

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE  
MATERIAIS**

**ERNANI FRANCISCO CHOMA**

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DA OFERTA E  
DEMANDA DE ENERGIA PARA AUTOMÓVEIS NO BRASIL  
UTILIZANDO AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA  
2014**

ERNANI FRANCISCO CHOMA

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DA OFERTA E  
DEMANDA DE ENERGIA PARA AUTOMÓVEIS NO BRASIL  
UTILIZANDO AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba, como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia” – Área de Concentração: Engenharia de Manufatura.

**Orientador:** Prof<sup>a</sup>. Cássia Maria Lie Ugaya, Dr.

**CURITIBA**

**2014**

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

- C548a Choma, Ernani Francisco  
2014 Avaliação de impactos ambientais da oferta e demanda de energia para automóveis no Brasil utilizando avaliação do ciclo e vida / Ernani Francisco Choma.-- 2014.  
140 f.: il.; 30 cm
- Texto em português, com resumo em inglês.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2014.  
Bibliografia: f. 126-136.
1. Veículos elétricos - Aspectos ambientais. 2. Ciclo de vida do produto - Avaliação. 3. Energia - Consumo. 4. Impacto ambiental. 5. Recursos energéticos - Planejamento. 6. Gestão da procura (Concessionárias de energia elétrica). 7. Política energética - Brasil. 8. Engenharia mecânica - Dissertações. I. Ugaya, Cássia Maria Lie, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD 22 -- 620.1

## TERMO DE APROVAÇÃO

ERNANI FRANCISCO CHOMA

# AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DA OFERTA E DEMANDA DE ENERGIA PARA AUTOMÓVEIS NO BRASIL UTILIZANDO AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

---

Prof. Paulo César Borges, Dr.  
Coordenador do Programa

### Banca Examinadora

---

Prof. Cássia M. L. Ugaya, Dr.  
UTFPR – orientadora

---

Prof. Miguel E. M. Udaeta, Dr.  
USP

---

Prof. Dario E. A. Dergint, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Carlos Cziulik, Ph.D.  
UTFPR

Curitiba, 29 de agosto de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

À professora Cássia Maria Lie Ugaya, pela oportunidade, pela paciência, e, sobretudo, pela imensa dedicação durante a orientação e transmissão de conhecimentos, que contribuíram muito para o meu aprendizado e sem as quais esse trabalho não poderia ter sido realizado.

À minha família, pelo apoio incondicional, paciência e incentivo durante a realização do trabalho.

Ao professor Dario Eduardo Amaral Dergint, pelo incentivo, e que muito contribuiu, especialmente no início do trabalho, e, também, como parte integrante das bancas de qualificação e de defesa.

Aos demais professores das bancas de qualificação e defesa, Carlos Cziulik e Miguel Edgar Morales Udaeta, pelas contribuições.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Metrologia e Qualidade (LAMEC), em especial ao professor Walter Mikos, pelo espaço cedido para a realização da pesquisa.

Aos meus colegas e professores do LAMEC, pelo excelente convívio e pelas proveitosas discussões acerca do tema durante a realização do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) e a todos os docentes do curso e, também, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia (PPGTE), onde frequentei disciplinas, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Dr. Gregory A. Norris, cujo trabalho me inspirou na elaboração dessa dissertação.

À PRé-Consultants e Ecoinvent Centre, pela disponibilização das licenças educacionais do software e da base de dados utilizados na realização do trabalho.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

“Impacts from agriculture are expected to increase substantially due to population growth, increasing consumption of animal products. Unlike fossil fuels, it is difficult to look for alternatives: people have to eat. A substantial reduction of impacts would only be possible with a substantial worldwide diet change away from animal products” (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2010, p. 82)

“Os impactos da agricultura devem aumentar consideravelmente devido ao crescimento populacional, aumentando o consumo de produtos de origem animal. Ao contrário dos combustíveis fósseis, é difícil buscar alternativas: as pessoas têm que comer. Uma redução substancial nos impactos somente seria possível com uma mudança substancial de dieta no mundo, afastando-se de produtos de origem animal” (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2010, p. 82, tradução livre do autor).

## RESUMO

CHOMA, Ernani. Avaliação de impactos ambientais da oferta e demanda de energia para automóveis no Brasil utilizando Avaliação do Ciclo de Vida. 2014. 140 f. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Veículos elétricos (VEs) são vistos como uma das potenciais soluções para os problemas ambientais associados com os veículos de combustão interna (VCIs). VEs, no entanto, também causam impactos ambientais ao longo do ciclo de vida e aumento no consumo de eletricidade, sendo também necessário incluí-los no planejamento energético. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) realizados para avaliar os impactos ambientais de VEs em outros países mostram que a fonte de eletricidade é significativa para determinar se estes apresentam melhores resultados que VCIs. O caso brasileiro, contudo, pode apresentar resultados diferentes, em função da matriz elétrica diferente e da possibilidade de utilização de etanol pelos VCIs. O objetivo geral deste estudo é identificar como atender a demanda por transporte de pessoas por automóveis com menor impacto ambiental, para diferentes categorias de impacto, no Brasil. Para realizar o estudo, foram realizadas quatro etapas: (i) definir dados gerais, como o ano de projeção; (ii) identificar a frota de automóveis e a respectiva demanda energética e opções de atendimento; (iii) realizar ACV por veículo; e (iv) avaliar o impacto ambiental da frota, comparando e selecionando opções de menor impacto. Foram considerados dois horizontes de tempo: 2022 e 2030. Foi utilizada a base de dados de inventário do ciclo de vida (ICV) doecoinvent v.3.01, com adaptações para o contexto brasileiro utilizando dados de literatura. Especificamente na definição da fonte de eletricidade, utilizou-se a abordagem decisional de ICV para 2022, enquanto que, para 2030, foram definidas possíveis tecnologias marginais/incrementais. Utilizou-se o método de avaliação do impacto do ciclo de vida CML 2000 v.2.05, sendo que para 2030 foram selecionadas três categorias (depleção de recursos abióticos; aquecimento global; depleção da camada de ozônio), em conjunto com resultados de ICV para ocupação da terra. Para 2030, utilizou-se, também, em análise de sensibilidade, o método EDIP 2003 v.1.04. Esses métodos estão disponíveis no *software* SimaPro v.8.0.2, utilizado para os cálculos. Os resultados para 2022 mostraram que, com recarga em horários de menor demanda, o VE é melhor para algumas categorias e o VCI melhor para outras. Já para 2030, contudo, uma inclusão de aproximadamente 35% de VEs na frota pode reduzir bastante os impactos para as três categorias do método CML e para o indicador único do método EDIP, embora cause aumento significativo na área ocupada. Deste modo, esses resultados poderiam ser comparados com outros tipos de ocupação da terra que visem reduzir impactos ambientais. Conclui-se que os VEs têm potencial de grande redução de impactos ambientais, de forma que poderiam ser alvos de políticas públicas que visem reduzir tais impactos. Entre as incertezas do estudo incluem-se: a simplificação na identificação das fontes de energia; a utilização de parâmetros médios para os veículos, em parte relativos apenas a veículos novos; a definição da tecnologia marginal/incremental apenas para a eletricidade; a não consideração de outras tecnologias, como VCIs a etanol de segunda e terceira geração; e a utilização de

dados de inventário do presente ou passado para estimar condições futuras. Estas poderiam ser tratadas em trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Veículo Elétrico (VE). Planejamento Energético. Planejamento Integrado de Recursos (PIR). Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD).



## ABSTRACT

CHOMA, Ernani. Environmental impact assessment of energy supply and demand for automobiles in Brazil using Life Cycle Assessment. 2014. 140 f. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Electric Vehicles (EVs) are seen as a potential solution for the environmental problems associated with Internal Combustion Engine Vehicles (ICEVs). EVs, on the other hand, also cause environmental impacts throughout their life cycles and increases in the demand for electricity, so that they need to be included in the energy planning. Life Cycle Assessment (LCA) studies carried out to assess the environmental impacts of EVs in other countries, indicated that the electricity source is significant to determine whether these present better results than ICEVs or not. For Brazil, however, results might be different, due to the different electricity mix and to the possibility of ICEVs to use sugarcane ethanol. The main purpose of this study is to analyze how to meet the demand for passenger transport by automobiles in Brazil with a smaller environmental impact, for different impact categories. In order to attain this objective, four steps were executed: (i) to define general data, such as the year of projection; (ii) to identify the automobile fleet and the respective energy demand and fulfillment options; (iii) to perform LCA, per vehicle; and (iv) to assess the environmental impact of the fleet, comparing and selecting options with smaller impact. Two time horizons were considered: 2022 and 2030. The ecoinvent database v.3.01 was used as the Life Cycle Inventory (LCI) data source, with some adaptations for the Brazilian context using literature data. Specifically for the identification of the electricity source, the decisional LCI approach was used, for 2022, while, for 2030, possible marginal/incremental technologies were identified. The Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method CML 2000 v.2.05 was used, from which three categories were chosen for 2030 (abiotic resource depletion; climate change; and ozone layer depletion), together with LCI results for land occupation. The single score of the LCIA method EDIP 2003 v.1.04 was used in a sensitivity analysis. These methods are available in SimaPro 8.0.2, used for calculations. The results for 2022 showed that, with battery charge during off-peak hours, the EV is better in some impact categories, while the ICEV is better in others. For 2030, however, an EV market penetration of approximately 35% can significantly reduce the impacts for the three CML categories and for the EDIP single score, albeit causing a significant increase in land occupation. These results, therefore, can be compared with other types of land occupations which aim to reduce environmental impacts. It was concluded that EVs have good environmental impacts reduction potentials, in a way that they could be targeted by public policies that address such impacts. Among the uncertainties of this study are included: the simplified identification of energy sources; the use of average parameters for the transportation sector, in part associated only with new vehicles; the definition of the marginal/incremental technology only for electricity; the fact that other vehicle technologies, such as ICEVs powered by second and third generation ethanol; and the use of present or past LCI data to assess future conditions. These could be dealt with in future studies.

**Keywords:** Life Cycle Assessment (LCA). Electric Vehicle (EV). Energy Planning. Integrated Resource Planning (IRP). Demand Side Management (DSM).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença conceitual entre ACV atribucional e consequential .....	24
Figura 2 – Matriz Decisional de energia para o ano de 2022, com base no estudo de Frischknecht e Stucki (2010).....	24
Figura 3 – Estrutura do modelo atribucional.....	28
Figura 4 – Estrutura do modelo consequential. ....	29
Figura 5 - Curva de carga horária do SIN para uma semana média no ano de 2012. ....	52
Figura 6 - Curvas de carga para uma média semanal do SIN para 2012 (a) e estimadas para 2022 (b) e 2030 (c). ....	54
Figura 7 – Curva de carga estimada para 2022 com VEs, para os três níveis de penetração. (a) representa todos os VEs carregando ao mesmo tempo; (b) representa uma carga dos VEs igualmente distribuída; e (c) representa o caso ótimo, resultando em curva de carga plana para o período noturno considerado. ....	62
Figura 8 – Curva de carga estimada para 2030 com dois níveis de penetração de VEs.....	64
Figura 9 – Resultados para 2022 (caracterização).....	96
Figura 10 – Contribuição dos processos no impacto do transporte de 1 pkm por um VE utilizando a matriz decisional (a) e eletricidade de gás natural de ciclo combinado (b).....	97
Figura 11 – Contribuição dos processos no impacto da produção do VE (considerando o ciclo de vida destes), sem a inclusão da bateria.....	98
Figura 12 – Contribuição dos processos no impacto do transporte de 1 pkm por um VCI utilizando etanol (a) e gasolina tipo C (b). ....	100
Figura 13 - Resultados para 2030 de caracterização, com todas as categorias de impacto.....	102
Figura 14 – Resultados para 2030 para (a) Depleção de Recursos Abióticos; (b) Mudanças Climáticas; (c) Depleção da Camada de Ozônio; (d) Ocupação da Terra (resultado de inventário); e (e) pontuação única do método de ponto final EDIP 2003. Os resultados de (a); (b); e (c) são de caracterização. ....	112

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Metas iniciais de qualidade de dados e fontes utilizadas. ....	30
Quadro 2 – Classificação do tamanho econômico do objeto de investigação.....	33
Quadro 3 – Modelagem recomendada para cada porte econômico.....	34
Quadro 4 – Consumo de eletricidade no SIN para o período estudado. ....	51
Quadro 5 – Dias da semana excluídos da média em função de feriados .....	52
Quadro 6 – Características do VE de Itaipu Binacional e parceiros. ....	55
Quadro 7 – Consumo de eletricidade dos VEs em 2022 e 2030.....	57
Quadro 8 – Consumo dos VCI's em 2022 e em 2030, para os dois casos considerados.....	58
Quadro 9 – Frota de veículos em 2022 e 2030. ....	59
Quadro 10 – Demanda de eletricidade dos VEs para 2022. ....	60
Quadro 11 – Características das baterias do VE utilizadas para 2022 e 2030. ....	72
Quadro 12 – Proporção de combustíveis utilizados na frota brasileira em 2022.....	73
Quadro 13 – Densidades e consumos de combustível para 2022 e 2030. ....	73
Quadro 14 – Emissões durante a fase de uso para os VCI's <i>flex fuel</i> utilizando etanol. .....	75
Quadro 15 – Emissões durante a fase de uso para os VCI's <i>flex fuel</i> utilizando gasolina tipo C.....	76
Quadro 16 – Produção de cana para etanol para os anos considerados.....	78
Quadro 17 – Valores de ocupação e transformação do uso da terra utilizados para os anos de 2022 e 2030, para produzir 83,1 toneladas de cana.....	79
Quadro 18 – Capacidade instalada e produção de eletricidade no Brasil. ....	82
Quadro 19 – Análises de sensibilidade realizadas. ....	85
Quadro 20 – Consumo adicional em função da autonomia.....	88
Quadro 21 – Legenda para as simulações para 2030 descritas no Quadro 23, no Quadro 24, na Figura 13 e na Figura 14. ....	101
Quadro 22 - Variação observada nas análises de sensibilidade. ....	103
Quadro 23 – Resultados de caracterização para 2030 para as três categorias do método CML selecionadas. ....	108
Quadro 24 – Resultados para 2030 para ocupação da terra (resultados de inventário) e para o método EDIP 2003 (pontuação única).....	109
Quadro 25 – Simulações alteradas consideradas no Quadro 26 e no Quadro 27. .	115
Quadro 26 – Variação em relação ao caso base (n: 0) para 2022.....	116
Quadro 27 – Variação em relação ao VE utilizando eletricidade com participação de 50% de hidrelétricas e 50% de bagaço de cana (n: 14), para 2030.....	117

## LISTA DE SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i> (demanda de energia cumulativa)
CHP	<i>Combined Heat and Power</i> (cogeração)
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
DSM	<i>Demand-Side Management</i> (Gerenciamento do Lado da Demanda)
EIO-LCA	<i>Economic Input-Output Life Cycle Assessment</i> (Avaliação do Ciclo de Vida com matriz de insumo produto)
FCV	<i>Fuel Cell Vehicle</i> (Veículo a célula de combustível)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLD	Gerenciamento do Lado da Demanda
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (potencial de aquecimento global)
HEMS	<i>Home Energy Management System</i> (sistema residencial de gestão de energia)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i> (Sistema Internacional de Dados de Referência sobre o Ciclo de Vida)
Li-ion	Lithium-ion (Lítio-íon)
MME	Ministério de Minas e Energia
MP <sub>2.5</sub>	Material Particulado, com diâmetro menor que 2,5 micrômetros
NMHC	<i>Non Methane Hydrocarbon</i> (hidrocarbonetos não-metano)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIR	Planejamento Integrado de Recursos
SIN	Sistema Interligado Nacional
VCI	Veículo de Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VEHP	Veículo Híbrido <i>Plug-in</i>
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> (Composto Orgânico Volátil)

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
1.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	19
1.2 PROBLEMA .....	19
1.3 OBJETIVOS .....	20
1.4 JUSTIFICATIVA .....	20
1.5 ESTRUTURAÇÃO .....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	22
2.1 ABORDAGENS DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	22
2.1.1 ACV Atribucional .....	25
2.1.2 Consequencial .....	26
2.1.3 Decisional .....	32
2.1.4 Análise das Abordagens .....	33
2.1.5. Base de dados doecoinvent .....	36
2.2 PLANEJAMENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS .....	37
2.2.1 Planejamento Integrado de Recursos (PIR) .....	38
2.3 ACV E PIR .....	41
2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO .....	46
3 MÉTODO .....	49
3.1 DADOS GERAIS PARA O ESTUDO .....	50
3.1.1 Definição do ano de projeção .....	50
3.1.2 Consumo de eletricidade .....	51
3.1.2.1 Curva de carga do ano base .....	51
3.1.2.2 Curva de carga para os anos de projeção .....	52
3.1.3 Características dos Veículos .....	55
3.2 FROTA DE AUTOMÓVEIS .....	59
3.2.1 Carga de eletricidade da frota de VEs em 2022 .....	61
3.2.2 Carga de eletricidade da frota de VEs em 2030 .....	63
3.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA POR VEÍCULO .....	64
3.3.1 Definição do Escopo .....	64
3.3.2. Realização de ACV rápida .....	65
3.3.3 Seleção da Abordagem de ICV .....	66
3.3.3.1 Matriz de eletricidade para os VEs .....	68
3.3.3.2 Comparação entre diferentes abordagens .....	70
3.3.4 Inventário .....	70
3.3.4.1 Da extração de matéria-prima à produção do veículo .....	71
3.3.4.2 Fase de uso .....	72
3.3.4.2.1 VCI .....	72
3.3.4.2.2 VE .....	80
3.3.4.3 Cenário de destino final .....	84
3.3.4.4 Incertezas e análise de sensibilidade .....	84
3.3.4.4.1 VCI .....	86
3.3.4.4.2 VE .....	86
3.4 ACV PARA A FROTA .....	93
4 RESULTADOS .....	94
4.1 RESULTADOS PARA 2022 .....	94
4.2 RESULTADOS PARA 2030 .....	101

4.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE PARA 2022.....	102
4.4 RESULTADOS PARA 2030: CATEGORIAS DE IMPACTO SELECIONADAS .....	107
4.5 DISCUSSÃO.....	114
5 CONCLUSÃO.....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	126
APÊNDICES.....	137

## 1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais têm sido cada vez mais discutidos em diferentes setores da economia, inclusive nas políticas governamentais brasileiras. No caso do planejamento energético, a discussão já é antiga. No Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2022, se observa uma preocupação ambiental, especialmente com as emissões de gases de efeito-estufa (GEE) (BRASIL, 2013a). São considerados quantitativamente, contudo, apenas GEEs e dados de ocupação da terra, não sendo considerado todo o ciclo de vida.

Mais especificamente, é importante considerar os impactos ambientais do setor de transporte no planejamento energético, que foi responsável por 47%, ou 204 Mt, das emissões de CO<sub>2</sub>-eq. associadas ao uso e produção de energia em 2012 (BRASIL, 2013a, p. 346). Adicionalmente, embora as projeções do autor indiquem que esta participação cairá para 44% em 2022, as emissões aumentarão para 306 Mt.

A previsão, no caso dos veículos leves, é que a frota deve aumentar de 35,7 milhões de veículos em 2013 para 59,3 milhões em 2022, um crescimento de 5,9% ao ano (BRASIL, 2013a, p. 54). Já as previsões de Brasil (2011a, p. 66) indicam que a contribuição dos automóveis para o total de emissões de CO<sub>2</sub> do setor de transporte rodoviário ocorridas no escapamento deve chegar a 37% em 2020. Uma alternativa que pode ser avaliada no intuito de reduzir os impactos ambientais é a adoção de veículos elétricos (VE)s.

A adoção de VEs, no entanto, causa impactos ambientais decorrentes do ciclo de vida (da extração de recursos, processamento de materiais e do produto, do consumo de eletricidade durante o uso e do descarte), e é necessário incluí-los no planejamento energético em função do aumento da demanda de eletricidade.

No intuito de avaliar os impactos da adoção de VEs na frota, vários estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) já foram realizados para outras regiões e países. Hawkins, Gausen, Strømman (2012) fizeram uma revisão de vários estudos de ACV de VEs e concluíram que os VEs utilizando eletricidade proveniente de termelétricas a carvão possuem menor impacto para aquecimento global que VCs pouco eficientes, mas maior impacto que VCs de alta eficiência. Os autores também concluíram que VEs utilizando eletricidade proveniente de fontes cujos impactos



para aquecimento global são baixos são melhores, para esta categoria, do que VCIs. Mais tarde, Hawkins et al. (2013) realizaram um estudo comparando VCIs a gasolina ou diesel, com VEs utilizando dois tipos de bateria de lítio em uma ACV com informações detalhadas da indústria para materiais e massas e dados dos demais processos doecoinvent v.2.2. Os resultados mostraram que VEs utilizando eletricidade proveniente de termelétricas a carvão têm impactos maiores que os VCIs para a maioria das categorias de impacto<sup>1</sup>, e que poucos benefícios são observados no caso da utilização de termelétricas utilizando gás natural. Os autores concluíram que seria contraproducente promover VEs em regiões nas quais a eletricidade é gerada a partir de carvão, óleo ou lignito. Neste estudo, os autores também apontam que a produção do VE e da bateria possuiu quase o dobro do impacto, para aquecimento global, do que a produção do VCI, sendo necessária a consideração de todo o ciclo de vida para um resultado mais preciso.

No caso da China, um estudo indicou que VEs proporcionam apenas uma redução limitada na utilização de combustíveis fósseis ao longo do ciclo de vida, e podem até não reduzir as emissões de GEE no ciclo de vida, utilizando a matriz de eletricidade chinesa – altamente dependente de carvão – se comparados com VCIs a gasolina ou diesel (YAN; CROOKES, 2010). Os autores apresentaram resultados para as emissões de GEE, uso de combustível fóssil e uso de petróleo. Este estudo já inclui também VCIs utilizando diferentes tipos de etanol, incluindo etanol de cana-de-açúcar, este último apresentando impactos menores que os VEs utilizando a matriz elétrica chinesa tanto para emissões de GEE quanto para uso de combustíveis fósseis. Não obstante, na avaliação de opções para o longo prazo, os autores consideram que os VEs podem ser uma melhora significativa em ambas as categorias. Um outro estudo para a China avaliou as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC e MP<sub>2.5</sub> de VEs e VCIs a diesel e gasolina, estimando frações de ingestão e impactos à saúde humana no caso de MP<sub>2.5</sub>, e mostrou que, para uma matriz elétrica composta majoritariamente por termelétricas a carvão, aproximadamente metade das emissões de MP<sub>2.5</sub> primários de VEs são inaladas por populações não urbanas, transferindo assim os impactos para os não usuários de VEs urbanos (JI et al., 2012). Muito embora as emissões de VEs tenham sido muito superiores, o

---

<sup>1</sup> Categoria de impacto é “classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados” (ASSOCIAÇÃO..., 2009a, p. 6). Exemplos de categoria de impacto são: mudanças climáticas; depleção da camada de ozônio.

deslocamento das emissões para as centrais elétricas pode reduzir a exposição radicalmente em alguns casos, melhorando a saúde pública em um contexto geral. Para a maioria das cidades os resultados mostraram que trocar VCI's a gasolina por VEs aumentaria as emissões de CO<sub>2</sub> e os impactos à saúde humana por MP<sub>2.5</sub> primário (JI et al., 2012).

As diferenças do caso brasileiro são a fonte de eletricidade, proveniente majoritariamente de hidrelétricas, e os VCI's *flex fuel*, que podem utilizar etanol, gasolina tipo C ou uma mistura de ambos. Considerando que os estudos mostram que os dados que mais impactam os resultados são a fonte de eletricidade e a eficiência dos VCI's, os resultados dos estudos anteriores não podem ser adotados no contexto brasileiro.

Em um caso mais similar ao brasileiro em termos de geração de eletricidade, um estudo avaliando a introdução de VEs na frota norueguesa, utilizando a produção de veículos com base em Hawkins et al. (2013) e oecoinvent v. 2.2 mostrou que VEs podem reduzir os impactos de aquecimento global da frota em até 15% caso a penetração no mercado chegue a 39%, devido ao fato das hidrelétricas serem a principal fonte de eletricidade na Noruega (SINGH; STRØMANN, 2013). Os autores também observaram um aumento substancial nos impactos para toxicidade neste cenário com grande número de VEs, de 72% e 57% para toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce, respectivamente. Este estudo, no entanto, não considerou VCI's a etanol. Além disso, hidrelétricas em regiões tropicais, como os reservatórios no Brasil, têm maiores emissões de GEE que em regiões temperadas (BARROS et al., 2011).

Veículos a etanol foram considerados uma opção para os Estados Unidos em um estudo que avaliou o potencial dos VEHPs na redução de impactos para aquecimento global, utilizando dados de ACV e o modelo *EIO-LCA* (SAMARAS; MEISTERLING, 2008). Mais uma vez, este estudo mostrou que a fonte de eletricidade é significativa nos resultados, embora VEHPs utilizando eletricidade proveniente de termelétricas a carvão ainda tenham apresentado melhor resultado, para aquecimento global, que VCI's a gasolina. VEHPs apresentaram resultados ligeiramente melhores que híbridos sem capacidade plug-in e uma redução de 32% em relação aos VCI's a gasolina, utilizando a matriz elétrica média dos Estados Unidos. O estudo também mostrou que, embora haja uma redução dos impactos no caso da utilização de gasolina com 85% de etanol celulósico, seriam necessários de

50 a 100 milhões de hectares para atender 25% da frota. Os autores também apontaram a importância da fonte de eletricidade, já que influencia os resultados dos impactos ambientais da adoção de VEHPs e que os horizontes de planejamento elétrico são muito superiores aos horizontes de planejamento da indústria automotiva, uma vez que centrais elétricas operam por um tempo muito superior a um ciclo da frota automotiva. Os autores também não incluíram o destino final porque consideraram que as contribuições deste no impacto total são pequenas. O etanol celulósico considerado neste estudo, no entanto, é diferente do etanol de cana-de-açúcar utilizado no Brasil, e o estudo cobre apenas aquecimento global.

Com relação às baterias, um estudo de ACV de vários tipos de baterias mostrou que o melhor desempenho ambiental dentre as baterias avaliadas, em termos de pontos do Eco-indicator 99, entre as avaliadas, foi a da bateria de Na-NiCl<sub>2</sub>, seguida pela de íon de lítio (VAN DEN BOSSCHE et al., 2006). Neste estudo foram avaliadas as baterias de chumbo-ácido, NiCd, NiMH, Li-ion e Na-NiCl<sub>2</sub> e a unidade funcional<sup>2</sup> foi definida como a bateria necessária para percorrer 60 km com um automóvel e uma única carga, embora os impactos para percorrer 180.000 km, a vida útil do veículo considerada no estudo, também tenham sido avaliadas. O estudo foi realizado para o contexto europeu, sendo que dados de indústrias foram coletados em complementaridade com dados de literatura e de bases de dados disponíveis comercialmente. O inventário, no entanto, não foi disponibilizado publicamente.

No Brasil, foram realizados estudos incluindo aspectos ambientais de veículos, que incluem: (i) cenários de adoção de VEs e estimativas de demanda energética e emissões de GEE, para o estado de São Paulo (DIAS et al., 2014) e para o Brasil (BARAN; LEGEY, 2013); (ii) a avaliação da inclusão de VEHPs no Nordeste para aproveitamento de excedente de energia eólica (BORBA; SZKLO; SCHAEFFER, 2012); (iii) ICV do aço utilizado nos automóveis no Brasil (UGAYA; WALTER, 2004); e (iv) comparação de VCI's a etanol e gasolina tipo C aplicando-se ACV (CAVALETT et al., 2013). Os três primeiros estudos, contudo, não incluíram ACV para avaliar os impactos ambientais decorrentes da adoção de VEs e os dois últimos não avaliaram VEs.

---

<sup>2</sup> Unidade funcional é “o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência” (ASSOCIAÇÃO..., 2009a, p. 4).

## 1.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Dentro do contexto apresentado, foram escolhidos os automóveis para o presente estudo porque se espera um grande crescimento da frota, de 5,9% ao ano, e um grande crescimento no número de veículos novos licenciados, de 3,6% ao ano, ambos para o horizonte decenal (BRASIL, 2013a, p. 54). Este grande aumento e substituição da frota por veículos novos possibilita a substituição de grande parte da frota por veículos de tecnologia diferente.

Entre as tecnologias alternativas existentes foram escolhidos os veículos elétricos em função desta tecnologia já estar bastante desenvolvida e disponível em outros países. Deste modo, seria possível começar a adoção desta tecnologia em um curto prazo. Já está disponível inclusive um VE brasileiro, desenvolvido por Itaipu Binacional e parceiros (ITAIPU BINACIONAL, 2010).

## 1.2 PROBLEMA

No contexto apresentado, observa-se que há um esforço para se reduzir os impactos ambientais. No entanto, as projeções governamentais referentes ao planejamento energético, de Brasil (2013a), consideram apenas GEEs e, em alguns casos, ocupação da terra, quantitativamente. O setor de transportes é responsável por grande parte dos impactos, mas este planejamento também não considera o ciclo de vida completo, além de Brasil (2013a) considerar apenas um pequeno ganho atual de eficiência para os VCI e considerar que não haverá penetração significativa na frota de híbridos e elétricos em função de barreiras tecnológicas e econômicas, incluindo a falta de incentivos governamentais (BRASIL, 2013a, p. 54).

Deste modo, é necessário que outras opções de automóveis sejam avaliadas considerando o ciclo de vida dos veículos e categorias de impacto adicionais, para evitar que a redução de um tipo de impacto ambiental ocasiona o aumento de outros tipos de impactos ambientais.

Com relação aos VEs, há a necessidade de se realizar estudos para a situação brasileira e inclui-los no planejamento elétrico, já que a adoção de grande número de VEs pode causar impacto significativo na demanda por eletricidade.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa é analisar como atender a demanda por transporte de pessoas por automóveis com menor impacto ambiental, para diferentes categorias de impacto, no Brasil.

No intuito de atingir o objetivo geral, os objetivos específicos desta pesquisa são :

- (i) identificar a abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) mais apropriada;
- (ii) identificar o impacto ambiental associado aos veículos elétricos; e
- (iii) identificar o impacto ambiental da frota e opções de redução para diferentes categorias de impacto.

Como resultados, espera-se obter com o presente trabalho:

- (i) ACV comparativa de VEs e VCIs para o contexto brasileiro; e
- (ii) identificação de penetrações de mercado de VEs que proporcionem menor impacto ambiental no atendimento da demanda transporte de passageiros por automóveis.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

Com as questões ambientais tornando-se cada vez mais importantes, é necessário que existam estudos de alternativas que proporcionem a redução de impactos ambientais. Neste sentido, é necessário que se incluam também outros tipos de impactos em adição aos resultados para aquecimento global.

O estabelecimento dos impactos ambientais antes dos VEs estarem amplamente disponíveis no mercado brasileiro pode auxiliar na tomada de decisão, a fim de se minimizarem os impactos ambientais no futuro. Em função das centrais elétricas operarem por um grande período de tempo após serem construídas, além do grande prazo associado à construção de alguns tipos de usinas, como hidrelétricas, um planejamento antecipado possibilita que os VEs sejam incluídos no planejamento energético a fim de se reduzirem os impactos ambientais.

Por fim, podem ser tomadas medidas no sentido de se controlar o número de VEs na frota com objetivo de reduzir os impactos ambientais.

## 1.5 ESTRUTURAÇÃO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No capítulo 2 é apresentado um referencial teórico acerca de ACV e Planejamento Integrado de Recursos (PIR). No capítulo 3 é apresentado o método utilizado para realizar o estudo. No capítulo 4 são apresentados os resultados dos impactos ambientais dos VEs no contexto brasileiro e opções de atendimento à demanda de passageiros com menor impacto ambiental, em conjunto com uma discussão a respeito destes. Por fim, no capítulo 5 encontram-se as conclusões. O trabalho tem como base dois artigos já escritos: Choma e Ugaya (2014a); e Choma e Ugaya (2014b).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o referencial teórico construído para servir como base para o presente estudo. Este capítulo foi dividido em três partes, de acordo com as três áreas discutidas. A seção 2.1 trata de Avaliação do Ciclo de Vida, a seção 2.2 de Planejamento Energético e a seção 2.3 da integração de Avaliação do Ciclo de Vida e Planejamento Integrado de Recursos. Uma discussão é apresentada na seção 2.4.

### 2.1 ABORDAGENS DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que permite a quantificação de impactos ambientais potenciais de produtos e serviços ao longo do ciclo de vida, desde a extração de matéria-prima até disposição final (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a).

A ACV é composta de quatro fases, sendo que a fase de análise de inventário “trata-se de um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo” (ASSOCIAÇÃO..., 2009a, p. vii), e na qual se incluem coleta de dados e procedimentos de cálculo, entre outros (ASSOCIAÇÃO..., 2009a).

Existe, na comunidade científica, uma discussão acerca de que dados são os mais apropriados para um estudo de ACV. Três das abordagens possíveis são a atribucional, a consequencial e a decisional. De acordo com Ekvall e Weidema (2004), a ACV atribucional apenas descreve os fluxos ambientais relevantes, enquanto a ACV consequencial busca identificar o comportamento do ciclo de vida em função de uma mudança, tendo como objetivo, portanto, entender as consequências das decisões. Além destas, existe a abordagem decisional (FRISCHKNECHT, 1998; 2007), que também é orientada à decisão e usa “[...] as relações financeiras e contratuais reais ou previstas entre agentes econômicos (relações *business-to-business*) como as principais bases de informação” (FRISCHKNECHT; STUCKI, 2010, p. 809, tradução livre do autor).

De acordo com Curran, Mann e Norris (2005, p. 856), os termos atribucional e consequencial substituem os termos marginal e médio por descreverem melhor esta diferença. Por exemplo, ao se considerar um acréscimo na demanda de eletricidade em uma ACV, o impacto pode ser relacionado a um dado médio ou marginal. A média pode ser obtida de fonte específica (e.g. hidrelétrica, termelétrica) ou da matriz energética da região ou país, como as emissões médias de metano em reservatórios por quilowatt-hora (kWh) gerado em hidrelétricas do país. No segundo caso, o dado utilizado corresponde ao incremento marginal da demanda no sistema, buscando assim identificar qual a fonte de energia que será utilizada no caso do aumento daquele consumo.

Já no caso da decisional utiliza-se o incremento previsto no período considerado no estudo, podendo ser utilizadas as projeções governamentais, como o Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 (BRASIL, 2013a), como fonte de informação, com base em Frischknecht e Stucki (2010).

A diferença entre as abordagens atribucional e consequencial, de acordo com Weidema (2003, p. 15), está ilustrada na Figura 1, na qual o círculo representa as trocas ambientais globais. De acordo com o autor, a ACV atribucional seleciona a parte relacionada à uma atividade humana específica, enquanto a consequencial procura identificar as mudanças decorrentes da inclusão ou exclusão de uma atividade. Tomando-se como exemplo o consumo de 1 kWh adicional de eletricidade no Brasil, a utilização da abordagem atribucional refletiria o impacto médio da matriz elétrica brasileira, enquanto a consequencial refletiria o impacto da geração utilizada para suprir este consumo adicional assim como outras consequências deste aumento no consumo de eletricidade, que poderia estar, por exemplo, substituindo outra fonte de energia. Já a Figura 2 ilustra a matriz energética decisional de Frischknecht e Stucki (2010), na qual os autores consideram as tecnologias para as quais haverá expansão a fim de se identificar uma consequência futura, assumindo que há aumento de demanda. Os autores justificam que o ICV decisional de eletricidade definido no estudo, com base em projeções de grandes companhias e governos, é estabelecido com base nos desenvolvimentos futuros que se esperam no setor elétrico, na melhor visão dos especialistas. Tomando-se como exemplo o consumo de 1 kWh adicional de eletricidade no Brasil e tendo como base Frischknecht e Stucki (2010), a utilização desta abordagem refletiria o consumo adicional, com a diferença, em relação à consequencial, que são utilizadas



projeções governamentais (como, por exemplo, o PDE 2022 (BRASIL, 2013a)) para estimar para quais tecnologias pretende-se aumentar a capacidade instalada no futuro e que provavelmente seriam utilizadas para suprir tal aumento de consumo futuro, além de que outras consequências indiretas deste consumo de eletricidade não são avaliadas.

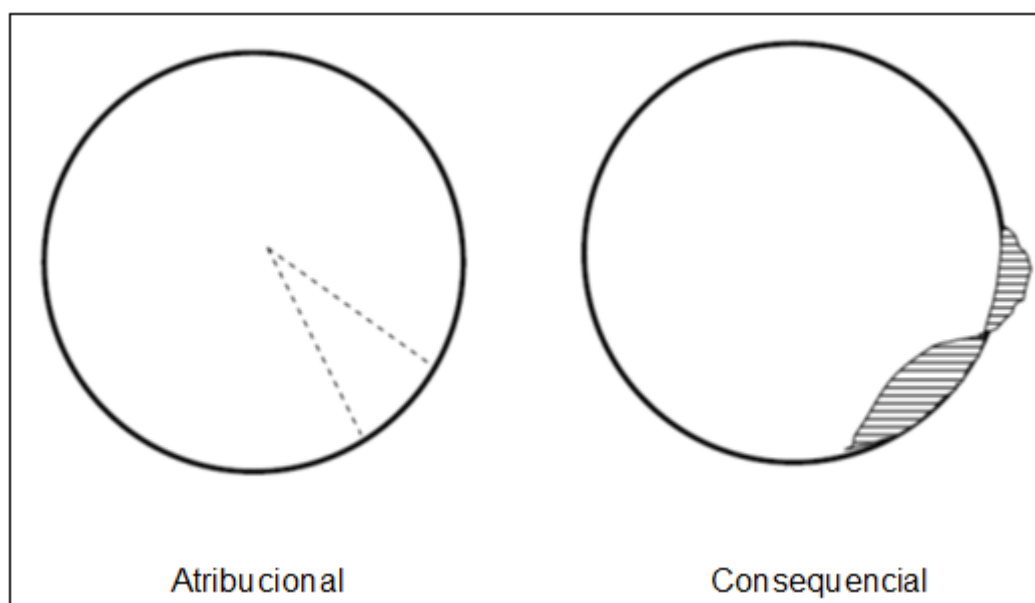


Figura 1 – Diferença conceitual entre ACV atribucional e consequencial  
Fonte: Weidema (2003, p. 15), tradução livre do autor.

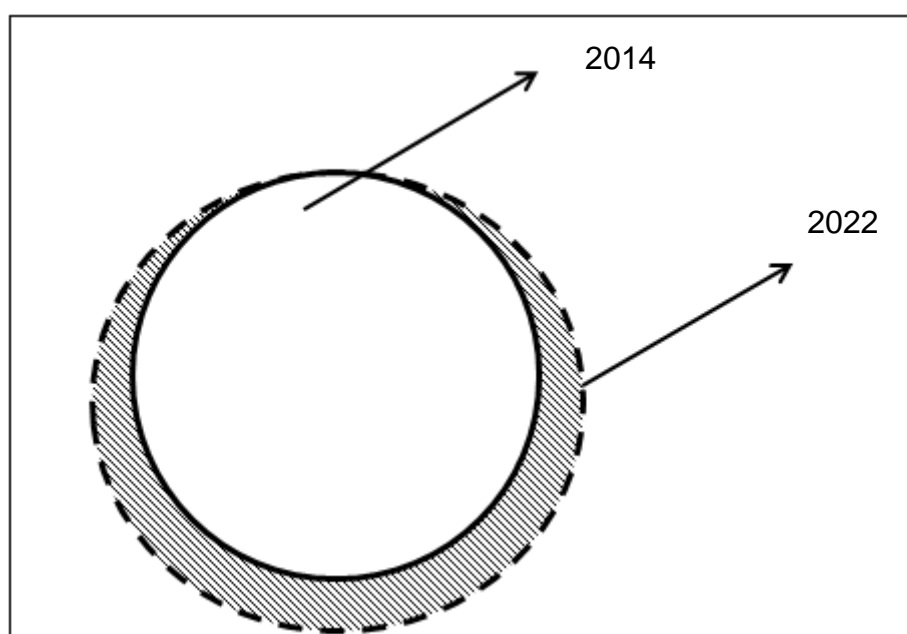


Figura 2 – Matriz Decisional de energia para o ano de 2022, com base no estudo de Frischknecht e Stucki (2010).

### 2.1.1 ACV Atribucional

Conforme a definição de Ekvall e Weidema (2004), a ACV atribucional busca descrever os fluxos ambientais relevantes. O cálculo do inventário na ACV atribucional pode ser realizado da seguinte maneira, de acordo com Heijungs e Suh (2002):

A matriz  $P$  é definida como sendo a matriz de processos e contém os processos  $p_1, p_2, \dots, p_x$ , de forma que  $P = (p_1 \mid p_2 \mid \dots \mid p_x)$ . Os processos podem ser, por exemplo, geração de eletricidade. A matriz  $P$  pode ser dividida em  $A$  e  $B$ , conforme a equação (1), sendo que  $A$  contém os fluxos tecnológicos (tais como combustível necessário para produzir eletricidade) e  $B$  os fluxos elementares (tais como emissões atmosféricas) (HEIJUNGS; SUH, 2002).

$$P = \frac{A}{B} \quad (1)$$

**Fonte: Heijungs e Suh (2002, p. 14).**

Os vetores  $s$  e  $f$  podem ser definidos como os vetores de fatores de escalonamento e demanda final, respectivamente. O vetor de fatores de escalonamento contém os fatores necessários para se obter a demanda final ( $f$ ). O vetor  $f$  é conhecido, então pode-se determinar  $s$  através da equação (2) (HEIJUNGS; SUH, 2002).

$$A.s = f \quad \text{ou} \quad s = A^{-1}.f \quad (2)$$

**Fonte: Heijungs e Suh (2002, p. 17).**

Por fim, o vetor de inventário (vetor  $g$ ) consiste nos fluxos ambientais gerados para a demanda final  $f$ . Este pode ser determinado a partir de  $B$  e  $s$ , de acordo com a equação (3) (HEIJUNGS; SUH, 2002).

$$g = B.s \quad \text{ou, substituindo } s \text{ por } A^{-1}.f, \quad g = (B.A^{-1}).f \quad (3)$$

**Fonte: Heijungs e Suh (2002, p. 18).**

Este modelo pode ser aplicado desde que a matriz A seja quadrada e inversível. Em uma ACV, isto pode não ocorrer quando existirem cortes de fluxos tecnológicos, processos multifuncionais, escolha entre processos alternativos ou reciclagem em malha fechada (HEIJUNGS; SUH, 2002).

