

Alternativas energéticas para o transporte público urbano no Rio de Janeiro: uma análise utilizando Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Marcio de Almeida D'Agosto¹, Cintia Machado Oliveira², Fabiana do Couto Assumpção³

Abstract: For the period 2003 to 2009 in Brazilian municipalities of over 60,000 inhabitants, buses accounted for more than 25% of urban trips, which is a trend that is not expected to change in the medium term. Worldwide, buses rely on petroleum diesel oil as fuel. In Brazil, alternative fuels such as biodiesel, natural gas and ethanol are available, and the choice between them should depend on an evaluation of the entire life cycle of such fuels. The present study uses a Life Cycle Inventory (LCI), which is essential to the implementation of a Life Cycle Analysis (LCA), to analyze 6 energy alternatives: petroleum diesel oil (D100), pure biodiesel (B100), biodiesel mixed with petroleum diesel (B5), compressed natural gas (CNG), CNG in conjunction with B5 (B5CNG) and additive hydrous ethanol (E95). In saving total energy consumption, D100, B5 and B5CNG stand out, in that order. If the use of renewable energy and the reduction of net CO₂ emissions are the goals, E95 and B100 should be given preference.

Keywords: Renewable Energy. Total Energy. Public Transportation. Biofuels. Life Cycle.

Resumo: Nos municípios brasileiros com mais de 60.000 habitantes, os ônibus responderam por mais de 25% das viagens urbanas no período de 2003 a 2009, tendência que não deve se alterar no médio prazo. Mundialmente, os ônibus dependem do óleo diesel de petróleo como fonte energética. No Brasil, há fontes alternativas como o biodiesel, gás natural e etanol e sua escolha deve considerar a avaliação de todo o seu ciclo de vida. Neste trabalho, aplica-se um procedimento de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), etapa essencial à realização da Análise de Ciclo de Vida (ACV), para analisar 6 alternativas energéticas: óleo diesel de petróleo (D100), biodiesel puro (B100) ou misturado ao diesel de petróleo (B5), gás natural de forma dedicada (GNC) ou em conjunto com o óleo diesel de petróleo (B5GNC) e etanol hidratado aditivado (E95). Quanto ao consumo de energia total, as alternativas D100, B5 e B5GNC se destacam nesta ordem. Se o uso de energia renovável e a redução de emissões líquidas de CO₂ forem as metas principais, as alternativas E95 e B100 devem ser as privilegiadas.

Palavras-chave: Energia Renovável. Energia Total. Transporte Coletivo. Biocombustíveis. Ciclo de Vida.

1 INTRODUÇÃO

Em 2009, o setor de transporte brasileiro respondeu por 28% do consumo final de energia, o modo rodoviário representou 92% desta fração, sendo 76,34% para os derivados de petróleo (diesel e gasolina). Porém, utilizou frações significativas de biocombustíveis (etanol e biodiesel) (20,45%) e gás natural (3,21%) (EPE, 2010).

Neste contexto, o ônibus é o principal meio de transporte público de passageiros nos 501 municípios brasileiros com mais de 60.000 habitantes, representando de 26% a 27% das viagens urbanas entre 2003 e 2009 (ANTP, 2010).

O diesel de petróleo ainda é a principal fonte de energia dos ônibus urbanos no Brasil. No entanto, desde 2008, o governo brasileiro tornou obrigatória a adição de biodiesel a este combustível, atingindo em janeiro de 2010 o patamar de 5% (CNPE, 2009). Além disso, já existem alternativas tecnológicas que permitem o uso de gás natural, de forma dedicada ou em conjunto com o diesel de petróleo e de etanol hidratado aditivado nos ônibus brasileiros (D'Agosto *et al*, 2011).

A crescente consciência social quanto ao desenvolvimento sustentável implica em promover a escolha destas alternativas energéticas empregando a Análise de Ciclo de Vida (ACV), técnica capaz de considerar insumos e impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida e não apenas seu uso final.

Este trabalho tem como objetivo principal aplicar o procedimento de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) proposto por D'Agosto e Ribeiro (2009), para analisar os resultados quanto ao uso de energia total, energia renovável e emissão líquida de CO₂ de seis alternativas energéticas: (1)

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes – E-mail: dagosto@pet.coppe.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes – E-mail: cintia.machado.oliveira.1@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica – E-mail: fabianaassumpcao@poli.ufrj.br

D100-SPD100: óleo diesel de petróleo (D100) em sistema de propulsão convencional (SPD100); (2) GNC-SPGNC: gás natural comprimido (GNC) em sistema de propulsão dedicado (SPGNC); (3) B5-SPB5: mistura de 95% de óleo diesel de petróleo e 5% de biodiesel de óleo de soja (B5) em sistema de propulsão convencional (SPB5); (4) B5-GNC-SPDG: gás natural comprimido (GNC) e mistura de 95% de óleo diesel de petróleo e 5% de biodiesel de óleo de soja (B5) em sistema de propulsão equipado com sistema diesel-gás (SPDG); (5) B100-SPB100: biodiesel de óleo de soja (B100) em sistema de propulsão convencional (SPB100) e (6) E95-SPE95: etanol hidratado aditivado (E95) em sistema de propulsão dedicado (SPE95), para o transporte público urbano no Município do Rio de Janeiro (MRJ).

Como objetivos adicionais consideram-se: (1) identificar a posição relativa quanto os resultados das alternativas que consideram fontes de energia renovável (B100-SPB100 e E95-SPE95) ou mais limpas (GNC-SPGNC) se comparadas a D100 e SPD100; (2) avaliar o impacto da introdução do uso de B5 no resultado das alternativas D100-SPD100, B100-SPB100 e E95-SPE95 e (3) entender como o uso de GNC pode ser aprimorado com o sistema diesel-gás.

Realizou-se coleta de dados não publicados, representativos da realidade brasileira, em particular a base de dados com 10 anos de consumo de energia fornecida pela Petrobras para o ciclo de vida dos combustíveis fósseis (D100 e GN) e os resultados das experiências recentes com o uso de B100 (Marques *et al.*, 2011), E95 (Jansen *et al.*, 2010) e SPDG (D'Agosto, 2011).

A partir desta introdução, apresenta-se o procedimento de ICV (item 2) que será aplicado no item 3, onde são apresentados os resultados e sua análise. Conclusões compõem o item 4.

2 O PROCEDIMENTO DE ICV

A figura 1 sumariza o procedimento de ICV a ser utilizado, segundo D'Agosto e Ribeiro (2009), que considera 4 fases de uma estrutura normatizada para analisar os insumos e cargas ambientais no ciclo de vida, composto por cinco meso-estágios (produção de matéria-prima - PMP, transporte de matéria-prima - TMP, produção da fonte de energia - PFE, distribuição da fonte de energia - DFE e uso final), de alternativas energéticas para transporte.

Partindo-se da definição do objetivo e escopo (Figura 1), identificam-se alternativas energéticas formadas de pares de fontes de energia (FE) e sistemas de propulsão (SP) que atendem às limitações de extensão geográfica, temporal e tecnológica e que ao serem conjugados com as dimensões do estudo originam Modelos de Ciclo de Vida (MCV). Os MCV são a base para a elaboração dos ICV onde dados coletados comporão as matrizes de ciclo de vida [F] com os fluxos representativos dos insumos e cargas ambientais que, após avaliação, comporão as matrizes de ciclo de vida de fluxos consistentes [F'] com os resultados a serem comparados.

3 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ICV NO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO NO MUNICÍPIO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - MRJ

A figura 1 baseia a aplicação do procedimento. Considerações adicionais, sempre que necessárias ao entendimento da aplicação, serão apresentadas em momento oportuno.

3.1 Fase 1: Objetivo e escopo

Escolheram-se como aplicação, as alternativas energéticas ao transporte público por ônibus, como propósito, a comparação das alternativas e, como função, o deslocamento de passageiros (pass). Decorre da função escolhida a unidade funcional de 1 pass.km.

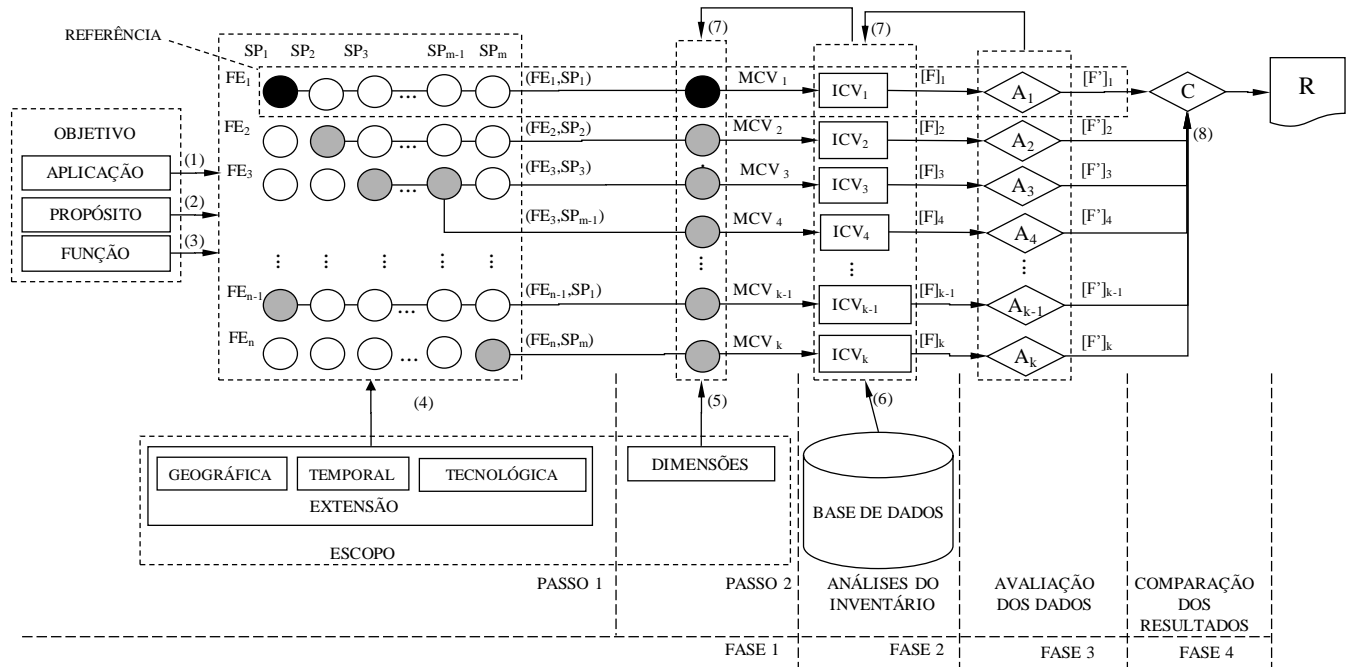
3.1.1 Fase 1 – Etapa 1 - Abrangência

Adotou-se como abrangência geográfica o MRJ, selecionando alternativas (FE, SP) disponíveis no mercado em 2009 e 2010, com viabilidade legal e tecnológica e disponibilidade de dados. A tabela 1 apresenta o resultado da ETAPA 1 do escopo, que se justifica a seguir.

No MRJ, considerando todos os modos de transporte de passageiros, o transporte por ônibus atinge percentuais superiores a 60% desde 1968, alcançando 68% em 2003, ano do último levantamento consistente deste dado (SMTr, 2006). Excluindo-se intervenções localizadas, que buscaram aprimorar a integração entre o transporte ferroviário e rodoviário (bilhete eletrônico e tarifa única) não se verificou tendência que justificasse a alteração deste percentual. Em 2010, 51% da frota de ônibus em circulação no MRJ era composta por ônibus urbanos Tipo I (SMTr, 2010).

