

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA PARA COMPARAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA PARA O TRANSPORTE NO BRASIL

Márcio de Almeida D'Agosto

Suzana Kahn Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE

Programa de Engenharia de Transportes

RESUMO

Apresenta-se um procedimento desenvolvido a partir da Análise de Ciclo de Vida (ACV) para uma primeira abordagem na comparação de alternativas de fontes de energia para transportes. O procedimento é aplicado ao transporte rodoviário por automóveis na comparação entre três alternativas adotadas no Brasil (gasolina com 25% de etanol, etanol e gás natural comprimido) considerando o uso final no tráfego urbano no Município do Rio de Janeiro, Brasil. O trabalho baseou-se em dados representativos da realidade brasileira e os resultados destacam a adequação do procedimento em identificar, ao longo do ciclo de vida de cada alternativa, onde ocorrem vantagens específicas, em particular no uso de combustíveis renováveis oriundos da biomassa, opção praticada e interessante para a realidade brasileira.

ABSTRACT

This article presents a procedure developed from life cycle analysis (LCA) for a first approach for comparing energy source alternatives for transportation. We apply the procedure to passenger car transportation, comparing three fuels used in Brazil (gasoline with 25% ethanol, pure ethanol and compressed natural gas), considering their use in urban traffic in the city of Rio de Janeiro and representative data of Brazilian reality. The results show the procedure is suitable to identify, over the life cycle of each alternative, where specific advantages occur, particularly in the use of renewable fuels made from biomass, an option already practiced and appropriate for Brazilian reality.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, entre 1996 e 2005, o consumo de energia para transportes cresceu 17%, dos quais, o transporte rodoviário respondeu por cerca de 90%, envolvendo derivados de petróleo (81%), gás natural comprimido (4%) e etanol de cana-de-açúcar (15%) (MME, 2007). A prática do desenvolvimento sustentável implica na escolha destas alternativas considerando toda a cadeia de suprimento, o que pode ser feito por meio da aplicação da Análise de Ciclo de Vida (ACV) (IEA, 1999). Porém, a difusão da ACV nos países em desenvolvimento depende de considerações que se aplicam especificamente à realidade de cada sociedade por meio do desenvolvimento de procedimentos específicos capazes de equilibrar alcances e limitações.

A partir da análise de um conjunto de referências selecionadas, este artigo propõe um procedimento baseado nas duas primeiras fases ACV para a comparação de alternativas de fontes de energia para transportes sob a óptica do consumo de energia. O procedimento é aplicado ao transporte rodoviário por automóveis na comparação entre gasolina com 25% de etanol, etanol e gás natural comprimido, considerando o seu uso final no tráfego urbano no Município do Rio de Janeiro e baseando-se em dados representativos da realidade brasileira.

2. APLICAÇÃO DA ACV ÀS FONTES DE ENERGIA PARA TRANSPORTE

Os estágios típicos do ciclo de vida de um produto são extração e processamento de matéria-prima, produção e uso final; sendo os três primeiros relacionados à cadeia de suprimento (ABNT, 2001). Não existe um único método para conduzir a ACV (Hanssen, 1998; Culaba e Purvis, 1999;), havendo flexibilidade para prática com base nos requisitos mínimos da norma. Investigar a aplicação da ACV às fontes de energia para o transporte rodoviário é um dos objetivos deste artigo. Doze trabalhos que tratam deste assunto foram selecionados para análise

e sua síntese encontra-se na Tabela 1.

Autores	Ano	Local	Aplicação da técnica	Objetivo			Escopo						Unidade Funcional	Critério de Alocação	Categoria de Impactos
							Dimensões			Abrangência					
				Aplicação	Propósito	Função	Largura	Comprimento	Profundidade	Temporal	Geográfica	Tecnológica			
Furuholt	1995	Noruega	Completa: 4 fases da ACV	Gasolina, gasolina com MTBE e óleo diesel	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento	Energia, CO ₂ , NO _x , SO _x , COV	Curto prazo (ano do estudo)	Dados proprietários	Tecnologia usual na data do estudo	litros	Equivalente energético	5 categorias ²
Wrang <i>et al.</i>	1997	EUA	Parcial: ICV e interpretação	E85, E10 e gasolina	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Curto prazo (ano do estudo) e longo prazo (não definido)	Valores médios nacionais e regionais	Aprimoramento tecnológico para a produção do etanol no longo prazo	Btu/milha	Não especifica	Não considera
Sheeran <i>et al.</i>	1998	EUA	Parcial - ICV e interpretação	B100, B20 e óleo diesel	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, GEE, poluentes atmosféricos locais	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais e internacionais	Tecnologia usual na data do estudo	bhp-h	Equivalente mássico	Não considera
IEA	1999	CE	Parcial: ICV	Gasolina, óleo diesel, GLP, GNC, M100, E100, B100, HC, DME	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , NO _x , CO, HC, MP	Curto prazo (1 a 5 anos) e longo prazo (15 a 25 anos)	Valores médios dos países da OECD.	Tecnologia usual na data do estudo	GJ	Não especifica	Não considera
Armstrong e Akhurst	2000	CE	Não divulga	Gasolina, óleo diesel, GLP, GNC, M100, E100, B100, HC, eletricidade	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Suprimento ¹ e uso final	Energia, CO ₂	Médio prazo	Valores médios dos países da CE	Tecnologia usual na data do estudo	MJ/km	Não especifica	Não considera
Berr <i>et al.</i>	2001	Austrália	Completa: 4 fases da ACV	Gasolina Premium sem enxofre, E85, E10, GLP, GNC, GNL, B100, diesel, óleo diesel e óleo diesel GTL	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, GEE e poluentes atmosféricos locais	Curto prazo	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	g/t.km	Equivalente energético e mássico	Não considera
Hackney e Neufville	2001	EUA	Parcial: ICV	Gasolina, gasolina reformulada, óleo diesel, M85, E85, M100, E100, GLP, GNC, GNL, HC, eletricidade	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , NO _x , HCNM, MP	Médio prazo (12 anos de vida dos veículos)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	Energia em 12 anos de vida do veículo	Equivalente mássico	Não considera
Kadam	2002	Índia	Completa: 4 fases do ACV	E10	Desenvolver produto	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CO, NO _x , SO _x , HC e MP	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	1 tonelada de bagaço seco	Não especifica	6 categorias ³
Kreith <i>et al.</i>	2002	EUA	Parcial: ICV	GNC, HC, óleo diesel GTL, M100, eletricidade	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia	Curto prazo (ano do estudo)	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	Não divulga	Não especifica	Não considera
HU et al	2004	China	Parcial ICV	E85, gasolina	Comparação	Produzir deslocamento	Não especifica	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CO, HC, NO _x , MP e custos	Curto prazo	Valores médios nacionais e internacionais	Tecnologia usual na data do estudo	200.000 km	Não especifica	Não considera
Wang et al	2005	China	Parcial ICV	Metanol, gasolina e hidrogênio	Comparação	Produzir deslocamento	Não especifica	Cadeia de suprimento e uso final	CO ₂ , CO, HC, SO _x e custos	Curto prazo	Valores médios nacionais e internacionais	Tecnologia usual na data do estudo	200.000 km	Não especifica	Não considera
Collela et al	2005	USA	ICV	Gasolina, óleo diesel, hidrogênio	Comparação	Produzir deslocamento	1o nível e 2o nível	Cadeia de suprimento e uso final	Energia, CO ₂ , CO, HC, NO _x , MP, SO _x , CH ₄	Curto prazo	Valores médios nacionais	Tecnologia usual na data do estudo	1 ano de operação	Não especifica	Não considera