De acordo com a NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO..., 2009a), em sistemas com múltiplos produtos de reciclagem, convém que haja um procedimento de alocação, que é a “repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto” (ASSOCIAÇÃO..., 2009a, p. 4).

A NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO..., 2009b) aponta duas soluções para evitar a alocação: divisão do processo em subprocessos ou expansão do sistema. Quando esta não puder ser evitada, convém que os dados de entrada sejam divididos com base em relações físicas, ou quando não for possível, podem ser utilizadas outras relações, como a alocação proporcional ao valor econômico (ASSOCIAÇÃO..., 2009b, p. 15).

### 2.1.2 Consequencial

De acordo com Ekvall e Weidema (2004), a ACV consequencial busca identificar o comportamento do ciclo de vida em função de uma mudança, tendo como objetivo, portanto, entender as consequências das decisões.

Zamagni et al. (2012), não encontraram na literatura a discussão de princípios de análise, técnicas analíticas e limitações da modelagem, definindo o que pode ou não ser feito, com exceção de Weidema, Ekvall e Heijungs (2009, p. 7) que descrevem os modelos consequenciais como sendo de “*estados estacionários, lineares, homogêneos, com cada processo unitário fixo em um ponto específico no tempo*”. Não é claro, no entanto, o que os autores querem dizer com esta frase.

As diferenças entre as modelagens consequencial e atribucional estão nos dados utilizados e nos limites do sistema, como pode ser observado no trabalho de Ekvall e Andræ (2006). De acordo com os autores, a abordagem consequencial inclui processos significativamente afetados dentro ou fora do ciclo de vida e utilizam-se dados de tecnologias marginais ao invés de dados médios. De acordo

com Ekvall e Weidema (2004, p. 161), na modelagem consequencial a expansão do sistema evita a alocação, e dados marginais são utilizados quando relevantes para descrever a consequência de uma ação.

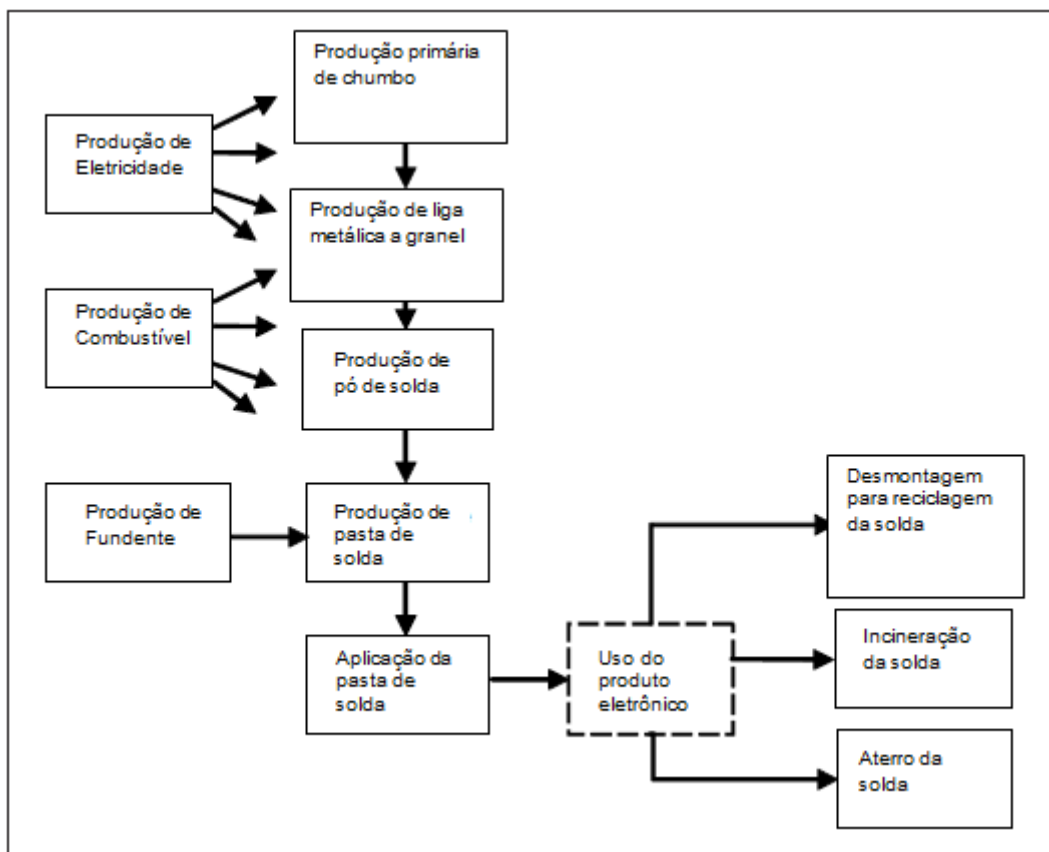
No que diz respeito à ACV, as tecnologias marginais são, como utilizado por Weidema, Frees e Nielsen (1999), as tecnologias de fato afetadas por uma pequena mudança na demanda. Os autores propõem um procedimento de cinco passos para auxiliar na identificação da tecnologia marginal em ACV, que posteriormente foi adaptado por Ekvall e Weidema (2004). Weidema, Frees e Nielsen (1999) tratam de tecnologia marginal, mas de acordo com os autores o procedimento de cinco passos ainda é relevante no caso de grandes mudanças, embora nesse caso não possa ser chamado de tecnologia marginal<sup>3</sup> e não possam ser assumidas condições *ceteris paribus*. No exemplo do consumo de eletricidade, quando há o consumo adicional de 1 kWh por uma unidade adicional de certo produto, portanto, a ACV consequencial busca considerar os impactos da geração adicional de 1 kWh (os impactos específicos da tecnologia marginal utilizada para gerar esse 1 kWh adicional), enquanto que a ACV atribucional utiliza os impactos da geração média de 1 kWh (e.g. impactos de 1 kWh gerados pela matriz elétrica brasileira, no caso de consumo de eletricidade no Brasil).

As estruturas dos modelos atribucional e consequencial de Ekvall e Andræ (2006) estão ilustrados na Figura 3 e na Figura 4, respectivamente, para a ACV de uma mudança para uma solda sem chumbo. A diferença entre as duas abordagens consiste na inclusão de modelos econômicos dos mercados de chumbo e sucata de chumbo, além do uso alternativo destes produtos fora do ciclo de vida da solda. Esta diferença ocorre porque a ACV consequencial busca identificar as consequências ambientais do uso de chumbo, de forma que esta foca nos fluxos de chumbo, identificando quais processos (dentro ou fora do sistema) serão afetados. De acordo com os autores, as abordagens são complementares em identificar as consequências, já que a ACV atribucional permite identificar como o ciclo de vida da solda muda (como o ciclo de vida da solda sem chumbo, no caso, é mais impactante para aquecimento global que o ciclo de vida da solda com chumbo) e a consequencial permite identificar consequências ambientais decorrentes da

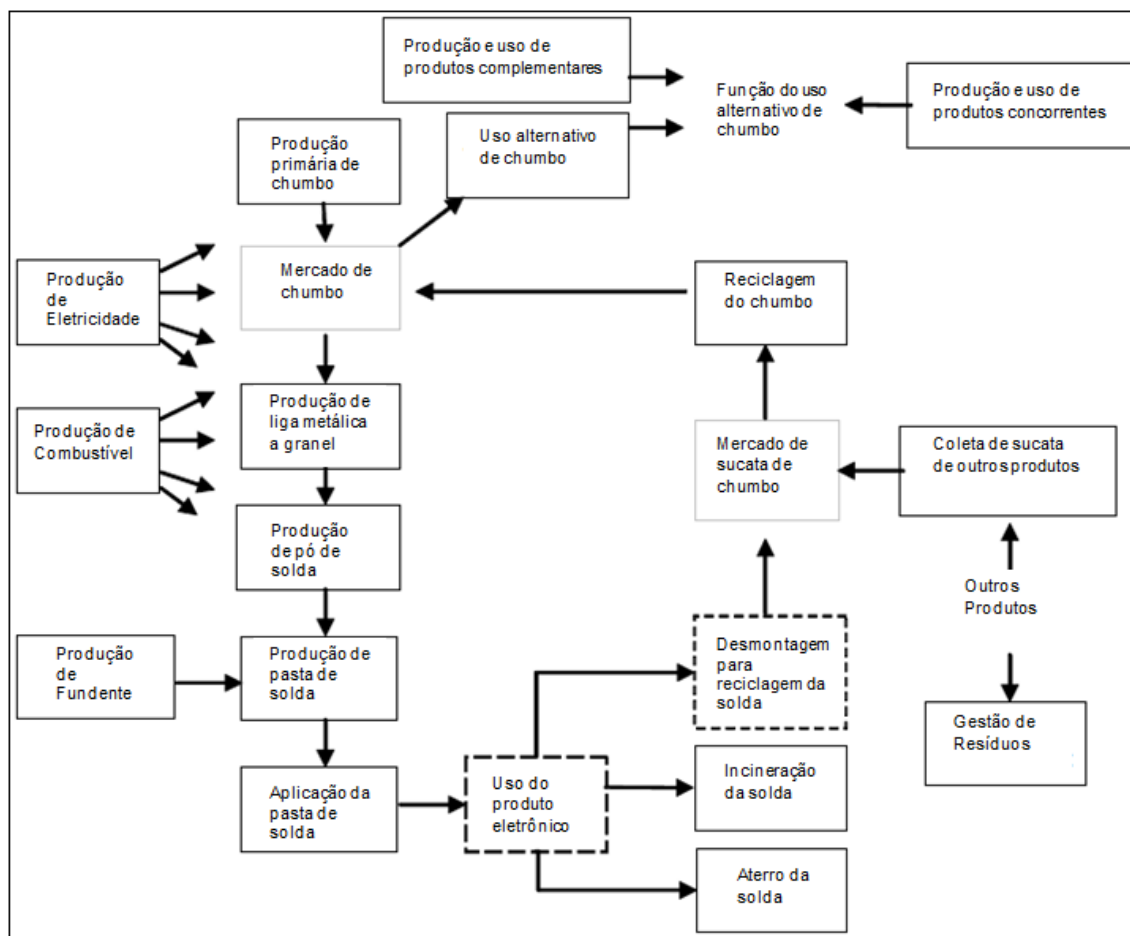
---

<sup>3</sup> Embora observe-se que há muitos estudos tratando de modelagem marginal e utilizando o termo tecnologia marginal, Weidema, Ekvall e Heijungs (2009, p. 7) diferenciam a modelagem em marginal (pequenas mudanças) e incremental (para mudanças maiores).

mudança em um contexto mais amplo, como o aumento do uso de chumbo em outros processos (EKVALL; ANDRÆ, 2006).



**Figura 3 – Estrutura do modelo atribucional.**  
Fonte: Ekvall e Andræ (2006, p. 345), tradução livre do autor.



**Figura 4 – Estrutura do modelo consequencial.**  
 Fonte: Ekvall e Andræ (2006, p. 346), tradução livre do autor.

Com relação aos dados, os requisitos iniciais estipulados por Ekvall e Andræ (2006) e os dados utilizados estão no Quadro 1. A diferença entre as abordagens consequencial e atribucional para os processos de produção de metal, combustível e eletricidade incluídos nas duas abordagens é o uso de dados médios (no caso da ACV atribucional) ou marginais (no caso da ACV consequencial). De acordo com os autores, isto ocorre porque uma alteração na demanda por um metal no ciclo de vida da solda afeta marginalmente os mercados internacionais. Nota-se também que, apesar do objetivo inicial, os dados utilizados para estes processos foram os mesmos nas duas abordagens, em função da indisponibilidade dos dados. No caso da eletricidade na abordagem consequencial os autores recomendam como ideal o uso de uma média ponderada das tecnologias marginais de longo-prazo dos mercados de eletricidade afetados, o que não foi possível obter na prática para o estudo realizado (EKVALL; ANDRÆ, 2006).

Subsistema	ICV Atribucional		ICV Consequencial	
	Metas iniciais de dados	Dados utilizados	Metas iniciais de dados	Dados utilizados
Produção de combustível	Média global	Dados da literatura [35-37]	Marginal global	Dados da literatura [35-37]
Produção de eletricidade	Média global	Matriz média global de tecnologias [38] Dados ambientais da literatura [35-37], [39-44]	Marginal global	Matriz média global de tecnologias [38] Dados ambientais da literatura [35-37], [39-44]
Produção de metais	Média global para metais específicos	Dados da literatura sobre produção primária de metais [45-48]	Marginal global para metais específicos	Dados da literatura sobre produção primária de metais [45-48]
Mercado de chumbo	n.a.	n.a.	Própria elasticidade-preço global de longo prazo da demanda e oferta	Estimativas semiquantitativas
Uso alternativo de chumbo	n.a.	n.a.	Dados marginais globais do portão ao tóculo da combinação de produtos afetados	Dados do berço ao portão de montagem de baterias de chumbo-acido
Produção e uso de produtos complementares	n.a.	n.a.	Dados marginais globais do berço ao tóculo dos produtos efetivamente complementares	Dados do berço ao tóculo de células fotovoltaicas
Produção e uso de produtos concorrentes	n.a.	n.a.	Dados marginais globais do berço ao tóculo dos produtos efetivamente concorrentes	Emissões da produção de eletricidade em geradores a Diesel [37], [51-52]
Produção de liga metálica a granel	Média global para liga de solda	Dados de um fornecedor de metal diferente [53]	Média global para soldas específicas	Dados de um fornecedor de metal diferente [53]
Produção de fundente	Média global para fundente de solda	Dados de tabela ambientalmente estendida de entradas e saídas [54-55]	Média global para fundente de solda	Dados de tabela ambientalmente estendida de entradas e saídas [54-55]
Produção de pó de solda	Média global para pó de solda	Dados de um fornecedor de pó de metal diferente [56]	Média global para soldas específicas	Dados de um fornecedor de pó de metal diferente [56]
Produção e aplicação de pasta de solda	Média global para soldas específicas	Dados da literatura [57-61]	Média global para soldas específicas	Dados da literatura [57-61]
Desmontagem para reciclagem da solda	Média global para produtos eletrônicos	Principalmente de um desmontador de eletrônicos [62]	Média global para produtos eletrônicos	Principalmente de um desmontador de eletrônicos [62]
Incineração da solda	Média global para metais de solda específicos	Dados de um incinerador de resíduos [63]	Média global para metais de solda específicos	Dados de um incinerador de resíduos [63]
Aterro da solda	Média global para metais de solda específicos	Dados de um aterro [64]	Média global para metais de solda específicos	Dados de um aterro [64]
Mercado de sucata de chumbo	n.a.	n.a.	Própria elasticidade-preço global de longo prazo da demanda e oferta	Pressuposto (ver seção 2.2.7)
Gestão de resíduos de outros produtos	n.a.	n.a.	Matriz global de matrizes regionais	Dados de um aterro [64]
Reciclagem do chumbo	n.a.	n.a.	Marginal global	Dados de um local [53]
n.a.: não aplicável				

**Quadro 1 – Metas iniciais de qualidade de dados e fontes utilizadas.**

Fonte: Ekvall e Andræ (2006, p. 347), tradução livre do autor.

Em comparação ao cálculo do inventário da ACV atribucional apresentado na seção 2.1.1, portanto, há alterações na matriz P, que ocorrem tanto nos fluxos tecnológicos da matriz A (em função de diferentes limites do sistema e processos incluídos) como nas emissões da matriz B (em função de utilizar tecnologia marginal ao invés de média, quando da disponibilidade de dados).

Em uma revisão de estudos de ACV consequencial, Earles e Halog (2011) concluíram que não há consenso em quais aplicações deve ser utilizada a abordagem consequencial e a respeito da padronização da abordagem. Também existe a necessidade de maior desenvolvimento dos modelos econômicos utilizados na ACV consequencial (EARLES; HALOG, 2011). De acordo com Weidema, Ekvall e Heijungs (2009, p. 7), contudo, a avaliação consequencial é relevante na maioria das áreas de aplicação da ACV.

De acordo com Ekvall e Weidema (2004), a tecnologia marginal pode ser definida como a tecnologia afetada por uma pequena mudança, que possa ser aproximada como infinitesimal, no ciclo de vida investigado. Ekvall e Weidema (2004) propõem um modelo de cinco etapas para identificar a tecnologia marginal, adaptando modelo já proposto por Weidema, Frees e Nielsen (1999). As três primeiras etapas buscam identificar a situação na qual a mudança na demanda ocorre. As duas últimas procuram identificar qual tecnologia é afetada por esta mudança.

De acordo com Mathiesen, Munster e Fruergaard (2009), no entanto, este modelo para identificação da tecnologia marginal de energia em uma ACV envolve simplificações que levam a uma escolha que, apesar de aparentemente inequívoca, é imprecisa e pode resultar em impactos ambientais completamente diferentes dos previstos em aplicações nas quais a energia é um fator importante. De acordo com os autores, a escolha por apenas uma tecnologia marginal não reflete a realidade de um sistema energético complexo no qual várias tecnologias são afetadas.

Quando a energia é parte importante do estudo, Mathiesen, Munster e Fruergaard (2009) recomendam identificar as várias tecnologias afetadas por meio de análise de sistemas energéticos. No caso de limitações de recursos não permitirem tal abordagem, no entanto, os autores recomendam como uma simplificação mínima a análise de diferentes tecnologias e diferentes cenários.

Lund et al. (2010) também aplicam análise de sistemas energéticos para identificar uma tecnologia marginal anual média (ou YAM do inglês *yearly average*



*marginal*) de longo prazo. A tecnologia marginal anual média compreende as diferentes tecnologias utilizadas em diferentes horários do dia e estações para atender às demandas diferenciadas.

### 2.1.3 Decisional

Com relação à abordagem decisional, foi encontrada pouca literatura a respeito. Frischknecht e Stucki (2010) fizeram um estudo da matriz decisional de energia elétrica de longo prazo. Neste estudo, a base para as informações são os planos de energia governamentais de longo prazo, de forma que para contabilizar 1 kWh de energia na abordagem decisional de longo prazo utilizam-se as projeções da matriz energética futura, estabelecendo-se as fontes para as quais se planeja a expansão de capacidade. Esta abordagem somente é válida caso a energia utilizada não seja especificada nas relações contratuais, de forma que no caso de o consumidor realizar uma compra de eletricidade “verde”, por exemplo, o impacto deve refletir exatamente o impacto da fonte de energia contratada. Com relação ao cálculo do inventário, apenas são utilizados dados diferentes dos dados utilizados na ACV atribucional.

Esta abordagem é similar à consequencial, no sentido em que ambas são orientadas à decisão. Observa-se que uma das diferenças entre estas está nos dados utilizados. A ACV consequencial busca identificar as tecnologias marginais com base em regras de mercado (i.e. a tecnologia mais provável de entrar ou sair de operação, normalmente definida com base econômica) enquanto que a decisional busca identificar as tecnologias com base em informações contratuais, sejam estas relacionadas a um contrato específico (e.g. compra “verde”) ou a um planejamento oficial (e.g. no caso de eletricidade no Brasil, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 (BRASIL, 2013a)), este último que já foi estabelecido, ou “contratado”, pelo governo e afetará toda a produção no país. Uma outra grande diferença observada é que esta abordagem não avalia as consequências causadas em função de um aumento ou diminuição de consumo da mesma forma que a ACV consequencial. Essas consequências consideradas apenas na ACV consequencial podem ser vistas no inventário consequencial do estudo de Ekvall e Andræ (ver

Figura 4), o qual considera o mercado para o chumbo e seus usos alternativos no sistema de produto de uma solda sem chumbo.

#### 2.1.4 Análise das Abordagens

De acordo com Frischknecht e Stucki (2010), qualquer uma das abordagens (atribucional, consequencial ou decisional) pode dar suporte à tomada de decisão, sendo que para relatórios da situação atual a abordagem utilizada deve ser a atribucional. Os autores mencionam também que atualmente a maioria das decisões é tomada com base em ACVs atribucionais, sendo que a abordagem consequencial, cujo objetivo é investigar o impacto de mudanças, é utilizada essencialmente por consultores e no meio acadêmico. Nas ACVs orientadas a decisão, portanto, o maior desafio é a seleção do modelo mais adequado.

Frischknecht e Stucki (2010) propõem a seleção da abordagem com base no tamanho econômico da questão analisada. O tamanho econômico é definido como pequeno, médio ou grande de acordo com a participação relativa como ilustrado no Quadro 2. A participação relativa é referente ao mercado analisado (no caso do consumo de eletricidade por veículos elétricos no Brasil, por exemplo, a participação relativa seria igual a este consumo dividido pelo consumo total de eletricidade no país). De acordo com os autores, o tamanho do objeto em questão deve ser definido com base na relevância econômica porque, provavelmente, quanto maior esta for, maior serão as mudanças na estrutura econômica e, conseqüentemente, nas relações de fornecimento de bens e serviços intermediários que impactam diretamente no resultado do estudo. De acordo com os autores, a relevância ambiental, em contrapartida, é apenas uma consequência das mudanças, e não a causa destas.

Tamanho Econômico	Participação Relativa
Pequeno	<0.1%
Médio	0.1% a <1%
Grande	>1%

**Quadro 2 – Classificação do tamanho econômico do objeto de investigação.**  
**Fonte: Frischknecht e Stucki (2010, p. 811), tradução livre do autor.**

Com base na relevância econômica, o tipo de abordagem a ser utilizado está indicado no Quadro 3. Para objetos de estudo pequenos, não existem consequências relevantes e o modelo pode ser atribucional, sob condições *ceteris paribus* (todo o resto é constante). Para objetos de tamanho médio ou grande, as consequências devem ser modeladas sob condições *mutatis mutandis* (com as mudanças necessárias), de forma que a abordagem deve ser consequencial ou decisional. Embora ambas as abordagens sejam adequadas neste caso, a abordagem decisional é mais adequada para objetos médios e a consequencial é mais adequada para objetos grandes, como o suporte para políticas governamentais, onde é importante considerar efeitos em larga escala que podem ser mais facilmente analisados com o auxílio de cenários (FRISCHKNECHT; STUCKI, 2010).

Tamanho econômico	Modelo de ICV	Exemplos e observações
Pequeno	Atribucional	Suporte para decisões diárias do consumidor Ter certeza que o objeto de investigação e a decisão em questão não é parte de uma medida política de autoridades públicas ou companhias com consequências maiores
Médio	Decisional/atribucional em uma análise de sensibilidade	Decisões estratégicas de grandes empresas ou associações industriais Promoção em larga escala de atividades de companhias
Grande	Consequencial/decisional em uma análise de sensibilidade	Medidas políticas de âmbito nacional, regional ou de multinacionais Decisional se estiver faltando informação e dados consequenciais

**Quadro 3 – Modelagem recomendada para cada porte econômico.**

**Fonte: Frischknecht e Stucki (2010, p. 813), tradução livre do autor.**

Com base nos trabalhos estudados, observa-se que a ACV atribucional é amplamente utilizada e já está consolidada, e está disponível em bases de dados, como oecoinvent v. 3.01. (SWISS..., 2014a). Apesar de ser uma abordagem descritiva, própria para relatórios ambientais, também é utilizada para tomada de decisões. Como desvantagens do uso da ACV consequencial, destaca-se a necessidade adicional de determinar tecnologias marginais e coletar dados dos respectivos inventários. A principal restrição desta abordagem é o fato de ser

limitada à condição *ceteris paribus*, de forma que não é possível investigar a consequência de decisões.

Na ACV consequencial, Curran, Mann e Norris (2005, p. 857) já apontavam a necessidade de bases de dados permitindo esta modelagem, além de estudos aplicando modelos de sistemas energéticos em ACV a fim de se obter respostas de curto, médio e longo prazo aos acréscimos na demanda em diferentes tempos (diário ou sazonal) e regiões. O ecoinvent v. 3.01 (SWISS..., 2014b) já permite a utilização de base de dados consequencial. No entanto, ainda seria necessário obter informações de mercado (e.g. fontes de energia/centrais elétricas capazes de serem utilizadas para responder a um aumento no consumo de eletricidade, com informações de custo para determinar a(s) mais provável(is) – geralmente de menor custo – de entrar em operação, no caso da eletricidade) relevantes para que esta abordagem pudesse ser aplicada com maior precisão no contexto brasileiro. Enquanto houve desenvolvimento na área da definição da tecnologia marginal de eletricidade por meio da análise de sistemas energéticos, como em Mathiesen, Munster e Fruergaard (2009) e Lund et al. (2010), estes estudos estão limitados à região da Dinamarca.

Em Ekvall e Andræ (2006) observa-se também que os requisitos de dados iniciais para conduzir a ACV consequencial são, por vezes, incompatíveis com os dados disponíveis, de forma que os dados utilizados são muito próximos dos dados utilizados na abordagem atribucional realizada pelo mesmo autor.

Com relação à ACV decisional, a abordagem de Frischknecht e Stucki (2010) considera apenas as projeções oficiais para definir a tecnologia de longo-prazo relacionada à produção de eletricidade. Mathiesen, Munster e Fruergaard (2009, p. 1336) observam uma grande variação nas projeções oficiais relacionadas da Autoridade de Energia Dinamarquesa, havendo variação entre cinco tecnologias marginais de longo prazo nas previsões do órgão entre 2003 e 2008. Desta forma, mesmo que em Frischknecht e Stucki (2010) seja utilizada uma matriz de expansão de tecnologias de longo prazo, conforme recomendado por Mathiesen, Munster e Fruergaard (2009), estabelecendo então uma média, a falta de análise de sistemas energéticos e de diferentes cenários limita o uso desta abordagem para o caso de grandes mudanças (como, por exemplo, um acréscimo significativo na demanda de eletricidade em função da utilização de mobilidade elétrica).

Por fim, com relação ao critério de seleção de abordagens proposto por Frischknecht e Stucki (2010), de acordo com os próprios autores os limites de 0,1 e 1% são definidos em função de um número muito pequeno de casos analisados. Desta forma, apesar de a ACV decisional ser uma simplificação da abordagem consequencial, é válida para casos que não envolvam grandes mudanças. Os valores adotados, de acordo com os autores, podem ser comparados a um critério de corte, de forma que deve haver flexibilidade na aplicação destes.

#### 2.1.5. Base de dados doecoinvent

A base de dados de inventário utilizada para o estudo foi a base do ecoinvent v.3.01, que possui a versão atribucional (SWISS..., 2014a) e a versão consequencial (SWISS..., 2014b).

Esta base originou de uma base de dados nacional Suíça, e agora é uma base de dados global. Embora na versão 3 existam processos globais para todas as atividades, e tenha havido um esforço de coletar dados novos, em muitos casos os conjuntos de dados globais são apenas uma extrapolação de um dos conjuntos de dados regionais, causando aumento de incertezas (WEIDEMA et al., 2013).

No que diz respeito ao transporte de passageiros por automóveis, os conjuntos de dados têm como base padrões da Europa (EURO 3, EURO 4, EURO 5) (SWISS..., 2014a). Neste caso, para os VCI's faltam os principais combustíveis utilizados no Brasil: etanol e gasolina tipo C. Com relação aos VEs, é possível adaptar a eletricidade para uma matriz atribucional brasileira (ou fonte de energia específica). A produção dos veículos (incluindo também baterias e sistemas de propulsão) também não é específica para o Brasil, apesar de existirem conjuntos de dados globais (SWISS..., 2014a).

Com relação à versão consequencial da base de dados (SWISS..., 2014b), esta falta de processos específicos para o Brasil resulta na limitação da aplicabilidade dos resultados verificados, já que mesmo havendo mercados globais, não é possível identificar as consequências no mercado local (brasileiro). Mesmo para a eletricidade, que possui dados mais detalhados e específicos para um grande número de países, de acordo com Bauer [2013?] as restrições do mercado são

consideradas apenas associando os mercados a fornecedores sem restrição. Bauer [2013?] também aponta que podem ser observados resultados não realistas, para algumas regiões, já que (i) não se consideram tecnologias futuras, que ainda não estejam em uso em uma região; (ii) as fatias de mercado das tecnologias refletem a produção atual de tecnologias consideradas irrestritas, e não consideram restrições de potencial dessas (e.g. restrições políticas); e (iii) não se considera eletricidade de CHP com calor como produto de referência. Deste modo, o autor recomenda adaptar dados de inventário e criar mercados consequencial de eletricidade mais específicos.

## 2.2 PLANEJAMENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS

O planejamento elétrico tradicional apenas considera as opções de oferta no atendimento de uma demanda crescente por energia, atendendo com segurança e menor custo econômico, mas sem considerar opções de eficiência no lado da demanda. As questões ambientais, no entanto, são um dos fatores que colocam em dúvida a expansão a custo mínimo (JANNUZZI; SWISHER, 1997).

As opções do lado da demanda indicam que o atendimento à necessidade de energia pode ser realizado alterando o uso final (DSM, do inglês *Demand Side Management*, ou, em português, gerenciamento do lado da demanda, GLD). De acordo com uma revisão de DSM no Reino Unido, a definição de DSM varia, incluindo o gerenciamento da demanda de eletricidade e podendo incluir ou não o gerenciamento da demanda de outras fontes de energia (WARREN, 2014). Nesta revisão de vários estudos, o autor verifica que as variações na definição de DSM podem incluir, dependendo do estudo, redução da demanda em horário de pico, transferência de carga para horário de menor demanda e medidas de eficiência energética, entre outros, além de ser utilizada como sinônimo de *smart(er) grid* (WARREN, 2014). Com base na revisão, o autor propõe a seguinte definição holística de DSM para melhor atender a objetivos atuais de políticas de redução de emissões, segurança energética e acessibilidade financeira:

“Demand-side management (DSM) se refere a tecnologias, ações e programas no lado da demanda de medidores de energia que buscam gerenciar ou diminuir o consumo de energia, a fim de reduzir as despesas totais do sistema energético ou contribuir para atingir objetivos de políticas, como redução de emissões ou balanceamento de fornecimento e demanda.” (WARREN, 2014, p. 943, tradução livre do autor).

### 2.2.1 Planejamento Integrado de Recursos (PIR)

“O PIR é o desenvolvimento combinado da oferta de eletricidade e de opções de gerenciamento do lado da demanda (DSM) para fornecer serviços de energia a custo mínimo, incluindo custos sociais e ambientais.” (JANNUZZI; SWISHER, 1997, p. 7).

De acordo com Jannuzzi e Swisher (1997), a projeção da demanda é bastante importante em um PIR, porque define quando e quais programas de eficiência serão adotados. As projeções devem ser feitas com base em serviços de energia, levando em consideração a base tecnológica e fatores socioeconômicos a fim de se determinar o nível de serviços necessário (modelo de usos-finais ou *bottom-up*) (JANNUZZI; SWISHER, 1997).

Como os de modelos de usos-finais não são completos, existe a necessidade de se apoiar em cenários macroeconômicos (*top-down*) para se projetar a demanda. São necessários pelo menos um cenário de referência, que pode ser de eficiência congelada ou tendencial (de evolução natural de tecnologias), e um cenário que considere medidas de eficiência, que podem ser de potencial técnico, econômico ou de mercado (JANNUZZI; SWISHER, 1997).

Para atender à demanda projetada nos cenários são necessários novos projetos de geração ou ações de eficiência. Na elaboração de um PIR um dos objetivos é determinar qual cenário oferece mais benefícios aos consumidores e à sociedade em geral (JANNUZZI; SWISHER, 1997).

Com relação às aplicações do PIR, uma aplicação com avaliação de custos pode ser encontrada em Ugaya (1996), para o setor energético na região de Campinas. Para o setor de transportes, um modelo *bottom-up* detalhado foi construído para o setor de transportes do Irã, com objetivo de minimização de custos (SADEGHI; HOSSEINI, 2008). No caso do setor de transportes do Brasil um estudo

foi realizado para o estado de São Paulo, no âmbito do planejamento integrado de energia (DIAS et al., 2014). Os autores utilizaram a ferramenta *Long Range Energy Alternatives Planning System* (LEAP), desenvolvendo um modelo bottom-up para a projeção da frota de automóveis e a respectiva demanda energética e emissões de CO<sub>2</sub>.

A metodologia também é discutida para o consumo de água, como no estudo de um PIR para o fornecimento de água no estado do Colorado (EUA) para o ano de 2050 (ROWAN; HECOX; MOREA, 2012). Este trabalho, no entanto, ainda é um estudo de proposta e os cenários não estão todos criados, mas os autores estudam como um PIR poderia avaliar possibilidades de oferta e demanda (conservação).

Como o PIR compara custos de opções de oferta e demanda, custos não monetários, tais como custos (impactos) ambientais, são tratados como externalidades. Existem, no entanto, maneiras de se considerar os custos ambientais, seja de forma qualitativa ou como valor expresso em custos monetários (que devem ser pagos e alteram os custos de geração com base na tecnologia utilizada). A energia produzida também pode ser associada a taxas de emissão de poluentes atmosféricos, e de forma ideal o custo marginal da oferta deveria incluir o custo externo de cada uma das emissões. (JANNUZZI; SWISHER, 1997).

Em 2001, California (2001) apresentava cinco diferentes testes utilizados para avaliar a viabilidade de um PIR. Estes testes avaliam se a adesão de um programa de eficiência é lucrativo para as partes envolvidas. Dependendo do teste escolhido, podem ser avaliados os benefícios para os consumidores participantes do programa, para os consumidores não participantes do programa e/ou para a companhia de eletricidade. O programa é considerado viável pelos testes se a implementação resulta em lucro para as partes envolvidas.

Dos cinco testes, no entanto, apenas o teste social (uma variante do teste do custo total, que considera as perspectivas da companhia de eletricidade e do consumidor) aponta a possibilidade de considerar os impactos ambientais. O método, porém, consiste em uma simples precificação das emissões atmosféricas (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, compostos orgânicos voláteis e material particulado com diâmetro igual ou inferior a 10 micrômetros) evitadas ao se optar por um programa de eficiência ao invés da instalação de nova capacidade de geração (CALIFORNIA, 2001).



Um estudo a respeito de externalidades para o caso da África do Sul foi desenvolvido por Spalding-Fecher e Matibe (2003). De acordo os autores, apesar de muitos trabalhos focarem nas emissões atmosféricas e outras consequências ambientais negativas, nos países em desenvolvimento também existem externalidades positivas como os custos de saúde evitados se a eletricidade é comparada com combustíveis poluidores como carvão e parafina. Na análise da situação na África do Sul realizada pelos autores, as externalidades ambientais consideradas foram as emissões atmosféricas e a qualidade da água. Os autores aplicaram um processo de monetização (*damage cost approach*) e verificaram grande variabilidade entre os valores para a África do Sul e para os países desenvolvidos. Outro exemplo com monetização de emissões é o de Natheer, Dougherty e Von Hippel (2006) para a Arábia Saudita, onde são consideradas emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, VOC, MP, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

Os efeitos ambientais também podem causar efeitos no sistema elétrico, e já foram estudados para mudanças climáticas no Brasil, onde um estudo avaliou o efeito das mudanças climáticas no sistema elétrico brasileiro (DE LUCENA; SCHAEFFER; SZKLO, 2010). Os efeitos considerados pelos autores foram impactos a redução da confiabilidade da geração hidrelétrica, representada por menor fator de capacidade; a redução da eficiência das termelétricas em função de temperaturas mais altas; e aumento do consumo dos setores residencial e de serviços, devido ao aumento do consumo dos equipamentos elétricos em função de maiores temperaturas e ao aumento da utilização de ar condicionado. Para as hidrelétricas, foi verificada uma queda de 29 a 31% na energia firme gerada, dependendo do cenário analisado. Os autores propuseram um PIR para avaliar as maneiras de adaptação de menor custo para os cenários climáticos considerados. Para suprir a queda de geração verificada e o aumento do consumo, a principal fonte de energia utilizada foi o gás natural, seguida pelo bagaço de cana. O estudo não considerou a adaptação do sistema elétrico a eventos climáticos extremos.

Não obstante, nestes estudos discutidos não é aplicada a ACV. A integração de PIR e ACV é tratada a seguir, na seção 2.3.

## 2.3 ACV E PIR

Mirakyan e De Guio (2013) fizeram uma revisão de métodos e ferramentas para planejamento integrado de energia em cidades e territórios, para as quatro fases do planejamento, de acordo com a divisão dos autores: (i) preparação e orientações; (ii) design do modelo e análises detalhadas; (iii) priorização e decisão; e (iv) implementação e monitorização. De acordo com os autores, na fase (ii) são utilizados métodos quantitativos, sendo que entre os métodos possíveis descritos está a ACV. É mencionado, no entanto, que, embora haja aplicação de *multi-criteria decision aid* (MCDA) com resultados de métodos das fases (i) e (ii), ainda falta combinação para gerenciar todos os processos e tarefas de um planejamento integrado (MIRAKYAN; DE GUIO, 2013).

No entanto, observa-se que não há um grande número de estudos combinando ACV e PIR, apesar de um estudo de 2002 também já ter discutido a aplicabilidade da ACV [ambiental] no PIR, concluindo que, embora haja dificuldades de aplicação, a utilização da ACV é viável, e auxilia na tomada de decisão, considerando os aspectos ambientais (CARVALHO et al., 2002). Os autores, no entanto, aplicaram ACV apenas para opções de oferta.

A ACV já foi utilizada em vários aspectos relacionados ao planejamento energético. Um estudo de Van Dam, Bakker e Buitter (2013) utilizou ACV para avaliar *Home Energy Management Systems* (HEMS). Foi utilizada a base do ecoinvent v.2.2 e o método CED além do método de *eco-costs* para verificar se havia um benefício ambiental na implementação destes. A comparação avaliou se o impacto (CED neste caso) da produção dos HEMS era inferior aos ganhos decorrentes da utilização do equipamento (em função da redução do consumo de energia). Foram avaliados vários tipos de HEMS e todos apresentaram um ganho neste sentido (menor CED) para todos os cenários de redução de consumo analisados, no máximo a partir de dois anos de uso. Não foram incluídos na avaliação, contudo, *smart meters* (a produção destes), que em alguns casos são necessários ou utilizados em conjunto com os HEMS. Os autores, contudo, recomendam cautela e também a necessidade de políticas de economia de energia mais amplas, para evitar o desengajamento dos usuários e a falta de economias substanciais. Além disso, a associação destes com *smart meters* poderia causar a adoção de HEMS

mais sofisticados, que consomem mais energia, podendo resultar em maiores impactos.

Um outro estudo que não faz um planejamento completo mas busca avaliar a alternativa de geração distribuída por meio de ACV é o estudo de Amor et al. (2014). Os autores utilizaram ACV para identificar o impacto da adoção de geração distribuída (fotovoltaica ou eólica) na província de Quebec (Canadá). A abordagem utilizada pelos autores é consequencial, determinando as tecnologias marginais horárias do sistema, a fim de verificar se haveria uma redução nas emissões. O método de AICV utilizado foi o Impact 2002+. Os resultados mostraram que a identificação de tecnologia marginal horária (a tecnologia marginal é identificada para cada hora – i.e. pode ser diferente em horários de pico e de vale) do sistema causa diferença se comparada à identificação de uma única tecnologia marginal simples. Isto ocorre, em parte, porque é obtido uma matriz de tecnologias, cujos resultados ficam em uma faixa entre os resultados para gás natural e óleo (assumindo uma única tecnologia). Os autores também compararam com os resultados atribucionais. Na abordagem dos autores, há grande potencial de redução de emissões, enquanto que ao comparar com a atribucional, não há redução (até aumento em alguns casos), já que a matriz atribucional é composto de 95.1% de hidrelétricas. Utilizar tal matriz superestimaria o potencial das hidrelétricas como sendo a tecnologia de fato utilizada à margem do sistema, em resposta a uma variação diferencial, que nos estudo dos autores é de 1 a 4%, ou 8 a 20% no máximo, para as jurisdições de Ontario. Isto resulta em resultados tendenciosos ao tomar uma decisão a respeito de incentivar a geração distribuída. Desta forma, a utilização de matriz média não é apropriada no contexto de políticas energéticas. Os autores recomendam tal metodologia quando é necessário estimar com precisão os impactos associados ao uso de eletricidade, sendo recomendado que os praticantes tenham cautela e utilizem análises de sensibilidade utilizando vários cenários de fornecimento de eletricidade para levar em conta a complexidade dos sistemas elétricos. Uma limitação do estudo é considerar apenas efeitos marginais, e não uma análise de grande adoção de tecnologias de geração distribuída.

Utilizar ACV em um planejamento integrado aplicando monetarização também já foi realizado. Pietrapertosa et al. (2009) aplicaram ACV com *Comprehensive Analysis* e o modelo de monetarização *ExternE* no modelo MARKAL para encontrar soluções de custo mínimo com monetarização de externalidades. Os

autores aplicam a um estudo de caso para o sistema energético de uma pequena região no sul da Itália (Val d'Agri). Os autores utilizam dados estáticos de ACV atribucional no MARKAL, e não está claro se aplicam ACV às opções do lado da demanda, descrevendo apenas a aplicação desta às fontes de energia e material (e.g. produção de óleo) e à conversão de energia (lado da oferta).

Para o sistema elétrico, Björklund (2012) discute a aplicação de ACV à Avaliação Ambiental Estratégica no âmbito do planejamento energético municipal, em um estudo de caso para o município de Finspång, na Suécia. Após a identificação de uma série de alternativas energéticas sugeridas pela comunidade, dez foram selecionadas para aplicação de ACV. Estas incluíam opções tanto do lado da oferta quanto da demanda. No que diz respeito ao transporte, a alternativa selecionada para o futuro seria a inclusão de veículos a etanol no município. A autora não forneceu resultados quantitativos para a ACV, já que não se considerou adequado ao contexto (comunidade local) fornecer resultados numéricos, ao invés disso apresentando uma simplificação em forma de tabela com “*smileys*” para identificar se uma medida era benéfica em relação aos cenários sem tal medida, para cada categoria de impacto. Adicionalmente, foram fornecidas explicações para interpretação do resultado. Não obstante, a autora optou por utilizar a metodologia consequential para cada alternativa, comparando com os casos em que não haveria tal interferência.