Em função da grande disponibilidade de GN no Estado do Rio de Janeiro (ERJ), em 2010, 25% da frota de automóveis e veículos comerciais leves utilizavam GNC (D'Agosto *et al*, 2011). Porém o uso deste combustível em ônibus ainda não se estabeleceu, sendo desejo do governo estadual adotá-lo como substituto parcial do B5 podendo

este ser usado na forma dedicada (GNC) ou dual-fuel (GNC + B5). Testes vêm sendo realizados desde a década de 1980 com ônibus a GNC. O mais recente foi realizado em 2005 (SMTr, 2006), porém, sem resultados que indicassem ser uma alternativa economicamente atrativa para operação no MRJ.



Legenda - (1) Fontes energéticas para transporte; (2) Comparação entre as alternativas; (3) Produção de movimento; (4) Dados de restrição e relacionamento; (5) Limites do sistema de produto; (6) Inventário de dados; (7) Reavaliação de dados; (8) Comparação de dados; FE: Fontes Energéticas; SP: Sistema de Propulsão; MCV: Modelo de Ciclo de Vida; ICV: Inventário de Ciclo de Vida; [F]: Matriz do fluxo do ICV; A: Avaliação de qualidade dos dados; [F']: Matriz do fluxo do ICV avaliado; C: Comparação de resultados; R: Relatório com os resultados.

Figura 1 - Procedimento de ICV

Em 2011, foram iniciados testes com um ônibus urbano Tipo II dotado de sistema diesel-gás da marca Bosch, modelo e DG-Flex, cujos primeiros resultados indicam potencial de utilização desta tecnologia. O SPDG possibilita flexibilidade na escolha entre os combustíveis (GNC ou B5), eliminando a dependência de um combustível difícil de estocar e passível de desabastecimento (GNC), garantindo a autonomia do veículo e permitindo que ao final da sua vida útil econômica possa ser vendido para uma localidade que ainda não é abastecida de GNC.

Uma vez que o biodiesel é renovável e miscível ao D100, é desejo do governo brasileiro ampliar seu uso, de modo que em 2010 sua adição ao D100 atingiu 5% (CENPE, 2009). Testes em ônibus e caminhões operando com biodiesel puro têm sido realizados e seus resultados indicam a possi-

bilidade de adotá-lo em segmentos de mercado em que se disponha o produto a um preço atrativo, comparado ao B5 (D'Agosto *et al*, 2011 e Marques *et al*, 2011).

Em função da disponibilidade do etanol em todo o Brasil e de seu amplo uso em automóveis e veículos comerciais leves, desde 2008, testam-se no Brasil ônibus movidos a E95, uma nova alternativa energética para o transporte público urbano que considera o uso de etanol anidro aditivado em motores do ciclo diesel (Jansen *et al*, 2010).

3.1.2 Fase 1 – Etapa 2 - Dimensões

As figuras 2, 3 e 4 apresentam os MCV considerados. Para cada micro-estágio consideram-se os fluxos de energia total, energia renovável e emissões líquidas de CO₂.

Tabela 1 - Caracterização das alternativas – FE-SP

Alternativas FE-SP	Fonte de energia		Sistema de propulsão ⁽¹⁾						
	Nome	Sigla	Massa específica [kg/l]	Es-PCI [MJ/t]	Nome	Sigla	Caracterização	Rendimento ⁽⁶⁾ [km/l]	Ocupação ⁽⁹⁾ [pass/veículo]
D100-SPD100	Óleo diesel de petróleo	D100	0,8520	44.979	Convencional óleo diesel de petróleo	SPD100	Ônibus urbano Tipo I ^(2,4) , dedicado ao uso de D100.	2,6990 ± 0,0508	65,23 ± 5,10
GNC-SPGNC	Gás natural comprimido	GNC	0,000745	47.862	Dedicado GNC	SPGNC	Ônibus urbano Tipo II ^(3,5) , dedicado ao uso de GNC.	1,6586 ± 0,1973 ⁽⁷⁾	65,23 ± 5,10
B5-SPB5	Mistura de 95% de óleo diesel de petróleo e 5% de bio-diesel de óleo de soja	B5	0,8532	44.732	Convencional B5	SPB5	Ônibus urbano Tipo I ^(2, 4) , dedicado ao uso B5.	2,6879 ± 0,0506	65,23 ± 5,10
B5GNC-SPDG	Gás natural comprimido Mistura de 95% de óleo diesel de petróleo e 5% de bio-diesel de óleo de soja	GNC B5	0,000745	47.862	Diesel-gás	SPDG	Ônibus urbano Tipo II ^(2,5) , equipado com sistema diesel-gás ⁽⁵⁾ .	2,6879 ± 0,0506 ⁽⁸⁾	65,23 ± 5,10
B100-SPB100	Biodiesel de óleo de soja	B100	0,8532	44.732	Convencional B100	SPB100	Ônibus urbano Tipo I ^(2, 4) , dedicado ao uso de B100.	2,4767 ± 0,0455	65,23 ± 5,10
E95- SPE95	Etanol aditivado	E95	0,8090	27.824	Dedicado E95	SPE95	Ônibus padron ^(2, 6) , dedicado ao uso de E95.	0,884 ± 0,0535	81,54 ± 6,37

Notas: (1) Para todos os casos, o perfil de operação possui tráfego urbano com velocidade média de 20 km/h (SMTr, 2006^b). (2) Equipado com motor alternativo (4 tempos) de combustão interna de ignição por compressão e sistema de transmissão mecânico. (3) Equipado com motor alternativo (4 tempos) de combustão interna de ignição por centelhamento e sistema de transmissão mecânico. (4) Ônibus urbano com motor dianteiro, 12 m de comprimento, peso bruto total de 17 t, capacidade nominal de 80 passageiros/veículo, potência máxima entre 200 e 250 hp, suspensão por molas e caixa de marcha mecânica. (5) Ônibus urbano com motor traseiro, 12 m de comprimento, peso bruto total de 17 t, capacidade nominal de 80 passageiros/veículo, potência máxima entre 200 e 250 hp, suspensão por molas e caixa de marcha automatizada (mecânica com controle eletrônico). (6) Ônibus urbano com motor traseiro, 13,2 m de comprimento, peso bruto total de 17,5 t, capacidade nominal de 100 passageiros/veículo, potência máxima entre 250 e 300 hp, suspensão pneumática e caixa de marcha automática (hidráulica) (D'Agosto *et al*, 2011). (7) Valor em km/m³. (8) Valor em litros equivalentes [l_{eg}] de B5. (9) Dados (SMTr, 2006^a).

3.1.2.1 MCV - (D100, SPD100), (GNC, SPGNC), (B5GNC, SPDG) e (B5, SPB5)

Como as vendas de combustíveis derivados de petróleo no ERJ representam 56% do petróleo processado na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), admite-se que todo o suprimento de D100 necessário ao MRJ se origine na REDUC. Segundo ANP (2010), em 2009, esta refinaria tinha capacidade de processar $13 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ com fator de utilização de 95%.

Jazidas *on shore* do Oriente Médio fornecem 42% do petróleo processado para suprimento do MRJ ($3 \times 10^6 \text{ bep}$). O restante vem de jazidas *off shore* situadas no litoral do ERJ, (ANP. 2010 e CENTRAN, 2009).

Para Dobson e Bersford (1989), admite-se o transporte marítimo do petróleo importado por 8.746 ± 262 milhas náuticas em navios de 300.000 TPB, o transporte poço-terminal no Oriente Médio por $145 \pm 15 \text{ km}$ em oleodutos (Rio Oil & Gas, 2002) e o transporte terminal-refinaria no Brasil em oleoduto (125 km). O transporte poço-refinaria do petróleo nacional é realizado exclusivamente por oleoduto (334 km) (TRANSPETRO, 2002). Nos terminais nacionais, o petróleo é mantido aquecido para bombeio (PETROBRAS-CONPET, 2003).

