuel*) (ano/modelo 2004/2004). Os veículos compõem a frota de automóveis da empresa Velox Transrio Ltda a serviço da INFRAERO no Aeroporto Santos Dumont e operam predominantemente em tráfego urbano. A Tabela 7.55 apresenta as características técnicas destes veículos.

Tabela 7.55. Características técnicas dos automóveis que tiveram dados coletados.

Marca	Modelo	Ano	Combustível	Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	Potência [cv]	Taxa de compressão	Peso [kg]
VW	Gol 1.6	2003	Gasolina C	1,595	92	10:1	1450
VW	Gol 1.6 Totalflex <sup>1</sup>	2004	AEHC	1,596	99 <sup>2</sup>	10:1	1450
VW	Gol 1.6 adaptado GNC	2004	GNC	1,596	96 <sup>3</sup>	10:1	1550 <sup>4</sup>

Notas: 1 – Os dados se referem exclusivamente ao uso de AEHC; 2 – Potência máxima com uso de AEHC; 3 – Potência máxima com uso de gasolina, com uso de GNC a informação não é disponível; 4 – Admite-se que o dispositivo de adaptação para GNC pese 100 kg (CINTRA – Comunicação pessoal, 2004).

A escolha da marca e do modelo do veículo foram condicionados à possibilidade de encontrar automóveis com as mesmas características básicas, operando em condições similares e utilizando os diferentes tipos de combustível. O período de coleta de dados foi condicionado a disponibilidade do operador e facilitado pela rotina operacional regular dos veículos.

Os dados de quilometragem percorrida e volume abastecido foram coletados para os meses de outubro e novembro de 2003 (veículos Gol 1.6 a gasolina C) e abril a maio de 2004 (veículos Gol 1.6 bicomcombustível e *flexible-fuel*). Uma planilha com a relação dos dados, a partir dos quais se estabeleceu a Tabela 7.56, encontra-se no Anexo 7.3

Tabela 7.56. Eficiência energética dos veículos escolhidos.

Sistema de propulsão	Veículo	Marca	Modelo	Ano	Combustível	Mínimo	Médio	Máximo	Unidade
SPCGC	Gol G I	VW	Gol 1.6	2003	Gasolina C	8,23	8,76	9,28	km/l
	Gol G II	VW	Gol 1.6	2003	Gasolina C	8,62	8,98	9,34	km/l
	Gol G III	VW	Gol 1.6	2003	Gasolina C	8,49	8,85	9,02	km/l
SPCBC	Gol GNC I	VW	Gol 1.6	2004	GNC	9,09	9,47	9,84	km/m <sup>3</sup>
	Gol GNC II	VW	Gol 1.6	2004	GNC	10,74	11,19	11,63	km/m <sup>3</sup>
SPCFF	Gol FF	VW	Gol 1.6 TotalFlex	2004	AEHC	5,20	5,47	5,74	km/l

Nota: SPCGC – sistema de propulsão convencional gasolina C, SPCBC – sistema de propulsão convencional bicombustível e SPCFF – sistema de propulsão convencional *flexible-fuel*.

Como referência para comparação buscou-se outra fonte de dados que pudesse ratificar os valores obtidos na Tabela 7.56. A Tabela 7.57 apresenta os resultados desta pesquisa.

Tabela 7.57. Referências para comparação com o levantamento de dados de consumo.

Fonte	Marca	Modelo	Ano	Combustível	Cilindrada [dm <sup>3</sup> ]	Potência [cv]	Peso [kg]	Eficiência [km/l] <sup>1</sup>
CLAUSET (1999)	VW	Gol 1.6	2000	Gasolina C	1,595 <sup>2</sup>	92	1410	7,9
BRIER (1998)	VW	Gol Cli 1.6	1999	Gasolina C	-	88	1042	10,87
BRIER (1997)	VW	Gol CL 1.6 Mi	1997	Gasolina C	-	-	-	10,38
VW (2000)	VW	Gol 1.6	2000	Gasolina C	1,595	92	1390	11,5
GERRERO (2003)	VW	Gol 1.6 Totalflex	2003	Gasolina C	1,596 <sup>3</sup>	99	1450	6,37
				AEHC	1,596 <sup>3</sup>	97	1450	5,29

Notas: 1 – Uso urbano; 2 – Taxa de compressão 9,8:1; 3 – Taxa de compressão 10:1.

A média obtida a partir dos dados coletados para o veículo *flexible-fuel* é próxima do valor apontado por GERRERO (2003). No caso dos veículos a gasolina obteve-se valores diferentes e até conflitantes, pois o fabricante (VW, 2000) declara um valor 45% maior que o obtido em teste pela Revista Quatro Rodas (CLAUSET, 1999). No entanto, os dados coletados encontram-se dentro do intervalo de variação o que ratifica o seu uso.

Não foi possível obter valores de referência para o veículo Gol 1.6 adaptado para uso de GNC. O único dado encontrado refere-se a um veículo FIAT Palio 1.6 16V, sem especificação do tipo de tráfego, onde a eficiência energética encontrada foi de 13,8 km/m<sup>3</sup> (RODRIGUES e SILVA, 2002), sendo o valor 18,6% melhor que a melhor média obtida para os veículos Gol 1.6.

Para os ônibus, adotou-se os valores obtidos por D'AGOSTO e RIBEIRO (2004) a partir de testes realizados em um ônibus Padron convencional (sistema de propulsão convencional - SPCD) e um ônibus Padron híbrido (sistema de propulsão híbrido –

SPH). Estes valores encontram-se na Tabela 7.58 e representam os resultados do teste com os veículos carregados com 75 passageiros em tráfego urbano.

Tabela 7.58. Eficiência energética dos ônibus Padron C e Padron H.

Intervalo de Velocidade [km/h]	Eficiência [km/l]					
	SPH			SPCD		
	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo
10 to 14,9	1,77	1,72	1,67	1,32	1,27	1,22
15 to 19,9	2,17	2,07	1,97	1,59	1,53	1,47
20 to 24,9	2,59	2,46	2,34	1,90	1,81	1,72
25 to 29,9	3,07	2,98	2,89	2,08	1,98	1,88

O trabalho de D'AGOSTO e RIBEIRO (2004) compara os resultados obtidos com referências que representam a realidade brasileira, o que ratifica os resultados apresentados, sendo desnecessário que se repita este procedimento. Considerando as condições de tráfego características da região em estudo, com velocidade média de 14 km/h (CELESTINO, 2001) e sendo a aplicação voltada para o uso urbano, adotou-se o valor de eficiência energética relativo ao intervalo de velocidade de 10 a 14,5 km/h.

Em função da indisponibilidade de dados nacionais atuais sobre a eficiência energética de veículos utilizando biodiesel (EMOS) puro (B100), considerou-se as experiências apresentadas no Capítulo 3, em particular o trabalho de SHEEHAN *et al.* (1998), que considera que na prática a redução máxima de eficiência energética de um veículo pesado utilizando biodiesel é de 5% se comparado com o uso de óleo diesel.

A Tabela 7.59 apresenta os valores de consumo de combustível calculados com base nas menores eficiências energéticas, o que privilegia uma posição conservadora. Os valores foram expressos em função da unidade funcional.

Tabela 7.59. Consumo de energia para os sistemas de propulsão.

Sistema de Propulsão	Fonte de energia	Consumo [t/1000pass.km]			
		Máximo	Médio	Mínimo	Varição
SPCGC	Gasolina C	0,1648	0,1549	0,1461	6,0%
SPCFF	AEHC	0,2378	0,2259	0,2151	5,0%
SPCBC	GNC	0,1411	0,1354	0,1302	4,0%
SPCD	Óleo diesel	0,0093	0,0090	0,0086	4,0%
	Biodiesel (EMOS)	0,0101	0,0097	0,0093	4,0%
SPH	Óleo diesel	0,0068	0,0066	0,0064	3,0%
	Biodiesel (EMOS)	0,0074	0,0071	0,0069	3,0%

Os modelos de ciclo de vida apresentados no Capítulo 6 consideram como desejável a inclusão de um processo de gestão dos resíduos no meso-estágio de uso final. Porém, não se encontrou uma proposta adequada de modelagem deste processo e ele não foi considerado numa primeira abordagem. No entanto, diferentemente das referências consultadas, que ignoram a gestão dos resíduos, apresenta-se algumas considerações sobre este processo que ajudam a subsidiar sua futura aplicação.

Pode-se considerar que os resíduos do uso final dos combustíveis são as emissões atmosféricas<sup>17</sup>. Para a presente aplicação estas emissões resumem-se ao CO<sub>2</sub> oriundo da queima direta de combustíveis, porém, em aplicações mais completas as emissões apresentam composição variada.

O processo de gestão dos resíduos considera as formas como os resíduos da combustão são removidos do ambiente onde foram gerados e a quantificação dos insumos necessários a este processo, em particular os insumos energéticos.

No caso particular dos combustíveis oriundos da biomassa, pode-se considerar que as emissões de CO<sub>2</sub> são naturalmente recicladas na recomposição da biomassa, existindo uma gestão natural deste resíduo, o que não ocorre com os combustíveis fósseis. Assim, estes últimos deveriam ter um custo energético de gestão dos resíduos maior que os primeiros, porém, existe grande dificuldade e controvérsia quanto a sua quantificação.

Na impossibilidade de identificar adequadamente e apropriar um custo energético de gestão dos resíduos aos combustíveis fósseis, sugere-se considerar um crédito para os biocombustíveis, no valor equivalente à parcela de energia oriunda da biomassa que pode ser reciclada naturalmente.

Com isso, o modelo seria capaz de considerar o potencial de reciclagem dos biocombustíveis e diferenciá-los dos combustíveis fósseis. Isto é feito, indiretamente, quando se destaca a parcela de energia renovável no total de energia consumida no ciclo de vida, como será apresentado mais adiante.

### **7.3.2. Etapa 2 – Avaliação da qualidade dos dados**

Para a avaliação da qualidade dos dados utilizou-se o processo apresentado na Figura

---

<sup>17</sup> Numa visão mais ampla, também poderia ser considerada a energia perdida no processo de conversão.

6.4 (Capítulo 6). A partir de MAURICE *et al.* (2000) adotou-se  $P_{\min} = 10\%$ , recomendado para inventários expeditos com a maior parte dos dados de uso específico. Como referência para o intervalo de variação dos fluxos adotou-se  $T_{\max} = 5\%$ , considerado como prática em engenharia de transportes (KING, 1994).

Considerou-se como base de cálculo os fluxos relacionados a 1000pass.km, escolhida como unidade funcional. As Tabelas 7.60 a 7.64 apresentam o intervalo de variação, o peso do fluxo máximo e a origem dos dados para os fluxos de processo de cada um dos indicadores escolhidos para avaliação.

Tabela 7.60. Avaliação da qualidade dos dados – SPCGC.

Processos	Energia total		Energia renovável		Emissão de CO <sub>2</sub>		Origem do dado
	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	
Produção de matéria-prima (petróleo)							
Exploração	12,415%	0,393%	-	-	12,400%	0,584%	uso específico
Produção	12,080%	3,239%	-	-	13,083%	3,141%	uso específico
Parcela do AEAC	6,022%	0,904%	-	-	6,022%	0,332%	uso específico
Transporte de matéria-prima (petróleo)							
Oleoduto (Oriente Médio)	21,453%	0,005%	-	-	-	-	uso geral
Carregamento navio (Oriente Médio)	8,356%	0,009%	-	-	8,356%	0,013%	uso geral
Transporte de navio	9,028%	0,434%	-	-	9,028%	0,677%	uso específico
Descarregamento navio (TEBIG)	8,356%	0,009%	-	-	8,356%	0,013%	uso geral
Oleoduto (TEBIG / TEDUC)	16,058%	0,012%	16,058%	0,071%	-	-	uso específico
Operações de estocagem	19,069%	0,007%	-	-	21,076%	0,008%	uso específico
Oleoduto (B. de Campos / TEDUC)	16,058%	0,031%	16,058%	0,190%	-	-	uso específico
Operações de estocagem	19,069%	0,007%	-	-	21,076%	0,008%	uso específico
Parcela do AEAC	11,690%	0,301%	-	-	6,022%	0,401%	uso específico
Produção da fonte de energia (gasolina C)							
Refino na REDUC	11,040%	6,047%	11,040%	0,202%	11,040%	9,029%	uso específico
Parcela do AEAC	6,022%	6,719%	<b>6,022%</b>	<b>30,874%</b>	-	-	uso específico
Distribuição da fonte de energia (gasolina C)							
Carregamento do caminhão	12,043%	0,004%	12,043%	0,018%	-	-	uso específico
Transporte	24,254%	0,077%	-	-	24,254%	0,121%	uso específico
Abastecimento do veículo	6,022%	0,001%	6,022%	0,006%	-	-	uso específico
Parcela do AEAC	22,120%	0,315%	6,022%	0,010%	6,022%	0,270%	uso geral
Uso final	<b>6,022%</b>	<b>81,488%</b>	<b>6,022%</b>	<b>68,576%</b>	<b>6,022%</b>	<b>85,402%</b>	uso específico
Total	6,613%	100,000%	6,057%	100,00%	6,581%	100,00%	

Tabela 7.61.Avaliação da qualidade dos dados – SPCFF.

Processos	Energia total		Energia renovável		Emissão de CO <sub>2</sub>		Origem do dado
	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	
Produção de matéria-prima (cana-de-açúcar)							
Agricultura	14,04%	0,90%	-	-	<b>14,04%</b>	<b>23,97%</b>	uso específico
Suprimento de insumos agrícolas	16,97%	0,30%	-	-	16,97%	7,91%	uso específico
Insumos agrícolas	5,01%	3,01%	-	-	-	-	uso específico
Transporte de matéria-prima (cana-de-açúcar)							
Carregamento dos caminhões	14,04%	0,22%	-	-	14,04%	5,91%	uso específico
Transporte rodoviário	10,03%	1,11%	-	-	<b>10,03%</b>	<b>29,47%</b>	uso específico
Produção da fonte de energia (AEHC e AEAC)							
Produção do etanol	5,00%	<b>29,69%</b>	5,00%	<b>31,93%</b>	-	-	uso específico
Distribuição da fonte de energia (AEHC e AEAC)							
Carregamento/descarregamento	11,03%	0,01%	11,03%	0,01%	-	-	uso geral
Transporte até BADUC	21,17%	1,38%	-	-	<b>21,17%</b>	<b>29,27%</b>	uso específico
Carregamento (BADUC)	11,03%	0,01%	11,03%	0,01%	-	-	uso específico
Transporte (até os postos)	23,21%	0,12%	-	-	23,21%	3,48%	uso específico
Abastecimento do veículo	5,01%	0,002%	5,01%	0,002%	-	-	uso específico
Uso final	5,00%	<b>63,25%</b>	5,01%	<b>68,05%</b>	-	-	uso específico
Total	5,40%	100,00%	5,01%	100,00%	15,28%	100,00%	

Tabela 7.62.Avaliação da qualidade dos dados – SPCBC.

Processos	Energia total		Energia renovável		Emissão de CO <sub>2</sub>		Origem do dado
	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	
Produção de matéria-prima (GN)							
Produção	11,018%	4,143%	-	-	11,018%	3,793%	uso específico
Transporte de matéria-prima (GN)							
Gasoduto (B. de Campos / REDUC)	7,011%	0,060%	7,011%	2,659%	-	-	uso específico
Produção da fonte de energia (GN)							
Processamento (UPGN REDUC I e II)	9,014%	1,033%	-	-	4,006%	0,833%	uso específico
Distribuição da fonte de energia (GN)							
Distribuição na malha urbana	7,011%	0,060%	7,011%	2,659%	-	-	uso geral
Compressão no posto de serviço	13,015%	2,214%	<b>13,194%</b>	<b>94,683%</b>	-	-	uso específico
Uso final	4,006%	<b>92,489%</b>	-	-	4,006%	<b>95,374%</b>	uso específico
Total	4,516%	100,00%	12,846%	100,00%	4,256%	100,00%	

Tabela 7.63. Avaliação da qualidade dos dados – SPCD.

Processos	Energia total		Energia renovável		Emissão de CO <sub>2</sub>		Origem do dado
	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	
Produção de matéria-prima (petróleo)							
Exploração	10,387%	0,503%	-	-	10,372%	0,508%	uso específico.
Produção	10,052%	4,146%	-	-	11,054%	2,733%	uso específico.
Transporte de matéria-prima (petróleo)							
Oleoduto (Oriente Médio)	19,397%	0,007%	-	-	-	-	uso geral
Carregamento navio (Oriente Médio)	6,336%	0,011%	-	-	6,336%	0,012%	uso geral
Transporte de navio	7,007%	0,555%	-	-	7,007%	0,589%	uso geral
Descarregamento navio (TEBIG)	6,336%	0,011%	-	-	6,336%	0,012%	uso geral
Oleoduto (TEBIG / TEDUC)	14,022%	0,015%	<b>14,022%</b>	<b>11,891%</b>	-	-	uso específico.
Operações de estocagem	17,027%	0,008%	-	-	19,030%	0,007%	uso específico.
Oleoduto (B. de Campos / TEDUC)	14,022%	0,040%	<b>14,022%</b>	<b>31,791%</b>	-	-	uso específico.
Operações de estocagem	17,027%	0,008%	-	-	19,030%	0,007%	uso específico.
Produção da fonte de energia (óleo diesel)							
Refino na REDUC	9,014%	7,704%	4,006%	<b>42,711%</b>	9,014%	7,820%	uso específico.
Distribuição da fonte de energia (AEHC e AEAC)							
Carregamento do caminhão	10,016%	0,004%	20,032%	3,563%	-	-	uso específico.
Transporte	23,181%	0,091%	-	-	23,181%	0,097%	uso específico.
Abastecimento do veículo	4,006%	0,001%	4,006%	1,190%	-	-	uso específico.
Uso final	4,006%	<b>86,895%</b>	-	-	4,006%	<b>88,216%</b>	uso específico.
Total	4,684%	100,00%	8,588%	100,00%	4,628%	100,000%	

Tabela 7.64. Avaliação da qualidade dos dados – SPCD + biodiesel.