A aplicação de ACV tanto para a oferta quanto para a demanda já foi realizada para vários setores. Um desses estudos foi realizado para avaliar o sistema de fornecimento de água na cidade de Oslo, na Noruega (VENKATESH; BRATTEBØ, 2014). Embora o ICV tenha sido simplificado, utilizando apenas fluxos de materiais e energia, e apenas para alguns equipamentos selecionados no lado da demanda (como lavadoras de roupa e louça, sabão e detergente), os resultados dos autores apontam que, para a maioria das categorias de impacto, a maior parte desse ocorre do lado da demanda (nas residências). Os autores discutem como medidas DSM são importantes no contexto e concluem que deveria ser dada muito mais atenção ao lado da demanda nas pesquisas a respeito de serviços de tratamento e fornecimento de água e nas futuras estratégias de sustentabilidade das companhias de água.

Um modelo aplicando ACV do lado da oferta e da demanda abrangendo mais categorias de impacto e mais opções do lado da demanda foi desenvolvido

para avaliar impactos ambientais no parque imobiliário (HEEREN et al., 2013). Embora os autores não falem de PIR, o modelo considera oferta e demanda. No lado da demanda, são consideradas várias opções de eficiência, incluindo a utilização do modelo Bass de difusão de tecnologias. No lado da oferta, no entanto, são considerados apenas cenários futuros de projeções governamentais, embora sejam utilizados diferentes cenários, de forma que são utilizadas várias matrizes elétricas atribucionais futuras. Deste modo, o impacto das medidas do setor da construção civil no planejamento elétrico não é avaliado. A utilização de abordagem consequencial também permitiria identificar outros possíveis impactos decorrentes das medidas de eficiência utilizadas no modelo. No caso de estudo dos autores, são avaliados os potenciais de redução energética e de GEEs do parque imobiliário até 2050. Embora sejam consideradas apenas emissões de GEEs e demanda primária de energia, os autores mencionam que o modelo seria compatível com outros indicadores. Como o caso de estudo avalia as potenciais reduções energéticas do parque imobiliário em relação a uma política mais ampla da cidade de Zurique e as reduções do parque imobiliário poderiam não ser suficientes para atingir a meta, outros setores, como indústria e transportes, teriam também que reduzir seu consumo energético. Desta forma, o próximo passo dos autores é estudar as relações entre os diferentes setores de demanda. O modelo utiliza dados de ICV do ecoinvent v.2.2. A limitação neste caso é a utilização de dados estáticos de ACV atribucional, que não permite investigar qual o impacto que as políticas identificadas teriam nos resultados da ACV (e.g. para a eletricidade um aumento de eficiência energética causaria a redução na geração da usina marginal, e não da média, sendo responsável por estes impactos).

Com relação à otimização ambiental utilizando dados de ACV, um modelo foi proposto por Kim et al. (2003) e aplicado à frota de automóveis no contexto dos Estados Unidos. O modelo de otimização, com inventário “dinâmico” (como chamado pelos autores) busca identificar os melhores períodos para substituição dos VCI por VCI mais novos, com menor consumo energético e emissões (em função da deterioração de veículos mais antigos). Neste caso, como o combustível não variava, o autor não considerou outras fontes do lado da oferta. O período considerado foi de 1985 a 2020. O modelo proposto, no entanto, não avaliou outras opções de veículos (como VEs ou FCVs) e também partiu de dados de ICV atribucionais para cada uma das fases do ciclo de vida. Já no caso dos VEs é

importante considerar os efeitos marginais, já que a tecnologia marginal pode ser bastante diferente da tecnologia média (atribucional). Os autores propuseram minimizar CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e uso de energia da frota, ao invés de indicadores de categorias de impacto de métodos de AICV. Os autores obtiveram resultados de minimização individuais para cada uma das emissões, e, embora entre CO<sub>2</sub> e uso de energia os resultados não tenham variado muito, houve variabilidade para NO<sub>x</sub>.

Uma aplicação com base no mesmo modelo foi realizada por Kim, Keoleian e Horie (2006) para otimizar a substituição de refrigeradores, para o período 2004-2020. Neste estudo os autores também avaliaram a questão econômica, e verificaram que a otimização ambiental (considerando o consumo de energia ou o GWP) fornece trocas muito mais frequentes que a otimização de menor custo. Neste caso poderia haver consideração a respeito de diferentes fontes de oferta. Os autores, contudo, mantiveram a mesma eficiência do sistema elétrico durante todo o período simulado (de 1985 a 2020), e não menciona a utilização de ACV consequencial ou de tecnologias marginais.

Uma outra aplicação com base no mesmo modelo com algumas adaptações foi realizada por De Kleine, Keoleian e Kelly (2011) para a substituição de aparelhos residenciais de ar condicionado, incluindo uma diferenciação climática (duas cidades com climas diferentes) considerando custo, energia e GWP. Esta aplicação também não considerou um inventário consequencial. O período analisado foi de 1985 a 2025. Os resultados também apresentaram grande variabilidade, indicando grande frequência de trocas para minimizar o consumo de energia (quatro a 12 trocas no período analisado), seguido de GWP (duas a cinco trocas) e custo (uma a três trocas).

Por fim, Röder (2001) desenvolveu um modelo de aplicação de ACV em um modelo de planejamento energético (MARKAL). O caso de estudo avaliado foi o setor de transporte de passageiros por automóveis na Europa. Embora o autor não fale em PIR, foram avaliadas diversas opções de oferta e demanda. Entre as opções de demanda foram considerados diversos tipos de veículos, embora não tenham sido considerados VEs (o estudo é de 2001. Foram, contudo, considerados FCVs). O autor primeiro aplicou ACV para as opções de demanda e oferta que incluíam diferentes combustíveis para os ICVs e diferentes formas de fornecer CH<sub>2</sub> para os FCVs. O segundo passo foi calcular os custos sociais e privados. Por fim, para integrar ACV no MARKAL, o autor utilizou duas abordagens: aplicação de impostos

sobre as emissões e aplicação de limite nas emissões. O MARKAL então fornece a solução de menor custo para o transporte com base nos valores e/ou limites informados (nem sempre existe solução possível dependendo do limite fornecido). Em função do desenvolvimento de métodos de AICV da época, foram consideradas poucas categorias de impacto e emissões em comparação ao disponível atualmente. O autor também comenta (p. 14) que uma desvantagem da ACV na época era a abordagem estática [i.e. atribucional], sendo que hoje já existe desenvolvimento significativo da ACV consequential. O autor conclui que “o ranking das diferentes tecnologias é uma função muito complexa de parâmetros tecnológicos, econômicos, ecológicos e sociais” (RÖDER, 2001, p. 151, tradução livre do autor), sendo necessárias reavaliações no futuro em função de desenvolvimento tecnológico ou de novos resultados científicos ou mudanças no sistema de valores da sociedade. Entre os trabalhos futuros que poderiam ser realizados o autor aponta a integração com outros setores, como o setor de transportes completo, energia e calor, para tratar de problemas como alocação e restrições de recursos. O desenvolvimento da ACV consequential, dos ICVs e métodos de AICV e de novas tecnologias de veículos, como os VEs, desde a publicação deste estudo contribuem para uma limitação do estudo de caso do autor, se considerada a aplicabilidade dos resultados do estudo de caso no contexto atual. Com relação à metodologia, o autor buscou minimizar os custos, de forma que as decisões eram tomadas com base econômica, ainda que os custos pudessem incluir precificação de emissões. Como o estudo não considerou VEs, o autor também deixou de lado o sistema elétrico, que poderia ser também avaliado com a utilização de ACV consequential.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

É possível notar que existe integração entre os tópicos discutidos. Observa-se que o PIR é compatível com a ACV, tendo em vista que esta já foi mencionada em alguns estudos como possibilidade dentro do PIR. O planejamento integrado (diferentemente do planejamento tradicional) considera opções tanto de oferta quanto de demanda, e a ACV poderia ser aplicada tanto em opções de oferta quanto em opções de demanda, já que considera os impactos do berço ao túmulo e poderia

ser aplicada tanto para avaliar opções do lado da demanda (como, por exemplo, opções de eficiência) quanto opções de oferta. Apesar de estudos já terem sido realizados identificando que a ACV é uma técnica quantitativa que poderia ser aplicada no PIR, nota-se que não há um grande número de estudos neste sentido. Como poucos estudos foram identificados realizando uma busca por PIR, muitos dos estudos revisados tratam de planejamento energético mais amplamente, ou de planejamento integrado de energia. Esses estudos, contudo, avaliam os lados da oferta e demanda de forma simultânea, de modo que constituem alternativas mais semelhantes ao PIR do que o planejamento tradicional, que olha apenas a oferta.

Dado o desenvolvimento da ACV, atualmente existem diferentes abordagens de ICV, de forma que o impacto causado pelo VE na demanda de eletricidade poderia ser considerado, de forma a ser estabelecida a matriz de eletricidade mais adequada. De acordo com o impacto do VE na demanda de eletricidade, poderiam ser utilizadas as abordagens atribucional, decisional ou consequencial, conforme critério de tamanho econômico sugerido pelo estudo de Frischknecht e Stucki (2010).

Nos estudos analisados que buscavam tomar a decisão do ponto de vista ambiental, observou-se que a otimização ambiental com ACV não levou em conta a questão consequencial. Estes estudos também indicaram que a minimização ambiental com ACV resulta em planos bastante diferentes da tomada de decisão para minimizar os custos (sem monetarização de externalidades). No estudo mais completo, de Röder (2001), que avaliou várias opções de oferta e demanda para automóveis no contexto europeu, mesmo que não se fale em ACV consequencial e que o autor até mencione que uma das limitações da ACV é que esta [atribucional, no caso] é estática, a própria modelagem econômica trataria de fornecer as tecnologias marginais com critérios econômicos. Não obstante, como a identificação de tecnologia marginal se restringe aos setores industriais incluídos no modelo econômico (já que os dados inseridos são estáticos), a não ser que todos os sistemas industriais estivessem presentes no modelo econômico não seria possível considerar todos os efeitos de mudanças no resultado do inventário. Embora este autor tenha aplicado técnicas de monetarização ou limite de emissões com objetivo de minimizar o custo, seria possível utilizar tal modelo para minimizar as emissões em condições de mercado. Ao aplicar as condições de mercado, contudo, fica dificultada uma análise de tomada de decisão com base no aspecto ambiental.



Por fim, nota-se que há uma preocupação ambiental no planejamento energético do PDE 2022 (BRASIL, 2013a), mas esta se limita a considerar de forma quantitativa apenas alguns tipos de impacto. Embora haja uma falta de métodos de AICV desenvolvidos especificamente para o contexto brasileiro, algumas das categorias de impacto tiveram métodos recomendados na avaliação do ILCD para o contexto europeu que possuem uma validade regional global (EUROPEAN COMMISSION, 2011; 2010). Isto permitiria a consideração de outros tipos de impactos além de emissões de GEE e ocupação da terra, além da contabilização dos impactos ao longo de todo o ciclo de vida.

### 3 MÉTODO

Para realizar o estudo, foram realizadas quatro etapas: (i) estabelecer dados gerais para o estudo; (ii) identificar a frota de automóveis e respectiva demanda energética e opções de atendimento; (iii) realizar ACV das opções de oferta e demanda; e (iv) avaliar o impacto ambiental da frota.

Nessas etapas buscou-se realizar uma adaptação das etapas para implementação de um PIR apresentadas por Jannuzzi e Swisher (1997, p. 25), que consistem em:

- 1) coleta de dados sobre uso-final de eletricidade e alternativas técnicas de eficiência;
- 2) definição e projeção da demanda;
- 3) cálculo de custos e dos impactos na curva de carga das alternativas do lado da demanda;
- 4) comparação dos custos das alternativas do lado da demanda com os custos e impactos ambientais das opções de oferta de eletricidade;
- 5) elaboração de um plano integrado de opções de oferta e ações no lado da demanda atendendo a critérios acordados de custo e qualidade ambiental; e
- 6) implementação do plano.

Como o presente estudo trata apenas de impactos ambientais, e não de custos, uma adaptação de tais etapas foi realizada para refletir apenas impactos ambientais. Apesar da etapa 4 tratar de impactos ambientais do lado da oferta, esses também estão presentes nas opções do lado da demanda, de forma que foram considerados no presente estudo. Também nota-se que não foi realizada a etapa de implementação, já que está além do escopo deste estudo. Como o escopo do presente estudo inclui apenas automóveis e não é objetivo realizar uma análise detalhada do sistema elétrico brasileiro, esta limita-se apenas a identificar possíveis fontes de energia para os automóveis.

Com relação à etapa número 1), o presente estudo trata apenas de veículos, e as características dos veículos avaliados e opções de eficiência estão descritas na seção 3.1.3. Com relação à etapa número 2), a demanda de eletricidade teve como base projeções governamentais e está descrita nas seções 3.1.1 e 3.1.2, enquanto que a demanda por transporte de passageiros corresponde ao número de veículos

na frota projetados para o horizonte de tempo, e está descrita na seção 3.2. Para a etapa número 3), considerou-se o impacto dos VEs na demanda (seção 3.2) e a ACV foi utilizada no lugar do cálculo de custos (seção 3.3).

Por fim, as etapas 4) e 5) estão brevemente descritas na seção 3.4, enquanto que os resultados destas estão apresentados no capítulo 4. Com relação à etapa número 4), neste estudo a comparação se limitou aos resultados de ACV das opções de veículos, que incluem: (i) veículos mais eficientes (VCIs com aumento de eficiência); (ii) veículos com diferentes combustíveis (VCIs ou VEs); e (iii) VEs alimentados com eletricidade de diferentes fontes (e.g. hidrelétricas, gás natural). Para a etapa 5) foram selecionadas algumas categorias de impacto ambiental e a elaboração do plano foi conduzida individualmente para cada categoria de impacto selecionada. Como o estudo considerou dois horizontes de tempo diferentes, representados pelos anos de projeção de 2022 e 2030, estas duas últimas etapas foram realizadas apenas para 2030. Isto deve-se à pouca penetração de VEs que foi considerada para o ano de 2022.

### 3.1 DADOS GERAIS PARA O ESTUDO

Os dados gerais do estudo compreendem os horizontes de tempo de projeção (3.1.1); os respectivos consumos de eletricidade e curvas de carga (3.1.2); e as características dos veículos utilizados (3.1.3).

#### 3.1.1 Definição do ano de projeção

Foram adotados dois anos de projeção no presente estudo. O primeiro ano de projeção adotado foi 2022, o mesmo horizonte de tempo de Brasil (2013a). Como assumiu-se que não seria possível haver grande penetração de VEs na frota dentro de um horizonte decenal, analisou-se também um horizonte de mais longo prazo, com o ano de projeção de 2030.

### 3.1.2 Consumo de eletricidade

Como cenário base para 2022, utilizaram-se as projeções de Brasil (2013a) com relação à energia, enquanto que para 2030 extrapolaram-se essas projeções para o período 2023-2030. Ainda que haja um plano governamental de expansão de longo prazo, o PNE 2030 (BRASIL, 2007a), este foi publicado em 2007, de forma que optou-se por utilizar dados mais recentes, do PDE 2022 (BRASIL, 2013a). Os consumos de eletricidade no SIN para os anos de projeção estão descritos no Quadro 4.

	2013 [GWh]	2022 [GWh]	Crescimento anual 2013-2022 [%]	2030 [GWh]
Consumo Eletricidade SIN [GWh]	461276 <sup>a</sup>	669463 <sup>a</sup>	4,2 <sup>b</sup>	932219 <sup>c</sup>

**Quadro 4 – Consumo de eletricidade no SIN para o período estudado.**

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 43).

<sup>b</sup> Fonte: Calculado com a equação (4), onde  $\text{Consumo}_{2022}$  e  $\text{Consumo}_{2013}$  são os consumos de eletricidade no SIN para 2022 e 2013, respectivamente.

<sup>c</sup> Fonte: Calculado com a equação (5), onde  $\text{Consumo}_{2030}$  é o consumo de eletricidade no SIN calculado para 2030,  $\text{Consumo}_{2022}$  é o consumo de eletricidade no SIN em 2022 descrito no Quadro 4, e  $i$  é o crescimento anual no período 2013-2022 descrito no Quadro 4.

$$i = \sqrt[9]{\frac{\text{Consumo}_{2022}}{\text{Consumo}_{2013}}} \quad (4)$$

$$\text{Consumo}_{2030} = \text{Consumo}_{2022} \times (1+i)^8 \quad (5)$$

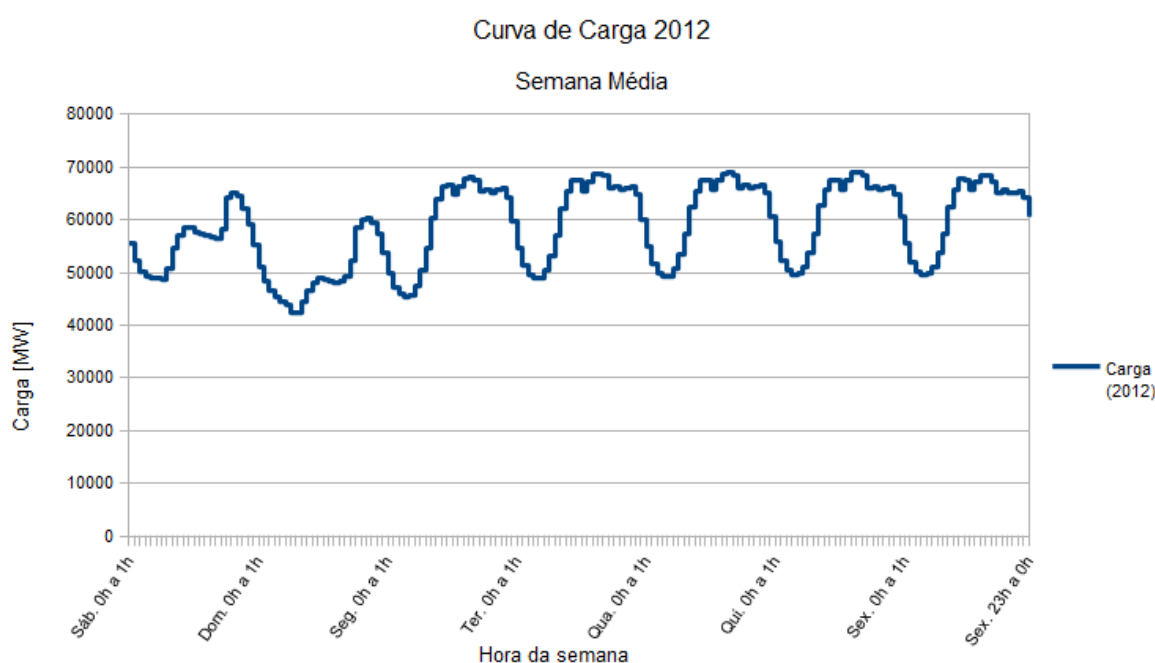
#### 3.1.2.1 Curva de carga do ano base

A curva de carga do SIN foi obtida de ONS (2014), por hora, para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2012. Uma semana média foi então calculada a partir desses dados, excluindo-se os feriados nacionais e pontos facultativos para o ano de 2012 descritos em Brasil (2011b). A exclusão dos feriados também se estendeu a alguns dias adjacentes, dependendo do dia da semana no qual os feriados ocorreram, conforme descrito no Quadro 5.

Dia da semana do feriado	Dias da semana do feriado excluídos da média
Domingo	Nenhum
Segunda-feira	Segunda-feira e o final-de-semana anterior
Terça-feira	Terça-feira, segunda-feira e o final-de-semana anterior
Quarta-feira	Quarta-feira
Quinta-feira	Quinta-feira, sexta-feira e o final de semana seguinte
Sexta-feira	Sexta-feira e o final de semana seguinte
Sábado	Sábado

**Quadro 5 – Dias da semana excluídos da média em função de feriados**

A curva de carga resultante para a semana média considerada, para o ano de 2012, está ilustrada na Figura 5.



**Figura 5 - Curva de carga horária do SIN para uma semana média no ano de 2012. Fonte: Média semanal calculada a partir dos dados de ONS (2014) para o ano de 2012.**

### 3.1.2.2 Curva de carga para os anos de projeção

Para os anos de 2022 e 2030, partiu-se da carga de 2012 e estimou-se que a curva de carga futura seria similar, assumindo que essa varia proporcionalmente à demanda total. Desta forma para a identificação da curva de carga para os anos 2022 e 2030 aplicaram-se as equações (6) e (7), respectivamente, para os valores de carga para cada uma das horas da semana. Nestas equações,  $Carga_{Horária,2022}$  e

$Carga_{Horária,2030}$  são os valores calculados para cada hora para os anos de 2022 e 2030, respectivamente;  $Carga_{Horária,2012}$  é a carga para a respectiva hora em 2012, para o SIN;  $Demanda_{Total\ SIN,2022}$  e  $Demanda_{Total\ SIN,2030}$  são os consumos totais no SIN para os anos de 2022 e 2030, respectivamente, calculados a partir da equação (8). Nesse caso, por demanda significa o total consumido mais as perdas (e.g. na transmissão, distribuição) do sistema. No cálculo a partir da equação (8), assumiu-se que as perdas no SIN para 2030 seriam as mesmas projetadas para 2022, de 16,0%, de acordo com Brasil (2013a, p. 44). Como base à suposição de aumento proporcional realizada, embora as projeções de Brasil (2013a) não incluam uma descrição da curva de carga horária do SIN para 2022, projeta-se um aumento de 45% na demanda total e de 41% na demanda máxima instantânea coincidente para o SIN (BRASIL, 2013a, p. 43, 45). Como demanda total para o SIN para 2012, assumiu-se a soma de todas as horas do ano da curva de carga. O consumo foi então calculado com a equação (8), assumindo perdas de 17,3%, valor para o SIN para 2013 de Brasil (2013a, p. 44).

$$Carga_{Horária,2022} = Carga_{Horária,2012} \times \frac{Demanda_{Total\ SIN,2022}}{Demanda_{Total\ SIN,2012}} \quad (6)$$

$$Carga_{Horária,2030} = Carga_{Horária,2012} \times \frac{Demanda_{Total\ SIN,2030}}{Demanda_{Total\ SIN,2012}} \quad (7)$$

$$Demanda = Consumo \times \frac{1}{1 - Perdas} \quad (8)$$

As curvas de carga resultantes para a semana média considerada e para os anos de 2022 e 2030 estão ilustradas na Figura 6.

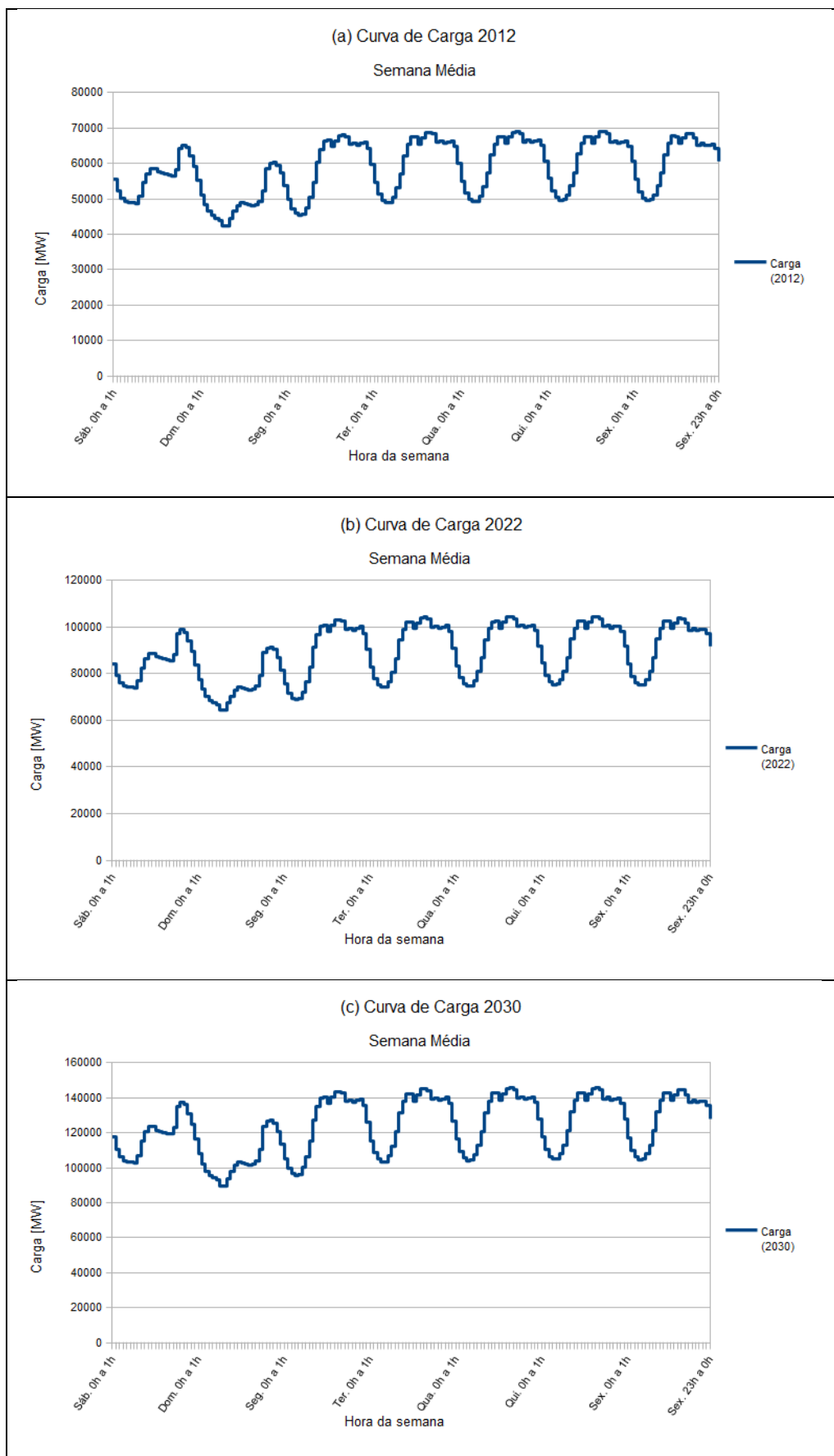


Figura 6 - Curvas de carga para uma média semanal do SIN para 2012 (a) e estimadas para 2022 (b) e 2030 (c).

Fonte: Curva de carga para 2012 obtida de ONS (2014).

### 3.1.3 Características dos Veículos

Como opções de veículos, foram considerados os VEs e os VCIs utilizando etanol e/ou gasolina tipo C. Foram considerados apenas veículos novos, já que não foram identificadas curvas de sucateamento atualizadas para o Brasil, adequadas ao horizonte de longo prazo analisado, embora a projeção da frota do PDE 2022 utilizada combine uma abordagem *top-down* com uma abordagem *bottom-up*, incluindo dados de sucateamento (BRASIL, 2013a, p. 331). No 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários são utilizados dados da Petrobras em conjunto com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) de 1988, sendo que o autor menciona que as curvas dos DETRANs estaduais superestimam a frota, concluindo na recomendação da atualização das curvas de sucateamento (BRASIL, 2011a, p. 80, 70). Desta forma, optou-se por não utilizar os dados já que considerou-se que não seriam indicativos da situação futura da frota, além de que a intensidade de uso de referência utilizada neste inventário é bastante elevada (BRASIL, 2011a, p. 95). Foram considerados apenas automóveis.

O VE utilizado como base foi o VE desenvolvido pela Itaipu Binacional em conjunto com outros parceiros (ITAIPU BINACIONAL, 2010). As principais características deste veículo estão descritas no Quadro 6.

Motor elétrico		Bateria	
Tipo	Assíncrono trifásico	Tipo	Sódio-Níquel-Cloro
Potência nominal	15 kW (20 cv)	Tensão	253 V
Torque nominal	50 N·m	Energia	19,2 kWh
Potência máxima	28 kW (37.8 cv)	Tempo de recarga	8 h
Torque máximo	124 N·m (12.6 kgf.m)	Peso	165 kgf
Peso	41,5 kgf <sup>a</sup>	Perdas	8%
		Autonomia	120 km <sup>a</sup>

**Quadro 6 – Características do VE de Itaipu Binacional e parceiros.**

Fonte: Itaipu Binacional (2010, p. 12), exceto peso do motor e autonomia da bateria.

<sup>a</sup> Fonte: Itaipu Binacional (2012).

A eficiência da bateria foi calculada a partir da equação (9), onde  $E_{\text{eficiência}_{\text{bateria}}}$  é a eficiência calculada e  $P_{\text{perdas}_{\text{bateria}}}$  são as perdas da bateria, descritas no Quadro 6. O consumo de eletricidade do VE foi calculado a partir da



equação (10), onde Consumo é o consumo de eletricidade calculado para o VE, em kWh/km, Energia<sub>bateria</sub> é a Energia da bateria descrita no Quadro 6, Eficiência<sub>bateria</sub> é a eficiência calculada com a equação (9), e Autonomia<sub>bateria</sub> é a autonomia da bateria descrita no Quadro 6. Estas características e este consumo foram assumidos para o ano de 2022.

$$\text{Eficiência}_{\text{bateria}} = 1 - \text{Perdas}_{\text{bateria}} \quad (9)$$

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Energia}_{\text{bateria}}}{\text{Eficiência}_{\text{bateria}} \times \text{Autonomia}_{\text{bateria}}} = 0,1739 \text{ kWh/km} \quad (10)$$

Já para o ano de 2030, foi considerada outra tecnologia de bateria para o VE, de lítio, já que é mais amplamente utilizada e que apresenta maior potencial de aumento de densidade de energia, se comparada com as de Na-NiCl<sub>2</sub>, de acordo com Gerssen-Gondelach e Faaij (2012). No cálculo do consumo de eletricidade, partiu-se do consumo calculado com a equação (10) e considerou-se, então, um aumento na densidade de energia da bateria e uma respectiva redução de massa, resultando em redução da massa total do veículo. A densidade de energia considerada foi de 200 Wh.kg<sup>-1</sup>, considerando a projeção para o futuro para baterias de Li-ion em (GERSSEN-GONDELACH; FAAIJ, 2012). A massa da nova bateria, mantendo-se a capacidade de 19,2 kWh, foi calculada com a equação (11). Por fim, considerou-se que a massa menor do veículo reduz o consumo, tendo como base a equação (12), de Bandivadekar et al. (2008, p. 46). Esta equação tem como base e foi obtida para VCIs, de forma que foi assumido que o mesmo desempenho que os autores observaram nos VCIs seria observado para os VEs. O consumo de eletricidade em 2030 foi então calculado com a equação (13), onde Consumo<sub>eletricidade, 2030</sub> e Consumo<sub>eletricidade, 2022</sub> são os consumos de eletricidade em 2030 (calculado) e 2022 (obtido por meio da equação (10)), respectivamente; e Consumo<sub>massa inicial</sub> e Consumo<sub>massa reduzida</sub> são os consumos calculados por meio da equação (12) considerando a massa inicial do veículo e a massa reduzida do veículo (considerando uma bateria de massa menor, calculada por meio da equação (11)), respectivamente.

$$\text{Massa} = \frac{\text{Energia}}{\text{Densidade de energia}} \quad (11)$$

$$\text{FC} = 0,004 \times m + 2,993 \quad (12)$$

Fonte: Bandivadekar et al. (2008, p. 46). FC = consumo de combustível (em L/100km); m = massa do veículo.

$$\text{Consumo}_{\text{eletricidade}, 2030} = \frac{\text{Consumo}_{\text{massa reduzida}}}{\text{Consumo}_{\text{massa inicial}}} \times \text{Consumo}_{\text{eletricidade}, 2022} \quad (13)$$

O Quadro 7 mostra os consumos de eletricidade utilizados para os VEs, para os anos de 2022 e 2030. Não foram considerados outros ganhos de eficiência para os VEs, além da evolução das baterias, já que esta tecnologia de veículo ainda não está amplamente disponível no mercado, de forma que considerou-se que esta já seria uma tecnologia futura.

	2022 <sup>a</sup>	2030 <sup>b</sup>
Consumo VE [kWh/km]	0,174	0,168

**Quadro 7 – Consumo de eletricidade dos VEs em 2022 e 2030**

<sup>a</sup> Calculado com a equação (10). <sup>b</sup> Calculado com a equação (13).

Já para os VCIs, foram estabelecidos os consumos de energia para os anos 2022 e 2030. Para 2022, partiu-se do consumo de veículos novos em 2009, de Brasil (2011a, p. 47) e considerou-se um aumento de eficiência de 0,7% ao ano, de Brasil (2013a, p. 54). O cálculo foi realizado com a equação (14), onde  $\text{Consumo}_{2009}$  [km/l] e  $\text{Consumo}_{2022}$  [km/l] são os consumos, em km/l, para 2009 e 2022 (calculado), respectivamente, enquanto  $i$  é o ganho de eficiência anual e 13 refere-se ao número de anos entre 2009 e 2022.

$$\text{Consumo}_{2022[\text{km/l}]} = \frac{\text{Consumo}_{2009[\text{km/l}]}}{(1-i)^{13}} \quad (14)$$

Foram estabelecidas duas situações para 2030. Na primeira, foi obtido da mesma forma que para 2022, mas considerando o aumento de eficiência até 2030. O cálculo foi realizado com a equação (15), onde  $\text{Consumo}_{2009}$  [km/L] e  $\text{Consumo}_{2030}$

[km/L] são os consumos, em km/l, para 2009 e 2030 (calculado), respectivamente, e  $i$  é o ganho de eficiência anual.

Na segunda situação, considerou-se que seria possível um limite de redução de 50% (em l/km), com base em Global Fuel Economy Initiative [2009?]. Esta redução de 50% (em relação a 2005) poderia ocorrer até 2030 com a inclusão de híbridos, mas sem a inclusão de híbridos *plug-in* ou VEs (GLOBAL FUEL ECONOMY INITIATIVE, [2009?]). O consumo para 2005 foi obtido de Brasil (2011a, p. 47). Este caso foi considerado como um limite de eficiência para os VCIs, e foi assumido tanto para VCIs utilizando gasolina quanto para VCIs utilizando etanol. O cálculo do consumo foi realizado por meio da equação (16), onde  $\text{Consumo}_{2005[\text{km/l}]}$  e  $\text{Consumo}_{2030[\text{km/l}]}$  são os consumos, em km/l, para 2005 e 2030 (calculado).

$$\text{Consumo}_{2030[\text{km/l}]} = \frac{\text{Consumo}_{2009[\text{km/l}]}}{(1-i)^{21}} \quad (15)$$

$$\text{Consumo}_{2030[\text{km/l}]} = \frac{\text{Consumo}_{2005[\text{km/l}]}}{0,5} \quad (16)$$

Os consumos dos VCIs utilizados estão descritos no Quadro 8.

	2005 <sup>a</sup>	2009 <sup>a</sup>	2022 <sup>b</sup>	2030a <sup>c</sup>	2030b <sup>d</sup>
Consumo VCI gasolina [km/l]	11,5	12,0	13,1	13,9	23,0
Consumo VCI etanol [km/l]	7,7	8,0	8,8	9,3	15,4

**Quadro 8 – Consumo dos VCIs em 2022 e em 2030, para os dois casos considerados.**

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2011a, p. 47).

<sup>b</sup> Calculado com equação (14).

<sup>c</sup> Calculado com equação (15).

<sup>d</sup> Calculado com equação (16).

Considerou-se para ambos os veículos, VEs e VCIs, uma vida útil de 150.000 km. Como distância percorrida anualmente, considerou-se a média dos primeiros nove anos (ano 0 a ano 8; assumindo uma utilização média de seis meses durante o ano 0) de Brasil (2011a, p. 95). Nessa pesquisa considera-se um total de 148.400 km percorridos no período, resultando em uma média de 17.459 km por ano. Isto é o equivalente a 47,8 km por dia ou 334,8 km por semana.

### 3.2 FROTA DE AUTOMÓVEIS

Para determinar a frota de veículos leves para os anos de projeção foram considerados: (i) para 2022, os dados de Brasil (2013a); e (ii) para 2030, aplicou-se ao período 2023-2030 o crescimento anual observado no período 2013-2022, de Brasil (2013a). Como estes dados são referentes à frota de veículos leves, e não de automóveis, utilizou-se a proporção estimada para 2020 entre comerciais leves e automóveis de Brasil (2011a, p. 81-82). O Quadro 9 mostra a frota de veículos leves para os dois anos de projeção, assim como a frota de automóveis para 2030.

	2013	2022	crescimento anual [%]	2030
Frota de Veículos Leves [10 <sup>6</sup> unidades]	35,7 <sup>a</sup>	59,3 <sup>a</sup>	5,9 <sup>b</sup>	93,8 <sup>c</sup>
Frota de Automóveis [10 <sup>6</sup> unidades]	-	50,2 <sup>d</sup>	-	79,4 <sup>e</sup>

#### Quadro 9 – Frota de veículos em 2022 e 2030.

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 54).

<sup>b</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 53).

<sup>c</sup> Fonte: Calculado com a equação (17), onde  $Frota_{VL,2030}$  é a frota de veículos leves calculada para 2030,  $Frota_{VL,2022}$  é a frota de veículos leves em 2022 descrita no Quadro 9, e  $i$  é o crescimento anual no período 2013-2022 descrito no Quadro 9.

<sup>d</sup> Fonte: Calculado com a equação (18), onde  $Frota_{A,2022}$  é a frota de automóveis calculada para 2022,  $Frota_{VL,2022}$  é a frota de veículos leves em 2022 e  $percentual_A$  é o percentual de automóveis na frota em relação ao total de veículos leves; este percentual foi obtido a partir dos dados de Brasil (2011a, p. 81-82) para o ano de 2020, último ano considerado na análise de Brasil (2011a), e equivale a 84,6%.

<sup>e</sup> Fonte: Calculado com a equação (19), onde  $Frota_{A,2030}$  é a frota de automóveis calculada para 2030,  $Frota_{VL,2030}$  é a frota de veículos leves calculada para 2030 com a equação (17) e  $percentual_A$  é o percentual de automóveis na frota em relação ao total de veículos leves; este percentual foi obtido a partir dos dados de Brasil (2011a, p. 81-82) para o ano de 2020, último ano considerado na análise de Brasil (2011a), e equivale a 84,6%.

$$Frota_{VL,2030} = Frota_{VL,2022} \times (1+i)^8 \quad (17)$$

$$Frota_{A,2022} = Frota_{VL,2022} \times percentual_A \quad (18)$$

$$Frota_{A,2030} = Frota_{VL,2030} \times percentual_A \quad (19)$$

Com relação à penetração dos VEs na frota, foram considerados dois casos diferentes, para os anos de 2022 e 2030. Para 2022, Brasil (2013a) considera apenas uma quantidade mínima de VEs na frota. Já as projeções de Baran e Legey (2013) consideram que a parcela de VEs pode chegar a 4,55% em 2020. Com base nestes estudos, considerou-se que não seria possível haver uma grande penetração

de VEs na frota neste ano, sendo que foram avaliadas três penetrações possíveis: 1%, 5% e 10% do total da frota de automóveis. Já para o ano de 2030, Baran e Legey (2013) apontam que seria possível atingir uma penetração de até 37,37% de VEs. Para este ano, considerou-se que a tecnologia já estaria bem desenvolvida e que seria possível estabelecer um planejamento governamental incentivando estes veículos. Deste modo, foram analisadas as penetrações que proporcionariam uma redução de impactos para as categorias analisadas, não estabelecendo um limite de penetração de VEs. Embora o caso de substituição total da frota por VEs seja improvável, em um caso recente de mudança de tecnologia de automóveis os veículos *flex fuel* atingiram grande parte das vendas de automóveis em poucos anos.

Para 2022, o consumo de eletricidade total dos VEs, por ano, para as penetrações de mercado consideradas, de 1%, 5% e 10%, foi calculado com a equação (21), onde  $\text{Consumo}_{\text{por km}}$  é o consumo por km descrito no Quadro 7; distância é a distância média percorrida anualmente; e  $\text{Número}_{\text{VEs}}$  é o número de VEs na frota, calculado com a equação (20). Os valores estão descritos no Quadro 10.

$$\text{Número}_{\text{VEs}} = \text{Frota} \times \text{Penetração}_{\text{mercado}} \quad (20)$$

$$\text{Consumo}_{\text{anual, frota}} = \text{Consumo}_{\text{por km}} \times \text{Distância} \times \text{Número}_{\text{VEs}} \quad (21)$$

Penetração de mercado [%]	Número VEs [10 <sup>6</sup> ] <sup>a</sup>	Consumo eletricidade [TWh] <sup>b</sup>	Aumento em relação a 2022 [%] <sup>c</sup>	Aumento em relação à expansão 2013-2022 [%] <sup>c</sup>
1	0,50	1,52	0,23	0,64
5	2,51	7,62	1,14	3,18
10	5,02	15,23	2,28	6,37

**Quadro 10 – Demanda de eletricidade dos VEs para 2022.**

Fonte:

<sup>a</sup> Calculado com a equação (20).

<sup>b</sup> Calculado com a equação (21).

<sup>c</sup> Tendo como base os consumos de 2013 e 2022 em Brasil (2013a, p. 43).

