

MARCELO DOS SANTOS CREMER

Estimativas de consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa pelo uso  
de combustíveis no transporte rodoviário brasileiro: análise poço-roda

São Paulo

2014

MARCELO DOS SANTOS CREMER

Estimativas de consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa pelo uso de combustíveis no transporte rodoviário brasileiro: análise poço-roda

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química

Área de Concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Gil Anderi da Silva

São Paulo

2014

## Agradecimentos

Ao professor Gil Anderi da Silva pela orientação durante a realização deste trabalho.

À minha família, representada pelos meus pais, por todo o apoio, amor e carinho necessários para persistir na caminhada que chega a este marco tão importante. Em especial, por todo o esforço desempenhado em me apresentar a importância da educação e do conhecimento na evolução do ser humano.

A todos meus amigos, que com uma pequena ajuda foram capazes de fornecer tudo que eu necessitei nos momentos mais importantes desses cinco anos e cuja companhia e apoio continuarão imprescindíveis no futuro.

Aos amigos do Instituto de Energia e Meio Ambiente, não somente pelo vasto conhecimento adquirido e compartilhado durante o período de estágio, mas também pelo valioso auxílio na minha formação como engenheiro e como cidadão.

## Resumo

O transporte rodoviário é o principal modal na composição da matriz de transporte brasileira, tanto de cargas quanto de passageiros. A elevada utilização desse meio de transporte está associada ao intenso consumo de energia e, conseqüentemente, às elevadas emissões de poluentes locais e gases de efeito estufa relacionadas a esse modal. De modo a ter uma visão ampliada e mais criteriosa a respeito do transporte rodoviário, são necessárias ferramentas capazes de estimar os impactos ambientais decorrentes da utilização desse modal no país. Inventários de emissões publicados pelo poder público se mostram importantes instrumentos ao avaliar esses impactos, porém se restringem à etapa de uso final dos combustíveis (tanque-roda). O presente trabalho procura incorporar conceitos da análise de ciclo de vida (ACV) dos combustíveis e, por meio da análise poço-roda, estimar o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa direto relacionadas às etapas de extração de matéria-prima e de transformação das fontes de energia na produção dos combustíveis. Contabilizando os resultados já disponíveis para emissões na etapa tanque-roda, foram levantados e estimados fatores de emissão e consumos específicos de energia para as atividades da etapa poço-tanque dos combustíveis. Através da alocação energética dos impactos já estimados para combustíveis fósseis e da aplicação de fatores existentes na literatura para combustíveis renováveis foi possível realizar as estimativas da análise poço-roda. A aplicação da nova metodologia estimou que, em 2012, estiveram associadas ao transporte rodoviário 204,4 Mt CO<sub>2</sub>e (contra 184,9 Mt CO<sub>2</sub>e quando restritas à etapa tanque-roda) e que além dos 71,9 Mtep consumidos na queima de combustíveis em veículos automotores rodoviários, mais 6,2 Mtep estão associados às atividades da etapa poço-tanque dos combustíveis. Apontando para a importância de estimativas relacionadas ao ciclo de vida dos combustíveis utilizados nesse modal de modo a tornar mais precisa a avaliação dos impactos promovidos por ele.

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Percentual dos combustíveis consumidos no transporte rodoviário em 2012 de origem importada .....	16
Tabela 2 - Unidades dos fatores utilizados nas estimativas poço-tanque .....	20
Tabela 3 - Consumo de combustível tanque-roda no transporte rodoviário em 2012 em ktep .....	24
Tabela 4 - Emissões de CO <sub>2</sub> no transporte rodoviário em 2012 (tanque-roda) em kt .....	24
Tabela 5 - Emissões de CH <sub>4</sub> no transporte rodoviário em 2012 (tanque-roda) em kt	25
Tabela 6 - Emissões de N <sub>2</sub> O no transporte rodoviário em 2012 (tanque-roda) em kt .....	25
Tabela 7 - Atividades poço-tanque dos combustíveis fósseis e fontes de informação .....	27
Tabela 8 - Fluxos de consumo de energia nos subsetores de interesse do Setor Energético e em suas Centrais Elétricas Autoprodutoras (CEAs) em 2012 (ktep)....	30
Tabela 9 - Associação entre os combustíveis analisados e as áreas de emissões fugitivas .....	33
Tabela 10 - Emissões fugitivas de GEE em kt por área de emissão e por tipo de gás em 2012 .....	33
Tabela 11 - Atividades da etapa poço-tanque do etanol, consumos específicos de energia e fatores de emissão e fontes de informação .....	36
Tabela 12 - Fluxos de consumo de energia nos subsetor Álcool do Setor Energético (destilarias) e em suas Centrais Elétricas Autoprodutoras (CEAs) em 2012 (ktep) ..	38
Tabela 13 – Atividades da etapa poço-tanque do biodiesel de soja, consumos específicos de energia e fatores de emissão e fontes de informação .....	39
Tabela 14 – Emissões associadas às etapas poço-tanque dos combustíveis fósseis em kt em 2012.....	41
Tabela 15 - Consumo específico de energia e fatores de emissão poço-tanque para os combustíveis fósseis .....	45
Tabela 16 - Consumo específico de energia (ktep/ktep de etanol) e fatores de emissão (ktGEE/ktep de etanol) poço-tanque para os combustíveis fósseis .....	48
Tabela 17 - Densidades energéticas em 2012 e fatores de emissão de CO <sub>2</sub> dos combustíveis .....	65
Tabela 18 - Coeficientes de destinação e fatores de emissão utilizados nas estimativas de emissões de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O nos subsetores do setor energético .....	67
Tabela 19 - Fatores de emissão de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O dos combustíveis usados na geração de eletricidade das Centrais Elétricas Autoprodutoras dos subsetores do Setor Energético .....	67
Tabela 20 - Consumo de combustível poço-tanque no transporte rodoviário em 2012 em ktep .....	68
Tabela 21 - Emissões de CO <sub>2</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-tanque) em kt .....	68

Tabela 22 - Emissões de CH <sub>4</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-tanque) em kt	68
Tabela 23 - Emissões de N <sub>2</sub> O no transporte rodoviário em 2012 (poço-tanque) em kt	69
Tabela 24 - Emissões de CO <sub>2</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-roda) em kt	69
Tabela 25 - Emissões de CH <sub>4</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-roda) em kt	70
Tabela 26 - Emissões de N <sub>2</sub> O no transporte rodoviário em 2012 (poço-roda) em kt	71

## Índice de Figuras

Figura 1 - Descrição das etapas da análise poço-roda .....	16
Figura 2 - Diagrama de Sankey dos fluxos energéticos e emissões de CO <sub>2</sub> e associados à etapa poço-tanque dos combustíveis fósseis em 2012 .....	43
Figura 3 - Diagrama de Sankey dos fluxos energéticos e emissões de CO <sub>2</sub> e associados ao processo industrial do Etanol (Destilarias) em 2012.....	47
Figura 4 - Diagrama de Sankey das emissões poço-roda de CO <sub>2</sub> e no transporte rodoviário brasileiro em 2012 .....	58

## Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Consumo final de combustíveis no transporte rodoviário em 2012 .....	22
Gráfico 2 - Participação de cada atividade na composição do fator de emissão de CO <sub>2</sub> e poço-tanque dos combustíveis fósseis .....	45
Gráfico 3 - Participação de cada atividade na composição do consumo específico de energia poço-tanque dos combustíveis fósseis.....	46
Gráfico 4 - Participação de cada atividade na composição do fator de emissão de CO <sub>2</sub> e poço-tanque do etanol anidro e hidratado .....	48
Gráfico 5 - Participação de cada atividade na composição do fator de emissão de CO <sub>2</sub> e poço-tanque do biodiesel.....	49
Gráfico 6 - Participação de cada atividade na composição do consumo específico de energia poço-tanque do biodiesel .....	49
Gráfico 7 - Consumo de energia associado à etapa poço-tanque para cada combustível de uso final em 2012 .....	51
Gráfico 8 - Emissões de CO <sub>2</sub> e por tipo de combustível e por etapa em 2012.....	52
Gráfico 9 - Emissões de CO <sub>2</sub> e por tipo de GEE e por etapa da análise poço-roda em 2012 .....	53
Gráfico 10 - Consumo de energia na etapa poço-tanque por categoria e por combustível utilizado em 2012 .....	54
Gráfico 11 – Emissões de CO <sub>2</sub> poço-roda por categoria e por combustível utilizado em 2012 .....	54
Gráfico 12 - Emissões de CH <sub>4</sub> poço-roda por categoria e por combustível utilizado em 2012 .....	55
Gráfico 13 - Emissões de N <sub>2</sub> O poço-roda por categoria e por combustível utilizado em 2012 .....	56
Gráfico 14 - Emissões de CO <sub>2</sub> e por categoria, por tipo de combustível e por etapa da abordagem poço roda em 2012 .....	57



## Lista de Siglas

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABRACICLO	Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN	Balanco Energético Nacional
CEA	Central Elétrica Autoprodutora
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH <sub>4</sub>	metano
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> e	dióxido de carbono equivalente
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
DEA	Dietanolamina
DOE	<i>U.S. Department of Energy</i> (EUA)
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FCC	<i>Fluid Catalytic Cracking</i>
GEE	gás de efeito estufa
GNV	gás natural veicular
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IMAFLOA	Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola
IMAZON	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
INEAVAR	Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MCT/MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MEA	Monoetanolamina

MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Ministério dos Transportes
MUT	Mudança de Uso da Terra
N <sub>2</sub> O	óxido nitroso
OC	Observatório do Clima
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
PR	poço-roda
PT	poço-tanque
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa
SIN	Sistema Interligado Nacional
tep	tonelada equivalente de petróleo
TR	tanque-roda
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WTW	<i>Well-to-wheels</i>

## Sumário

1. Objetivo do trabalho .....	12
2. Revisão Bibliográfica.....	13
2.1 Introdução .....	13
2.2 Análise de ciclo de vida de combustíveis e a análise poço-roda.....	14
2.2.1 Alocação Energética.....	17
2.3 Metodologia.....	17
2.4 Estimativas tanque-roda.....	20
2.4.1 Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (INEAVAR).....	21
2.4.2 Consumo de energia e emissões de GEE .....	23
2.5 Estimativas poço-tanque .....	26
2.5.1 Combustíveis Fósseis.....	26
2.5.2 Combustíveis Renováveis .....	33
3. Resultados e Discussões .....	41
3.1 Estimativas poço-tanque .....	41
3.1.1 Combustíveis Fósseis.....	41
3.1.2 Combustíveis Renováveis .....	46
3.2 Estimativas totais: análise poço-roda .....	50
3.3 Limitações e incertezas.....	59
4. Conclusão .....	61
5. Referências Bibliográficas.....	62
ANEXO A – Parâmetros utilizados nas estimativas das emissões de CO <sub>2</sub> .....	65
ANEXO B – Parâmetros utilizados nas estimativas das emissões de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O ....	67
ANEXO C – Estimativas detalhadas para a etapa poço-tanque e para a análise poço-roda .....	68

## 1. Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como objetivo estimar o consumo de energia e as emissões nacionais de gases de efeito estufa direto (dióxido de carbono, óxido nitroso e metano) relacionados ao uso de combustíveis no transporte rodoviário brasileiro de cargas e de passageiros no ano de 2012, segundo uma análise poço-roda. As estimativas relacionadas à etapa de queima de combustíveis (fase tanque-roda) nos veículos automotores rodoviários foram obtidas através do “Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013, Ano Base 2012” (MMA, 2014). Foram levantados consumos específicos de energia e fatores de emissão para realização das estimativas relacionadas às demais etapas contidas na abordagem utilizada; para os combustíveis fósseis os valores foram estimados por meio de dados nacionais e públicos através da alocação energética, enquanto que para os combustíveis renováveis os fatores foram levantados na literatura disponível.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Introdução

Os dados de consumo final de energia apresentados no “Balanço Energético Nacional (BEN) 2013, Ano Base 2012” (EPE/MME, 2013), apontam para o transporte rodoviário como um dos setores de atividade econômica de maior importância no Brasil.

Da energia consumida no país em 2012 (253,4 Mtep<sup>1</sup>), o setor de transportes, como um todo, foi responsável por 31,3% (79,3 Mtep); dessa fração, o transporte rodoviário consumiu 91,7% (72,7 Mtep). Além dos elevados valores absolutos, a tendência de crescimento acelerado do setor é outro dado importante a ser considerado, uma vez que o consumo energético do setor de transportes rodoviário aumentou 7,1% de 2011 para 2012, terceiro maior crescimento percentual entre os setores de consumo final (EPE/MME, 2013).

Esses dados de consumo energético são importantes indicadores da tendência de aumento do impacto ambiental proveniente do transporte de cargas e passageiros no Brasil, tanto no uso final dos combustíveis quanto nas atividades de produção das fontes de energia e de extração da matéria prima.

Sendo o transporte rodoviário o de maior participação na matriz modal do país (MT, 2009), instrumentos de estimativas e estudos a respeito dos impactos associados a essa forma de transporte são de extrema importância, tanto no auxílio à formação de políticas públicas voltadas ao transporte e aos temas diretamente vinculados a ele como mobilidade urbana, qualidade do ar e emissões de gases de efeito estufa, quanto na avaliação crítica da sociedade civil a respeito das ações tomadas.

Exemplos desses instrumentos são os “Inventários de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários” (INEAVAR), como os publicados pelo Ministério do Meio Ambiente em 2011 e em 2014, que tem por abrangência espacial o território nacional, e como os “Relatórios de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo”, publicados anualmente pela CETESB.

---

<sup>1</sup> tep: tonelada equivalente de petróleo. Unidade energética usualmente empregada em balanços energéticos nacionais e adotada para este trabalho de modo a facilitar a comparação entre combustíveis diferentes.

Apesar de possuírem uma importância valiosa na avaliação dos impactos gerados pelo transporte rodoviário, tanto na questão das emissões de poluentes locais (monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, aldeídos, material particulado, entre outros) quanto na de gases de efeito estufa direto (dióxido de carbono, óxido nítrico e metano), os inventários publicados atualmente se restringem às emissões associadas diretamente à queima dos combustíveis, não estimando emissões de etapas anteriores do ciclo de vida desses produtos como o consumo de combustíveis fósseis na produção agrícola de biocombustíveis ou na geração de energia nas refinarias de petróleo.

Dessa forma, ganham importância ferramentas capazes de estimar os impactos ambientais das demais etapas presentes no ciclo de vida desses combustíveis, como a extração de matérias-primas e a transformação das fontes energéticas envolvidas.

## **2.2 Análise de ciclo de vida de combustíveis e a análise poço-roda**

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) está intimamente relacionada com a quebra do paradigma do foco a respeito dos processos e a gradual transição desse foco para os produtos. Fundamentada em uma “visão holística da existência do produto” (ABCV, 2013), ao descrever detalhadamente e ao interpretar os fluxos materiais e energéticos associados a um produto, a ACV está ligada, respectivamente, aos conceitos de análise e avaliação.

Focada em uma visão sistêmica buscando compreender o conjunto das interações entre as partes, a ACV se aproxima dos conceitos apresentados por Capra (2002), compreendendo que sistemas não são plenamente compreendidos quando vistos de forma monocriteriosa, ou seja, pela avaliação de uma variável, apenas, mas sim pelo conjunto de interações entre eles.

O conceito de análise berço ao túmulo (Vigon et al., 1993), aponta que os efeitos ambientais levantados em uma ACV vão desde as atividades de obtenção das matérias-primas até o ponto no qual todos os rejeitos retornam à Terra.

Por meio dos conceitos inseridos na ACV, é possível ampliar a análise dos impactos proporcionados pelo uso dos combustíveis no transporte rodoviário brasileiro, não se restringindo ao uso final desses produtos nos veículos automotores.

Em especial, no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa (GEE), a avaliação se torna mais ampla, uma vez que emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de biocombustíveis são consideradas nulas, mas as atividades que compõem seus ciclos de vida são responsáveis por emissões. Como esses combustíveis respondem por parcela significativa da matriz energética do transporte rodoviário nacional, 16% em 2012 (EPE/MME, 2013), é interessante avaliar os impactos de etapas anteriores ao “túmulo” desses produtos.

Para aproximar as estimativas propostas daquelas geradas pelos instrumentos da ACV, este trabalho fará uso da análise poço-roda (“*WTW – well-to-wheels analysis*”). Esta abordagem permite analisar o ciclo de vida dos combustíveis desde as atividades de produção denominadas poço-tanque (“*WTT – well-to-tank*”) até o uso final na queima dos combustíveis, etapa denominada tanque-roda (“*TTW – tank-to-wheels*”). Entretanto, a análise poço-roda se limita a avaliar o consumo de energia e as emissões relacionadas apenas ao combustível, não considerando esses impactos na produção de infraestrutura necessária para a produção dos combustíveis ou dos veículos; diferindo assim da ACV (DOE, 2005).

Cabe ressaltar que por não se tratarem de estimativas que seguem a metodologia de um inventário de ciclo de vida (ICV) completo, algumas premissas são feitas neste trabalho, relacionadas aos dados de entrada a serem utilizados e descritos na Metodologia:

- O consumo de energia estimado se restringe ao uso de combustíveis nas atividades avaliadas da abordagem, não sendo estimada a energia associada a cada um dos insumos ainda que não energéticos (ferro do maquinário utilizado, por exemplo).
- Consumo de energia e emissões relacionadas à atividade de transporte rodoviário dos combustíveis e das matérias primas não devem ser consideradas como parte da etapa poço-tanque, uma vez que levariam a dupla contagem, pois já foram contabilizadas na etapa tanque-roda dos combustíveis utilizados nesse transporte.
- Uma vez que o Inventário se restringe às emissões nacionais relacionadas às atividades poço-roda, emissões poço-tanque da fração importada dos combustíveis utilizados não devem ser estimadas, pois ocorreram fora da abrangência espacial das estimativas. A Tabela 1 apresenta a porcentagem importada dos combustíveis para os quais as

estimativas poço-tanque neste trabalho não foram realizadas. Assumiu-se que essas porcentagens são representativas do consumo desses combustíveis no transporte rodoviário nacional.