Processos	Energia total		Energia renovável		Emissão de CO <sub>2</sub>		Origem do dado
	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	Intervalo de Variação	Peso do Fluxo Máximo	
Produção de matéria-prima (óleo de soja)							
Agricultura da soja	13,021%	6,566%	-	-	4,006%	<b>35,277%</b>	uso específico
Suprimento insumos agrícolas	13,021%	0,143%	-	-	4,006%	0,767%	uso específico
Insumos agrícolas	4,006%	2,102%	-	-	-	-	uso geral
Transporte dos grãos de soja	24,127%	0,513%	4,006%	0,007%	24,378%	2,971%	uso específico
Extração do óleo de soja	4,006%	2,088%	4,006%	0,684%	4,006%	8,981%	uso geral
Transporte de matéria-prima (óleo de soja)							
Carregamento e descarregamento	10,016%	0,008%	4,006%	0,010%	-	-	uso geral
Transporte rodoviário	15,038%	1,845%	-	-	9,014%	5,593%	uso específico
Produção da fonte de energia (biodiesel)							
Produção do biodiesel	4,028%	4,502%	4,006%	0,295%	4,038%	<b>18,118%</b>	uso específico
Insumos (metanol)	4,006%	5,108%	-	-	-	-	uso geral
Distribuição da fonte de energia (biodiesel)							
Carregamento caminhão	10,016%	0,004%	10,016%	0,006%	-	-	uso geral
Transporte	23,181%	0,088%	-	-	22,143%	7,850%	uso específico
Abastecimento do veículo	4,006%	0,001%	4,006%	0,002%	-	-	uso específico
Uso final	4,006%	<b>77,032%</b>	4,006%	<b>98,996%</b>	4,006%	<b>20,441%</b>	uso específico
Total	4,850%	100,00%	4,007%	100,00%	6,003%	100,00%	

Foram identificados os fluxos que apresentam peso maior que 10% (destacados em negrito), bem como os intervalos de variação maiores que 5%, desde que o peso tenha sido maior que 10% (destacados nas células de cor cinza).

As alternativas de uso de óleo diesel ou biodiesel + sistema de propulsão híbrido possuem as cadeias de suprimento apresentadas nas Tabelas 7.63 e 7.64. Com isso, as proporções dos pesos e intervalos de variação dos fluxos se mantêm as mesmas e não há necessidade de repetir a avaliação da qualidade dos dados.

Para o ciclo de vida da gasolina C (Tabela 7.60) os fluxos de peso maior que 10% estão concentrados no processo de uso final. Porém, na produção da gasolina C o AEAC apresenta contribuição maior que 10% no consumo de energia renovável. Para estes casos, o intervalo de variação maior que 5% foi determinado a partir de dados de uso

específico e a principal determinante desta variação é a eficiência do veículo de uso final, cuja justificativa de escolha já foi apresentada.

No caso do AEHC (Tabela 7.61), intervalos de variação maiores que 5% são encontrados na maior parte dos processos, porém, a conjugação destes com fluxos de peso superior a 10% ocorre para a emissão de CO<sub>2</sub> na agricultura e transporte da cana-de-açúcar e no transporte do etanol até a BADUC. O uso de óleo diesel nestes processos é o único colaborador para as emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida do etanol, e embora apresente pesos inferiores a 5% no consumo de energia, é determinante para as emissões de CO<sub>2</sub>.

A justificativa para manutenção destes valores decorre de tratarem-se de fluxos obtidos a partir de dados de uso específico e com base na literatura consultada considerou-se intervalo de variação de 10% para a eficiência energética dos equipamentos agrícolas, 5% para os caminhões de transporte de cana-de-açúcar e 10% para os caminhões de transporte de etanol. Adicionalmente, a distância de transporte entre as unidades de produção de etanol e a BADUC têm intervalo de variação de 5%, sendo também oriundas de dados de uso específico. Todos estes intervalos são ampliados pelo intervalo de variação do processo de uso final (5%).

O consumo de energia elétrica para a compressão do GN é responsável por 94,68% do uso de energia renovável no seu ciclo de vida e apresenta intervalo de variação de 13,19% (Tabela 7.62). Mesmo sendo um fluxo obtido a partir de dados de uso específico, entende-se que seu grande peso recomenda cuidado na aquisição de dados para futuro refinamento do ICV, porém, nesta abordagem preliminar os valores podem ser mantidos.

No ciclo de vida do óleo diesel (Tabela 7.63), o consumo de energia renovável apresenta fluxos onde se observa pesos maiores que 10% e intervalos de variação maiores que 5%. Destaca-se o consumo de energia elétrica no bombeio de petróleo do TEBIG e da Bacia de Campos para o TEDUC, que apresentam pesos de 11,89% e 31,79%, respectivamente, com intervalos de variação pouco maiores que 14%. Sua manutenção se justifica por tratarem-se de fluxos calculados a partir de uma série histórica de dados de uso específico e seu intervalo de variação (10%) deve ser considerado como característico do processo.

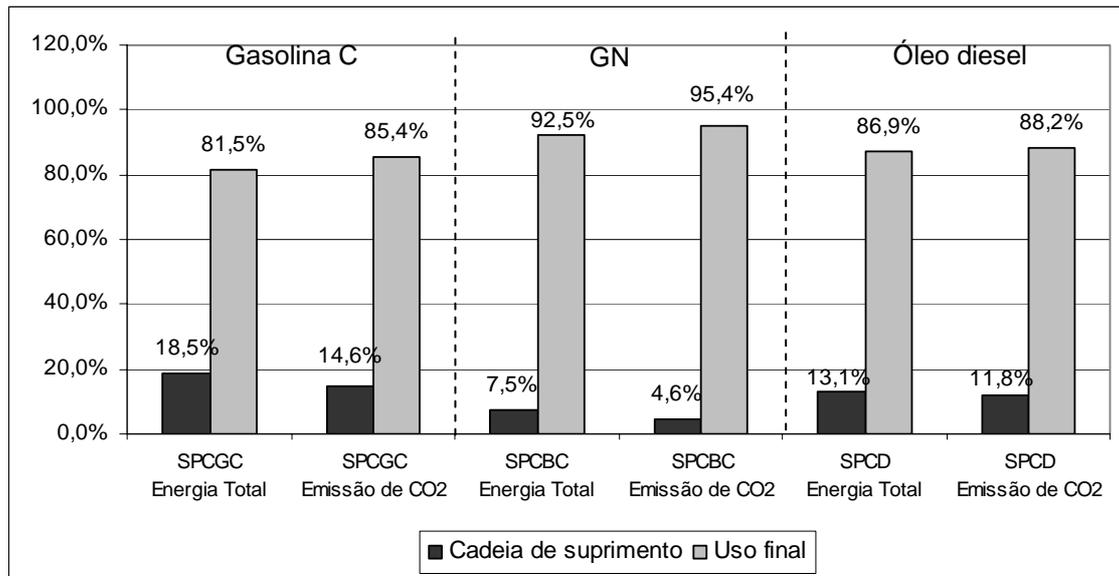
Não se verificou a conjugação de fluxos com peso superior a 10% e intervalo de variação maior que 5% no ciclo de vida do biodiesel (Tabela 7.64), porém, considerando o consumo de energia (total ou renovável) destaca-se que os fluxos de maior peso estão associados ao processo de uso final. No que se refere à emissão de CO<sub>2</sub>, os maiores pesos se distribuem entre agricultura (35,28%), produção do biodiesel (18,12%) e uso final (20,44%).

Embora não se tenha considerado necessária a reavaliação dos dados de nenhum dos fluxos na presente aplicação, o processo de avaliação da qualidade dos dados permite que se identifique por onde o trabalho de refinamento do ICV deve ser iniciado e qual o caminho a seguir, por meio da consideração de intervalos de variação progressivamente menores.

#### **7.4.FASE 3 – ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS**

Além de subsidiar o processo de verificação da qualidade dos dados, o conjunto de Tabelas 7.60 a 7.64 permite que se identifique como cada processo contribui para a formação dos indicadores de consumo de energia (total e renovável) e emissão de CO<sub>2</sub>. Com isso, uma parte da análise dos resultados do ICV já pode ser apresentada, como será visto a seguir.

No caso das alternativas que utilizam combustíveis fósseis verifica-se a predominância do consumo de energia total e emissão de CO<sub>2</sub> no processo de uso final, como pode ser visto na Figura 7.8. No extremo desta situação está o SPCBC (sistema de propulsão convencional bicomcombustível) que utiliza gás natural (GN). Como o GN se apresenta praticamente pronto na natureza, sua cadeia de suprimento consome menos de 10% da energia total necessária ao seu ciclo de vida. Desta parte cerca de 30% dizem respeito ao consumo de energia elétrica, de modo que as emissões de CO<sub>2</sub> ao longo da cadeia de suprimento ficam ainda menores, não chegando a 5%.



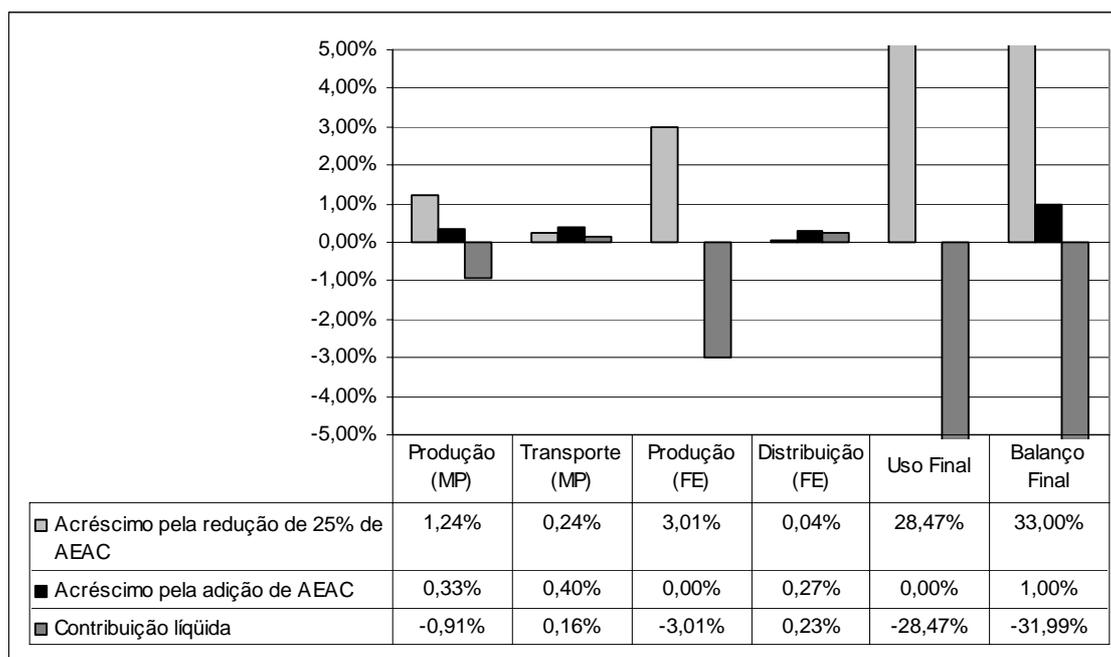
Legenda: SPCGC – sistema de propulsão convencional + gasolina C; SPCBC – sistema de propulsão convencional bicomcombustível; SPCD – sistema de propulsão convencional + óleo diesel.

Figura 7.8. Percentuais de consumo de energia total e emissão de CO<sub>2</sub>, combustíveis fósseis.

Como a cadeia de suprimento dos combustíveis fósseis consome, em sua maior parte, os próprios combustíveis fósseis, as emissões de CO<sub>2</sub> se distribuem pelos processos em percentuais aproximadamente equivalentes aos percentuais de consumo de energia total, como pode ser visto nas Tabelas 7.60, 7.62 e 7.63. Isto se reflete diretamente nos percentuais acumulados, apresentados na Figura 7.8.

Destaca-se que a adição de AEAC na composição da gasolina C não apenas favorece a redução de emissões de CO<sub>2</sub> no uso final, o que pode ser visto na Figura 7.8, como também contribui para o consumo de energia renovável ao longo da sua cadeia de suprimento. Composto apenas 25% da gasolina C, o AEAC contribui com mais de 50% da energia necessária a produção da fonte de energia (Tabela 7.60), sendo esta contribuição na forma de energia renovável.

No entanto, os meso-estágios de produção e transporte de matéria-prima da cadeia de suprimento do AEAC consomem predominantemente óleo diesel, o que contribui para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> na cadeia de suprimento da gasolina C, sendo conveniente que se faça um balanço destas contribuições ao longo de todo o ciclo de vida, como pode ser visto na Figura 7.9.



Notas: A escala foi interrompida em  $\pm 5\%$  para facilitar a visualização. Os cálculos se basearam na unidade funcional (1.000pass.km).

Figura 7.9. Contribuição líquida do AEAC nas emissões de CO<sub>2</sub>, ciclo de vida da gasolina C.

Verifica-se que a adição de 25% de AEAC na composição da gasolina C contribui para a redução de 31,99% nas emissões de CO<sub>2</sub> ao longo de todo o ciclo de vida. Porém, esta redução não se distribui igualmente pelos meso-estágios, havendo pequenos acréscimos no transporte de matéria-prima e distribuição da fonte de energia, pequena redução na produção de matéria-prima e maiores reduções na produção da fonte de energia e uso final, como já era esperado.

O mesmo não ocorre para a alternativa SPCD (sistema de propulsão convencional + óleo diesel). Assim como para o GN, a diferença de proporções entre consumo total de energia e emissão de CO<sub>2</sub> ao longo da cadeia de suprimento se deve exclusivamente ao uso de energia elétrica, neste caso em torno de 1%, enquanto para o GN atinge 30%.

Assim, já é possível evidenciar a diferença de composição no consumo de energia total para os combustíveis fósseis brasileiros, onde a gasolina C, além de contar com as parcelas de energia renovável de origem hidrelétrica, ainda recebe as contribuições de energia renovável oriunda da adição de AEAC, com reflexos diretos na redução da emissão de CO<sub>2</sub>.

Quanto ao consumo de energia total, é possível comparar os resultados apresentados na Figura 7.8 com as referências internacionais, apresentadas no Capítulo 4. Selecionou-se os resultados de BOUSTEAD e HANCOCK (1979), WANG e DELUCHI (1991), FURUHOLT (1995), IEA (1999) e SHEEHAN *et al.* (1998), como pode ser visto na Tabela 7.65.

Tabela 7.65. Comparativo do consumo de energia total com referências selecionadas – fontes de energia convencionais.

Gasolina				
Resultado obtido	Brasil/Rio de Janeiro	18,50%		
Referência	País	Menor valor	Valor Médio	Maior Valor
WANG e DELUCHI (1991)	Estados Unidos	-	16,9%	-
FURUHOLT (1995)	Noruega	-	9,0%	-
IEA (1999)	Países da OECD	12,8%	16,8%	20,8%
Óleo diesel				
Resultado obtido	Brasil/Rio de Janeiro	13,10%		
Referência	País	Menor valor	Valor Médio	Maior Valor
FURUHOLT (1995)	Noruega	-	5%	-
IEA (1999)	Países da OECD	8,7%	10,5%	12,4%
SHEEHAN <i>et al.</i> (1998)	Estados Unidos	-	16,7%	-
Gás natural				
Resultado obtido	Brasil/Rio de Janeiro	7,50%		
Referência	País	Menor valor	Valor Médio	Maior Valor
BOUSTEAD e HANCOCK (1979)	Estados Unidos	7,0%	11,0%	14,5%
	Reino Unido	2,0%	17,5%	-
IEA (1999)	Países da OECD	6,0%	9,7%	13,5%

Notas: O resultado obtido expressa o valor médio para as condições de abrangência da aplicação, enquanto para as referências, as variações de valor representam condições diferenciadas de abrangência.

Para a gasolina C, verifica-se a tendência do consumo de energia total encontrar-se na faixa de maior valor das referências, em parte por conta da adição de AEAC, que contribui decisivamente para o aumento do consumo de energia na sua produção. No caso do óleo diesel, o resultado obtido é bastante próximo do maior valor obtido por IEA (1999), porém, 4,2% menor que o valor médio de SHEEHAN *et al.* (1998). Já no que se refere ao gás natural, a tendência é se equiparar aos menores valores.

Deve-se levar em consideração que os resultados apresentados referem-se exclusivamente às condições de abrangência da aplicação em estudo e não devem ser considerados como médias nacionais do Brasil. A posição privilegiada do Município do Rio de Janeiro, próximo à Bacia de Campos, colabora para reduzir o consumo de energia no transporte de gás natural e petróleo nacional até a REDUC. Por outro lado, o transporte de AEAC de São Paulo para o Rio de Janeiro colabora para aumentar o consumo de energia no ciclo de vida da gasolina C.

Seguindo a mesma linha estabelecida para os combustíveis fósseis, é possível apresentar resultados para os biocombustíveis. Neste caso não se observa uma relação tão marcante entre consumo de energia total e emissões de CO<sub>2</sub>, sendo mais difícil generalizar os resultados, como pode ser visto na Figura 7.10.