Tabela 1: Síntese das referências selecionadas sobre aplicação de ACV as fontes de energia para o transporte rodoviário.

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, toxidade humana e odor do ar; ICV – Aplicação parcial da ACV, considerando apenas as fases de objetivo e escopo e análise do inventário.

3. PROPOSTA DE PROCEDIMENTO

A partir das referências bibliográficas selecionadas propõe-se um procedimento baseado na técnica de ACV para uma primeira abordagem na comparação de alternativas de fontes de energia para o transporte sob a óptica do consumo de energia. A Figura 1 apresenta o esquema do procedimento e baseia a discussão a seguir.

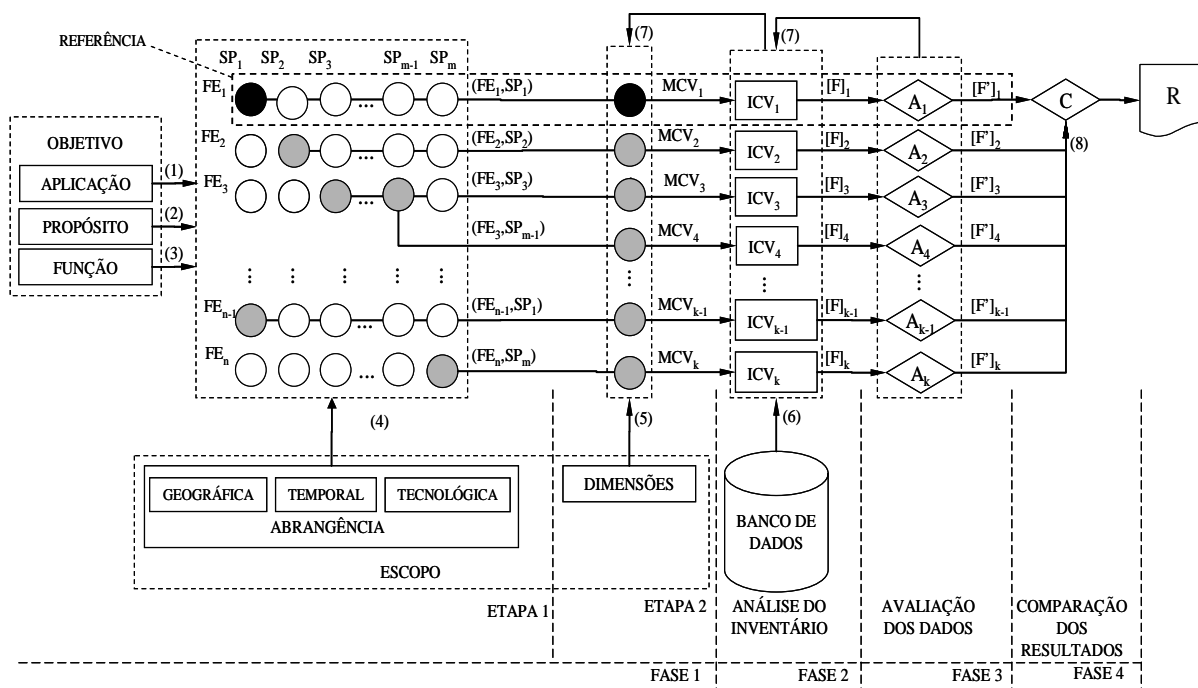
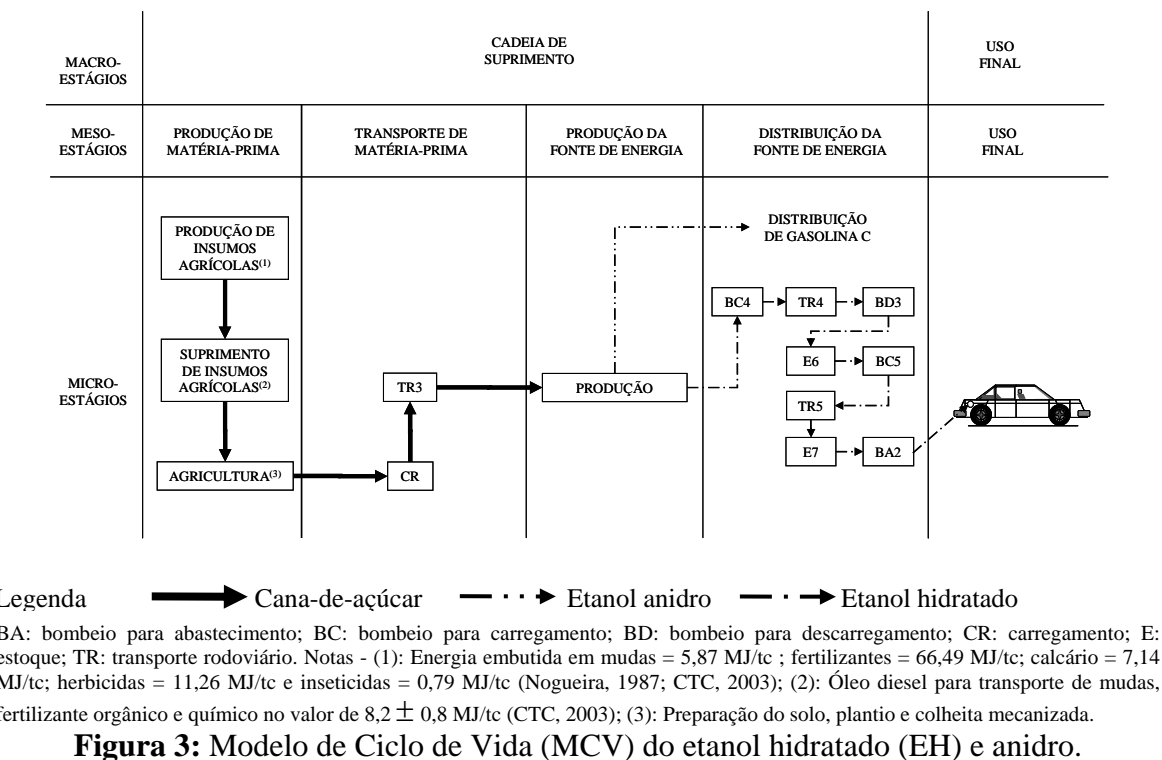
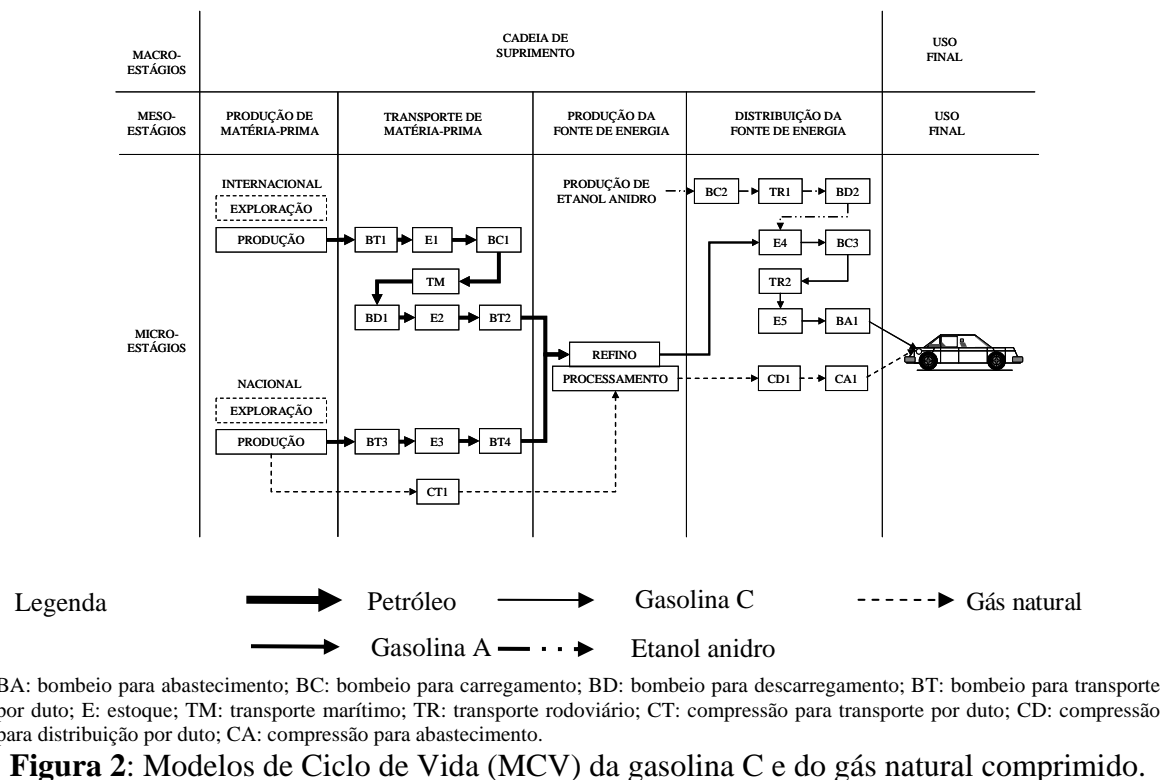