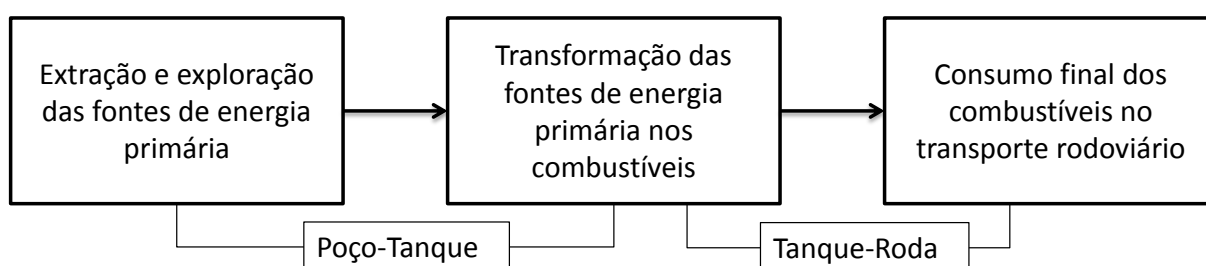
Tabela 1 - Percentual dos combustíveis consumidos no transporte rodoviário em 2012 de origem importada

Combustível	Combustível de origem importada (%)
Gasolina Automotiva	11,9%
Etanol Anidro	4,5%
Etanol Hidratado	1,6%
Gás Natural Seco	47,6%
Diesel Mineral	17,6%
Biodiesel	0,0%

Fonte: BEN 2013, Ano-base 2012 (EPE/MME, 2013).

A Figura 1 ilustra as denominações dadas a cada etapa da análise poço-roda e enumera algumas das atividades relacionadas a essas etapas que este trabalho considerará. Os termos utilizados para a abordagem tem sua origem nos meios de produção dos combustíveis fósseis; por exemplo, “poço” que se refere à origem da matéria-prima (petróleo) dos combustíveis de uso final (gasolina e diesel). Porém eles serão adaptados para que as mesmas estimativas possam ser realizadas para os combustíveis renováveis, dessa forma, “poço” será compreendido como origem da matéria-prima; podendo ser o poço do qual petróleo e gás natural serão obtidos ou a produção agropecuária que dará origem aos biocombustíveis.

Figura 1 - Descrição das etapas da análise poço-roda



Fonte: Elaboração própria a partir de DOE, 2005.



### 2.2.1 Alocação Energética

Muitos dos processos para os quais as estimativas foram realizadas apresentam mais de um produto como saída, dessa forma, foi preciso estabelecer um critério para alocar em cada um dos produtos os impactos estimados provenientes dessas etapas. Este trabalho adotará como critério a alocação energética e a equação 1 representa a metodologia utilizada para que essas estimativas fossem realizadas.

$$E_p = \frac{E}{F_{ref}} \times \left( \frac{F_p}{F_{ref}} \right) \quad (1)$$

Onde:

$E_p$  indica a estimativa de determinado impacto (consumo de energia ou emissões de GEE) alocada no produto  $p$  de determinado processo;

$E$  representa a estimativa desse impacto para todo o processo, dessa forma, é igual à somatória das variáveis  $E_p$ ;

$F_{ref}$  é o fluxo de referência utilizado para fazer a alocação, nesse caso a entrada de matéria-prima do processo em termos de energia;

$F_p$  é o mesmo fluxo associado ao produto  $p$ , nesse caso a saída desse produto do processo em termos de energia.

## 2.3 Metodologia

Para realizar as estimativas de consumo de energia e de gases de efeito estufa apresentadas nos objetivos, este trabalho fará uso da análise poço-roda introduzida na seção 2.2. Define-se aqui o ano de 2012 como escopo temporal e as atividades que ocorrem em território nacional como abrangência espacial dessas estimativas.

O nível de detalhamento das estimativas realizadas será dividido em três diferentes cortes: combustíveis, categorias de veículos automotores (para o consumo de energia e para as emissões atmosféricas de GEE) e tipo de gás (para as emissões de GEE). A seguir é listada cada uma das classificações dos referidos cortes:

- Combustíveis: óleo diesel mineral, gasolina automotiva, gás natural seco<sup>2</sup>, etanol anidro, etanol hidratado e biodiesel;
- Categorias: automóveis, motocicletas, comerciais leves, caminhões (semileves, leves, médios, semipesados, pesados) e ônibus (urbanos, micro-ônibus e rodoviários);
- Tipo de gás: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e metano (CH<sub>4</sub>).

Os combustíveis para os quais foram feitas estimativas são aqueles que o BEN apresenta fluxo energético de consumo final no transporte rodoviário em 2012. Ressalta-se aqui que os veículos não consomem etanol anidro ou gasolina automotiva, mas sim uma mistura desses denominada gasolina comum ou gasolina C; o mesmo ocorre com o óleo diesel mineral e o biodiesel, a mistura desses combustíveis será denominada neste trabalho como óleo diesel<sup>3</sup>.

As categorias de veículos são as mesmas apresentadas no “Anuário da Indústria Automobilística Brasileira” (ANFAVEA, 2013). Os gases selecionados são aqueles denominados gases de efeito estufa direto que estão relacionados às atividades do setor de energia (IPCC, 2007).

As estimativas de cada etapa da análise poço-roda serão feitas por meio de duas metodologias distintas, dessa forma este trabalho procurará apresentar os dados de entrada e resultados em seções separadas para as atividades da etapa poço-tanque e para as da etapa tanque-roda, consolidando-os em uma seção final.

As estimativas de consumo de energia e emissões de GEE da etapa tanque-roda foram levantadas através de dados publicados pelo MMA no INEAVAR 2013, Ano-base 2012; esses dados foram apenas coletados e organizados conforme as atribuições dos cortes descritos anteriormente.

Para realização das estimativas da etapa poço-tanque, este trabalho apresentará consumos específicos de energia e fatores de emissão a serem aplicados sobre os consumos de combustível apresentados no Inventário Nacional. Sendo assim, será possível somar as duas etapas e obter as estimativas da análise poço-roda. As equações 2 e 3 representam a maneira como essas estimativas serão realizadas:

---

<sup>2</sup> Gás natural seco consumido no transporte rodoviário é a denominação utilizada pelo BEN para o gás natural veicular (GNV).

<sup>3</sup> Em 2012, a composição da gasolina comum comercializada no Brasil foi 20% de etanol anidro e 80% de gasolina automotiva (%v). O óleo diesel comercializado foi composto de 5% de biodiesel e 95% de óleo diesel mineral (%v).

$$C_{f,c,PR} = Ce_{f,PT} * C_{f,c,TR} + C_{f,c,TR} \quad (2)$$

$$E_{g,f,c,PR} = Fe_{g,f,PT} * C_{f,c,TR} + E_{g,f,c,TR} \quad (3)$$

Onde  $C$  indica o consumo de combustível em tep,  $Ce$  é o consumo específico de energia em tep/tep combustível,  $E$  representa as emissões atmosféricas de GEE em toneladas e  $Fe$  o fator de emissão em toneladas de GEE por tep de combustível consumido; o índice  $g$  indica o tipo de GEE,  $f$  representa o tipo de combustível,  $c$  é a categoria do veículo e as abreviações  $PR$ ,  $PT$  e  $TR$  correspondem às etapas poço-roda, poço-tanque e tanque-roda, respectivamente.

No que diz respeito a atividades que envolvem a queima de combustíveis, as emissões de  $CO_2$  provenientes da queima de biomassa (etanol anidro e hidratado, biodiesel, lenha e bagaço de cana) não serão consideradas, pois se assume que essas emissões foram compensadas pela absorção de  $CO_2$  ocorrida no processo de fotossíntese que gerou a biomassa; essas emissões serão contabilizadas para os combustíveis fósseis, pois o carbono liberado fazia parte de um estoque produzido há milhares de anos (“carbono fossilizado”).

O mesmo não se aplica aos demais gases de efeito estufa direto, contabilizados para a queima de combustíveis fósseis e renováveis. Assim como outras atividades da produção de combustíveis renováveis terão suas emissões de  $CO_2$  contabilizadas, por exemplo, na cadeia de fertilizantes fosfatados utilizados no plantio da cana-de-açúcar que dará origem ao etanol anidro e hidratado e nas mudanças de uso da terra provocadas pela atividade agrícola relativa à matéria-prima vegetal dos biocombustíveis.

De modo a representar o impacto que cada gás de efeito estufa direto tem sobre alterações no balanço energético da Terra, também serão estimadas as emissões em toneladas de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ), através da métrica GWP (*global warming potential*). Para tal são utilizados fatores que convertem as emissões dos demais gases em emissões de  $CO_2$ , considerando seus efeitos em um prazo de 100 anos. Os fatores GWP utilizados são os mesmos apresentados na “Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC)” (MCT, 2010), sendo 21 para o  $CH_4$  e 310 para o  $N_2O$ .

Os fatores a serem obtidos e levantados devem possuir as seguintes unidades:

Tabela 2 - Unidades dos fatores utilizados nas estimativas poço-tanque

Grandeza	Unidade
Consumo específico de energia ( $Ce$ )	[tep/tep combustível <sup>4</sup> ]
Fator de emissão de CO <sub>2</sub> ( $Fe_{CO_2}$ )	[tCO <sub>2</sub> /tep combustível]
Fator de emissão de CH <sub>4</sub> ( $Fe_{CH_4}$ )	[tCH <sub>4</sub> /tep combustível]
Fator de emissão de N <sub>2</sub> O ( $Fe_{N_2O}$ )	[tN <sub>2</sub> O/tep combustível]
Fator de emissão de CO <sub>2</sub> e ( $Fe_{CO_2e}$ )	[tCO <sub>2</sub> e/tep combustível]

O consumo específico de energia representa a demanda energética para que ocorra a produção de uma unidade energética dos combustíveis. Os fatores de emissão representam as emissões geradas ao longo das atividades anteriores ao uso final dos combustíveis para que uma unidade energética dos mesmos seja produzida.

Nas próximas seções serão descritas as metodologias envolvidas na obtenção dos dados de cada uma das etapas da análise poço-roda para os combustíveis. Todos os cálculos e estimativas realizados neste trabalho foram feitos por meio de planilhas eletrônicas desenvolvidas no *software MS Excel*.

## 2.4 Estimativas tanque-roda

A etapa de utilização final dos combustíveis rodoviários é denominada tanque-roda. Na avaliação dos impactos ambientais deste trabalho, as emissões de GEE provenientes da queima dos combustíveis no motor dos veículos são contabilizadas aqui.

Como descrito na metodologia, as estimativas de consumo tanque-roda são essenciais tanto para o cálculo total da abordagem, quanto para as estimativas das atividades da etapa poço-tanque; dessa forma, procurou-se utilizar dados públicos condizentes com o grau de detalhamento proposto nos objetivos das estimativas a serem realizadas.

<sup>4</sup> ktep combustível refere-se a uma unidade energética de cada combustível para o qual as emissões e o consumo de energia foram estimados. Quando é apresentada a unidade como ktep apenas, refere-se ao consumo de energia em geral, sem especificar a fonte.

#### 2.4.1 Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (INEAVAR)

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) publicou em 2014 o segundo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (INEAVAR), elaborado por um grupo de trabalho que contou com instituições como Petrobrás, ANFAVEA, CETESB, IBAMA, ANP, CNT, IEMA, entre outras.

Esse Inventário apresenta como resultados o consumo de energia e as emissões dos gases de efeito estufa direto, grandezas que este trabalho se propõe a estimar, para a etapa tanque-roda do ciclo de vida dos combustíveis analisados. Esses resultados são apresentados com a mesma descrição dos cortes citados na metodologia para os quais as estimativas propostas serão realizadas.

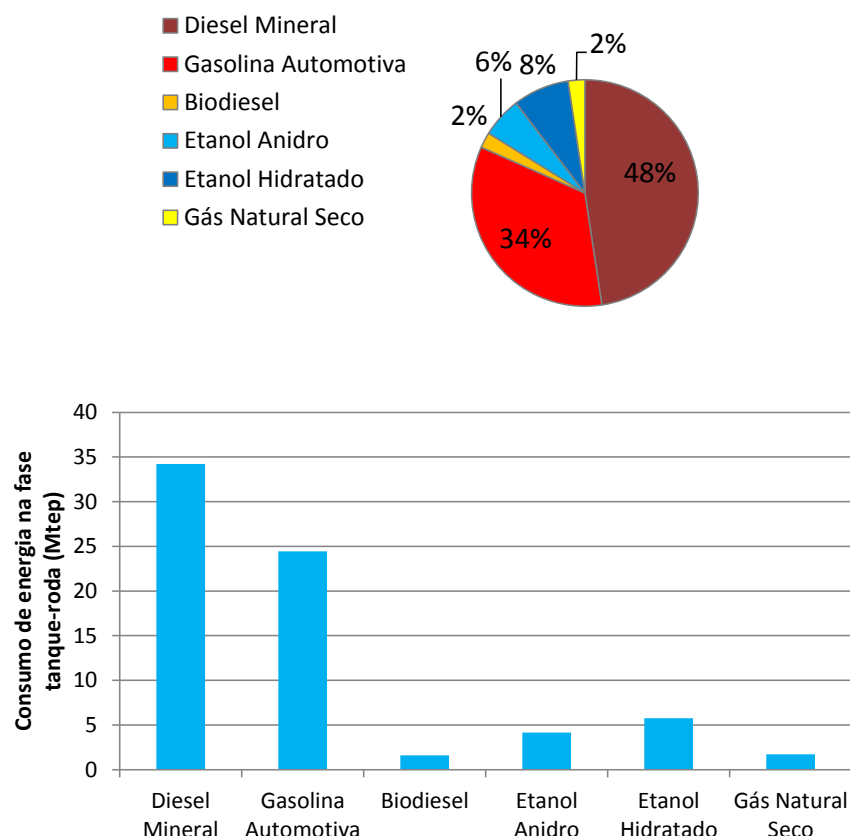
Conforme descrito na metodologia do INEAVAR, o consumo de combustível para cada categoria de veículos ( $C_c$ ) da frota circulante, num determinado ano-calendário, para cada ano modelo de veículo é estimado através de dados de frota em número de veículos ( $Fr_c$ ), consumo específico em litros de combustível por quilômetro percorrido ( $Ce_c$ ) e intensidade de uso em quilômetros percorridos por ano ( $Iu_c$ ). A equação 4 a seguir representa essas estimativas; nela, o índice  $c$  indica a categoria dos veículos.

$$C_c = Fr_c \times Iu_c \times Ce_c \quad (4)$$

A frota circulante de um determinado ano-calendário é estimada no INEAVAR para cada categoria de veículo de um determinado ano modelo por meio de dados de vendas de veículos novos, publicados pela ANFAVEA e pela ABRACICLO, e aplicada uma taxa de sucateamento, dependente da categoria do veículo e de sua idade.

Essa estimativa é então ajustada através do consumo agregado de cada combustível apresentado no BEN, de modo a ratear o consumo entre cada categoria que compõem a frota assegurando que o total é o mesmo apresentado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) como consumo final energético do transporte rodoviário nacional para determinado ano. O Gráfico 1 mostra esses dados reportados pelo BEN para 2012, utilizados para realizar o ajuste às estimativas do INEAVAR.

Gráfico 1 - Consumo final de combustíveis no transporte rodoviário em 2012



Fonte: BEN 2013, Ano-base 2012 (EPE/MME, 2013).

A partir dessas estimativas de consumo de energia, as emissões de CO<sub>2</sub> são calculadas por meio de fatores de emissão e metodologia apresentados no Relatório de Referência “Emissões de Gases de Efeito Estufa por Queima de Combustíveis: Abordagem Bottom-Up”, o qual compõe a “Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC)” (MCT, 2010). As emissões de CO<sub>2</sub> ( $E_{CO_2}$ ) foram estimadas através da equação 5:

$$E_{CO_2,f} = Cons_f * Fe_{CO_2,f} \quad (5)$$

Onde  $Cons_f$  corresponde ao consumo do combustível  $f$  (em ktep) estimado para cada categoria de veículos da frota circulante e  $Fe_{CO_2,f}$  é o fator de emissão (em ktCO<sub>2</sub>/ktep) obtido a partir dos dados apresentados no Relatório de Referência “Emissões de Gases de Efeito Estufa por Queima de Combustíveis: Abordagem Bottom-Up”, (MCT 2010), para cada combustível  $f$  consumido e das densidades

energéticas (em ktep por unidade comercial do combustível) fornecidas pelo BEN para 2012.

As densidades energéticas e os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos combustíveis para 2012 utilizadas neste trabalho são apresentadas no ANEXO A.

De maneira distinta às emissões de CO<sub>2</sub>, que são dependentes exclusivamente das propriedades químicas dos combustíveis (teor de carbono), as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são altamente dependentes da categoria dos veículos, da tecnologia de emissão de poluentes dos motores e da intensidade de uso dos veículos. Sendo assim, o INEAVAR estima essas emissões (*E*) para cada categoria de veículos da frota circulante, num determinado ano-calendário, para cada ano modelo de veículo a partir de dados da frota (*Fr*) em número de veículos, fatores de emissão (*Fe*) em gramas de poluente por quilômetro percorrido, específicos para cada ano modelo de veículo e dependente do tipo de combustível utilizado e intensidade de uso (*Iu*) em quilômetros percorridos por ano. A equação 6 a seguir representa essas estimativas:

$$E = Fr \times Iu \times Fe \quad (6)$$

#### 2.4.2 Consumo de energia e emissões de GEE

As estimativas apresentadas no INEAVAR estão em unidades de volume, uma vez que os fatores de emissão e o consumo específico de energia a serem utilizados neste trabalho para a etapa poço-tanque são dados em termos de energia, esses valores foram convertidos para tep através da densidade energética dos combustíveis comercializados em 2012, apresentada no BEN. Esses valores são apresentados no ANEXO A.