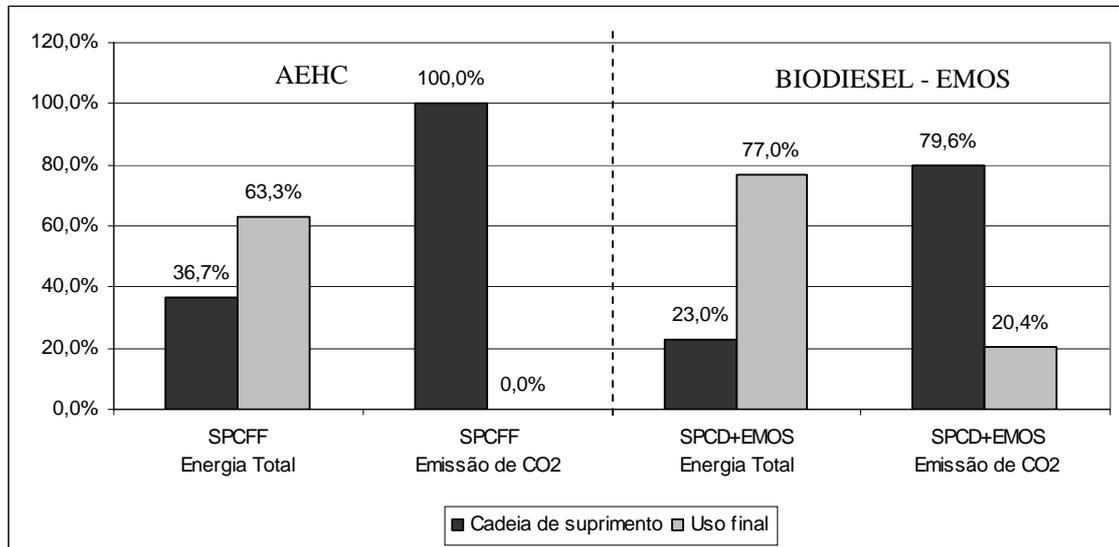


Figura 7.10. Percentuais de consumo de energia total e emissão de CO<sub>2</sub>, biocombustíveis.

No caso do AEHC observa-se que enquanto a cadeia de suprimento é responsável por menos da metade do consumo de energia total, responde por 100% das emissões de CO<sub>2</sub>, que se concentram nos processos agrícolas e de transporte (Tabela 7.61), totalmente dependentes do óleo diesel. Para o biodiesel (EMOS) a diferença existe, porém, é menos marcante, pois cerca de 20% da emissão de CO<sub>2</sub> permanece associada ao uso final, representando a fração de metanol embutida no EMOS. Ainda assim, grandes percentuais de emissão de CO<sub>2</sub> para a cadeia de suprimento do biodiesel ocorrem para os processos agrícola, de transporte e de produção (Tabela 7.64).

O biodiesel também apresenta menor consumo percentual de energia total na cadeia de suprimento que o AEHC, sendo que alguns aspectos colaboram para isso. Em primeiro lugar, considera-se as diferenças de poder calorífico inferior e massa específica, onde o biodiesel apresenta valores superiores em aproximadamente 44% e 8%, respectivamente.

Em segundo lugar, a cadeia de suprimento do biodiesel a partir da soja é privilegiada

pelo rateio da energia total consumida entre co-produtos, como o farelo e a glicerina, o que não ocorre com o AEHC. Assim, a energia consumida na produção do óleo, incluindo as operações agrícolas, é rateada entre as frações de farelo e óleo, que representam 76% da massa dos grãos. No caso do AEHC, a fração útil se resume a cerca de 7%, considerando o rendimento de 85,4 litros de etanol por tonelada de cana-de-açúcar.

Estes aspectos também se manifestam no processo de transporte. Considerando que os rendimentos energéticos são calculados em função da massa transportada, o transporte de óleo de soja de São Paulo para o Rio de Janeiro apresenta rendimento 14% superior que o transporte de AEHC.

A comparação dos resultados obtidos para os biocombustíveis com as referências internacionais é mais difícil, tendo em vista as particularidades que as cadeias de produção destas fontes de energia apresentam em cada país. A Tabela 7.66 apresenta alguns destes resultados.

Para o AEHC produzido a partir da cana-de-açúcar o resultado obtido encontra-se 27% abaixo do menor valor obtido com a produção a partir do milho. No caso do biodiesel, a melhor comparação se faz com o trabalho de SHEEHAN *et al.* (1998), sendo o resultado obtido 18,5% superior. Se comparado ao EMOC, consome-se 38% menos energia que para o menor valor apresentado em IEA (1999).

Tabela 7.66. Comparativo do consumo de energia total para os biocombustíveis.

AEHC (produzido a partir da cana-de-açúcar)				
Resultado obtido	Brasil/Rio de Janeiro	36,7		
Referências	País	Menor Valor	Valor Médio	Maior Valor
IEA (1999) <sup>1</sup>	Países da OECD	50,5%	71,2	91,9%
Biodiesel (EMOS)				
Resultado obtido	Brasil/Rio de Janeiro	23,0%		
Referências	País	Menor Valor	Valor Médio	Maior Valor
SHEEHAN <i>et al.</i> (1998)	Estados Unidos	-	19,4%	-
IEA (1999) <sup>2</sup>	Países da OECD	37,2%	67,8%	98,4%

Notas: 1 – etanol produzido a partir do milho; 2 – biodiesel produzido a partir do óleo de colza.

O principal diferencial que existe no ciclo de vida da alternativa SPCFF (sistema de propulsão convencional *flexible-fuel*) está no maior uso de energia renovável ao longo da cadeia de suprimento do AEHC, menos presente nas alternativas que dependem de combustíveis fósseis e no biodiesel, como pode ser visto na Figura 7.11. Mesmo assim,

graças à adição de AEAC na gasolina C amplia-se o uso de energia renovável nesta alternativa, que caso contrário teria desempenho similar ao uso de óleo diesel, com praticamente nenhuma participação de energia renovável em seu ciclo de vida.

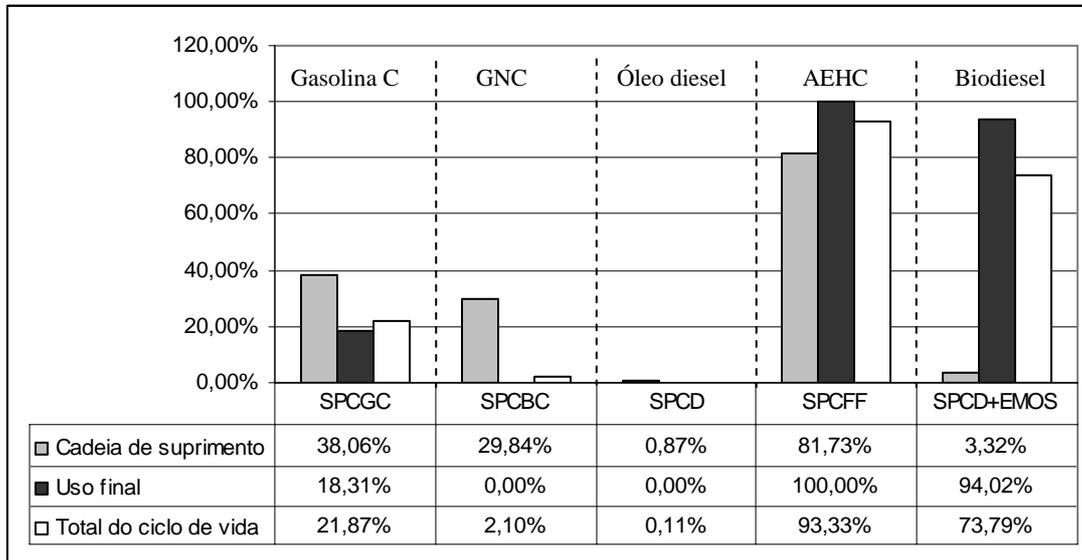


Figura 7.11. Percentual de energia renovável no ciclo de vida de cada alternativa.

Destaca-se que a contribuição do AEAC em termos de energia renovável para a cadeia de suprimento da gasolina C é mais expressiva que para o uso final, consideração que só é possível de ser obtida por meio da análise do ciclo de vida.

No caso do gás natural para sistemas de propulsão bicompostível (SPCBC) o que se verifica é que a pequena parcela de energia consumida na cadeia de suprimento é predominantemente energia hidrelétrica, o que colabora para elevar o percentual de contribuição da energia renovável na cadeia de suprimento, porém, se considerado o total do ciclo de vida, a participação da energia renovável cai sensivelmente.

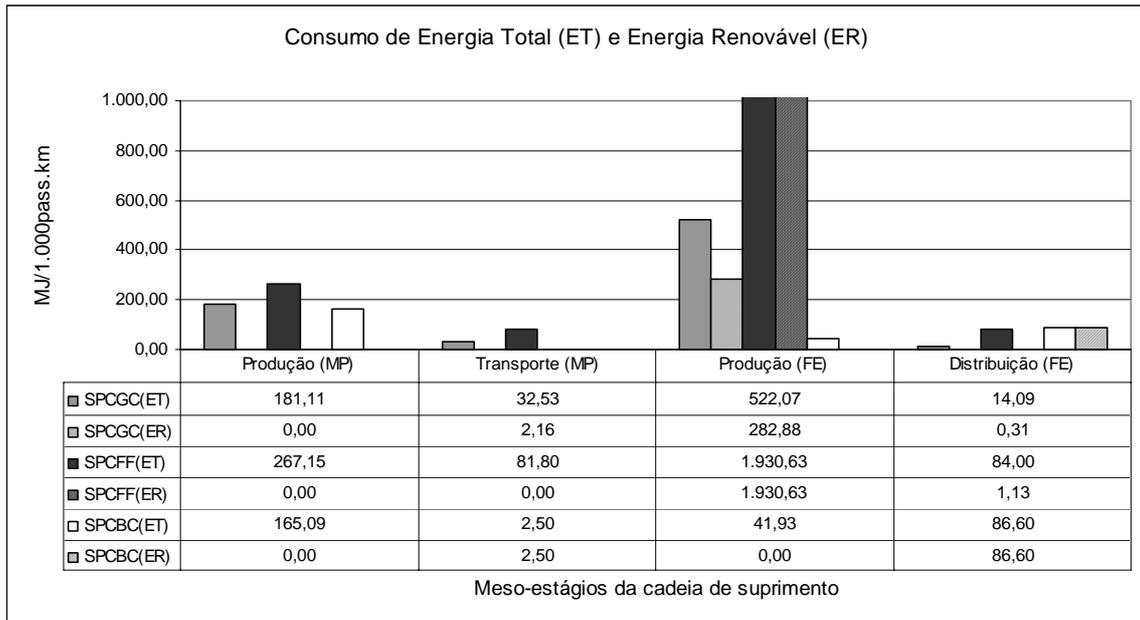
A participação da energia renovável na cadeia de suprimento do biodiesel é pouco expressiva, e limitada à energia hidrelétrica, reflexo de sua dependência nos combustíveis fósseis, como o óleo diesel (agricultura e transporte), óleo combustível (extração do óleo de soja) e gás natural (produção do biodiesel). Mesmo assim, o processo de uso final compensa esta situação e no ciclo de vida como um todo se observa a predominância do uso de energia renovável.

As considerações feitas até o momento basearam-se em dados relativos, específicos de

cada alternativa, quanto ao consumo de energia total, energia renovável e emissão de CO<sub>2</sub>. Para que se aprimore a análise comparativa, os resultados obtidos para cada um destes três indicadores serão apresentados nas Figuras 7.12 a 7.19. Por uma questão de representação em escala, optou-se por dividir a abordagem em meso-estágios da cadeia de suprimento e macro-estágios do ciclo de vida. Uma vez que o procedimento considera duas referências, sistema de propulsão convencional + gasolina C (SPCGC) e sistema de propulsão convencional + óleo diesel (SPCD), que representam modos de transporte de passageiros privados e coletivos, os resultados também são divididos por alternativas afins.

Independente da alternativa apresentada na Figura 7.12 não se verifica o consumo de energia renovável no meso-estágio de produção de matéria-prima, sendo que o gás natural (SPCBC) apresenta o menor consumo de energia total, 38,2% abaixo do AEHC (SPCFF) e 8,8% abaixo da gasolina C (SPCGC). Como é possível verificar da análise do inventário, a energia consumida neste meso-estágio é exclusivamente de fonte fóssil, predominando o gás natural nas alternativas de origem fóssil e o óleo diesel no caso dos biocombustíveis de insumos cultiváveis, como o etanol.

Para o transporte de matéria-prima, os maiores valores de consumo de energia total ocorrem para o AEHC e a gasolina C. O gás natural continua sendo o que apresenta processo menos dependente de energia, integralmente de origem hidrelétrica. Verifica-se que o transporte da cana-de-açúcar até a unidade de produção de AEHC, integralmente dependente do óleo diesel, consome o dobro de energia que o transporte de petróleo nacional e importado para produção de derivados na REDUC. Deste último, cerca de 6,6% são de origem hidrelétrica.



Nota: A escala vertical foi interrompida em 1.000 MJ/1.000pass.km para facilitar a visualização.  
 Legenda: ET – energia total; ER – energia renovável; MP – matéria-prima; FE – fonte de energia; SPCGC – sistema de propulsão convencional gasolina C; SPCFF – sistema de propulsão convencional *flexible-fuel*; SPCBC – sistema de propulsão convencional bicombustível.

Figura 7.12. Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC.

Também é possível verificar que o consumo de energia total para transporte de matéria-prima para a produção do AEHC é da mesma ordem que a para a distribuição da fonte de energia, embora este último processo considere deslocamento muito maior. No caso da matéria-prima, transporta-se cana-de-açúcar, donde apenas uma fração se transformará em AEHC, o que não ocorre na distribuição da fonte de energia, onde se transporta o próprio combustível.

Embora consumindo 3,7 vezes mais energia total que a para a produção de gasolina C e 46 vezes mais que para a purificação do gás natural, é no meso-estágio de produção da fonte de energia que o AEHC apresenta vantagem sobre os demais combustíveis, pois toda a energia consumida é de origem renovável. Uma fração de energia renovável menor (54%) ocorre para a gasolina C, da qual 99% graças a adição do AEAC. Como por hipótese a purificação do gás natural só consome gás natural, não se verifica o uso de energia renovável nesta alternativa.

O menor consumo de energia total na distribuição da fonte de energia ocorre para a gasolina C, cerca de 17% da energia necessária para a distribuição do AEHC e 16% do

gás natural.

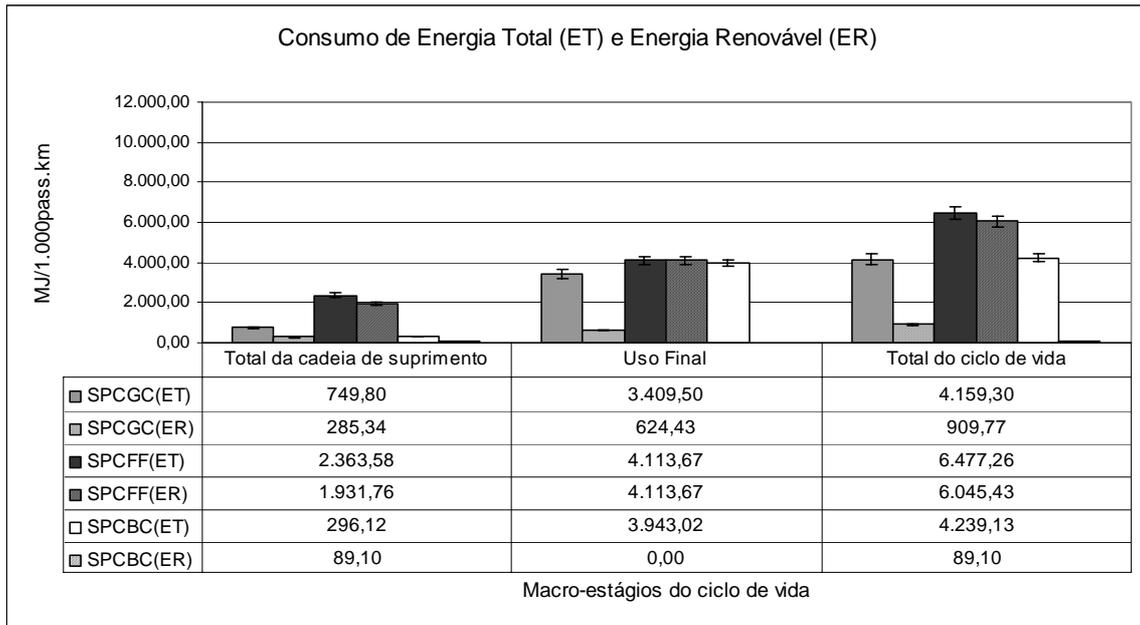
No caso do AEHC, como o processo de distribuição a partir da BADUC é idêntico ao da gasolina C, a diferença de consumo de energia (83%) está associada ao transporte entre a unidade de produção do AEHC e a base de distribuição, que pode ser otimizado por meio da escolha de modos de transporte de melhor eficiência energética (dutos, navios, trens) e/ou menores distâncias de transporte (origem do AEHC no norte do Estado do Rio de Janeiro).

Já para o gás natural, o maior consumo de energia está associado à compressão, cuja tecnologia existente já evoluiu bastante e dificilmente poderá ser otimizada. Destaca-se que, em função da indisponibilidade de dados, adotou-se o mesmo consumo energético da transferência de gás natural para a distribuição na malha urbana, o que representa uma simplificação que subestima o consumo energético.

Verifica-se que os meso-estágios de produção de matéria-prima e das fontes de energia são os que consomem maior proporção de energia em toda a cadeia de suprimento, com predomínio do segundo. Entre transporte de matéria-prima e distribuição das fontes de energia o segundo prevalece no caso do AEHC e do gás natural.

A Figura 7.13 apresenta o consumo de energia total e renovável em termos de macro-estágios, sendo possível a visão completa do ciclo de vida de cada alternativa. Quanto ao consumo de energia total, as alternativas SPCFF e SPCBC apresentam desempenho semelhante no processo de uso final, e as diferenças de valor são restritas aos intervalos de variação. Porém, a alternativa SPCGC leva vantagem de 20% sobre aquelas. Já para a parcela de energia renovável, observa-se dois extremos, onde a energia total consumida na alternativa SPCFF é renovável e o oposto ocorre para a alternativa SPCBC. No caso da alternativa SPCGC, 18,3% da energia total é renovável, graças a adição do AEAC.