Figura 1: Estrutura do procedimento

3.1. FASE 1: Objetivo e escopo

O objetivo desdobra-se em aplicação aos ciclos de vida das fontes de energia para o transporte, propósito de comparar alternativas e função de produzir deslocamento. Na ETAPA 1 do escopo, a consideração de limites para a abrangência geográfica, temporal e tecnológica restringe e relaciona as fontes de energia (FE), associadas à cadeias de suprimento e os sistemas de propulsão (SP), associados ao uso final. Cada par (FE, SP) deve ser caracterizado de modo tão específico e detalhado quanto necessário. Na ETAPA 2 do escopo, para cada par (FE, SP) são associados modelos de ciclo de vida (MCV) que estabelecem as dimensões da aplicação e os fluxos a serem considerados. Recomenda-se uma estrutura modular para elaboração dos MCV (Figuras 2 e 3), com três níveis de profundidade, na forma de macro-estágios, meso-estágios e micro-estágios, que permite a prática de refinamentos sucessivos, garantindo equivalência entre os níveis. Como os micro-estágios são específicos para cada ciclo de vida, recomenda-se que a comparação de alternativas se faça no nível de meso-estágios, onde se consegue melhor equidade.

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



3.2. FASE 2: Análise do inventário

Realiza-se a coleta de dados para cada um dos MCV resultantes da FASE 1, ao que se denomina inventário de ciclo de vida (ICV). Numa pesquisa preliminar quantificam-se os dados com pouca preocupação quanto a qualidade, promovendo refinamentos sucessivos posteriormente. Como resultado da FASE 2, para cada MCV associa-se uma matriz [F] de fluxos por processo, que sofrerá avaliação da qualidade dos dados na FASE 3.

3.3. FASE 3: Avaliação dos dados

O critério de avaliação varia em função da necessidade de cada estudo. Para uma abordagem preliminar recomenda-se um critério baseado em Maurice *et al.* (2000) que propõe avaliações quanto ao: (1) peso que os fluxos individuais de insumos e cargas ambientais de cada processo têm em relação aos respectivos fluxos totais no ciclo de vida (P_{\min}); (2) intervalo de variação dos valores de cada fluxo (T_{\max}) e (3) origem, que pode ser uso específico ou uso geral. Como resultado da FASE 3 obtém-se uma matriz $[F']$ de fluxos avaliados por meso-estágio para cada alternativa.

3.4. FASE 4: Comparação dos resultados

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

4. VERIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

A verificação do procedimento será feita por meio da seleção de uma situação típica, porém não restritiva, de transporte de passageiros no Brasil.

4.1. FASE 1: Objetivo e escopo

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

4.1.1. FASE 1 – ETAPA 1 - Abrangência

Adotou-se como abrangência geográfica o transporte urbano no Município do Rio de Janeiro, selecionando alternativas de fontes de energia (FE) para um sistema de propulsão (SP) disponível no mercado no momento presente, com viabilidade legal, tecnológica, econômica e disponibilidade de dados, conforme Tabela 2. Tal escolha não limita a aplicação do procedimento e se justifica pelas considerações apresentadas a seguir.

Tabela 2: Caracterização dos pares de alternativas (FE, SP)

Fonte de energia			Sistema de propulsão ⁽²⁾			Alternativas
Nome	Sigla	Caracterização	Nome	Sigla	Caracterização	
Gasolina C	GC	Mistura com 85% de gasolina obtida do refino de petróleo e 25% ⁽¹⁾ de etanol anidro obtido a partir do processamento da cana-de-açúcar	Convencional	SPC	Automóvel ⁽³⁾ dedicado ao uso de gasolina C	(GC,SPC)
Gás natural comprimido	GNC	Gás natural associado ao petróleo purificado e comprimido	Bi-combustível	SPBC	Automóvel ⁽³⁾ dedicado ao uso de gasolina C e adaptado ao uso de GNC ⁽⁴⁾	(GNC,SPBC)
Etanol hidratado	EH	Etanol hidratado obtido a partir do processamento da cana-de-açúcar	<i>Flexible-fuel</i>	SPFF	Automóvel ⁽³⁾ capaz de consumir gasolina C e/ou etanol hidratado ⁽⁵⁾	(EH,SPFF)

Notas: (1) Este era o percentual vigente na época da elaboração do artigo, que pode variar entre 20% e 25% em função de política do governo. (2) Perfil de operação: tráfego urbano com velocidade média do fluxo de 12 km/h, ar condicionado ligado e ocupação média de 1,5 passageiro por veículo (PDT-RJ, 2006); (3) Veículo pequeno de 1.450 kgf de peso vazio, equipado com motor alternativo de combustão interna de ignição por centelhamento com 1,6 dm³ de cilindrada e 97 cv de potência máxima e sistema de transmissão mecânico; (4) Pressupõe predominância do uso de GNC, embora também possa consumir gasolina C; (5) Considera-se que os veículos *flexible-fuel* utilizam predominantemente etanol.

Desde 2003 comercializa-se no Brasil veículos *flexible fuel*, que utilizam gasolina C e etanol em qualquer proporção de mistura (ANFAVEA, 2006). Entre 1996 e 2005, os

automóveis de passageiros representaram 89% das vendas de veículos que consomem gasolina C e/ou etanol, incluído aqui os automóveis *flexible-fuel* que responderam por 53% das vendas (ANFAVEA, 2006). Estes veículos podem ser adaptados para consumo de gás natural comprimido (GNC) assumindo a configuração bi-combustível. Em 2006, cerca de 4% frota brasileira de automóveis apresentava esta configuração e o Rio de Janeiro respondia por 42% desta fração, com a maior frota brasileira movida a GNV (GASNET, 2007).