A seguir é mostrada uma série de tabelas contendo os resultados obtidos através do INEAVAR que serão utilizados nas demais estimativas deste trabalho. São mostrados consumo de combustíveis, emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O detalhados por categoria de veículo e por tipo de combustível utilizado.

Como as emissões de CO<sub>2</sub> são dependentes do tipo de combustível apenas é possível apresentá-las discriminadas por cada combustível mesmo que ele faça parte de uma mistura (gasolina automotiva e óleo diesel mineral, por exemplo). Porém as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são dependentes da maneira como ocorre a

queima dos combustíveis (categoria do veículo e tecnologia do motor); sendo assim, essas emissões são atribuídas às misturas e não aos seus componentes (gasolina comum e óleo diesel).

Tabela 3 - Consumo de combustível tanque-roda no transporte rodoviário em 2012 em ktep

Categoria	Gás Natural	Óleo Diesel	Gasolina	Etanol Anidro	Etanol	Biodiesel
	Seco	Mineral	Automotiva		Hidratado	
Automóveis	1.708,78	-	18.896,83	3.201,95	4.910,68	-
Caminhões Leves	-	3.277,24	-	-	-	153,26
Caminhões Médios	-	3.038,05	-	-	-	142,08
Caminhões Pesados	-	9.203,95	-	-	-	430,43
Caminhões Semileves	-	411,68	-	-	-	19,25
Caminhões Semipesados	-	10.381,92	-	-	-	485,52
Comerciais Leves	-	1.409,74	3.462,40	586,68	756,94	65,93
Micro-ônibus	-	1.119,43	-	-	-	52,35
Motocicletas	-	-	2.094,56	354,91	95,02	-
Ônibus Rodoviários	-	828,77	-	-	-	38,76
Ônibus Urbanos	-	4.560,10	-	-	-	213,26

Fonte: INEAVAR 2013, Ano-base 2012 (MMA, 2014).

Tabela 4 - Emissões de CO<sub>2</sub> no transporte rodoviário em 2012 (tanque-roda) em kt

Categoria	Gás Natural	Óleo Diesel	Gasolina
	Seco	Mineral	Automotiva
Automóveis	3.993,71	-	54.282,57
Caminhões Leves	-	10.061,66	-
Caminhões Médios	-	9.327,28	-
Caminhões Pesados	-	28.257,59	-
Caminhões Semileves	-	1.263,92	-
Caminhões Semipesados	-	31.874,15	-
Comerciais Leves	-	4.328,14	9.946,00
Micro-ônibus	-	3.436,83	-
Motocicletas	-	-	6.016,79
Ônibus Rodoviários	-	2.544,45	-
Ônibus Urbanos	-	14.000,23	-

Fonte: INEAVAR 2013, Ano-base 2012 (MMA, 2014).



Tabela 5 - Emissões de CH<sub>4</sub> no transporte rodoviário em 2012 (tanque-roda) em kt

Categoria	Gás Natural	Óleo Diesel	Gasolina	Etanol
	Seco		Comum	Hidratado
Automóveis	5,21	-	9,78	3,39
Caminhões Leves	-	1,35	-	-
Caminhões Médios	-	1,26	-	-
Caminhões Pesados	-	2,36	-	-
Caminhões Semileves	-	0,28	-	-
Caminhões Semipesados	-	2,67	-	-
Comerciais Leves	-	0,12	1,54	0,39
Micro-ônibus	-	0,32	-	-
Motocicletas	-	-	9,41	0,13
Ônibus Rodoviários	-	0,19	-	-
Ônibus Urbanos	-	0,78	-	-

Fonte: INEAVAR 2013, Ano-base 2012 (MMA, 2014).

Tabela 6 - Emissões de N<sub>2</sub>O no transporte rodoviário em 2012 (tanque-roda) em kt<sup>5</sup>

Categoria	Óleo Diesel	Gasolina	Etanol
		Comum	Hidratado
Automóveis	-	7,13	1,27
Caminhões Leves	0,68	-	-
Caminhões Médios	0,63	-	-
Caminhões Pesados	1,18	-	-
Caminhões Semileves	0,14	-	-
Caminhões Semipesados	1,33	-	-
Comerciais Leves	0,48	1,23	0,17
Micro-ônibus	0,16	-	-
Motocicletas	-	0,26	-
Ônibus Rodoviários	0,09	-	-
Ônibus Urbanos	0,39	-	-

Fonte: INEAVAR 2013, Ano-base 2012 (MMA, 2014).

Os dados apresentados na Tabela 3 correspondem à variável  $C_{f,c,TR}$  da equação 2; enquanto os dados da Tabela 4, da Tabela 5 e da Tabela 6 compõem as três variáveis  $E_{g,f,c,TR}$  da equação 3, uma vez que o índice  $g$  aponta os três GEEs para os quais as emissões são calculadas.

<sup>5</sup> As emissões de óxido nítrico não foram estimadas para motocicletas consumindo etanol hidratado nem para automóveis movidos a gás natural seco no INEAVAR.

## 2.5 Estimativas poço-tanque

Obtidos os dados nacionais já publicados a respeito das emissões e do consumo de energia da etapa tanque-roda, procuraram-se dados para que as estimativas das demais atividades constituintes da etapa poço-tanque da análise poço-roda dos combustíveis rodoviários pudessem ser realizadas.

Nesta seção será discutida a metodologia utilizada para obtenção de fatores de emissão e consumo específico de energia que pudessem ser aplicados sobre os consumos de combustíveis obtidos do INEAVAR.

Dessa forma, é possível estimar os impactos ambientais provenientes da extração e exploração das fontes de energia primária e das atividades de transformação dessas nos combustíveis de consumo final em veículos automotores.

Uma vez que cada combustível possui um ciclo de vida particular, nas próximas seções serão apresentadas as atividades para as quais foram realizadas as estimativas e as fontes de informação necessárias para os cálculos.

### 2.5.1 Combustíveis Fósseis

Este trabalho se propôs a estimar fatores de emissão e consumos específicos de energia relacionados ao ciclo de vida dos combustíveis rodoviários fósseis através de dados nacionais.

Duas fontes de informação foram de extrema importância na formulação das estimativas, o “Balanço Energético Nacional (BEN) 2013, Ano Base 2012”<sup>6</sup>, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) e o “Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa”<sup>7</sup> (SEEG) plataforma desenvolvida pelo Observatório do Clima (OC).

A partir do nível de detalhe apresentado pelos dados do BEN e do SEEG, foram definidas as atividades poço-tanque para cada um dos combustíveis fósseis utilizados no transporte rodoviário brasileiro.

A Tabela 7 descreve as atividades consideradas poço-tanque para os combustíveis fósseis e as fontes de informação das estimativas agregadas.

---

<sup>6</sup> Os valores utilizados nas estimativas deste trabalho foram obtidos na planilha Microsoft Excel disponibilizada pelo MME em sua página. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas\\_publicacoes.html](http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html)>.

<sup>7</sup> A plataforma pode ser acessada em: <<http://seeg.observatoriodoclima.eco.br/>>.

Tabela 7 - Atividades poço-tanque dos combustíveis fósseis e fontes de informação

Combustível	Atividades	Fontes de Informação		
		Consumo de Energia	Emissões de GEE	
Gasolina Automotiva	Exploração de Petróleo e Gás	Consumo Final Energético	BEN 2013	Elaboração própria
		Geração de Eletricidade	BEN 2013	Elaboração própria
		Emissões Fugitivas	-	SEEG
	Refino de Petróleo	Consumo Final Energético	BEN 2013	Elaboração própria
		Geração de Eletricidade	BEN 2013	Elaboração própria
		Emissões Fugitivas	-	SEEG
Óleo Diesel Mineral	Exploração de Petróleo e Gás	Consumo Final Energético	BEN 2013	Elaboração própria
		Geração de Eletricidade	BEN 2013	Elaboração própria
		Emissões Fugitivas	-	SEEG
	Refino de Petróleo	Consumo Final Energético	BEN 2013	Elaboração própria
		Geração de Eletricidade	BEN 2013	Elaboração própria
		Emissões Fugitivas	-	SEEG
Gás Natural Seco	Exploração de Petróleo e Gás	Consumo Final Energético	BEN 2013	Elaboração própria
		Geração de Eletricidade	BEN 2013	Elaboração própria
		Emissões Fugitivas	-	SEEG
	Transporte	Emissões Fugitivas	-	SEEG

Em 2012, 68,9% do gás natural brasileiro foi produzido associado à extração de petróleo (ANP, 2013), porém os dados do BEN apresentam somados os fluxos de energia relacionados à extração de petróleo e gás natural; neste trabalho a atividade “Extração de Petróleo e Gás Natural” foi considerada constituída por todas as saídas desses combustíveis produzidos em território nacional, ainda que parte do gás natural possa possuir fatores de emissão distintos por não ser produzido de forma associada, constituindo uma das fontes de incerteza das estimativas realizadas.

Conhecidos os consumos de energia e as emissões de GEE associados a essas atividades, é possível utilizar a metodologia da alocação energética para processos que apresentam mais de um produto como saída e então obter consumos específicos de energia e fatores de emissão para cada combustível fóssil analisado neste trabalho.

### 2.5.1.1 Consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> por queima de combustíveis

No que diz respeito aos dados de consumo de energia, todas as informações foram extraídas diretamente do BEN. São apresentados pelo MME consumos finais de energia tanto do Setor Energético<sup>8</sup> como de seus subsetores, entre eles os únicos que podem ser alocados dentro das atividades que estão na fronteira definida pela análise poço-roda são Exploração de Petróleo e Gás Natural e Refino de Petróleo.

O SEEG estima as emissões do Setor Energético definido pelo BEN, porém não apresenta as respectivas emissões de seus subsetores. Por meio da metodologia descrita no SEEG na “Nota Metodológica do Setor de Energia” (IEMA/OC, 2013) e dos dados disponibilizados pelo MME, foi possível realizar as estimativas de emissões de GEE por queima de combustíveis para esses subsetores. Essas emissões foram estimadas durante período de estágio no Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), instituição responsável pela coordenação técnica das estimativas do Setor de Energia do SEEG e que fez parte do grupo de trabalho do INEAVAR coordenado pelo MMA.

De maneira análoga ao que ocorre com a queima de combustíveis em fontes móveis (transporte rodoviário, por exemplo), as emissões de CO<sub>2</sub> geradas na queima de combustíveis em fontes fixas podem ser estimadas a partir de algumas propriedades dos combustíveis. Assim, as emissões de CO<sub>2</sub> foram estimadas também pela equação 4, onde a variável  $Cons_f$  passa a representar o consumo final de combustível (em ktep) e  $Fe_{CO_2f}$  é o fator de emissão (em ktCO<sub>2</sub>/ktep) do combustível.

Caso semelhante ocorre com as emissões de Centrais Elétricas Autoproduzidas (CEAs); os valores apresentados no SEEG estão agregados entre todas as CEAs, porém com os dados do MME é possível estimar as emissões das centrais associadas à Exploração de Petróleo e Gás Natural e ao Refino de Petróleo, uma vez que o BEN possui dados desagregados para as CEAs associadas a cada um dos subsetores do Setor Energético, e então alocar as emissões provenientes da geração de eletricidade nos combustíveis produzidos.

---

<sup>8</sup> O BEN define o consumo no Setor Energético como "energia consumida nos centros de transformação e/ou nos processos de extração e transporte interno de produtos energéticos, na sua forma final". Enquadram-se neste setor, por exemplo, os combustíveis nas refinarias e plataformas de petróleo, bem como o bagaço de cana utilizado para prover energia para o funcionamento das utilidades das destilarias de álcool.

As estimativas de emissões provenientes do consumo de eletricidade nos subsetores do setor energético ( $E_{CO_2q}^{consumo}$ ) apresentam uma particularidade; uma vez que o consumo de eletricidade desses subsetores ( $\varepsilon_q^{consumo}$ ) é maior do que a geração nas CEAs associadas a eles ( $\varepsilon_q^{geração}$ ) em 2012, admitiu-se que toda a eletricidade gerada é utilizada nos próprios subsetores e; logo, as emissões provenientes dessa atividade ( $E_{CO_2q}^{geração}$ ) devem ser alocadas aos combustíveis produzidos.

Admitiu-se também que a diferença entre a eletricidade consumida e a gerada é obtida através do Sistema Interligado Nacional (SIN). Sendo assim, as emissões de CO<sub>2</sub> associadas a essa diferença ( $E_{CO_2q}^{consumo SIN}$ ) foram calculadas a partir do fator de emissão médio anual para 2012 (0,0653 ktCO<sub>2</sub>/GWh), publicado pelo MCTI<sup>9</sup> para inventários corporativos ( $Fe_{CO_2SIN}$ ). A equação 6 representa a peculiaridade dessas emissões e a composição dos resultados, o índice  $q$  indica o subsetor onde ocorrem as emissões.

$$E_{CO_2q}^{consumo} = E_{CO_2q}^{geração} + E_{CO_2q}^{consumo SIN} = E_{CO_2q}^{geração} + Fe_{CO_2SIN} \times (\varepsilon_q^{consumo} - \varepsilon_q^{geração}) \quad (6)$$

Os dados de consumo de combustíveis nesses subsetores tanto para consumo final de energia, quanto para geração de eletricidade nas CEAs em 2012 disponibilizados pelo BEN, são apresentados na Tabela 8.

Essa abordagem permite atribuir aos combustíveis produzidos as emissões proporcionadas pelo consumo de eletricidade de maneira mais precisa, uma vez que evita a utilização de percentuais de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira ou a aplicação de fatores de emissão do Sistema Interligado Nacional para eletricidade gerada em autoprodutores.

<sup>9</sup> Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>.

Tabela 8 - Fluxos de consumo de energia nos subsetores de interesse do Setor Energético e em suas Centrais Elétricas Autoprodutoras (CEAs) em 2012 (ktep)

Utilização	Fonte de Energia	Exploração de Petróleo e Gás	Refino de Petróleo
Consumo Final de Energia	Eletricidade Consumida	807,08	329,66
	Gás natural seco	-	2.683,17
	Gás natural úmido	2.134,10	-
	Óleo combustível	0,42	349,22
	Óleo diesel	1.178,79	10,28
	Gás de refinaria	-	3.124,35
	GLP	-	0,29
Geração de Eletricidade (CEAs)	Gás natural úmido	1.695,78	-
	Gás natural seco	-	166,37
	Óleo diesel	250,57	-
	Óleo combustível	-	40,07
	Gás de refinaria	-	305,10
	Eletricidade Gerada	669,51	230,20

Fonte: BEN 2013, Ano-base 2012 (EPE/MME, 2013).

#### 2.5.1.2 Emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O por queima de combustíveis

As emissões de gases não-CO<sub>2</sub> (metano e óxido nitroso) são dependentes da tecnologia utilizada na queima desses combustíveis, tanto em fontes móveis quanto fixas. Sendo assim, a metodologia descrita pelo SEEG para estimar essas emissões utiliza fatores de emissão dependentes da finalidade para a qual os combustíveis são queimados – calor de processo, força motriz, aquecimento direto ou iluminação – e da tecnologia utilizada para atingir esse fim.

Faz-se uso de “coeficientes de destinação” que caracterizam o consumo de combustível de acordo com a finalidade de uso e a tecnologia empregada. As estimativas de emissões desses gases pode ser representadas pela equação 7 a seguir:

$$E_{gfjk} = Fe_{gfjk} * C_f * Z_{fj} * W_{jk} \quad (7)$$

Onde:

$E_{gfjk}$  é a emissão do gás  $g$  associada ao consumo do combustível  $f$ , para atender o uso final  $j$  através da tecnologia  $k$ ;

$F_{e_{gfjk}}$  é o fator de emissão do gás  $g$  associado ao consumo do combustível  $f$ , para atender o uso final  $j$  através da tecnologia  $k$ ;

$C_f$  é o consumo do combustível  $f$  no setor para o qual as emissões estão sendo estimadas;

$Z_{fj}$  é o coeficiente de destinação de uso final do combustível  $f$  consumido para atender o uso final  $j$ ;

$W_{jk}$  é o coeficiente de destinação da tecnologia  $k$  que representa a fração do uso final  $j$  que é atendida pela tecnologia  $k$ .

O Relatório de Referência “Emissões de Gases de Efeito Estufa por Queima de Combustíveis: Abordagem Bottom-Up” (MCT, 2010) apresenta os fatores de emissão necessários e os coeficientes de destinação da tecnologia. Os coeficientes de destinação de uso final foram obtidos através da última edição do “Balanço de Energia Útil (BEU)” (MME, 2005) <sup>10</sup>. O consumo de combustível foi obtido dos dados do BEN.

No caso do setor energético, cada uso final é atendido por apenas um tipo de tecnologia; logo, todos os fatores  $W$  são iguais a 1. Na geração de eletricidade nas CEAs, o BEU considera que todo o combustível é queimado em caldeiras para obtenção de calor de processo, dessa forma, todos os coeficientes  $W$  e  $Z$  são iguais a 1.

Por falta de um fator de emissão do SIN para  $CH_4$  e  $N_2O$ , as emissões desses gases associadas ao consumo de eletricidade se restringem àquelas ocorridas na geração de eletricidade nas CEAs associadas a esses subsetores. O que não se trata de uma fonte significativa de incertezas, uma vez que os dados do SEEG apontam para uma participação menor do que 5% das emissões de  $CO_2e$  (GWP) por parte desses gases no que diz respeito às atividades de geração de eletricidade.

O ANEXO B apresenta todos os dados necessários para as estimativas das emissões desses GEEs.

---

<sup>10</sup> Esses coeficientes estão disponíveis no sítio <<http://www.feng.pucrs.br/~eberson/13.03/CoeficientesdeDestinacao>>, no formato de planilhas Microsoft Excel. Na indisponibilidade de valores mais recentes, considerou-se que os coeficientes de destinação de uso final não sofreram alterações, os valores de 2004 foram utilizados para 2012.

### 2.5.1.3 Emissões fugitivas

Todo o consumo de energia relacionado à produção dos combustíveis analisados neste trabalho e contido na fronteira da análise poço-roda já foi estimado nas seções anteriores, porém parte das emissões relacionadas a essas atividades não é decorrente da queima útil de combustíveis.