Considerando o total do ciclo de vida, a alternativa com menor consumo de energia total é o SPCGC, 2% menor que a SPCBC. No outro extremo encontra-se o SPCFF, com maior consumo de energia total, cerca de 56% maior que para a SPCGC, porém, com 93% da energia oriunda de fonte renovável.



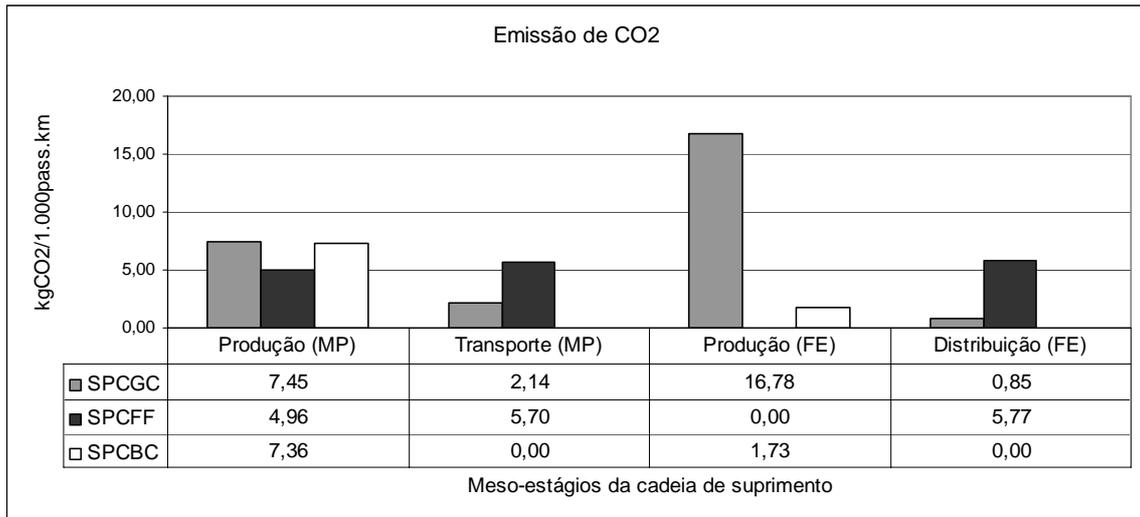
Nota: As barras indicam os intervalos de variação obtidos para cada alternativa

Legenda: ET – energia total; ER – energia renovável; MP – matéria-prima; FE – fonte de energia; SPCGC – sistema de propulsão convencional gasolina C; SPCFF – sistema de propulsão convencional *flexible-fuel*; SPCBC – sistema de propulsão convencional bicombustível.

Figura 7.13. Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC.

As emissões de CO<sub>2</sub> nos meso-estágios da cadeia de suprimento de cada alternativa acompanham as tendências do gráfico de consumo de energia total para o caso do SPCGC (gasolina C) e SPCBC (gás natural comprimido), como pode ser visto na Figura 7.14. Isso decorre da dependência de combustíveis fósseis como principais fontes de energia na sua cadeia de suprimento. Para o SPCFF esta tendência também se verifica com exceção para o meso-estágio de produção da fonte de energia.

No caso do AEHC (alternativa SPCFF) a emissão de CO<sub>2</sub> se distribui proporcionalmente nos processos de trato agrícola, transportes e distribuição. Isto se deve a grande dependência que estes processos têm quanto ao uso de óleo diesel. Porém, comparando-se com a alternativa que usa gasolina C, o total de emissões de CO<sub>2</sub> é cerca de 60%, ficando o gás natural com o menor valor, cerca de 33,4% da emissão observada para a gasolina C.

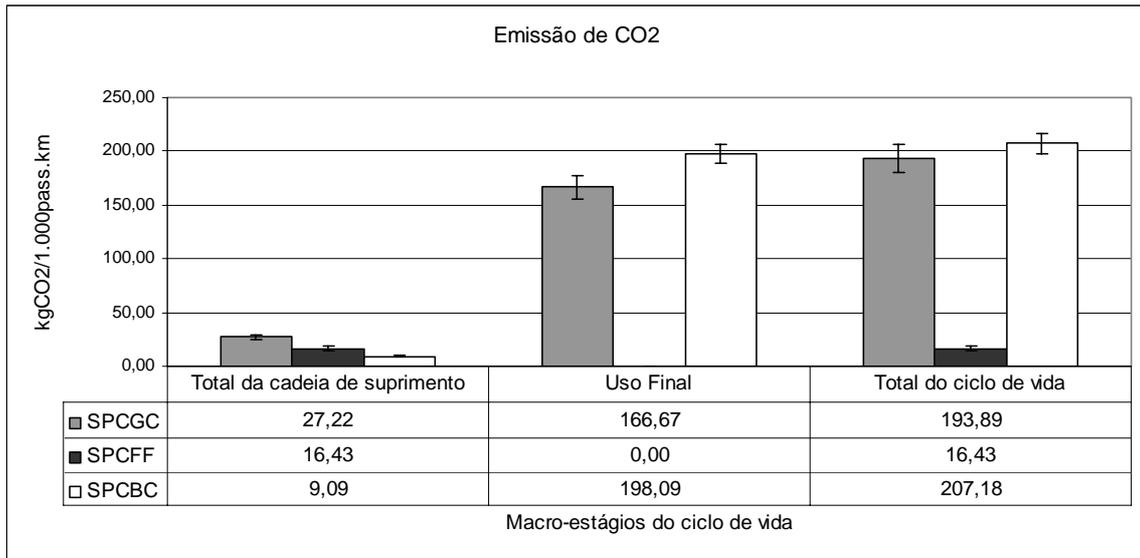


Legenda: MP – matéria-prima, FE – fonte de energia; SPCGC – sistema de propulsão convencional gasolina C; SPCFF – sistema de propulsão convencional *flexible-fuel*; SPCBC – sistema de propulsão convencional bicombustível.

Figura 7.14. Emissão de CO<sub>2</sub>, meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC.

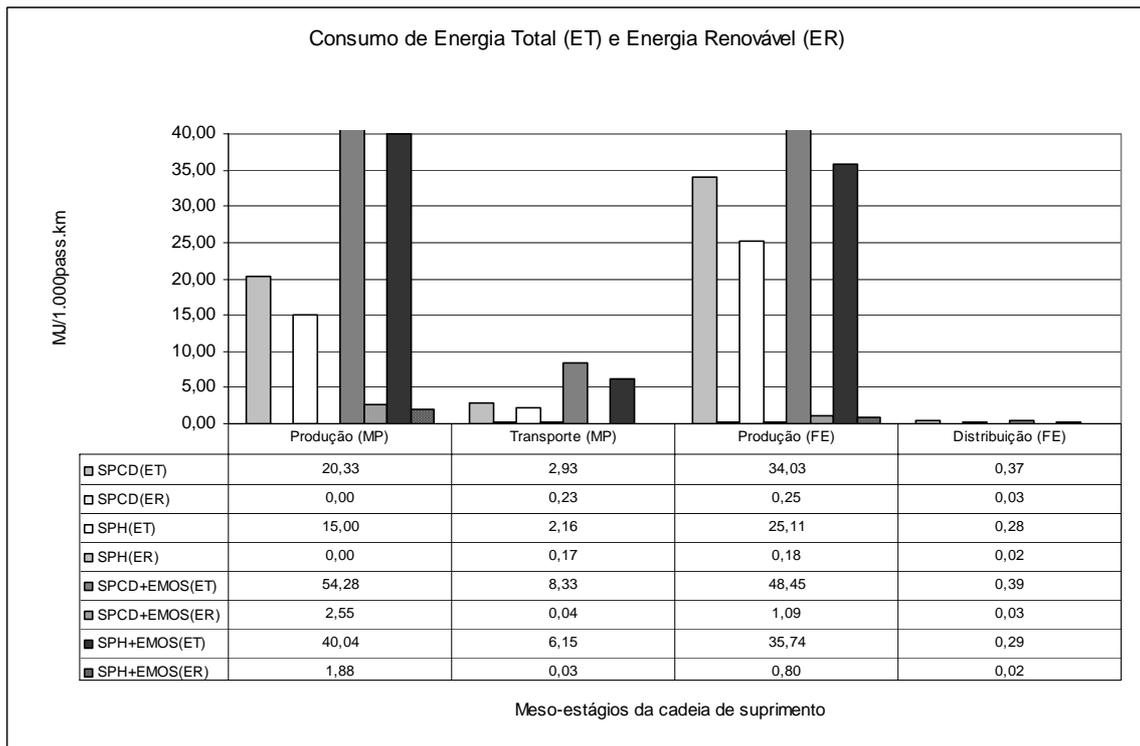
Considerando o ciclo de vida de cada alternativa, o uso de AEHC continua representando grande vantagem se comparado à gasolina C ou gás natural comprimido no que se refere às emissões de CO<sub>2</sub>, como pode ser visto na Figura 7.15. Na verdade, o gás natural é a alternativa com maior emissão de CO<sub>2</sub> no uso final, considerando-se que a gasolina C tem 25% de AEAC, cujas emissões de CO<sub>2</sub> são recapturadas no plantio da cana-de-açúcar. Mesmo a cadeia de suprimento da gasolina C apresentando a maior emissão de CO<sub>2</sub>, suas emissões totais são ainda 6% menores que para o gás natural. Esta diferença ainda se torna mais tênue se considerado o intervalo de variação.

As alternativas que utilizam óleo diesel e biodiesel (EMOS) também apresentam os maiores consumos de energia total nos meso-estágios de produção de matéria-prima e fonte de energia, como pode ser visto na Figura 7.16.



Legenda: SPCGC – sistema de propulsão convencional gasolina C; SPCFF – sistema de propulsão convencional *flexible-fuel*; SPCBC – sistema de propulsão convencional bicomcombustível.

Figura 7.15. Emissão de CO<sub>2</sub>, macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC.



Nota: A escala vertical foi interrompida em 40 MJ/1.000pass.km para facilitar a visualização.

Legenda: ET – energia total; ER – energia renovável; MP – matéria-prima; FE – fonte de energia; SPCD – sistema de propulsão convencional + óleo diesel; SPH – sistema de propulsão híbrido; EMOS – éster metílico de óleo de soja (biodiesel).

Figura 7.16. Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCD, SPH com uso de óleo diesel e biodiesel.

A diferença entre os sistema de propulsão convencional + óleo diesel (SPCD) e o sistema de propulsão híbrido (SPH), independente do combustível utilizado (óleo diesel ou biodiesel) e se relaciona à melhor eficiência do último, que implica em menores consumos no uso final.

Ao longo de toda a cadeia de suprimento verifica-se a o pouco uso de energia renovável, sendo o maior consumo associado à energia elétrica para a produção de do óleo de soja.

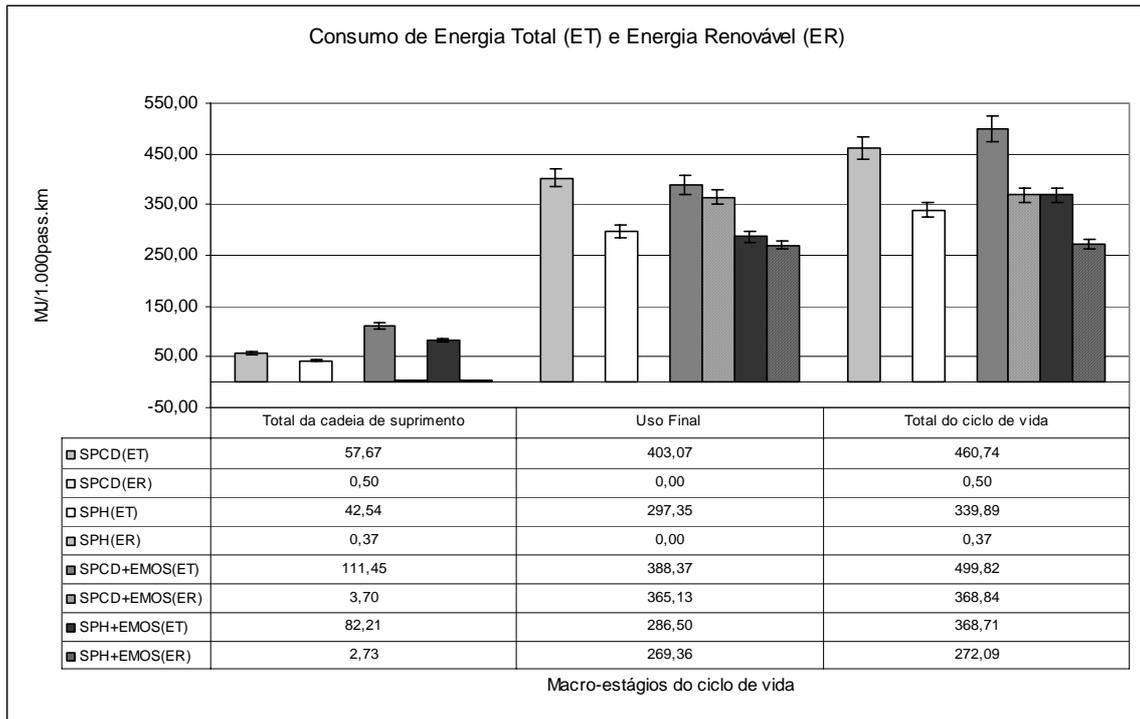
Os meso-estágios de produção de matéria-prima e da fonte de energia para as alternativas que usam biodiesel apresentam os maiores consumo de energia total, sendo 2,7 e 1,5 vezes maiores que para o óleo diesel, respectivamente.

O mesmo ocorre para o transporte de matéria-prima, que é aproximadamente 2,8 maior para o biodiesel que para o óleo diesel. No meso-estágio de distribuição da fonte de energia, não há diferença significativa, uma vez que por hipótese, os processos são os mesmos, independente do combustível utilizado.

Considerando o uso final e o ciclo de vida como um todo, verifica-se desvantagem para o biodiesel no que se refere ao consumo de energia total, 8,5% maior que para as alternativas que usam óleo diesel, porém, 74% da energia consumida é renovável, o que não ocorre com o óleo diesel, como pode ser visto na Figura 7.17.

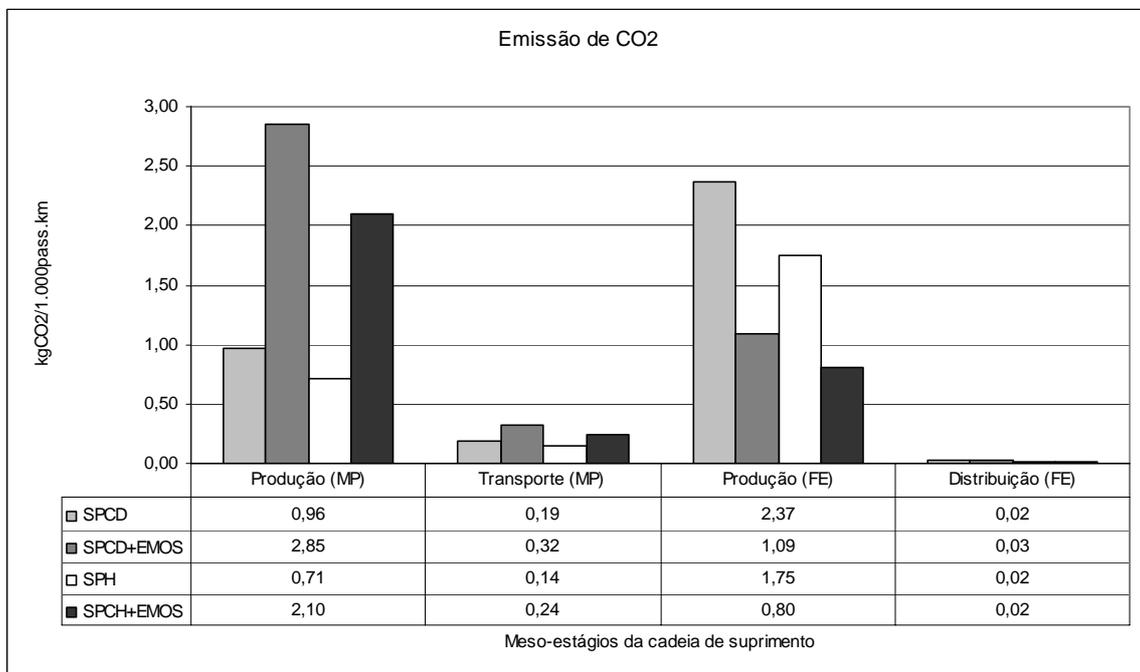
No caso das emissões de CO<sub>2</sub> (Figura 7.18), segue-se a tendência observada no consumo de energia total, tendo em vista a dependência de fontes fósseis, como o óleo diesel, o óleo combustível e o gás natural.

Verifica-se maior emissão de CO<sub>2</sub> na produção de óleo diesel que na produção de biodiesel, embora os consumos de energia total sejam semelhantes. Isso decorre de se considerar no biodiesel a energia embutida no metanol, sem que se considere a emissão de CO<sub>2</sub>.



Legenda: ET – energia total; ER – energia renovável; MP – matéria-prima; FE – fonte de energia; SPCD – sistema de propulsão convencional + óleo diesel; SPH – sistema de propulsão híbrido; EMOS – éster metílico de óleo de soja (biodiesel).