4.1.2. FASE 1 – ETAPA 2 - Dimensões

As Figuras 2 e 3 apresentam os MCV adotados para as alternativas da Tabela 2. Numa primeira abordagem, para cada micro-estágio considerou-se: energia total, energia renovável e emissão líquida (gás emitido na queima do combustível e não reabsorvido na produção de matéria-prima) de dióxido de carbono (CO₂).

Metade do petróleo para suprimento do município do Rio de Janeiro (cerca de $7 \times 10^6 \text{ m}^3$) é proveniente de jazidas *on-shore* do Oriente Médio e o restante de jazidas *off-shore* na Bacia de Campos (ANP, 2003, Medeiros, 2003). Admite-se o transporte marítimo do petróleo importado por 8.746 ± 262 milhas náuticas (Dobson & Beresford, 1989) em navios-tipo de 300.000 TPB; o transporte poço-terminal no Oriente Médio por 145 ± 15 km em oleodutos (Rio Oil & Gas, 2002) e terminal-refinaria no Brasil em oleoduto por 125 km. O transporte poço-refinaria do petróleo nacional é realizado exclusivamente em oleoduto por 334 km (Transpetro, 2002). Nos terminais nacionais, o petróleo é mantido aquecido para bombeio (Petrobras-Conpet, 2003). Após o refino, a gasolina A (sem adição de etanol) é bombeada por dutos para tanques próximos da refinaria, onde se adiciona 25% de etanol anidro, produzindo gasolina C. Esta é carregada em caminhões-tipo com 30.000 l de capacidade que a distribuem para postos a distância de $26,23 \pm 1,84$ km (Menezes, 2004).

O gás natural associado ao petróleo nacional pode ser reinjetado no poço, queimado, consumido como energia nas plataformas ou disponibilizado para uso (ANP, 2003, Petrobras-Conpet, 2003). O gás disponível é transportado em gasodutos por 452 km até a unidade de processamento (Transpetro, 2002). Após processamento, é distribuído por uma rede de 638 km de gasodutos até postos (SEINPE, 2000), onde é comprimido a 220 atm para abastecer os veículos.

Admite-se que todo o etanol consumido no município do Rio de Janeiro é produzido em São Paulo e transportado em caminhões-tipo com 30.000 l de capacidade por 697 ± 24 km até a base de distribuição no Rio de Janeiro (UDOP, 2004, Menezes, 2004). A partir deste ponto segue o modelo de distribuição da gasolina C. A matéria-prima para a produção do etanol é a cana-de-açúcar que é transportada em caminhões com 23 t de capacidade por 20 ± 5 km até as usinas. Admite-se colheita mecanizada em 25% da plantação e colheita manual com carregamento mecanizado no restante.

4.2. FASE 2: Análise do inventário

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

$0,0075 \pm 0,0004$ tEP/t para exploração *on-shore* e 97 ± 5 MJ/barril para produção. Admite-se o uso de óleo diesel na exploração e GN na produção (Sheehan *et al*, 1998).

O bombeio de petróleo nacional (BT2, BT3 e BT4) consome $0,0311 \pm 0,0031$ kWh/t.km de energia elétrica e $(1,79 \pm 0,23) \cdot 10^{-4}$ tEP/t para aquecimento nos terminais (E2 e E3) com óleo combustível e GN (Petrobras-Conpet, 2003). Adotou-se $0,0144 \pm 0,0007$ kWh/t.km de GN para o bombeio de petróleo no Oriente Médio (BT1) (Sheehan *et al*, 1998) e o dado nacional para aquecimento no terminal E1. Para o transporte marítimo (TM) adotou-se consumo entre 1,543 e 1,637 g/t.milha de óleo combustível para capacidade entre 328.000 e 347.000 m³. O carregamento e descarregamento (BC1 e BD1) consomem entre 3,7 e 3,5 t/h de óleo combustível (Transpetro, 2002, Gabina, 2004).

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

O carregamento de caminhões para distribuição de gasolina C (BC3) consome $2,32 \pm 0,17$ MJ/t de energia elétrica (Petrobras-Conpet, 2003; Marques, 2003). Os valores típicos de eficiência energética para o caminhão-tipo de 30.000 l de capacidade (TR1 e TR2) variam entre 1,81 e 2,25 km/l (Volvo, 2000) e adotou-se o consumo de energia elétrica no abastecimento (BA1) como $0,654 \pm 0,033$ MJ/m³ (Gilbarco, 2004). O estoque na base (E4 e E6) e no posto (E5 e E7) não consomem energia.

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

Na cadeia de suprimento do etanol admite-se 65 t_c/ha (t_c = tonelada de cana-de-açúcar) para a produção de cana-de-açúcar e 85,4 l/t_c para a produção de etanol (Lima e Marcondes, 2002; CTC, 2003). Por uma questão de coerência com os trabalhos apresentados na Tabela 1 considerou-se a energia embutida nos insumos agrícolas e seu suprimento, embora se trate de fluxos de 2º nível. A cada 5 anos a agricultura envolve o cultivo da cana-planta (1 vez), das soqueiras (3 vezes) e colheita mecanizada (4 vezes), utilizando equipamentos que consomem óleo diesel e totalizam $25,10 \pm 2,25$ MJ/t_c (CTC, 2003). O consumo de energia para a produção de matéria-prima totalizou 1807 ± 45 MJ/t_{EH} (t_{EH} = tonelada de etanol hidratado).