A “Nota Metodológica do Setor de Energia” (IEMA/OC, 2013) define as emissões fugitivas como descargas intencionais e não intencionais de GEE que ocorrem durante os processos produtivos de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural). Este trabalho alocará as emissões decorrentes dos processos da indústria de Petróleo e Gás Natural nos respectivos combustíveis de uso final produzidos.

O Relatório de Referência “Emissões Fugitivas de Gases de Efeito Estufa na Indústria de Petróleo e Gás” (PETROBRAS/MCT, 2010), define três diferentes áreas para as quais as seguintes atividades geradoras de emissões fugitivas estão inseridas:

- Extração e Produção de Petróleo e Gás Natural: *venting*, *flaring*<sup>11</sup>, tanques de *flash* de metano, processo de desidratação a glicol, remoção de CO<sub>2</sub> (colunas de MEA e DEA), passagem de *pig* em linhas e fugitivas em componentes de linha como conectores, válvulas e outros;
- Refino de petróleo: regenerador de FCC, unidades de geração de hidrogênio (UGH), fugitivas de componentes de linha como conectores, válvulas e outros e *flaring*;
- Transporte de gás natural em dutos: descompressão de linhas fugitivas de componentes de linha como conectores, válvulas, flanges e outros, vazamentos em gasodutos e *flaring*.

A Tabela 9 mostra a associação dessas áreas de emissões fugitivas aos combustíveis analisados por meio da alocação energética.

---

<sup>11</sup> *Venting* são fugas de CH<sub>4</sub> e *flaring* é a queima intencional desse gás, porém sem fins de obtenção de energia. Essas emissões ocorrem durante a extração e produção de petróleo para fins de segurança das instalações.



Tabela 9 - Associação entre os combustíveis analisados e as áreas de emissões fugitivas

Área de Emissões Fugitivas	Combustíveis
Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural	Óleo Diesel Mineral, Gasolina Automotiva e Gás Natural Seco
Refino de Petróleo	Óleo Diesel Mineral e Gasolina Automotiva
Transporte de Gás Natural	Gás Natural Seco

Por meio da metodologia descrita no Relatório de Referência da Comunicação Nacional e do documento “Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil – 2012” (MCTI, 2013), o SEEG estimou as Emissões Fugitivas da indústria de Petróleo e Gás e os dados serão utilizados neste trabalho para que a alocação energética seja feita. Essas estimativas são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Emissões fugitivas de GEE em kt por área de emissão e por tipo de gás em 2012

Gás de Efeito Estufa	Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural	Refino de Petróleo	Transporte de Gás
CO <sub>2</sub>	5.714,589	7.982,324	58,400
CH <sub>4</sub>	109,001	9,164	1,047
N <sub>2</sub> O	0,176	0,028	0,002

Fonte: SEEG (IEMA/OC, 2013).

### 2.5.2 Combustíveis Renováveis

Assim como realizado para obtenção das estimativas relacionadas aos combustíveis fósseis, este trabalho procurou levantar dados representativos do uso e da produção de combustíveis renováveis participantes da matriz energética do transporte rodoviário brasileiro: etanol (anidro e hidratado) e biodiesel.

Esses três combustíveis são derivados de biomassa, sendo assim chamados de biocombustíveis. O etanol brasileiro é produzido a partir da cana-de-açúcar através de fermentação e destilação. O biodiesel já possui uma origem mais variada; em 2012, as principais matérias-primas para sua produção no país foram o óleo de soja (69,9%) e o sebo bovino (14,7%) (EPE/MME, 2013).

Uma vez que as emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela etapa tanque-roda do uso de combustíveis renováveis podem ser consideradas nulas, os impactos provenientes da etapa poço-tanque são cruciais na análise desses combustíveis. O consumo de

combustíveis fósseis no maquinário agrícola, as emissões de GEE ocorridas em outros processos das atividades agrícolas relacionados à produção da biomassa (matéria-prima), entre outras atividades devem ser levantados de modo a alcançar as fronteiras propostas pela análise poço-roda; ainda que o termo “poço” perca parte do sentido original ao se tratar de biocombustíveis.

Como mostrado anteriormente, optou-se por utilizar dados públicos e agregados de consumo de energia e emissões de GEE relacionados à etapa poço-tanque dos combustíveis fósseis e, por meio da alocação energética, associar essas estimativas ao consumo desses combustíveis. O mesmo procedimento não será realizado para os combustíveis renováveis, uma vez que os dados disponibilizados pelo BEN e pelo SEEG não apresentam detalhamento suficiente para que a alocação seja feita com precisão adequada. Por exemplo, o BEN publica o consumo final de energia para todo o setor Agropecuário, mas não associa esse consumo a cada um dos insumos agrícolas produzido; o mesmo ocorre com o SEEG que reporta as emissões desse setor causadas pelo consumo de energia, pelas atividades agrícolas e pela criação animal (IMAFLOA/OC, 2013), porém não segmenta as emissões nos produtos.

Dessa forma, optou-se por realizar uma revisão bibliográfica dos estudos nacionais relacionados aos biocombustíveis e às análises do ciclo de vida desses produtos. Procurou-se por trabalhos que possuíssem Inventários de Ciclo de Vida dos biocombustíveis, onde o consumo de energia e as emissões de GEE estivessem discriminados para cada uma das atividades levantadas pelos autores.

Em posse desses dados, foi possível utilizar aqueles que estivessem incluídos nas fronteiras da análise poço-roda e da metodologia proposta por este trabalho. Através dos ICVs, foram obtidos os consumos específicos de energia e os fatores de emissão de GEE, em termos de energia de cada biocombustível, necessários para a aplicação das equações 2 e 3.

A revisão bibliográfica mostrou grande variedade de trabalhos e estudos relacionados aos temas, sendo assim, optou-se por tomar como ponto de partida a dissertação “Harmonização de Inventários de Ciclo de Vida de Biocombustíveis do Brasil” (ROCHA, 2011) apresentada à Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Essa dissertação procurou identificar os estudos de inventário de ciclo de vida de biocombustíveis produzidos no Brasil e avaliar e harmonizar as informações contidas nos ICVs. Por meio dos critérios apresentados pelo *ecoinvent data V2* (maior base de dados de ICV), o estudo selecionou 6 outros estudos para que a avaliação fosse

feita, 3 dos quais foram utilizados neste trabalho na obtenção dos dados necessários às estimativas.

Grande parte dos impactos ambientais da produção de biocombustíveis está relacionada à mudança do uso da terra, a qual é dependente do tipo de matéria-prima, do método de cultivo e das condições edafoclimáticas (termo usado para se referir ao solo e ao clima). Estão entre esses impactos desmatamento para uso da própria atividade agrícola analisada ou pelo deslocamento de outras atividades de pasto ou cultivos para áreas de vegetação nativa – denominada mudança indireta do uso da terra (FRITSCHÉ et al., 2006), redução da biodiversidade, migração de espécies nativas e perda de matéria orgânica do solo (KALTNER et al., 2005).

No que diz respeito às estimativas realizadas por este trabalho, emissões provenientes da mudança do uso da terra (MUT) e florestas estão associadas à etapa poço-tanque da produção de biocombustíveis. Essas emissões de CO<sub>2</sub> estão relacionadas às alterações da cobertura do solo que aumentam ou diminuem os estoques de carbono da biomassa existente acima ou abaixo do solo; outra fonte dessas emissões é o processo de calagem ocorrido na agricultura (IMAZON/OC, 2013).

Ainda que muitas discussões estejam relacionadas aos impactos das mudanças diretas e indiretas do uso da terra nas emissões de GEEs relacionadas à produção de biocombustíveis e que fatores médios ou regionais possam distorcer os resultados de abrangência nacional; este trabalho procurou utilizar fatores representativos da realidade brasileira para que essas emissões pudessem ser estimadas e a comparação dos biocombustíveis com os combustíveis fósseis, a partir da análise poço-roda, se tornasse mais criteriosa e completa. Neste trabalho, as emissões associadas ao processo de calagem serão estimadas em separado das de MUT.

Como descrito na seção 2.2, as emissões relativas ao transporte de matéria-prima até centros de transformação e à distribuição dos combustíveis para uso final não serão consideradas, pois passariam a ser dupla contagem dentro do escopo das estimativas. No que diz respeito aos biocombustíveis, a maioria das ACVs apresenta essas atividades consideradas em suas metodologias, porém os ICVs utilizados neste trabalho traziam as atividades detalhadas, dessa forma, foi possível não utilizar fatores relacionados ao uso de combustíveis no transporte rodoviário de cargas e, assim, evitar a dupla contagem.

Uma análise criteriosa do ciclo de vida dos biocombustíveis como produtos deve considerar os impactos ambientais proporcionados pelo transporte de cargas (rodoviário ou de outro modal), pois, assim como este trabalho procura apresentar, essa atividade é extremamente representativa no contexto de consumo de energia e emissões de GEE no Brasil. Porém o uso de combustíveis fósseis ou renováveis em veículos automotores configura a última atividade dentro da fronteira da análise poço-roda proposta, dessa forma, preferiu-se alocar as emissões tanque-roda nos combustíveis de uso final e não naqueles que a atividade de transporte faz parte do ciclo de vida (atividades de produção ou distribuição).

### 2.5.2.1 Etanol

Após ser feita a revisão bibliográfica dos estudos envolvendo etanol, foram selecionadas as atividades mostradas na Tabela 11 para estimar o consumo de energia e as emissões de GEE associadas à etapa poço-tanque. São apresentadas as fontes de informação para os fatores de cada uma das atividades escolhidas e os valores obtidos para o consumo específico de energia (em ktep por ktep de etanol) e para os fatores de emissão de GEE em (kt de gás por ktep de etanol).

Tabela 11 - Atividades da etapa poço-tanque do etanol, consumos específicos de energia e fatores de emissão e fontes de informação

Atividade	Consumo Específico de Energia	Fatores de Emissão				Fonte de Informação
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> e	
Mudança de Uso da Terra	-	0,549	-	-	0,549	EPA (2011)
Preparo do Solo	3,61E-08	3,13E-03	1,34E-06	4,17E-07	3,29E-03	OMETTO (2005)
Plantio da Cana-de-Açúcar	4,15E-05	1,01E-03	3,44E-08	1,28E-04	4,07E-02	OMETTO (2005)
Tratos Culturais	6,31E-04	1,34E-03	7,77E-07	2,40E-04	7,57E-02	OMETTO (2005)
Colheita da Cana-de-Açúcar	3,78E-03	6,06E-03	8,10E-03	3,98E-04	2,99E-01	OMETTO (2005)
Destilarias						Elaboração Própria
Geração de Eletricidade (CEAs associadas às Destilarias)			Seção 3.1.2			Elaboração Própria
Fertirrigação	6,57E-05	1,23E-03	3,84E-08	3,19E-05	1,11E-02	OMETTO (2005)

“Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível Pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia” foi tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (OMETTO, 2005) e serviu como principal referência para estudo do ciclo de vida do etanol e fonte de informação para obtenção dos fatores de emissão e consumos específicos de energia correspondentes às atividades descritas na Tabela 11 e à metodologia deste trabalho. Importante destacar que este estudo detalhava os fatores relacionados ao consumo de diesel conforme as atividades e conforme o equipamento que o utilizava; logo, foi possível utilizar apenas os fatores associados a tratores e não incluir aqueles destinados a caminhões, os quais fazem parte do transporte rodoviário de cargas.

O consumo de energia foi apresentado em termos da unidade funcional 10.000 km percorridos por um automóvel dedicado a etanol hidratado e com autonomia igual a 8 km/L. Para que esses consumos específicos pudessem ser utilizados como a variável  $Ce_{f,PT}$  da equação 2, essa unidade foi convertida para volume de etanol hidratado e posteriormente para energia, através da densidade energética da Tabela 17. Dessa forma, foi possível obter o consumo de energia em termos de energia de etanol hidratado produzida.

São apresentados fatores de emissão para os três GEEs diretos em termos do fluxo de referência do estudo (1t de etanol hidratado); por meio da densidade volumétrica do etanol que é igual a 809 kg/m<sup>3</sup> (EPE, 2013) e, novamente, da densidade energética, os fatores foram obtidos também em termos de energia produzida de etanol e puderam ser utilizados como a variável  $Fe_{g,f,PT}$  da equação 3. Uma vez que todas essas atividades são comuns à produção de etanol hidratado e anidro, esses fatores foram aplicados a ambos os combustíveis.

No que diz respeito aos impactos das atividades ocorridas nas destilarias<sup>12</sup>, tanto no consumo final de energia quanto na geração de eletricidade nas CEAs associadas, optou-se por utilizar a mesma metodologia descrita na seção 2.5.1. O consumo de energia foi levantado através do subsetor Álcool do Setor Energético do BEN e as emissões foram obtidas através das equações 5 e 7. Os fluxos energéticos da geração de eletricidade nas CEAs associadas a esse subsetor também foram obtidos pelo BEN e suas emissões foram estimadas pelas equações 5, 6 e 7. Como as destilarias brasileiras produzem tanto etanol anidro quanto hidratado, foi feita

---

<sup>12</sup> Processo Industrial do Álcool e Geração de Vapor e Energia Elétrica (OMETTO, 2005).

alocação energética da energia utilizada e das emissões para que os fatores de cada combustível pudessem ser obtidos. Esses fluxos de energia são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Fluxos de consumo de energia no subsetor Álcool do Setor Energético (destilarias) e em suas Centrais Elétricas Autoprodutoras (CEAs) em 2012 (ktep)

Utilização	Fonte de Energia	Destilarias
Consumo Final de Energia	Eletricidade Consumida	478,27
	Bagaço de Cana	10.507,81
Geração de Eletricidade (CEAs)	Bagaço de Cana	2.868,67
	Hidráulica	4,31
	Eletricidade Gerada	1.400,45

Fonte: BEN 2013, Ano-base 2012 (EPE/MME, 2013).

Na Tabela 12 é possível constatar que em 2012 as Destilarias foram autossuficientes em eletricidade, uma vez que a energia elétrica produzida nas CEAs associadas é maior do que a consumida pelas destilarias. Dessa forma, não foi necessário atribuir o fator de emissão do SIN para o consumo de eletricidade e foi possível contabilizar apenas as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O dessas CEAs, uma vez que a energia contida nas fontes utilizadas (bagaço e hidráulica) não emite CO<sub>2</sub> ao ser convertida em energia elétrica.

O fator de emissão relacionado à mudança de uso da terra é o mesmo utilizado pela USEPA (Agência Americana de Proteção ao Meio Ambiente). Apesar da intensa discussão em torno dessas emissões e do fator ser proveniente de uma instituição internacional, esse fator já foi empregado para estimativas em estudos nacionais recentes, entre eles, “Perspectivas de longo prazo sobre o perfil ambiental do etanol de cana-de-açúcar no Brasil” (SILVA, 2013) e “Avaliação Técnico-Econômica das Principais Tendências e Alternativas do Transporte Rodoviário Nacional sob o Ponto de Vista Energético e Ambiental” (FIGUEIREDO, 2013). Esses fatores também foram associados aos dois tipos de etanol produzidos.

#### 2.5.2.2 Biodiesel

Como mencionado, a matéria-prima para produção do biodiesel nacional é mais variada. Apesar de a produção a partir de óleo de soja ser majoritária, o uso de

outros óleos como palma, algodão e canola e de sebo animal foram representativos em 2012. Ainda assim, por simplificação, assumiu-se que toda a produção nacional ocorreu a partir da transesterificação metílica do óleo de soja. Essa simplificação pode ser considerada uma das maiores fontes de imprecisão deste trabalho, por procurar representar a realidade nacional, porém utilizar fatores relativos a apenas 70% dela.

A Tabela 13 enumera as atividades do ciclo de vida do biodiesel de soja selecionadas para compor a etapa poço-tanque desse combustível. Como descrito para o etanol, foram selecionados ICVs que detalhassem as atividades de modo a não se utilizar nenhum fator relacionado ao transporte rodoviário. São apresentados ainda os valores levantados e as respectivas fontes de informação. O consumo específico é dado em ktep por ktep de biodiesel produzido e as emissões em kt de gás por ktep de biodiesel.

Tabela 13 – Atividades da etapa poço-tanque do biodiesel de soja, consumos específicos de energia e fatores de emissão e fontes de informação

Atividade	Consumo Específico de Energia	Fatores de Emissão				Fonte de Informação
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> e	
Mudança de Uso da Terra	-	1,847	-	-	1,847	(GRISOLI et al., 2012)
Fase Agrícola	0,108	0,323	-	-	0,323	(CAVALETT, 2008)
Secagem	0,022	0,005	1,91E-04	2,54E-06	0,010	(MOURAD, 2008)
Processo de Esmagamento	0,039	0,115	1,23E-07	-	0,115	(CAVALETT, 2008)
Processo de Refino do Óleo de Soja	0,004	0,012	1,26E-08	-	0,012	(CAVALETT, 2008)
Produção de Biodiesel	0,051	0,174	1,87E-07	-	0,174	(CAVALETT, 2008)

“Análise do Ciclo de Vida da Soja” foi tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas (CAVALETT, 2008) e foi base da formulação das atividades escolhidas e da maior parte dos fatores utilizados. Os fluxos eram dados em termos da unidade de referência de cada um dos produtos dos processos descritos acima (grão de soja, óleo de soja bruto e refinado e biodiesel); logo, foi preciso converter cada uma dessas unidades em ktep de biodiesel para aplicação nas equações 2 e 3. No caso do processo de

esmagamento, utilizou-se a alocação energética do estudo que associa 35,6% dos impactos ao óleo de soja bruto.

Cavalett aponta a secagem dos grãos de soja como uma das atividades para as quais não foi possível encontrar dados, dessa forma, “Avaliação da Cadeia Produtiva de Biodiesel obtido a partir de Soja”, tese apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (MOURAD, 2008), foi utilizada como fonte de informação. A tese utiliza a tonelada de biodiesel produzida como unidade de referência e apresenta o consumo energético de lenha e de eletricidade na atividade de secagem. A partir desses, estimou-se o consumo específico e os fatores de emissão<sup>13</sup>.