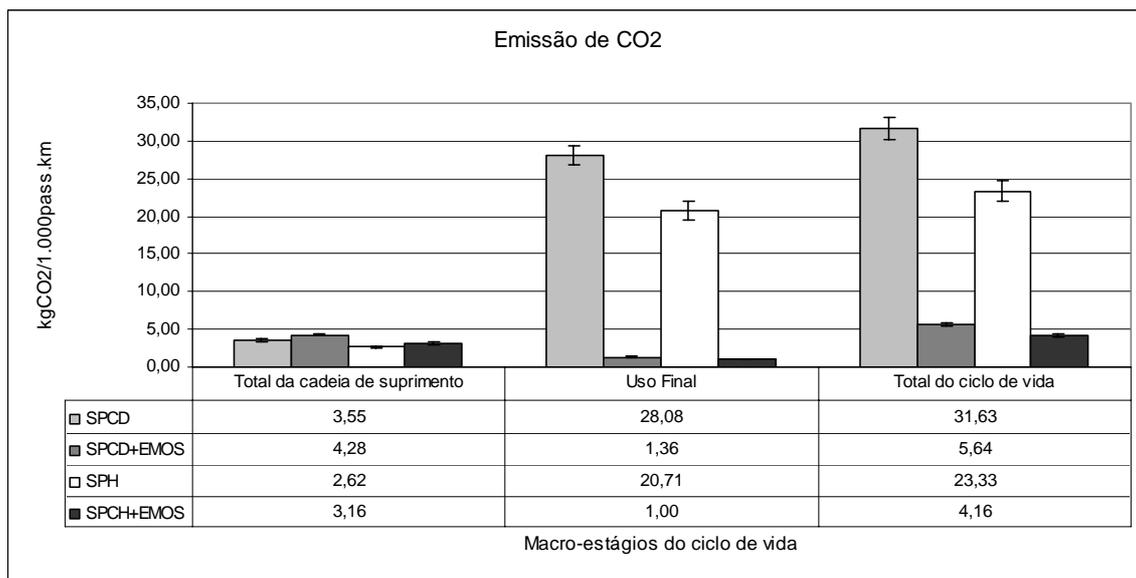
Figura 7.17. Consumo de energia total (ET) e energia renovável (ER), macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCD, SPH com uso de óleo diesel e biodiesel.



Legenda: MP – matéria-prima, FE – fonte de energia; SPCD – sistema de propulsão convencional + óleo diesel; SPH – sistema de propulsão híbrido; EMOS – éster metílico de óleo de soja (biodiesel)

Figura 7.18. Emissão de CO<sub>2</sub>, meso-estágios das cadeias de suprimento das alternativas SPCD, SPCH com uso de óleo diesel e biodiesel.

Se comparado ao óleo diesel, o biodiesel apresenta emissões de CO<sub>2</sub> um pouco maiores ao longo da cadeia de suprimento, principalmente em função do meso-estágio de produção de matéria-prima. Porém, a situação se modifica ao considerar o total do ciclo de vida (Figura 7.19), tendo em vista seu bom desempenho no processo de uso final, onde apenas a parte das emissões relacionadas ao metanol são contabilizadas. Assim sendo, as principais vantagens desta alternativa estão na possibilidade de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, o que se verifica realmente no uso final, de maneira diferente do que ocorria para o AEHC.



Legenda: SPCD – sistema de propulsão convencional + óleo diesel; SPH – sistema de propulsão híbrido; EMOS – éster metílico de óleo de soja (biodiesel)

Figura 7.19. Emissão de CO<sub>2</sub>, macro-estágios do ciclo de vida das alternativas SPCD, SPCH com uso de óleo diesel e biodiesel.

Embora a maior parte da análise comparativa já tenha sido realizada, é possível sintetizar o desempenho de cada uma das alternativas em poucas medidas de ecoeficiência, como apresentado nas Figuras 7.20 a 7.25. Considerando estritamente o conceito de ecoeficiência, representou-se as medidas na forma de resultado (pass.km) sobre recurso (energia total ou emissão de CO<sub>2</sub>). Nos caso da energia renovável, para obter uma medida coerente com a lógica de quanto maior melhor, adotou-se o valor do recurso como energia total menos energia renovável. Como referência considerou-se as alternativas SPCGC e SPCD.

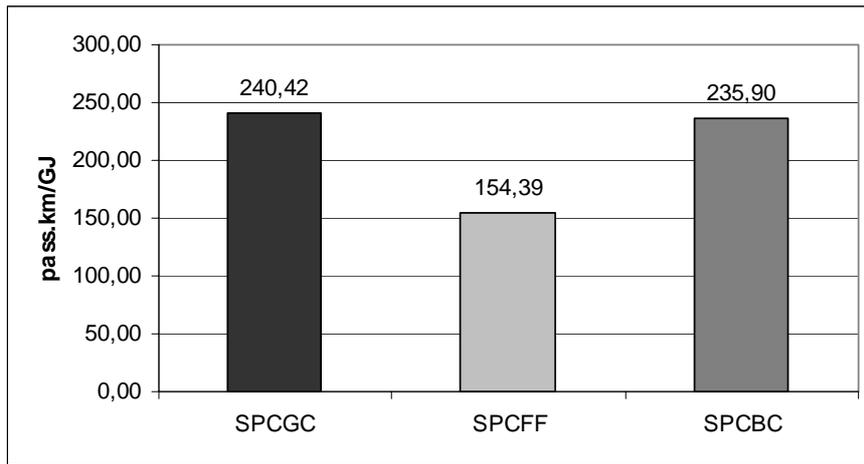


Figura 7.20. Eficiência energética, alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC.

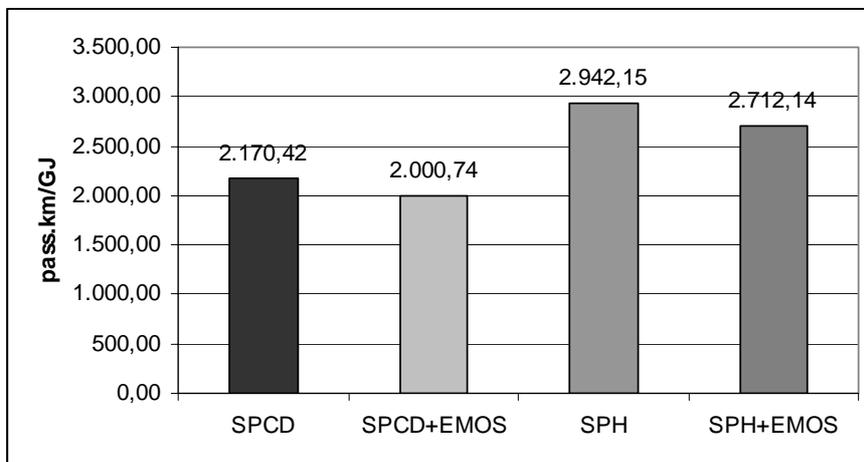


Figura 7.21. Eficiência energética, alternativas SPCD, SPH utilizando óleo diesel e EMOS.

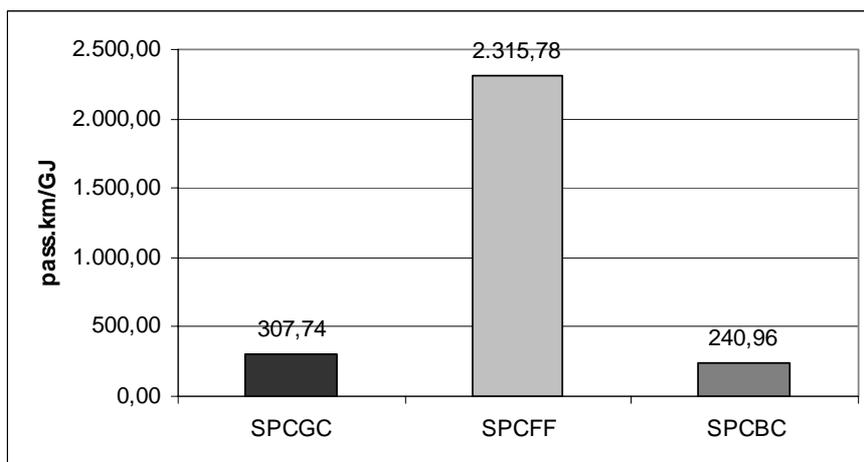


Figura 7.22. Eficiência de energia renovável, alternativas SPCGC, SPCFF e SPCBC

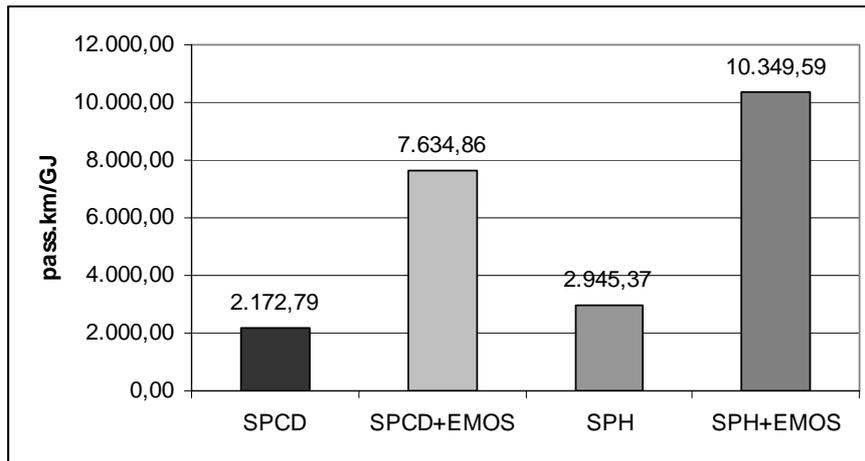


Figura 7.23. Eficiência de energia renovável, alternativas SPCD, SPH utilizando óleo diesel e EMOS.

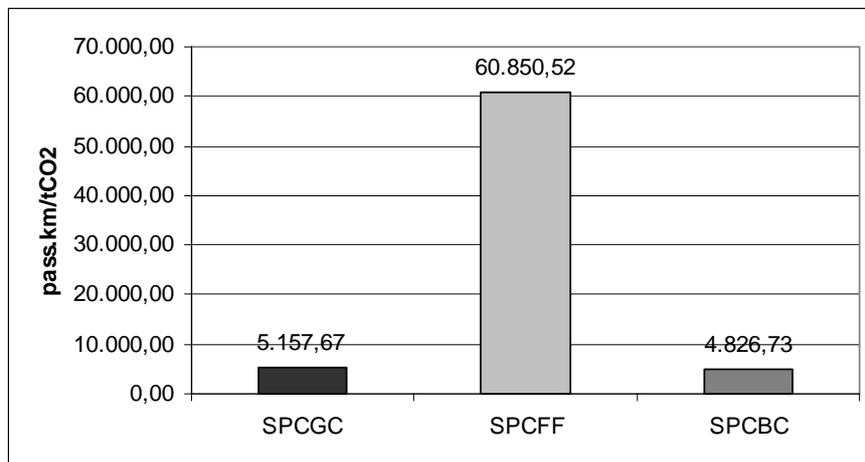


Figura 7.24. Eficiência na emissão de CO<sub>2</sub>, alternativas SPCGC, SPCFF, SPCBC.

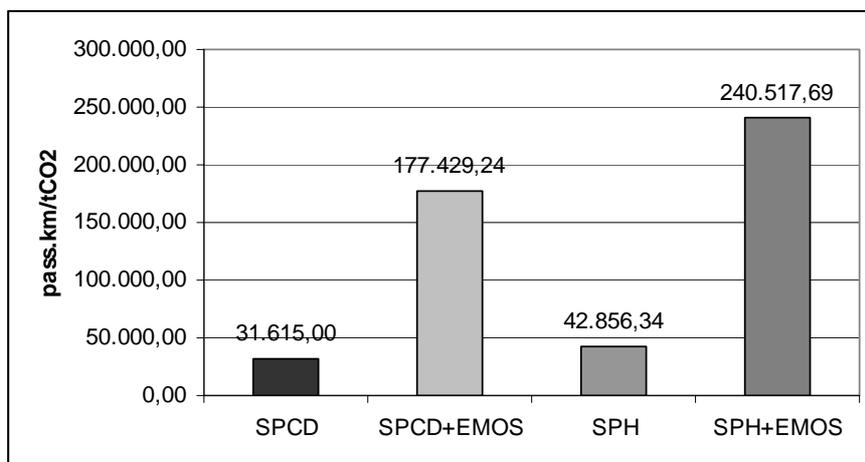


Figura 7.25. Eficiência na emissão de CO<sub>2</sub>, alternativas SPCD, SPH utilizando óleo diesel e EMOS

Considerando apenas a eficiência energética, verifica-se a preponderância da alternativa SPCGC sobre as demais alternativas que representam modos de transporte individual, porém, com vantagem (2%) irrelevante sobre a alternativa SPCBC. No caso dos modos coletivos, a melhor opção recai sobre o SPH + óleo diesel. Porém, avaliando o conjunto completo de indicadores, verifica-se o grande diferencial do uso de AEHC, na alternativa SPCFF, proporcionando desempenho de destaque nas medidas de eficiência de energia renovável e na emissão de CO<sub>2</sub>, onde apresenta valores muito superiores que as demais.

Ao considerar as três medidas para as alternativas que usam óleo diesel e biodiesel, o biodiesel passa a ser a melhor alternativa, considerando seu melhor desempenho no que se refere à eficiência de energia renovável e na emissão de CO<sub>2</sub>, porém, seu uso deve ocorrer com o sistema de propulsão híbrido, para que se privilegie a sua melhor eficiência no uso final.

Não existe uma alternativa que apresenta melhores valores para todas as medidas, devendo-se considerar que tipo de indicador se pretende privilegiar para a hierarquização. Considerando a cadeia de suprimento e uso final como um todo, os biocombustíveis apresentam melhor desempenho no que se refere à eficiência de energia renovável e de emissão de CO<sub>2</sub>, porém, isso não ocorre para a eficiência energética.

Por outro lado, as alternativas SPCGC e SPCBC apresentam eficiência energética muito semelhante, porém, a primeira leva ligeira vantagem também nas medidas de eficiência de energia renovável e emissão de CO<sub>2</sub>, em função de conter 25% de AEAC na sua composição.

## **CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **8.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Este capítulo encerra o trabalho, apresentando um conjunto de conclusões e recomendações sobre os principais produtos apresentados. As conclusões consideram aspectos de todos os capítulos, com ênfase no procedimento de análise comparativa das fontes de energia para o transporte rodoviário, sua abrangência e limitações e nos principais resultados da sua aplicação.

As recomendações seguem a mesma linha das conclusões e procuram expandir a aplicação do procedimento, dos modelos de ciclo de vida e da avaliação dos resultados da aplicação, apresentando o ilimitado alcance deste conjunto de conceitos e ferramentas para a análise e a avaliação das fontes de energia para os transportes.

### **8.2. CONCLUSÕES**

O uso de energia no transporte rodoviário envolve inúmeras abordagens e um estudo completo deveria considerar aspectos relacionados ao planejamento de transportes, às dimensões do uso de energia e ao consumo direto e indireto em todas as dimensões. Porém, este trabalho limita-se ao consumo direto de energia para o transporte rodoviário, considerando a eficiência no uso de energia ao longo da cadeia de suprimento e uso final.

No que se refere ao uso final, no Capítulo 2 apresentou-se um modelo simples que se baseia em identificar e igualar as componentes de oferta e demanda por energia, dada uma condição de operação. Isto permite identificar os fatores que influenciam no uso final de energia no transporte rodoviário e orienta como determinar a abrangência da aplicação na análise comparativa de fontes de energia para o transporte rodoviário, como foi feito no Capítulo 7.

Do lado da demanda por energia, além da distância a ser percorrida, função do planejamento de transportes, parâmetros construtivos dos veículos e condições de operação são os principais determinantes do uso final de energia. Assim sendo, escolhas entre alternativas de fontes de energia devem considerar os mesmos parâmetros (veículos similares com sistemas de propulsão equivalentes) e as mesmas condições de

operação.

Do lado da oferta de energia, a perfeita identificação da relação entre a energia estocada no veículo ( $E$ ) e a energia disponível nas rodas ( $E_{of}$ ), depende da fonte de energia (combustível, energia elétrica, energia mecânica) e do sistema de propulsão (convencional ou não convencional) e sua melhor compreensão passa pelo conceito de eficiência, como foi visto no Capítulo 4.

Quanto às fontes de energia para o transporte rodoviário, das 13 alternativas apresentadas no Capítulo 3 (Tabela 3.1), 4 já representam opções consolidadas no mercado brasileiro. São elas a gasolina, o óleo diesel, o etanol (álcool etílico hidratado combustível – AEHC) e o gás natural comprimido (GNC). Numa visão mundial, os dois primeiros são considerados como combustíveis convencionais e os dois últimos como combustíveis alternativos e substitutos naturais da gasolina.

Destaca-se que a gasolina brasileira já apresenta uma fração de etanol anidro (AEAC) de cerca de 25%, sendo comercialmente denominada de gasolina C. Esta mistura, pelas melhores capacidades antidetonantes, já pode ser considerada como um combustível alternativo ao uso de gasolina pura de boa qualidade, ou gasolina reformulada.

O uso do AEHC, embora atualmente em muito menor escala do que foi no passado, ainda representa uma iniciativa que destaca o Brasil como pioneiro no uso de combustíveis renováveis para o transporte rodoviário, colocando-o numa posição isolada na elaboração e implantação de grandes programas para uso deste tipo de combustível em substituição à gasolina.

Embora se buscasse inicialmente um substituto para o óleo diesel no gás natural comprimido, este se mostrou adequado ao uso como substituto para a gasolina e para o AEHC, em veículos leves. O uso do GNC tem apresentado um crescimento expressivo em toda a extensão do país coberta pela rede de gasodutos que distribuem o combustível.

Assim sendo, cabe ao biodiesel, o papel estratégico de substituir o óleo diesel, combustível convencional mais consumido no Brasil em função da intensa dependência do transporte rodoviário de carga e de passageiros. Em função das características deste combustível alternativo, acredita-se que esta substituição possa ser feita inicialmente de

forma parcial, em alguns nichos de mercado, utilizando-se mistura de biodiesel com óleo diesel (BX) e posteriormente o combustível puro (B100).

Considerando uma visão mais abrangente para o uso dos insumos energéticos, o conceito de ecoeficiência auxilia na introdução da variável ambiental na determinação da eficiência energética. Todas as formas de energia envolvidas em um processo podem ser consideradas como indicadores de ecoeficiência. Num processo de conversão de energia, quando a energia disponível representa um valor de produto ou serviço, a eficiência energética é uma medida representativa de ecoeficiência. Numa visão ampla, outras medidas de ecoeficiência podem ser criadas, como por exemplo: independência de fontes de energia esgotáveis, utilização de fontes de energia renováveis, reaproveitamento de energia do processo, dentre outras.