O carregamento (CR) e transporte (TR3) de cana-de-açúcar até as destilarias utiliza carregadeiras e caminhões que consomem óleo diesel em taxas de $16,25 \pm 1,62$ l/ha e 0,0209 a 0,0231 l/t.km, respectivamente. (CTC, 2003; Ribeiro, 2004). O consumo de energia para o transporte de matéria-prima totalizou 553 ± 31 MJ/t_{EH}.

Admite-se que toda a energia necessária para a produção de etanol é obtida da queima de 232 kg/t_c de bagaço com PCI de 1650 kcal/kg e eficiência na conversão de vapor de 78%, produzindo excedente de 8% de bagaço que é considerado como co-produto pelo potencial de geração de energia elétrica comercializável (Coelho *et al*, 1997; Lima e Marcondes, 2002; CTC, 2003). Obteve-se 58% de eficiência energética do processo, 7% para o balanço de massa, 0,3% para o balanço de energia e 13.355 ± 668 MJ/t_{EH}.

Por analogia aos cálculos adotados para a gasolina C, obteve-se $519,6 \pm 92$ MJ/t_{EH} para o carregamento, descarregamento (BC4 e BD3) e transporte rodoviário da usina até a base de distribuição (TR4) e $48,6 \pm 9$ MJ/t_{EH} para a distribuição urbana (BC5 e TR5) e abastecimento (BA2).

Para cada sistema de propulsão apresentado na Tabela 2, foram coletados dados de campo de eficiência para 3 veículos com as características e perfil operacional descritos nas notas (2) e (3) (Gomes, 2004). Adotou-se posição conservadora, escolhendo-se os menores valores por alternativa, que foram: $8,76 \pm 0,52$ km/l para (GC, SPC); $9,47 \pm 0,38$ km/m³ para (GNC, SPBC) e $5,47 \pm 0,27$ km/l para (EH, SPFF).

4.3. FASE 3: Avaliação dos dados

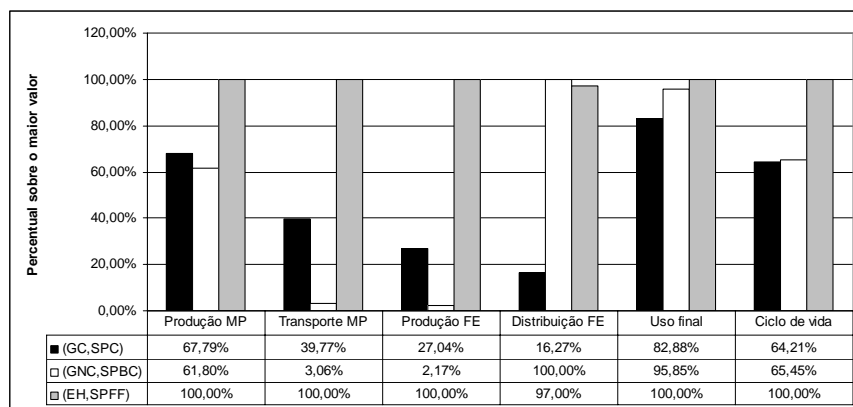
A finalidade desta fase é orientar uma possível reavaliação dos dados por meio da identificação de fluxos críticos. Os parâmetros adotados foram: $P_{\min}=10\%$ e $T_{\max}=5\%$ (Maurice *et al.*, 2000). Apenas as variações relativas aos fluxos de uso final para a alternativa (GC, SPC) ultrapassam em 1,022% T_{\max} estando associadas aos resultados do levantamento de campo da eficiência energética dos veículos escolhidos. A consistência dos resultados foi testada por meio de sua comparação com dados de referências bibliográficas que refletissem a realidade brasileira (Clauset, 1999; Gerrero, 2003).

4.4. FASE 4: Comparação dos resultados e discussão

Por facilitar a visualização dos resultados, optou-se pela comparação paramétrica. As Figuras 4, 5 e 6 baseiam a discussão dos principais resultados.

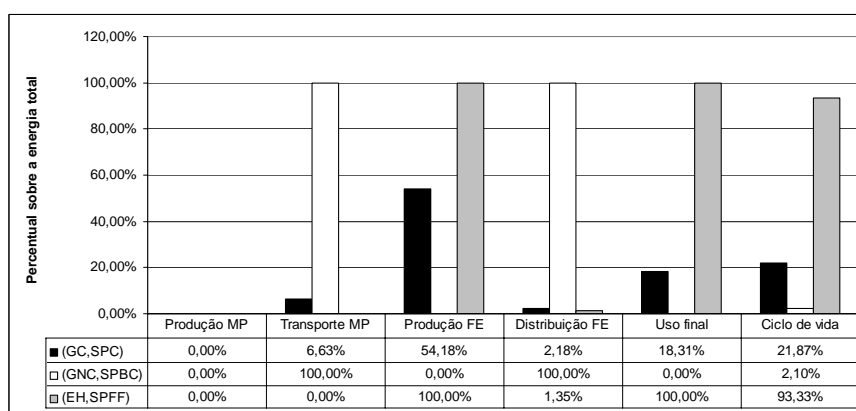
Com exceção da distribuição, a alternativa (EH, SPFF) apresenta os maiores consumos de energia total por meso-estágios, sendo a energia embutida nos insumos agrícolas decisiva para tornar o consumo de energia total da produção de matéria-prima superior em 32% a alternativa (GC, SPC) e 38% a alternativa (GNC, SPBC). Esta última se privilegia da não consideração do óleo diesel consumido na exploração do GN associado.