Por fim, as emissões relacionadas à mudança do uso da terra foram obtidas do trabalho “Emissões de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida do Biodiesel de Soja Produzido no Brasil” (GRISOLI et al., 2012). O estudo levantou fatores representativos de quatro estados brasileiros produzindo biodiesel (MT, PR, GO e RS), as estimativas deste trabalho utilizam a média dos fatores obtidos pela alocação energética.

---

<sup>13</sup> O fator de emissão da lenha em secadores é 300 kgCH<sub>4</sub>/TJ e 4 kgN<sub>2</sub>O/TJ (MCT, 2010) e utilizou-se o fator de emissão do SIN para 2012 no que diz respeito à eletricidade.



### 3. Resultados e Discussões

Conforme descrito na seção 2.4.2, os resultados necessários para a etapa tanque-roda das estimativas foram todos obtidos através do INEAVAR 2013, Ano-base 2012 (MMA, 2014). Esta seção apresentará os resultados obtidos através da alocação energética para os fatores de emissão e consumos específicos de energia da etapa poço-tanque. Serão também consolidados os resultados para os consumos de energia e emissões obtidos pela aplicação da análise poço-roda, conforme os cortes descritos na metodologia: combustíveis, categoria de veículos rodoviários e tipo de gás de efeito estufa direto. Por fim, serão discutidas as limitações e incertezas associadas aos resultados obtidos por este trabalho.

#### 3.1 Estimativas poço-tanque

##### 3.1.1 Combustíveis Fósseis

Através dos fluxos de energia apresentados na Tabela 8, as emissões associadas à etapa poço-tanque dos combustíveis fósseis puderam ser estimadas através da metodologia descrita nas seções 2.5.1.1 e 2.5.1.2. As emissões fugitivas já foram apresentadas na Tabela 10. A Tabela 14 sintetiza os resultados obtidos para as estimativas dessas atividades antes de ser feita a alocação energética para atribuir cada um dos consumos e emissões de GEE aos combustíveis produzidos. Nela, as emissões associadas ao consumo e geração de eletricidade já estão incluídas nas respectivas atividades.

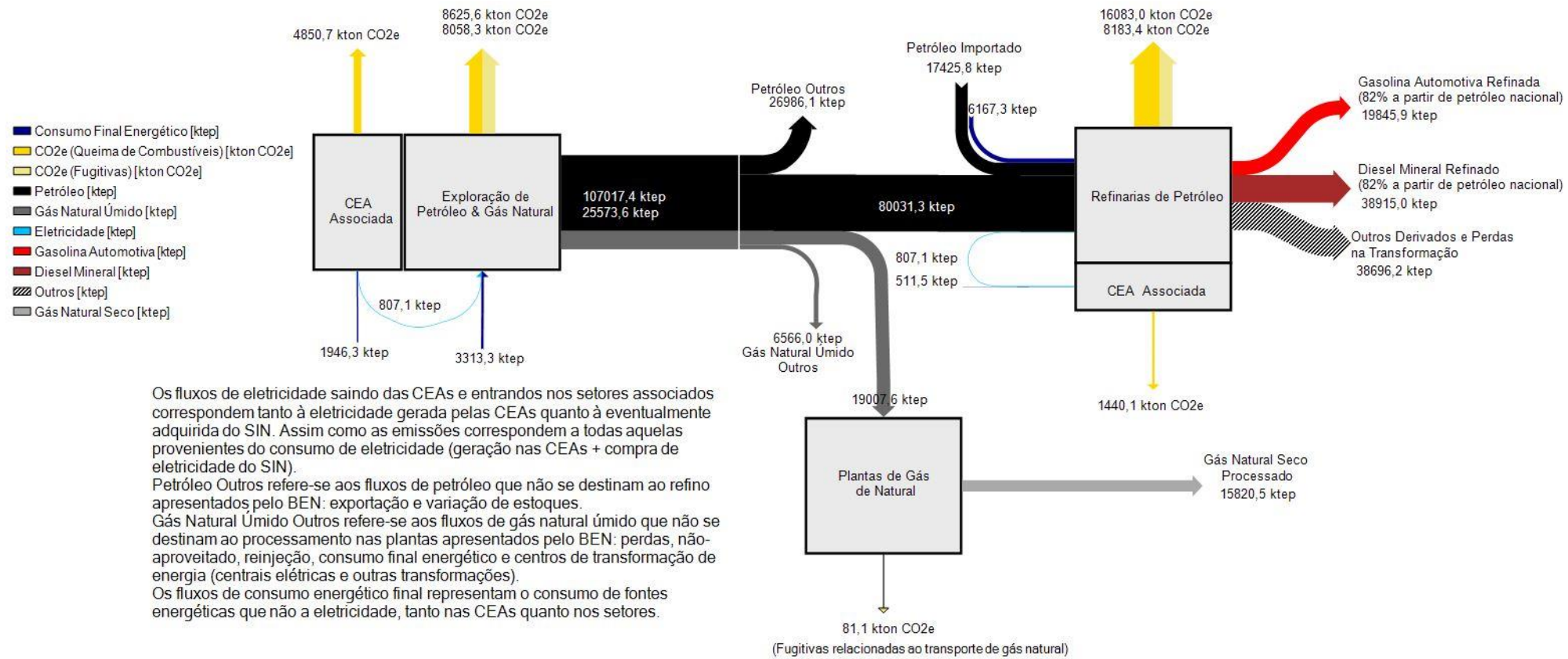
Tabela 14 – Emissões associadas às etapas poço-tanque dos combustíveis fósseis em kt em 2012

Atividade	Fonte de Emissão	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> e
Exploração de Petróleo e Gás	Consumo de Energia	13.444,63	0,75	0,05	13.476,36
	Emissões Fugitivas	5.714,59	109,00	0,18	8.058,28
Refino de Petróleo	Consumo de Energia	17.501,82	0,58	0,03	17.523,10
	Emissões Fugitivas	7.982,32	9,16	0,03	8.183,36
Transporte de Gás Natural	Emissões Fugitivas	58,40	1,05	0,00	81,09

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN 2013, Ano-base 2012 e do SEEG

A Figura 2 é um diagrama de Sankey, no qual a espessura das setas é proporcional à intensidade dos fluxos, onde estão representados os fluxos de energia e emissões de CO<sub>2</sub>e associados às atividades que compõem a etapa poço-tanque presente na análise dos combustíveis fósseis que foram necessários para realização da alocação energética.

Figura 2 - Diagrama de Sankey dos fluxos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub>e associados à etapa poço-tanque dos combustíveis fósseis em 2012



Fonte: Elaboração própria.

A alocação energética na extração de petróleo e gás natural teve como fluxo de referência ( $F_{ref}$ ) a soma da energia produzida nessa atividade (132.591,1 ktep); a partir dele foram alocados o consumo total de energia (4.120,4 ktep) e as emissões de GEE (13.476,4 kt CO<sub>2</sub>e) para cada tipo de gás. A alocação foi feita utilizando a produção de Gás Natural Seco (15.820,7 ktep) e as produções de Gasolina Automotiva e Diesel Mineral obtidas a partir de petróleo nacional (16.297,4 e 31.956,8 ktep). Os mesmos valores foram utilizados na alocação das emissões fugitivas desta atividade.

De modo a não contabilizar emissões associadas à extração que não ocorreram na abrangência espacial das estimativas, procurou-se estimar a quantidade de gasolina e de diesel que seriam provenientes de petróleo nacional. Para tal, utilizou-se o fator 82,1% que é a razão entre a quantidade de petróleo nacional refinado em 2012 e todo o petróleo refinado no Brasil no mesmo período; o restante do petróleo que entra nas Refinarias é obtido através de importações. Isso não foi necessário para o Gás Natural Seco, pois todo o Gás Natural Úmido processado nas Plantas de Gás Natural é de origem nacional.

Já para a atividade de Refino de Petróleo o fluxo de referência ( $F_{ref}$ ) foi a entrada de petróleo nas refinarias (97.457,2 ktep); a partir dele foram alocados o consumo total de energia (6.497,0 ktep) e as emissões de GEE (17.523,1 kt CO<sub>2</sub>e) para cada tipo de gás. A alocação foi feita utilizando a produção de Gasolina Automotiva e Diesel Mineral nas refinarias (19.845,9 e 38.915,0 ktep). As emissões fugitivas associadas ao refino utilizaram os mesmos fluxos de referência e de alocação.

Aqui não foi preciso utilizar os fluxos de combustível refinado a partir de petróleo nacional, pois as emissões do refino ocorreram todas dentro das fronteiras da metodologia e as emissões poço-tanque dos combustíveis de uso final importados não foram contabilizadas, conforme explicado na seção 2.2.

As emissões fugitivas relacionadas ao transporte de gás natural (81,09 kt CO<sub>2</sub>e) foram alocadas utilizando a produção de gás natural úmido (25.573,6 ktep) como fluxo de referência e a quantidade de gás natural seco processado (15.820,7 ktep) como fluxo de alocação.

Por meio desses fatores e da equação 1 foram obtidos os consumos específicos de energia e os fatores de emissão associados a cada um dos combustíveis fósseis avaliados, para cada uma das atividades da etapa poço-tanque contidas na abordagem. A Tabela 15 sintetiza os resultados obtidos, os fatores são dados em

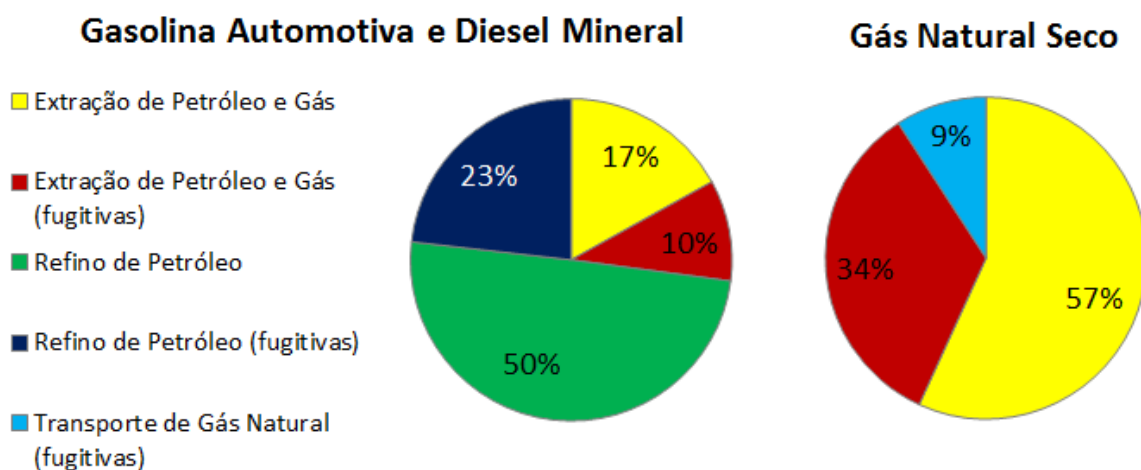
termos de kt de GEE por ktep de combustível produzido e o consumo de energia em ktep por ktep de combustível produzido. O Gráfico 2 e o Gráfico 3 ilustram a participação de cada atividade poço-tanque nos impactos estimados para o fator de emissão de CO<sub>2</sub>e e o consumo específico de energia dos três combustíveis; 100% do consumo específico de energia do Gás Natural Seco estão associado à atividade de Extração.

Tabela 15 - Consumo específico de energia e fatores de emissão poço-tanque para os combustíveis fósseis

Combustível	Consumo de Energia	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> e
Gasolina Automotiva	0,017	0,071	1,22E-04	3,30E-07	0,074
Diesel Mineral	0,034	0,139	2,39E-04	6,47E-07	0,144
Gás Natural Seco	0,004	0,019	1,24E-04	2,60E-07	0,021

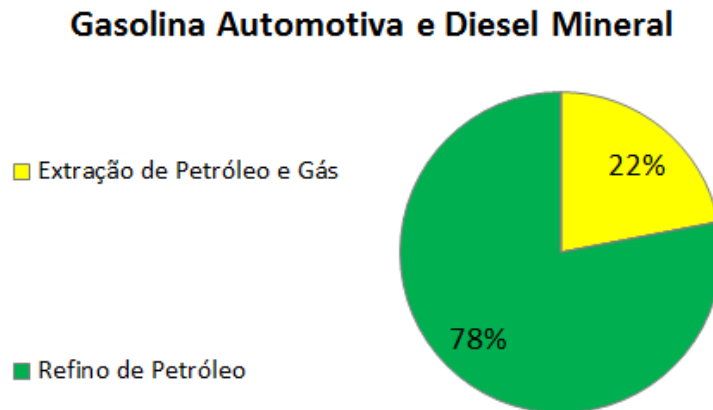
Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 2 - Participação de cada atividade na composição do fator de emissão de CO<sub>2</sub>e poço-tanque dos combustíveis fósseis



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 3 - Participação de cada atividade na composição do consumo específico de energia poço-tanque dos combustíveis fósseis



Fonte: Elaboração própria.

Com isso, foram estimadas também as variáveis  $Ce_{f,PT}$  e  $Fe_{g,f,PT}$  das equações 2 e 3 para os três combustíveis fósseis utilizados no transporte rodoviário brasileiro.

Cabe destacar a importância das emissões fugitivas no contexto das atividades poço-tanque, ainda que não sejam decorrentes da queima de combustíveis, como comumente faz-se a associação das emissões de GEE do setor de energia. Outro ponto de destaque é a importância do CO<sub>2</sub> como principal GEE na composição do fator. Além disso, a alocação energética provocou uma ordem crescente de valores obtidos para os três combustíveis: Gás Natural Seco, Gasolina Automotiva e Diesel Mineral. O Diesel Mineral que já é o combustível de maior participação na matriz energética do transporte rodoviário brasileiro terá suas emissões ainda mais elevadas pela análise poço-roda.

### 3.1.2 Combustíveis Renováveis

A revisão bibliográfica a respeito de fatores utilizados na produção de ICVs de biocombustíveis conteve quase todos os valores necessários para que as estimativas poço-tanque desses combustíveis pudessem ser realizadas, conforme apresentado na Tabela 11 (etanol) e na Tabela 13 (biodiesel).

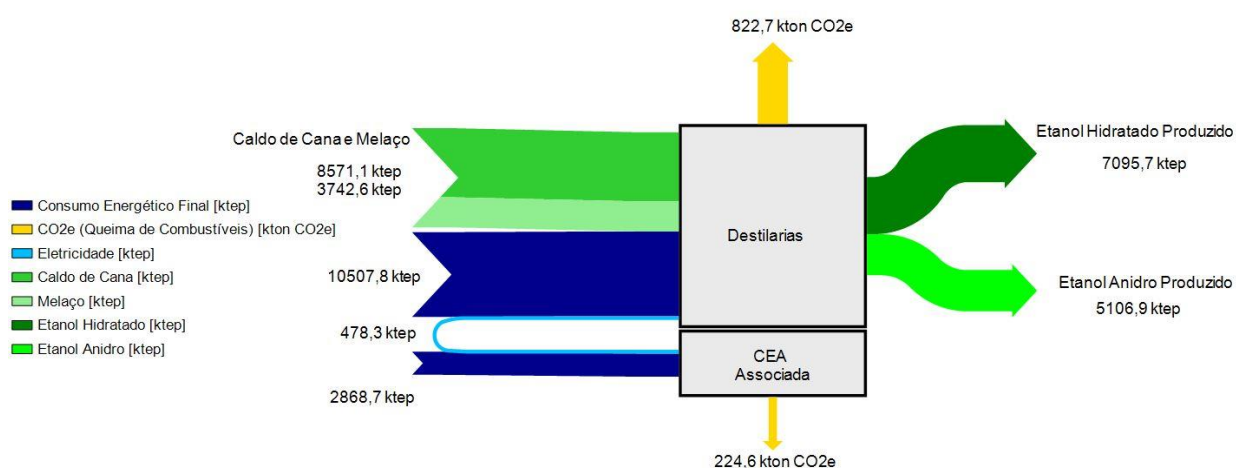
Porém este trabalho procurou obter fatores específicos para o processo industrial do álcool (Destilarias), a partir de dados do BEN e do SEEG. Dessa forma, os

resultados levantados para essa atividade e a metodologia aplicada para realização da alocação energética são descritos nesta seção.

### 3.1.2.1 Etanol

O diagrama de Sankey apresentado na Figura 3 ilustra os fluxos energéticos e as emissões de CO<sub>2</sub>e associados ao processo industrial do etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil.

Figura 3 - Diagrama de Sankey dos fluxos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub>e associados ao processo industrial do Etanol (Destilarias) em 2012



Os fluxos de consumo energético final representam o consumo de fontes energéticas que não a eletricidade, tanto nas CEAs quanto nas Destilarias.

Fonte: Elaboração própria.

Todos os fatores de emissão e consumos de energia levantados em ICVs foram associados tanto ao etanol anidro quanto ao hidratado por se tratarem de atividades comuns aos ciclos de vida dos dois combustíveis. No que diz respeito às Destilarias, elas podem ser compreendidas como um processo em que cada tipo de etanol é uma saída; logo, foi preciso adotar a metodologia da alocação energética para obter os fatores relacionados a cada combustível.

O fluxo de referência adotado foi a soma da energia de entrada no processo de fermentação e destilação na forma de Caldo de Cana-de-açúcar e Melaço (12.313,7 ktep); a partir dele o consumo de energia (10.986,1 ktep) e as emissões de GEE

(1.047,3 ktCO<sub>2</sub>e) para cada gás foram alocados por meio dos fluxos de produção de etanol anidro (5.106,9 ktep) e hidratado (7.095,7 ktep) utilizando a equação 1.