### 3.2.1 Demanda de eletricidade da frota de VEs em 2022

Considerou-se no presente estudo que existiriam incentivos para que os usuários dos VEs carreguem seus veículos nos períodos de menor carga. O período selecionado foi das 23h às 7h, todos os dias, resultando em um total de 56 horas possíveis de recarga durante a semana. O impacto na carga está ilustrado na Figura 7, onde foram ilustrados três casos: (a) todos os VEs carregando ao mesmo tempo, para uma carga lenta de 8h, onde os resultados apresentados são individuais para cada dia da semana, já que a média diária percorrida pelos VEs de 47,8 km não requer a carga total da bateria, com autonomia de 120 km, todos os dias; (b) a carga resultante dos VEs é igualmente distribuída, de forma que há sempre o mesmo número de veículos carregando no período considerado; e (c) um caso ótimo para o período considerado, embora não possível de se atingir na prática já que não se tem controle total da recarga e do perfil de uso dos VEs. Para o caso (a) foi utilizada a equação (22), enquanto para os casos (b) e (c) partiu-se da demanda semanal total, calculada com a equação (23), e dividiu-se essa demanda igualmente entre as 56 horas possíveis de recarga – caso (b) – ou de modo a tornar a curva de carga plana – caso (c). A variável  $perdas_{SIN}$  representa as perdas no SIN para 2022, de 16,0% de acordo com Brasil (2013a, p. 44).

$$Carga = \frac{Autonomia_{bateria}}{8} \times Número_{VEs} \times \frac{1}{(1 - perdas_{SIN})} \quad (22)$$

$$Demanda_{semanal} = \frac{Consumo_{por\ km} \times Distância_{semanal} \times Número_{VEs}}{(1 - perdas_{SIN})} \quad (23)$$

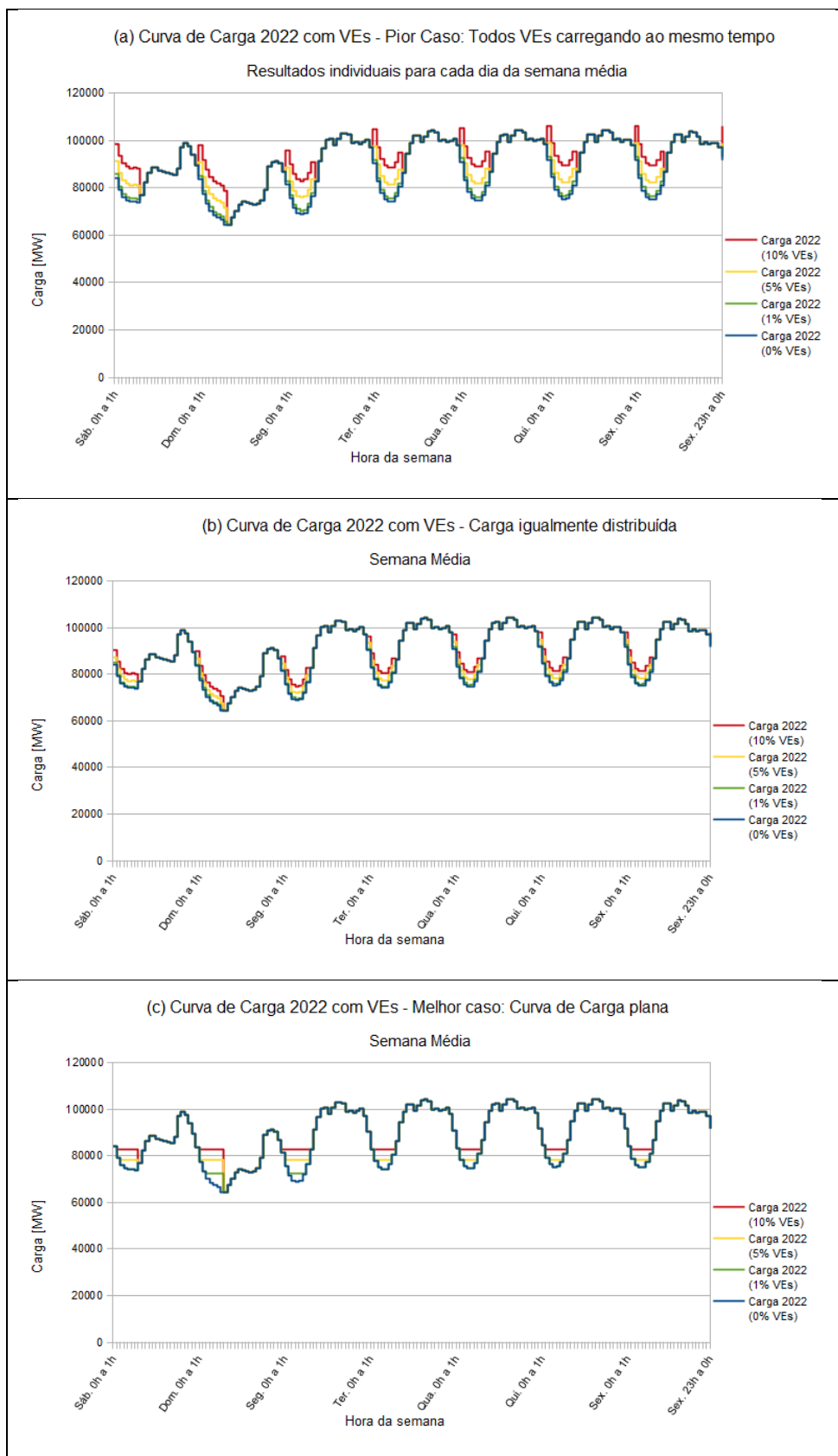


Figura 7 – Curva de carga estimada para 2022 com VEs, para os três níveis de penetração. (a) representa todos os VEs carregando ao mesmo tempo; (b) representa uma carga dos VEs igualmente distribuída; e (c) representa o caso ótimo, resultando em curva de carga plana para o período noturno considerado.

Fonte: A curva de carga com 0% VEs é a mesma da Figura 6 (b), que foi baseada em ONS (2014).

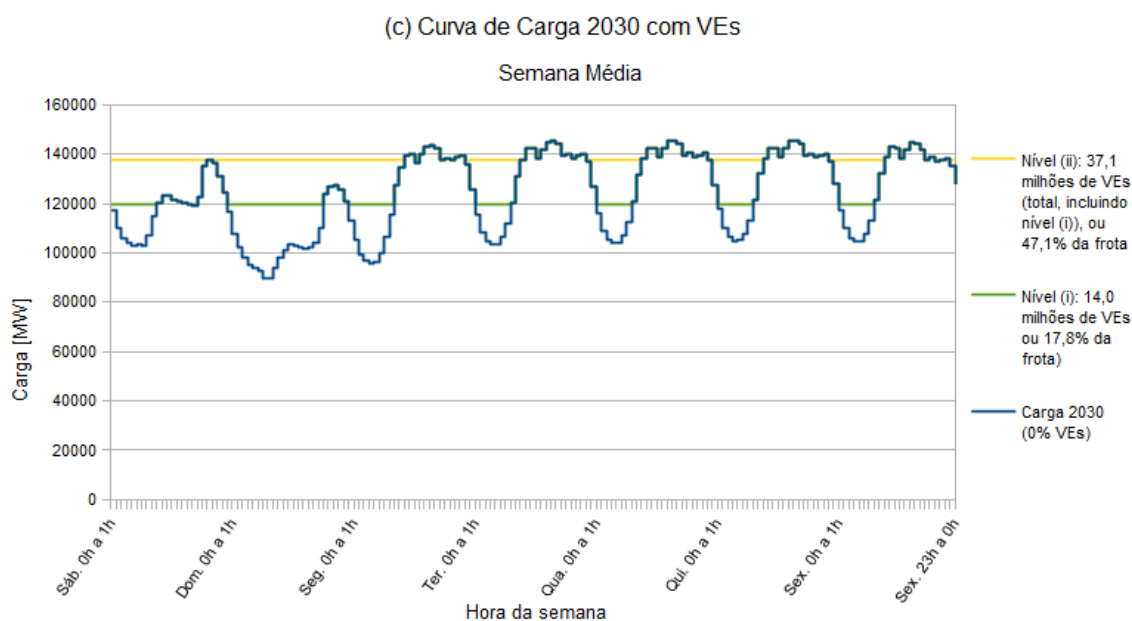
### 3.2.2 Demanda de eletricidade da frota de VEs em 2030

Já para 2030, estabeleceu-se a quantidade de VEs que poderiam ser incluídos na frota considerando três níveis de carga. O primeiro nível considera quantos VEs poderiam ser incluídos a fim de se aproveitar os períodos noturnos de baixa carga, chegando até a carga média do SIN, de segunda a sexta-feira, para a hora das 07 às 08h da manhã. O segundo nível considera uma penetração adicional, partindo deste nível chegando até a carga média de segunda a sexta-feira, para a hora das 09 às 10h da manhã. O terceiro e último nível seria o período para o qual a carga do SIN ultrapassaria o nível anterior. O nível (i) representaria um consumo adicional de 0,94 TWh por semana, enquanto para o nível (ii) seriam 2,31 TWh adicionais (incluindo o nível (i)). Aplicou-se a equação (24) para calcular a demanda semanal por VE, utilizando-se o consumo por km para 2030, e então a equação (25) para calcular o número de VEs. Os valores encontrados foram de 17,8 milhões para o nível (i) e de 37,1 milhões de VEs para o total do nível (ii) (incluindo-se os 17,8 milhões do nível anterior). A curva de carga está descrita na Figura 8, ilustrando o caso ótimo. Como esse caso ótimo dificilmente seria atingido na prática, uma penetração de termelétricas seria possível para atender os casos nos quais ocorrer recarga de uma parcela da frota em horário diferente, ou quando houver muitos veículos carregando ao mesmo tempo, ao invés de distribuição uniforme.

$$\text{Demanda}_{\text{semana,por VE}} = \frac{\text{Consumo}_{\text{por km}} \times \text{Distância}_{\text{semanal}}}{(1 - \text{perdas}_{\text{SIN}})} \quad (24)$$

$$\text{Número}_{\text{VEs}} = \frac{\text{Demanda}_{\text{semanal,adicional}}}{\text{Demanda}_{\text{semanal,por VE}}} \quad (25)$$





**Figura 8 – Curva de carga estimada para 2030 com dois níveis de penetração de VEs.**  
**Fonte:** A curva de carga com 0% VEs é a mesma da Figura 6 (c), que foi baseada em ONS (2014).

### 3.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA POR VEÍCULO

Esta seção detalha a ACV, por veículo, realizada para VEs e VCIs: o escopo, a abordagem de inventário utilizada e os dados principais são descritos.

#### 3.3.1 Definição do Escopo

A unidade funcional deste estudo é transportar uma pessoa por um km (1 pkm). O fluxo de referência resultante é de (1/240.000) veículo com uma vida útil de 150.000 km e ocupação média de 1,6 pessoas. Um sistema de produto “do berço ao túmulo” foi considerado.

A base de dados *unit process, allocation default* do ecoinvent v.3.01 (SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES, 2014a) foi utilizada, com algumas adaptações. A exceção foi uma das análises de sensibilidade para 2030 que utilizou a base de dados *unit process, consequential* do ecoinvent v.3.01 (SWISS CENTRE

FOR LIFE CYCLE INVENTORIES, 2014b). Uma descrição detalhada dos processos utilizados é apresentada no Apêndice A.

Com relação ao método de avaliação de impacto utilizado, adotou-se o CML 2 baseline 2000 v.2.05, sendo que para 2030 escolheram-se as categorias de depleção de recursos abióticos, aquecimento global e depleção da camada de ozônio para estabelecer opções de menor impacto. Estas categorias foram selecionadas por terem sido recomendadas em uma avaliação para a aplicação no contexto europeu mas possuem validade global (EUROPEAN COMMISSION, 2011; 2010<sup>4</sup>). Em função do presente estudo de caso incluir biocombustíveis, também foi considerado importante incluir a ocupação da terra, que foi utilizada como resultado de inventário. Como análise de sensibilidade foi utilizada a pontuação única do método de ponto final: EDIP 2003, v. 1.04, com normalização “Default”. Os métodos utilizados estão disponíveis no software SimaPro v.8.0.2<sup>5</sup> (PRÉ-CONSULTANTS, 2014), que foi utilizado para os cálculos.

### 3.3.2. Realização de ACV rápida

Uma ACV rápida, utilizando os dados já disponíveis na base de dados do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) foi realizada para identificar os principais contribuintes para o impacto total do transporte de 1 pkm, considerando tanto um VE quanto um VCI. O método utilizado foi o CML 2 baseline 2000 v. 2.05, disponível no SimaPro 8.0.2 (PRÉ-CONSULTANTS, 2014). Os processos da base do ecoinvent v.3.01, atribucional (SWISS...,2014a) foram:

(i) para o VE: “Transport, passenger car, electric {GLO}| processing | Alloc Def, U”; e

---

<sup>4</sup> European Commission (2010, p. 12) indica as seguintes fontes de informação utilizadas a respeito do método CML: Guinée, et al. (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Hardbound, ISBN 1-4020-0228-9; Paperback, ISBN 1-4020-0557-1 Website: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>

<sup>5</sup> Os métodos utilizados já estão implementados no software SimaPro 8.0.2, com base nas referências Guinée, J. B. et al. 2001. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards Volume 1, 2a, 2b and 3 (para o CML); e Hauschild, M.; Potting, J. 2003. Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment – The EDIP 2003 methodology. Institute for Product Development Technical University of Denmark (para o EDIP 2003).

(ii) para o VCI: “Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 {RoW}| transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 | Alloc Def, U”.

Os resultados obtidos indicaram que os maiores contribuintes para o impacto foram: no caso (i) o ciclo de vida da eletricidade, os ciclos de vida do veículo (do berço ao portão) e da bateria (do berço ao portão), com a manutenção do veículo sendo significativa na categoria de oxidação fotoquímica; e no caso (ii) o ciclo de vida da gasolina e do veículo (do berço ao portão). Os resultados variaram dependendo da categoria de impacto. Também observou-se que no caso da produção do veículo, o ciclo de vida da carroceria (“*glider*”: veículo sem sistema de propulsão; do berço ao portão) corresponde à maior parte dos impactos na maioria das categorias de impacto, tanto para o VCI (processo “Passenger car, petrol/natural gas {GLO}| production | Alloc, Def U” doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a)) quanto para o VE (sem bateria, processo “Passenger car, electric, without battery {GLO}| production | Alloc Def, U”).

### 3.3.3 Seleção da Abordagem de ICV

Esta seção trata da seleção da abordagem de ICV para os dois tipos de veículos e para os dois horizontes de tempo considerados.

Como a ACV rápida mostrou que a produção e queima de combustível é significativa com relação aos impactos totais do transporte de 1 pkm por um VCI, buscou-se identificar dados relevantes neste sentido. No caso da gasolina, considerou-se que a gasolina seria similar à já existente na base de dados doecoinvent, inclusive porque há importação de gasolina, que deve aumentar até 2022 (BRASIL, 2013a, p. 252). Em função da pouca variação na produção e no aumento da demanda no período decenal (BRASIL, 2013a, p. 252), assume-se que há aumento da importação e que esta poderia ser inclusive a tecnologia marginal para 2022. Desta forma, considerou-se que o processo doecoinvent utilizado seria adequado.

Com relação ao etanol, embora haja dados noecoinvent específicos para o Brasil, o inventário tem como base fontes antigas (JUNGBLUTH et al., 2007). Desta forma, optou-se por utilizar um inventário mais recente, de Cavalett et al. (2013), que

considera, ao menos em parte, questões associadas com o uso de tecnologia marginal para produção de cana (colheita 100% mecanizada e transformação do uso da terra).

Embora a ACV rápida também tenha demonstrado que a produção do veículo também pode ser significativa, tanto para os VCIs quanto para os VEs, a falta de dados específicos de diferentes tecnologias para os anos de projeção e pertinente ao caso brasileiro na base utilizada não permite a utilização de outra abordagem além da atribucional, nesse caso. Essa falta de dados afetaria também outros processos, mesmo que se desejasse utilizar a tecnologia marginal, como no caso do estudo de Ekvall e Andræ (2006).

Para os VEs, a matriz de eletricidade utilizada para recarregar a bateria tem um grande impacto nos resultados, como observado na ACV rápida e em estudos anteriores. Desta forma, atentou-se para a escolha da tecnologia marginal (pelo menos no que diz respeito à fonte de energia) neste caso. Já no caso das baterias, estas atualmente não são produzidas no Brasil, embora no caso das baterias de Na-NiCl<sub>2</sub> haja um projeto para nacionalizar a tecnologia (ITAIPU BINACIONAL, 2010, p. 11). Não existem, portanto, dados específicos para a produção das baterias no Brasil, de forma que foram também utilizados dados médios presentes na base de dados doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a). Considerou-se, contudo, um aumento na densidade de energia da bateria, conforme descrito na seção 3.1.3, além de um aumento na vida útil, ambos para 2030. Com exceção destas alterações, foram utilizados dados atribucionais.

Como a utilização de tecnologia marginal restringe-se à eletricidade, contudo, não foram identificados os impactos da consequência da mudança, que idealmente deveriam ser considerados (e.g. o efeito que um possível aumento ou diminuição na produção de etanol teria no mercado referente à alimentação ou a consequência que existiria em função de um possível aumento na quantidade de níquel utilizada para baterias de VEs).

### 3.3.3.1 Matriz de eletricidade para os VEs

Como a matriz elétrica vai mudar no horizonte de tempo do presente estudo, e o próprio consumo dos VEs pode alterar significativamente a demanda, a matriz atribucional atual pode não ser adequada dependendo da penetração de mercado. É necessário, então, determinar a matriz de eletricidade, que depende da abordagem e, também, do horário e dia da semana durante o qual a recarga da bateria ocorre.

A matriz elétrica brasileira é composta majoritariamente de energia hidrelétrica (BRASIL, 2013d), e a produção das hidrelétricas pode variar de acordo com o clima. As incertezas em projetar para o futuro apoiam o uso da abordagem decisional para 2022, já que o consumo adicional dos VEs representa pouco mais de 2% da demanda total de eletricidade, mesmo para uma penetração de mercado de 10% (ver Quadro 10), e uma pequena variação na produção das hidrelétricas devido a incertezas associadas aos regimes hidrológicos é suficiente para abastecer os VEs (i.e. um pequeno aumento na produção das hidrelétricas, da ordem de 3%, em função de condições climáticas favoráveis, seria suficiente para suprir totalmente o aumento de eletricidade em função de uma participação de 10% de VEs na frota).

A abordagem decisional, que com base em Frischknecht e Stucki (2010) utilizaria o consumo adicional já planejado em Brasil (2013a), é, portanto, justificada para 2022, desde que a recarga ocorra em períodos de baixa carga. Com base em Frischknecht e Stucki (2010), para um tamanho econômico de 2,28% seria recomendada a abordagem consequencial. Este aumento na demanda total ocorrendo em horário de baixa carga, contudo, teria menor impacto na demanda que tal aumento ocorrendo em horários de pico. Com base neste fato, além dos autores mencionarem que a faixa de tamanho econômico para a qual se recomenda a abordagem consequencial, superior a 1%, tem como base apenas alguns casos de estudo e deve ser aplicada com flexibilidade, considerou-se que a abordagem decisional poderia ser utilizada nesta situação. Caso a recarga da bateria (ou parte desta) ocorra em horário de pico, nas quais a termostabilidade seria necessária, justifica-se aplicar uma abordagem consequencial e tratar tal incremento de demanda (ou parte deste) diferentemente de outros usos, porque o impacto no sistema em tais horários seria muito superior.

A falta de incentivos governamentais para recarregar durante as horas de menor demanda e de um plano para atender a esse consumo adicional de VEs, contudo, poderia levar à recarga da bateria, ou parte desta, em horário de pico, já que, atualmente, a diferenciação de tarifa residencial é opcional (ANEEL, 2014). Neste caso, o impacto desta parcela da carga que ocorresse em horário de pico na demanda seria muito maior, justificando-se a utilização de abordagem consequencial. Também seria justificado tratar esta parcela do aumento da demanda de forma diferenciada de outros usos de eletricidade, em função de ocorrer em horários de maior demanda.

O planejamento de Brasil (2013a), que poderia ser utilizado como base para a matriz decisional, não considera VEs, de forma que não é previsto o atendimento a uma demanda adicional oriunda da adoção de VEs. Para 2030, ao se considerar que seria possível uma grande penetração de VEs na frota, o impacto na demanda não previsto poderia ser muito grande, não sendo recomendada a utilização da abordagem decisional, com base no critério de tamanho econômico. Deste modo, para 2030 optou-se por estabelecer opções de tecnologia marginal de atendimento, e, em função das incertezas em estabelecer esta para cada hora do sistema, incluindo a variação da geração em função de regimes hidrológicos, utilizou-se a divisão em três níveis, como ilustrado na Figura 8. Não foi utilizada, no entanto, uma abordagem consequencial completa, já que se trata apenas da tecnologia marginal na geração de eletricidade e não foram avaliadas outras consequências. Além disso, a seleção das fontes teve como base opções de menor impacto, ao invés de selecionar-se com regras de mercado, conforme Weidema, Frees e Nielsen (1999) e Ekvall e Weidema (2004), já que o objetivo é reduzir os impactos ambientais e o governo poderia escolher quais fontes contratar. Nota-se, no entanto, que as fontes consideradas como opções foram aquelas já presentes na matriz brasileira e para as quais haveria disponibilidade de recursos no horizonte de tempo analisado. Na seção 3.3.3.2 é realizada uma discussão a respeito da comparação de diferentes dados/abordagens.

Por outro lado, tal planejamento não inclui a capacidade necessária para suprir a frota de VEs, porque estes não estão incluídos no planejamento. Embora uma abordagem consequencial implique nos VEs utilizando eletricidade marginal enquanto os outros usos de eletricidade se beneficiariam da expansão de capacidade de geração planejada, que é majoritariamente hidrelétrica em Brasil

(2013a), para 2030 faz-se necessária tal abordagem, já que uma grande penetração de VEs na frota pode alterar significativamente a demanda.

### 3.3.3.2 Comparação entre diferentes abordagens

Embora considere-se que idealmente o estudo deveria ser realizado com abordagem consequencial completa, há maior disponibilidade de dados a respeito das fontes de energia que permite a identificação de tecnologia marginal para estas, que é um item bastante relevante no resultado do estudo.

A comparação entre diferentes dados para eletricidade e produção da cana e para os outros processos não foi considerada um problema, já que os dados atribucionais se referem a processos que não são significativos. Embora a produção do veículo seja significativa em termos absolutos, o objetivo é estudar a possibilidade de substituição de VCIs por VEs, e não o aumento da frota. Desta forma, como o mais significativo é a produção da carroceria, muito similar para ambos os veículos, e não o motor de combustão interna do VCI ou a bateria e a parte eletrônica do VE, na comparação do VCI com o VE estes dados são menos significativos (i.e. não haveria grande diferença entre os impactos de um VCI e de um VE, no que diz respeito à produção do veículo – do berço ao portão) Embora menos significativa, é possível que a produção da bateria altere bastante no horizonte de tempo do presente estudo, já que a tecnologia ainda está sendo desenvolvida. O uso de dados atribucionais, neste caso, representa uma limitação deste estudo. As incertezas com relação à tecnologia futura, contudo, tornam difícil estabelecer um conjunto de dados para 2022 ou 2030.

### 3.3.4 Inventário

Como foi utilizada uma base de dados internacional, do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), os conjuntos de dados, em muitos casos, não são específicos para o Brasil (i.e. referentes a processos produtivos em outros países) e podem não

representar a realidade brasileira, de forma que foi necessário realizar algumas adaptações. As adaptações realizadas referem-se aos itens mais significativos já discutidos, às tecnologias marginais e, também, aos itens faltantes na base do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), como o VCI a etanol de cana de açúcar. Adicionalmente, a produção de alguns itens foi adaptada substituindo-se a matriz de eletricidade utilizada no ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) pela matriz brasileira, assumindo que esses ocorrem ou poderiam, no futuro, ocorrer no Brasil. Uma descrição detalhada dos processos utilizados e das adaptações está no Apêndice A.

#### 3.3.4.1 Da extração de matéria-prima à produção do veículo

Foi utilizado como base um VCI com massa de 1200 kg, similar ao VE, que possui massa total de 1380 kg (FIAT, 2012), ou 1215 kg sem a bateria, com massa de 165 kg (ITAIPU BINACIONAL, 2010).

Para a bateria do VE, utilizou-se uma vida útil de 1.000 ciclos a uma profundidade de descarga de 80% (KALHAMMER et al., 2007) para 2022, o que corresponde a 96.000 km considerando os parâmetros do presente estudo, enquanto que para 2030 assumiu-se uma vida útil de 2.000 ciclos (GERSSEN-GONDELACH; FAAIJ, 2012), assumindo-se a mesma profundidade de descarga de 80%, o que, neste estudo, corresponde a 192.000 km. No primeiro caso, a vida útil da bateria é inferior à vida útil do veículo, de 150.000 km, sendo necessárias 1,56 baterias ao longo do ciclo de vida do veículo. No segundo caso, a vida útil da bateria é maior que a vida útil do veículo, de forma que não é necessária substituição. Assumiu-se, neste caso, que a bateria não é utilizada após o descarte do veículo. Os parâmetros considerados para a bateria estão descritos no Quadro 11, alguns dos quais já foram discutidos na seção 3.1.



Características	2022	2030
Tipo de Bateria	Na-NiCl <sub>2</sub>	Li-ion
Vida útil [ciclos]	1.000 <sup>a</sup>	2.000 <sup>b</sup>
Vida útil [km] <sup>c</sup>	96.000	192.000
Baterias necessárias ao longo do ciclo de vida do veículo <sup>d</sup>	1,56	1
Densidade de energia [Wh.kg <sup>-1</sup> ]	116,4 <sup>e</sup>	200 <sup>b</sup>
Massa [kg]	165 <sup>f</sup>	92 <sup>g</sup>

**Quadro 11 – Características das baterias do VE utilizadas para 2022 e 2030.**

Fontes:

<sup>a</sup> Kalhammer et al. (2007), considerando uma profundidade de descarga de 80%;

<sup>b</sup> Gerssen-Gondelach e Faaij (2012), assumindo, para a vida útil, a mesma profundidade de descarga de 80%;

<sup>c</sup> Considerando uma autonomia de 120 km, conforme Itaipu Binacional (2010);

<sup>d</sup> Para uma suposição de vida útil do veículo de 150.000 km;

<sup>e</sup> Calculado a partir dos dados do Quadro 6;

<sup>f</sup> Itaipu Binacional (2010); e

<sup>g</sup> Calculado com base na densidade energética para proporcionar uma autonomia de 120 km.

### 3.3.4.2 Fase de uso

Como a fonte de energia é significativa na avaliação da comparação de VCIs e VEs e existem algumas diferenças para o caso do Brasil, a adaptação de alguns processos foi necessária.

#### 3.3.4.2.1 VCI

Para os VCIs, foram alteradas as emissões atmosféricas durante a fase de uso e os respectivos fatores de deterioração, assim como a quantidade de combustível utilizada e a produção da cana-de-açúcar, tanto no caso da utilização de etanol quanto no caso da utilização de gasolina tipo C. Com relação ao combustível, em função da base de dados utilizada não possuir gasolina tipo C, esta foi definida como possuindo 25% de etanol, em volume, conforme as previsões de demanda de gasolina tipo A e etanol anidro para 2022 de Brasil (2013a, p. 54-55, 62). A proporção de uso de gasolina tipo C e etanol hidratado, considerando a média da frota, está descrita no Quadro 12.

Combustível	Demanda em 2022 [m <sup>3</sup> ]	Distância percorrida [10 <sup>9</sup> km] <sup>d</sup>	Volume na Gas. C [%] <sup>a</sup>	Uso [%] <sup>e</sup>
Etanol Anidro	14.371 <sup>a</sup>	-	25,0%	
Gasolina tipo A	43.114 <sup>b</sup>	-	75,0%	
Gasolina tipo C	57.486 <sup>c</sup>	756	-	72,44
Etanol Hidratado	32.811 <sup>a</sup>	288	-	27,56

**Quadro 12 – Proporção de combustíveis utilizados na frota brasileira em 2022.**

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 62);

<sup>b</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 54);

<sup>c</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 55);

<sup>d</sup> Calculada como a multiplicação das demandas em 2022 pelos consumos de combustível para 2022, esses últimos descritos no Quadro 8. Note-se que há uma necessidade de adequar as unidades (multiplicar por 1000), já que a demanda em 2022 é fornecida em m<sup>3</sup> e o consumo, no Quadro 8, por litro; e

<sup>e</sup> Proporção que reflete o percentual do consumo energético da frota que é suprido por estes dois combustíveis. Tem como base a distância percorrida indicada. Embora esta seja para 2022, como assume-se o mesmo ganho de eficiência para ambos os combustíveis (gasolina tipo C e etanol hidratado), a proporção mantém-se constante para 2030, no caso 2030a do Quadro 8. No caso do cenário de máxima eficiência, caso 2030b do Quadro 8, haveria uma leve alteração na proporção.

O Quadro 13 descreve as densidades utilizadas para os combustíveis e os consumos em kg/km.

Combustível	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ] <sup>a</sup>	Densidade – valor utilizado [kg/m <sup>3</sup> ]	Consumo em 2022 [kg/km]	Consumo em 2030 (a) [kg/km]	Consumo em 2030 (b) [kg/km]
Gasolina tipo A	700-770	735 <sup>b</sup>	-		
Etanol anidro	791.5 (máx.)	791,5	-		
Gasolina tipo C	-	749,125 <sup>c</sup>	0,0570 <sup>d</sup>	0,0539 <sup>d</sup>	0,0326 <sup>d</sup>
			Gasolina A: 0,0419 <sup>e</sup>	Gasolina A: 0,0539 <sup>e</sup>	Gasolina A: 0,0326 <sup>e</sup>
			Etanol Anidro: 0,0151 <sup>f</sup>	Etanol Anidro: 0,0142 <sup>f</sup>	Etanol Anidro: 0,00860 <sup>f</sup>
Etanol hidratado	805-811	808 <sup>b</sup>	0,0922 <sup>d</sup>	0,0871 <sup>d</sup>	0,0525 <sup>d</sup>

**Quadro 13 – Densidades e consumos de combustível para 2022 e 2030.**

<sup>a</sup> Fonte: Petrobras Distribuidora (2012);

<sup>b</sup> Valor utilizado é a média da faixa fornecida por Petrobras Distribuidora (2012);

<sup>c</sup> Calculado com a equação (26);

<sup>d</sup> Calculado com a equação (29);

<sup>e</sup> Calculado com a equação (27). Representa a parcela de gasolina A contida na gasolina tipo C;

<sup>f</sup> Calculado com a equação (28). Representa a parcela de etanol anidro contido na gasolina tipo C. Nas equações (26) a (29),  $\rho$  representa as densidades e  $m$  representa as massas.

$$\rho_{\text{GasolinatipoC}} = 0,75 \times \rho_{\text{GasolinatipoA}} + 0,25 \times \rho_{\text{Etanolanidro}} \quad (26)$$

$$m_{\text{GasolinatipoA}} = \frac{0,75 \times \rho_{\text{GasolinatipoA}}}{\rho_{\text{GasolinatipoC}}} \times \text{Consumo}_{[\text{kg/km; GasolinatipoC}]} \quad (27)$$

$$m_{\text{Etanolanidro}} = \frac{0,25 \times \rho_{\text{Etanolanidro}}}{\rho_{\text{GasolinatipoC}}} \times \text{Consumo}_{[\text{kg/km; GasolinatipoC}]} \quad (28)$$

$$\text{Consumo}_{[\text{kg/km}]} = \frac{\text{Consumo}_{[\text{L/km}]} \times \rho_{[\text{kg/m}^3]}}{1000} \quad (29)$$

As emissões atmosféricas durante a fase de uso, no escapamento, dos VCI's *flex fuel* utilizando etanol hidratado e gasolina tipo C foram obtidas de Brasil (2011a) e adaptadas de acordo com o consumo de combustível. Os valores utilizados para os anos considerados no presente estudo estão descritos no Quadro 14 e no Quadro 15 para os veículos utilizando etanol hidratado e gasolina tipo C, respectivamente. Foi utilizado o ano de 2009 como referência por ser o ano mais recente para o qual estavam disponíveis os dados no estudo de Brasil (2011a).

Ano	Consumo [kg/km]	Vida útil [ $10^3$ km]	CO	NO <sub>x</sub>	RCHO	NMHC	CH <sub>4</sub>	MP	CO <sub>2</sub> <sup>f</sup>
2009: novo [g/km] <sup>a</sup>			0,56	0,032	0,0104	0,03	0,011	-	-
F.D. [g/80.000 km] <sup>a</sup>			0,224	0,02	0,00276	0,024		-	-
2009 <sup>b</sup>	0,101 <sup>d</sup>		Emissões médias durante a vida útil do veículo, em g/km						
		150	0,770	0,0508	0,0130	0,0525	0,0110	-	-
		200	0,840	0,0570	0,0139	0,0600	0,0110	-	-
		250	0,910	0,0633	0,0147	0,0675	0,0110	-	-
2022 <sup>c</sup>	0,0922 <sup>e</sup>							-	-
		150	0,703	0,0463	0,0119	0,0479	0,0100	-	-
		200	0,767	0,0520	0,0126	0,0548	0,0100	-	-
		250	0,831	0,0577	0,0134	0,0616	0,0100	-	-
2030a <sup>c</sup>	0,0871 <sup>e</sup>							-	-
		150	0,664	0,0438	0,0112	0,0453	0,00949	-	-
		200	0,725	0,0492	0,0120	0,0518	0,00949	-	-
		250	0,785	0,0546	0,0127	0,0582	0,00949	-	-
2030b <sup>c</sup>	0,0525 <sup>e</sup>							-	-
		150	0,400	0,0264	0,00675	0,0273	0,00571	-	-
		200	0,436	0,0296	0,00719	0,0312	0,00571	-	-
		250	0,473	0,0329	0,00764	0,0351	0,00571	-	-

**Quadro 14 – Emissões durante a fase de uso para os VCI's *flex fuel* utilizando etanol. Note-se que essas emissões são as emissões no escapamento do veículo, durante o uso.**

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2011a, pp. 33-36). F.D. são os fatores de deterioração de emissões por acúmulo de rodagem. Assumiu-se que os F.D. são lineares, conforme utilizado por Brasil (2011a, p. 36).

<sup>b</sup> Emissões calculadas com a equação (32) para  $y = 150.000$  km,  $200.000$  km e  $250.000$  km; aplicando valores de 2009 para as equações (30) e (31).

<sup>c</sup> Emissões calculadas com a equação (33) para  $a = 2022$ , 2030a e 2030b;  $y = 150.000$  km,  $200.000$  km e  $250.000$  km; a partir de Emissão<sub>média; CV</sub> calculada para 2009 em <sup>(b)</sup>.

<sup>d</sup> Calculado a partir de consumo em km/L de Brasil (2011a), descrito no Quadro 8, e da densidade do etanol utilizada, com base em Petrobras (2012), descrita no Quadro 13.

<sup>e</sup> Valores descritos no Quadro 13.

<sup>f</sup> Embora haja emissões de CO<sub>2</sub> em função da queima do etanol, como descrito em Brasil (2011a), estas não foram adicionadas à base de dados, já que o sequestro de carbono pela cana-de-açúcar não é considerado na base de dados doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) (i.e. considera-se que todo o carbono emitido pela queima, no escapamento do veículo, foi sequestrado na fase agrícola, havendo uma emissão líquida igual a zero nesse sentido).

Para as equações (30), (31), (32) e (33): Emissão<sub>x</sub> é a emissão (por km) do veículo após ter percorrido uma distância  $x$ ; Emissão<sub>novo</sub> é a emissão do veículo novo;  $x$  = distância percorrida em km; Emissão<sub>total; CV</sub> é a emissão total ao longo do ciclo de vida do veículo;  $y$  = vida útil do veículo; F.D. = fator de deterioração; Emissão<sub>média; CV</sub> é a emissão média observada ao longo do ciclo de vida do veículo; Emissão<sub>média; CV; a</sub> é a emissão média observada ao longo do ciclo de vida do veículo para o ano  $a$ ; Consumo<sub>a</sub> é o consumo de combustível do veículo para o ano  $a$ . No Quadro 14 os cálculos têm como base parâmetros referentes a veículos utilizando etanol, enquanto que no Quadro 15 estes se referem a veículos utilizando gasolina tipo C.

$$\text{Emiss\~{a}o}_x = \text{Emiss\~{a}o}_{\text{novo}} + \text{F.D.} \times \frac{x}{80.000} \quad (30)$$

$$\text{Emiss\~{a}o}_{\text{total;CV}} = \int_0^y \left( \text{Emiss\~{a}o}_{\text{novo}} + \text{F.D.} \times \frac{x}{80.000} \right) \times dx \quad (31)$$

$$\text{Emiss\~{a}o}_{\text{m\~{e}dia;CV}} = \frac{\text{Emiss\~{a}o}_{\text{total;CV}}}{y} \quad (32)$$

$$\text{Emiss\~{a}o}_{\text{m\~{e}dia;CV;a}} = \text{Emiss\~{a}o}_{\text{m\~{e}dia;CV}} \times \frac{\text{Consumo}_a}{\text{Consumo}_{2009}} \quad (33)$$

Ano	Consumo [kg/km]	Vida útil [10 <sup>3</sup> km]	CO	NO <sub>x</sub>	RCHO	NMHC	CH <sub>4</sub>	MP	CO <sub>2</sub> <sup>f</sup>
2009: novo			0,33	0,03	0,0024	0,032	0,011	0,0011	142
F.D. [g/80.000 km] <sup>a</sup>			0,263	0,03	0,00065	0,023			
2009 <sup>b</sup>	0,0624 <sup>d</sup>		Emiss\~{o}es m\~{e}dias durante a vida \~{u}til do ve\~{i}culo, em g/km						
		150	0,577	0,0581	0,00301	0,0536	0,0110	0,00110	142
		200	0,659	0,0675	0,00321	0,0608	0,0110	0,00110	142
		250	0,741	0,0769	0,00342	0,0679	0,0110	0,00110	142
2022 <sup>c</sup>	0,0570 <sup>e</sup>								
		150	0,526	0,0531	0,00275	0,0489	0,0100	0,00100	129
		200	0,601	0,0616	0,00293	0,0554	0,0100	0,00100	129
		250	0,676	0,0702	0,00312	0,0620	0,0100	0,00100	129
2030a <sup>c</sup>	0,0539 <sup>e</sup>								
		150	0,497	0,0502	0,00260	0,0462	0,00949	0,000949	122
		200	0,568	0,0582	0,00277	0,0524	0,00949	0,000949	122
		250	0,639	0,0663	0,00295	0,0586	0,00949	0,000949	122
2030b <sup>c</sup>	0,0326 <sup>e</sup>								
		150	0,301	0,0303	0,00157	0,0279	0,00574	0,000574	74,0
		200	0,344	0,0352	0,00168	0,0317	0,00574	0,000574	74,0
		250	0,387	0,0401	0,00178	0,0354	0,00574	0,000574	74,0

**Quadro 15 – Emiss\~{o}es durante a fase de uso para os VCI's *flex fuel* utilizando gasolina tipo C. Note-se que essas emiss\~{o}es s\~{a}o as emiss\~{o}es no escapamento do ve\~{i}culo durante o uso.**

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2011a, pp. 33-36), com exce\~{c}\~{a}o de emiss\~{o}es de CO<sub>2</sub> (ver <sup>(f)</sup>). F.D. s\~{a}o os fatores de deteriora\~{c}\~{a}o de emiss\~{o}es por ac\~{u}mulo de rodagem. Assumiu-se que os F.D. s\~{a}o lineares, conforme utilizado por Brasil (2011a, p. 36).

<sup>b</sup> Emiss\~{o}es calculadas com a equa\~{c}\~{a}o (32) para y = 150.000 km, 200.000 km e 250.000 km; aplicando valores de 2009 para as equa\~{c}\~{o}es (30) e (31).

<sup>c</sup> Emiss\~{o}es calculadas com a equa\~{c}\~{a}o (33) para a = 2022, 2030a e 2030b; y = 150.000 km, 200.000 km e 250.000 km; a partir de Emiss\~{a}o<sub>m\~{e}dia;CV</sub> calculada para 2009 em <sup>(b)</sup>.

<sup>d</sup> Calculado a partir de consumo em km/L de Brasil (2011a), descrito no Quadro 8, e da densidade da gasolina tipo C utilizada, com base em Petrobras (2012), descrita no Quadro 13.

<sup>e</sup> Valores descritos no Quadro 13.

<sup>f</sup> Para as emiss\~{o}es CO<sub>2</sub>, Brasil (2011a, p. 35) fornece apenas emiss\~{o}es para gasolina tipo A, de 2,269 kg/L, de forma que as emiss\~{o}es para gasolina tipo C, em kg/L foram estimadas como sendo de 75% das emiss\~{o}es para gasolina tipo A. O c\~{a}lculo das emiss\~{o}es foi realizado por meio das equa\~{c}\~{o}es (34) e (35), onde o Consumo<sub>[kg/km]</sub> \~{e} o consumo de gasolina tipo C para os anos de 2009; 2022; 2030a e 2030b.

$$\text{Emissão}_{\text{CO}_2;\text{gas.C}[\text{kg/L}]} = 0,75 \times \text{Emissão}_{\text{CO}_2;\text{gas.A}[\text{kg/L}]} \quad (34)$$

$$\text{Emissão}_{\text{CO}_2;\text{gas.C}[\text{g/km}]} = \text{Emissão}_{\text{CO}_2;\text{gas.C}[\text{kg/L}]} \times \text{Consumo}_{[\text{kg/km}]} \times 10^3 \quad (35)$$

Com relação à produção da cana-de-açúcar no Brasil, os processos disponíveis no ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a: “Sugarcane {BR}| production | Alloc, Def U” e “Sugarcane {BR}| production, on land recently transformed | Alloc Def U”) reflete uma situação em que apenas 20% da colheita era realizada mecanicamente, sendo os 80% realizados manualmente (JUNGBLUTH et al., 2007). Além disso, as fontes de dados utilizadas por esses autores no processo do ecoinvent são, em vários casos, das décadas de 90 e 80. Desta forma, como o presente estudo trata de uma substituição futura da frota, optou-se por utilizar dados mais recentes. Neste caso, a fonte utilizada para o inventário de produção da cana foi Cavalett et al. (2013), que considera colheita mecanizada e transformação do uso da terra, esta última que ocorreria se a área plantada de etanol aumentasse. Este inventário foi utilizado como base e adaptado, em conjunto com dados do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a: processo “Sugarcane {BR}| production, on land recently transformed | Alloc Def U”). Entre as adaptações do inventário de Cavalett et al. (2013) incluem-se a utilização de processos do ecoinvent para preparação da terra, ao invés de apenas consumo de diesel e quantidade de maquinário e a não consideração das emissões de CO<sub>2</sub> do calcário, que não são incluídas no processo considerado do ecoinvent. O inventário também foi adaptado para refletir um horizonte de tempo de 20 anos para a depreciação da transformação inicial do uso da terra, em conformidade com a suposição utilizada pelo ecoinvent para culturas permanentes (Frischknecht et al., 2007, p. 31) (obs. : este dado é referente à versão 2 do ecoinvent, contudo, não é feita nenhuma menção de alteração na versão 3 em Weidema et al. (2013)), assim como ganhos de produtividade previstos nos horizontes de tempo estudados. Com base neste horizonte de tempo de 20 anos para a depreciação, os impactos da transformação inicial foram divididos pela produção de 20 anos. Os ganhos de produtividade, no entanto, foram considerados apenas com relação ao uso e transformação da terra, já que está sendo analisado o resultado de inventário de ocupação da terra, que seria influenciado diretamente.