A diferença entre o consumo de energia total para o transporte de matéria-prima de cada alternativa é função do modo de transporte e do critério de alocação mássica na conversão da matéria-prima em fonte de energia. O GN é transportado por gasodutos e o petróleo por oleodutos e navios, modos de maior eficiência energética que o modo rodoviário, utilizado para a cana-de-açúcar. Adicionalmente, admite-se que uma pequena fração da massa da cana-de-açúcar, o equivalente a 85,4 l/t_c, é transformada em etanol, enquanto para o petróleo e GN, a menos das pequenas perdas de processo, a matéria-prima é integralmente transformada em co-produtos comercializáveis.



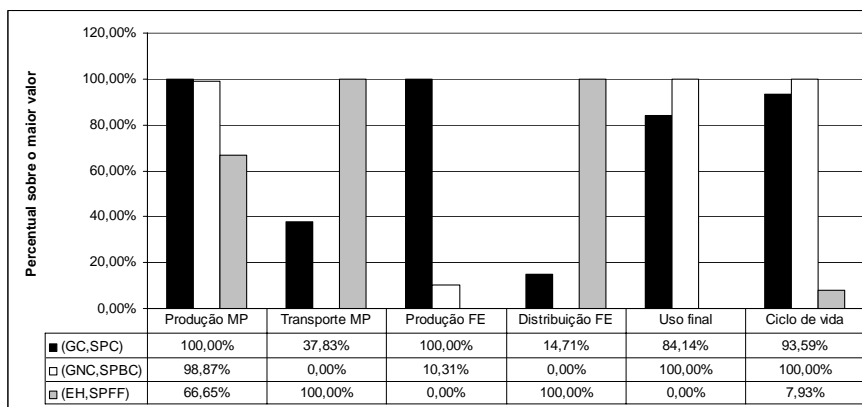
Legenda – MP: matéria-prima; FE: fonte de energia.

Figura 4: Energia total consumida em cada alternativa



Legenda – MP: matéria-prima; FE: fonte de energia.

Figura 5: Energia renovável associada a cada alternativa



Legenda – MP: matéria-prima; FE: fonte de energia.

Figura 7: Emissões líquidas de CO₂ associadas a cada alternativa

Além de apresentar o menor consumo de energia total, o transporte de GN utiliza exclusivamente energia renovável (hidrelétrica) e por hipótese não apresenta emissões líquidas de CO₂. Isso não ocorre para as alternativas (GC, SPC), onde apenas uma pequena parte da energia total é renovável e (EH, SPFF), onde toda a energia consumida é de origem fóssil (óleo diesel), produzindo emissões líquidas de CO₂ com perfil semelhante ao consumo de energia total.

O consumo de energia total para a produção de etanol é 3,7 vezes maior que para a gasolina C e 46 vezes maior que para o GN, porém, toda a energia consumida é biomassa

o que leva a inexistência de emissões líquidas de CO₂. A maior parte da energia renovável observada na produção de gasolina C (99%).

O maior consumo de energia total na distribuição ocorre para a alternativa (GNC, SPBC) e está associado à energia elétrica utilizada na compressão para abastecimento. A utilização do óleo diesel em transporte rodoviário implica nas maiores emissões líquidas de CO₂ para o etanol este meso-estágio. Para a distribuição da gasolina C, a energia total e a emissão líquida de CO₂ representam, respectivamente, 16% e 15% das obtidas para o etanol. Esta diferença está associada ao transporte do etanol até a base de distribuição, uma vez que a partir deste ponto, o modelo de distribuição é idêntico para as duas alternativas.

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

A alternativa (GC, SPC) apresenta o melhor desempenho para o uso final, com consumo de energia total 13,5% menor que a alternativa (GNC, SPBC) e 17% menor que a alternativa (EH, SPFF). Para esta última as emissões líquidas de CO₂ são nulas, por se tratar de energia com origem na biomassa. A parcela de etanol adicionada à gasolina C contribui para a redução da emissão líquida de CO₂ em seu uso final, o que não ocorre para o GNC, responsável pela maior emissão líquida de CO₂ neste meso-estágio.

A parcela do etanol na gasolina C representa 38% de energia renovável na energia total da cadeia de suprimento da alternativa (GC, SPC), percentual mais expressivo que os 18,31% obtido para o uso final e os 21,87% obtidos para o ciclo de vida. Constatção que só é possível por meio da análise do ciclo de vida.

A alternativa (GC, SPC) é a que apresenta o menor consumo de energia total para o ciclo de vida, com desempenho semelhante à alternativa (CNG, SPBC) e 36% melhor que a alternativa (EH, SPFF), sendo que esta última apresenta a vantagem de utilizar predominantemente energia renovável (93%) e apresentar a menor emissão líquida de CO₂. Porém, os seguintes aspectos devem ser considerados: a fração de etanol na gasolina C representa uma parcela de energia renovável em todo o seu ciclo de vida o que não se verifica no GN; o MCV estabelecido para o GN associado às incertezas nos dados para a distribuição do GN podem ter subestimado o seu consumo de energia; a alternativa (EH, SPFF) ainda apresenta oportunidades de melhoria significativas nos meso-estágios de transporte de matéria-prima e distribuição, indicando a direção de futuros estudos.

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

Para as alternativas (GC, SPC) e (GNC, SPBC) a cadeia de suprimento consome respectivamente 18% e 7% da energia total do ciclo de vida. Estes valores são comparáveis com os obtidos por IEA (1999), sendo de 13% a 21% para a gasolina e de 6% a 13,5% para o GN. No caso da alternativa (EH, SPFF), a cadeia de suprimento responde por 36,5% da energia total do ciclo de vida, valor bem inferior a faixa de 50,5% a 92%

apresentada por IEA (1999), porém, considerando etanol produzido a partir de milho e beterraba.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O procedimento sugerido apresenta aderência à técnica de ACV, estando alinhado a prática apresentada na literatura consultada. A adoção de três níveis na elaboração dos modelos de ciclo de vida (MCV), permite a prática de refinamentos sucessivos e garante equivalência entre os níveis. A associação de cada fonte de energia a apenas um sistema de propulsão, racionaliza a coleta de dados e facilita a comparação dos resultados. Os MCV apresentados são aplicáveis a qualquer tipo de atividade de transporte, bastando para isso que se caracterize adequadamente o uso final. Com isso, destaca-se a robustez e flexibilidade do modelo em face de diferentes aplicações.