Uma das maneiras de aplicar os conceitos de ecoeficiência às cadeias de suprimento e uso final de fontes de energia para o transporte rodoviário é por meio do uso da ferramenta de análise de ciclo de vida (ACV), em particular suas duas primeiras fases: determinação do objetivo e escopo e análise do inventários, ao que se denomina de ICV (inventário de ciclo de vida). A identificação da unidade funcional de um sistema de produto leva a possibilidade de se especificar um indicador de valor do produto, enquanto os fluxos elementares podem ser considerados como indicadores de impacto ambiental da geração e do uso do produto, caso estejam associados à cadeia de suprimento ou ao processo de uso final.

Com isso, é possível propor um procedimento que orienta a aplicação do ICV para a análise comparativa de alternativas de fonte de energia para o transporte rodoviário, considerando medidas de ecoeficiência oriundas da composição da unidade funcional com o resultado do inventário de dados para fluxos selecionados que representam os indicadores de impacto ambiental do sistema de produto.

Este procedimento divide-se em três fases, duas das quais semelhantes ao ICV e uma terceira fase que tem a finalidade de apresentar a análise comparativa das alternativas. Isto pode ser feito por meio da exposição dos resultados obtidos para os indicadores de impacto ambiental com base numa unidade funcional definida ou por meio da apresentação de medidas de ecoeficiência.

A aplicação do procedimento pressupõe que as alternativas de fonte de energia podem

ser identificadas previamente, sendo divididas em cadeia de suprimento e processo de uso final. Adicionalmente, é necessário que se limite a abrangência, considerando aspectos relativos a largura e profundidade do estudo, tendo em vista que o comprimento deve ser sempre da extração da matéria-prima até o uso final.

Uma das contribuições do procedimento para a análise comparativa de fontes de energia para o transporte rodoviário está em considerar um modelo de ciclo de vida padronizado, como foi visto no Capítulo 6. A possibilidade de três níveis de detalhamento do ciclo de vida (macro-estágios, meso-estágios e micro-estágios) permite que se proponha refinamentos sucessivos ao modelo, enquanto que o estabelecimento de um nível mínimo para detalhamento (meso-estágios) pretende tornar o tratamento das alternativas equitativo.

Com a apresentação, no Capítulo 6, dos modelos de ciclo de vida para as fontes de energia convencionais (gasolina e óleo diesel oriundos do petróleo), o gás natural e os biocombustíveis oriundos de insumos cultiváveis, fruto da síntese da pesquisa realizada ao longo de todo o trabalho, procura-se estabelecer algum padrão para a distribuição dos processos entre os meso-estágios, o que não se verifica nos trabalhos consultados.

No que se refere a profundidade da análise, envolvendo quais indicadores de impacto ambiental serão considerados e qual o nível de profundidade que se pretende desenvolver uma aplicação em particular, não se verifica nenhum tipo de limitação no procedimento ou nos modelos de ciclo de vida, que neste caso também comportam refinamentos sucessivos.

Verifica-se com isso que o procedimento de análise comparativa de fontes de energia para o transporte rodoviário atende aos aspectos relacionados no Capítulo 1, quanto a sua estrutura modular, possibilidade de aprimoramentos sucessivos e inclusão de níveis de abrangência. Por outro lado, o processo de avaliação da qualidade dos dados e o uso de valores distribuídos em torno de uma média, permitem que se disponha de uma ferramenta simples que considere a variação dos dados.

Embora não se tenha considerado o processo de gestão de resíduos na aplicação apresentada, sua existência permite que se destaque a possibilidade que os biocombustíveis têm de reciclar naturalmente o dióxido de carbono, oriundo da combustão.

No que se refere à aplicação do procedimento, apresentada no Capítulo 7, considera-se que as conclusões pertinentes aos resultados já foram consideradas, sendo uma contribuição para o entendimento da cadeia de suprimento e uso final das fontes de energia para o transporte rodoviário com aplicação específica para o caso do Município do Rio de Janeiro, porém, apresentando um inventário de dados característicos da realidade brasileira que representa um resultado inédito, até onde se tem conhecimento.

Quanto a aplicação para a alternativa de uso do biodiesel (EMOS), considera-se também uma contribuição inédita, em função de considerar aspectos da realidade brasileira, ressaltando-se as limitações de se tratar de um alternativa que ainda não foi implantada. Neste sentido, destaca-se a possibilidade de aplicação do procedimento como ferramenta de planejamento.

Como atendimento aos objetivos gerais do trabalho, verifica-se que o procedimento de análise comparativa é capaz de destacar peculiaridades de cada alternativa, como por exemplo a dependência de energia não renovável ou o uso de energia renovável. Além disso, é possível identificar como o consumo de energia se distribui por meso-estágio e seu peso comparativo com o valor total da cadeia ou com meso-estágios de outras alternativas.

A comparação dos dados utilizados e dos resultados obtidos com dados e resultados encontrados na literatura internacional ratificam a diferença dos valores e destaca a necessidade de se investir em ferramentas de análise específicas para a realidade brasileira. Isto se aplica principalmente ao caso dos biococombustíveis.

O procedimento de análise comparativa das fontes de energia para o transporte rodoviário e os modelos propostos para seu ciclo de vida são instrumentos que permitem reavaliações progressivas a medida que se disponha de dados e informações adicionais ou de outras alternativas a serem analisadas.

Um dos méritos do procedimento é aplicar a ACV de forma didática e equitativa, porém, de forma parcial, pois utiliza o ICV, sendo necessário que se introduza futuramente a fase de avaliação de impactos. Ainda como limitações, o procedimento não se aplica com flexibilidade para hipóteses que contemplem variação no tempo e diferentes tecnologias.

Finalmente, com a finalidade de preencher parcialmente a lacuna que se verificou existir ao longo da pesquisa, procurou-se disponibilizar neste trabalho dados e informações que representam a realidade brasileira para a composição de um banco de dados sobre fontes de energia para o transporte rodoviário. Acredita-se que a disponibilização deste material, que também representa uma contribuição para a pesquisa brasileira, será de bastante utilidade para futuros trabalhos que necessitem realizar inventários de dados.

### **8.3.RECOMENDAÇÕES**

Esta tese foi apenas um pequeno passo na direção de um melhor entendimento sobre o ciclo de vida das fontes de energia para os transportes rodoviários. Muito trabalho ainda pode ser desenvolvido e recomenda-se algumas linhas de ação para sua continuidade.

- ◆ Introdução do processo de gestão dos resíduos no meso-estágio de uso final, considerado como uma das limitações deste trabalho;
- ◆ Aplicação do procedimento para outras regiões do Brasil, em particular para a região Centro-Sul, onde existem as maiores demandas de energia para os transportes;
- ◆ Aplicação do procedimento para outras alternativas de fontes de energia para o transporte, em particular que tratem da produção de biodiesel a partir de outros insumos;
- ◆ Aplicação do procedimento considerando valores médios nacionais de modo que se possa comparar com os resultados obtidos para as aplicações específicas, verificando-se qual a incerteza em adotar valores médios no lugar de valores específicos;
- ◆ Aprimoramento da profundidade do ICV, considerando outros indicadores de impacto ambiental, como poluentes atmosféricos locais, resíduos sólidos, consumo de água etc;
- ◆ Refinamento dos processos e inclusão de outras alternativas de transporte e produção;
- ◆ Ampliação do banco de dados e automação dos cálculos por meio de desenvolvimento de *software* específico, capaz de retratar adequadamente a realidade brasileira;

- ◆ Desenvolvimento de outras ferramentas que auxiliem na aquisição e tratamento dos dados, como sistemas de informação geográfico e sistemas de simulação.

Um esforço grande dos envolvidos neste trabalho está voltado para a sua continuidade, por meio do fomento de pesquisas e possam preencher as lacunas que foram identificadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ABDETRAN, 2000, *Frota Nacional*, In: [www.abdetran.org.br](http://www.abdetran.org.br), Associação Brasileira dos DETRANS, acesso em 17/05/2002.
- ABIOVE, 2004, *Dados estatísticos*. In: [www.abiove.com.br](http://www.abiove.com.br), Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, acesso em 12/05/2004.
- 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.
- ANEEL/ANP, 1999, *Eficiência Energética, Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios*, 1ª ed, Rio de Janeiro, Agência Nacional de Energia Elétrica, Agência Nacional do Petróleo.
- ANFAVEA, 2004, *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2004*, São Paulo, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores.
- ANP, 2000, *Anuário Estatístico da Indústria Brasileira do Petróleo 1990-1999*, Rio de Janeiro, Agência Nacional do Petróleo.
- ANP, 2002, *Vendas de combustíveis por região 1999-2002*, In: [http://www.anp.gov.br/petro/desenvolvimento\\_dados.asp](http://www.anp.gov.br/petro/desenvolvimento_dados.asp), Agência Nacional do Petróleo, acesso em 15/09/2003.
- 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
- ANTP, 2000, *Anuário ANTP dos Transportes Urbanos*, São Paulo, Associação Nacional dos Transportes Públicos.
- ARMSTRONG, A. P. e AKHURST, M. A., 2000, *Alternative Fuels: Well-to-Wheels Energy Use & CO<sub>2</sub> Comparisons*, London, BP Amoco.
- ARMSTRONG, J. D. e WILBRAHAM, K., 1995, “Fuels – Their properties and respective International Standards”, *Seminar on Environmentally Friendly Petroleum Fuels* (Nov. 18-19, 1995). Directorate General of Oil, Ministry of Petroleum and Natural Resources, Islamabad, Pakistan – refered in Faiz, A. et al (1996)
- ASIMOV, I, 1993, *Cronologia das Ciências e das Descobertas*, 1ª ed, Rio de Janeiro, Editora Civilização Brasileira.
- AUDUS, H., 1996, “IEA Greenhouse Gas R&D Programme: Full Fuel Cycle Studies”, *Energy Conversion and Management*, vol 37, pp. 6-8.
- BASTOS, M. G. A., 2004, “Logística de abastecimento e distribuição de combustíveis”. *Comunicação pessoal*. Supervisor de Planejamento de Suprimentos, Esso Brasileira de Petróleo Limitada, Rio de Janeiro.
- 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., 2001, “Comparison of Transport Fuels: Life Cycle Emissions Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles”. *Final Report EV45A/2/F3C*, Australian Greenhouse Office.

- BENTLEY, R. W., 2002, "Global oil & gas depletion: an overview", *Energy Policy* 30, pp. 189 – 205.
- BISOTTO, V e FARIAS, A. D., 2002, *Algumas considerações sobre a cultura da soja. FecoAgro/RS*, In: [www.fecoagro.org.br](http://www.fecoagro.org.br), acesso em 23/09/2004.
- 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.
- BNDES, 2003, *Ampliação da produção de etanol e co-geração de energia elétrica. Documento base para discussão*. Brasília, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.
- BOCKEY, D., 2004a, *Biodiesel production and marketing in Germany. The situation and perspective*. In: [www.ufop.de](http://www.ufop.de), UFOP, Berlim, acesso em 16/05/2004.
- BOCKEY, D., 2004b, *The biodiesel market is growing – but the challenges too!* In: [www.ufop.de](http://www.ufop.de), UFOP, Berlim, acesso em 16/05/2004.
- BODDEY, R. M., 1993, "Green energy from sugarcane", *Chemistry and Industry* 17, pp. 355 – 358.
- BOLDO, C., WAHNFRIED, C. e MASSAGARDI, M. A., 2001, *A experiência europeia 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*, Fórum de debates sobre qualidade e uso de combustíveis, Rio de Janeiro, AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva.
- BOUNSTED, I e HANCOCK, G. F., 1979, *Handbook of Industrial Energy Analysis*, 2<sup>a</sup> ed, New York, John Wiley & Sons.
- BREHENY, M., 1995, "The compact city and transport energy consumption", *Trans Inst Georg*, no 20, pp. 81-101.
- BRIER, M., 1997, "Gol 1.6, agora mais econômico". *Revista 4 Rodas*, maio 1997, Editora Abril Cultural, São Paulo, pp. 50,.
- BRIER, M., 1998, "Corsa é o melhor com motor 1.6", *Revista 4 Rodas*, maio 1998, Editora Abril Cultural, São Paulo, pp. 65.
- CEBDS, 2001, "O transporte do futuro", *Desenvolvimento Sustentável*, ano III, n<sup>o</sup> 13, maio/junho/julho/2001, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, pp. 4 –5.
- CELESTINO, H., 2001, "Transportes", *Caderno Retratos do Rio*. O Globo, 5 de maio de 2001, pp. 1–8.
- CHEHEBE, J. R. B., 1998, *Análise do Ciclo de Vida de Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000*. 1<sup>a</sup> ed, Rio de Janeiro, Qualitymark Editora.
- CINTRA, P., 2004, "Estimativa do peso de um dispositivo de adaptação para uso de GNC em veículo VW Gol 1.6", *Comunicação pessoal*, Gerente Técnico, BRC Importação e Exportação Ltda, Rio de Janeiro.
- CLAUSET, C., 1999, "Gol 1.6 de cara nova". *Revista 4 Rodas*, maio 1999, Editora Abril, Cultural, São Paulo, pp. 40.
- CNE, 1989, *Plano Nacional de Gás Natural - Relatório Final*, Rio de Janeiro, Comissão Nacional de Energia.
- 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.

- CORTEZ, L. A. B.; BAJAY, S. W.; BRAUNBECK, O., 2002, *Uso de resíduos agrícolas para fins energéticos: o caso da palha de cana-de-açúcar*, In: [www.cenbio.org.br/index\\_documentos.html](http://www.cenbio.org.br/index_documentos.html), acesso em 29/10/2002.
- COSTA, J. A., 1996, *Cultura da soja*, 1ª ed, Porto Alegre, Ivo Manica e José Antônio Costa Editores.
- 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., 1999, “A Methodology for the Life Cycle and Sustainability Analysis of Manufacturing Processes”, *Journal of Cleaner Production*, vol 7, pp. 435-445.
- D’AGOSTO, M. A e BALASSIANO, R., 2001, “Conservação de energia em sistemas de transportes: uma estrutura de procedimentos”, In: *Anais do XV ANPET, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, São Carlos.
- D’AGOSTO, M. A. e RIBEIRO, S. K., 2004, “Performance evaluation of hybrid-drive buses and potencial fuel savings in Brazilian urban transit” *Transportation 31*, pp. 479 – 496.
- DAVIS, S. C., 2001, *Transportation Energy Data Book*, ed. 21, Center of Transportation Analysis, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- 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.
- DENATRAN, 2001, *Anuário Estatístico de Acidentes de Trânsito 2001*, In: [www.denatran.gov.br](http://www.denatran.gov.br), acesso em 23/07/2002.
- 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.
- DIEHL, S. R. L. e JUNQUETTI, M. T. G., 2002, *Soja*. In: [www.ufrgs.br/icta/agronom/soja.htm](http://www.ufrgs.br/icta/agronom/soja.htm), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, acesso em 23/09/2004.
- 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](http://www.ott.doe.gov), Office of Transportation Technology, U.S. Department of Energy, acesso em 12/09/2003.
- DORSA, R., 2000, *Tecnologia de Processamento de Óleos e Gorduras Vegetais e Derivados*, 3ª Ed, Rio de Janeiro, Editora Interciência..
- DUCASSÉ, P., 1961, *História das Técnicas*. 2ª ed, Lisboa, Publicações Europa-América.
- EBB, 2004, *Biodiesel News*, In: [www.ebb-eu.org/stats.php](http://www.ebb-eu.org/stats.php), European Biodiesel Board, acesso em 15/06/2004.
- 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.
- FERREIRA, A. B. de H., 1999, *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*, 2ª ed., 41ª Impressão, Rio de Janeiro, Editora Nova Fronteira S.A.
- FERRÉS, J. D., 2001, “Biodiesel: Produção e custos no Brasil”, In: *Anais do Seminário Biodiesel*. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo.