Não foi considerado, no entanto, o impacto que o ganho de produtividade teria na utilização de insumos.

Como suposição, considerou-se para 2023-2030 um aumento na produtividade na mesma proporção que o esperado para o período 2012-2022, sendo que para 2030 foi considerado um máximo de área plantada de cana destinada a etanol representado pelo aumento de área no período 2023-2030 na mesma proporção que o esperado para o período 2012-2022. Essas suposições foram feitas já que o PDE 2022 (Brasil, 2013a), só cobre o período decenal, até o ano de 2022. Os valores utilizados estão descritos no Quadro 16, no qual os máximos possíveis considerados correspondem aos valores máximos de área plantada e de produção, de modo que refletiriam a oferta máxima possível de cana-de-açúcar para produção de etanol, com base nessas suposições de área plantada e de ganhos de produtividade.

	2012	2022	2030
Produtividade [t/ha]	69,9 <sup>a</sup>	88,6 <sup>a</sup>	107,1 <sup>b</sup>
Área Plantada (etanol) [Mha]	4,2 <sup>a</sup>	7,0 <sup>a</sup>	-
Área Plantada (etanol: máximo possível considerado) [Mha]	-	-	10,5 <sup>c</sup>
Produção (cana para etanol) [10 <sup>6</sup> t]	294 <sup>a</sup>	620 <sup>a</sup>	-
Produção (cana para etanol: máximo possível considerado) [10 <sup>6</sup> t]	-	-	1128 <sup>d</sup>

**Quadro 16 – Produção de cana para etanol para os anos considerados.**

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 302).

<sup>b</sup> Estimada para 2030, calculado com a equação (36).

<sup>c</sup> Calculado com a equação (37).

<sup>d</sup> Calculado com a equação (38).

$$\text{Produtividade}_{2030} = \left( \sqrt[10]{\frac{\text{Produtividade}_{2022}}{\text{Produtividade}_{2012}}} \right)^8 \times \text{Produtividade}_{2022} \quad (36)$$

$$\text{Área plantada}_{\text{limite},2030} = \left( \sqrt[10]{\frac{\text{Área plantada}_{2022}}{\text{Área plantada}_{2012}}} \right)^8 \times \text{Área plantada}_{2022} \quad (37)$$

$$\text{Produção} = \text{Produtividade} \times \text{Área plantada} \quad (38)$$

Os valores de transformação do uso e ocupação da terra utilizados estão descritos no Quadro 17.

	Cavalett et al. (2013) <sup>b</sup>	2022	2030
Produção [t]	83,1	83,1	83,1
Produtividade [t/ha]	83,1	88,6 <sup>c</sup>	107,1 <sup>c</sup>
<i>Transformation, from pasture and meadow, extensive</i> [ha] <sup>a</sup> (Transformação, de pasto e prado, extensiva)	0,016	0,038 <sup>d</sup>	0,031 <sup>d</sup>
<i>Transformation, from shrub and sclerophyllous</i> [ha] <sup>a</sup> (Transformação, de arbustos e esclerófilas)	0,0002	0,00047 <sup>d</sup>	0,00039 <sup>d</sup>
<i>Transformation, from arable, non-irrigated</i> [ha] <sup>a</sup> (Transformação, de arável, não irrigado)	0,0038	0,0089 <sup>d</sup>	0,0074 <sup>d</sup>
<i>Transformation, to arable, non-irrigated</i> [ha] <sup>a</sup> (Transformação, para arável, não irrigado)	0,02	0,047 <sup>d</sup>	0,039 <sup>d</sup>
<i>Occupation, arable, non-irrigated</i> [ha] <sup>a</sup> (Ocupação, arável, não irrigado)	1	0,94 <sup>e</sup>	0,78 <sup>e</sup>

**Quadro 17 – Valores de ocupação e transformação do uso da terra utilizados para os anos de 2022 e 2030, para produzir 83,1 toneladas de cana.**

<sup>a</sup> Denominação utilizada por Cavalett et al. (2013) e no software SimaPro 8.0.2 (PRÉ-CONSULTANTS, 2014).

<sup>b</sup> Valores utilizados por Cavalett et al. (2013).

<sup>c</sup> Valores do Quadro 16: valor para 2022 e 2030 (calculado) com base em Brasil (2013a, p. 302).

<sup>d</sup> Calculado com a equação (39).

<sup>e</sup> Calculado com a equação (40).

Para as equações (39) e (40) os índices  $c$  e  $x$  representam os valores de Cavalett et al. (2013) e para o ano  $x$ , respectivamente. Na equação (39) o termo (50/20) reflete-se à adequação dos valores de transformação fornecidos por Cavalett et al. (2013), que seriam equivalentes a uma transformação de 100% da área dividida por 50 anos (de forma que haveria atribuição de 2% deste impacto para a produção de cada um dos anos), para o presente estudo, no qual optou-se, conforme discutido, por um horizonte de 20 anos (havendo atribuição de 5% do impacto da transformação da terra para a produção de cada um dos 20 anos).

$$\text{Transformação}_x = \text{Transformação}_c \times \frac{\text{Produtividade}_c}{\text{Produtividade}_x} \times \frac{50}{20} \quad (39)$$

$$\text{Ocupação}_x = \text{Ocupação}_c \times \frac{\text{Produtividade}_c}{\text{Produtividade}_x} \quad (40)$$

Assumiu-se que, em 2030, os VCIs poderiam utilizar tanto gasolina tipo C quanto etanol hidratado, este último atendendo à restrição de produção considerada.



### 3.3.4.2.2 VE

Para os VEs, foi alterada a matriz de eletricidade da base de dados utilizada para carregar as baterias. Considerou-se a matriz de consumo, já que nos dados de capacidade instalada de Brasil (2013a, p. 99) considerados inclui-se importação de Itaipu. Assumiu-se que a eletricidade é fornecida pela rede, de forma que foram utilizados dados referentes ao SIN, e foram excluídos os autoprodutores, com exceção da eletricidade proveniente destes que é comercializada à rede, a maior parte da qual (76%) vem da indústria sucroalcooleira (BRASIL, 2013b, p. 10). Foi assumido, então, que esta eletricidade é produzida a partir de bagaço de cana. Os demais autoprodutores não foram incluídos porque não há informação a respeito das fontes de eletricidade utilizadas. Os valores utilizados para a demanda são referentes ao SIN, desconsiderando também, portanto, os sistemas isolados, que representam apenas 0.4% da demanda esperada para 2022 (BRASIL, 2013a, p. 43).

Para 2022, ao se estabelecer a matriz decisional, foram calculadas as matrizes para 2013 e 2022, para que fosse possível estabelecer a diferença 2022-2013 como sendo a matriz decisional. Em função de o sistema brasileiro ser majoritariamente hidrelétrico (BRASIL, 2013a) e da produção das hidrelétricas variar conforme os regimes hidrológicos (i.e. condições climáticas favoráveis (ou desfavoráveis) às hidrelétricas causam redução (aumento) na operação das termelétricas), optou-se pela utilização de fatores de capacidade médios para as termelétricas, ao invés de utilizar a matriz de capacidade instalada. Estes fatores de capacidade médios refletem a expectativa de geração com relação à potência instalada (BRASIL, 2013a, p. 93). Embora existam dados referentes à matriz de produção observada no ano de 2012 (BRASIL, 2013b), optou-se por calcular a matriz para 2013 também com fatores de capacidade médios, já que refletiriam uma média da geração termelétrica, e não apenas o observado em uma pequena amostra, de um ano. Desta forma, as incertezas associadas à variação na produção das hidrelétricas e termelétricas são reduzidas. Após utilizados os fatores de capacidade para todas as fontes, com exceção das hidrelétricas, assumiu-se que estas seriam responsáveis pelo restante da demanda, refletindo assim uma aproximação do caso médio de geração hidrelétrica, no qual estas estariam sendo

utilizadas na medida em que suprissem o sistema com as outras fontes gerando as respectivas quantidades médias de eletricidade.

As matrizes para 2013 e 2022, assim como a matriz de expansão no período (2022-2013), utilizada como matriz decisional, estão apresentadas no Quadro 18. Os fatores de capacidade utilizados, com exceção de eólicas e do bagaço de cana, são os fatores de capacidade médios fornecidos por Brasil (2013a, p. 93) referentes a uma média de 2.000 cenários hidrológicos simulados por Brasil (2013a) para o período 2013-2022. Para as eólicas o fator de capacidade foi calculado apenas para o último ano, já que não é fornecido por Brasil (2013a) e, em função do rápido crescimento da capacidade instalada (BRASIL, 2010, 2011c; 2012b; 2013a; 2013b), que aumentou de 602 MW no SIN em 2009 (BRASIL, 2010, p. 12; BIG/ANEEL, Boletim Mensal SEE/MME e DPE/EPE/BEN *apud* BRASIL, 2010, p. 12) para uma previsão de 3898 MW em 2013 (BRASIL, 2013a, p. 99), ou mais de seis vezes nos últimos quatro anos. Deste modo, optou-se por não utilizar uma média histórica. Para o bagaço de cana, assumiu-se que o crescimento seria proporcional à capacidade instalada, sendo que, como os dados utilizados como base foram referentes a 2012, a situação é equivalente a estabelecer um fator de capacidade para 2012 e aplicá-lo ao restante do período.

$$\text{Produção}_{2013} = \frac{\text{Capacidade instalada}_{2013}}{\text{Capacidade instalada}_{2012}} \times \text{Produção}_{2012} \quad (41)$$

$$\text{Produção}_{2013} = \frac{\text{Capacidade instalada}_{2022}}{\text{Capacidade instalada}_{2013}} \times \text{Produção}_{2013} \quad (42)$$

$$\text{Fator de capacidade} = \frac{\text{Produção}_{2012}}{(\text{Capacidade instalada}_{2011} + \text{Capacidade instalada}_{2012}) \times 0,5} \quad (43)$$

$$\text{Produção}_{[\text{GWh}]} = \frac{\text{Capacidade instalada}_{[\text{MW}]} \times 8760_{[\text{h}]} \times \text{Fator de capacidade}}{10^3} \quad (44)$$

$$\text{Produção}_{\text{hidro}} = \text{Produção}_{\text{TOTAL}} - \text{Produção}_{\text{outras fontes}} \quad (45)$$

	Capacidade Instalada			Fator de Capacidade <sup>b</sup>	Consumo				
	2013 [MW] <sup>a</sup>	2022 [MW] <sup>a</sup>	2022-2012 [MW]		2013 [GWh] <sup>c</sup>	2022 [GWh] <sup>d</sup>	2022 [%]	2022-2013 [GWh]	2022-2013 [%]
Hidro <sup>f</sup>	88696	119013	31678	-	485605	644198	80,83	173408	72,48
Urânio	2007	3412	1405	0,87	15296	26004	3,26	10708	4,48
Gás Natural	11218	14065	2752	0,30	29481	36963	4,64	7482	3,13
Carvão	3205	3205	360	0,40	11230	11230	1,41	0	0
Óleo Combustível	3512	3563	4520	0,02	615	624	0,08	9	0
Óleo Diesel	1426	971	-347	0,01	125	85	0,01	- <sup>e</sup>	- <sup>e</sup>
Gás de Processo	687	687	0	0,82	4935	4935	0,62	0	0
PCH <sup>g</sup>	5330	6905	2089	-	-	-	-	-	-
Biomassa	9473	13769	4546	-	13347	19399	2,43	6053	2,53
Eólica	3898	17463	13582	0,35 <sup>h</sup>	11951	53542	6,72	41590	17,38
<b>TOTAL</b>	<b>121823</b>	<b>182408</b>	<b>60585</b>		<b>557770<sup>i</sup></b>	<b>796980<sup>i</sup></b>	<b>100,00</b>	<b>239249</b>	<b>100,00</b>

**Quadro 18 – Capacidade instalada e produção de eletricidade no Brasil.**

<sup>a</sup> Fonte: Brasil (2013a, p. 99);

<sup>b</sup> Fatores de capacidade médios esperados com base em 2.000 cenários hidrológicos, de Brasil (2013a, p. 93), com exceção de eólica, que foi calculado com a equação (43), onde as capacidades instaladas de 2011 e 2012 representam os valores para 31/12/2011 (1.425 MW) e 31/12/2012 (1.886 MW), e foram obtidas de Brasil (2012b, p. 11) e Brasil (2013b, p. 11), respectivamente; e a produção para o ano de 2012 (5.050 GWh) foi obtida de Brasil (2013b, p. 8).

<sup>c</sup> Calculado com a equação (44), com a exceção de biomassa e hidro. Biomassa considera apenas a parte da eletricidade proveniente de autoprodutores da indústria sucroalcooleira que é vendida para a rede, de Brasil (2013a, p. 10). Biomassa foi calculada com a equação (41), sendo que os valores para 2012 de produção e capacidade instalada utilizados foram de 12.142 GWh (BRASIL, 2013b, p. 10) e 8.618 MW (BRASIL, 2013a, p. 99), respectivamente. Para hidro, assumiu-se que esta fonte seria responsável pelo restante da demanda, de forma que foi calculada com a equação (45), onde a Produção<sub>TOTAL</sub> representa a produção total (demanda + perdas; ver <sup>(i)</sup>) e Produção<sub>Outras fontes</sub> representa o total de produção de todas as outras fontes combinadas, ambos os dados para 2013.

<sup>d</sup> Calculado com a equação (44), com a exceção de biomassa, que foi calculada com a equação

(42), e de hidro, que assumiu-se como sendo a fonte responsável pelo restante da demanda, de forma que foi calculada com a equação (45), onde a Produção<sub>TOTAL</sub> representa a produção total (demanda + perdas; ver <sup>(i)</sup>) e Produção<sub>Outras fontes</sub> representa o total de produção de todas as outras fontes combinadas, ambos os dados para 2022.

<sup>e</sup> Valor negativo de -40 GWh desconsiderado.

<sup>f</sup> Inclui hidro e importação de Brasil (2013a, p. 99) para capacidade instalada, e também PCHs para produção.

<sup>g</sup> Produção incluída em hidro.

<sup>h</sup> Calculado com a equação (43).

<sup>i</sup> Calculado a partir da demanda total do SIN menos perdas, de Brasil (2013a, pp. 43-44).

Já para 2030, como foi definido que seria utilizada a tecnologia marginal/incremental de geração, foram levantadas as fontes de eletricidade disponíveis. No presente estudo, como o aumento de consumo pode ser grande, e não diferencial, esta tecnologia seria melhor denominada de tecnologia incremental, e não marginal. Sendo assim, foram analisadas como opções hidrelétricas, eólicas e

térmicas a partir de bagaço de cana, gás natural (ciclo combinado), carvão e óleo combustível. As eólicas não foram consideradas, já que o potencial disponível de 30 GW (PORTO, 2005<sup>6</sup> *apud* BRASIL, 2007c, p. 66) poderia estar esgotado em 2030, em função do grande aumento de capacidade instalada desta fonte que está sendo previsto por Brasil (2013a, p. 99).

Para o bagaço de cana, considerou-se a disponibilidade, em função do consumo de etanol (hidratado ou anidro) por parte da frota. Assumiu-se um fator de exportação de 73,7 kWh/ton cana (BRASIL, 2013a, p. 322). Embora também seja possível produzir eletricidade a partir de bagaço proveniente da cana destinada à produção de açúcar, a área plantada de açúcar não deve aumentar no período decenal, até 2022 (BRASIL, 2013a, p. 302). Deste modo, assumiu-se que a geração de bagaço proveniente da cana destinada à produção de açúcar teria outros fins, utilizando-se apenas a geração a partir de bagaço proveniente da produção de etanol.

Para as outras fontes consideradas, assumiu-se que não haveria restrição, em função das grandes reservas disponíveis (BRASIL, 2013d).

Em função da sazonalidade e da complementaridade de hidrelétricas e bagaço de cana (ONS, 2013, p. 35), assumiu-se que poderia ser utilizado 50% de hidrelétrica e 50% de bagaço, sendo possível substituir quaisquer destas por fonte fóssil, para o nível (i) da Figura 8. Para o nível (ii) considerou-se que a geração termelétrica seria progressiva e chegaria até a 25% da parcela anteriormente gerada por hidrelétricas (no nível I), ou 12.5% do total. O valor de 25% é uma suposição deste estudo, já que a atual geração que seria observada dependeria de uma série de fatores, incluindo, por exemplo, mas não se limitando a, a quantidade de usuários que, mesmo com incentivos, não carregariam as baterias no período de menor carga.

---

<sup>6</sup> PORTO, L. Energias Renováveis no Brasil: Perspectivas para o Setor: Apresentação em slides. Rio de Janeiro: MME, 2005.

### 3.3.4.3 Cenário de destino final

Os processos da base doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) adaptados já consideram o destino final do veículo. Como este não se mostrou significativo na ACV rápida, nenhuma suposição adicional neste sentido, ou adaptação adicional, foi realizada.

### 3.3.4.4 Incertezas e análise de sensibilidade

Várias suposições foram consideradas durante o desenvolvimento do presente estudo. A fim de se identificar o efeito destas nos resultados foi feita uma série de análises de sensibilidade. Os parâmetros e valores utilizados estão descritos no Quadro 19.

Simulação <sup>a</sup>	Número da simulação
VE: 2022	0 <sup>b</sup>
Eletricidade: Atribucional 2013	1
Eletricidade: Atribucional 2022	2
Eletricidade: Marginal	3
Eletricidade: Eólica (NE)	4
Eletricidade: Hidro	5
Hidro com área de reservatório reduzida	6
Hidro com área reduzida + emissões de GEEs a jusante da barragem	7
Hidro fio d'água com dados para região "resto do mundo"	8
Vida útil: 200.000 km	9
Vida útil: 250.000 km	10
Autonomia: 240 km	11
Autonomia: 360 km	12
Bateria de lítio	13
VE: 2030	14 <sup>c</sup>
Vida útil: 200.000 km	15
Vida útil: 250.000 km	16
Autonomia: 240 km	17
Autonomia: 360 km	18
Bateria de Na-NiCl <sub>2</sub>	19
Eletricidade: Hidro	20
Hidro com área de reservatório reduzida	21
Hidro com área reduzida + emissões de GEEs a jusante da barragem	22
Hidro fio d'água com dados para região "resto do mundo"	23
Eletricidade: Bagaço de cana	24
Produção da cana com <i>dataset</i> original doecoinvent	25

<b>Simulação<sup>a</sup></b>	<b>Número da simulação</b>
VE: 2030: Consequencial	-
Eletricidade: Hidro	26
Eletricidade: Gás Natural (ciclo combinado)	27
Eletricidade: BR (ecoinvent)	28
VCI: 2022	-
Proporção média de gasolina C e etanol	29
Adicional de 10% de etanol	30
Adicional de 10% de gasolina tipo C	31
Vida útil: 200.000 km	32
Vida útil: 250.000 km	33
Produção da cana ecoinvent: 80% colheita manual	34
Etanol hidratado	35
Vida útil: 200.000 km	36
Vida útil: 250.000 km	37
Produção da cana ecoinvent: 80% colheita manual	38
Gasolina tipo C	39
Vida útil: 200.000 km	40
Vida útil: 250.000 km	41
Produção da cana ecoinvent: 80% colheita manual	42
VCI: 2030	-
Etanol hidratado	43
Vida útil: 200.000 km	44
Vida útil: 250.000 km	45
Produção da cana ecoinvent: 80% colheita manual	46
Gasolina tipo C	47
Vida útil: 200.000 km	48
Vida útil: 250.000 km	49
Produção da cana ecoinvent: 80% colheita manual	50
VCI: 2030a	-
Etanol hidratado	51
Gasolina tipo C	52

**Quadro 19 – Análises de sensibilidade realizadas.**

<sup>a</sup> Suposições padrão, utilizadas quando não especificadas.

Para o VCI:

Vida útil: 150.000 km; e

Produção da cana com colheita 100% mecanizada adaptada com base em Cavalett et al. (2013).

Para o VE:

Matriz de eletricidade: decisional (2022), 50% hidro + 50% bagaço de cana (2030)

Vida útil: 150.000 km;

Autonomia: 120 km;

Tipo de bateria: Na-NiCl<sub>2</sub> (2022), Li-ion (2030); e

Geração hidrelétrica: dados do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), processo “Electricity, high voltage {BR} | electricity production hydro, reservoir, tropical region | Alloc Def, U”.

Produção da cana com colheita 100% mecanizada adaptada com base em Cavalett et al. (2013).

<sup>b</sup> Caso base para 2022 (suposição padrão)

<sup>c</sup> Caso base para 2030 (suposição padrão)

#### 3.3.4.4.1 VCI

As análises de sensibilidade realizadas para o VCI foram associadas à produção de etanol, à proporção média de gasolina tipo C e etanol utilizada e à vida útil do veículo. No primeiro caso, os impactos foram calculados utilizando o processo original doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) para a produção de etanol no Brasil. O ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) tem dois conjuntos de dados para a produção de etanol no Brasil, sendo que em um deles há coprodução de açúcar e no outro não. Em todas as simulações do presente estudo utilizou-se o segundo (sem coprodução de açúcar), já que a área plantada de açúcar deve permanecer constante no período decenal (BRASIL, 2013a, p. 302) . Com relação à proporção média de gasolina tipo C e etanol utilizada pela frota brasileira foram simulados dois outros casos além do apresentado no Quadro 12, com variação de 10 pontos percentuais para mais e para menos na proporção de gasolina tipo C: 82,4% gasolina C e 16,6% etanol e 62,4% gasolina C e 36,6% etanol. Por fim, foram simulados dois casos adicionais para a vida útil dos automóveis, equivalentes a 200.000 km e 250.000 km.

#### 3.3.4.4.2 VE

Para o VE, análises de sensibilidade foram realizadas com relação à bateria, à matriz/fonte de eletricidade utilizada e à vida útil do veículo. Para a vida útil do veículo foram simulados os mesmos casos adicionais considerados para os VCIs: vida útil de 200.000 km e de 250.000 km.

##### 3.3.4.4.2.1 Bateria

Para a bateria, foram alterados o tipo de bateria e a autonomia. Quanto ao tipo, o caso base utilizou baterias de Na-NiCl<sub>2</sub> para 2022 e de lítio para 2030, de

forma que os tipos foram alterados em análise de sensibilidade (i.e. lítio em 2022 e Na-NiCl<sub>2</sub> em 2030).

Com relação à autonomia, a unidade funcional de transportar uma pessoa por um km (1 pkm) não leva em consideração qualquer aspecto associado a esta, de forma que os VEs podem atender a esta unidade funcional independentemente da autonomia que possuem. Os VCIs, por outro lado, possuem autonomia muito superior aos 120 km utilizados para o VE, de modo que a substituição de um por outro reduziria drasticamente a autonomia do veículo e necessitaria de uma adaptação do usuário. No intuito de diminuir esta diferença de autonomia foram simulados VEs com autonomia de duas e três vezes o valor padrão utilizado, ou seja, de 240 km e 360 km, respectivamente. Assumiu-se que a massa da bateria seria proporcional à autonomia, de forma que para uma autonomia três vezes maior seria necessária uma bateria três vezes maior, o que resultaria em uma bateria de massa de 495 kg (com base no valor padrão de 165 kg utilizado para uma autonomia de 120 km (ITAIPU BINACIONAL, 2010) - ver Quadro 6).

Uma bateria de maior massa aumenta a massa do VE, o que gera um aumento no consumo de combustível. Foi utilizada novamente a equação (12), de Bandivadekar et al. (2008, p. 46), assumindo que o VE teria o mesmo desempenho dos VCIs estudados pelos autores. Nota-se também que, como a vida útil tem como base o número de ciclos, uma bateria de maior autonomia não necessita de troca. O Quadro 20 descreve o consumo adicional decorrente do aumento da autonomia e do respectivo aumento na massa da bateria, havendo também redução do consumo em função de uma massa menor em um dos casos para 2030. Mesmo que a bateria possua vida útil superior à do veículo, assumiu-se que esta não seria reutilizada após a vida útil do veículo, com exceção dos últimos dois casos do Quadro 20 (autonomias de 240 e 360 km), já que para uma vida útil da bateria superior a duas (ou três) vezes a vida útil do veículo assumiu-se que esta poderia ser utilizada em dois (ou três) veículos.



Ano	Bateria	Autonomia [km]	m bat. [kg] <sup>b</sup>	m VE [kg] <sup>d</sup>	Cons. [kWh/km] <sup>f</sup>	Variação [%] <sup>h</sup>	V.U. bateria [km] <sup>i</sup>
2022	Na-NiCl <sub>2</sub>	120 <sup>a</sup>	165 <sup>a</sup>	1380 <sup>e</sup>	0,174 <sup>g</sup>	-	96.000
2022	Na-NiCl <sub>2</sub>	240	330	1545	0,187	+7,8%	192.000
2022	Na-NiCl <sub>2</sub>	360	495	1710	0,201	+15,5%	288.000
2030	Li-ion	120	96 <sup>c</sup>	1311	0,168	-3,2%	192.000
2030	Li-ion	240	192	1407	0,176	+1,3%	384.000
2030	Li-ion	360	288	1503	0,184	+5,8%	576.000

**Quadro 20 – Consumo adicional em função da autonomia.**

<sup>a</sup> Fonte: Itaipu Binacional (2010) – ver Quadro 6.

<sup>b</sup> m bat. é a massa da bateria.

<sup>c</sup> Calculada com a equação (11), com base na densidade de energia fornecida por Gerssen-Gondelach e Faaij (2012).

<sup>d</sup> m VE é a massa do veículo com bateria. Com base na massa padrão de 1380 kg para uma bateria de 165 kg (FIAT, 2012), resultando em uma massa de 1215 kg sem bateria, o restante dos valores calculados como 1215 + m bateria.

<sup>e</sup> Fonte: FIAT (2012).

<sup>f</sup> Cons. [kWh/km] é o consumo do VE. Calculado com a equação (46), com exceção de <sup>(g)</sup>, onde  $FC_x$  é calculado com a equação (12) para uma m VE<sub>x</sub>;  $FC_{2022; 120 \text{ km}}$  é calculado para o veículo padrão em 2022 (autonomia 120 km e m VE = 1380 kg); e  $Consumo_{2022; 120 \text{ km}}$  é o consumo padrão para 2022 (autonomia 120 km e m VE = 1380 kg) – ver Quadro 7.

<sup>g</sup> Calculado com a equação (10) com base nos dados de Itaipu Binacional (2010) – ver Quadro 6 e Quadro 7.

<sup>h</sup> Em relação ao consumo base de <sup>(g)</sup> para 2022 e 120 km de autonomia.

<sup>i</sup> V.U. bateria é a vida útil da bateria. Calculada com a equação (47), sendo que  $n_{\text{ciclos}}$  é o número de ciclos, de 1.000 para 2022, utilizado por Kalhammer et al. (2007) e de 2.000 para 2030, com base nas projeções futuras (para 2025) de Gerssen-Gondelach e Faaij (2012) para baterias de Li-ion.

$$\text{Consumo}_x = \frac{FC_x}{FC_{2022; 120 \text{ km}}} \times \text{Consumo}_{2022; 120 \text{ km}} \quad (46)$$

$$\text{Vida útil}_{\text{bat.}} = \text{Autonomia} \times n_{\text{ciclos}} \times 80\% \quad (47)$$

#### 3.3.4.2.4.2 Eletricidade

Para a eletricidade, dois aspectos foram considerados: emissões de GEEs de reservatórios para hidrelétricas e diferentes matrizes/fontes de eletricidade.

A matriz decisional utilizada para o Brasil é composta majoritariamente de energia hidrelétrica, de forma que uma mudança nos impactos das hidrelétricas pode alterar os resultados. Dados para hidrelétricas no Brasil estão disponíveis no ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), mas estes dados refletem usinas existentes de Dos Santos et al. (2006) (BAUER et al., 2007).

Novas usinas serão construídas de maneira diferente, como na nova capacidade planejada no PDE 2022, que será construída majoritariamente na região

Norte (BRASIL, 2013a). Esta seria a capacidade considerada na matriz decisional, ao contrário da capacidade existente considerada no conjunto de dados do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), que está espalhada por diferentes regiões, de Dos Santos et al. (2006) (BAUER et al., 2007). Isto pode levar a maiores impactos ambientais, já que barragens na região amazônica apresentam emissões de GEEs superiores, como mostrado por Barros et al. (2011).

Outro fator de incerteza é a idade das barragens. As emissões atuais em reservatórios existentes, utilizadas no ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), de Dos Santos et al. (2006), são medições em um momento específico e não refletem a média das emissões ao longo do ciclo de vida dos reservatórios, que variam de acordo com o tempo (BARROS et al., 2011).

Além disso, a nova capacidade hidrelétrica planejada é composta majoritariamente de usinas a fio d'água e, incluindo importações e PCHs, haverá um aumento de capacidade instalada de 33,9% enquanto que a capacidade de armazenamento dos reservatórios do sistema aumentará apenas 2,4% (BRASIL, 2013a). Isso resulta em um incremento da capacidade instalada cerca de 14 vezes maior que o incremento da capacidade de armazenamento do sistema, de modo que sugere que, assumindo que a capacidade de armazenamento é proporcional ao volume dos reservatórios, o volume médio dos reservatórios das novas hidrelétricas planejadas será aproximadamente 14 vezes menor que o das usinas existentes.

Por fim, existe uma discussão na literatura a respeito de emissões de GEEs a jusante da barragem, que não são consideradas no trabalho utilizado como referência pelo ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), de Dos Santos et al. (2006). Um estudo para a usina de Balbina estima que mais da metade das emissões de CH<sub>4</sub> ocorrem a jusante da barragem, mesmo para um reservatório extremamente grande (KEMENES; FORSBURG; MELACK, 2011). Já um estudo para Tucuruí mostrou que de 88 a 93% das emissões de metano ocorrem à jusante da barragem (FEARNSIDE, 2002). Esta é outra fonte de incertezas. Kemenes, Forsberg e Melack (2007) assumem, no caso do metano, que as emissões a jusante da barragem são proporcionais à descarga da turbina ou à capacidade de geração, enquanto que de acordo com Fearnside e Pueyo (2012) estas são também proporcionais ao fluxo de água.

Foram então realizadas análises de sensibilidade para os dois casos. Para o primeiro caso, assumiu-se que 14 vezes menos capacidade de armazenamento

seria equivalente a uma área 14 vezes menor, e, portanto, 14 vezes menos emissões de GEEs nos reservatórios. Também foi simulada a utilização de dados para usinas a fio d'água em para região "resto do mundo", já que não existe um processo para usinas a fio d'água no Brasil no ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a). A utilização deste conjunto de dados, contudo, não reflete totalmente a situação do Brasil, onde há reservatórios, mesmo que pequenos, assumindo a média da capacidade instalada prevista no PDE 2022 (BRASIL, 2013a), além de não levar em conta maiores emissões observadas na região amazônica (BARROS et al., 2011). Nota-se, porém, que no caso de haver, no futuro, diminuição adicional na área dos reservatórios, as emissões poderiam se assemelhar a este caso. Para o segundo caso, as emissões utilizadas no processo do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) foram adaptadas adicionando as emissões à jusante de Balbina, de Kemenes, Forsberg e Melack (2011). Assumiu-se que as mesmas emissões a jusante observadas em Balbina, convertidas em um valor por kWh, seriam observadas em outras barragens, já que considera-se que estas emissões são proporcionais à vazão d'água (KEMENES; FORSBERG; MELACK, 2007). Embora este trabalho só discuta emissões de metano, a mesma suposição foi feita para emissões a jusante da barragem de CO<sub>2</sub>. As emissões totais à jusante da barragem estimadas por Kemenes, Forsberg e Melack (2011) para Balbina são de 39 Gg C em metano e de 81 Gg C em CO<sub>2</sub> por ano, o que pode ser convertido em 50,8 g/kWh para metano e 290,0 g/kWh para CO<sub>2</sub>, considerando a geração média esperada para Balbina para 2013, de 116,9 MW, de ELETROBRAS (2012, p. 8). Estes valores em g/kWh foram calculados com as equações (49) e (50), respectivamente, nas quais m.a. são as massas atômicas. Na equação (48) a geração média é referente à usina de Balbina e foi utilizado o valor de 116,9 MW, de ELETROBRAS (2012, p. 8).

Balbina, no entanto, é um caso extremo, possuindo uma área alagada que varia entre 1.350 km<sup>2</sup> e 2.320 km<sup>2</sup> (valores para 2005 de Kemenes, Forsberg e Melack (2011)). Como comparação, esta área é similar à área de Itaipu (normal: 1.350 km<sup>2</sup>, máximo 1.561 km<sup>2</sup>, mínimo (excepcional): 459 km<sup>2</sup>), que possui uma capacidade instalada de 14.000 MW e produziu 98.630.035 MWh de eletricidade em 2013 (ITAIPU BINACIONAL, 2014a; 2014b).

$$\text{Geração}_{[\text{kWh/ano}]} = \text{Geração média}_{[\text{MW}]} \times 8.760_{[\text{h/ano}]} \times 10^3 \quad (48)$$

$$\text{Emissão}_{\text{CH}_4; \text{jus.}; [\text{g/kWh}]} = \frac{\text{Emissão}_{\text{C}; [\text{Gg/ano}]} \times \frac{\text{m.a.}_{\text{CH}_4}}{\text{m.a.}_{\text{C}}}}{\text{Geração}_{[\text{kWh/ano}]}]} \times 10^9 \quad (49)$$

$$\text{Emissão}_{\text{CO}_2; \text{jus.}; [\text{g/kWh}]} = \frac{\text{Emissão}_{\text{C}; [\text{Gg/ano}]} \times \frac{\text{m.a.}_{\text{CO}_2}}{\text{m.a.}_{\text{C}}}}{\text{Geração}_{[\text{kWh/ano}]}]} \times 10^9 \quad (50)$$

Para o segundo aspecto analisado, um estudo propôs o uso de VEHPs como estratégia para utilizar energia eólica excedente na região Nordeste no período noturno, que, caso contrário, seria desperdiçada (BORBA; SZKLO; SCHAEFFER, 2012). A energia excedente identificada pelos autores, com o uso do modelo MESSAGE, foi de 805 GWh para 2020 para a região Norte/Nordeste. Isto seria suficiente para suprir aproximadamente 218 mil VEs, ou cerca de 0,4% da frota, considerando os parâmetros do presente estudo. Embora a eletricidade excedente identificada pelos autores seja sazonal, acontecendo durante o verão e o inverno, assume-se que haveria VEs suficientes para utilizá-la completamente, usando outras fontes de eletricidade durante o restante do ano. Assumiu-se que esse excedente aconteceria apenas na região Nordeste, que possui 53% do potencial eólico no Brasil (DO AMARANTE et al., 2001). Foram utilizadas perdas de 17,6% para esta região (BRASIL, 2013a, p. 44).

Assumiu-se que os impactos decorrentes da utilização de 1 kWh de eletricidade eólica são os mesmos independentemente do período ou estação. Não obstante, os impactos poderiam ser alocados, considerando menor impacto por utilizar eletricidade eólica à noite e maior impacto por utilizá-la em horários de pico, reduzindo os impactos destes VEs (em uma perspectiva consequential, se a eletricidade seria desperdiçada caso contrário, não haveriam impactos decorrentes da produção desta energia “alocados” ao VE).

Além de eletricidade eólica, simulou-se a utilização de eletricidade marginal para 2022 e, também, a utilização de matriz atribucional.

O procedimento proposto por Weidema, Frees e Nielsen (1999) e posteriormente adaptado por Ekvall e Weidema (2004) foi utilizado para identificar a tecnologia afetada. De acordo com os autores, este foi desenvolvido para identificar

mudanças marginais, mas ainda é relevante se a substituição do produto é grande, embora possa afetar o mercado, restrições e custos de produção. Aplicando o procedimento a este caso (fonte de geração de eletricidade no Brasil), assumindo nenhum planejamento antecipado para a demanda adicional dos VEs, a tecnologia afetada não pode ser hidrelétrica, porque é restrita. Mesmo que ainda exista potencial hidrelétrico inexplorado significativo no Brasil (BRASIL, 2007b), na expansão prevista por Brasil (2013a) os projetos já estão em parte contratados ou em processo de construção, e mesmo o restante dos projetos, previstos para a segunda parte do período decenal (2018-2022) já possuem projetos indicativos com estudos em fase de conclusão (BRASIL, 2013a). Desta forma, haveria uma restrição temporal associada à construção de hidrelétricas. No PDE 2021, Brasil (2012a, p. 94) afirmou que a implementação daquele plano com grande penetração de fontes não renováveis na geração de eletricidade estaria sujeito à obtenção de licenças prévias ambientais, e que caso contrário uma expansão concentrada em termelétricas, principalmente gás natural, poderia ser uma alternativa, em função de eventuais atrasos nos projetos. Em 2007, o PNE 2030 apontava que “[...] os prazos para obtenção das licenças ambientais tornam-se cada vez mais longos” (BRASIL, 2007b, p. 15). Desta forma, considerou-se que esta fonte seria restrita em função desta questão temporal, no caso do horizonte temporal considerado aqui, para o ano de 2022.

Com relação às centrais nucleares, também considerou-se que seriam restritas para o período analisado devido ao longo período necessário para a implantação de novas centrais (BRASIL, 2013a, p. 92).

As fontes restantes que possuem uma capacidade instalada significativa na matriz brasileira são as térmicas, eólica e biomassa. Biomassa de cana-de-açúcar também foi considerada constante, já que a presença desta na matriz é decorrente das exportações de autoprodutores. Entre as outras fontes, gás natural teve o menor preço médio nos leilões de energia, no Brasil, se comparado a óleo diesel e carvão (BRASIL, 2013c). Embora os custos possam mudar se uma grande quantidade de eletricidade for necessária, assumiu-se que os leilões já representam uma parte significativa da capacidade instalada. Uma simplificação, considerando apenas novas usinas, e não o incremento dos fatores de capacidade das usinas existentes, foi aplicada, como sugerida por Ekvall e Weidema (2004). Isto também representa o melhor caso para os impactos de termelétricas, já que considerou-se que usinas

novas seriam de ciclo combinado, enquanto o uso de plantas existentes ociosas resultaria em maiores impactos decorrentes de usinas mais antigas de gás natural, em parte de ciclo simples, ou de óleo combustível, óleo diesel ou carvão.

A tecnologia marginal para geração de eletricidade, com base no procedimento delineado por Weidema, Frees e Nielsen (1999) e depois adaptado por Ekvall e Weidema (2004), seria termoeletricidade de gás natural, de ciclo combinado, para um consumo ocorrendo em horário diferente de horário de pico. Adicionalmente, simulou-se, para 2022, a utilização da matriz atribucional, tanto a atual (2013) quanto a estimada para 2022 (ver Quadro 18).

### 3.4 ACV PARA A FROTA

A partir dos resultados de ACV obtidos por veículo, as diferentes opções de veículos e de atendimento foram elencadas de acordo com o respectivo impacto ambiental. Para o ano de 2030, foi calculada a ACV para a frota multiplicando-se o resultado por veículo pelo total da frota, e foram identificadas opções de atendimento a fim de se reduzirem os impactos ambientais, para as categorias de impacto selecionadas.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados para 2022 e 2030, incluindo análises de sensibilidade e uma discussão acerca dos resultados obtidos.

### 4.1 RESULTADOS PARA 2022

Os resultados de caracterização para 2022 mostrando todas as categorias de impacto do método CML 2000 v.2.05 estão ilustrados na Figura 9 para os VCIs utilizando diferentes combustíveis e para os VEs utilizando as matrizes de eletricidade decisional e atribucional, além da tecnologia marginal de eletricidade (gás natural de ciclo combinado) e de eletricidade proveniente de hidrelétricas. O VE carregado com a matriz decisional apresenta menores impactos que os VCIs utilizando quaisquer dos tipos de combustível (i.e. etanol e/ou gasolina tipo C) para as categorias de impacto de depleção de recursos abióticos, aquecimento global, depleção da camada de ozônio e ecotoxicidade de água doce. Em contrapartida, este VE apresenta maiores impactos que os VCIs utilizando qualquer tipo de combustível para as categorias de acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha, oxidação fotoquímica e ecotoxicidade terrestre. Para eutrofização, o impacto deste VE é menor que o do VCI utilizando etanol, mas superior ao do VCI utilizando gasolina tipo C ou a proporção média etanol/gasolina C da frota para 2022. Se comparado à mistura média de etanol e gasolina C utilizada pela frota para 2022, este VE apresenta uma grande redução (de 53% a 64%) nos impactos para depleção de recursos abióticos, aquecimento global e depleção da camada de ozônio, além de uma pequena redução para ecotoxicidade de água doce (-11%). São observados, contudo, grandes aumentos nos impactos para oxidação fotoquímica (+391%), acidificação (+91%) e ecotoxicidade marinha (+65%). Há aumentos, também, para eutrofização (+24%), toxicidade humana (+21%) e toxicidade terrestre (+16%).