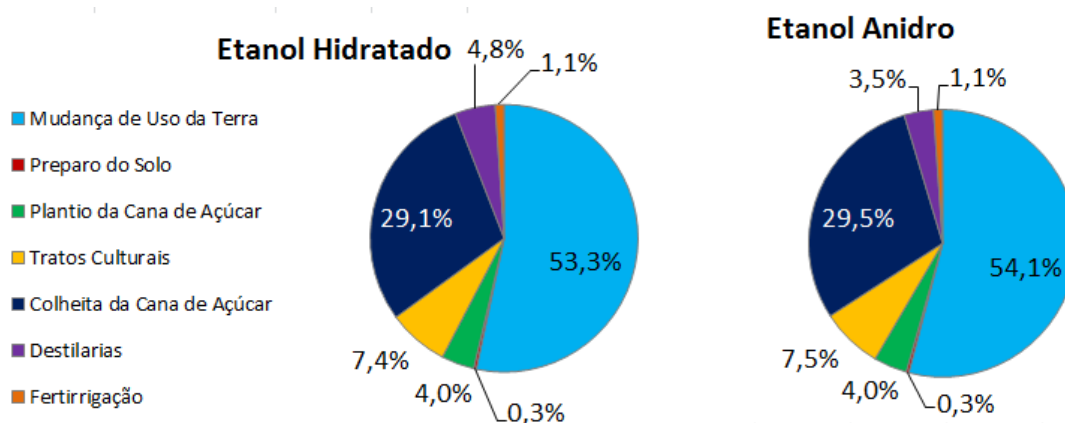
Dessa forma, obtiveram-se todos os valores correspondentes as variáveis  $Ce_{f,PT}$  e  $Fe_{g,f,PT}$  das equações 2 e 3 para o etanol (anidro e hidratado). A Tabela 16 consolida os resultados da etapa poço-tanque para os dois tipos de etanol. O Gráfico 4 apresenta a contribuição de cada atividade no fator de emissão de CO<sub>2</sub>e dos combustíveis; 99,1 e 98,8% do consumo específico de energia são proveniente do consumo de energia ocorrido nas destilarias para o etanol hidratado e anidro, respectivamente.

Tabela 16 - Consumo específico de energia (ktep/ktep de etanol) e fatores de emissão (ktGEE/ktep de etanol) poço-tanque para os combustíveis fósseis

Combustível	Consumo de Energia	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> e
Etanol Anidro	0,381	0,562	0,0087	0,0009	1,015
Etanol Hidratado	0,528	0,562	0,0089	0,0009	1,029

Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 4 - Participação de cada atividade na composição do fator de emissão de CO<sub>2</sub>e poço-tanque do etanol anidro e hidratado



Fonte: Elaboração própria.

Alguns aspectos relativos aos fatores obtidos merecem destaque, entre eles a variação da composição dos fatores, decorrente da alocação energética da produção dos combustíveis nas destilarias; a maior participação do metano como GEE devido ao intenso consumo de Bagaço nas Destilarias e nas CEAs associadas a elas, incrementada pelo elevado GWP desse gás; a importância do uso de fatores

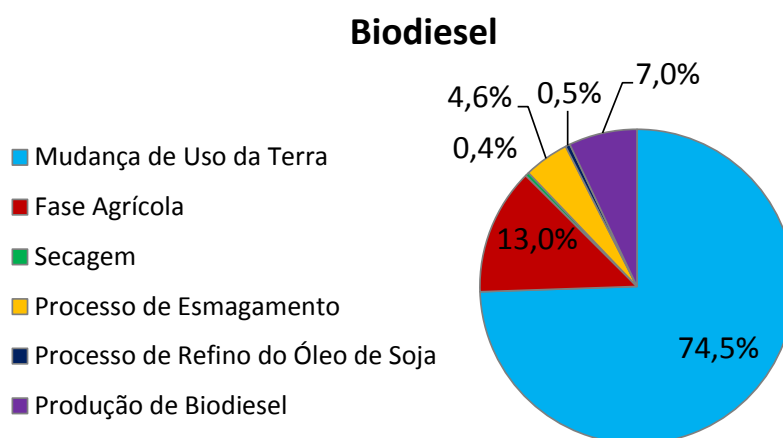


que representem a realidade das emissões provocadas pela MUT, uma vez que eles compõem mais de 50% do fator de emissão poço-tanque de CO<sub>2</sub>e.

### 3.1.2.2 Biodiesel

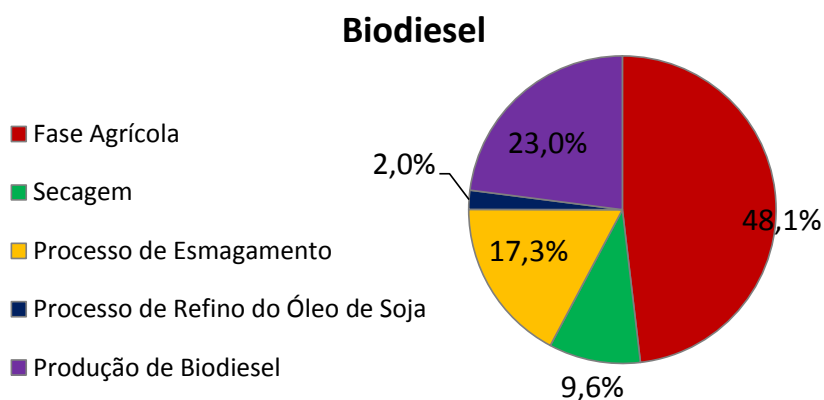
Os fatores de emissão utilizados neste trabalho para obter as estimativas poço-tanque relacionadas ao biodiesel de soja já foram apresentados. O Gráfico 5 e o Gráfico 6 mostram a contribuição de cada uma dessas fases na composição dos valores obtidos.

Gráfico 5 - Participação de cada atividade na composição do fator de emissão de CO<sub>2</sub>e poço-tanque do biodiesel



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 6 - Participação de cada atividade na composição do consumo específico de energia poço-tanque do biodiesel



Fonte: Elaboração própria.

Importante ressaltar aspectos como a intensa contribuição das emissões decorrentes de MUT no perfil do fator de emissão poço-tanque do biodiesel de soja, ainda maior do que a já elevada contribuição dessa atividade no fator relacionado ao etanol; a elevada contribuição da fase agrícola no que diz respeito ao consumo de energia poço-tanque; e apesar do processo industrial do biodiesel possuir parcela importante (23%), a relevância para a composição do consumo específico não é tão expressiva quanto àquela apresentada para as Destilarias no caso do etanol.

### **3.2 Estimativas totais: análise poço-roda**

Esta seção procura consolidar os resultados obtidos através das estimativas e, dessa forma, analisar as modificações proporcionadas pelo uso da análise poço-roda na avaliação dos impactos proporcionados pelo transporte rodoviário nacional, quando comparado à abordagem exclusivamente relacionada à queima dos combustíveis (tanque-roda).

As estimativas realizadas para a análise poço-roda apontam para 204,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e relacionados ao transporte rodoviário nacional, o que representa 46,8% das emissões nacionais do setor de energia (IEMA, 2013) e 13,7% das emissões brasileiras em 2012 (SEEG/OC, 2013). Quando comparadas às emissões de CO<sub>2</sub>e relacionadas apenas à etapa tanque-roda do transporte rodoviário, o aumento ocorrido foi de 10,5% (IEMA, 2013); as emissões poço-tanque respondem por 9,5% de todas as emissões da análise poço-roda.

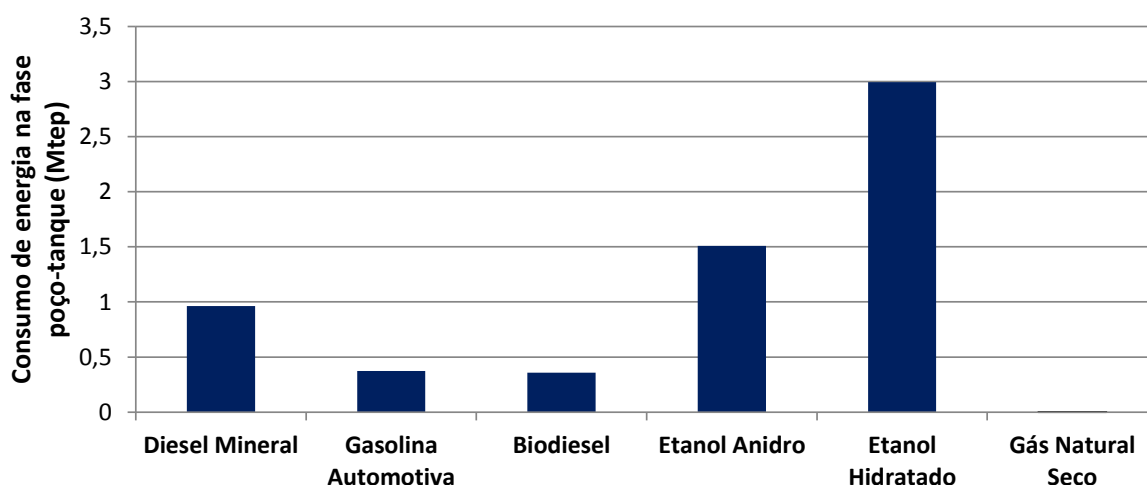
O consumo de energia estimado para as atividades da etapa poço-tanque da abordagem utilizada foi 6,2 Mtep. Dessa forma, além dos 71,9 Mtep consumidos pelo transporte rodoviário nacional em 2012 na etapa tanque-roda (EPE/MME, 2013), esse setor de consumo passa a responder por 78,1 Mtep, o que representa 30,8% de toda a energia consumida no país.

Os resultados serão apresentados conforme os três cortes propostos neste trabalho (categorias de veículos, combustíveis e tipo de GEE), de modo a facilitar a visualização e as análises. No que diz respeito ao corte das categorias de veículos, os resultados exibidos serão simplificados em cinco categorias: automóveis, motocicletas, comerciais leves, ônibus e caminhões.

No ANEXO C são apresentados todos os resultados obtidos para análise poço-rodas e para a etapa poço-tanque, no mesmo nível de detalhe que os obtidos para a etapa tanque-rodas através do INEAVAR.

O Gráfico 7 apresenta o consumo de energia demandado pelas atividades que compõem a etapa poço-tanque de cada combustível. Os resultados são reflexo direto do consumo específico utilizado nas estimativas, uma vez que mesmo apresentando menores participações na matriz energética do transporte rodoviário (consumo tanque-rodas), etanol (14%) e biodiesel (2%) possuem elevado consumo de energia poço-tanque. Por outro lado, os combustíveis fósseis que apresentam maior participação na matriz (diesel mineral com 48% e gasolina automotiva com 34%), possuem menor consumo poço-tanque.

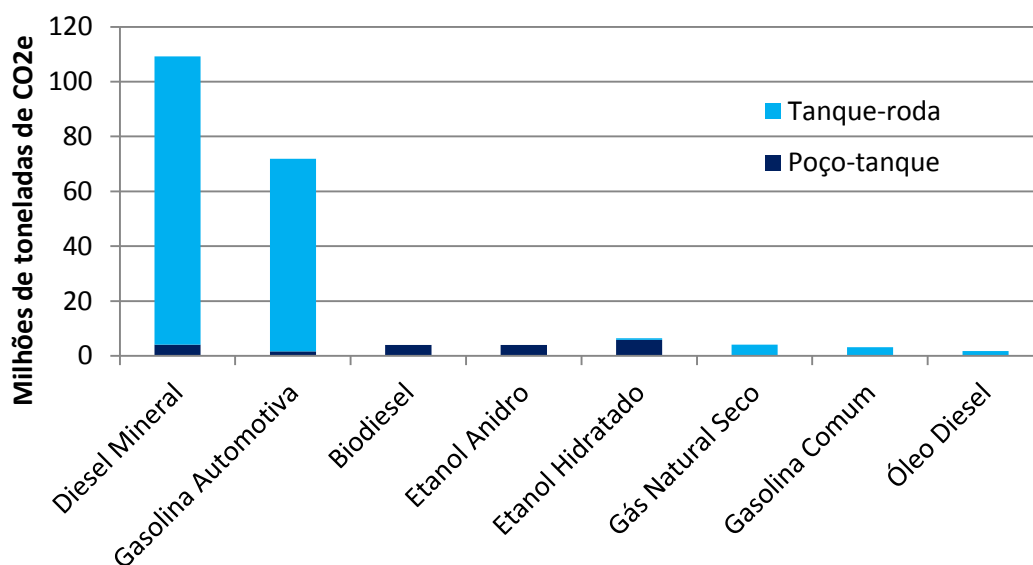
Gráfico 7 - Consumo de energia associado à etapa poço-tanque para cada combustível de uso final em 2012



Fonte: Elaboração própria.

No que diz respeito às emissões de  $\text{CO}_2$  e poço-rodas associadas a cada um dos combustíveis, o Gráfico 8 indica a importância das emissões poço-tanque associadas aos combustíveis renováveis, pois suas emissões tanque-rodas de  $\text{CO}_2$  são consideradas nulas; além de apontar para a predominância da etapa de queima do combustível em si, no que diz respeito aos combustíveis fósseis. Os valores relacionados ao Óleo Diesel e à Gasolina Comum correspondem às emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  decorrentes da queima dessas misturas.

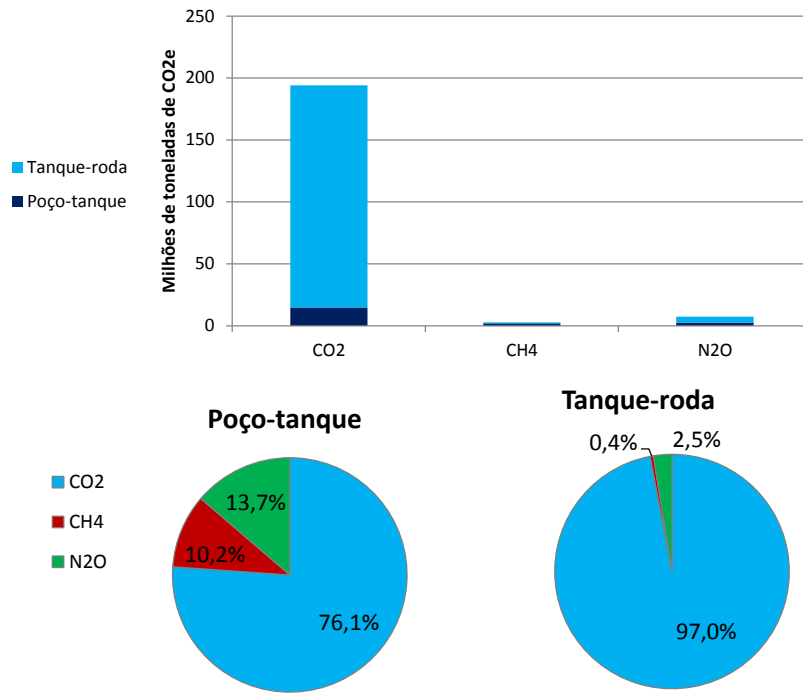
Gráfico 8 - Emissões de CO<sub>2</sub>e por tipo de combustível e por etapa em 2012



Fonte: Elaboração própria.

A partir do Gráfico 9 é evidente notar a participação majoritária do CO<sub>2</sub> na composição das emissões de GEE. Ainda que o uso da análise poço-roda aumente a participação das emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (24% na etapa poço-tanque e 3% na etapa tanque-roda), devido ao consumo de biomassa nas atividades da etapa poço-tanque dos biocombustíveis, o dióxido de carbono ainda é o principal GEE relacionado ao transporte rodoviário, respondendo por 95% das emissões de CO<sub>2</sub>e na análise poço-roda.

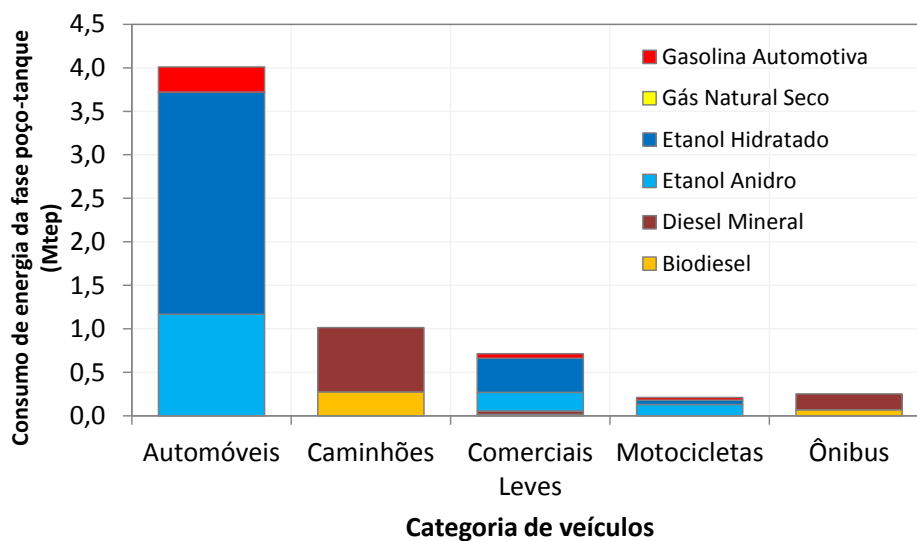
Gráfico 9 - Emissões de CO<sub>2</sub>e por tipo de GEE e por etapa da análise poço-roda em 2012



Fonte: Elaboração própria.

Os próximos gráficos procuram apontar as estimativas para cada categoria de veículo por tipo de combustível. No Gráfico 10 é possível identificar a importância dos combustíveis renováveis na energia consumida na etapa poço-tanque. Como os automóveis são os principais consumidores de etanol no país, a maior parte desse consumo está associada a eles; destaca-se ainda a importância do consumo associado ao biodiesel na composição do consumo relacionado a caminhões e ônibus.