A aplicação representa uma contribuição para divulgação de conhecimento no que se refere às fontes de energia para o transporte em países em desenvolvimento, uma vez que considera dados representativos de uma parte da realidade brasileira, sendo a comparação das alternativas (GC, SPC) e (GNC, SPBC) com (EH, SPFF) um estudo inédito.

A identificação da melhor fonte de energia para o transporte rodoviário por automóveis depende dos aspectos que se pretende valorizar. Se considerado apenas o menor consumo de energia total, o uso de gasolina C e GNC, nesta ordem, são as melhores alternativas. Porém, sob a ótica do uso de energia renovável e emissões líquidas de CO₂, para as condições apresentadas, o uso de etanol é imbatível. Os resultados também destacam a adequação do procedimento em identificar, ao longo do ciclo de vida de cada alternativa, onde ocorrem vantagens específicas, em particular no uso de combustíveis renováveis oriundos da biomassa, opção praticada e interessante para a realidade brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2001) *NBR – ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ANFAVEA (2006) Anuário da Indústria Automobilística Brasileira, www.anfavea.com.br/anuario2006/Cap02, acessado em 08/02/2007.
- ANP (2003) Anuário Estatístico da Indústria Brasileira do Petróleo 1993 – 2002, Rio de Janeiro, Agência Nacional do Petróleo.
- Armstrong, A. P. E Akhurst, M. A. (2000) *Alternative Fuels: Well-to-Wheels Energy Use & CO₂ Comparisons*, London, BP Amoco.
- 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.
- Clauset, C. (1999) “Gol 1.6 de cara nova”, Revista 4 Rodas, maio 1999, Editora Abril, Cultural, São Paulo, pp. 40.
- Coelho, S. T.; Oliveira Jr, S.; Zylbersztajn, D. (1997) “Thermoeconomic analysis of electricity cogeneration from sugarcane origin”. Third Biomass.
- Collela, W. G.; Jacobson, M. G. and Golden, D. M. (2005) Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: The resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases. *Journal of Power Sources* 150, 150–181
- 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.
- Dobson, H E Bersford, A. (1989) *Maritime Atlas of Words Ports and Shipping Places*, London, Lloyd's of London Press Ltd.
- 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.

- GASNET (2007) GNV: Perfil do GNV no Brasil, www.gasnet.com.br/novo_gnv/perfilgnv/brasil_asp, acessado em 09/02/2007.
- Gerrero, L. (2003) “Álcool ou gasolina? Você decide no posto”, Revista 4 Rodas, ano 43, no 513, Editora Abril Cultural, São Paulo, pp. 36-41.
- Gilbarco (2004) Linha de produtos Gilbarco, In: www.gilbarco.com.br, acesso em 28/09/2004.
- 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.
- Hanssen, O. J. (1998) “Environmental impacts of product systems in life cycle perspective: a survey of five product types based on life cycle assessments studies”, Journal of Cleaner Production, 6, pp. 299 – 311.
- Hu, Z.; Pu, G.; Fang, F. and Wang C. (2004) Economics, environment, and energy life cycle assessment of automobiles fueled by bio-ethanol blends in China. Renewable Energy 29, 2183–2192.
- IEA (1999) Automotive Fuels for the Future - The Search for Alternative, International Energy Agency, Office of Energy Efficiency Technology and R&D, Paris.
- 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.
- 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.
- 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.
- Maurice, B.; Frischknecht, R.; CoelhoSchwartz, 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.
- Medeiros, A. (2003) Refino no Brasil, Cadernos Petrobras, agosto/2003, no 3, Unidade de Comunicação Institucional da Petrobras, Rio de Janeiro, pp. 30 – 33.
- MME (2007) Balanço Energético Nacional Ano Base 2005, www.mme.gov.br, BEN 2006, acessado em 07/02/2007.
- 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.
- PDT-RJ (2006) Plano Diretor de Transportes da Cidade do Rio de Janeiro, Secretaria Municipal de Transportes, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.
- Petrobras-Compnet (2003) Relatório Sobre Conservação de Energia no Sistema Petrobras, C-CONPET, Petrobras, Rio de Janeiro, RJ.
- Ribeiro, E. A. C. (2004) Anuário do Transporte de Carga 2004, São Paulo, OTM Editora Ltda.
- Rio Oil & Gas (2002) “Strategies for World Energy”, In: “Official publication of the 17th World Petroleum Congress”, Rio de Janeiro, pp. 158 – 159.
- 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.
- Transpetro (2002) Relatório Anual 2001, Rio de Janeiro, Transpetro.
- UDOP (2004) Acompanhamento da produção de álcool – Safra 00/01, In: 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.
- Volvo (2000) Estimativa de Custos de Transportes, São Paulo, Volvo do Brasil S.A.
- Wang, M Et Al. (1997) Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced from U.S. Midwest Corn, Centre of Transportation Research, Argonne Laboratory.
- Wang, C.; Zhou, S.; Hong X.; Qiu, T. and Wang, S. (2005) A comprehensive comparison of fuel options for fuel cell vehicles in China. Fuel Processing Technology 86, 831– 845.