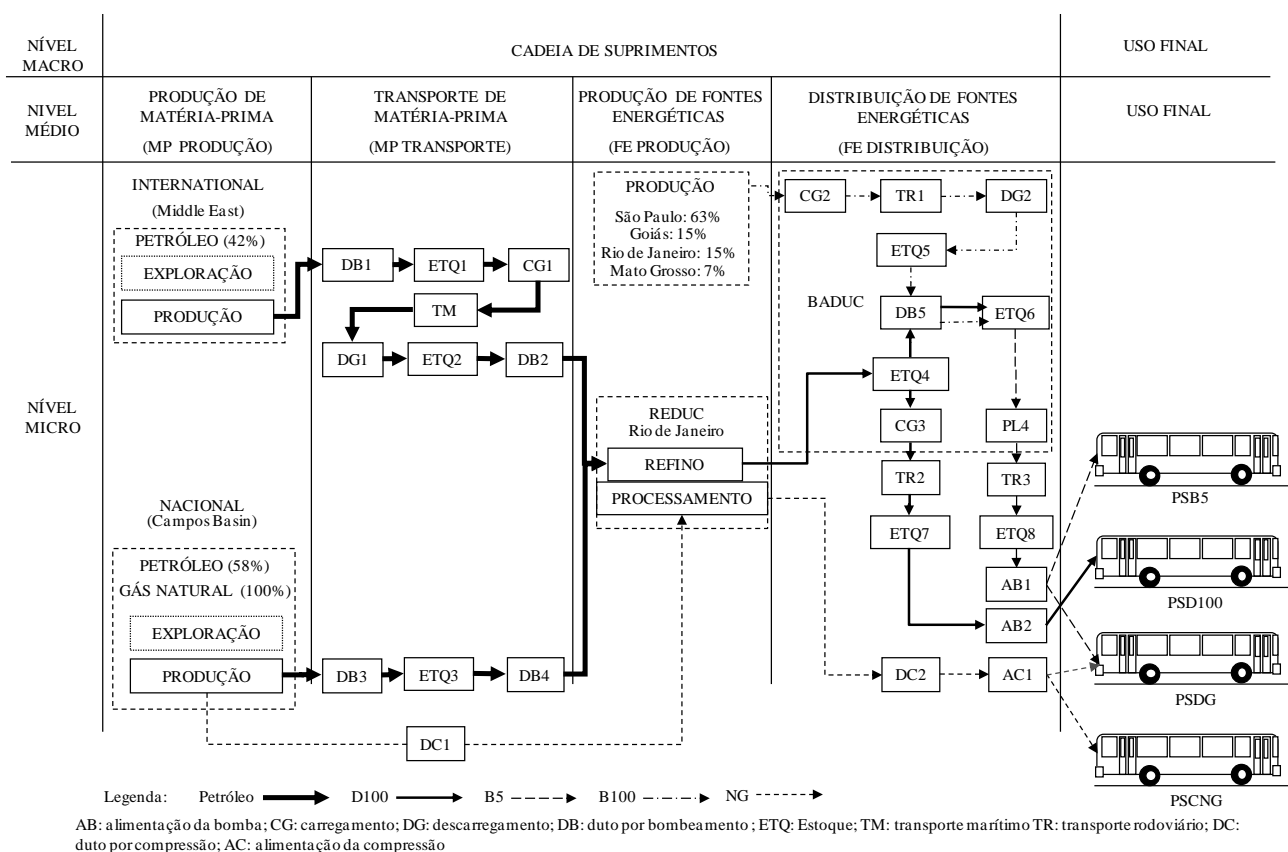


Figura 2 - MCV - alternativas D100-SPD, B5-SPB5, GNC-SPGNC e B5GNC-SPDG

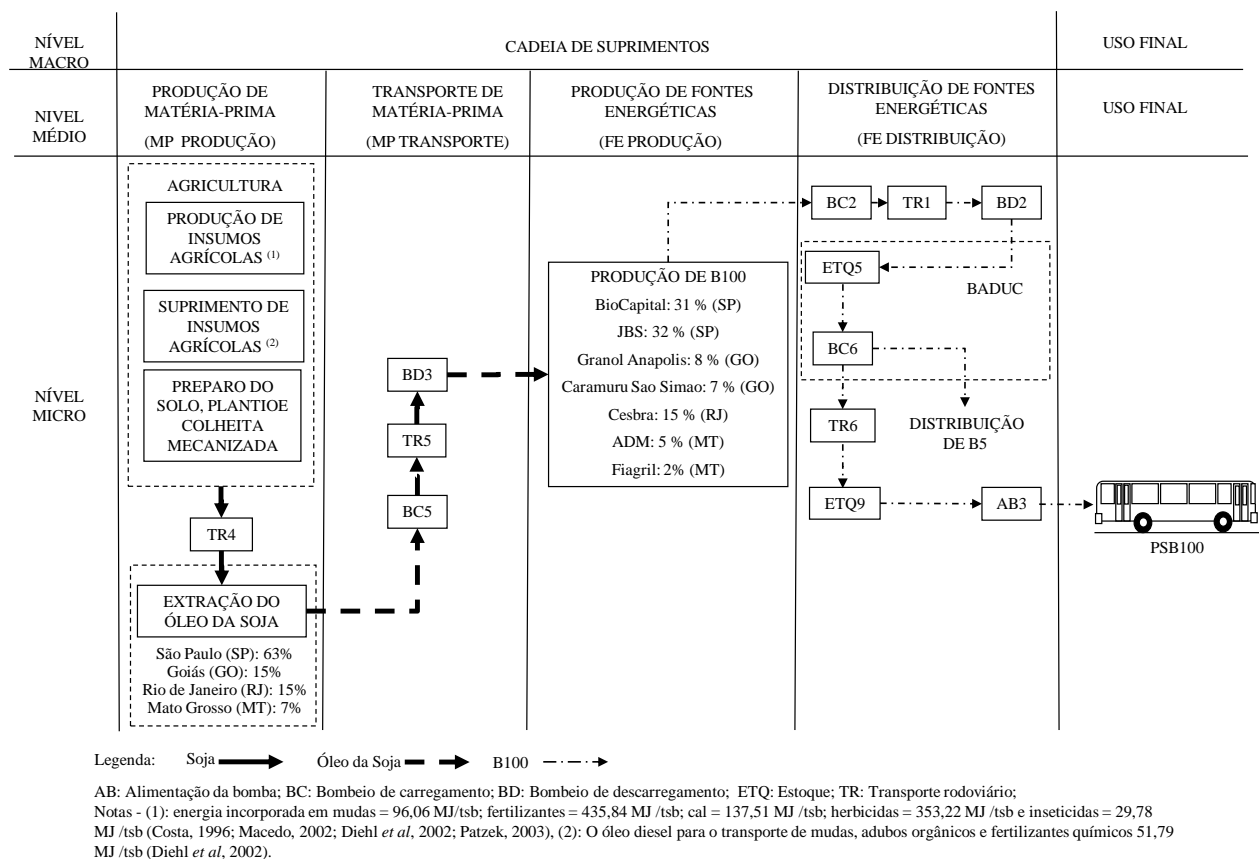


Figura 3 - MCV - alternativa B100-SPB100

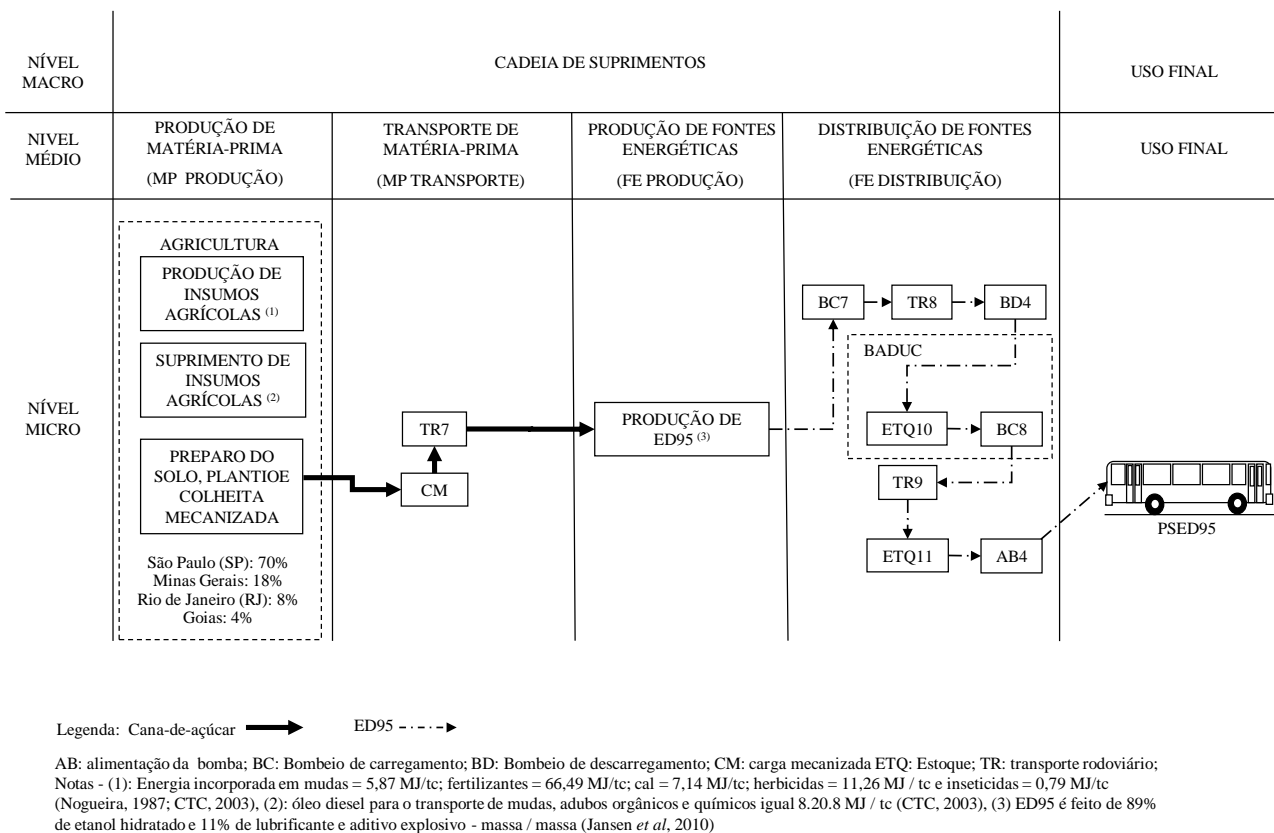


Figura 4 - MCV - alternativa E95-SPE95

Após o refino, o D100 é bombeado por dutos para tanques da base de distribuição de combustíveis próxima da refinaria (BADUC), onde se adiciona 5% de B100, produzindo B5. Este é carregado em caminhões tanque (30.000 l) que o distribuem ($27,6 \pm 9,7$ km) para os postos de abastecimento das garagens de ônibus (Freitas, 2010).

O GN associado ao petróleo nacional pode ser reinjetado no poço, queimado, consumido (energia nas plataformas) ou disponibilizado para uso (ANP 2010 e PETROBRAS-CONPET 2003). Em 2009, as vendas de GNC em todo o ERJ representaram 16% do GN disponível na Bacia de Campos de acordo com a ANP (2010). Admite-se assim que todo o GNC para uso automotivo no MRJ seja oriundo da Bacia de Campos.

O GN disponível é transportado em gasodutos (452 km) até a unidade de processamento, segundo TRANSPETRO (2002). Após processamento, é distribuído por gasodutos até os postos (638 km) (SEINPE, 2000) onde é comprimido (220 atm) para abastecimento dos ônibus.

3.1.2.2 MCV – (B100, SPB100)

Em 2009, o ERJ importou 85% da sua demanda de biodiesel de São Paulo, Goiás e Mato Grosso onde se utilizam, predominantemente, o óleo de soja como matéria-prima (70%) e a transesterificação alcoólica com metanol (95% da produção) e hidróxido de potássio como processo produtivo para produzir o éster metílico de óleo de soja (EMOS), aqui denominado B100 (IBP, 2007; ANP, 2010 e Freitas, 2011).

A quantidade em percentual recebida de cada estado produtor foi estimada considerando as usinas que apresentam maior representatividade (Figura 3) e produção contínua entre janeiro e novembro de 2009 (ANP, 2010 e IBP, 2007).

A distância média entre as usinas de extração de óleo de soja e as produtoras de B100, ponderada por seus percentuais de participação, foi estimada em $203,6 \pm 14,5$ km e o transporte é feito por caminhões tanque (18.000 l) (Freitas, 2010).

Uma vez produzido, o B100 é transportado por $753,4 \pm 53,5$ km em caminhões tanque (30.000 l) (Freitas, 2010) até a BADUC, distância ponderada pelos percentuais ofertados por usina.

3.1.2.3 MCV – (E95, SPE95)

A matéria-prima para a produção do etanol é a cana-de-açúcar, transportada em caminhões (23 t) por 25 ± 5 km até as usinas. Para São Paulo, admite-se colheita mecanizada em 45% da plantação e, para os demais estados, 15%. O restante da produção sofre colheita manual com carregamento mecanizado (D'Agosto e Ribeiro, 2009).

O ERJ atende a 8% da sua demanda de etanol, recebendo o restante de São Paulo (70%), Minas Gerais (18%) e Goiás (4%) (IBP, 2007).

Para produzir E95, adiciona-se 5% do volume de aditivo com propriedades lubrificantes e detonantes na usina (Jansen *et al.*, 2010) ao etanol anidro.

A distância ponderada entre as usinas produtoras de E95 e a BADUC foi estimada em $736,1 \pm 36,8$ km e se utiliza caminhões tanque (30.000 l) (Freitas, 2010). A partir da BADUC a distribuição do E95 é análoga a do B5.

3.2 Fase 2: Análise do inventário

As tabelas 2 a 7 apresentam o resultado ICV para cada uma das (FE, SP) consideradas neste trabalho.

Adotou-se o poder calorífico inferior (PCI) para estimar o conteúdo energético dos combustíveis. Desconsiderou-se a energia embutida, pois sua identificação é objetivo do trabalho.

Médias aritméticas de séries históricas para consumo de energia, o desvio padrão da amostra e os coeficientes da distribuição t de Student (90% de significância) foram usados para estimar o intervalo de variação dos dados (King, 1994). Dados disponíveis na forma de intervalos tiveram sua média determinada pelo centro do intervalo e a variação pela amplitude dividida por dois.