- FURUHOLT, E., 1995, "Life Cycle Assessment of Gasoline and Diesel", *Ressources, Conservation and Recycling*, n<sup>o</sup>. 14, pp. 251 – 263.
- GABEL, H. K. e ROLLER, L. H., 1992, "Trade liberalisation, transportation, and the environment", *The Energy Journal*, 13, n<sup>o</sup> 3, p. 1234-1245.
- 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.
- GAKENHEIMER, R., 1999, "Urban mobility in the developing world", *Transportation Research Part A*, 33, pp. 671 – 689.
- GARCIA, R., 2002, *Combustíveis e Combustão Industrial*, 1<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda.
- GARDINER, R., 1992, *Conway's History of the Shipping. The Ships Revolution and the Modern Mercant Ship*, 3<sup>rd</sup> ed., pp. 63 – 83, London, Conway Maritime Press Ltd.
- GÁSENERGIA, 2003, *Banco de mapas*, In: [www.gasenergia.com.br](http://www.gasenergia.com.br), acesso em 25/03/2003.
- GASNET, 2003, *Mapa do GNV no Brasil*, In: [www.gasnet.com.br](http://www.gasnet.com.br), acesso em 25/03/2003.
- GASNET, 2004, *Relação dos postos de revenda de GNV no Município do Rio de Janeiro*, In: [www.gasnet.com.br](http://www.gasnet.com.br), acesso em 23/08/2004.
- 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, n<sup>o</sup> 513, Editora Abril Cultural, São Paulo, pp. 36-41.
- GILBARCO, 2004, *Linha de produtos Gilbarco*, In: [www.gilbarco.com.br](http://www.gilbarco.com.br), acesso em 28/09/2004.
- GILLESPIE, T. D., 1992, *Fundamentals of Vehicles Dynamics*, 3<sup>a</sup> ed, Warrendale, Society of Automotive Engineers.
- 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.
- GOMES, R., 2004, "Dados da frota da empresa Veloz Transrio que operação no Aeroporto Santos Dumont no período de outubro de 2003 a maio de 2004", *Comunicação pessoal*, gerente da empresa Veloz Transrio Ltda, Rio de Janeiro, RJ.
- HACKNEY, J. e NEUFVILLE, R., 2001, "Life cycle of alternative fuel vehicles: emissions, energy and cost trade-offs", *Transportation Research Part A* 35, pp. 243-266.
- HANSSSEN, 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.
- HESKETT, J., 1998, *Desenho Industrial*, 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro, José Olympio Editora.
- HILLMAN, M., 1994, "Curbing car use – the dangers of exaggerating the future role of public transport", *Transportation Planning Systems*, vol. 2, n<sup>o</sup> 4, pp.21-30.
- HIMANEM, V., 1993, "Possible transport policies for urban areas during the 1990's", *Transportation Planning and Technology*, vol. 17, pp. 331-339.
- HUGHES, P., 1994, "Planning for reduced carbon dioxide emissions from transport sources", *Transportation Planning Systems*, vol. 2, n<sup>o</sup> 1, pp.29-40.
- 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*, In: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br), acesso em 02/05/2003.
- IEA, 1999, *Automotive Fuels for the Future - The Search for Alternative*. International Energy Agency, Office of Energy Efficiency Technology and R&D, Paris.
- IEA, 2002, *Key World Energy Statistics from the IEA*, In: [www.iea.org](http://www.iea.org), International Energy Agency, acesso em 23/08/2003.
- INFOENER, 2001, *Sistemas de informações energéticas*, In: [www.infoener.iee.usp.br](http://www.infoener.iee.usp.br), acesso em 09/03/2003.
- INTECNIAL, 2003, *Biodiesel – processo de fluxo contínuo*, Intecnial, Erechim.
- ISO 14.041, 1998, *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Inventory Analysis*, International Organization for Standardization.
- 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., 2002, “Environmental Benefits on a Life Cycle Basis of Using Bagasse-derived Ethanol as a Gasoline Oxygenate in India”, *Energy Policy*, nº. 30, pp. 371 - 384.
- KENWORTHY, J. R. e LAUBE, F. B., 1999, “Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implication for urban policy”, *Transportation Research Part A*, 33, pp. 691 – 723
- KHAN, F. I.; NATRAJAN B. R. e REVATHI, P., 2001, “GreenPro: A New Methodology for Cleaner and Greener Process Design”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, nº. 14, pp. 307-328.
- KHAN, F. I.; SADIQ, R. e HUSAIN, T., 2002, “GreenPro-I: A Risk-based Life Cycle Assessment and Decision Making Methodology for Process Plant Design”, *Environmental Modelling & Software*, nº. 17, pp. 669-692.
- KING, L. E., 1994, “Statistical Analyses”, *Manual of Transportation Engineering Studies - Appendix C*, Prentice Hall Inc, pp. 392-412.
- KÖRBITZ, W., 2000, “New Markets for biodiesel in modern Common Rail diesel engines”, In: *ALTENER – Seminar*, University for Technology in Graz, Graz.
- KREITH, F. *et al.*, 2002, “Legislative and Technical Perspective for Advanced Ground Transportation Systems”, *Transportation Quarterly*, 56, nº 1, Winter 2002, p. 51 – 73.
- 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.
- LURGI, 2003, *Biodiesel from renewable resources*, Lurgi Life Science GmGH, Chemnitz.
- MA, 2004, *Levantamento sistemático da produção agrícola. LSPA – 12/2004*, In: [www.agricultura.gov.br](http://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., 2002, “Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos vinte anos”, In: *Academia Brasileira de Ciências*, Unicamp, 18 a 20 de fevereiro de 2002, Campinas.
- MACEDO, I. de C., 1999, “Greenhouse gas emissions and bio-ethanol production/utilization in Brazil”, *Internal Report, CTC – 05/97*, Piracicaba, Centro de Tecnologia Copersucar.
- 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.
- MARQUES, P. S. V., 2003, “Tabela de consumo de energia nas bases da CBPI”, *Comunicação por e-mail*, engenheiro, Companhia Brasileira de Petróleo Ipiranga, Seção de Bases e Terminais, Rio de Janeiro.
- MARTINEZ, M. L., 1999, *A Indústria do Petróleo – Transporte*. Panorama Setorial. Gazeta Mercantil, São Paulo.
- MARTINS, P. G. e LAUGENI, F. P., 1999, *Administração da Produção*, 2<sup>a</sup> ed, São Paulo, Editora Saraiva.
- MAURICE, B.; FRISCHKNECHT, R.; COELHOSCHWIRTZ, V. e HUNGERBÜHLER, K., 2000, “Uncertainty Analysis in the Life Cycle Inventory. Application to the Production of Electricity with French Coal Power Plants”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 8, pp. 95-108.
- MCT, 2002, *Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Relatório de referência. Emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem top-down*, Brasília, DF, Ministério da Ciência e Tecnologia.
- MEDEIROS, A., 2003, *Refino no Brasil*, Cadernos Petrobras, agosto/2003, n<sup>o</sup> 3, Unidade de Comunicação Institucional da Petrobras, Rio de Janeiro, pp. 30 – 33.
- MELLOR, W.; WRIGHT, E.; CLIFT, R.; AZAPAGIC, A. e STEVENS, G., 2002, “A Mathematical Model and Decision-support Framework for Material Recovery, Recycling and Cascaded Use”, *Chemical Engineering Science*, vol. 57, pp. 4697-4713.
- MENEZES, H. L., 2004, “Procedimentos de operação no Núcleo de Caxias (CBPI)”, *Comunicação pessoal*, Chefe do Núcleo Caxias, Companhia Brasileira de Petróleo Ipiranga, Base de Distribuição, Duque de Caxias.
- MENKE, D. M.; Davis, G. A. e Vigon, B. W., 1996, “Evaluation of Life Cycle Assessment Tools”, *Relatório Final*, Center for Clean Products and Clean Technologies, The University of Tennessee, Tennessee.
- MINETTO, T., 2002, *Custo de produção da lavoura de soja no Rio Grande do Sul*, In: FecoAgro/RS, [www.fecoagro.org.br](http://www.fecoagro.org.br), junho de 2002, acesso em 23/09/2004.
- MME, 2002, *Balanco Energético Nacional 2002*, In: Departamento Nacional de Política Energética, Coordenação Geral de Informações Energéticas, [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br), Ministério das Minas e Energia, Brasília, DF, acesso em 12/11/2003.
- 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](http://www.mct.gov.br/clima/ingles/comunic_old/alcool.htm), acesso em 21/03/2003.
- MORLOK, E. K., 1978, *Introduction to Transportation Engineering and Planning*, 2<sup>nd</sup> ed, New York, Mc Graw Hill Inc.
- 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., 1987, *Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana de açúcar*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Campinas.
- NOGUEIRA, L. A.H e LORA. E. E. S., 2001, *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- NTU, 2000, *Anuário 1999/2000*, Confederação Nacional dos Transportes Urbanos - NTU, Brasília, DF.
- OBERT, E. F., 1971, *Motores de Combustão Interna*, 4<sup>a</sup> ed., Porto Alegre, Editora Globo.
- OECD/IEA, 1993, *Cars and Climate Change*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Head of Publication Service, Paris.
- OEDC, 1997, "Eco-Efficiency in Transport", In: *Workshop Report and Background Paper*, Group on Pollution Prevention and Control, Task Force on Transport, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- 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*, 1<sup>a</sup> ed., Fortaleza, Tecbio..
- PATZEK, T. W., 2003, "Ethanol from corn: just how unsustainable it is?", In: *U. C. Berkeley, Spring 2003, Freshman Seminar CE24*, Civil and Environmental Engineering, U. C. Berkeley, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- PETROBRAS, 2000, *O petróleo e a Petrobras em perguntas e respostas*, Petrobras, Serviço de Comunicação Institucional, Rio de Janeiro.
- PETROBRAS/GEGÁS, 1998, *Gás Natural, O Combustível do Século XXI*, Petróleo Brasileiro AS, Gerência de Gás Natural, Rio de Janeiro , RJ
- 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*, 2<sup>a</sup> ed, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- POULTON M. L., 1994a, *Alternative Fuels for Road Vehicles*, Computational Mechanics Publications, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton.
- POULTON, M. L., 1994b, *Alternative Engines for Road Vehicles*, Computational Mechanics Publications, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton.
- POULTON, M. L., 1997, *Fuel Efficient Car Technology*, Computational Mechanics Publications, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton.
- QUATRO RODAS, 2000, *Guia Quatro Rodas Ruas Rio de Janeiro 2000*, Editora Abril, São Paulo.
- REN, Y *et al.*, 2002, "Economic, environmental and energy life cycle assessment of natural gas based automotive fuels in Chogqing China", In: *International Symposium on Alcohol Fuels, Phuket, Thailandia*.
- 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.
- RIBEIRO, S. K. *et al.*, 2001b, *Transporte Sustentável: alternativas para ônibus urbanos*, Rio de Janeiro, Centro Clima, COPPE/UFRJ.
- 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, E. A. C., 2002, *Anuário do Transporte de Carga 2002*, São Paulo, OTM Editora Ltda.
- RIBEIRO, E. A. C., 2003, *Anuário do Transporte de Carga 2003*, São Paulo, OTM Editora Ltda.
- RIBEIRO, E. A. C., 2004, *Anuário do Transporte de Carga 2004*, São Paulo, OTM Editora Ltda.
- RIBEIRO, S. K., SANTOS, S. P. S, BALASSIANO, R., ALMEIDA, A. F. S., D'AGOSTO, M. A., 2004, "O uso de biodiesel no Brasil. Efeitos na atividade de distribuição de combustíveis", *Proposta COPPETEC PET 5700*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- 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.
- RIOÔNIBUS, 2004a, *Dados técnicos – médias anuais de 2002*, In: [www.rioonibus.com.br](http://www.rioonibus.com.br), acesso em 08/09/2004.
- RIOÔNIBUS, 2004b, *Relação das Empresas de Ônibus do Município do Rio de Janeiro*, In: [www.rioonibus.com.br](http://www.rioonibus.com.br), acesso em 24/08/2004.
- RISTINEN, R. A. e KRAUSHAAR, J. J., 1999, *Energy and the environment*, John Willey & Sons, Inc.
- RODRIGUES, V. F. e SILVA, J. E., 2002, "Performance and emission Analysis of the Otto cycle engine converted to bi-fuel gasoline and natural gas", In: *11th International Mobility Technology Congress and Exhibition*, SAE Brasil, São Paulo, SP, Brasil.
- RUBIN, E. S., 2001, *Introduction to Engineering and the environment*, 1<sup>st</sup> ed., McGraw-Hil Higher Education.
- SAAD O., 1983, *Seleção do equipamento agrícola*, 3<sup>a</sup> ed., São Paulo, Editora Nobel.
- SAE, 1996, *Automotive Handbook*, 5<sup>th</sup> ed., Warrendale, Society of Automotive Engineering.
- 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.
- SANTOS, V., 1997, "Transporte muda de mãos", *Transporte Moderno*, mar/abr, n<sup>o</sup> 380, São Paulo, pp.18 – 25.
- SBPC, 2000, "A cadeia do petróleo: das 'armadilhas' do subsolo a bilhões de consumidores", *Ciência Hoje*, vol. 28, n<sup>o</sup> 163, pp.2-7.
- SCHAFFER, A e VICTOR, D., 2000, "The future mobility of the world population", *Transportation Research Part A*, 34, pp. 171 – 205.
- SECTRAN, 2000, *Política de Transporte de Passageiros para a Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, Secretaria de Transporte do Estado do Rio de Janeiro.
- SEINPE, 2000, *Balanço 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.
- 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., 1989, *As máquinas para plantar. (aplicadoras – distribuidoras-semeadoras-plantadoras-cultivadoras)*, 2ª ed, São Paulo, Editora Globo S.A.
- SILVEIRA, G. M. (1991). *As máquinas para colheita e transportes*. 1ª ed, São Paulo, Editora Globo S.A.
- SLESSER, M., 1978, *Energy in the economy*, 1ª ed, New York, St. Martin's Press.
- SOBRINHO, C. A., 1999, “Análise Comparativa do Desempenho de Compressores de Gás Natural; Características Técnico Econômicas”, In: 7<sup>th</sup> *International Seminar on Natural Gas and LPG*, Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Petróleo.
- SPATH, P. M. e MANN, M. K., 2000, “Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System”, *Relatório NREL/TP-570-27715*, National Renewable Energy Laboratory.
- STEAD, D., 2001, “Transport intensity in Europe - indicators and trends”, *Transport Policy* 8, pp. 29-46.
- STEVENSON, W. J., 1981, *Estatística Aplicada à Administração*, São Paulo, Editora Harbra Ltda.
- 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.
- THOMAS, J. E., 2004, “Dúvidas sobre exploração e produção de petróleo”, *Comunicação por e-mail*.
- THORSTEN, R e RIGNOR, L., 1978, *Shipping, How it Works*, Kungsbaka, Ecanders Boktryckeri, AB, pp. 54.
- 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, 2003, *Processo de Fabricação de Álcool Etílico Hidratado Carburante*, In: [www.udop.com.br/historico/materiais/fabr\\_alcool\\_etilico\\_hidratado\\_carburante.htm](http://www.udop.com.br/historico/materiais/fabr_alcool_etilico_hidratado_carburante.htm), Usinas e Destilarias do Oeste Paulista, acesso em 31/03/2003.
- UDOP, 2004, *Acompanhamento da produção de álcool – Safra 00/01*, In: [www.udop.com.br](http://www.udop.com.br), Boletim II – NNE de 25/10, NO e CSUL de 17/10/00, Usinas e Destilarias do Oeste Paulista, acesso em 21/09/2004.
- UFOP, 2004, *Biodiesel – Flowerpower. Facts, Arguments, Tips*. 2<sup>nd</sup> ed., issue 1/2004, Belin, UFOP, [www.ufop.de](http://www.ufop.de), acesso em 15/06/2004.
- ÚNICA, 2001, *Evolução da produção brasileira de álcool anidro e hidratado – safra 93/94 a 00/01*, In: Informação ÚNICA, ano 4, n° 41, maio/junho 2001, [www.udop.com.br/estatisticas/materiais/ev\\_anidro\\_9394\\_0001.htm](http://www.udop.com.br/estatisticas/materiais/ev_anidro_9394_0001.htm), União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, acesso em 09/03/03.
- VAN WYLEN, G. J. e SONNTAG R. E., 1985, *Fundamentos da termodinâmica clássica*, 4ª ed, São Paulo, Edgard Blucher.
- 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.
- VOLVO, 2000, *Estimativa de Custos de Transportes*, São Paulo, Volvo do Brasil S.A.
- VUCHIC, V. R., 1981, *Urban Public Transportation - Systems and Technology*, Englewood Cliffs, Prentice Hall.

- VW, 2000, *Manual do usuário do veículo VW Gol*, São Bernardo do Campo Volkswagen do Brasil S.A.
- WALTERS, M. H. L., 1992, *Road Vehicle Fuel Economy. State of the art review / 3.*, London, Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport.
- WANG, M *et al.*, 1997, *Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced from U.S. Midwest Corn*, Center of Transportation Research, Argonne Laboratory.
- WANG, Q e DELUCHI, M. A., 1991, *Impacts of electric vehicles on primary energy consumption and petroleum displacement*, Institute of Transportation Studies, U.S.A.
- WBCSD, 2000, *Measuring Eco-Efficiency. A Guide to Reporting Company Performance*, World Business Council for Sustainable Development, Geneva.
- WISER, W. H., 2000, *Energy Resources. Occurrence, production, conversion and use*, New York, Springer.
- WOOTON, J., 1995, “Replacing the private car”, *Transport Reviews*, vol. 19, n<sup>o</sup>. 2, pp.157-175.
- WRIGHT, K., 1990, “The shape of things to go. Automakers turn to high technology in the search for car that is clean, safe and fun”, *Scientific American*, vol. 262, n<sup>o</sup> 5, pp. 58 – 67.

## ANEXO 7.1 – FATORES DE CONVERSÃO ADOTADOS PARA OS INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA.

Tabela A7.1.1.Poder calorífico superior e massa específica.

Combustível	PCS			Massa específica [t/m <sup>3</sup> ]	Fonte		
		Mcal/t	MJ/t				
Petróleo (50% imp/50% nac)	10.800	Mcal/t	45.188	MJ/t	0,860153	Calculado a partir de ANP (2003a)	
Óleo Combustível Industrial	10.085	Mcal/t	42.197	MJ/t	0,98	MME (2002)	
Gás Natural Seco (GN)	11.439	Mcal/t	47.862	MJ/t	0,000745	GARCIA (2002) – após UPGN II REDUC	
Gás Combustível de Refinaria	11.937	Mcal/t	44.954	MJ/t	0,00078	ANP (2003a)	
Coque Verde de Petróleo	8.500	Mcal/t	35.565	MJ/t	1,04	MME (2002)	
Gasolina A	11.220	Mcal/t	46.946	MJ/t	0,742		
GLP	11.750	Mcal/t	49.163	MJ/t	0,552		
Óleo diesel	10.750	Mcal/t	44.979	MJ/t	0,852		
QAV	11.090	Mcal/t	46.402	MJ/t	0,79		
Querosene iluminante	11.090	Mcal/t	46.402	MJ/t	0,79		
Asfalto <sup>(Diluído em petróleo)</sup>	10.500	Mcal/t	42.050	MJ/t	1,04		
Nafta <sup>(Não energética)</sup>	11.320	Mcal/t	47.364	MJ/t	0,72		
Óleo lubrificante	10.770	Mcal/t	45.063	MJ/t	0,875		
Parafina	11.567	Mcal/t	48.396	MJ/t	0,82		
Solvente	11.240	Mcal/t	47.029	MJ/t	0,741		
Outros <sup>(Não energéticos)</sup>	10.800	Mcal/t	45.188	MJ/t	1		
Gás Natural Úmido (GN)	10.454	Mcal/t	43.741	MJ/t	0,000856		GARCIA (2002) – Bacia de Campos
Caldo de cana	620	Mcal/t	2.594	MJ/t	-		MME (2002)
Bagaço de cana	2.257	Mcal/t	9.444	MJ/t	-		
Álcool anidro (AEAC)	7.090	Mcal/t	29.665	MJ/t	0,791		
Álcool hidratado (AEHC)	6.650	Mcal/t	27.824	MJ/t	0,809		
Óleo de soja	9.432	Mcal/t	39.464	MJ/t	0,922	SALAMA (1982)	
EMOS	9.599	Mcal/t	40.162	MJ/t	0,876	SHEEHAN <i>et al</i> (1998)	
Metanol	4.994	Mcal/t	20.894	MJ/t	0,796	BERCHTOLD (1997), ACIOLI, (1994)	

Tabela A7.1.2.Fatores de conversão para cálculo de conteúdo de carbono.