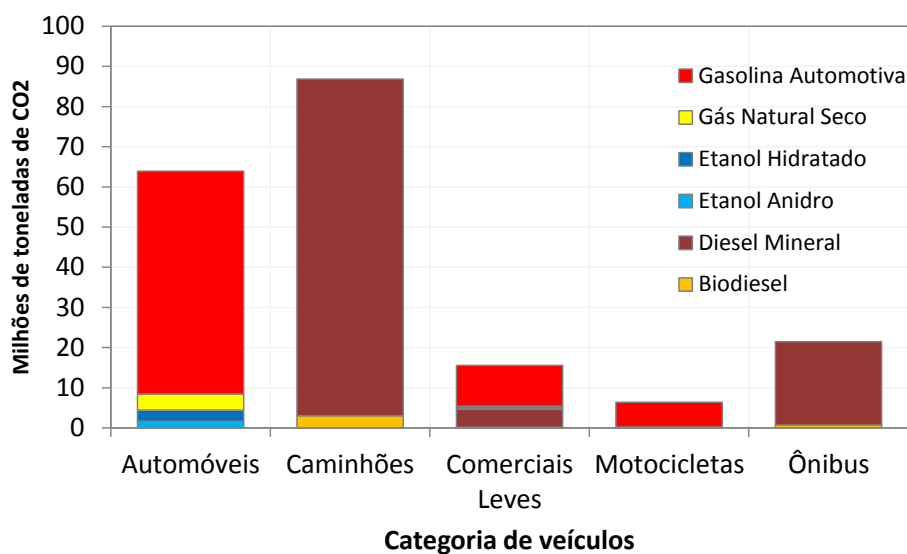
Gráfico 10 - Consumo de energia na etapa poço-tanque por categoria e por combustível utilizado em 2012



Fonte: Elaboração própria.

As emissões de CO<sub>2</sub> estimadas pela análise poço-roda por categoria de veículo e por combustível utilizado são representadas no Gráfico 11. Destaque para a participação do etanol e do biodiesel decorrente, principalmente, das atividades de MUT e do consumo de diesel mineral na produção agrícola. Contudo, a importância das emissões da etapa tanque-roda decorrentes da queima de gasolina automotiva e diesel mineral ainda é muito mais elevada.

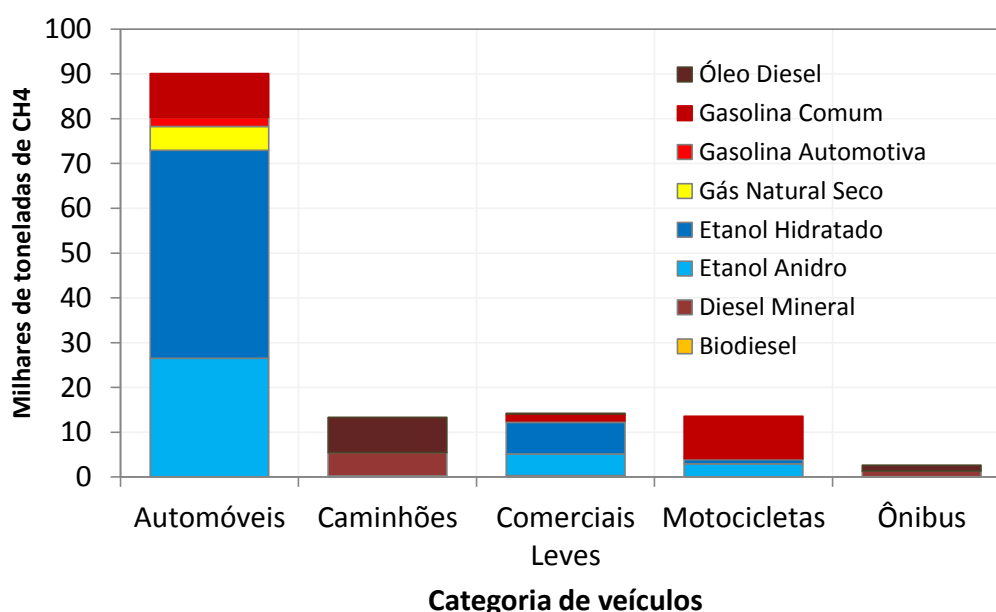
Gráfico 11 – Emissões de CO<sub>2</sub> poço-roda por categoria e por combustível utilizado em 2012



Fonte: Elaboração própria.

As emissões de metano são mais expressivas nas atividades da etapa poço-tanque (95 kt) do que na etapa tanque-roda (39 kt). Uma vez que este resultado está associado às emissões ocorridas no processo industrial do etanol, o Gráfico 12 ilustra a importância do consumo desse combustível em automóveis, comerciais leves e motocicletas. A maior parte do restante das emissões está associada à queima de GNV em automóveis, de gasolina comum em automóveis, comerciais leves e motocicletas e de óleo diesel em caminhões e ônibus.

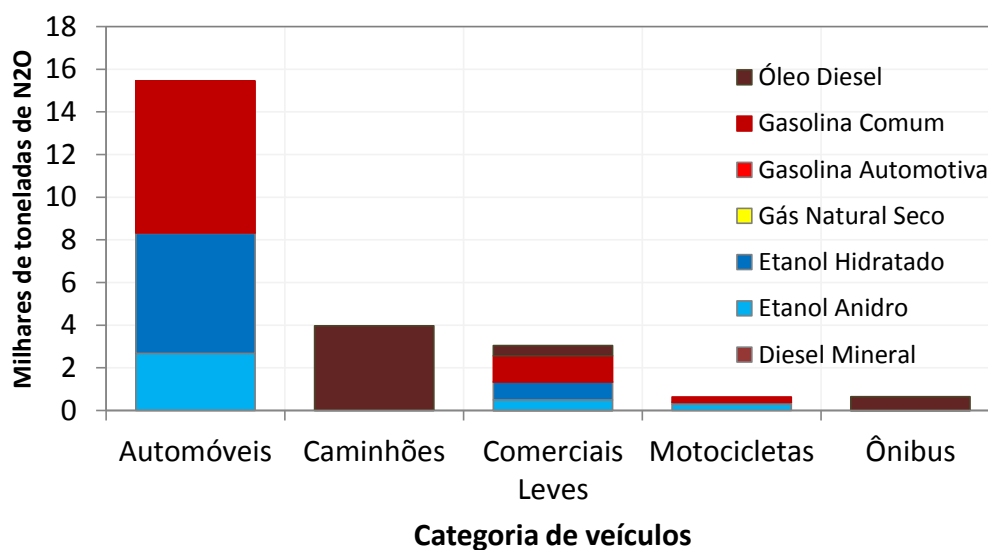
Gráfico 12 - Emissões de CH<sub>4</sub> poço-roda por categoria e por combustível utilizado em 2012



Fonte: Elaboração própria.

Mais uma vez a queima de biomassa no processo industrial do etanol responde pela maior parte das emissões no caso do óxido nitroso; cabe destacar também a relevância do consumo de óleo diesel e gasolina comum na composição dessas emissões. Ainda que não hajam emissões diretamente relacionadas ao biodiesel, a queima desse combustível contribui para as emissões relacionadas à mistura que ele compõe (óleo diesel). Ainda assim, as principais emissões desse gás estão associadas à etapa tanque-roda dos combustíveis (63,7%). O Gráfico 13 ilustra essas descrições.

Gráfico 13 - Emissões de N<sub>2</sub>O poço-roda por categoria e por combustível utilizado em 2012

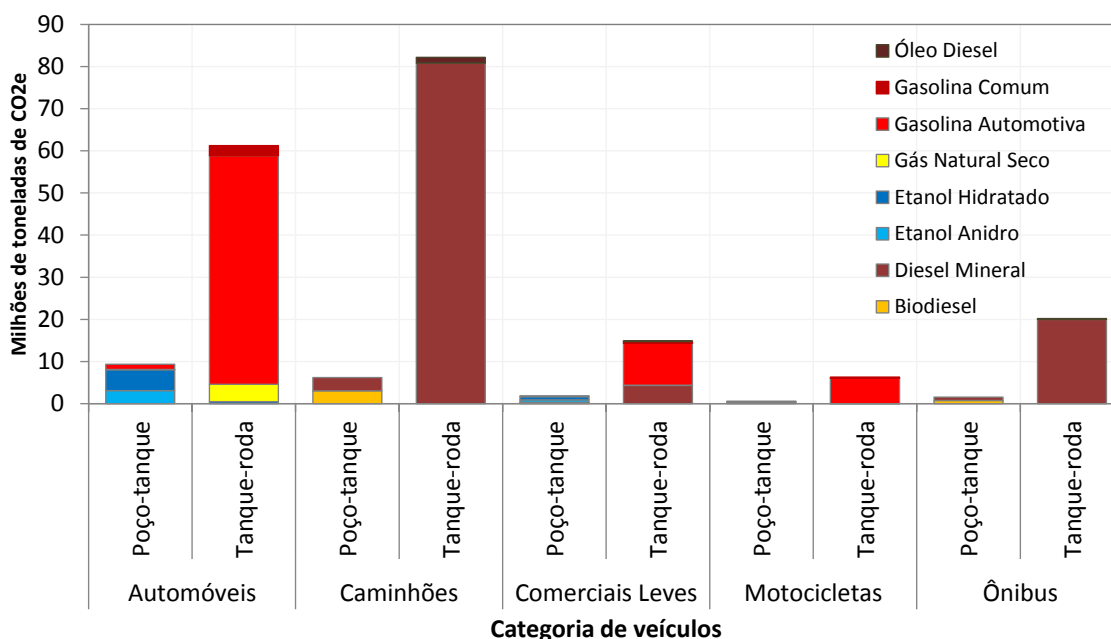


Fonte: Elaboração própria.

O Gráfico 14 procura sintetizar os resultados deste trabalho nas estimativas de emissões de GEE. Ele compara, para cada categoria de veículos, as emissões de CO<sub>2</sub>e por etapa da análise poço-roda. Além disso, segmenta essas emissões conforme o combustível avaliado. A importância das emissões tanque-roda está destacada pelas emissões provenientes da queima de diesel mineral (caminhões e ônibus, principalmente) e de gasolina automotiva (automóveis, comerciais leves e motocicletas). Contudo, alguns aspectos obtidos a partir das estimativas poço-tanque merecem destaque, como as emissões geradas na produção do etanol (MUT e destilarias, em especial) e de biodiesel (MUT e produção agrícola). Ressalta-se que mesmo após aplicação da nova abordagem, as emissões associadas aos combustíveis fósseis são predominantes.



Gráfico 14 - Emissões de CO<sub>2</sub>e por categoria, por tipo de combustível e por etapa da abordagem poço roda em 2012



Fonte: Elaboração própria.

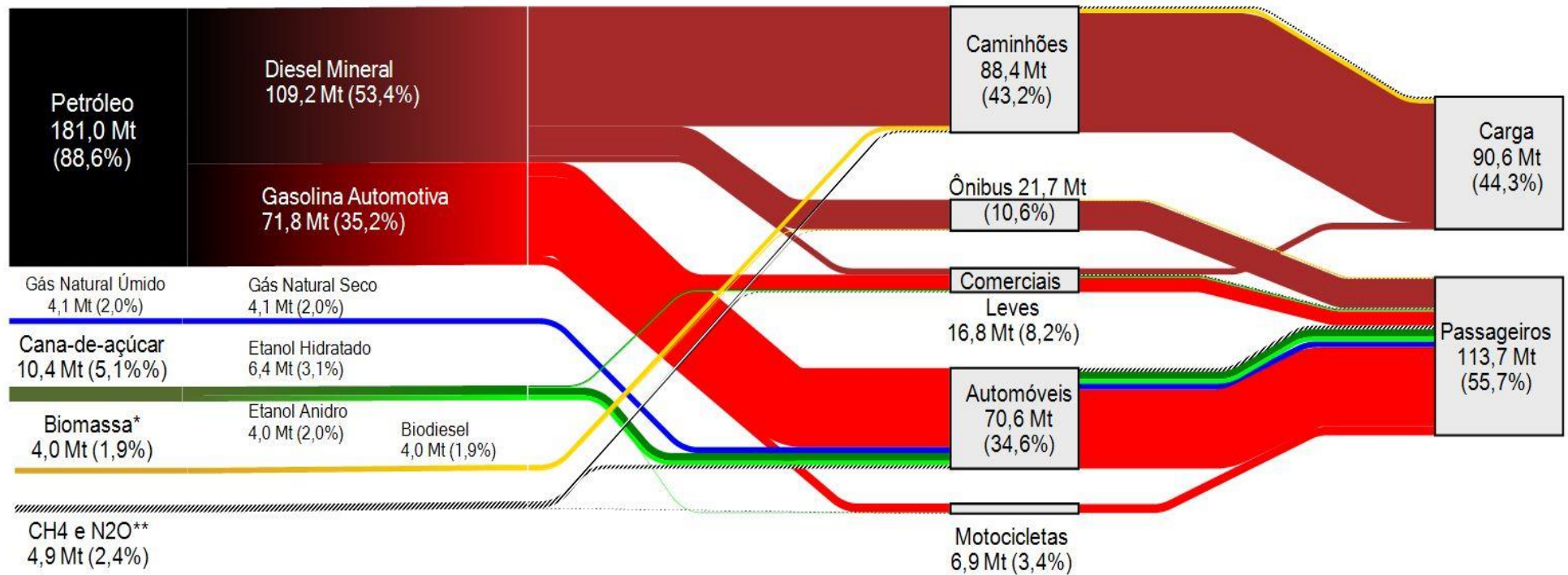
A Figura 4 é apresentada como consolidação desses resultados. Através de um diagrama de Sankey, são distribuídas as emissões poço-rodas do transporte rodoviário nacional em quatro níveis distintos: energia primária, combustíveis de uso final, categoria de veículo e função do transporte<sup>14</sup>. Destacam-se as emissões associadas aos combustíveis fósseis (90,6%), contudo é importante ressaltar as emissões associadas aos biocombustíveis (7,0%) que são muito menos relevantes quando limitadas à abordagem tanque-rodas (0,3%), pois se restringem às emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O atribuídas à queima do etanol hidratado. O restante das emissões está associado à queima das misturas de biocombustíveis e combustíveis fósseis (2,4%).

É possível ainda perceber a importância de cada uso final do transporte nas emissões de CO<sub>2</sub>e, a utilização da análise poço-rodas permite que as emissões associadas à produção e ao uso de biocombustíveis estejam incluídas e, dessa forma, aumentem a participação relativa do transporte de passageiros no total das emissões, contabilizando 55,7% contra 48,7% caso fossem consideradas apenas as emissões tanque-rodas.

<sup>14</sup> Foi considerado que as emissões de caminhões e 50% das emissões de comerciais leves movidos a óleo diesel são destinadas ao transporte de cargas, o restante das categorias foi associado ao transporte de passageiros.

Figura 4 - Diagrama de Sankey das emissões poço-roda de CO<sub>2</sub>e no transporte rodoviário brasileiro em 2012

**Total: 204,4 Mt**



\* Biomassa se refere à energia primária que dá origem ao biodiesel que são óleos vegetais e gordura animal.

\*\* As emissões referenciadas como Metano e Óxido Nitroso estão relacionadas à etapa tanque-roda da queima de Gasolina Comum e Óleo Diesel. Não é possível associar as emissões a cada combustível-componente da mistura.

Fonte: Elaboração própria.

Outra possível análise a partir dos dados produzidos é um desdobramento do transporte de passageiros em individual e coletivo. Das 113,7 MtCO<sub>2</sub>e emitidas pelo transporte de passageiros, 80,9% está associada ao transporte individual (automóveis, motocicletas e comerciais leves); enquanto o transporte coletivo (ônibus urbanos, rodoviário e micro-ônibus) representa apenas 19,1%. Uma vez que as emissões são fortemente impulsionadas pelo uso de combustível, esse dado pode ser usado como indicador da priorização do transporte individual no país; o que remete aos graves problemas de mobilidade urbana enfrentados pelas grandes cidades brasileiras. Esse valor relacionado ao transporte individual se torna ainda mais expressivo pelo uso da análise poço-roda, por conta dos automóveis serem a categoria de maior emissão de CO<sub>2</sub>e na etapa poço-tanque.

### **3.3 Limitações e incertezas**

De modo a tornar a metodologia utilizada neste trabalho mais clara, esta seção procura apontar as simplificações adotadas nas estimativas realizadas e as limitações e incertezas associadas aos resultados obtidos pela sua aplicação.

- Fatores de emissão relacionados à mudança de uso da terra: grande parte das emissões poço-tanque dos biocombustíveis está associada a esta atividade, dessa forma o fator de emissão utilizado, caso distorça a realidade do território nacional, pode provocar variações significativas nas estimativas.
- Fatores de emissão e consumo específico de energia apenas para o biodiesel produzido a partir do óleo de soja: apesar de representar 70% da produção de biodiesel brasileiro em 2012, representar os outros 30% da produção a partir desses fatores pode constituir variações às emissões que estão de fato associadas a esse combustível quando produzido a partir de outros óleos vegetais (algodão, palma, canola) e de sebo animal. Uma análise mais detalhada poderia utilizar fatores associados a cada uma dessas origens e ponderar o consumo de biodiesel a partir da produção associada a elas, assim os fatores corretos seriam aplicados para cada tipo de combustível.

- Considerar todo o gás natural produzido como associado: a disponibilidade de dados do SEEG e do BEN fez com que essa simplificação fosse utilizada, porém a porcentagem do gás natural produzido no Brasil de forma não associada pode possuir fatores distintos para a etapa poço-tanque; em estimativas mais rigorosas seria possível levantar esses fatores específicos para o gás não associado e aplicá-los ao consumo de GNV.
- Combustíveis importados e produzidos a partir de matéria-prima importada: a metodologia empregada restringe a abrangência espacial das estimativas ao território nacional, dessa forma, impactos associados às etapas poço-tanque dos combustíveis de uso final importados não foram estimados, assim como impactos decorrentes da exploração de matéria-prima importada (petróleo importado que foi refinado em diesel mineral e gasolina automotiva); limitando assim as estimativas.
- Atividade de transporte dos combustíveis em seu ciclo de vida: de modo a evitar dupla contagem, nenhuma atividade de transporte rodoviário foi considerada nas estimativas poço-tanque; logo, parte das emissões e do consumo de diesel mineral tanque-roda (combustível do transporte rodoviário de cargas) poderia ser considerada emissões e consumo poço-tanque dos demais combustíveis. Por não poderem ser considerados representativos do ciclo de vida de cada combustível, a comparação dos fatores obtidos com aqueles disponíveis na literatura para combustíveis fósseis é prejudicada. Por outro lado, a metodologia escolhida garante que as emissões tanque-roda são as mesmas causadas pelo consumo de combustível reportado pelo BEN e estimado no INEAVAR.