Tabela 2 - ICV - D100-SPD100

Nível médio	Nível micro	Origem do dado	Energia total [kJ/pass.km]			Energia renovável [kJ/pass.km]			Emissões de CO2 [g/pass.km]		
			Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}
Produção de matéria-prima	Exploração	uso espec.	1,1254	16,49%	0,48%	0,0000	-	0,00%	0,0778	16,47%	0,48%
	Produção	uso espec.	9,8508	16,01%	4,18%	0,0000	-	0,00%	0,4414	17,02%	2,75%
	Contribuição do B100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte de matéria-prima											
Óleo importado	Duto por bombeamento (DB1)	uso geral	0,0121	25,28%	0,01%	0,0000	-	0,00%	-	-	-
	Bombeio de carregamento (BC1)	uso geral	0,0227	12,11%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0017	12,11%	0,01%
	Transporte marítimo (TM)	uso espec.	1,1343	12,78%	0,47%	0,0000	-	0,00%	0,0825	12,78%	0,49%
	Bombeio para descarregamento (BD1)	uso geral	0,0227	12,11%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0017	12,11%	0,01%
	Duto por bombeamento (DB2)	uso espec.	0,0284	19,84%	0,01%	0,0284	19,84%	10,59%	0,0000	0,00%	0,00%
	Estoque (ETQ1 + ETQ2)	uso espec.	0,0157	22,87%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0009	24,88%	0,01%
Transporte de matéria-prima											
Óleo nacional	Duto por bombeamento (DB3 + DB4)	uso espec.	0,1047	19,84%	0,05%	0,1047	19,84%	39,09%	0,0000	0,00%	0,00%
	Estoque (ETQ3)	uso espec.	0,0216	22,87%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0012	24,88%	0,01%
	Contribuição do B100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Produção da fonte de energia	Refino	uso espec.	18,3791	14,80%	7,71%	0,1334	9,76%	45,28%	1,2973	14,80%	7,92%
	Contribuição do B100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Distribuição da fonte de energia	Bombeio de carregamento (BC3)	uso espec.	0,0105	15,81%	0,00%	0,0105	31,62%	3,78%	0,0000	0,00%	0,00%
	Transporte rodoviário (TR2)	uso espec.	0,1877	29,18%	0,09%	0,0000	-	0,00%	0,0131	29,18%	0,09%
	Alimentação da bomba (AB2)	uso espec.	0,0037	9,76%	0,00%	0,0037	9,76%	1,26%	0,0000	0,00%	0,00%
	Contribuição do B100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total da cadeia de suprimento			30,919	15,29%	13,03%	0,281	14,77%	100,00%	1,918	15,40%	11,79%
Uso final		uso espec.	217,6638	9,76%	86,97%	0,000	0,00%	0,00%	15,162	9,76%	88,21%
Total do ciclo de vida			248,583	10,45%	100,00%	0,281	14,77%	100,00%	17,081	10,40%	100,00%

Legenda: V_{fluxo} - variação percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) em relação a sua média; W_{fluxo} - peso percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) de um micro estágio em relação ao valor total do fluxo para o ciclo de vida Os parâmetros V_{fluxo} e W_{fluxo} são considerados no item 3.3.

Tabela 3 - ICV - B5-SPB5

Nível médio	Nível micro	Origem do dado	Energia total [kJ/pass.km]			Energia renovável [kJ/pass.km]			Emissões de CO2 [g/pass.km]		
			Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}
Produção de matéria-prima	Exploração	uso espec.	1,0736	16,49%	0,45%	0,0000	-	0,00%	0,0783	16,47%	0,50%
	Produção	uso espec.	9,3969	16,01%	3,96%	0,0000	-	0,00%	0,4439	17,02%	2,88%
	Contribuição do B100	uso espec.	1,4050	15,75%	0,59%	0,1053	13,43%	1,04%	0,0710	17,64%	0,46%
Transporte de matéria-prima											
Óleo importado	Duto por bombeamento (DB1)	uso geral	0,0115	25,28%	0,01%	0,0000	-	0,00%	-	-	-
	Bombeio de carregamento (BC1)	uso geral	0,0217	12,11%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0020	12,11%	0,01%
	Transporte marítimo (TM)	uso espec.	1,0821	12,78%	0,44%	0,0000	-	0,00%	0,0988	12,78%	0,62%
	Bombeio para descarregamento (BD1)	uso geral	0,0217	12,11%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0020	12,11%	0,01%
	Duto por bombeamento (DB2)	uso espec.	0,0271	19,84%	0,01%	0,0271	19,84%	0,28%	0,0000	0,00%	0,00%
	Estoque (ETQ1 + ETQ2)	uso espec.	0,0149	22,87%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0011	24,88%	0,01%
Transporte de matéria-prima											
Óleo nacional	Duto por bombeamento (DB3 + DB4)	uso espec.	0,0999	19,84%	0,04%	0,0999	19,84%	1,05%	0,0000	0,00%	0,00%
	Estoque (ETQ3)	uso espec.	0,0206	22,87%	0,01%	0,0000	-	0,00%	0,0011	24,88%	0,01%
	Contribuição do B100	uso espec.	0,0599	27,93%	0,03%	0,0036	23,40%	0,04%	0,0039	28,14%	0,03%
Produção da fonte de energia	Refino	uso espec.	17,5323	14,80%	7,31%	0,1273	9,76%	1,22%	1,3045	14,80%	8,28%
	Contribuição do B100	uso espec.	1,2509	9,77%	0,50%	0,0281	9,78%	0,27%	0,0280	9,79%	0,17%
Distribuição da fonte de energia	Bombeio de carregamento (BC3)	uso espec.	0,0100	15,81%	0,00%	0,0100	31,62%	0,10%	0,0000	0,00%	0,00%
	Transporte rodoviário (TR2)	uso espec.	0,1788	29,18%	0,09%	0,0000	-	0,00%	0,0125	29,18%	0,09%
	Alimentação da bomba (AB2)	uso espec.	0,0035	9,76%	0,00%	0,0035	9,76%	0,03%	0,0000	0,00%	0,00%
	Contribuição do B100	uso espec.	0,1606	28,05%	0,08%	0,0092	25,57%	0,10%	0,0106	28,20%	0,08%
Total da cadeia de suprimentos			32,371	15,19%	13,55%	0,414	14,41%	4,14%	2,047	15,40%	13,06%
Uso final		uso espec.	217,6638	9,76%	86,45%	10,028	9,76%	95,86%	14,384	9,76%	86,94%
Total do ciclo de vida total			250,035	10,47%	100,00%	10,442	9,95%	100,00%	16,431	10,47%	100,00%

Legenda: V_{fluxo} - variação percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) em relação a sua média; W_{fluxo} - peso percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) de um micro estágio em relação ao valor total do fluxo para o ciclo de vida Os parâmetros V_{fluxo} e W_{fluxo} são considerados no item 3.3.

Tabela 4 - ICV - GNC-SPGNC

Nível médio	Nível micro	Origem do dado	Energia total [kJ/pass.km]			Energia renovável [kJ/pass.km]			Emissões de CO ₂ [g/pass.km]		
			Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}
Produção de matéria-prima	Exploração	NC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produção	uso espec.	13,799	27,33%	4,15%	0,0000	-	0,00%	0,6154	27,33%	3,79%
Transporte de matéria-prima	Duto por compressão (DC1)	uso espec.	0,209	0,00%	0,00%	0,2092	0,00%	0,00%	0,0000	0,00%	0,00%
Produção da fonte de energia	Processamento	uso espec.	3,504	25,27%	1,03%	0,0000	-	0,00%	0,1446	20,12%	0,83%
Distribuição da fonte de energia	Duto por compressão (DC2)	uso geral	0,209	23,21%	0,06%	0,2092	23,21%	2,66%	0,0000	-	0,00%
	Alimentação da compressão (AC1)	uso espec.	7,029	29,57%	2,15%	7,0291	29,57%	94,68%	0,0000	-	0,00%
Total da cadeia de suprimentos				27,60%	7,46%	7,447	29,21%	100,00%	0,760	25,96%	4,63%
Uso final		uso espec.	329,577	20,12%	92,54%	0,000	0,00%	0,00%	16,557	20,12%	95,37%
Total do ciclo de vida total				20,64%	100,00%	7,447	29,21%	100,00%	17,317	20,38%	100,00%

Legenda: V_{fluxo} - variação percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) em relação a sua média; W_{fluxo} - peso percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) de um micro estágio em relação ao valor total do fluxo para o ciclo de vida Os parâmetros V_{fluxo} e W_{fluxo} são considerados no item 3.3.

Tabela 5 - ICV - B5GNC-SPDG

Nível médio	Nível micro	Origem do dado	Energia total [kJ/pass.km]			Energia renovável [kJ/pass.km]			Emissões de CO ₂ [g/pass.km]		
			Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}
Produção de matéria-prima	Exploração	uso espec.	0,4455	16,49%	0,18%	0,0000	-	0,000%	0,0325	16,47%	0,238%
	Produção	uso espec.	11,9721	27,33%	4,88%	0,0000	-	0,000%	0,5442	27,33%	3,983%
	Contribuição do B100	uso espec.	0,5831	15,75%	0,24%	0,0437	13,43%	0,503%	0,0295	17,64%	0,216%
Transporte de matéria-prima											
Óleo importado	Duto por bombeamento (DB1)	uso geral	0,0048	25,28%	0,002%	0,0000	-	0,000%	0,0000	-	0,000%
	Bombeio de carregamento (BC1)	uso geral	0,0090	12,11%	0,004%	0,0000	-	0,000%	0,0008	12,11%	0,006%
	Transporte Marítimo (TM)	uso espec.	0,4490	12,78%	0,183%	0,0000	-	0,000%	0,0410	12,78%	0,300%
	Bombeio de descarregamento (BD1)	uso geral	0,0090	12,11%	0,004%	0,0000	-	0,000%	0,0008	12,11%	0,006%
	Duto por bombeamento (DB2)	uso espec.	0,0112	19,84%	0,005%	0,0112	19,84%	0,129%	0,0000	0,00%	0,000%
	Estoque (ETQ1 + QTQ2)	uso espec.	0,0062	22,87%	0,003%	0,0000	-	0,000%	0,0004	24,88%	0,003%
Transporte de matéria-prima											
Óleo nacional	Duto por bombeamento (DB3 + DB4) Duto por compressão (DC1)	uso espec.	0,1638	19,84%	0,067%	0,1638	19,84%	1,885%	0,0000	0,00%	0,000%
	Estoque (ETQ3)	uso espec.	0,0086	22,87%	0,003%	0,0000	-	0,000%	0,0004	24,88%	0,003%
	Contribuição do B100	uso espec.	0,0249	27,93%	0,010%	0,0015	23,40%	0,017%	0,0016	28,14%	0,012%
Produção da fonte de energia	Refino	uso espec.	9,3259	25,27%	3,798%	0,0528	9,76%	0,608%	0,6259	20,12%	4,580%
	Contribuição do B100	uso espec.	0,5191	9,77%	0,211%	0,0117	9,78%	0,134%	0,0116	9,79%	0,085%
Distribuição da fonte de energia	Bombeio de carregamento (BC3) Duto por compressão (DC2)	uso espec.	0,1265	23,21%	0,052%	0,1265	31,62%	1,456%	0,0000	0,00%	0,000%
	Transporte rodoviário (TR2)	uso espec.	0,0742	29,18%	0,030%	0,0000	-	0,000%	0,0052	29,18%	0,038%
	Alimentação da bomba (AB1) Alimentação da compressão (AC1)	uso espec.	4,1135	29,57%	1,675%	4,1135	29,57%	47,335%	0,0000	0,00%	0,000%
	Contribuição do B100	uso espec.	0,0667	28,05%	0,027%	0,0038	25,57%	0,044%	0,0044	28,20%	0,032%
Total da cadeia de suprimentos			27,913	27,60%	11,366%	4,529	29,21%	52,111%	1,298	25,96%	9,502%
Uso final		uso espec.	217,664	9,76%	88,634%	4,162	9,76%	47,889%	12,366	20,12%	90,498%
Total do ciclo de vida total			245,577	20,64%	100,000%	8,690	29,21%	100,00%	13,665	20,38%	100,000%

Legenda: V_{fluxo} - variação percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) em relação a sua média; W_{fluxo} - peso percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) de um micro estágio em relação ao valor total do fluxo para o ciclo de vida Os parâmetros V_{fluxo} e W_{fluxo} são considerados no item 3.3.