Combustível	F <sub>con</sub> [tC/TJ]	1 tEP =	4,22E-02 TJ
Gás Natural	15,3	Combustível	F <sub>con</sub> [tC/TJ]
Óleo Diesel	20,2		
Óleo Combustível	21,1	Gasol. Automotiva	18,9
Óleo Xisto	20	AEHC	20
Gás Combustível	20	QAV	19,5
Gás Residual	20	Coque de Petróleo	27,5
Gás Refinaria	18,2	GLP	17,2

Fonte: MCT (2002).

Tabela A7.1.3.Fatores de conversão para cálculo da emissão de CO<sub>2</sub>.

Fator de correção de PCS para PCI	
Combustíveis	F <sub>corr</sub>
Gasosos	0,9
Líquidos	0,95
Fator de oxidação	
Combustíveis	F <sub>ox</sub>
Fósseis secundários	0,99
Fósseis gasosos	0,995
Fator de conversão em CO <sub>2</sub>	
F <sub>CO<sub>2</sub></sub> [C/CO <sub>2</sub> ]	3,67

Tabela A7.1.4.Fatores de conversão de uso geral.

1	m3	6,29	barril
1	ano	365	dias
		12	meses
1.000	m3 GN	0,912	tEP
1	m3 petróleo nacional (mar)	0,89002	t
1.000	m3 GN úmido	0,851	t
1	m3 diesel	0,847	t
1	m3 LGN	0,63919	t
1	MWh (conversão AIE)	0,08	tEP
1	tEP (PCI)	42929	MJ
1	MWh	3600	MJ
1	kWh	3,6	MJ
1	tEP	0,848	m <sup>3</sup>
1	t GN	2699,98	kg
1	t diesel	3220,41	kg
1	kg óleo combustível marítimo	40,13	MJ
1	MJ	0,239	Mcal
1	hph	0,7457	kWh

Fonte: PETROBRAS – CONPET (2003), SAE (1996)

## ANEXO 7.2 – DISTÂNCIAS ESTIMADAS PARA DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS.

Tabela A7.2.1. Distâncias entre as garagens das empresas de ônibus e a BADUC.

NOME	ENDEREÇO	BAIRRO	DISTÂNCIA BADUC GARAGEM [km]
Rodoviária A. Matias Ltda.	Rua Dr. Bulhões, 766	Engenho De Dentro	25,5
Acari	Rua Miguel Rangel, 493	Cascadura	29,4
Empresa de Viação Algarve Ltda.	Av. Santa Cruz, 12375	Campo Grande	39,1
Auto Viação Alpha S.A.	Rua Dona Romana, 130	Engenho Novo	27,9
Transportes América Ltda.	Av. Coronel Phídias Távora, 400	Pavuna	16,9
Viação Andorinha Ltda.	Rua Boiobi, 1992	Bangu	36,5
Auto Diesel Ltda.	Estrada Rio Do Pau, 1471	Anchieta	19,9
Auto Viação Bangu Ltda.	Estrada Gal. Canrobert Da Costa, 536	Magalhães Bastos	26,7
Transportes Barra Ltda.	Rua Anália Franco, 150	Vila Valqueire	31,3
Empresa de Transportes Braso Lisboa Ltda.	Av. Automóvel Club, 3700	Engenho Da Rainha	16,0
Breda Rio Transportes Ltda.	Rua Figueiredo Rocha, 104	Vigário Geral	14,2
Transportes Campo Grande Ltda. - Matriz	Av. Santa Cruz, 7825	Senador Camará	36,1
Caprichosa Auto Ônibus Ltda.	Rua Bulhões Marcial, 361	Parada De Lucas	11,6
Erig Transportes Ltda.	Av. Itioca, 362 - Parte	Bonsucesso	18,2
Transportes Estrela S.A.	Rua Saravatá, 210	Marechal Hermes	24,6
Transportes Estrela Azul S.A.	Rua Luiz Barbosa, 55	Vila Isabel	30,0
Transportes Futuro Ltda.	Estrada Engenho D'água, 755	Jacarepaguá	33,8
Empresa Viação Ideal S.A.	Av. Cel. Luiz De O. Sampaio, 180	Ilha Do Governador	25,0
Auto Viação Jabour Ltda.	Av. Santa Cruz, 12375	Campo Grande	39,1
Litoral Rio Transportes Ltda.	Estrada Do Gabinal, 1381	Jacarepagua	33,8
Viação Nossa Senhora de Lourdes S.A.	Rua Capitão Vicente, 85	Penha	13,9
Viação Madureira Candelária Ltda.	Rua Citéria, 108/210	Irajá	13,2
Viação Normandy do Triângulo Ltda.	Rua Barreiros, 21	Ramos	16,1
Viação Novacap S.A.	Estrada Intendente Magalhães, 1154	Vila Valqueire	33,3
Viação Oeste Ocidental S.A.	Av. Santa Cruz, 11120	Santíssimo	38,0
Transportes Oriental Ltda.	Av. Santa Cruz, 11220	Santíssimo	38,0
Transportes Paranapan S. A.	Estrada Do Galeão, 178	Ilha Do Governador	24,5
Viação Pavunense S.A.	Estrada Rio Do Pau, 699	Anchieta	22,1
Expresso Pégaso Ltda.	Av. Cesário De Melo, 8121	Cosmos	48,9
Viação Penha Rio Ltda.	Av. Itioca, 149 A 187	Bonsucesso	17,8
Real Auto Ônibus Ltda.	Rua 29 De Julho, 357	Bonsucesso	16,1
Viação Redentor Ltda.	Estrada Do Gabinal, 1395	Jacarepaguá	33,8
Viação Rubanil Ltda.	Av. Cel. Phídias Távora, 400-411	Pavuna	16,9
Viação Saens Peña S.A.	Rua Leopoldo, 708 - Parte	Andaraí	30,0
Transportes Santa Maria Ltda.	Estrada Cel. Pedro Correia, 140	Jacarepaguá	39,4
Viação Santa Sofia Ltda.	Estrada Rio Do "A", 1500	Campo Grande	43,0
Santa Maria Turismo Ltda.	Estrada Cel. Pedro Correia, 140 - Parte	Jacarepaguá	39,4
Transportes São Silvestre S.A.	Rua Rego Barros, 103	Santo Cristo	26,4
Auto Viação Tijuca S.A.	Rua Leopoldo, 610	Andaraí	30,0
Viação Top Rio Ltda. - "Via Rio"	Av. Crhisóstomo Pimentel Oliveira, 1399	Anchieta	20,6
Transurb S.A.	Rua José Dos Reis, 1136 - Parte	Engenho De Dentro	24,8
Auto Viação Três Amigos S.A. - Filial	Rua Picuí, 505	Bento Ribeiro	25,6
Auto Viação Três Amigos S.A. - Matriz	Rua Jucari, 90	Irajá	17,3
Viação Verdun S.A.	Rua Torres De Oliveira, 335	Água Santa	26,0
Transportes Vila Isabel S.A.	Rua Vianna Drumond, 45	Vila Isabel	30,0
Viação Vila Real S.A.	Rua João Vicente, 933	Bento Ribeiro	26,7
Transportes Zona Oeste Ltda.	Av. Cesário De Melo, 11.800	Paciência	52,2
		Média	27,63
		Desvio Padrão	9,69
		Intervalo de variação sobre a média	0,08

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

Tabela A7.2.2. Distâncias entre os postos de serviço e a BADUC.

Postos	Bairro	DISTÂNCIA BADUC - POSTO [km]
Stargás Auto Posto	Irajá	17,93
Auto Posto dos Afonsos	Marechal Hermes	24,55
Catita Auto Serviço	Bangu	37,3
Centro Aut. Gás Center Ceasa	Irajá	17,3
Posto Galeão Supersônico	Ilha do Governador	27,25
Posto Via Parque	Barra da Tijuca	35,25
Posto Abast. Veículos Silman	Campo Grande	39,57
Posto Alvaro da C. Mello	Bonsucesso	17,75
Posto Alvorada	Barra da Tijuca	36
Posto Ama	Centro	27
Posto Arte Moderna	Centro	28,57
Posto Bracarense	Praça da Banadeira	27,9
Posto Brás de Pina	Brás de Pina	13,77
Posto Carioca	Irajá	17,3
Posto Portuário	Santo Cristo	26,72
Posto Rio Lisboa	São Cristovão	19,57
Posto Samanta	Madureira	29,72
Posto Santa Clara da Pavuna	Pavuna	19,9
Posto Santa Rita	Madureira	21,22
Posto São Crsitovão	São Cristovão	27,77
Posto São Luiz Gonzaga	Benfica	19,7
Posto Suburbano	Engenho de Dentro	25,45
Posto Sul América	Thomáz Coelho	16
Posto Ceg	São Crsitovão	27,4
Posto Ceg Acari	Acari	21,15
Posto Angelina	Campo Grande	39,7
Posto Imperador	Pavuna	20,4
Posto Mato Alto	Jacarepaguá	32,45
Posto Oliveirense	Bangu	37,3
Posto Primeiro	Abolição	24,8
Posto Rainha da Penha	Penha	13,9
Posto Reginas	Caju	19,25
Posto Rio do A	Campo Grande	42,95
Posto Romântico	Jardim Sulacap	34,37
Posto Serv. Marquês de Sapucaí	Centro	27,35
Posto V. Marques	Del Castilho	26,25
Rubi Posto de Abastecimento	Penha	14,4
Posto Mega Brasil	Bonsucesso	18,2
Posto Mega Madureira	Madureira	29,95
Posto Bango	Ramos	17,75
Posto dos Valentens	Realengo	26,95
Posto Fantasminha	Tijuca	27,9
Posto Garagem Paris	Centro	26,77
Posto Torremolinos	Ilha do Governador	27,3
Posto Vila Real	Vicente de Carvalho	17,8
Posto Wal Campo Grande	Campo Grande	43,45
Posto Wal Filial Pavuna	Pavuna	20,4
Posto Boa Fé	Padre Miguel	26,7
Posto Dom Helder Câmara	Inhauma	19,2
Posto Esplanada	Centro	27,02
Posto Metro	Centro	27,02
Posto Santo Cristo	Santo Cristo	26,9
Posto São Jerônimo do Anil	Freguesia	34,62
Posto Shell Democráticos	Higienópolis	18,2
Posto Vouga	Irajá	17,3
Posto Campuscão	Campo Grande	43,2
Posto Cordeiro	Jacarepaguá	35,12
Posto Cristiane	Jacarepaguá	34,83
Posto das Américas	Recreio dos Bandeirantes	44,35
Posto Garagem B. de São Félix	Centro	26,75
Posto LM & JB	Brás de Pina	17,8

Postos	Bairro	DISTÂNCIA BADUC - POSTO [km]
Posto Marechal de Bangu	Padre Miguel	27,2
Posto Real Brás	Vila da Penha	14,4
	Média	26,226
	Desvio padrão	8,147
	Intervalo de variação sobre a média	0,070

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

Tabela A7.2.3. Distâncias entre as usinas/destilarias de etanol e a BADUC.

Destino		BADUC		
N	Região de Origem	Volume de Produção Safra 2000/2001 [m <sup>3</sup> ]	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 7.3 – COLETA DE DADOS PARA OS SISTEMAS DE PROPULSÃO.

Tabela A7.3.1.Dados dos automóveis dedicados ao uso de gasolina C.

N	Data	Gol 1.6 I			Gol 1.6 II			Gol 1.6 III		
		Abast.	km	km/l	Abast.	km	km/l	Abast.	km	km/l
1	01/10/03	38,45	328,10	7,20	29,45	347,00	9,94	35,95	458,00	10,74
2	03/10/03	35,36	326,40	7,78	44,02	392,00	7,51	30,31	303,00	8,43
3	06/10/03	48,11	430,80	7,55	32,96	350,00	8,95	32,46	309,00	8,03
4	08/10/03	44,39	475,00	9,02	34,14	345,00	8,52	37,16	350,00	7,94
5	10/10/03	52,67	510,10	8,17	22,90	219,00	8,06	45,00	500,00	9,37
6	13/10/03	42,15	557,00	11,14	12,09	105,00	7,32	36,97	392,00	8,94
7	15/10/03	42,99	389,00	7,63	36,60	321,00	7,40	25,38	289,00	9,60
8	17/10/03	38,49	489,70	10,73	27,93	306,00	9,24	30,54	300,00	8,28
9	20/10/03	36,18	422,80	9,85	21,22	243,00	9,66	20,56	205,00	8,41
10	22/10/03	40,03	415,40	8,75	34,38	386,00	9,47	36,04	339,00	7,93
11	24/10/03	41,99	533,80	10,72	33,79	365,00	9,11	34,70	331,00	8,04
12	28/10/03	47,39	397,00	7,06	31,00	305,00	8,30	37,09	347,00	7,89
13	30/10/03	40,05	459,90	9,68	33,16	367,00	9,33	32,96	367,00	9,39
14	31/10/03	38,11	317,30	7,02	33,15	396,00	10,07	30,32	303,00	8,43
15	03/11/03	31,37	338,60	9,10	32,56	334,00	8,65	32,74	383,00	9,86
16	05/11/03	35,54	468,90	11,13	33,77	399,00	9,96	35,78	382,00	9,00
17	07/11/03	45,58	381,40	7,06	30,70	345,00	9,48	17,87	168,00	7,93
18	10/11/03	44,43	439,40	8,34	13,07	154,00	9,94	29,42	313,00	8,97
19	12/11/03	38,40	429,00	9,42	35,53	412,00	9,78	32,44	352,00	9,15
20	13/11/03	35,90	331,00	7,77	34,93	373,00	9,00	39,00	411,00	8,89
		Média		8,76	Média		8,98	Média		8,85
		Desvio padrão		1,42	Desvio padrão		0,88	Desvio padrão		0,77
		Intervalo de variação		0,06	Intervalo de variação		0,04	Intervalo de variação		0,03

Fonte: GOMES (2004).

Tabela A7.3.2.Dados dos automóveis *flexible-fuel*.

Flexible				
N	Data	Hodômetro		AEHC
1	29/03/04	273	30,37	5,095
2	06/04/04	472	20,52	5,662
3	08/04/04	826	38,52	5,366
4	12/04/04	970	17,5	4,805
5	13/04/04	1227	25,51	5,882
6	14/04/04	1558	37,6	5,140
7	15/04/04	1686	15	4,982
8	16/04/04	1879	31,02	3,633
9	19/04/04	2213	34,51	5,651
10	20/04/04	2488	26,68	6,018
11	22/04/04	2833	32,38	6,221
12	23/04/04	3055	23,82	5,442
13	26/04/04	3358	30,06	5,885
14	29/04/04	3810	52,17	5,059
15	30/04/04	4053	28,58	4,964
16	03/05/04	4416	33,96	6,241
17	05/05/04	4760	30,71	6,540
18	07/05/04	5166	40,13	5,907
			Média	5,472
			Desvio padrão	0,684
			Intervalo de variação	0,05

Fonte: GOMES (2004).

Tabela A7.3.2.Dados dos automóveis utilizando GNC.

N	Data	Gol 1.6 I			Gol 1.6 II		
		m3	km	km/m3	m3	km	km/m3
1	29/03/04	33,99	308,25	9,07	25,90321	369,91	14,28
2	06/04/04	31,38	318,39	10,15	6,570902	70,10	10,67
3	08/04/04	19,36	168,91	8,72	12,99604	143,57	11,05
4	12/04/04	29,32	293,90	10,02	22,51758	263,49	11,70
5	13/04/04	20,92	162,15	7,75	18,98088	154,55	8,14
6	14/04/04	30,34	306,57	10,11	26,50747	318,39	12,01
7	15/04/04	20,42	216,20	10,59	14,67997	147,79	10,07
8	16/04/04	23,54	207,76	8,83	26,50747	297,28	11,21
9	19/04/04	27,98	264,34	9,45	25,29895	278,70	11,02
10	20/04/04	22,90	237,31	10,36	31,60103	344,57	10,90
11	22/04/04	24,33	228,02	9,37	22,54423	259,27	11,50
12	23/04/04	21,06	183,26	8,70	33,06547	365,68	11,06
13	26/04/04	31,59	270,25	8,55	25,76103	278,70	10,82
14	29/04/04	23,67	226,33	9,56	21,25574	225,49	10,61
15	30/04/04	28,60	250,83	8,77	22,21545	252,52	11,37
16	03/05/04	32,18	263,49	8,19	17,33693	198,47	11,45
17	05/05/04	27,07	248,29	9,17	20,71368	244,07	11,78
18	07/05/04	31,15	327,68	10,52	28,18696	342,88	12,16
19	10/05/03	28,87	309,94	10,74	27,56493	311,63	11,31
20	11/05/02	22,41	240,69	10,74	30,22189	322,61	10,67
			Média	9,47		Média	11,19
			Desvio padrão	0,90		Desvio padrão	1,12
			Intervalo de variação	0,04		Intervalo de variação	0,04

Nota: A coleta de dados foi normatizada para uma coleta a cada 2 abastecimentos  
 Fonte: GOMES (2004).