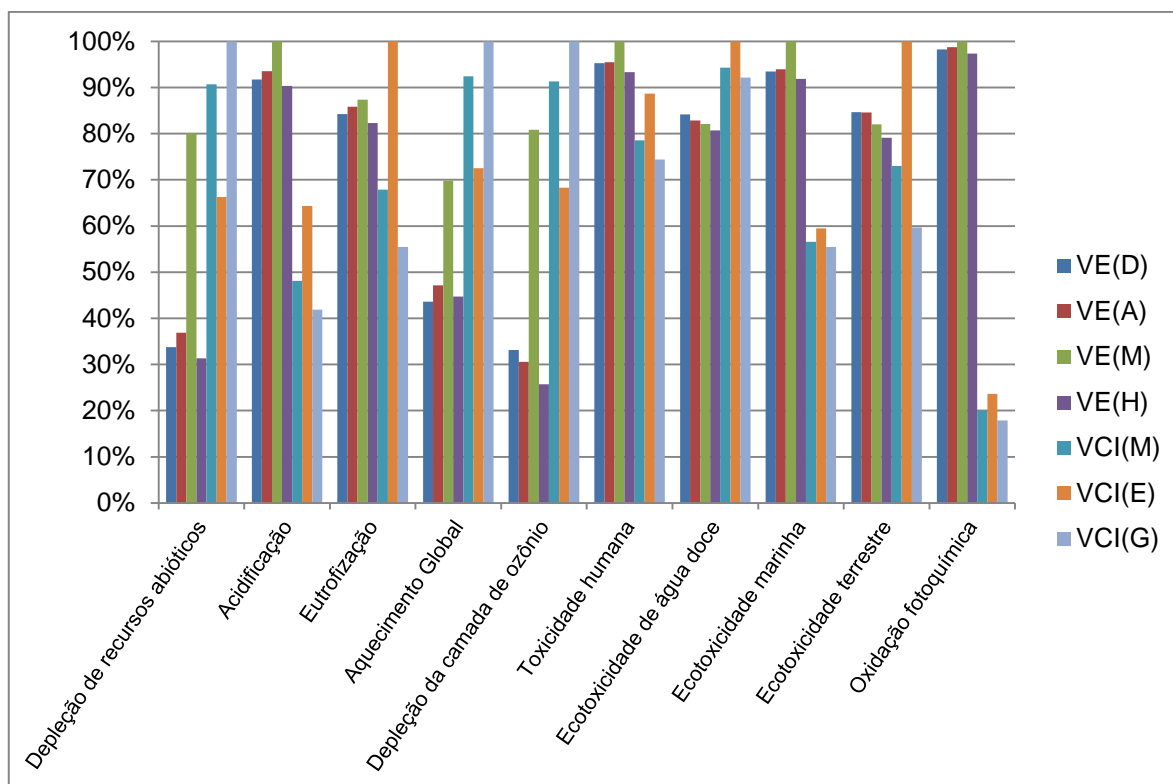
O VE utilizando eletricidade proveniente de hidrelétricas apresenta resultado similar ao VE utilizando a matriz decisional, já que a matriz decisional é composta

majoritariamente de hidrelétricas. A utilização de termelétricidade de gás natural, por outro lado, resulta em grandes diferenças para as categorias de depleção abiótica, aquecimento global e depleção da camada de ozônio, se comparada à utilização da matriz decisional. É observado grande aumento nessas três categorias, variando de +60% a +144%, sendo que para aquecimento global o VE utilizando termelétricidade de gás natural ainda possui menor impacto que qualquer VCI enquanto que para as outras duas categorias os resultados são piores que os do VCI utilizando etanol e melhores que o do VCI utilizando gasolina tipo C ou a mistura média de etanol e gasolina tipo C da frota para 2022.

A situação utilizando a matriz atribucional também foi simulada, embora apenas como comparação, uma que esta matriz não seria adequada ao presente estudo. A utilização dessa apresenta resultado similar à utilização da matriz decisional, já que ambas são compostas majoritariamente de hidrelétricas, embora haja um decréscimo na participação das hidrelétricas na matriz decisional em comparação à matriz atribucional.

Já a comparação entre os VCIs utilizando diferentes tipos de combustível mostra que o VCI a etanol tem menores impactos que o VCI a gasolina C para as categorias de depleção de recursos abióticos, aquecimento global e depleção da camada de ozônio, sendo que o VCI a gasolina C possui maiores impactos nas categorias restantes.





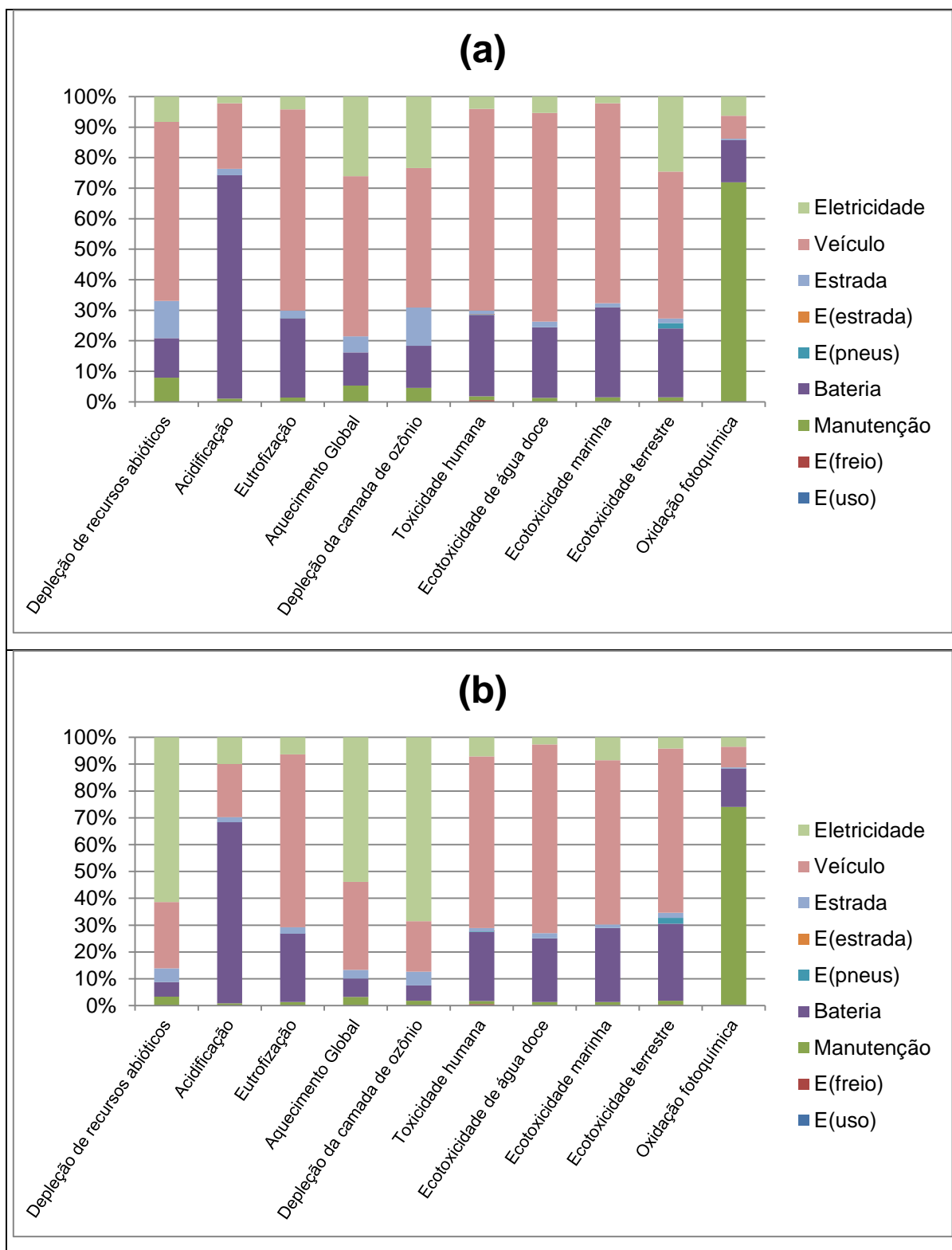
**Figura 9 – Resultados para 2022 (caracterização).**

Legenda: VE(D): VE utilizando a matriz decisional; VE(A): VE utilizando a matriz atribucional; VE(M): VE utilizando a tecnologia marginal de geração de eletricidade (gás natural de ciclo combinado); VE(H): VE utilizando energia hidrelétrica; VCI(M): VCI utilizando a média de etanol hidratado e gasolina tipo C consumida pela frota (ver Quadro 12); VCI(E): VCI utilizando etanol hidratado; VCI(G): VCI utilizando gasolina tipo C.

Foram conduzidas, também, análises para identificar quais processos são os responsáveis pela maior parte do impacto total. Nestas análises nota-se que os processos descritos (e.g. produção do etanol; produção do veículo) correspondem, na verdade, ao ciclo de vida destes processos (incluem, e.g., plantio da cana utilizada para a produção de etanol; energia para a produção do aço utilizado no veículo).

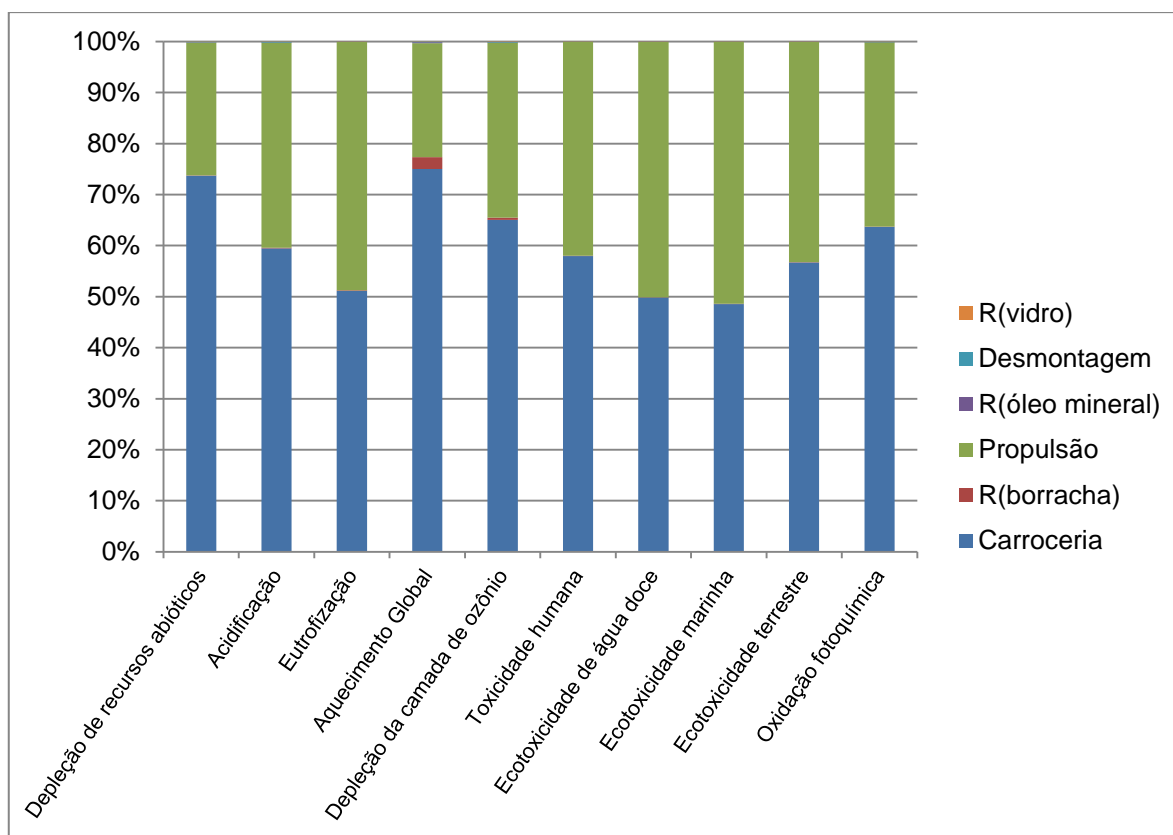
Na Figura 10 (a) e (b) são mostradas as contribuições dos processos no impacto do transporte de 1 pkm por um VE utilizando a matriz decisional e eletricidade de gás natural, respectivamente. Nota-se que a produção do veículo (sem a inclusão da bateria) é a maior responsável na maioria das categorias, em ambos os casos. Na Figura 10 (b), no entanto, é possível verificar que uma eletricidade mais impactante, como é o caso da utilização de gás natural de ciclo combinado, se comparada à utilização da matriz decisional, já torna-se a fonte mais significativa de impactos para as categorias de depleção de recursos abióticos, aquecimento global e depleção da camada de ozônio. No caso da utilização de uma

eletricidade com ainda maiores impactos em alguma destas categorias, a participação no total de impactos seria ainda maior.



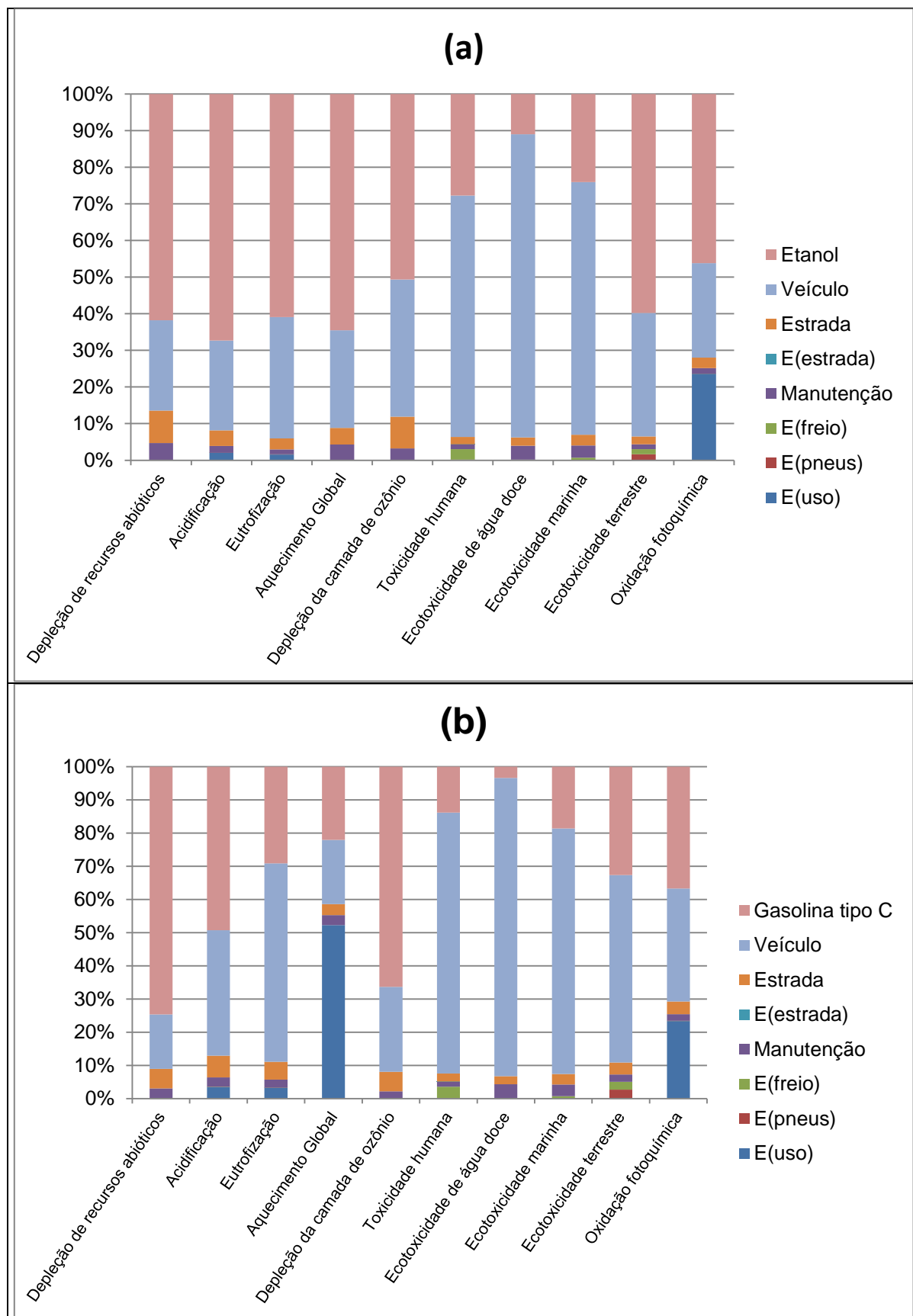
**Figura 10 – Contribuição dos processos no impacto do transporte de 1 pkm por um VE utilizando a matriz decisional (a) e eletricidade de gás natural de ciclo combinado (b). Legenda – E(estrada): emissões de desgaste da estrada; E(pneus): emissões de desgaste dos pneus; E(freio): emissões de desgaste do freio; E(uso): emissões durante a fase de uso.**

Com relação ao veículo, a Figura 11 mostra a contribuição dos processos no impacto total do VE. O ciclo de vida da carroceria (“*glider*”, que é o veículo sem o sistema de propulsão) é o item mais significativo em oito das dez categorias, sendo que nas outras duas apresenta participação de 48,6% e 49,9%. O ciclo de vida do sistema de propulsão, que inclui inversor, motor, carregador, cabo, conversor e unidade de distribuição de energia é evidentemente o outro processo que é responsável por quase que a totalidade do restante dos impactos. O ciclo de vida da carroceria na base doecoinvent (SWISS..., 2014a) não é específico ao Brasil, de forma que o ideal seria possuir dados específicos para o Brasil para a produção do veículo. Não obstante, como se assume que a produção da carroceria seja bastante similar para os dois tipos de veículo, sendo inclusive comum aos dois tipos de veículo na base doecoinvent (SWISS..., 2014a), a utilização de dados para o Brasil não alteraria significativamente o resultado da comparação entre os dois tipos de veículo, embora possa alterar o resultado dos impactos em termos absolutos.



**Figura 11 – Contribuição dos processos no impacto da produção do VE (considerando o ciclo de vida destes), sem a inclusão da bateria. Legenda – R(vidro): utilização de resíduos de vidro; R(óleo mineral): utilização de resíduos de óleo mineral; R(borracha): utilização de resíduos de borracha.**

Na Figura 12 (a) e (b) é mostrada a contribuição dos processos no impacto total do transporte de 1 pkm por um VCI utilizando etanol e gasolina tipo C, respectivamente. Da mesma forma que o identificado para o VE, a produção do veículo é bastante significativa em várias categorias. Nas três categorias com validade global selecionadas para análise posterior para o ano de 2030 (depleção de recursos abióticos; aquecimento global; depleção da camada de ozônio), no entanto, a produção do etanol e da gasolina tipo C, somando-se a queima desta, são responsáveis pela maior parte do impacto.



## 4.2 RESULTADOS PARA 2030

Os resultados para 2030 mostrando todas as categorias de impacto do método CML 2000 v.2.05 estão ilustrados na Figura 13 para os VCIs utilizando diferentes combustíveis, para os dois casos de eficiência considerados, e para os VEs utilizando eletricidade proveniente das seis fontes consideradas. Os resultados da caracterização estão apresentados na Figura 13. O Quadro 21 informa a legenda e descreve os nomes das simulações realizadas, assim como as diferentes fontes de energia e casos considerados. Nos resultados da caracterização, com relação à comparação entre VEs e VCIs não se observa grande diferença em relação ao resultado para 2022, com exceção da categoria de acidificação. Há redução de impactos, principalmente, em função do ganho de eficiência dos VCIs e da redução da bateria dos VEs.

Nome simulação	Significado		
	Tipo	Fonte de energia	Caso de eficiência (ver Quadro 8)
VCI(Ea)	VCI	Etanol	2030 <sup>a</sup>
VCI(Eb)	VCI	Etanol	2030b
VCI(Ga)	VCI	Gasolina tipo C	2030 <sup>a</sup>
VCI(Gb)	VCI	Gasolina tipo C	2030b
VCI(Ma)	VCI	Média Etanol/Gasolina C 2030 (ver Quadro 12)	2030 <sup>a</sup>
VCI(Mb)	VCI	Média Etanol/Gasolina C 2030 (ver Quadro 12)	2030b
VE(B)	VE	Bagaço de cana	-
VE(C)	VE	Carvão	-
VE(GN)	VE	Gás natural – ciclo combinado	-
VE(H)	VE	Hidrelétrica	-
VE(OC)	VE	Óleo Combustível	-
VE(OD)	VE	Óleo Diesel	-

**Quadro 21 – Legenda para as simulações para 2030 descritas no Quadro 23, no Quadro 24, em parte do Quadro 25, na Figura 13 e na Figura 14.**

<sup>a</sup> Mercado consequencial de eletricidade para o Brasil do Ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014b).

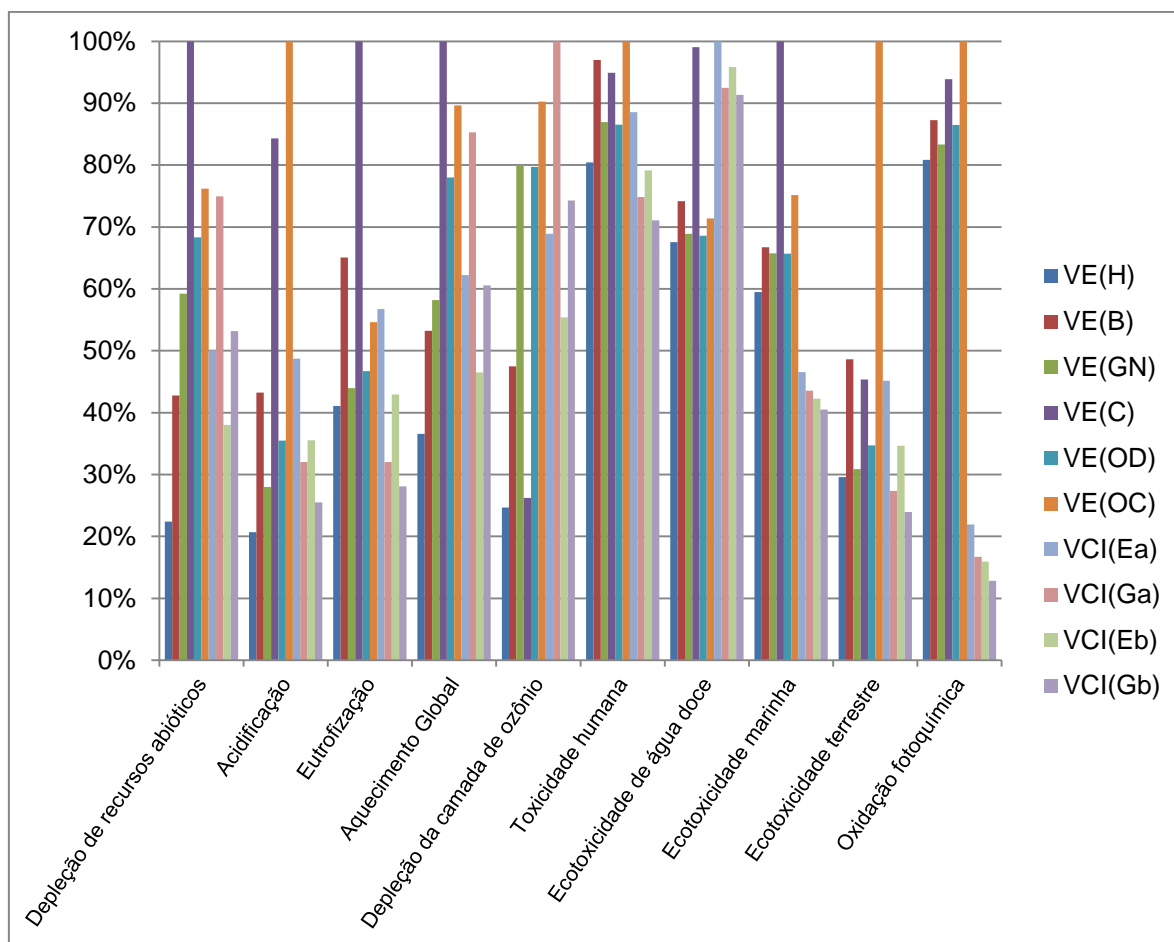


Figura 13 - Resultados para 2030 de caracterização, com todas as categorias de impacto.

#### 4.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE PARA 2022

O Quadro 19 mostra as variações observadas nas análises de sensibilidade realizadas. No Quadro 19, AD: *Abiotic depletion* (depleção de recursos abióticos); ACI: *Acidification* (acidificação); EUT: *Eutrophication* (eutrofização); GWP: *Global Warming Potential* (aquecimento global); OLD: *Ozone Layer Depletion* (depleção da camada de ozônio); HT: *Human Toxicity* (toxicidade humana); FWET: *Fresh Water Aquatic Ecotoxicity* (ecotoxicidade de água doce); MET: *Marine Aquatic Ecotoxicity* (ecotoxicidade marinha); TET: *Terrestrial Ecotoxicity* (ecotoxicidade terrestre); e PO: *Photochemical oxidation* (oxidação fotoquímica).

n <sup>a</sup>	n <sup>b</sup>	Variação para cada categoria de impacto										
		Base	AD	ACID	EUT	GWP	OLD	HT	FWET	MET	TET	PO
0	-											
1	0	13%	3%	3%	11%	-9%	0%	-2%	1%	0%	1%	
2	0	9%	2%	2%	8%	-8%	0%	-2%	1%	0%	1%	
3	0	137%	9%	4%	60%	144%	5%	-2%	7%	-3%	2%	
4	0	-4%	0%	1%	-22%	-20%	3%	18%	4%	-1%	-1%	
5	0	-7%	-1%	-2%	3%	-22%	-2%	-4%	-2%	-7%	-1%	
6	5	0%	0%	0%	-25%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%	
7	5	0%	0%	0%	164%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	
8	5	0%	0%	0%	-27%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%	
9	0	-17%	-6%	-17%	-14%	-13%	-17%	-17%	-17%	-15%	-21%	
10	0	-27%	-9%	-27%	-23%	-20%	-27%	-28%	-27%	-24%	-33%	
11	0	4%	21%	8%	5%	6%	8%	7%	8%	8%	4%	
12	0	13%	68%	25%	14%	16%	25%	22%	27%	27%	14%	
13	0	1%	-64%	5%	-1%	8%	7%	-4%	2%	8%	-12%	
14												
15	14	-14%	-15%	-18%	-13%	-14%	-22%	-23%	-23%	-18%	-24%	
16	14	-22%	-22%	-28%	-21%	-21%	-33%	-35%	-34%	-28%	-38%	
17	14	2%	2%	1%	2%	2%	0%	0%	0%	1%	0%	
18	14	5%	7%	8%	6%	7%	8%	5%	7%	9%	1%	
19	14	4%	113%	7%	4%	2%	8%	12%	12%	11%	11%	
20	14	-31%	-35%	-23%	-19%	-32%	-9%	-5%	-6%	-24%	-4%	
21	20	0%	0%	0%	-26%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%	
22	20	0%	0%	0%	172%	0%	0%	0%	0%	0%	21%	
23	20	0%	0%	0%	-28%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%	
24	14	31%	35%	23%	19%	32%	9%	5%	6%	24%	4%	
25	24	-4%	24%	48%	-3%	9%	70%	13%	0%	834%	231%	
26	(a)	19%	-458%	41%	4%	-2%	28%	17%	38%	100%	-32%	
27	20	-7%	-348%	30%	-9%	-11%	23%	13%	28%	85%	-31%	
28	14	-28%	-343%	0%	-25%	-50%	14%	7%	23%	45%	-35%	
29	-											
30	29	-4%	5%	7%	-3%	-3%	2%	1%	1%	6%	3%	
31	29	4%	-5%	-7%	3%	3%	-2%	-1%	-1%	-6%	-3%	
32	29	-5%	-8%	-12%	-6%	-8%	-19%	-23%	-19%	-12%	-5%	
33	29	-9%	-13%	-20%	-10%	-12%	-30%	-37%	-30%	-20%	-7%	
34	29	-1%	16%	45%	-1%	3%	49%	6%	0%	701%	614%	
35	-											
36	35	-7%	-6%	-8%	-8%	-10%	-17%	-22%	-18%	-9%	-5%	
37	35	-12%	-10%	-13%	-12%	-16%	-27%	-35%	-29%	-14%	-7%	
38	35	-5%	29%	75%	-3%	8%	108%	14%	1%	1232%	1255%	
39	-											
40	39	-5%	-10%	-15%	-6%	-7%	-20%	-24%	-19%	-15%	-6%	
41	39	-8%	-15%	-24%	-9%	-11%	-32%	-38%	-31%	-23%	-8%	
42	39	-1%	8%	24%	0%	1%	23%	3%	0%	363%	291%	
43	-											
44	43	-10%	-9%	-12%	-11%	-13%	-19%	-23%	-20%	-12%	-8%	
45	43	-16%	-15%	-19%	-17%	-21%	-31%	-36%	-32%	-19%	-12%	
46	43	-4%	23%	59%	-3%	6%	70%	8%	1%	945%	1021%	
47	-											
48	47	-7%	-13%	-18%	-8%	-10%	-21%	-24%	-21%	-17%	-10%	
49	47	-11%	-20%	-28%	-13%	-16%	-34%	-38%	-34%	-27%	-14%	
50	47	0%	6%	16%	0%	1%	14%	2%	0%	241%	224%	
51	43	32%	37%	32%	34%	24%	12%	4%	10%	26%	33%	
52	47	41%	25%	14%	41%	35%	5%	1%	8%	10%	25%	

**Quadro 22 - Variação observada nas análises de sensibilidade.**

<sup>a</sup> Número de simulação, conforme Quadro 19.

<sup>b</sup> Variação observada em relação ao número de simulação descrito nesta coluna.



Como não há variação entre os dados utilizados para produção do veículo para 2022 e 2030, as análises de sensibilidade apresentam resultados similares para ambos os anos, em vários casos. Tomando como base os resultados para 2022, entre as diferentes análises de sensibilidade realizadas verificou-se que a vida útil do veículo é significativa para várias categorias de impacto, ocasionando uma redução nos impactos no caso do aumento da vida útil para 250.000 km (em comparação à suposição inicial de 150.000 km) em todas as categorias, tanto para os VEs (decisional ou gás natural) quanto para os VCIs (etanol ou gasolina C). Para os VEs, a menor redução foi observada para acidificação, já que o ciclo de vida da bateria é responsável por grande parte dos impactos desta categoria, e que não assumiu-se um aumento de vida útil da bateria. Da mesma forma, a maior redução foi observada para oxidação fotoquímica, já que a manutenção domina os impactos desta categoria, e assumiu-se, como melhor caso, que haveria uma redução na manutenção por km (i.e. mesma quantidade de manutenção para uma vida útil superior). Para os VCIs, assumindo a mistura média de etanol e gasolina C da frota para 2022, a menor redução foi observada para depleção abiótica (já que o ciclo de vida do etanol/gasolina tipo C é o maior contribuinte para os impactos desta categoria) e a maior redução foi observada para ecotoxicidade de água doce (já que para esta categoria é a produção do veículo, incluindo os processos ao longo do ciclo de vida, que domina os impactos).

O aumento da vida útil beneficia ambos os tipos de veículo. Em função da produção do veículo ser significativa tanto para o VE quanto para o VCI, no caso de o aumento de vida útil ser equivalente para ambos os tipos de veículo, não há variação significativa nos resultados da comparação. Como é o ciclo de vida da carroceria que causa a maior parte dos impactos no total da produção do veículo na maioria das categorias, acredita-se que esta suposição seja válida, já que a carroceria poderia ser bem similar para ambos os veículos. Problemas relacionados a outras partes dos veículos (e.g. parte eletrônica do VE), portanto, poderiam causar um aumento de manutenção (ou reposição) sem alterar significativamente o impacto total do ciclo de vida do veículo para a maioria das categorias. Nota-se, no entanto, que variações poderiam ocorrer para as categorias de ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce e eutrofização, nas quais a produção do sistema de propulsão do VE (berço ao túmulo) causa cerca de metade dos impactos totais da produção do veículo (berço ao túmulo), diferentemente do observado para o VCI.

Com relação aos VEs, o tipo de bateria (lítio ou sódio-níquel-cloro) não causa grandes variações no resultado, com exceção da categoria de acidificação. Isto ocorre porque a produção da bateria de Na-NiCl<sub>2</sub> é bem mais impactante para esta categoria, em função da utilização de níquel. Para esta categoria, a utilização de baterias de Li-ion reduziria o impacto total do transporte de 1 pkm em 64% se comparada à utilização de baterias de Na-NiCl<sub>2</sub>. Já uma autonomia superior pode afetar os resultados de forma significativa dependendo da categoria de impacto analisada. Um aumento para 240 km de autonomia causaria um aumento nos impactos de 4 a 21% para as categorias de depleção de recursos abióticos e acidificação, respectivamente, enquanto que um aumento para 360 km elevaria estes valores para 13 e 68%, respectivamente, para as mesmas categorias. Isto ocorre porque uma autonomia maior requer uma bateria de maior tamanho, que causa tanto maior impacto na sua produção quanto um aumento de consumo do veículo, em função da maior massa da bateria e do respectivo aumento de massa do veículo.

Já, as fontes de eletricidade são significativas. A utilização de gás natural de ciclo combinado resulta em um aumento significativo para as categorias de depleção da camada de ozônio, depleção de recursos abióticos e aquecimento global, conforme apresentado na seção 4.1.

Nas simulações associadas às áreas dos reservatórios, observou-se que pode haver uma mudança significativa na categoria de aquecimento global. A redução das emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> de reservatórios por um fator de aproximadamente 14 acarretou em uma redução nos impactos totais de 25% para esta categoria, enquanto que a soma das emissões à jusante da barragem a esse valor já reduzido resulta em um aumento de 164%. O impacto resultante neste último caso seria 18% superior ao impacto do VCI a gasolina C e similar ao impacto de um VE utilizando termoeletricidade de carvão, apenas cerca de 0,5% inferior, para esta categoria de impacto. A utilização do processo doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) para hidrelétricas a fio d'água para a região "resto do mundo" fornece valores de impacto cerca de 27% inferiores. A utilização deste conjunto de dados, contudo, não reflete totalmente a situação do Brasil, onde há reservatórios, mesmo que pequenos, assumindo a média da capacidade instalada prevista no PDE 2022 (BRASIL, 2013a).

Por fim, para os VCIs observou-se que a utilização do processo de produção da cana com base em Cavalett et al. (2013) resultou em grandes diferenças se comparado ao processo doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a), causando menor impacto em nove categorias. O impacto do VCI a etanol possui variações superiores a +28% no caso da utilização do processo doecoinvent em cinco categorias de impacto, apresentando redução de 5% na categoria de depleção de recursos abióticos, ambos se comparados ao mesmo veículo utilizando o processo com base em Cavalett et al. (2013). Os grandes acréscimos são observados nas categorias de acidificação (+29%), eutrofização (+75%), toxicidade humana (+108%), ecotoxicidade terrestre (+1232%) e oxidação fotoquímica (+1255%). Uma grande diferença observada nos dados, em parte responsável por essas grandes variações, é a utilização de pesticidas diferentes no caso do inventário de Cavalett et al. (2013). Algumas das fontes de dados relacionadas à aplicação de pesticidas utilizadas peloecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) no processo de produção da cana selecionado são mais antigas, podendo contribuir para as diferenças nos inventários (JUNGBLUTH et al., 2007). Observou-se também que, embora possa haver variação entre os impactos da utilização de etanol ou gasolina tipo C, uma variação de +10% ou -10% na participação relativa de qualquer um destes na mistura média utilizada pela frota não é suficiente para causar grande alteração nos resultados.

No que difere das análises de sensibilidade para 2022, para 2030 foi realizada uma análise adicional utilizando a base consequencial doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a). Adaptando-se as quantidades de materiais da mesma forma que para 2022, foram simulados o VE com três tipos de eletricidade: (i) matriz consequencial para o Brasil, doecoinvent; (ii) gás natural de ciclo combinado; e (iii) hidrelétricas. Se comparados aos resultados utilizando a base atribucional, observa-se uma grande diferença para a categorias de acidificação, a qual possui impactos negativos em ambos os casos nesta análise de sensibilidade, e ecotoxicidade terrestre, com variações de +91% para gás natural e +107% para hidro. A matriz consequencial para o Brasil doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014b) é composta majoritariamente de hidrelétricas, de forma que os resultados são similares ao do VE utilizando energia hidrelétrica.

#### 4.4 RESULTADOS PARA 2030: CATEGORIAS DE IMPACTO SELECIONADAS

Conforme discutido no capítulo 3, foram selecionadas três categorias de impacto do método CML 2000 v.2.05 com validade global, que foram utilizadas para fazer uma análise das opções de redução de impactos ambientais no longo prazo (2030). Estas categorias são: (i) depleção de recursos abióticos; (ii) aquecimento global; e (iii) depleção da camada de ozônio. Os resultados destas categorias mostrados no Quadro 23 e na Figura 14 são de caracterização. Além destas categorias, também foi considerado o resultado de inventário de ocupação da terra e a pontuação única do método EDIP 2003 v.1.04. O Quadro 23 mostra os resultados obtidos, em ordem crescente de impactos, para cada uma das categorias analisadas do método CML, com exceção das duas últimas linhas, que apresentam os resultados para o VCI utilizando a proporção média de etanol e gasolina tipo C da frota para os dois casos de eficiência, que estão indicados para efeito de comparação. Nota-se que a fonte de eletricidade dos VEs causa grande variação no resultado final, da mesma forma que o aumento de eficiência dos VCIs. Não obstante, este ganho de eficiência dos VCIs teria que ser ainda maior para que os impactos desses fossem inferiores ao do VE utilizando eletricidade de hidrelétricas. Nota-se, também, que uma recarga da bateria que causasse a utilização de grande parcela de termelétricas tornaria os VEs mais impactantes, já que a utilização de termelétricas de gás natural de ciclo combinado pelos VEs acarreta em impactos maiores que os do VCI a etanol com aumento de eficiência, para as três categorias do método CML 2000 v.2.05.

Foi observado, adicionalmente, que os VEs alimentados com eletricidade proveniente de bagaço de cana consomem menos energia por km (considerando o poder calorífico do etanol em Brasil (2013d)), mas apresentam impactos superiores aos VCIs a etanol. Isto se deve à alocação por critérios econômicos utilizada nos dados do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) e ocorre tanto para as categorias do método CML 2000 v.2.05 quanto para os resultados de inventário de ocupação da terra e do indicador único do método EDIP 2003.

Depleção de Recursos Abióticos <sup>a</sup>			Aquecimento Global <sup>a</sup>			Depleção da Camada de Ozônio <sup>a</sup>					
	1 pkm <sup>b</sup>	10 <sup>6</sup> VE.ano <sup>c</sup>			1 pkm <sup>b</sup>	10 <sup>6</sup> VE.ano <sup>c</sup>			1 pkm <sup>b</sup>	10 <sup>6</sup> VE.ano <sup>c</sup>	
	[kg Sb eq.]	[kg Sb eq.]	[Mt Sb eq.]		[kg CO <sub>2</sub> eq.]	[kg CO <sub>2</sub> eq.]	[Mt CO <sub>2</sub> eq.]		[kg CFC-11 eq.]	[kg CFC-11 eq.]	[t CFC-11 eq.]
VE(H)	3,02E-04	8,43E+06	8,43E-03	VE(H)	6,42E-02	1,79E+09	1,79E+00	VE(H)	2,60E-09	7,26E+01	7,26E-02
VCI(Eb)	5,13E-04	1,43E+07	1,43E-02	VCI(Eb)	8,17E-02	2,28E+09	2,28E+00	VE(C)	2,76E-09	7,71E+01	7,71E-02
VE(B)	5,77E-04	1,61E+07	1,61E-02	VE(B)	9,34E-02	2,61E+09	2,61E+00	VE(B)	5,00E-09	1,40E+02	1,40E-01
VCI(Ea)	6,75E-04	1,89E+07	1,89E-02	VE(GN)	1,02E-01	2,85E+09	2,85E+00	VCI(Eb)	5,83E-09	1,63E+02	1,63E-01
VCI(Gb)	7,17E-04	2,00E+07	2,00E-02	VCI(Gb)	1,06E-01	2,97E+09	2,97E+00	VCI(Ea)	7,26E-09	2,03E+02	2,03E-01
VE(GN)	7,99E-04	2,23E+07	2,23E-02	VCI(Ea)	1,09E-01	3,05E+09	3,05E+00	VCI(Gb)	7,82E-09	2,19E+02	2,19E-01
VE(OD)	9,21E-04	2,57E+07	2,57E-02	VE(OD)	1,37E-01	3,82E+09	3,82E+00	VE(OD)	8,39E-09	2,34E+02	2,34E-01
VCI(Ga)	1,01E-03	2,82E+07	2,82E-02	VCI(Ga)	1,50E-01	4,18E+09	4,18E+00	VE(GN)	8,42E-09	2,35E+02	2,35E-01
VE(OC)	1,03E-03	2,87E+07	2,87E-02	VE(OC)	1,57E-01	4,40E+09	4,40E+00	VE(OC)	9,50E-09	2,65E+02	2,65E-01
VE(C)	1,35E-03	3,77E+07	3,77E-02	VE(C)	1,76E-01	4,90E+09	4,90E+00	VCI(Ga)	1,05E-08	2,94E+02	2,94E-01
VCI(Mb)	6,60E-04	1,84E+07	1,84E-02	VCI(Mb)	9,95E-02	2,78E+09	2,78E+00	VCI(Mb)	7,27E-09	2,03E+02	2,03E-01
VCI(Ma)	9,18E-04	2,56E+07	2,56E-02	VCI(Ma)	1,39E-01	3,87E+09	3,87E+00	VCI(Ma)	9,63E-09	2,69E+02	2,69E-01

**Quadro 23 – Resultados de caracterização para 2030 para as três categorias do método CML selecionadas.**

<sup>a</sup> Categorias de impacto do método CML 2000 v.2.05.

<sup>b</sup> pkm: impacto para 1 pkm.

<sup>c</sup> 10<sup>6</sup> VE.ano: impacto de um milhão de VEs utilizados pelo período de um ano.

O Quadro 24 apresenta os resultados, em ordem crescente de impacto, com exceção das duas últimas linhas, para ocupação da terra (resultado de inventário) e para a pontuação única do método EDIP. Da mesma forma que no Quadro 23, as duas últimas linhas apresentam os resultados para o VCI utilizando a proporção média de etanol e gasolina tipo C da frota para os dois casos de eficiência, indicados para efeito de comparação. Para a ocupação da terra, observa-se que os VEs utilizando termelétricas fósseis apresentam resultados melhores que os VCIs, em função dos últimos possuírem a produção de cana de açúcar no ciclo de vida. Isto é observado também na comparação com a gasolina tipo C, cuja parcela de etanol já é suficiente para causar impactos bastante maiores que estes VEs. No caso das hidrelétricas, embora haja um aumento de área em função dos reservatórios, este é pequeno se comparado à área de plantio de cana. Nota-se também que este resultado é referente a hidrelétricas com reservatórios e que, no

caso da utilização de hidrelétricas a fio d'água ou com reservatórios pequenos, poderia se aproximar dos resultados observados para os VEs utilizando termelétricidade proveniente de fontes fósseis. Uma diminuição da área de reservatórios por um fator de 14, conforme discutido na seção 3.3.3.2.4.2, tornaria os resultados similares aos do VE a gás natural.