Tabela 6 - ICV - B100-SPB100

Nível médio	Nível micro	Origem do dado	Energia total [kJ/pass.km]			Energia renovável [kJ/pass.km]			Emissões de CO ₂ [g/pass.km]		
			Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}
Produção de matéria-prima	Preparação do solo, plantio e colheita mecanizada	uso espec.	17,0921	18,84%	6,59%	0,7842	18,84%	0,41%	1,1364	18,84%	37,14%
	Suprimento de insumos agrícolas	uso espec.	0,3718	18,84%	0,14%	0,0171	18,84%	0,01%	0,0247	18,84%	0,81%
	Produção de insumos agrícolas	uso geral	5,9402	9,76%	2,10%	-	-	-	-	-	-
	Transporte rodoviário (TR4)	uso espec.	1,1924	30,03%	0,51%	0,0687	25,91%	0,04%	0,0783	30,28%	2,86%
	Extração do óleo de soja	uso geral	5,9000	9,76%	2,09%	1,4150	9,76%	0,68%	0,3019	9,76%	9,05%
Transporte de matéria-prima	Bombeio para carregamento e descarregamento (BC5 + BD3)	uso geral	0,0221	15,81%	0,01%	0,0204	9,76%	0,01%	0,0000	0,00%	0,00%
	Transporte rodoviário (TR5)	uso espec.	1,2792	28,14%	0,54%	0,0587	28,14%	0,03%	0,0850	28,14%	3,05%
Produção da fonte de energia	Produção de B100	uso espec.	12,7188	9,79%	4,50%	0,6108	9,78%	0,29%	0,6088	9,79%	18,26%
	Insumos (metanol)	uso geral	14,4326	9,76%	5,10%	-	-	-	-	-	0,00%
Distribuição da fonte de energia	Bombeio para carregamento (BC2)	uso espec.	0,0126	15,81%	0,00%	0,0126	15,81%	0,01%	0,0000	0,00%	0,00%
	Transporte rodoviário (TR1)	uso espec.	3,2412	28,14%	1,37%	0,1487	28,14%	0,09%	0,2155	28,14%	7,73%
	Bombeio para descarregamento (BD2)	uso espec.	0,0126	15,81%	0,00%	0,0126	15,81%	0,01%	0,0000	0,00%	0,00%
	Bombeio para carregamento (BC6)	uso geral	0,0114	15,81%	0,00%	0,0114	15,81%	0,01%	0,0000	0,00%	0,00%
	Transporte rodoviário (TR6)	uso espec.	0,2045	29,18%	0,09%	0,0105	29,18%	0,01%	0,0135	100,00%	0,00%
	Alimentação da bomba (AB3)	uso espec.	0,0039	9,76%	0,00%	0,0039	9,76%	0,00%	0,0000	0,00%	0,00%
Total da cadeia de suprimentos			62,435	14,09%	23,05%	3,175	13,74%	1,59%	2,464	17,05%	79,40%
Uso final		uso espec.	217,664	9,76%	76,95%	204,641	9,76%	98,41%	0,687	9,76%	20,60%
Total do ciclo de vida total			280,099	10,73%	100,00%	207,816	9,82%	100,00%	3,151	15,46%	100,00%

Legenda: V_{fluxo} - variação percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) em relação a sua média; W_{fluxo} - peso percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) de um micro estágio em relação ao valor total do fluxo para o ciclo de vida Os parâmetros V_{fluxo} e W_{fluxo} são considerados no item 3.3.

Tabela 7 - ICV - E95-SPE95

Nível médio	Nível micro	Origem do dado	Energia total [kJ/pass.km]			Energia renovável [kj/pass.km]			Emissões de CO ₂ [g/pass.km]		
			Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}	Média	V _{fluxo}	W _{fluxo}
Produção de matéria-prima	Preparação do solo, plantio e colheita mecanizada	uso espec.	5,0853	23,14%	1,10%	0,2575	23,14%	0,06%	0,3575	23,14%	15,00%
	Suprimento de insumos agrícolas	uso espec.	1,2793	25,94%	0,28%	0,0646	25,94%	0,02%	0,0298	25,94%	1,26%
	Produção de insumos agrícolas	uso espec.	14,2283	14,01%	2,82%	-	-	-	-	-	-
Transporte de matéria-prima	Carregamento mecanizado (CM)	uso espec.	0,7466	23,14%	0,16%	0,0382	23,14%	0,01%	0,0525	23,14%	2,20%
	Transporte rodoviário (TR7)	uso espec.	6,2495	39,51%	1,56%	0,3155	39,51%	0,09%	0,4395	39,51%	21,31%
Produção da fonte de energia	Produção de ED95	uso espec.	138,3379	14,01%	27,42%	138,3379	14,01%	30,61%	0,0000	0,00%	0,00%
	Insumos (dinitrotolueno)	uso geral	16,5692	14,01%	3,28%	0,0000	0,00%	0,00%	-	-	-
Distribuição da fonte de energia	Bombeio para carregamento e descarregamento (BC7 + BD4)	uso geral	0,0506	20,10%	0,01%	0,0506	20,10%	0,01%	0,0000	0,00%	0,00%
	Transporte rodoviário (TR8)	uso espec.	5,7547	30,51%	1,34%	0,2817	30,51%	0,07%	0,3814	30,51%	17,28%
	Bombeio para carregamento (BC8)	uso espec.	0,0253	20,10%	0,01%	0,0253	20,10%	0,01%	0,0000	0,00%	0,00%
	Transporte rodoviário (TR9)	uso espec.	0,4522	33,64%	0,11%	0,0232	0,00%	0,01%	0,0299	33,64%	1,39%
	Alimentação da bomba (AB4)	uso espec.	0,0090	14,01%	0,00%	0,0090	14,01%	0,00%	0,0000	0,00%	0,00%
Total da cadeia de suprimentos			188,788	15,77%	38,10%	139,404	14,13%	30,89%	1,291	31,20%	58,44%
Uso final			312,308	14,01%	61,90%	312,308	14,01%	69,11%	1,080	14,01%	41,56%
Total do ciclo de vida total			501,096	14,67%	100,00%	451,712	14,05%	100,00%	2,370	23,37%	100,00%

Legenda: V_{fluxo} - variação percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) em relação a sua média; W_{fluxo} - peso percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) de um micro estágio em relação ao valor total do fluxo para o ciclo de vida Os parâmetros V_{fluxo} e W_{fluxo} são considerados no item 3.3.

As emissões líquidas de CO₂ (E_{CO_2}) foram calculadas por meio da Eq. (1) aplicada aos combustíveis fósseis. Admite-se que o CO₂ emitido pela fração dos biocombustíveis oriunda da biomassa (palha e bagaço de cana-de-açúcar, E95 e B100) é reabsorvido na produção de matéria-prima. A emissão de CO₂ da energia hidrelétrica foi desconsiderada por ser um fluxo de 2º nível (MCT 2002).

$$E_{CO_2} = CE_C \cdot F_{con} \cdot F_{corr} \cdot F_{ox} \cdot F_{CO_2} \quad (1)$$

Onde: CE_C – conteúdo energético [MJ/t];
 F_{con} – fator de conversão [tC/MJ];
 F_{corr} – fator de correção de PCS para PCI (0,90 – gases; 0,95 - líquidos);
 F_{ox} – fator de proporção do carbono oxidado (0,995 – gases; 0,99 - líquidos);
 F_{CO_2} - fator de conversão de C para CO₂ (3,67).

Com exceção da cadeia de suprimento do D100, considerada como referência, o combustível utilizado nos equipamentos agrícolas e caminhões é o B5, obrigatório por lei em todo o território nacional brasileiro. Para comparar com o uso do B5, estimou-se o consumo de energia total, energia renovável e emissão líquida de CO₂ para as cadeias de suprimento do B100 e do E95 utilizando-se D100.

3.2.1 Cadeia de suprimento - (D100, SPD100), (GNC, SPGNC), (B5GNC, SPDG) e (B5, SPB5).

O D100 e o GN consumidos na produção de petróleo e GN nacional foram obtidos de inventários anuais (1990 a 2003). Como critério de alocação utilizou-se o rateio mássico (0,043 kg de GN - 1 kg de petróleo). O D100 consumido na exploração e o GN reinjetado foram alocados exclusivamente ao petróleo, pois têm como finalidade a sua obtenção (PETROBRAS-CONPET, 2003). Para o petróleo, os valores obtidos foram: $0,0042 \pm 0,0005$ tEP/t (exploração) e 154 ± 11 MJ/barril (produção), e para o GN, 2004 ± 140 MJ/t (produção).

Para o petróleo importado, adotou-se $0,0075 \pm 0,0004$ tEP/t para exploração *on shore* e 97 ± 5 MJ/barril para produção no Golfo Pérsico. Admite-se o uso de D100 na exploração e de GN na produção (Sheehan, 1998).

O bombeio de petróleo nacional (DB2, DB3 e DB4) consome $0,0311 \pm 0,0031$ kWh/t.km de energia hidrelétrica e $(1,79 \pm 0,23) \cdot 10^{-4}$ tEP/t para aquecimento nos terminais (ETQ2 e ETQ3) 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 (DB1) (Sheehan, 1998) e o dado nacional para aquecimento nos terminais (ETQ1).

Para o transporte marítimo (TM), adotou-se o consumo de óleo combustível (1,54 a 1,64 g/t.milha) para navios de 300.000 TPB. O carregamento e descarregamento (BC1 e BD1) consomem entre 3,7 e 3,5 t/h de óleo combustível (TRANSPETRO, 2002 e Gabina, 2004).

A série histórica (1990 a 2003) do consumo de óleo combustível, GN, gás de refinaria, coque e energia hidrelétrica para refino de petróleo e processamento de GN foi obtida de PETROBRAS-CONPET (2003). Obteve-se a produção de D100 e derivados (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 hidrelétrica e o GN consumido pela massa dos derivados do petróleo e do GN seco e os demais combustíveis apenas pelos derivados de petróleo. Os valores obtidos foram: 3.798 ± 190 MJ/t (D100) e 509 ± 25 MJ/t (GN).

O consumo de energia para movimentação interna ou transferência de produtos por dutos entre a REDUC e BADUC (DB5), foi internalizado na REDUC, por limitação da disponibilidade dos dados.

O carregamento de caminhões tanque para distribuição (BC3 e BC4) consome $2,17 \pm 0,13$ MJ/t para o D100 e B5 (PETROBRAS-CONPET, 2003 e Marques, 2003).

Os valores de rendimento para caminhões tanque (TR2 e TR3) variam entre 1,81 e 2,25 km/l (Volvo, 2000). Adotou-se o consumo de energia hidrelétrica no abastecimento (AB1 e AB2) como $0,654 \pm 0,033$ MJ/m³ (Gilbarco, 2004). Os estoques na base (ETQ4 e ETQ6), o descarregamento dos caminhões tanque (gravidade) e os estoques nos postos de abastecimento (ETQ7 e ETQ8) não consomem energia. Emissões evaporativas não fazem parte do escopo do trabalho.