#### 4. Conclusão

Os dados existentes a respeito das emissões e do consumo de energia da etapa tanque-roda dos combustíveis do transporte rodoviário se mostraram suficientes e em grau de detalhe necessário para a formulação de estimativas através da análise poço-roda.

A metodologia empregada neste trabalho acabou por limitar certas análises comparativas entre os combustíveis, porém foi capaz de ressaltar o fato de que uma abordagem restrita ao uso final da energia nos veículos automotores não permite uma análise criteriosa dos modais; uma vez que tanto emissões quanto consumo de energia apresentaram aumentos significativos quando ampliados para outras atividades do ciclo de vida desses produtos.

Outro ponto a ser destacado como vantagem de se utilizar a análise poço-roda é não atribuir aos biocombustíveis emissões nulas de CO<sub>2</sub>, uma vez que o ciclo de vida da produção desses combustíveis faz uso de carbono fóssil para geração de energia, além de grande parte das emissões poço-tanque relacionadas a eles estar atribuída a atividades que não a queima de combustíveis: mudança de uso da terra e produção agropecuária.

Todas as limitações apresentadas apontam para o fato de que este trabalho não é um comparativo entre os impactos provenientes do ciclo de vida dos combustíveis analisados, mas uma tentativa de ampliar a visão das emissões atribuídas ao transporte rodoviário brasileiro, redistribuindo emissões que estariam alocadas em outros setores caso feitas conforme as *guidelines* do IPCC ou os setores de consumo de energia do BEN.

## 5. Referências Bibliográficas

Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) Disponível em:

<<http://abcvbrasil.org.br/o-que-e-acv.php>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*, 2013. 160p.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural*, 2013. 26p.

CAVALETT, O. *Análise do Ciclo de Vida da Soja* (doutorado). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 245p.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). *Relatório de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2012*, 2013. São Paulo. 90p.

Department of Energy – US (DOE). *Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions*, 2005. 238p.

Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE). *Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012*, 2013. Rio de Janeiro. 284p.

FIGUEIREDO, S.A. *Avaliação Técnico-Econômica das Principais Tendências e Alternativas do Transporte Rodoviário Nacional sob o Ponto de Vista Energético e Ambiental* (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2013. 203p.

GRISOLI, R., NOGUEIRA, A., CASTANHEIRA, É.G., FREIRE, F., SILVA, G.A., COELHO, S. *Emissões de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida do Biodiesel de Soja Produzido no Brasil*. III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços, 2012. 6p.

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). *Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa – Nota Metodológica Setor de Energia*, 2013. Disponível em: <[http://gvces.com.br/arquivos/267/Nota\\_Metodologica\\_SEEG\\_-\\_Energia\\_FINAL\\_-\\_Editado\\_Site\\_-\\_10fev2014.pdf](http://gvces.com.br/arquivos/267/Nota_Metodologica_SEEG_-_Energia_FINAL_-_Editado_Site_-_10fev2014.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2014.

Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (IMAFLOA). *Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa – Nota Metodológica Setor Agropecuário*, 2013. Disponível em: <[http://gvces.com.br/arquivos/266/Nota\\_Metodologica\\_SEEG\\_-\\_Agropecuaria\\_-\\_FINAL\\_-\\_Editado\\_Site\\_-\\_20dez2013.pdf](http://gvces.com.br/arquivos/266/Nota_Metodologica_SEEG_-_Agropecuaria_-_FINAL_-_Editado_Site_-_20dez2013.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2014.

Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (IMAZON). *Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa – Nota Metodológica Mudança de Uso do Solo*, 2013. Disponível em: <[http://gvces.com.br/arquivos/270/Nota\\_Metodologica\\_SEEG\\_-\\_Uso\\_Solo\\_-\\_FINAL\\_-\\_Editado\\_Site\\_-\\_22jan2014.pdf](http://gvces.com.br/arquivos/270/Nota_Metodologica_SEEG_-_Uso_Solo_-_FINAL_-_Editado_Site_-_22jan2014.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2014.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCT). *Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência: Emissões de Gases de Efeito Estufa por Queima de Combustíveis: Abordagem Bottom-Up*, 2010.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCT). *Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência: Emissões Fugitivas de Gases de Efeito Estufa na Indústria de Petróleo e Gás Natural*, 2010.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*, 2013. Brasília. 81p.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). *Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> para utilizações que necessitem do fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional do Brasil*.

Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em: 03 jul. 2014.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013, Ano-base 2012, 2014*. 155p.

Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em:  
<[http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas\\_publicacoes.html](http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html)>. Acesso em: 10 nov. 2013.

Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em:  
<<http://www.feng.pucrs.br/~eberson/13.03/CoeficientesdeDestinacao>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

MOURAD, A.L. *Avaliação da Cadeia Produtiva de Biodiesel obtido a partir da Soja* (doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 141p.

Observatório do Clima (OC). Disponível em:  
< <http://seeg.observatoriodoclima.eco.br/>>. Acesso em: 15 abr. 2014.

OMETTO, A.R. *Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível Pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia* (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005. 209p.

ROCHA, T.B., *Harmonização de Inventários de Ciclo de Vida de Biocombustíveis do Brasil* (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011. 106p.

SILVA, C.R.U., *Perspectivas de longo prazo sobre o perfil ambiental do etanol de cana-de-açúcar no Brasil* (doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2013. 193p.



## ANEXO A – Parâmetros utilizados nas estimativas das emissões de CO<sub>2</sub>

O Relatório de Referência “Emissões de Gases de Efeito Estufa por Queima de Combustíveis: Abordagem Bottom-Up”, o qual compõe a Segunda Comunicação Nacional do Brasil à CQNUMC (MCT, 2010) apresenta fatores de emissão para combustíveis em termos de toneladas de carbono elementar por terajoule ( $Fe_C$ ). Esses fatores podem ser convertidos para outros em termos de emissões de CO<sub>2</sub> (kt) por ktep ( $Fe_{CO_2}$ ) conforme a equação 8 a seguir, utilizando os valores para cada combustível:

$$Fe_{CO_2} = Fe_C \times 41,868 \times \%Oxi \times \frac{44}{12} \times 10^{-3} \quad (8)$$

Onde:

41,868 é a conversão das unidades de energia em TJ/ktep;

$\%Oxi$  é a fração do carbono elementar oxidado na combustão usada na Comunicação Nacional;

$\frac{44}{12}$  é a razão entre as massas molares do CO<sub>2</sub> e do carbono elementar (tCO<sub>2</sub>/tC).

A Tabela 17 apresenta esses fatores e o fator  $Fe_{CO_2}$  calculado para os combustíveis que são consumidos nas estimativas deste trabalho.

Tabela 17 - Densidades energéticas em 2012 e fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos combustíveis

Fonte de Energia	Densidade Energética		Fator de Emissão (tC/TJ)	Fração Oxidada	Fator de Emissão (ktCO <sub>2</sub> /ktep)
	Valor	Unidade			
Etanol Anidro	0,534	ktep/mil m3	18,8	0,98	2,83
Etanol Hidratado	0,510	ktep/mil m3	18,8	0,98	2,83
Bagaço de Cana	0,213	ktep/kt	26,5	0,98	3,99
Biodiesel	0,792	ktep/mil m3	20,2	0,99	3,07
Eletricidade	0,086	ktep/GWh	-	-	-
Gás de Refinaria	0,652	ktep/mil m3	18,2	0,99	2,77
Gás Natural Seco	0,880	ktep/milhões de m3	15,3	1,00	2,34
Gás Natural Úmido	0,993	ktep/milhões de m3	15,3	1,00	2,34
Gasolina Automotiva	0,770	ktep/mil m3	18,9	0,99	2,87
GLP	0,611	ktep/mil m3	17,2	0,99	2,61
Óleo Combustível	0,957	ktep/mil m3	21,1	0,99	3,21
Óleo Diesel	0,848	ktep/mil m3	20,2	0,99	3,07

Ressalta-se que apesar de apresentados os fatores de emissão na Tabela 17, as emissões de CO<sub>2</sub> geradas na queima de combustíveis renováveis foram consideradas nulas, como descrito na seção 2.3.

As emissões associadas ao uso de eletricidade nos subsetores do setor energético tiveram metodologia própria apresentada na seção 2.5.1.1, dessa forma, não é apresentado fator de emissão para eletricidade.

ANEXO B – Parâmetros utilizados nas estimativas das emissões de CH<sub>4</sub> e  
N<sub>2</sub>O

Tabela 18 - Coeficientes de destinação e fatores de emissão utilizados nas estimativas de emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O nos subsetores do setor energético

Combustível	Uso Final	Coeficiente de Destinação	Fator de emissão (kgCH <sub>4</sub> /TJ)	Fator de emissão (kgN <sub>2</sub> O/TJ)
Bagaço de cana	Calor de processo	100,0%	30	4
Eletricidade	Força Motriz	93,0%	-	-
	Iluminação	7,0%	-	-
Gás de Refinaria	Força Motriz	60,0%	4	0,1
	Calor de processo	30,0%	0,1	0,1
	Aquecimento direto	10,0%	1,1	0,1
Gás Natural Seco	Aquecimento direto	100,0%	1,1	0,1
Gás Natural Úmido	Aquecimento direto	100,0%	1,1	0,1
GLP	Força Motriz	49,5%	4	0,1
	Calor de processo	1,9%	0,1	0,1
	Aquecimento direto	48,6%	1,1	0,1
Óleo Combustível	Força Motriz	60,0%	4	0,6
	Calor de processo	30,0%	0,9	0,3
	Aquecimento direto	10,0%	1	0,6
Óleo Diesel	Força Motriz	95,0%	4	0,6
	Calor de processo	5,0%	0,9	0,4

Tabela 19 - Fatores de emissão de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O dos combustíveis usados na geração de eletricidade das Centrais Elétricas Autoprodutoras dos subsetores do Setor Energético

Combustível	Fator de emissão (kgCH <sub>4</sub> /TJ)	Fator de emissão (kgN <sub>2</sub> O/TJ)
Bagaço de cana	30	4
Gás de refinaria	6	0,1
Gás natural seco	6	0,1
Gás natural úmido	6	0,1
Óleo combustível	0,9	0,3
Óleo diesel	4	0,6

**ANEXO C – Estimativas detalhadas para a etapa poço-tanque e para a análise poço-roda**

**Tabela 20 - Consumo de combustível poço-tanque no transporte rodoviário em 2012 em ktep**

Categoria	Biodiesel	Diesel Mineral	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gás Natural Seco	Gasolina Automotiva
Automóveis	-	-	1.165,74	2.552,10	3,32	289,59
Caminhões Leves	34,28	92,08	-	-	-	-
Caminhões Médios	31,78	85,36	-	-	-	-
Caminhões Pesados	96,28	258,60	-	-	-	-
Caminhões Semileves	4,31	11,57	-	-	-	-
Caminhões Semipesados	108,60	291,70	-	-	-	-
Comerciais Leves	14,75	39,61	213,59	393,38	-	53,06
Micro-ônibus	11,71	31,45	-	-	-	-
Motocicletas	-	-	129,21	49,38	-	32,10
Ônibus Rodoviários	8,67	23,29	-	-	-	-
Ônibus Urbanos	47,70	128,12	-	-	-	-

**Tabela 21 - Emissões de CO<sub>2</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-tanque) em kt**

Categoria	Biodiesel	Diesel Mineral	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gás Natural Seco	Gasolina Automotiva
Automóveis	-	-	1.717,23	2.714,80	16,71	1.182,15
Caminhões Leves	379,34	375,89	-	-	-	-
Caminhões Médios	351,66	348,45	-	-	-	-
Caminhões Pesados	1.065,36	1.055,65	-	-	-	-
Caminhões Semileves	47,65	47,22	-	-	-	-
Caminhões Semipesados	1.201,71	1.190,76	-	-	-	-
Comerciais Leves	163,18	161,69	314,64	418,46	-	216,60
Micro-ônibus	129,57	128,39	-	-	-	-
Motocicletas	-	-	190,34	52,53	-	131,03
Ônibus Rodoviários	95,93	95,06	-	-	-	-
Ônibus Urbanos	527,83	523,02	-	-	-	-

**Tabela 22 - Emissões de CH<sub>4</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-tanque) em kt**

Categoria	Biodiesel	Diesel Mineral	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gás Natural Seco	Gasolina Automotiva
Automóveis	-	-	26,53	43,03	0,11	2,03
Caminhões Leves	0,03	0,65	-	-	-	-
Caminhões Médios	0,03	0,60	-	-	-	-
Caminhões Pesados	0,08	1,82	-	-	-	-
Caminhões Semileves	0,00	0,08	-	-	-	-
Caminhões Semipesados	0,09	2,05	-	-	-	-
Comerciais Leves	0,01	0,28	4,86	6,63	-	0,37
Micro-ônibus	0,01	0,22	-	-	-	-
Motocicletas	-	-	2,94	0,83	-	0,23
Ônibus Rodoviários	0,01	0,16	-	-	-	-
Ônibus Urbanos	0,04	0,90	-	-	-	-

Tabela 23 - Emissões de N<sub>2</sub>O no transporte rodoviário em 2012 (poço-tanque) em kt

Categoria	Biodiesel	Diesel Mineral	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gás Natural Seco	Gasolina Automotiva
Automóveis	-	-	2,674	4,372	0,000	0,005
Caminhões Leves	3,89E-04	1,75E-03	-	-	-	-
Caminhões Médios	3,61E-04	1,62E-03	-	-	-	-
Caminhões Pesados	1,09E-03	4,91E-03	-	-	-	-
Caminhões Semileves	4,89E-05	2,19E-04	-	-	-	-
Caminhões Semipesados	1,23E-03	5,53E-03	-	-	-	-
Comerciais Leves	1,68E-04	7,51E-04	0,490	0,674	-	0,001
Micro-ônibus	1,33E-04	5,97E-04	-	-	-	-
Motocicletas	-	-	0,296	0,085	-	0,001
Ônibus Rodoviários	9,85E-05	4,42E-04	-	-	-	-
Ônibus Urbanos	5,42E-04	2,43E-03	-	-	-	-

Tabela 24 - Emissões de CO<sub>2</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-roda) em kt

Categoria	Biodiesel	Diesel Mineral	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gás Natural Seco	Gasolina Automotiva
Automóveis	-	-	1.717,23	2.714,80	4.010,41	55.464,72
Caminhões Leves	379,34	10.437,54	-	-	-	-
Caminhões Médios	351,66	9.675,73	-	-	-	-
Caminhões Pesados	1.065,36	29.313,25	-	-	-	-
Caminhões Semileves	47,65	1.311,14	-	-	-	-
Caminhões Semipesados	1.201,71	33.064,91	-	-	-	-
Comerciais Leves	163,18	4.489,83	314,64	418,46	-	10.162,60
Micro-ônibus	129,57	3.565,22	-	-	-	-
Motocicletas	-	-	190,34	52,53	-	6.147,82
Ônibus Rodoviários	95,93	2.639,51	-	-	-	-
Ônibus Urbanos	527,83	14.523,25	-	-	-	-

Tabela 25 - Emissões de CH<sub>4</sub> no transporte rodoviário em 2012 (poço-roda) em kt<sup>15</sup>

Categoria	Biodiesel	Diesel Mineral	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gás Natural Seco	Gasolina Automotiva	Gasolina Comum	Óleo Diesel
Automóveis	-	-	26,53	46,42	5,32	2,03	9,78	-
Caminhões Leves	0,03	0,65	-	-	-	-	-	1,35
Caminhões Médios	0,03	0,60	-	-	-	-	-	1,26
Caminhões Pesados	0,08	1,82	-	-	-	-	-	2,36
Caminhões Semileves	0,00	0,08	-	-	-	-	-	0,28
Caminhões Semipesados	0,09	2,05	-	-	-	-	-	2,67
Comerciais Leves	0,01	0,28	4,86	7,02	-	0,37	1,54	0,12
Micro-ônibus	0,01	0,22	-	-	-	-	-	0,32
Motocicletas	-	-	2,94	0,96	-	0,23	9,41	-
Ônibus Rodoviários	0,01	0,16	-	-	-	-	-	0,19
Ônibus Urbanos	0,04	0,90	-	-	-	-	-	0,78

<sup>15</sup> As emissões de Gasolina Automotiva e Diesel Mineral se referem à etapa poço-tanque, pois as emissões de metano e óxido nítrico desses combustíveis estão contidas nas emissões tanque-roda das misturas que eles são componentes (Gasolina Comum e Óleo Diesel, respectivamente).

Tabela 26 - Emissões de N<sub>2</sub>O no transporte rodoviário em 2012 (poço-roda) em kt

Categoria	Biodiesel	Diesel Mineral	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Gás Natural Seco	Gasolina Automotiva	Gasolina Comum	Óleo Diesel
Automóveis	-	-	2,67	5,64	2,33E-04	0,01	7,13	-
Caminhões Leves	3,89E-04	1,75E-03	-	-	-	-	-	0,68
Caminhões Médios	3,61E-04	1,62E-03	-	-	-	-	-	0,63
Caminhões Pesados	1,09E-03	4,91E-03	-	-	-	-	-	1,18
Caminhões Semileves	4,89E-05	2,19E-04	-	-	-	-	-	0,14
Caminhões Semipesados	1,23E-03	5,53E-03	-	-	-	-	-	1,33
Comerciais Leves	1,68E-04	7,51E-04	0,49	0,84	-	1,01E-03	1,23	0,48
Micro-ônibus	1,33E-04	5,97E-04	-	-	-	-	-	0,16
Motocicletas	-	-	0,30	0,08	-	6,09E-04	0,26	-
Ônibus Rodoviários	9,85E-05	4,42E-04	-	-	-	-	-	0,09
Ônibus Urbanos	5,42E-04	2,43E-03	-	-	-	-	-	0,39