Para a pontuação única do método EDIP, os VEs apresentam melhor resultado que os VCIs, com exceção do VE a termelétricidade de carvão, já que o ciclo de vida do motor de combustão interna é responsável por grande parte dos impactos dos VCIs e, evidentemente, os VEs não possuem motor de combustão interna.

Ocupação da Terra <sup>a</sup>				Pontuação única do método EDIP 2003 <sup>b</sup>			
	1 pkm <sup>c</sup>	10 <sup>6</sup> VE.ano <sup>d</sup>			1 pkm <sup>c</sup>	10 <sup>6</sup> VE.ano <sup>d</sup>	
	[m <sup>2</sup> .a]	[m <sup>2</sup> .a]	[Mha.a]		[mPt]	[mPt]	[GPt]
VE(GN)	6,10E-03	1,70E+08	1,70E-02	VE(H)	5,24E-01	1,46E+10	1,46E-02
VE(OC)	6,18E-03	1,73E+08	1,73E-02	VE(GN)	5,81E-01	1,62E+10	1,62E-02
VE(OD)	6,25E-03	1,75E+08	1,75E-02	VE(OD)	6,42E-01	1,79E+10	1,79E-02
VE(C)	6,97E-03	1,95E+08	1,95E-02	VE(B)	6,89E-01	1,93E+10	1,93E-02
VE(H)	1,03E-02	2,88E+08	2,88E-02	VE(OC)	7,38E-01	2,06E+10	2,06E-02
VCI(Gb)	1,50E-02	4,20E+08	4,20E-02	VCI(Gb)	8,00E-01	2,24E+10	2,24E-02
VCI(Ga)	2,04E-02	5,69E+08	5,69E-02	VCI(Eb)	8,55E-01	2,39E+10	2,39E-02
VCI(Eb)	5,23E-02	1,46E+09	1,46E-01	VCI(Ga)	8,67E-01	2,42E+10	2,42E-02
VE(B)	6,19E-02	1,73E+09	1,73E-01	VE(C)	9,07E-01	2,53E+10	2,53E-02
VCI(Ea)	8,24E-02	2,30E+09	2,30E-01	VCI(Ea)	9,59E-01	2,68E+10	2,68E-02
VCI(Mb)	2,53E-02	7,08E+08	7,08E-02	VCI(Mb)	8,16E-01	2,28E+10	2,28E-02
VCI(Ma)	3,75E-02	1,05E+09	1,05E-01	VCI(Ma)	8,92E-01	2,49E+10	2,49E-02

**Quadro 24 – Resultados para 2030 para ocupação da terra (resultados de inventário) e para o método EDIP 2003 (pontuação única).**

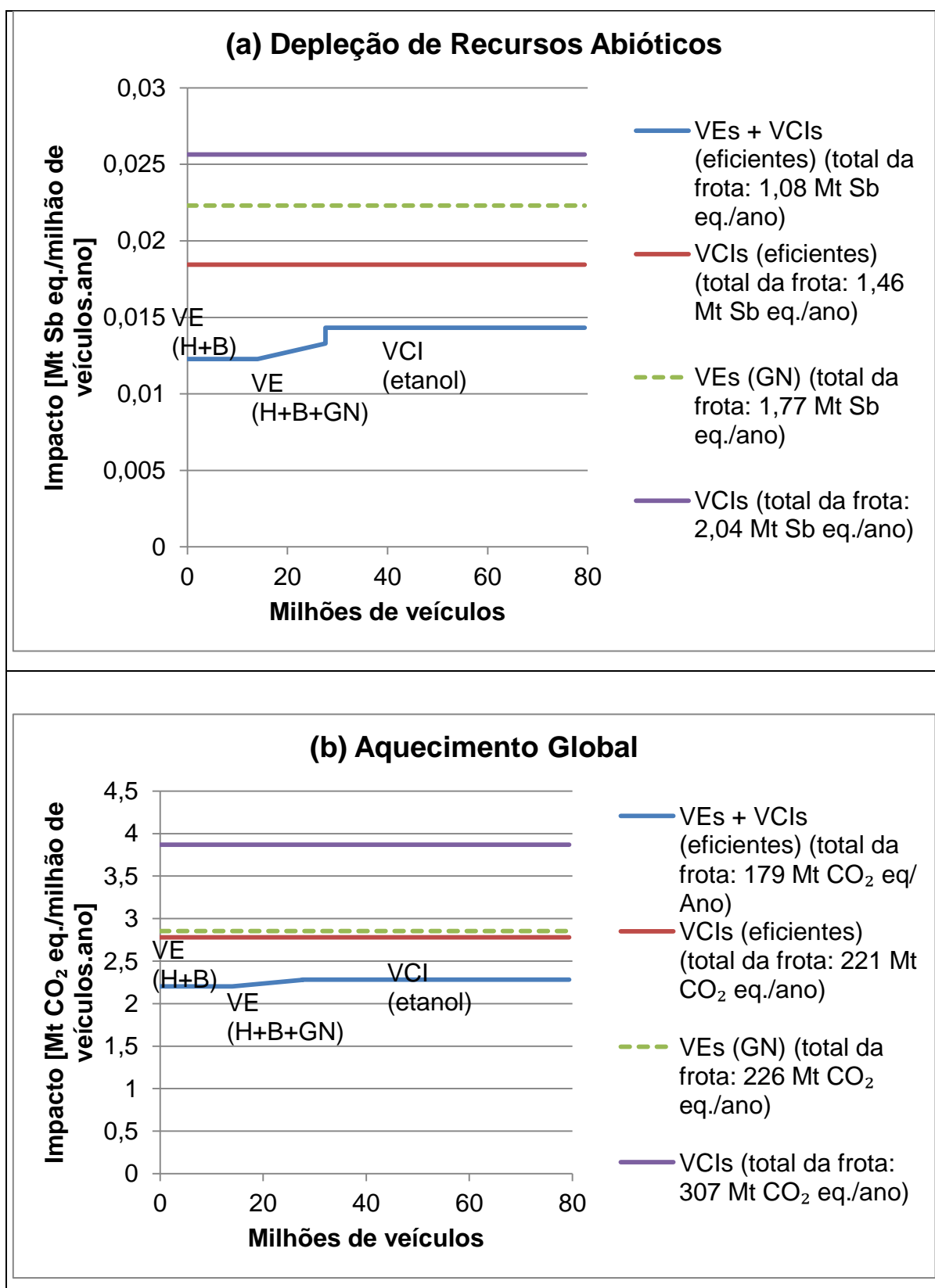
<sup>a</sup> Resultados de inventário para ocupação da terra.

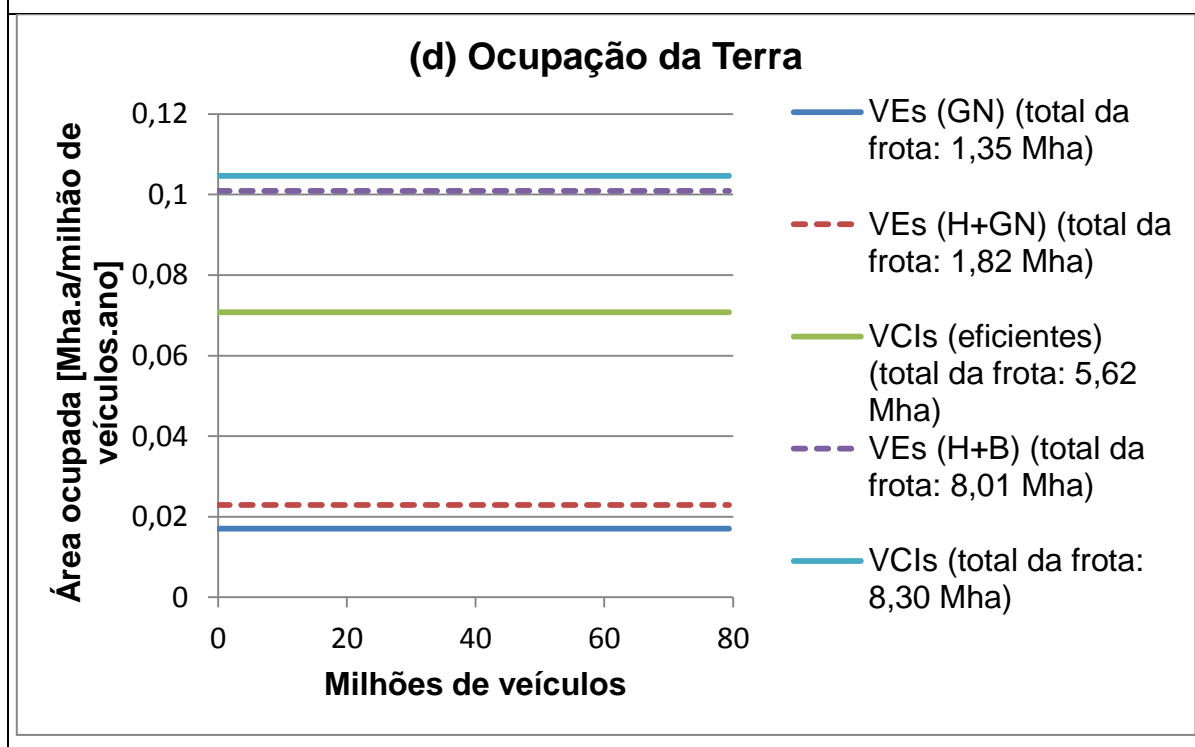
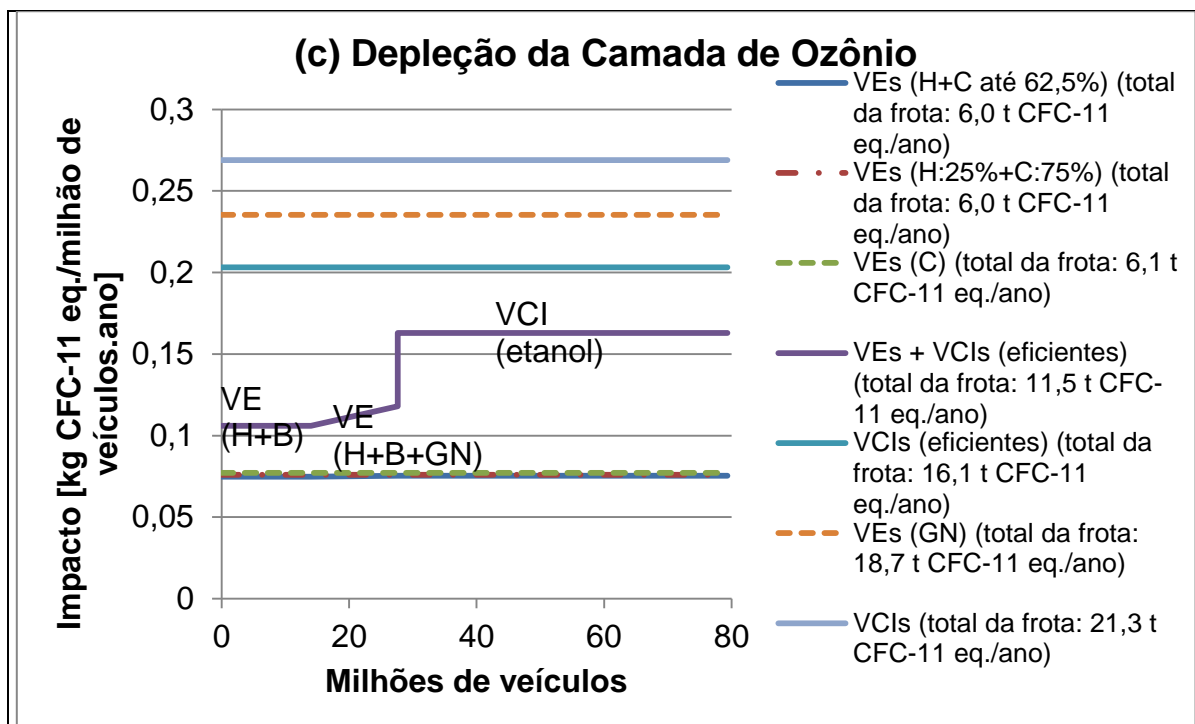
<sup>b</sup> Pontuação única do método de ponto final EDIP 2003 v.1.04, com normalização.

<sup>c</sup> 1 pkm: impacto para 1 pkm

<sup>d</sup> 10<sup>6</sup> VE.ano: impacto de 1 milhão de VEs utilizados pelo período de 1 ano.

Por fim, a Figura 14 apresenta opções de redução de impacto para as categorias analisadas, assim como o total de impactos da frota assumindo-se 100% de veículos novos.







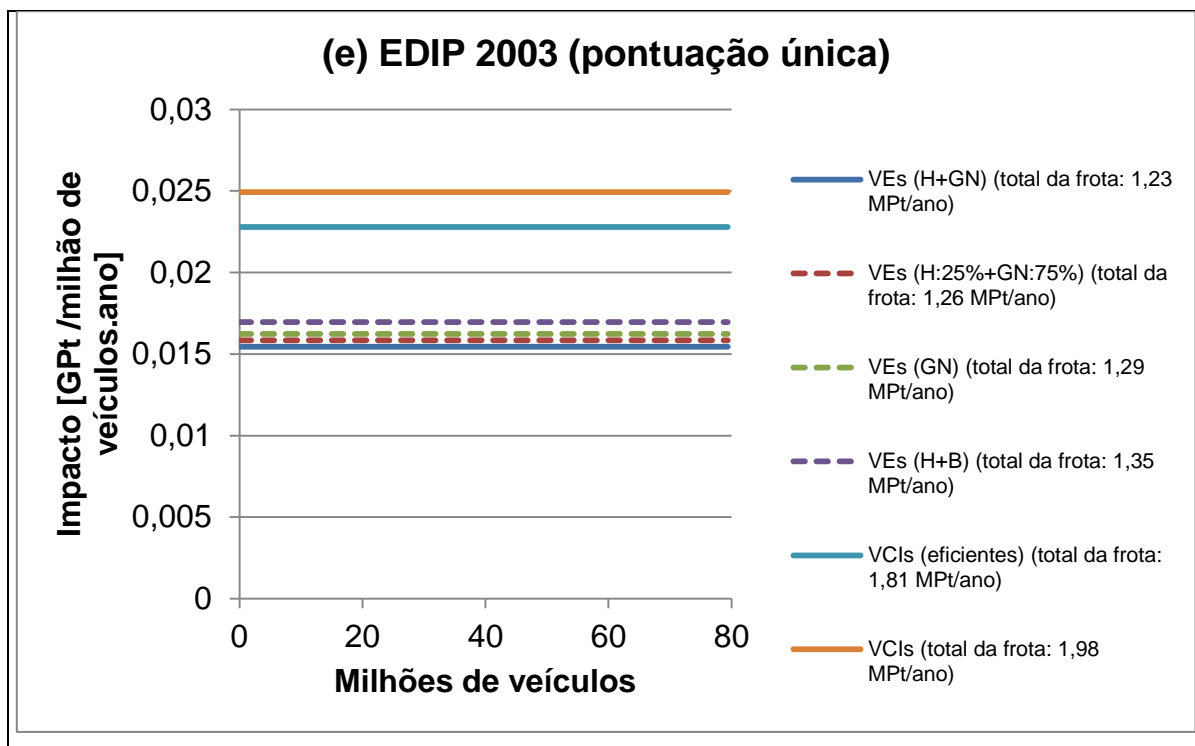


Figura 14 – Resultados para 2030 para (a) Depleção de Recursos Abióticos; (b) Aquecimento Global; (c) Depleção da Camada de Ozônio; (d) Ocupação da Terra (resultado de inventário); e (e) pontuação única do método de ponto final EDIP 2003. Os resultados de (a); (b); e (c) são de caracterização. Para VEs: (H)=hidrelétrica; (B)=bagaço de cana; (GN)=gás natural; (C)=carvão. As linhas VCIs indicam VCIs a etanol e gasolina, proporção média da frota, com eficiência base. As linhas VCIs (eficientes) indicam VCIs a etanol e gasolina, proporção média da frota, com o limite de eficiência considerado. O eixo vertical representa o impacto/resultado (cada figura descreve um tipo de impacto/resultado diferente) por milhão de veículos por ano, enquanto que o eixo horizontal representa o número de veículos. Nas linhas onde há a combinação de mais de um tipo de veículos (e.g. na série VEs + VCIs (eficientes) da figura (c)), há o crescimento do impacto em função do número de veículos, uma vez que opta-se primeiro pelas opções de menor impacto (apresentadas mais à esquerda, mais perto de 0 no eixo horizontal), e, à medida em que são necessários mais veículos, é necessário adotar opções mais impactantes (apresentadas mais à direita no eixo horizontal). No caso exemplificado da figura (c), o degrau que ocorre entre os VEs (H+B+GN) e os VCIs (etanol) é devido à diferença de impactos entre esses, contudo, não é possível adotar mais VEs desse tipo em função da escassez do bagaço de cana. Uma opção nesse caso, por exemplo, seria aumentar os VEs utilizando outro tipo de eletricidade no lugar de bagaço, mas tal opção causaria maior impacto total (já que teria mais impactos que o VE (H+B+GN) e reduziria o número de VCIs (etanol), que por sua vez reduziria o número de VEs (H+B+GN) em função da redução da quantidade de bagaço, assumindo-se que haveria redução na utilização e, conseqüentemente, na produção de etanol).

Nas Figura 14 (a) e (b) nota-se que o menor impacto é obtido mantendo-se mais de metade da frota com VCIs a etanol, embora os elétricos tenham menor impacto quando não há grande penetração de térmicas à base de combustível fóssil. Para depleção de recursos abióticos, o impacto se equivaleria ao do VCI a etanol quando a participação do gás natural chega a cerca de 15% do total, assumindo 50% de participação do bagaço de cana e o restante de hidrelétricas. Para aquecimento global e depleção da camada de ozônio estes valores seriam de 15% e

70%, respectivamente. Como a geração a base de bagaço depende da produção de etanol, assumindo que este etanol será consumido pela frota de automóveis, uma penetração de menor impacto fica em torno de 35% para estas três categorias. No caso de depleção da camada de ozônio um menor impacto seria observado caso fosse utilizada uma combinação de hidrelétricas e carvão, já que VEs utilizando ambas essas fontes causam impactos inferiores para essa categoria, em contraste com as outras duas categorias do método CML, nas quais o VE a carvão é mais impactante que outras opções. A utilização de VEs carregados com termelétricidade de carvão, contudo, é a mais impactante dentre os casos analisados, gerando impactos substancialmente superiores, nas outras duas categorias do método CML analisadas. Desta forma, também é mostrado na Figura 14 (c) o mesmo caso que proporciona grande redução de impacto nas categorias de depleção de recursos abióticos e aquecimento global, com os VEs utilizando uma combinação de hidrelétricas, bagaço e gás natural e com a maior parte da frota sendo de VCI's utilizando etanol. Embora esse caso possua impacto total da frota significativamente superior ao caso dos VEs utilizando termelétricidade de carvão, ou a combinação desta com hidro, este impacto é também significativamente inferior ao impacto da frota com 100% de VCI's utilizando etanol e gasolina na mesma proporção que a esperada para 2022 por Brasil (2013a).

Para o resultado, de inventário, de ocupação da terra (Figura 14 (d)), somou-se todos os tipos de ocupações, fornecidas em  $\text{mm}^2.\text{a}$ , independentemente do tipo de ocupação ou o local onde ocorre (e.g. ocupação para construção de estradas ou por reservatórios de hidrelétricas; ocupação urbana ou de terras aráveis), não aplicando nenhum peso diferente em função do tipo de ocupação. Como já discutido, o VE carregado com eletricidade proveniente de hidrelétricas, gás natural, carvão, óleo diesel ou óleo combustível resulta em menores impactos que os VCI's, já que a utilização de etanol ou gasolina tipo C requer a produção de cana-de-açúcar, que ocupa uma grande área comparativamente com os VEs. O VE utilizando eletricidade proveniente de bagaço de cana possui o mesmo problema. Embora não indicado na Figura 14 (d), a composição da frota com VEs (H+B), VEs (H+B+GN) e VCI's (etanol), da mesma forma que identificado nas Figuras 14 (a), (b) e (c), causaria uma ocupação de cerca de 10,3 Mha. Isto seria superior até a uma frota de 100% de VCI's considerando o consumo médio de etanol e gasolina tipo C.

Para o indicador único do método EDIP (Figura 14 (e)), também foi verificado que o VE carregado com eletricidade proveniente de hidrelétricas, gás natural, óleo diesel ou óleo combustível resulta em menores impactos que os VCIs. Em comparação com a ocupação da terra, a exceção é o VE a carvão, que apresenta resultados piores que os VCIs com maior eficiência (2030b) e que o VCI a gasolina tipo C, mesmo com menor eficiência (2030a). Conforme já discutido, isto se deve ao impacto da produção do motor de combustão interna dos VCIs. Neste caso, a substituição de 100% da frota causaria grande redução de impactos, mesmo que fossem utilizadas termelétricas a base de óleo ou gás natural para suprir a frota de VEs. Nota-se, contudo, que embora a pontuação única facilite a tomada de decisão, de acordo com a NBR ISO 14040 “não existe base científica para a redução dos resultados de ACV a uma única nota ou número, uma vez que a ponderação requer escolha de valores” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, p. 17).

#### 4.5 DISCUSSÃO

As variações em relação aos casos base para 2022 e 2030 estão representadas no Quadro 26 e no Quadro 27, respectivamente. Os números das simulações nestes quadros são os mesmos que os utilizados no Quadro 19, com exceção dos descritos no Quadro 25. Foram adaptadas algumas simulações descritas no Quadro 19 de forma a facilitar a comparação dos resultados. Como exemplo, as simulações 6, 7, 8, 21, 22 e 23 do Quadro 19 tratavam da geração hidrelétrica, e assumia-se que os VEs utilizavam energia hidrelétrica. Essas simulações, agora descritas como 6b, 7b, 8b, 21b, 22b e 23b no Quadro 25, foram adaptadas para os VEs utilizando a matriz decisional, que por sua vez é composta, em parte, por hidrelétricas, que por sua vez são variadas em análise de sensibilidade da mesma forma que nas respectivas simulações do Quadro 19. O motivo para a adaptação foi a comparação de resultados, já que, no Quadro 26 e no Quadro 27, as variações dessas simulações são indicadas em relação ao caso base, que é um VE utilizando a matriz decisional. Deste modo, a influência das emissões dos reservatórios de hidrelétricas no ciclo de vida do caso base (VE utilizando a

matriz adicional) pode ser identificada, ao invés da influência das emissões dos reservatórios de hidrelétricas no ciclo de vida de um VE utilizando energia hidrelétrica.

n rem. <sup>a</sup>	n adic. <sup>b</sup>	Comentário
-	0b	Similar à simulação n: 0, mas com o VE utilizando a matriz decisional (utilizou-se produção de cana original do ecoinvent na produção de termoelectricidade de bagaço de cana, que tem participação na matriz decisional).
4	4b	Similar à simulação n: 4, mas considerando eólicas apenas para cerca de 0,4% <sup>c</sup> da frota, sendo a decisional utilizada para o restante dos VEs (9,6% da frota - considerando uma penetração de 10% de VEs).
6	6b	Similar à simulação n: 6, mas com o VE utilizando a matriz decisional (alterou-se a geração hidrelétrica, da mesma forma que em n: 6, que tem participação na matriz decisional).
7	7b	Similar à simulação n: 7, mas com o VE utilizando a matriz decisional (alterou-se a geração hidrelétrica, da mesma forma que em n: 7, que tem participação na matriz decisional).
8	8b	Similar à simulação n: 8, mas com o VE utilizando a matriz decisional (alterou-se a geração hidrelétrica, da mesma forma que em n: 8, que tem participação na matriz decisional).
21	21b	Similar à simulação n: 21, mas com o VE utilizando a matriz decisional (alterou-se a geração hidrelétrica, da mesma forma que em n: 21, que tem participação na matriz decisional).
22	22b	Similar à simulação n: 22, mas com o VE utilizando a matriz decisional (alterou-se a geração hidrelétrica, da mesma forma que em n: 22, que tem participação na matriz decisional).
23	23b	Similar à simulação n: 23, mas com o VE utilizando a matriz decisional (alterou-se a geração hidrelétrica, da mesma forma que em n: 23, que tem participação na matriz decisional).
25	25b	Similar à simulação n: 25, mas com o VE utilizando 50% hidro e 50% bagaço de cana (utilizou-se produção de cana original do ecoinvent na produção de termoelectricidade de bagaço de cana, que tem participação na matriz decisional).
-	53	VE(GN)
-	54	VE(C)
-	55	VE(OD)
-	56	VE(OC)

**Quadro 25 – Simulações alteradas consideradas no Quadro 26 e no Quadro 27.**

<sup>a</sup> n rem. significa n removido, e corresponde às simulações do Quadro 19 removidas.

<sup>b</sup> n adic. significa n adicionado, e corresponde às simulações adicionadas.

<sup>c</sup> com base no valor de eletricidade eólica excedente observado por Borba, Szklo e Schaeffer (2012) – ver seção 3.3.4.2.4.2.

No Quadro 26 e no Quadro 27, AD: *Abiotic depletion* (depleção de recursos abióticos); ACI: *Acidification* (acidificação); EUT: *Eutrophication* (eutrofização); GWP: *Global Warming Potential* (aquecimento global); OLD: *Ozone Layer Depletion* (depleção da camada de ozônio); HT: *Human Toxicity* (toxicidade humana); FWET: *Fresh Water Aquatic Ecotoxicity* (ecotoxicidade de água doce); MET: *Marine Aquatic Ecotoxicity* (ecotoxicidade marinha); TET: *Terrestrial Ecotoxicity* (ecotoxicidade terrestre); e PO: *Photochemical oxidation* (oxidação fotoquímica).

AD		ACID.		EUT.		GWP		OLD		HT		FWET		MET		TET		PO	
n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.
10	-27%	13	-64%	41	-50%	10	-23%	5	-22%	41	-47%	41	-32%	41	-59%	41	-46%	41	-83%
9	-17%	41	-61%	40	-44%	8b	-20%	10	-20%	33	-43%	33	-29%	33	-58%	40	-40%	40	-83%
5	-7%	40	-59%	33	-35%	6b	-18%	9	-13%	40	-38%	10	-28%	37	-55%	33	-33%	39	-82%
8b	0%	33	-55%	39	-34%	9	-14%	1	-9%	32	-33%	37	-22%	40	-52%	39	-30%	33	-82%
4b	0%	39	-54%	32	-29%	13	-1%	2	-8%	37	-32%	9	-17%	32	-51%	32	-27%	32	-81%
0b	0%	32	-52%	10	-27%	4b	-1%	4b	-1%	10	-27%	40	-16%	36	-48%	10	-24%	31	-81%
6b	0%	42	-51%	31	-25%	0b	0%	8b	0%	36	-23%	32	-14%	39	-41%	31	-21%	29	-80%
7b	0%	31	-50%	29	-20%	0	0%	6b	0%	39	-22%	36	-7%	42	-41%	29	-16%	30	-80%
0	0	29	-48%	42	-18%	5	3%	7b	0%	31	-19%	5	-4%	31	-40%	9	-15%	37	-78%
13	1%	30	-45%	9	-17%	11	5%	0	0%	29	-18%	13	-4%	29	-39%	30	-12%	36	-77%
11	4%	34	-39%	30	-14%	2	8%	0b	0%	9	-17%	3	-2%	34	-39%	5	-7%	35	-76%
2	9%	37	-37%	5	-2%	1	11%	11	6%	30	-16%	1	-2%	30	-39%	3	-3%	10	-33%
1	13%	36	-34%	8b	0%	12	14%	13	8%	35	-7%	2	-2%	35	-36%	1	0%	42	-29%
12	13%	35	-30%	6b	0%	37	46%	12	16%	42	-4%	8b	0%	38	-36%	2	0%	9	-21%
37	73%	38	-10%	7b	0%	36	54%	37	73%	5	-2%	6b	0%	10	-27%	8b	0%	13	-12%
36	82%	10	-9%	0	0%	3	60%	36	85%	8b	0%	7b	0%	9	-17%	4b	0%	5	-1%
38	87%	9	-6%	4b	0%	38	61%	35	106%	6b	0%	0	0%	5	-2%	6b	0%	8b	-1%
35	96%	5	-1%	0b	1%	35	66%	38	124%	7b	0%	0b	0%	8b	0%	7b	0%	6b	0%
3	137%	8b	0%	2	2%	33	92%	33	142%	0	0%	4b	1%	6b	0%	0	0%	4b	0%
33	146%	4b	0%	1	3%	32	99%	3	144%	4b	0%	11	7%	7b	0%	37	2%	0	0%
32	154%	0	0%	37	3%	30	106%	32	155%	2	0%	39	9%	0	0%	36	8%	2	1%
30	159%	6b	0%	3	4%	41	109%	30	166%	1	0%	31	11%	0b	0%	13	8%	1	1%
34	165%	7b	0%	13	5%	34	110%	41	168%	0b	2%	29	12%	4b	0%	11	8%	3	2%
29	169%	0b	0%	11	8%	29	112%	29	175%	3	5%	42	12%	2	1%	35	18%	11	4%
41	173%	2	2%	36	9%	40	117%	40	181%	13	7%	30	13%	1	1%	0b	23%	0b	5%
31	179%	1	3%	34	16%	31	118%	34	182%	11	8%	34	19%	13	2%	12	27%	7b	13%
40	182%	3	9%	35	19%	7b	122%	31	185%	34	23%	35	19%	3	7%	42	226%	12	14%
42	195%	11	21%	12	25%	42	128%	39	202%	12	25%	12	22%	11	8%	34	570%	34	42%
39	196%	12	68%	38	108%	39	129%	42	205%	38	94%	38	35%	12	27%	38	1474%	38	226%

Quadro 26 – Variação em relação ao caso base (n: 0) para 2022. Legenda – amarelo: VEs; azul: VCIs; cinza: n: 0.

AD		ACID.		EUT.		GWP		OLD		HT		FWET		MET		TET		PO	
n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.	n	var.
20	-31%	28	-343%	49	-62%	28	-25%	28	-50%	49	-47%	16	-35%	49	-57%	49	-55%	49	-87%
28	-28%	26	-332%	48	-56%	16	-21%	26	-33%	45	-38%	15	-23%	45	-55%	48	-49%	48	-86%
16	-22%	27	-318%	47	-47%	20	-19%	20	-32%	48	-37%	49	-20%	48	-49%	47	-39%	47	-85%
26	-19%	49	-36%	52	-40%	26	-16%	54	-27%	16	-33%	45	-14%	44	-47%	52	-30%	45	-83%
15	-14%	20	-35%	50	-39%	45	-14%	16	-21%	44	-28%	20	-5%	47	-36%	45	-28%	44	-83%
25b	-3%	48	-30%	45	-34%	15	-13%	15	-14%	15	-22%	55	-3%	50	-36%	16	-28%	43	-81%
45	-2%	16	-22%	44	-29%	23b	-12%	23b	0%	47	-20%	53	-3%	16	-34%	20	-24%	52	-80%
23b	0%	47	-20%	16	-28%	21b	-11%	21b	0%	52	-16%	48	-2%	43	-33%	44	-22%	51	-74%
21b	0%	50	-16%	20	-23%	44	-7%	22b	0%	43	-11%	23b	0%	46	-33%	53	-21%	50	-51%
22b	0%	15	-15%	43	-19%	25b	-2%	14	0%	20	-9%	21b	0%	52	-31%	15	-18%	16	-38%
14	0%	53	-12%	15	-18%	14	0%	17	2%	50	-9%	22b	0%	51	-26%	43	-11%	28	-35%
17	2%	45	-5%	53	-17%	46	1%	19	2%	55	-2%	14	0%	15	-23%	55	-11%	26	-34%
19	4%	23b	0%	55	-12%	17	2%	25b	6%	53	-2%	17	0%	20	-6%	23b	0%	27	-32%
44	5%	14	0%	23b	0%	43	4%	18	7%	51	0%	56	1%	23b	0%	14	0%	15	-24%
18	5%	21b	0%	14	0%	19	4%	45	22%	23b	0%	44	4%	14	0%	21b	0%	20	-4%
46	12%	22b	0%	21b	0%	18	6%	24	32%	21b	0%	24	5%	21b	0%	22b	0%	53	-1%
43	17%	52	0%	22b	0%	49	17%	44	34%	22b	0%	18	5%	22b	0%	17	1%	23b	0%
24	31%	44	1%	28	0%	27	18%	43	54%	14	0%	25b	7%	25b	0%	18	9%	21b	0%
49	44%	17	2%	17	1%	24	19%	46	63%	17	0%	28	7%	17	0%	19	11%	14	0%
48	51%	18	7%	56	3%	48	24%	49	74%	54	7%	27	10%	55	4%	51	16%	17	0%
51	54%	55	11%	51	7%	53	30%	48	86%	18	8%	26	12%	53	4%	54	16%	18	1%
50	62%	43	11%	19	7%	50	34%	51	91%	19	8%	19	12%	24	6%	24	24%	55	3%
47	63%	25b	16%	18	8%	47	35%	27	98%	24	9%	47	29%	18	7%	28	48%	24	4%
27	69%	24	35%	27	8%	51	39%	47	106%	56	13%	52	31%	19	12%	27	51%	22b	10%
53	82%	46	37%	26	10%	22b	70%	50	108%	28	14%	50	31%	56	19%	26	56%	19	11%
55	110%	51	53%	24	23%	55	74%	55	121%	26	16%	43	35%	28	23%	50	109%	54	12%
52	130%	19	113%	46	28%	52	90%	53	122%	27	21%	54	40%	26	30%	56	156%	56	19%
56	134%	54	164%	25b	29%	56	100%	56	150%	25b	39%	51	41%	27	33%	25b	519%	46	113%
54	207%	56	213%	54	88%	54	123%	52	177%	46	51%	46	47%	54	58%	46	826%	25b	120%

Quadro 27 – Variação em relação ao VE utilizando eletricidade com participação de 50% de hidrelétricas e 50% de bagaço de cana (n: 14), para 2030. Legenda – amarelo: VEs; azul: VCIs; cinza: n: 0

Nos resultados obtidos mostrou-se que a adoção de VEs pode ser benéfica para algumas categorias de impacto, mas causar o inverso em outras categorias. Para o ano de 2022, cujos resultados estão indicados no Quadro 26, o VE base apresenta melhor impactos que qualquer VCI em acidificação, aquecimento global e depleção da camada de ozônio. Para o mesmo ano, no entanto, muitos VCIs apresentam resultados melhores que os VEs para as categorias de acidificação, eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, e oxidação fotoquímica. Os raros VEs que proporcionam redução em relação ao caso base, ainda que a redução não seja tão grande e não chegue a torná-los melhores que os VCIs de menor impacto para estas categorias, são os VEs com maior vida útil (sendo que, neste caso, como também há VCIs com maior vida útil, estes acabam por apresentar impactos menores). A exceção é a categoria de acidificação, para a qual o VE com bateria de lítio apresenta o melhor resultado. Isto ocorre porque a maior parte dos impactos é decorrente do ciclo de vida do níquel utilizado nas baterias de Na-NiCl<sub>2</sub>. Como opções, portanto, para redução dos impactos para esta categoria, que podem inclusive tornar o VE melhor, apontam-se (i) a utilização de baterias de lítio; (ii) o aumento da densidade energética ou da vida útil da bateria, acarretando em menor massa necessária; (iii) a redução no uso de níquel; ou (iv) a utilização de níquel reciclado (possivelmente), total ou parcialmente, sendo necessário neste caso avaliar os impactos da reciclagem para definir se realmente há redução nos impactos e em que proporção.

Para a categoria de oxidação fotoquímica, o processo doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) referente à manutenção do veículo (não incluindo troca da bateria) causa grande parte dos impactos, em função da emissão de eteno que consta neste conjunto de dados. Nota-se que o processo não é específico da região brasileira, já que nem sequer existe grande penetração de VEs na frota, de forma que seria possível averiguar a possibilidade de redução de tais emissões a fim de tornar o VE melhor que o VCI neste caso.

Para as categorias de ecotoxicidade marinha, eutrofização, e, em menor grau, ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana, um processo que contribui por grande parte dos impactos é o tratamento de resíduos sulfídricos. Inclui-se também nestas categorias o ciclo de vida do cobre, que é em parte responsável por este tratamento e também causa outros impactos nestas categorias. Embora este também exista nos VCIs, a quantidade de dispositivos eletrônicos e placas de

circuito impresso no VE é maior, de forma que há mais tratamento destes resíduos e mais impactos decorrentes da utilização de cobre. Deste modo, para estas categorias a solução envolveria uma coleta de dados para verificar se a situação se confirma utilizando dados brasileiros e, em caso afirmativo, buscar alternativas de gerenciamento destes resíduos.

Para ecotoxicidade terrestre, o ciclo de vida do cobre é responsável por grande parte dos impactos, de forma que seria necessária uma redução no uso deste metal, buscando materiais alternativos.

Com relação às categorias nas quais o VE base apresenta-se melhor que qualquer VCI para 2022 (depleção de recursos abióticos; aquecimento global; e depleção da camada de ozônio), observou-se que há alguns fatores que podem alterar os resultados. Para as três categorias, a utilização de termelétricidade de gás natural de ciclo combinado alteraria significativamente o resultado, apresentando impactos bastante maiores. Isto poderia ocorrer no caso da bateria ser recarregada em horário de pico, gerando a utilização de termelétricas fósseis, já que a diferenciação na tarifa residencial ainda é opcional (ANEEL, 2014). Deste modo, políticas que estimulem a recarga da bateria em horários nos quais seja possível atender com fontes de menor impacto (como hidrelétricas) poderiam contribuir para evitar tal situação.

No caso específico do aquecimento global, há uma grande variação nos impactos totais em função da grande variação observada nos valores de emissões de hidrelétricas, conforme discutido na seção 3.3.4.2.4.2. A redução das emissões em função de menor área causa uma variação de -18% em relação ao caso base, similar à variação (-20% em relação ao caso base) observada quando utiliza-se um conjunto de dados doecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a) referente a hidrelétricas a fio d'água. Não obstante, a adição a estas emissões reduzidas das emissões a jusante da barragem, tendo como base o estudo para Balbina de Kemenes, Forsberg e Melack (2011), causa um aumento de 122% em relação ao caso base. Neste caso, seriam necessários estudos a respeito das novas usinas que estão sendo projetadas que incluam estas emissões a jusante da barragem para estabelecer quais valores são os mais apropriados.

Com relação aos resultados para 2030, são observados resultados similares aos de 2022. As exceções são a categoria de acidificação, já que considerou-se bateria de lítio como caso padrão e o ganho de eficiência considerado para os VCIs,



que causa redução dos impactos destes. Foram realizadas, também, simulações com a utilização da base consequencial doecoinvent (SWISS..., 2014b), que resultaram em grande variação (impacto negativo, ou seja, benefício) nas categorias de acidificação e toxicidade terrestre, embora não tenha sido possível verificar a origem deste benefício.

Como foram consideradas outras fontes de energia, no entanto, como eletricidade de carvão, óleo combustível ou óleo diesel (n: 54, 55 e 56, respectivamente, no Quadro 27) fica mais evidente o grande impacto que a fonte de energia tem nos resultados. No caso do óleo diesel, observa-se variação superior a 99% em cinco categorias de impacto.

Com relação às análises de sensibilidade, observou-se que um dos principais fatores que poderia alterar os resultados é a vida útil do veículo, já que, em várias categorias, grande parte dos impactos estão associados a processos dentro da fase de produção deste. Desta forma, os resultados poderiam ser alterados caso o VE não tivesse a mesma vida útil do VCI. Embora haja diferenças entre os veículos, no entanto, no caso de não alteração na vida útil em função de tais diferenças, a diferença nos resultados poderia ser reduzida. Não obstante, uma política pública para reduzir os impactos ambientais da frota que causasse a substituição antecipada dos VCIs pelos VEs também poderia ter efeito adverso. Este resultado é semelhante ao resultado de um estudo que já avaliou o aumento de eficiência de VCIs nos Estados Unidos e concluiu que, para otimizar a frota no que diz respeito a emissões de CO<sub>2</sub> e consumo total de energia, os veículos poderiam chegar a rodar mais de 300.000 km antes de serem trocados, variando de acordo com a quilometragem média anual (KIM et al., 2003). Já os resultados dos autores para otimização com objetivo de reduzir outros tipos de emissões, no entanto, indicavam trocas frequentes, em alguns casos com vida útil de apenas dois a quatro anos, como no caso ótimo para redução de emissões de CO e distância média anual percorrida de 24.000 milhas. Estes resultados, contudo, não foram verificados no presente estudo, já que não foram avaliadas especificamente emissões de CO ou outros tipos de emissões. Não obstante, houve redução em todas as categorias de impacto com o aumento da vida útil do veículo, já que foram considerados apenas veículos novos na frota e que as emissões durante a fase de uso para as quais considerou-se um fator de deterioração não são significativas, prevalecendo a

redução dos impactos na produção do veículo (e os respectivos processos incluídos no ciclo de vida deste).

Nos resultados das categorias de impacto selecionadas para análise posterior para 2030, ilustrados na Figura 14, foi possível observar que, para as três categorias do método CML selecionadas, uma combinação de hidrelétricas e bagaço de cana para o VE, com pequena penetração de termelétricas, apresenta grande potencial de redução de impactos, mesmo considerando um grande aumento de eficiência dos VCIs. Uma opção de atendimento para a qual se notou um grande potencial de redução de impactos ficou em torno de 35%. A maior parte da frota, no entanto, continuaria sendo de VCIs, para que houvesse geração de bagaço de cana suficiente para suprir os VEs. Uma substituição total da frota que causasse grande geração termelétrica poderia causar inclusive mais impacto do que uma frota de 100% de VCIs, sem qualquer substituição.

Em contrapartida, a utilização de etanol para abastecer grande parte da frota, em conjunto com termelétricidade de bagaço de cana, causaria grande ocupação de terra. Uma penetração de cerca de 35% de VEs atendidos com hidro e bagaço e com participação limitada de gás natural, com o restante da frota sendo de VCIs a etanol, conforme a curva “VEs + VCIs (eficientes)” da Figura 14 (b), causaria uma ocupação de 10,3 Mha considerando o caso 2030b para os VCIs a etanol. Este valor é 25% superior ao esperado para a frota no caso 2030a e 84% superior ao esperado para a frota no caso 2030b, considerando a utilização média de etanol e gasolina C esperada para 2030, em ambos os casos. Como a ocupação de terra é evidentemente limitada, seria necessária uma análise mais abrangente para determinar se existem outras opções de ocupação com maior benefício ambiental, não necessariamente no setor de transportes. Já para a pontuação única do método EDIP 2003 v.1.04, uma penetração de 100% de VEs na frota causaria menos impactos, uma vez que mesmo a utilização de termelétricas na recarga do VE, excluindo carvão, causaria menor impacto que o melhor (menos impactante) VCI. Embora o caso 2030b cause redução dos impactos se comparado ao 2030a, não é o suficiente para tornar os VCIs menos impactantes se comparados aos VEs, com a exceção dos VEs utilizando eletricidade gerada a partir de carvão.