A energia hidrelétrica consumida no transporte de GN até o processamento (DC1) foi obtida de série histórica (1990 a 2003) no valor de $30 \pm 0,9$ MJ/t (PETROBRAS-CONPET, 2003). Utili-

zou-se o mesmo valor, aproximação subestimada, para a distribuição de GN (DC1), em função da indisponibilidade de dados específicos. Para compressão para abastecimento (AC1) adotou-se 1.021 ± 94 MJ/t, ainda segundo a PETROBRAS-CONPET (2003).

3.2.2 Cadeia de suprimento - (B100, SPB100)

Admite-se 2,4 ts/ha (ts: tonelada de soja) para a produção da soja e 18% em massa de óleo no grão (IBP, 2007).

Por uma questão de coerência com a prática apresentada por D'Agosto e Ribeiro (2009), considerou-se a energia embutida nos insumos agrícolas e para seu suprimento, embora se trate de fluxos de 2º nível. O consumo de energia para a produção de matéria-prima totalizou 5.613 ± 328 MJ/tB100 (tB100: tonelada de B100).

O transporte (TR4) da soja até a esmagadora utiliza tratores de capacidade de 12t e rendimento de 1,34 km/l para velocidade média de 10 km/h por distância de 8 ± 1 km (Silveira, 1991).

Admite-se que toda a energia necessária para a produção do óleo de soja (recebimento e estocagem, preparação da soja, extração do óleo, recuperação do óleo, degomagem do óleo, recuperação do solvente, processamento do farelo e tratamento dos resíduos) é obtida da queima de 351,28 kcal/ts de óleo combustível, 182,6 kcal/ts de vapor e 72,5 kWh/ts de energia hidrelétrica (Sheehan *et al*, 1998).

O transporte (TR5), carregamento e descarregamento (BC5 e BD3) do óleo de soja para as usinas de produção de B100 tiveram tratamento análogo ao do B5.

As usinas de produção de B100 consomem 2.347 ± 10 MJ/tB100 e considera-se a energia embutida no metanol (2.663 MJ/tB100), de acordo com Sheehan *et al* (1998) e Boustead (1979).

O transporte (TR1), carregamento (BC2), descarregamento (BD2), estocagem na BADUC (ETQ5), carregamento para distribuição (BC6), distribuição (TR6), estocagem no posto de abastecimento (ETQ9) e o abastecimento dos ônibus (AB3) tiveram tratamento análogo ao do B5.

3.2.3 Cadeia de suprimento - (E95, SPE95)

Admite-se o rendimento de 65 tc/ha (tc: tonelada de cana-de-açúcar) para a produção de cana-de-açúcar. Em São Paulo, adotou-se o rendimento de 85,4 leh/tc (leh: litros de etanol) (CTC,

2003) e, para os demais estados, 73,0 leh/tc (Lima e Marcondes, 2002).

Quanto à energia embutida nos insumos agrícolas e seu suprimento, adotou-se procedimento análogo ao B100. 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 B5 ($25,10 \pm 2,25$ MJ/tc) (CTC, 2003). O consumo de energia para a produção de matéria-prima totalizou 1993 ± 59 MJ/teh (teh: tonelada de etanol).

O carregamento (BC) e transporte (TR7) de cana-de-açúcar até as usinas utiliza carregadeiras e caminhões que consomem B5 ($16,25 \pm 1,62$ l/ha e $0,0220 \pm 0,0011$ l/t.km, respectivamente) segundo CTC (2003) e Ribeiro (2004), totalizando 492 ± 25 MJ/teh.

Toda a energia necessária para a produção de etanol (moagem, fermentação, destilação e geração de energia elétrica) é obtida da queima de 232 kg/tc de bagaço (PCI = 1650 kcal/kg), com eficiência na conversão de vapor de 78%. O excedente de 8% de bagaço é considerado coproduto, devido ao seu potencial de geração de energia elétrica comercializável (Coelho *et al*, 1997). Obteve-se 58% de eficiência energética no processo, 7% para o balanço de massa, 0,3% para o balanço de energia e 13.058 ± 668 MJ/teh.

Para produção do E95, utiliza-se um aditivo com conteúdo energético de 26.276 MJ/t, segundo Boustead e Hancock (1979).

Por analogia ao B5, obteve-se 464 ± 72 MJ/tE95 para o carregamento (BC7), descarregamento (BD4) e transporte da usina até a BADUC (TR8) e $48,6 \pm 9$ MJ/tE95 para a distribuição urbana (BC8 e TR9) e abastecimento (AB4).

3.2.4 Uso Final

A Tabela 1 apresenta parâmetros de uso final e os rendimentos energéticos dos SP considerados neste trabalho que foram convertidos para a unidade funcional [kg/pass.km] utilizando suas massas específicas e a ocupação média dos veículos. Para o caso do D100, B5, B100 e SPDG, admitiu-se o mesmo rendimento energético do motor, variando-se o consumo mássico do combustível em função do respectivo conteúdo energético.

3.3 Fase 3: Avaliação dos dados

Busca-se orientar uma possível reavaliação dos dados por meio da identificação de fluxos crí-

ticos. Para isso, são definidos: V_{fluxo} como a variação percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) em relação a sua média e W_{fluxo} como o peso percentual de um fluxo (energia total, energia renovável e emissão de CO₂) de um micro estágio em relação ao valor total do fluxo para o ciclo de vida. São considerados críticos os fluxos onde $W_{fluxo} \geq W_{mim}$ e $V_{fluxo} \geq V_{max}$. Adotou-se: W_{mim} (peso mínimo) = 20% e V_{max} (variação máxima) = 10% (D'Agosto e Ribeiro 2009).

Nas Tabelas 2 a 7, observa-se 20 fluxos onde $W_{fluxo} \geq 20\%$, onde 11 apresentam $V_{fluxo} \geq 10\%$. Nenhum envolve dados de uso geral, não sendo críticos e optando-se por sua manutenção. O principal aspecto a ser verificado é a consistência dos dados.

Valores maiores que W_{mim} ocorrem para os fluxos relacionados ao consumo de energia renovável nos micro-estágios DB3, DB4 e refino. Isto decorre da combinação da distância de bombeio (334 km) e da variabilidade dos dados obtidos em PETROBRAS-CONPET (2003), considerados característicos dos micro-estágios.

Observa-se variações acima de W_{mim} e V_{max} no consumo de energia total e emissão líquida de CO₂ no uso final da alternativa GNC-SPGNC e no consumo de energia total, energia renovável e emissão líquida de CO₂ no uso final da alternativa E95-SPE95. No caso da alternativa GNC-SPGNC, a alta eficiência energética da cadeia de suprimento do GNC e o baixo rendimento energético do SPGNC potencializam o peso do consumo de energia de origem fóssil no uso final desta alternativa. Adicionalmente, os dados de campo de rendimento energético do SPGNC compuseram uma amostra que forneceu amplo intervalo de variação para 90% de significância. O ideal seria dispor de

um banco de dados com mais experimentos.

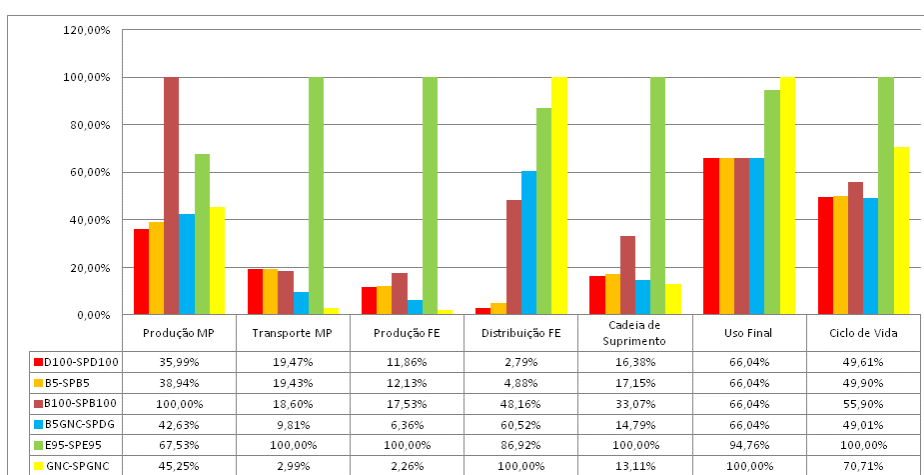
Para o consumo de energia renovável na compressão do GNC nos postos de abastecimento (AC1), só foi possível obter referências para valores médios, segundo Sobrinho (1999), Gômara (2001) e Blanco (2004). O refinamento destes dados, considerando sua variação, representa oportunidade de melhoria.

No caso da alternativa E95-SPE95, as situações de maiores pesos e variações nos fluxos do uso final estão associadas ao baixo rendimento energético do SPE95 e a limitação de disponibilidade de dados.

Em função da dependência do B5, os fluxos de emissão líquida de CO₂ para preparação do solo, cultivo e colheita mecanizada da alternativa B100-SPB100 e transporte da cana-de-açúcar (TR7) para a alternativa E95-SPE95 apresentaram condições desfavoráveis de peso e variação. O mesmo ocorreu para o consumo de energia total e renovável para a produção do E95, uma vez que a produção de etanol é energia-intensiva e ainda se considera o conteúdo energético do aditivo que compõe o E95.

3.4 Fase 4: Comparação dos resultados e discussão

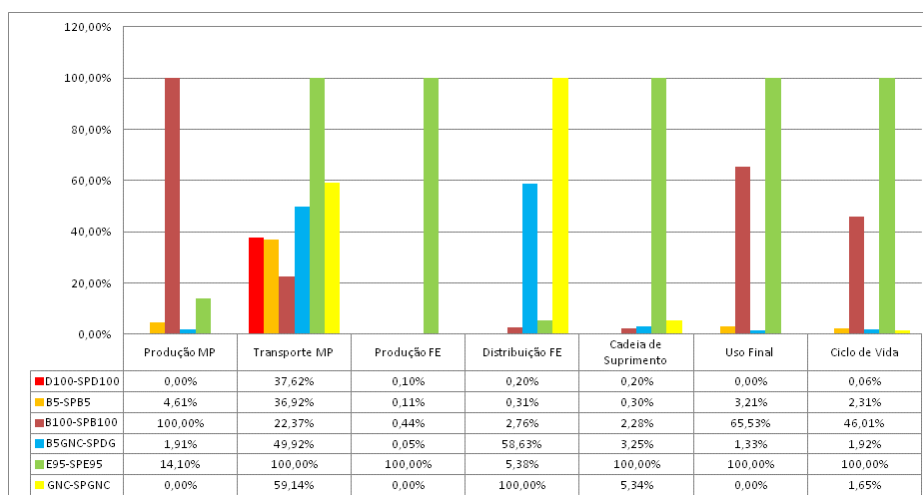
Optou-se pela comparação paramétrica onde, para cada alternativa da Tabela 1, o maior valor dos fluxos é considerado como referência. Nos casos do consumo de energia total e emissão líquida de CO₂, os maiores valores representam os piores desempenhos. O inverso para o consumo de energia renovável. As figuras 5, 6 e 7 foram elaboradas a partir das Tabelas 2 a 7 e servirão de base para a comparação dos resultados.



Legenda: MP – Matéria-Prima, FE – Fonte de Energia

Nota: Alternativas D100-SPD100, B5-SPB5, B100-SPB100, B5GNC-SPDG, E95-SPE95 e GNC-SPGNC como definidas na Tabela 1

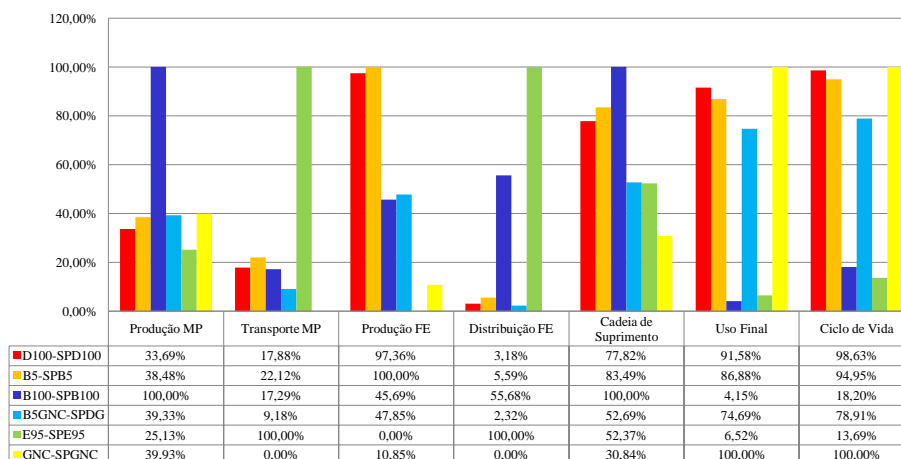
Figura 5 - Consumo de energia total por alternativa



Legenda: MP –Matéria-Prima, FE – Fonte de Energia

Nota: Alternativas D100-SPD100, B5-SPB5, B100-SPB100, B5GNC-SPDG, E95-SPE95 e GNC-SPGNC como definidas na Tabela 1

Figura 6 - Consumo de energia renovável por alternativa



Legenda: MP –Matéria-Prima, FE – Fonte de Energia

Nota: Alternativas D100-SPD100, B5-SPB5, B100-SPB100, B5GNC-SPDG, E95-SPE95 e GNC-SPGNC como definidas na Tabela 1

Figura 7 - Emissão líquida de CO2 por alternativa

3.4.1 Consumo de energia total

A alternativa E95-SPE95 apresenta maior consumo de energia total em toda cadeia de suprimento e no ciclo de vida, com maior consumo de energia total no transporte de matéria-prima, pela baixa produtividade do processo de transformação da cana-de-açúcar em etanol (de 73,0 a 84,5 leh/tc) e cujo estágio de produção da fonte de energia apresenta valor 44 vezes maior que a alternativa de melhor resultado GNC-SPGNC.

Quanto ao consumo de energia total, as alternativas D100-SPD100, B5-SPB5 e B5GNC-SPDG podem ser consideradas semelhantes, não havendo diferenças dentro de um intervalo de variação de $\pm 1,5\%$.

A alternativa B100-SPB100 apresenta o maior consumo de energia total para a produção de matéria-prima por agregar os micro-estágios de produção agrícola, a energia embutida nos insu-

mos de produção e a extração do óleo de soja. De forma semelhante, E95-SPE95 é a segunda mais energético-intensiva quanto à produção de matéria-prima. Por outro lado, as alternativas que consideram maior participação dos combustíveis fósseis (D100, B5 e GNC) ou o SPDG, consomem entre 55% e 64% menos energia total neste meso-estágio.

Por utilizar dutos, a alternativa GNC-SPGNC apresenta o melhor resultado no transporte de matéria-prima, 15% a 16% melhor que as alternativas que consideram o transporte de petróleo e óleo de soja onde mais do que 75% da matéria-prima transportada é convertida em FE ou em coprodutos de valor comercial.

A alternativa GNC-SPGNC apresenta de 13% a 16% do consumo de energia total para a produção da fonte de energia encontrado para

D100-SPD100, B5-SPB5 e B100-SPB100. Como o GN está associado ao petróleo e seu processamento feito em unidade contígua à refinaria, houve dificuldade em identificar a quantidade de energia total consumida, tendo sido adotados valores subestimados e passíveis de aprimoramento.

A necessidade de comprimir o GN para abastecimento ocasiona o maior consumo de energia total de GNC-SPGNC para distribuição da fonte de energia, impactando negativamente B5GCN-SPDG.

O consumo de energia total para a distribuição da fonte de energia das alternativas B100-SPB100 e E95-SPE95 é impactado pelas grandes distâncias de transferência pelo modo rodoviário do B100 e do E95 das usinas de produção para a BADUC.

O menor consumo de energia total da alternativa GNC-SPGCN na cadeia de suprimento é reflexo dos resultados obtidos em três dos quatro meso-estágios. O inverso ocorre com E95-SPE95, ficando B100-SPB100 em situação intermediária, com 1/3 do consumo de energia total da pior alternativa e D100-SPD100, B5-SPB5 e B5GNC-SPDG próximas da melhor alternativa, com variações menores que 4%.

Em função do baixo rendimento energético do SPGNC e alto PCI do GNC, GNC-SPGNC apresentou o pior consumo de energia total para o uso final. Por razões semelhantes, E95-SPE95 apresenta-se com resultado muito próximo (-5,24%) da pior alternativa.

Em termos de uso final as alternativas D100-SPD100, B5-SPB5, B100-SPB100 e B5GNC-SPGNC são análogas, uma vez que o rendimento energético dos motores do ciclo Diesel que utilizam D100, B5, B100 e o SPDG são os mesmos.

Para o ciclo de vida, D100-SPD100, B5-SPB5 e B5GNC-SPGNC apresentam menores consumos de energia total, podendo ser considerados como equivalentes.

O melhor resultado em termos de consumo de energia total da alternativa GNC-SPGNC para a cadeia de suprimento não compensa o pior no uso final e esta alternativa é a 2ª pior em termos de ciclo de vida.

Para D100-SPD100 e GNC-SPGNC, a cadeia de suprimento consome, respectivamente, 12% e 7% da energia total do ciclo de vida, valores comparáveis com os obtidos por IEA (2009), EUCAR(2007) e Yan e Crookes (2009), este último para países em desenvolvimento, que variam de 8% a 20% para o D100 e de 7% a 24% para o

GNC. Para B100-SPB100, a cadeia de suprimento consome 22% da energia total do ciclo de vida, comparável a experiência europeia (21% a 22%) EUCAR (2007). Porém, inferior aos melhores valores norte-americanos, italianos e chineses (30% a 49%), segundo Yan e Crookes (2009).

3.4.2 Consumo de energia renovável

Quanto ao consumo de energia renovável, E95-SPE95 apresenta os melhores resultados para dois meso-estágios da cadeia de suprimento e para o uso final, o que a coloca em posição de destaque, com valores muito superiores as demais alternativas.

Isto se deve a produção de E95 consumir bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia para o meso-estágio de maior intensidade energética e pelo uso de B5 na produção agrícola e transporte de matéria-prima.

Para as alternativas D100-SPD100, B5-SPB5 e B5GCN-SPGNC, observa-se pouca participação de energia renovável nos meso-estágios da cadeia de suprimento, estando esta associada ao uso de energia hidrelétrica ou B5.

A adição de 5% de B100 no D100 aumenta em 47,5% o uso de energia renovável na cadeia de suprimento de D100-SPD100, com acréscimo de 0,58% no consumo de energia total e redução de 3,8% na emissão líquida de CO₂ no ciclo de vida. No caso de B100-SPB100, o uso de B5 aumenta em 51,15% o uso de energia renovável na cadeia de suprimento, com acréscimo de 0,03% no consumo de energia total e decréscimo de 7% na emissão líquida de CO₂ no ciclo de vida.

O uso de B5 não apresenta impactos perceptíveis no consumo de energia renovável (+0,69%) ou energia total (+0,04%) na cadeia de suprimento de E95-SPE95 que já apresenta grande utilização deste insumo energético. Porém, observa-se redução de 9,29% na emissão líquida de CO₂ para a cadeia de suprimento que atinge 5,28% no ciclo de vida.

O uso de energia hidrelétrica na extração de óleo de soja reflete no melhor resultado de B100-SPB100 quanto ao consumo de energia renovável na produção de matéria-prima. Nas demais alternativas o consumo de energia renovável para produção de matéria-prima se deve ao uso de B5.

Para GNC-SPGNC, utiliza-se energia hidrelétrica para o transporte e distribuição do GNC, meso-estágios de maior participação de energia renovável na sua cadeia de suprimento.

Quanto ao uso final, E95-SPE95 e B100-

SPB100 apresentam os dois melhores valores quanto ao uso de energia renovável, uma vez que utilizam biocombustíveis. Este resultado reflete-se para todo o ciclo de vida.

O peso dos combustíveis fósseis na cadeia de suprimento de D100-SPD100 e GNC-SPGNC é da ordem de 12% e 5%, valores inferiores aos encontrados por Yan e Crookes (2009) para o D100 (19% a 26%) e GNC (15% a 21%), pois no Brasil, em sua maioria, utiliza-se energia hidrelétrica.

Para B100-SPB100 e E95-SPE95, 21% e 9% da energia consumida no ciclo de vida é de origem fóssil, valores comparáveis com EUCAR (2007) e Yan e Crookes (2009), sendo de 22% a 21% (B100) e de 12% a 48% (etanol) segundo Luo *et al* (2019), este último para a experiência chinesa.

3.4.3 Emissão líquida de CO₂

Emissões líquidas de CO₂ estão associadas aos consumos de combustíveis fósseis por meso-estágio do ciclo de vida. Assim, B100-SPB100 apresenta a maior emissão líquida de CO₂ para produção de matéria-prima, pela sua dependência no uso de B5 para a produção agrícola e transporte de grãos e óleo combustível para extração de óleo de soja.

As alternativas que dependem majoritariamente de combustíveis fósseis (D100-SPD100, B5-SPB5, B5GCN-SPGNC e GNC-SPGNC) na produção de matéria-prima também apresentam significativas emissões líquidas de CO₂.

Em função do baixo rendimento no transporte rodoviário de cana-de-açúcar, E95-SPE95 apresenta as maiores emissões líquidas de CO₂ no transporte de matéria-prima. Em virtude da maior eficiência energética dos modos de transporte e da conversão em coproduto de valor comercial das matérias-primas, as demais alternativas apresentam menores emissões líquidas de CO₂, mesmo quando dependem de combustíveis fósseis para transporte.

Por utilizar apenas energia hidrelétrica para o transporte de matéria-prima e distribuição da fonte de energia, GNC-SPGNC não apresenta emissões líquidas de CO₂ nestes meso-estágios.

Por depender majoritariamente de derivados de petróleo para produção da fonte de energia, D100-SPD100 e B5-SPB5 apresentam as maiores emissões líquidas de CO₂. Ao contrário, por usar exclusivamente bagaço de cana de açúcar para produção do etanol, E95-SPE95 apresenta emissão

líquida de CO₂ nula.

O impacto das longas distâncias de transporte pelo modo rodoviário na distribuição da fonte de energia para B100-SPB100 e E95-SPE95 as coloca nas duas piores posições em termos de emissões líquidas de CO₂. Por outro lado, alternativas relacionadas aos combustíveis fósseis (D100-SPD100, B5-SPB5 e B5GCN-SPGNC) apresentam emissões marginais, não chegando a 6% da pior alternativa.

Em termos de cadeia de suprimento, os resultados de B100-SPB100 para produção de matéria-prima, produção da fonte de energia e distribuição da fonte de energia a coloca na pior posição quanto a emissões líquidas de CO₂, sendo seguida pelas alternativas que dependem majoritariamente de derivados de petróleo (D100-SPD100 e B5-SPB5). Neste macro-estágio, a alternativa que apresenta melhor desempenho é GNC-SPGNC em função de uso de energia hidrelétrica para seu transporte e distribuição e da baixa fração de energia de origem fóssil associada à produção da fonte de energia.