Nota-se, contudo, que os impactos foram calculados com base em um veículo e multiplicados pelo total da frota, de forma que os resultados obtidos devem ser considerados tendo em vista as incertezas associadas a esta suposição.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho realizado possibilitou apresentar configurações da frota de automóveis brasileira com potencial de redução de impactos ambientais. Foi também realizada uma ACV comparativa de VEs e VCIs para o contexto brasileiro. Dois horizontes de tempo foram considerados, 2022 e 2030, sendo que para 2022 adotou-se a abordagem decisional de ICV, em função do menor número de VEs que seria possível atingir neste horizonte, enquanto para 2030 identificou-se que seria possível maior penetração, o que tornaria necessária uma abordagem consequencial. Só foram, no entanto, consideradas tais abordagens no que diz respeito às fontes energéticas, sendo que, idealmente, havendo disponibilidade, as abordagens deveriam ser utilizadas em todos os processos ao longo do ciclo de vida. Deste modo, a aplicação da abordagem selecionada apenas às fontes de energia constitui limitação do estudo. Não obstante, a fonte de energia, elemento bastante significativo na comparação de VEs e VCIs, foi considerada conforme a abordagem selecionada. No que diz respeito à ACV comparativa e às configurações da frota, além da questão da abordagem de ICV, a falta de dados mais detalhados a respeito do perfil de uso e de curvas de sucateamento resultou na suposição de uma frota composta apenas de veículos novos. Isto também contribui para as limitações do estudo, e poderia ser tratado em trabalhos futuros.

Para o médio prazo (2022) não foi considerada possível uma grande penetração de VEs na frota, e uma pequena penetração de VEs proporcionou resultados variando em função da categoria de impacto analisada: redução de impacto em algumas categorias e aumento de impacto em outras. No entanto, para as categorias de impacto globais, como é o caso de depleção de recursos abióticos, aquecimento global e depleção da camada de ozônio, verifica-se um menor impacto associado aos VEs. Isto, contudo, pressupõe que os VEs sejam carregados no período noturno, já que a recarga da bateria em horário de pico poderia causar a utilização de termelétricas, o que tornaria estes veículos piores que os VCIs em algumas ou todas estas categorias, dependendo da fonte de eletricidade utilizada pelo VE e do combustível utilizado pelo VCI. Desta forma, seriam necessários incentivos para garantir que a recarga ocorresse no período de baixa demanda. Observou-se também que, apesar dos resultados variarem dependendo da

categoria, a origem dos impactos está associada em vários casos aos resíduos sulfídricos que ocorrem em maior quantidade no ciclo de vida do VE. Embora os dados do tratamento destes resíduos não sejam para o Brasil, um avanço tecnológico que cause a redução do uso de eletrônicos poderia reduzir os impactos e tornar os VEs melhores, ao menos na grande maioria das categorias de impacto. Outra opção seria estudar outras maneiras de gerenciar este tipo de resíduo.

Para o longo prazo (2030), horizonte de tempo que permite grande penetração de VEs na frota, foram analisadas mais especificamente três categorias de impacto globais do método de ponto médio CML 2000 v.2.05, além dos resultados de inventário para ocupação da terra e dos resultados de pontuação única do método de ponto final EDIP 2003 v.1.04. Embora existam diferenças entre os resultados obtidos individualmente para cada indicador ou categoria, estes mostraram que para uma penetração de VEs na frota em torno de 35% os impactos são menores em quatro dos cinco indicadores analisados: nas três categorias do método CML e na pontuação única do método EDIP, em comparação a uma frota de 100% de VCIs consumindo a estimativa de proporção média de etanol hidratado e gasolina tipo C utilizada pela frota. Os impactos mostraram-se aproximadamente 19% a 29% menores do que os impactos para uma frota de 100% de VCIs com grande ganho de eficiência (caso 2030b) e aproximadamente 32% a 47% menores do que os impactos para uma frota de 100% de VCIs com pequeno ganho de eficiência (caso 2030a), dependendo do indicador considerado, sendo ambas as frotas de VCIs considerando a estimativa de proporção média de etanol e gasolina C utilizada pela frota. Estes resultados assumem uma recarga da bateria no período noturno utilizando eletricidade proveniente de hidrelétricas e bagaço de cana, com pequena penetração de termelétricas a gás natural, com o restante da frota de VCIs a etanol. Em contrapartida, para o resultado de inventário de ocupação da terra, tal configuração da frota aumentaria a área ocupada estimada da frota em 84%, se comparada à mesma frota de 100% de VCIs com grande ganho de eficiência (caso 2030b) ou em 25% se comparada à mesma frota de 100% de VCIs com pequeno ganho de eficiência (caso 2030a). Nota-se que esta frota de 100% de VCIs utilizada para efeito de comparação corresponde à frota no cenário base adaptado das informações de Brasil (2013a), adicionalmente assumindo-se o caso de pequeno aumento de eficiência dos VCIs, mantendo-se o ganho anual de 0,7% (Brasil, 2013a, p. 54), caso 2030a, ou de grande ganho de eficiência, de 50% em l/km de 2005 a

2030 com base em Global Fuel Economy Initiative [2009?], caso 2030b. Como a área é evidentemente limitada, haveria que se estudar as diferentes possibilidades de uso, a fim de se determinar as melhores opções de ocupação. Estas poderiam incluir tanto outras alternativas do setor de transportes (e.g. biodiesel para transporte de cargas) quanto alternativas de outros setores da economia, a fim de se estudar qual a ocupação da terra que possui maior potencial de redução de impactos. Ressalta-se, também, que os resultados de inventário utilizados não constituem método de AICV e não incorporam fatores de caracterização para os diferentes usos, ou a transformação do uso. Esta questão é bastante complexa e deveria ser avaliada não somente para os biocombustíveis, mas também para os combustíveis fósseis (GORISSEN et al., 2010).

Os resultados mostram que há um indicativo de que os VEs poderiam ser alvo de políticas públicas incentivando sua adoção para redução de impactos ambientais, ainda que um desenvolvimento de métodos de AICV específicos para o Brasil seja necessário para contabilizar com menor incerteza o resultado para outras categorias de impacto, adicionalmente às três analisadas com mais detalhe para 2030. Os resultados obtidos mostram-se úteis no âmbito do planejamento energético, uma vez que foi identificado que a maneira de atendimento à demanda adicional dos VEs pode alterar os resultados, sendo necessário incluí-los no planejamento de forma a evitar que termelétricas fósseis sejam utilizadas para carregar os VEs, o que causaria um efeito adverso ao planejado (resultando em impactos ambientais maiores dos VEs, se comparados aos VCIs). Considera-se que os resultados obtidos são, também, úteis no contexto do PIR, já que, apesar do presente trabalho ter tratado apenas de impactos ambientais, poderiam ser levados em conta, em trabalhos futuros, aspectos econômicos e sociais por meio de realização de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida. Não obstante, os resultados obtidos no presente trabalho permitem auxiliar na tomada de decisão a fim de minimizar ou reduzir os impactos ambientais, podendo ser levados em conta vários impactos, e, ainda que não tenham sido considerados aspectos econômicos, as fontes de energia do lado da oferta analisadas para os VEs são aquelas já presentes na matriz brasileira e para as quais identificou-se que haveriam reservas/potenciais disponíveis no futuro (para o ano de projeção: 2030), de forma que acredita-se que seriam economicamente viáveis. Neste caso, a viabilidade

econômica dependeria apenas da viabilidade de produção dos VEs, que já estão sendo adotados em outros países.

Em função das muitas incertezas associadas a previsões de longo prazo, além de outras incertezas associadas ao estudo, os resultados apresentados não devem ser entendidos como definitivos, e podem ser aprimorados em estudos futuros. Entre as incertezas do estudo incluem-se a simplificação na identificação das fontes de energia; a utilização de parâmetros médios para o setor de transportes, em parte relativos apenas a veículos novos; a definição da tecnologia marginal apenas para o caso da eletricidade; a não consideração de outras tecnologias de veículo, tal como a utilização de etanol de segunda e terceira geração; e a utilização de dados de inventário do presente ou passado para estimar as condições futuras. Estas poderiam ser tratadas em trabalhos futuros, incluindo também o desenvolvimento de métodos de AICV específicos para o Brasil e a definição das categorias de impacto mais relevantes no contexto brasileiro. Nota-se, também, que o objetivo deste estudo não é realizar um planejamento detalhado do sistema elétrico, de forma que uma análise detalhada também poderia ser realizada em estudos futuros. Por fim, o presente estudo trata apenas de automóveis, de forma que outras partes do setor de transportes e outros setores da economia poderiam ser incluídos a fim de que houvesse um planejamento buscando a diminuição de impactos ambientais associados a outras atividades.

## REFERÊNCIAS

AMOR, Mourad B. et al. Implications of integrating electricity supply dynamics into life cycle assessment: A case study of renewable distributed generation. **Renewable Energy**, v. 69, p. 410-419, set. 2014.

ANEEL. **Modalidade tarifária branca oferecerá tarifas diferentes dependendo do horário.** Disponível em: <[www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=7646&id\\_area=90](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=7646&id_area=90)>. Acesso em: 20 de janeiro de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:** Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044:** Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

BANDIVADEKAR, Anup. et al. **On the road in 2035:** Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions. Report No. LFEE 2008-05 RP. Cambridge, Massachusetts (Estados Unidos): Massachusetts Institute of Technology, 2008. 196p. Disponível em: <[http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/otr2035/On%20the%20Road%20in%202035\\_MIT\\_July%202008.pdf](http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/otr2035/On%20the%20Road%20in%202035_MIT_July%202008.pdf)>. Accessed in: August 30th, 2012.

BARAN, Renato; LEGEY, Luiz .F. L. The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 80, n. 5, p. 907-917, jun. 2013.

BARROS, Nathan et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. **Nature Geoscience**, v. 4, n. 9, p. 593-596, set. 2011.

BAUER, Christian et al. **Wasserkraft.** In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-VIII. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf (Suíça), 2007. 114 p.

BAUER, Christian. **Electricity markets in different system models of the ecoinvent v3 database.** Ecoinvent v3 talk page info: electricity markets. Sine loco, [2013?]. 2 p.

BJÖRKLUND, Anna. Life cycle assessment as an analytical tool in strategic environmental assessment. Lessons learned from a case study on municipal energy planning in Sweden. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 32, n. 1, p. 82-87, jan. 2012.

BORBA, Bruno S. M. C.; SZKLO, Alexandre, SCHAEFFER, Roberto. Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable energy in power systems: The case of wind generation in the northeastern Brazil. **Energy**, v. 37, n. 1, p. 469-481, jan. 2012.

BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, colaboração Empresa de Pesquisa Energética, 2007a. 324 p. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/pne\\_2030/PlanoNacionalDeEnergia2030.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/pne_2030/PlanoNacionalDeEnergia2030.pdf)>. Acesso em: 09 de abril de 2014.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Energia 2030**: v.3 Geração hidrelétrica. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, colaboração Empresa de Pesquisa Energética, 2007b. 210p. Disponível em: < [http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_3.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_3.pdf)>. Acesso em: 16 de janeiro de 2013.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Energia 2030**: v.9. Geração de energia elétrica a partir de outras fontes. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, colaboração Empresa de Pesquisa Energética, 2007c. 223p. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_9.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_9.pdf)>. Acesso em: 09 de abril de 2014.

\_\_\_\_\_. **Resenha Energética Brasileira**: Exercício de 2009 (Preliminar); março de 2010. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2010. 26 p.

\_\_\_\_\_. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**: Relatório Final. Ministério do Meio Ambiente, 2011a. 114p. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_publicacao/163\\_publicacao27072011055200.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf)>. Acesso em: 28 de dezembro de 2012.

\_\_\_\_\_. Portaria No. 595, de 22 de dezembro de 2011. **Diário Oficial da União**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão/Gabinete do Ministro. Número 247, 26 de dezembro de 2011. Seção 1 p. 312. 2011b. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=312&data=26/12/2011>>. Acesso em: 28 de julho de 2014.



\_\_\_\_\_. **Resenha Energética Brasileira:** Exercício de 2010 (Preliminar); maio de 2011. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2011c. 28 p.

\_\_\_\_\_. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2012a. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2013/PDE2021.pdf>>. Acesso em: 11 de março de 2014.

\_\_\_\_\_. **Resenha Energética Brasileira:** Exercício de 2011, Resultados Preliminares – Edição de Julho de 2012. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2012b. 26 p. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/3\\_-\\_Resenha\\_Energetica/1\\_-\\_Resenha\\_Energetica.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/3_-_Resenha_Energetica/1_-_Resenha_Energetica.pdf)>. Acesso em: 06 de dezembro de 2012.

\_\_\_\_\_. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2013a. 410 p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2014/PDE2022.pdf>>. Acesso em: 06 de março de 2014.

\_\_\_\_\_. **Resenha Energética Brasileira:** Exercício de 2012, Edição de 29 de maio de 2013. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2013b. 26 p. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/3\\_-\\_Resenha\\_Energetica/1\\_-\\_Resenha\\_Energetica.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/3_-_Resenha_Energetica/1_-_Resenha_Energetica.pdf)>. Acesso em: 11 de março de 2014.

\_\_\_\_\_. **Gestão da Comercialização de Energia – Leilões de Energia.** Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Energia Elétrica, Departamento de Gestão do Setor Elétrico, 2013c. 7 p. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Quadro\\_Leiloes\\_Boletim\\_Tarifario\\_11-12.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Quadro_Leiloes_Boletim_Tarifario_11-12.pdf)>. Acesso em: 04 de janeiro de 2013.

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional 2013:** Ano base 2012. Rio de Janeiro, Empresa de Pesquisa Energética, 2013d. 283p. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2\\_-\\_BEN\\_-\\_Ano\\_Base/1\\_-\\_BEN\\_Portugues\\_-\\_Inglxs\\_-\\_Completo.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf)>. Acesso em: 25 de abril de 2014.

CALIFORNIA Standard Practice Manual : **Economic Analysis of Demand-Side Programs and Projects.** Sine loco, 2001. 34p. Disponível em:<[http://www.energy.ca.gov/greenbuilding/documents/background/07-J\\_CPUC\\_STANDARD\\_PRACTICE\\_MANUAL.PDF](http://www.energy.ca.gov/greenbuilding/documents/background/07-J_CPUC_STANDARD_PRACTICE_MANUAL.PDF)>. Acesso em: 10 de junho de 2011.

CARVALHO, Cláudio E. et al. Introducción a la evaluación de costos y ciclo de vida como herramienta de la planificación integrada de recursos. **Información Tecnológica**, La Serena-Chile, v.13, n. 1, p. 161-169, 2002.

CAVALETT, Otávio. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647-658, mar. 2013.

CHOMA, Ernani; UGAYA, Cássia M. L. 2014a. Environmental Impact Assessment of Increasing Electric Vehicles in the Brazilian Fleet. Artigo submetido.

CHOMA, Ernani; UGAYA, Cássia M. L. 2014b. Avaliação de impactos ambientais da oferta e demanda de energia para automóveis no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 9., 2014, Florianópolis. **Anais Eletrônicos...** SBPE, 2014. 1 CD-ROM.

CURRAN, Mary Ann; MANN, Margaret; NORRIS, Gregory. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 8, p. 853-862, jun. 2005.

DE KLEINE, Robert D.; KEOLEIAN, Gregory A.; KELLY, Jarod C. Optimal replacement of residential air conditioning equipment to minimize energy, greenhouse gas emissions, and consumer cost in the US. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3144-3153, jun. 2011.

DE LUCENA, Andre F. P.; SCHAEFFER, Roberto; SZKLO, Alexandre S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 342-350, mai. 2010.

DIAS, Marcos V. X. et al. The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System. **Energy Policy**, v. 65, p. 298-304, fev. 2014.

DO AMARANTE, Odilon .A.C. et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, DF, 2001. 44p. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 04 janeiro de 2013.

DOS SANTOS, Marco A. et al. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. **Energy Policy**, v. 34, n. 4, p. 481-488, mar. 2006.

EARLES, J. M.; HALOG, Anthony. Consequential life cycle assessment: a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 5, p. 445-453, jun. 2011.

EKVALL, Tomas; WEIDEMA, Bo .P. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 3, p. 161-171, mai. 2004.

EKVALL, Tomas; ANDRÆ, Anders S. G. Attributional and Consequential Environmental Assessment of the Shift to Lead-Free Solders. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 5, p. 344-353, set. 2006.

ELETRONBRAS. **Plano Anual de Operação dos Sistemas Isolados para 2013**. 133p. Sine loco, 2012. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/107/documento/plano\\_anual\\_de\\_operacao\\_2013\\_19nov2012.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/107/documento/plano_anual_de_operacao_2013_19nov2012.pdf)>. Acesso em: 11 de março de 2014.

EUROPEAN COMMISSION. , 2010. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment**, First Edition. European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. Sine loco: European Comission, 2010. 115 p. Disponível em: <<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/2014/01/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>>. Acesso em: 30 de julho de 2014.

\_\_\_\_\_. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context**. European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. Luxemburg: Publication Office of the European Union, 2011. 159 p. Disponível em: <<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/26229>>. Acesso em: 23 de maio de 2014.

FEARNSIDE, Philip M. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí dam) and the energy policy implications. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 133, n. 1-4, p. 69-96, 2002.

FEARNSIDE, Philip M., PUEYO, Salvador. Greenhouse-gas emissions from tropical dams. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 4, p. 382-384, jun. 2012.

FIAT. **Palio Weekend elétrico participa da 1ª expedição brasileira com um carro 100% elétrico.** Disponível em: <<http://www.fiat.com.br/mundo-fiat/novidades/6194/FIAT+PALIO+WEEKEND+ELETRICO+PARTICIPA+DA+1+EXPEDICAO+BRASILEIRA+COM+UM+CARRO+100+ELETRICO>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2012.

FRISCHKNECHT, Rolf. **Life Cycle Inventory Analysis For Decision-Making: Scope-dependent Inventory System Models and Context-Specific Joint Product Allocation.** 1998. 280 f. Tese (para o título de “Doctor of Technical Sciences”) - Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, 1998. Disponível em: <<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:41089/eth-41089-02.pdf>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2013.

\_\_\_\_\_. **Modelling of product systems in life cycle inventory analysis: Synopsis of Attributional and Consequential LCI Models – Properties and Differences.** 2007. Disponível em: <[http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/webdav/site/lca/groups/allPersonsActive/public/Projektberichte/NetLZD-Methodik\\_S05\\_v04\\_2007.pdf](http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/webdav/site/lca/groups/allPersonsActive/public/Projektberichte/NetLZD-Methodik_S05_v04_2007.pdf)>. Acesso em: 23 de janeiro de 2013.

FRISCHKNECHT, Rolf et al. **Overview and Methodology.** ecoinvent report No. 1. Dübendorf (Suíça): Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007. Disponível em: <[http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/01\\_OverviewAndMethodology.pdf](http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/01_OverviewAndMethodology.pdf)>. Acesso em: 28 de julho de 2014.

FRISCHKNECHT, Rolf; STUCKI, Matthias. Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n.8, p. 806-816, set. 2010.

GERSSSEN-GONDELACH, Sarah J.; FAAIJ, André P. C. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. **Journal of Power Sources**, v. 212, n. 15, p. 111-129, ago. 2012.

GLOBAL FUEL ECONOMY INITIATIVE. **50 by 50, Global Fuel Economy Initiative: Making Cars 50% More Fuel Efficient by 2050 Worldwide.** Sine loco, [2009?]. 18p. Disponível em: <[http://www.fiafoundation.org/publications/Documents/50BY50\\_report.pdf](http://www.fiafoundation.org/publications/Documents/50BY50_report.pdf)>. Acesso em: 23 de maio de 2014.

GORISSEN, Leen et al. Why the Debate about Land Use Change Should Not Only Focus on Biofuels. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 11, p. 4046-4049, jun. 2010.

HAWKINS, Troy R.; GAUSEN, Ola M.; STRØMANN, Anders H. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles – a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 8, p. 997-1014, set. 2012.

HAWKINS, Troy R. et al. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 1, p. 53-64, fev. 2013.

HEEREN, Niko et al. A component based bottom-up building stock model for comprehensive environmental impact assessment and target control. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 45-56, abr. 2013.

HEIJUNGS, Reinout; SUH, Sangwon. **The Computational Structure of Life Cycle Assessment**. Países Baixos: Kluwer Academic Publishers, 2002.

ITAIPU BINACIONAL. **Veículo Elétrico**: Itaipu Binacional | KWO Grimselstrom. Sine loco, 2010. 16p.

\_\_\_\_\_. **Veículo Elétrico**. Disponível em: < [www.itaipu.gov.br/ve](http://www.itaipu.gov.br/ve)>. Acesso em: 27 de agosto de 2012.

\_\_\_\_\_. **Geração**. Disponível em: < [www.itaipu.gov.br/energia/geracao](http://www.itaipu.gov.br/energia/geracao) >. Acesso em: 06 de março de 2014. 2014a

\_\_\_\_\_. **Reservatório**. Disponível em: < [www.itaipu.gov.br/energia/reservatorio](http://www.itaipu.gov.br/energia/reservatorio) >. Acesso em: 06 de março de 2014. 2014b.

JANNUZZI, Gilberto de M.; SWISHER, Joel N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos**: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis. Campinas: Autores Associados, 1997.

JI, Shuguang et al. Electric Vehicles in China: Emission and Health Impacts. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 4, p. 2018-2024, fev. 2012.

JUNGBLUTH, Niels. et al. **Life Cycle Inventories of Bioenergy**:ecoinvent report No. 17. Dübendorf (Suíça): Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007. 755 p.

KALHAMMER, Fritz R. et al. **Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology**: Report of the ARB Independent Expert Panel 2007. Prepared for State of California Air Resources Board, Sacramento, California, 2007. 207 p. Disponível em: < [http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev\\_panel\\_report.pdf](http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf)>. Acesso em: 22 de dezembro de 2012.

KEMENES, Alexandre; FORSBERG, Bruce R.; MELACK, John M. Methane release below a tropical hydroelectric dam. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 12, número do artigo L12809, jun. 2007.

KEMENES, Alexandre; FORSBERG, Bruce R.; MELACK, John M. CO<sub>2</sub> emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. 3, número do artigo G03004, 2011.

KIM, Hyung C.; KEOLEIAN, Gregory A.; HORIE, Yuhta A. Optimal household refrigerator replacement policy for life cycle energy, greenhouse gas emissions, and cost. **Energy Policy**, v. 34, n. 15, p. 2310-2323, out. 2006.

KIM, Hyung C. et al. Life Cycle Optimization of Automobile Replacement: Model and Application. **Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 23, p. 5407-5413, dez. 2013.

LUND, Henrik et al. Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 3, p. 260-271, mar. 2010.

MATHIESEN, Brian V.; MUNSTER, Marie; FRUERGAARD, Thilde. Uncertainties related to the identification of the marginal energy technology in consequential life cycle assessments. **Journal Of Cleaner Production**, v. 17, n. 15, p. 1331-1338, out. 2009.

MIRAKYAN, Atom; DE GUIO, Roland. Integrated energy planning in cities and territories: a review of methods and tools. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 289-297, jun. 2013.

NATHEER, Othman; DOUGHERTY, William W.; VON HIPPEL, David. Environmental benefits of energy efficiency and renewable energy in Saudi Arabia's electric sector. **Energy Policy**, v. 34, n. 1, p. 2-10, jan. 2006. Corrigendum acerca da lista de

autores: **Energy Policy**, v. 35, n. 12, p. 6557, dez. 2007. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.07.004.

ONS. **Plano da Operação Energética 2013/2017, PEN 2013**: Volume I – Condições de Atendimento. Rio de Janeiro, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2013. 137p. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/download/avaliacao\\_condicao/operacao\\_energetica/PEN%2013%20-%20Vol%201%20-%20Condi%C3%A7%C3%B5es%20de%20Atendimento.pdf](http://www.ons.org.br/download/avaliacao_condicao/operacao_energetica/PEN%2013%20-%20Vol%201%20-%20Condi%C3%A7%C3%B5es%20de%20Atendimento.pdf)>. Acesso em: 23 de maio de 2014.

\_\_\_\_\_. **Dados da curva de carga, por hora, para o período de 01 de janeiro de 2012 a 31 de dezembro de 2012**. ONS, 2014.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA. **Gasolina**. Disponível em: <[http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/gasolina!/ut/p/c4/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N\\_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ4MgQ\\_2CbEdFAGTIIink!/?PC\\_7\\_9O1ONKG10GSIC025HDRRAB10F400000\\_WCM\\_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/gasolina/duvidas+frequentes+gasolinas+petrobras#3](http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/gasolina!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ4MgQ_2CbEdFAGTIIink!/?PC_7_9O1ONKG10GSIC025HDRRAB10F400000_WCM_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/gasolina/duvidas+frequentes+gasolinas+petrobras#3)>. Acesso em: 22 de dezembro de 2012.

PIETRAPERIOSA, Filomena et al. Life Cycle Assessment, External and Comprehensive Analysis for an integrated evaluation of the environmental impact of anthropogenic activities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1039-1048, jun. 2009.

PRÉ CONSULTANTS. **SIMAPRO versão 8.0.2**. PRé-Consultants, 2014. Países Baixos.

RÖDER, Alexander. **Integration of Life-Cycle Assessment and Energy Planning Models for the Evaluation of Car Powertrains and Fuels**. 2001. 198 f. Tese (para o título de “Doctor of Natural Sciences”) - Swiss Institute of Technology, Zürich, 2001. Disponível em: <<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:24367/eth-24367-02.pdf>>. Acesso em: 28 de julho de 2014.

ROWAN, N.; HECOX, E.; MOREA, S. A 2050 vision for Colorado's water supply future. **Water Practice and Technology**, v. 7, n. 4, 2012.

SADEGHI, Mehdi; HOSSEINI, Hossein M. Integrated energy planning for transportation sector – A case study for Iran with techno-economic approach. **Energy Policy**, v. 36, n. 2, p. 850-866, fev. 2008.

SAMARAS, Constantine; MEISTERLING, Kyle. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-In Hybrid Vehicles: Implications for Policy. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 9, p. 3170-3176, mai. 2008.

SINGH, Bhawna; STRØMANN, Anders H. Environmental assessment of electrification of road transport in Norway: Scenarios and impacts. **Transportation Research Part D**, v. 25, p. 106-111, dez. 2013.

SPALDING-FECHER, Randall; MATIBE, David K. Electricity and externalities in South Africa. **Energy Policy**, v. 31, n. 8, p. 721-734, jun. 2003.

SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES. **Ecoinvent Unit Process Database v.3.01 – allocation, default**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2014a.

\_\_\_\_\_. **Ecoinvent Unit Process Database v.3.01 – consequential**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2014b.

UGAYA, Cássia M. L.; WALTER, Arnaldo C. S. Life Cycle Inventory Analysis – A Case Study of Steel Used in Brazilian Automobiles. **The international journal of life cycle assessment**, v. 9, n. 6, p. 365-370, nov. 2004.

UGAYA, Cássia M. L. **Planejamento integrado de recursos energéticos: uma aplicação da modelagem na Região Administrativa de Campinas**. 1996. 190 f. Dissertação (mestrado, para o título “Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos”) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials**, A report of the Working Group on the Environmental Impacts of Products and Materials to the International Panel for Sustainable Resource Management. Hertwich, E., van der Voet, E., Suh, S., Tukker, A., Huijbregts M., Kazmierczyk, P., Lenzen, M., McNeely, J., Moriguchi, Y. Sine loco, 2010. 112 p. Disponível em: < [http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1262xPA-PriorityProductsAndMaterials\\_Report.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1262xPA-PriorityProductsAndMaterials_Report.pdf) >. Acesso em: 03 de novembro de 2014.

VAN DAM, S. S.; BAKKER, C. A.; BUITER, J. C. Do home energy management systems make sense? Assessing their overall lifecycle impact. **Energy Policy**, v. 63, p. 398-407, dez. 2013.



VAN DEN BOSSCHE, Peter et al. SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. **Journal of Power Sources**, v. 162, n. 2, p. 913-919, nov. 2006.

VENKATESH, G.; BRATTEBØ, Helge. Studying the demand-side vis-à-vis the supply side of urban water systems – case study of Oslo, Norway. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 35, n. 18, set. 2014.

WARREN, Peter. A review of demand-side management policy in the UK. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 941-951, jan. 2014.

WEIDEMA, Bo P.; FREES, Niels; NIELSEN, Anne-Merete. Marginal Production Technologies for Life Cycle Inventories. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 4, n. 1, p. 48-56, jan. 1999.

WEIDEMA, Bo P. **Market Information in Life Cycle Assessment**. Copenhagen (Dinamarca): Danish Environmental Protection Agency (Environmental Project no. 863), 2003. 147p. Disponível em: < <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2003/87-7972-991-6/pdf/87-7972-992-4.pdf>>. Acesso em: 31 de agosto de 2012.

WEIDEMA, Bo Pedersen; EKVALL, Tomas; HEIJUNGS, Reinout. **Guidelines for application of deepened and broadened LCA**: Deliverable D18 of work package 5 of the CALCAS project. Sine loco, 2009. 49p. Disponível em: <<http://www.lca-net.com/publications/>>. Acesso em: 30 de agosto de 2012.

WEIDEMA, Bo P. et al. **Overview and Methodology**. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent centre, 2013. 169 p. Disponível em: < [http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/Data\\_Quality\\_Guidelines/01\\_Data\\_QualityGuideline\\_v3\\_Final.pdf](http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/Data_Quality_Guidelines/01_Data_QualityGuideline_v3_Final.pdf)>. Acesso em: 28 de julho de 2014.

YAN, Xiaoyu, CROOKES, Roy J. Energy demand and emissions from road transportation vehicles in China. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 6, p. 651-676, dez. 2010.

ZAMAGNI, Alessandra et al. Lights and shadows in consequential LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 7, p. 904-918, ago. 2012.

APÊNDICE A – Processos do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a; 2014b) utilizados e adaptados.

O Quadro A.1 descreve processos do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a; 2014b) utilizados.

Item	Processo utilizado	Comentário
<b>1. Processos do ecoinvent v.3.01 atribucional (SWISS..., 2014a) utilizados</b>		
Item	Processo utilizado	Comentário
<b>1.1. Processos de transporte utilizados como base</b>		
Transporte, VE	Transport, passenger car, electric {GLO}  processing   Alloc Def, U*	*adaptado para: quantidade de bateria, quantidade de veículo, consumo de eletricidade. No caso da análise de sensibilidade com relação à vida útil, alterou-se também a quantidade de manutenção.
		Ao longo deste ciclo de vida, foram adaptados os processos referentes à bateria, inversor, carregador, unidade de distribuição de energia, conversor e motor elétrico
Transporte (VCI)	Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 {RoW}  transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5   Alloc Def, U*	*adaptado para: emissões durante a fase de uso, combustível e quantidade de combustível, quantidade de veículo. No caso da análise de sensibilidade com relação à vida útil, alterou-se também a quantidade de manutenção.
		Ao longo deste ciclo de vida, foram adaptados os processos referentes ao motor de combustão interna, à carroceria, e à manutenção
<b>1.2. Para os seguintes processos (1.2.1 e 1.2.2), foram alterados só as fontes de energia. Para eletricidade, considerou-se a matriz decisional (+ perdas), enquanto que para calor considerou-se a mesma tecnologia mas utilizou-se o processo para a região para RoW (resto do mundo).</b>		
<b>1.2.1 VE</b>		
Carroceria	Glider, passenger car {GLO}  production   Alloc Def, U*	
Inversor	Inverter, for electric passenger car {GLO}  production   Alloc Def, U*	
Carregador	Charger, electric passenger car {GLO}  charger production, for electric passenger car   Alloc Def, U*	
Conversor	Converter, for electric passenger car {GLO}  production   Alloc Def, U*	
Unidade de distribuição de energia	Power distribution unit, for electric passenger car {GLO}  production   Alloc Def, U*	
Motor elétrico	Electric motor, electric passenger car {GLO}  electric motor production, vehicle (electric powertrain)   Alloc Def, U*	
Bateria (Na-NiCl)	Battery, NaCl {CH}  battery production, NaCl, rechargeable   Alloc Def, U*	
Bateria (lítio); células	Battery cell, Li-ion {RoW}  production   Alloc Def, U*	
Bateria (lítio)	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO}  production   Alloc Def, U*	
Manutenção	Maintenance, passenger car, electric, without battery {GLO}  processing   Alloc Def,	

	U*	
<b>1.2.2. VCI</b>		
Carroceria	Glider, passenger car {GLO}  production   Alloc Def, U*	
Motor de combustão interna	Internal combustion engine, for passenger car {GLO}  internal combustion engine production, passenger car   Alloc Def, U*	
Manutenção	Passenger car maintenance {RoW}  maintenance, passenger car   Alloc Def, U*	
<b>1.3 Eletricidade</b> (fontes de energia individuais utilizadas na composição das diversas matrizes discutidas no presente trabalho)		
Bagaço de cana	Electricity, high voltage {BR}  ethanol production from sugar cane   Alloc Def, U*	*Adaptou-se a produção da cana de açúcar utilizada ao longo do ciclo de vida, com base em Cavalett et al. (2013). No caso da análise de sensibilidade para a produção de cana utilizando o processo do ecoinvent, esta adaptação evidentemente não foi realizada
Carvão	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, hard coal   Alloc Def, U	
Eólica	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   Alloc Def, U	Proporção destas com base na proporção observada no conjunto de dados Electricity, high voltage {BR}  production mix   Alloc Def, U
	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, wind, >3MW turbine, onshore   Alloc Def, U	
	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Alloc Def, U	
Gás de processo	Electricity, high voltage {BR}  treatment of blast furnace gas, in power plant   Alloc Def, U Electricity, high voltage {BR}  treatment of coal gas, in power plant   Alloc Def, U	Proporção destas com base na proporção observada no conjunto de dados Electricity, high voltage {BR}  production mix   Alloc Def, U
Gás natural (ciclo combinado)	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Alloc Def, U	
Gás natural ("convencional")	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, natural gas, at conventional power plant   Alloc Def, U	Utilizado apenas na matriz atribucional
Hidrelétrica	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, hydro, reservoir, tropical region   Alloc Def, U*	*Adaptou-se a emissão de dióxido de carbono e de metano, no caso das análises de sensibilidade
Nuclear	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, nuclear, pressure water reactor   Alloc Def, U	
Óleo diesel	Electricity, high voltage {BR}  heat and power co-generation, diesel, 200kW electrical, SCR-NOx reduction   Alloc Def, U	
Óleo combustível	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, oil   Alloc Def, U	
<b>1.4 Combustíveis para os VCIs</b>		
Gasolina (tipo A)	Petrol, unleaded {RoW}  market for   Alloc Def, U	
Etanol hidratado	Ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation {BR}  ethanol production from sugar cane   Alloc Def, U*	*Foi adaptado o processo de produção da cana de açúcar ao longo do ciclo de vida (com exceção das análises de sensibilidade que consideram os dados originais do ecoinvent); considerou-se 500 km de transporte
Etanol anidro	Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from fermentation {BR}  dewatering of ethanol from biomass, from 95% to 99.7% solution state   Alloc Def, U*	*Foi adaptado o processo de produção da cana de açúcar ao longo do ciclo de vida (com exceção das análises de sensibilidade que consideram os dados originais do ecoinvent); considerou-se 500 km de transporte
Cana de açúcar	Inventário com base em Cavalett et al. (2013) Sugarcane {BR}  production, on land recently transformed   Alloc Def, U*	*Os dados de Cavalett et al. (2013) foram tomados como base e adaptados com base em dados deste processo
Cana de açúcar	Sugarcane {BR}  production   Alloc, Def U	Utilizado apenas nas análises de sensibilidade
<b>2. Adaptações realizadas no inventário de Cavalett et al., com base no processo do ecoinvent</b>		

Item em Cavalett et al. (2013)	Processo(s) doecoinvent v.3 (SWISS..., 2014a) utilizado(s)	Comentário
Vinhaça Aplicação vinhaça	Nitrogen fertiliser, as N {GLO}  field application of vinasse, from fermentation of sugarcane   Alloc Def, U Potassium fertiliser, as K2O {GLO}  field application of vinasse, from fermentation of sugarcane   Alloc Def, U Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO}  field application of vinasse, from fermentation of sugarcane   Alloc Def, U Liquid manure spreading, by vacuum tanker {GLO}  market for   Alloc Def, U	Adaptação com base no processo Sugarcane {BR}  production, on land recently transformed   Alloc Def, U e considerando a quantidade de diesel utilizada nos processos de plantio agrícolas (equivalência por consumo de diesel, como utilizado em Jungbluth et al. (2007) para cana de açúcar).
Operações de plantio: -Consumo de diesel -Produção de trator -Produção de colheitadeira -Produção de maquinário agrícola	Tillage, ploughing {GLO}  market for   Alloc Def, U Tillage, harrowing, by spring tine harrow {GLO}  market for   Alloc Def, U Harvesting, by complete harvester, beets {GLO}  market for   Alloc Def, U Application of plant protection product, by field sprayer {GLO}  market for   Alloc Def, U Transport, tractor and trailer, agricultural {GLO}  market for   Alloc Def, U Irrigation {BR}  market for   Alloc Def, U Planting {GLO}  market for   Alloc Def, U Fertilising, by broadcaster {GLO}  market for   Alloc Def, U	Adaptação com base no processo Sugarcane {BR}  production, on land recently transformed   Alloc Def, U e considerando a quantidade de diesel utilizada nos processos de plantio agrícolas (equivalência por consumo de diesel, como utilizado em Jungbluth et al. (2007) para cana de açúcar).
Cloreto de potássio (como K <sub>2</sub> O)	Potassium chloride, as K2O {RoW}  potassium chloride production   Alloc Def, U*	*Adaptado o consumo de eletricidade (para decisional do Brasil + perdas) Obs.: não se considerou o transporte deste até o lugar de utilização por já estar considerado diretamente nos valores de transporte informados por Cavalett et al. (2013)
Superfosfato simples (como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Phosphate fertiliser, as P2O5 {RER}  single superphosphate production   Alloc Def, U	Obs.: não se considerou o transporte deste até o lugar de utilização por já estar considerado diretamente nos valores de transporte informados por Cavalett et al. (2013)
Ureia (como N)	Urea, as N {RoW}  production   Alloc Def, U*	*Adaptado o consumo de eletricidade (para decisional do Brasil + perdas) Obs.: não se considerou o transporte deste até o lugar de utilização por já estar considerado diretamente nos valores de transporte informados por Cavalett et al. (2013)
Calcário	Lime, packed {RoW}  lime production, milled, packed   Alloc Def, U* Limestone, crushed, for mill {RoW}  production   Alloc Def, U* Limestone, unprocessed {GLO}  market for   Alloc Def, U*	*Adaptado o consumo de energia (calor) para região "resto do mundo" Obs.: não se considerou o transporte deste até o lugar de utilização por já estar considerado diretamente nos valores de transporte informados por Cavalett et al. (2013) *Adaptado o consumo de eletricidade (para decisional do Brasil + perdas) e de calor, para região "resto do mundo" Obs.: processo incluído no ciclo de vida do processo Lime, packed {RoW}  lime production, milled, packed   Alloc Def, U* *Adaptado para incluir apenas região "resto do mundo" no processo "Limestone, unprocessed {RoW}  limestone quarry operation   Alloc Def, U" Obs.: processo incluído no ciclo de vida do processo Lime, packed {RoW}  lime production, milled, packed   Alloc Def, U*
Gipsita	Gypsum, mineral {RoW}  gypsum quarry operation   Alloc Def, U*	*Adaptado o consumo de eletricidade (para decisional do Brasil + perdas) e também o transporte, que foi desconsiderado estar considerado diretamente nos valores de transporte informados por Cavalett et al. (2013)
Glyphosate	Glyphosate {GLO}  market for   Alloc Def, U	

Transporte, caminhão 7.5-16t	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   Alloc Def, U	
Transporte, caminhão 16-32t	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   Alloc Def, U	
Transporte, caminhão > 32t	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   Alloc Def, U	
Carbofuran Diuron Inseticidas Herbicidas Outros pesticidas	Pesticide, unspecified {GLO}  market for   Alloc Def, U	
Emissões (ar)	Como descritas em Cavalett et al. (2013), com exceção de emissões de CO <sub>2</sub> da combustão do diesel (já consideradas nas operações de plantio) e de calcário, que não são consideradas no conjunto de dados do ecoinvent. Todas as emissões consideradas para área de baixa densidade populacional	
Emissões (água)	Como descritas em Cavalett et al. (2013), considerando emissões para água de superfície como emissões para rio. As emissões de Imazapic para água de superfície foram consideradas como “Herbicidas, unspecified”	
Emissões (solo)	Como descritas em Cavalett et al. (2013), considerando solo agrícola	
Ocupação e transformação do solo	Adaptadas conforme descrito na seção 3.3.4 (ver Quadro 17)	
<b>3. Processos utilizados na análise de sensibilidade que utilizou a base consequential do ecoinvent (SWISS..., 2014b)</b>		
<b>Item</b>	<b>Processo utilizado</b>	<b>Comentário</b>
<b>3.1. Transporte</b>		
Transporte (VE)	Transport, passenger car, electric {GLO}  processing   Conseq, U*	*Adaptado para quantidade de veículo, de bateria, e consumo de eletricidade
<b>3.2. Eletricidade</b>		
Matriz brasileira	Electricity, high voltage {BR}  market for   Conseq, U	
Hidrelétrica	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, hydro, reservoir, tropical region   Conseq, U	
Gás natural (ciclo combinado)	Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Conseq, U	

**Quadro A.1 – Processos do ecoinvent v.3.01 (SWISS..., 2014a; 2014b) utilizados e adaptados, incluindo descrição das adaptações realizadas.**