Quanto ao uso final, os combustíveis de origem fóssil apresentam as maiores emissões líquidas de CO₂, ficando a alternativa GNC-SPGNC com o pior resultado em função do baixo rendimento energético do SPGNC. Esta situação impacta no resultado do ciclo de vida que apresenta distribuição análoga à verificada para o uso final.

A cadeia de suprimento de D100-SPD100 e GNC-SPGNC é responsável por 11% e 4% das emissões líquidas de CO₂, valores inferiores aos encontrados em EUCAR (2011) e Yan e Crookes (2009) (20%), impacto da situação privilegiada dos locais de exploração e produção considerados e do uso de energia hidrelétrica.

Para a produção de B100, segundo Hou *et al* (2011), apresentam-se os seguintes valores de emissão de CO₂ por meso-estágio: 32% - produção de matéria-prima, 2% - transporte de matéria-prima, 60% - produção da fonte de energia e 1% - transporte da fonte de energia. Para B100-SPB100, estes valores são, respectivamente: 48%, 3%, 19% e 7%. Observa-se maior aderência nos dois primeiros meso-estágios, uma vez que uso de energia hidrelétrica e GN minimizam a emissão líquida de CO₂ para a produção de fonte de energia brasileira e pelo fato do transporte de B100 no Brasil ser feito por distância 200 vezes maior que a adotada na chinesa.

4 CONCLUSÕES

O procedimento de ICV possibilitou a análise sistemática e crítica e a comparação de resultados de consumo de energia total, energia renovável e a emissão líquida de CO₂ para seis alternativas energéticas para o transporte público urbano no MRJ, conforme apresentado no item 3.4 deste trabalho. Isto ratifica sua adequação e representa uma contribuição para o desenvolvimento e divulgação de conhecimento do ciclo de vida de alternativas energéticas para o transporte em países em desenvolvimento, uma vez que considera dados representativos de uma parte da realidade brasileira e até onde se tem conhecimento, tratam-se de resultados inéditos.

A identificação da melhor alternativa depende dos aspectos a valorizar. Em termos de consumo de energia total, D100-SPD100, B5-SPB5, B5GNC-SPDG e B100-SPB100 se destacam nesta ordem. Se o uso de energia renovável e a redução de emissões líquidas de CO₂ forem as metas principais, sobressaem E95-SPE95 e B100-SPB100. GNC-SPGNC não se destaca em nenhuma situação se comparadas às demais.

Foram elaborados MCV (Figuras 2, 3 e 4) e ICV (Tabelas 2 a 7) que consideram a realidade do ERJ, envolvendo o ciclo de vida de derivados de petróleo, GN e biocombustíveis que podem ser aplicados em qualquer tipo de atividade de transporte, bastando para isso que se adeque o uso final. Com isso destaca-se a robustez e flexibilidade do procedimento em face de diferentes aplicações.

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 quanto ao uso de B5 (subitem 3.4.2) e do SPDG, objetivos deste trabalho.

No entanto, os resultados obtidos limitam-se à abrangência do modelo (MRJ). Esta situação privilegia as alternativas D100-SPD100, B5-SPB5, GNC-SPGNC e B5GNC-SPDG pela proximidade a produção da matéria-prima, em sua totalidade ou em parte, e o uso final. Tais resultados não devem ser adotados como médias nacionais, o que implicaria na determinação de outra abrangência para os modelos de ciclo de vida (MCV).

O MCV estabelecido para o GN associado ao petróleo privilegia as alternativas GNC-SPGNC e B5GNC-SPGNC no que se refere ao consumo de energia total na cadeia de suprimento

e imprecisão dos dados para a produção e distribuição do GNC podem ter levado a subestimar o consumo de energia total para estes meso-estágios. Os dois últimos itens representam oportunidades de melhoria no estudo.

Este trabalho limita-se a uma abordagem preliminar quanto à realização de ICV, recomenda-se a realizar um aprofundamento quanto à coleta de dados, para que se permita avaliar outros impactos ambientais: poluentes atmosféricos locais, outros gases de efeito estufa, água e insumos produtivos.

Não se considerou, nesta primeira abordagem, custos e viabilidade financeira das alternativas (GNC, SPGNC), (B5GNC, SPGNC) e (E95, SPE95) quanto ao seu uso final, sendo esta, outra sugestão para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ANP, Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis / Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. – Rio de Janeiro: ANP, 2010.
- ANP, Dados da produção e consumo de combustíveis. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- ANP, Refino do petróleo, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003. In: <http://www.anp.gov.br/petro>, acesso em 25/03/2003.
- ANTP, Sistema de Informações da Mobilidade Urbana Relatório Comparativo 2003-2009. Associação Nacional dos Transportes Públicos, ANTP, São Paulo, SP, 2010.
- Blanco, J. Identificação da rede de gasodutos da CEG. Personal communication. VNG Market Development Manager, Companhia Estadual de Gás, Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- Boustead, I. e G. F. Hancock, Handbook of industrial energy analysis. John Wiley and Sons Inc., N.Y., USA, 1979, pp. 391, nota 323.
- CENTRAN. Perenização do Plano Nacional de Logística e Transportes –PNLT - Relatório Parcial II: Produtos Perigosos. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro - CENTRAN – Centro de Excelência em Engenharia de Transportes. 2009.
- CNPE, Resolução CNPE nº 6, de 16 de setembro de 2009, do Conselho Nacional de Política Energética, Brasília. DF, Brasil, 2009.
- Coelho, S. T. S. Oliveira Jr. e D. Zylbersztajn, Thermo-economic analysis of electricity cogeneration from sugarcane origin, Third Biomass Conference of the Americas, Montreal, August 24-29, v. II, 1997, pp. 1631-1640.
- Costa, J. A. Cultura da soja, first Ed., Porto Alegre, Ivo Manica e José Antônio Costa Editores, 1996.

- CTC, 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, 2003.
- D'Agosto, M. de A., C. D. R. Souza, S. D. Silva, M. A. V. Silva, I. C. Leal Junior, J. M. M. Rodrigues, M. L. R. Almeida e A. P. Barboza, Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro. Relatório Final. Fundação COPPETEC, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- D'Agosto, M. de A. Avaliação do potencial de uso de sistema diesel-gás em ônibus urbano tipo II em linha da região metropolitana do Rio de Janeiro. Primeiro Relatório de Projeto. Fundação de Carlos Chagas Freitas de Amparo a Pesquisa do Rio de Janeiro – FAPERJ, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- D'Agosto, M. de A. e S. K., Ribeiro, Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels, A life cycle inventory (LCI) approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009) 1326–1337.
- D'Agosto, M. de A., C. D. R., Souza, S. D., Silva e A. P., Barboza, Alternativas tecnológicas para ônibus no Rio de Janeiro. Relatório Parcial 1. Fundação COPPETEC, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- Diehl, S. R. L. M. T. G. Junquetti, Soja, 2002. In: www.ufrgs.br/icta/agronom/soja.htm, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, acesso em 23/09/2004.
- Dobson, H. e A. Bersford, *Maritime Atlas of World Ports and Shipping Places*, London, Lloyd's of London Press Ltd., 1989.
- EPE, Balanço Energético Nacional 2010, Empresa de pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, DF, Brasil, 2010.
- EUCAR. Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. European Council for Automotive R&D, European Commission, Version 2c, 2007.
- Freitas, R. C. Dados sobre suprimento de biocombustíveis (etanol e biodiesel) no Estado do Rio de Janeiro. Superintendência de Abastecimento – SAB, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- Freitas, R. C. Perfil da frota de combustíveis líquidos. Superintendência de Abastecimento – SAB, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- Gabina, F. de C. Dados sobre a frota de petróleo da Transpetro e sua operação”, Comunicação pessoal, engenheiro naval, FRONAPE – Frota Nacional de Petroleiros – GETEC, Rio de Janeiro, 2004.
- Gilbarco, Linha de produtos Gilbarco, 2004. In: www.gilbarco.com.br, acesso em 28/09/2004.
- Gômara, R. Identificação das características de distribuição de GN para os postos de service. Personal communication. Chief Representative of Aspro Compressors for NG, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- Hou, J., P. Zhang, X. Yuan e Y. Zheng, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 5081–5091.
- IBP, Planejamento Estratégico do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel BASE TECNOLÓGICA. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- IEA. *Automotive Fuels for the Future. The Search for Alternative*. Office of Energy Efficiency Technology and R&D, International Energy Agency, Paris, 1999.
- Jansen, R. D. Rutz, A. Hofer, J. M. S. Santos, S. Coelho, S. Velasquez, S. Capaccioli, G. Landhal, J. Ericson. Bioethanol as a sustainable transport fuel in Brazil and Europe. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lion, France, 2010.
- King, L. E. *Statistical Analyses Manual of Transportation Engineering Studies - Appendix C*, Prentice Hall Inc, 1994, pp. 392-412.
- Lima, L. DA R. e A. de A. Marcondes, Álcool carburante, Uma estratégia brasileira, first ed., Editora de UFPR, Curitiba, 2002.
- Luo, L., E. van der Voet e G. Huppés, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1613–1619.
- Macedo, I de C. 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.
- Marques, G. G., L. S. Izquierdo, V. e F. Balieiro, Avaliação dos Resultados dos Testes Experimentais com Biodiesel (B20 e Puro) de Óleo Residual de Fritura – O Estudo de Caso da Frota de Caminhões da Martin Brower/Mc Donald's. SAE Technical Paper. Society of Automotive Engineers, 2011.
- Marques, P. S. V. 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, 2003.
- Maurice, B., R. Frischknecht, V. Coelho Schwirtz e K. Hungerbühler, Uncertainty Analysis in the Life Cycle Inventory, Application to the Production of Electricity with French Coal Power Plants, *Journal of Cleaner Production*. 8 (2000) 95-108.
- MCT, 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, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, DF, 2002.
- Menezes, H. L. 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, 2004
- Nogueira, L. A. H. Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana de açúcar. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Campinas. 1987
- Patzek, T. W. Ethanol from corn: just how unsustainable it is?, In: U. C. Berkeley, Spring, Freshman Seminar CE24, Civil and Environmental Engineering, U. C. Berkeley, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- PETROBRAS-CONPET, Relatório Sobre Conservação de Energia no Sistema Petrobras, C-CONPET, Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- Ribeiro, E. A. C. Anuário do Transporte de Carga 2004, OTM Editora Ltda., São Paulo, 2004.
- Rio Oil & Gas, Strategies for World Energy, In: Official publication of the 17th World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002, pp. 158 – 159.

- SEINPE, Balanço Energético do Estado do Rio de Janeiro 1980 – 1999, Rio de Janeiro, Secretaria de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo, 2000.
- Sheehan, J.,V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski e H. Shapouri. Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. Final Report. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 1998.
- Silveira, G. M. As máquinas para colheita e transportes. first ed., São Paulo, Editora Globo S.A., 1991.
- SMT, Dados de desempenho das linhas de ônibus. Secretaria Municipal de Transportes Urbanos, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- SMT, Dados de desempenho das linhas de ônibus. Secretaria Municipal de Transportes Urbanos, Rio de Janeiro, RJ, 2006^a.
- SMT, Plano Diretor de Transportes da Cidade do Rio de Janeiro, Secretaria Municipal de Transportes, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006^b.
- Sobrinho, C.A. Análise Comparativa do Desempenho de Compressores de Gás Natural; Características Técnico Econômicas. In 7th International Seminar on Natural Gas and LPG, IBP, Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- TRANSPETRO, Relatório Anual 2001, Petrobras Transporte S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- Volvo, Estimativa de Custos de Transportes, Volvo do Brasil S.A., São Paulo, 2000.
- Yan, X. e R.J. Crookes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2505–2514.